

IRSN/FRM-287



# Dynamique et bilans des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens

Cédric MARION

Mars 2010

ISRN/IRSN - 2010/131

Laboratoire d'Etudes Radioécologiques en milieux  
Marins et Continentaux - IRSN La Seyne/mer



Système de management  
de la qualité IRSN certifié



# Thèse de doctorat

présentée par

**Cédric MARION**

pour obtenir le titre de

**Docteur de l'Université de Perpignan Via Domitia**

Spécialité : Sciences de l'Environnement Marin

## **Dynamique et bilans des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens**

soutenue le 12 mars 2010 devant le jury composé de :

M. DURRIEU DE MADRON Xavier, CEFREM, Perpignan	Président du jury
M. LAFITE Robert, UMR CNRS 6143, Rouen	Rapporteur
M. RADAKOVITCH Olivier, CEREGE, Aix-en-Provence	Rapporteur
Mme DELFANTI Roberta, ENEA, La Spezia (Italie)	Examinatrice
Mme CHARMASSON Sabine, IRSN, La Seyne-sur-Mer	Codirectrice de thèse
M. HEUSSNER Serge, CEFREM, Perpignan	Directeur de thèse

Thèse préparée au

LABORATOIRE D'ETUDES RADIOECOLOGIQUES EN MILIEUX  
CONTINENTAL ET MARIN, IRSN Centre de La Seyne-sur-Mer  
ET

CENTRE DE FORMATION POUR LA RECHERCHE SUR LES  
ENVIRONNEMENTS MEDITERRANEENS, UPVD à Perpignan



# REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement Sabine Charmasson qui m'a encadré dans ce long travail et a notamment eu la patience de corriger mon manuscrit durant la dernière année. Je la remercie de ne pas avoir craqué devant la succession des versions du manuscrit et le style d'écriture particulier que je pratique.

Je remercie mon directeur de thèse, Serge Heussner, qui a permis la réalisation de cette étude et qui a supervisé mon travail à distance.

J'exprime également mes remerciements aux membres du jury : mes rapporteurs, Robert Lafite, spécialiste en morphodynamique côtière, et Olivier Radakovitch, spécialiste du transport des particules et des contaminants en milieux aquatiques, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et leurs réflexions constructives, mon examinatrice Roberta Delfanti, spécialiste en environnement marin, pour sa présence et le temps qu'elle a pris pour étudier mes travaux, et le président de mon jury, Xavier Durrieu de Madron, spécialiste en hydrodynamique côtière, pour sa disponibilité et pour avoir accepté la présidence de mon jury de thèse.

Je tiens à remercier François Dufois avec qui j'ai partagé de très bons moments (congrès à Istanbul, campagnes océanographiques, sorties) comme de moins bons (missions de prélèvements en mer par mauvais temps, caprices du matériel). Nos échanges toujours très enrichissants, le partage de nos connaissances mutuelles et son espièglerie ont facilité le développement de mon étude.

Je remercie l'équipe du LERCM de La Seyne/mer pour leur expérience et l'assistance qu'ils m'ont fournies : Mireille Arnaud pour son dynamisme durant les missions, sa ténacité face aux différentes situations et son engagement personnel, Hervé Thébault pour sa disponibilité, ses larges connaissances et sa facilité à discuter, Céline Duffa pour son optimisme quotidien au bureau et Yves Di Meglio pour tous les services qu'il m'a rendus lors des missions et lors des phases de traitement des échantillons. Une pensée également aux membres temporaires de l'IRSN, dont je fais partie, avec qui j'ai passé de bons moments à la machine à café, notamment Antoine Le Faouder, Carolyn Scheurle, Nathalie Grillo, Johnathan Maura, Aude Jaffrenou, Anne Desnues et Grégory Agin.

J'exprime mes remerciements aux collègues du LERCM de Cadarache, notamment Frédérique Eyrolle pour sa compagnie enrichissante, notamment lors d'un congrès aux antipodes et

**pour ses conseils au niveau de différentes études, Alain Champelovier qui a toujours répondu présent aux missions terrains les plus ébouriffantes comme les plus minutieuses, et Sabrina Barbier pour sa disponibilité, son énergie et sa bonne humeur.**

**Je tiens également à remercier certains scientifiques actuels et anciens du CEREGE : Jérôme Miralles pour les super moments passés chez Mehmet alors qu'il finissait son post-doc à l'IRSN, Claude Vella pour son active participation aux campagnes de terrain, sa connaissance de la zone d'étude et son amabilité, Grégoire Maillet pour ses conseils avisés ainsi que pour son intérêt profond pour la partie aval du Rhône qu'il a su me faire partager, Carolyne Vassas pour les différentes missions que l'on a menées sur la Flèche de la Gracieuse.**

**Je tiens également à remercier les personnes de l'ombre, celles qui s'affairent à faciliter le recueil des données : l'équipage du N/O L'Europe, dont je connaissais déjà une partie des membres (Benoît, Christophe et Pierrick) par le biais d'une mission océanographique réalisée en 2003 dans le Golfe de Gascogne sur le N/O Le Thalia, l'équipage du N/O l'Antédon, et les techniciens et ingénieurs du LMRE de l'IRSN à Orsay qui ont mesuré la concentration en radioéléments dans les sédiments prélevés durant les différentes missions. Merci également à mes différents collègues de mission : Olivier Radakovitch, Yves Noack, Christine Sotin, Philippe Cann, Christophe Ravel, Eric Emery et bien d'autres, qui ont su mêler bonne humeur et rigueur durant de très longues journées de travail.**

**Un grand merci à Lionel C., Alexis D., Aurélien T., Benjamin D., Antoine D., Lionel G., Vincent C., Christophe J., Mickaël L., Franck L., William G., Aurélien G. et Christian R. pour leurs encouragements.**

**Je remercie également mes parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études, ainsi que mes beaux-parents qui m'ont supporté ces dernières années.**

**A Mélissa, ma compagne, qui a su me motiver et m'encourager pendant ces 3 dernières années. Je m'incline devant sa patience et bien d'autres qualités dont elle fait preuve...**

**Je tiens enfin à remercier l'IRSN qui a assuré le financement de ce travail, l'IFREMER et le COM qui ont mis matériels et plongeurs à ma disposition et l'ED305 de l'UPVD qui m'a aidé à financer certains congrès.**

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>13</b>
<b>1. Situation de l'étude</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Le Golfe du Lion</b>	<b>19</b>
1.1.1. Description générale	19
1.1.2. Les régimes de vent	20
1.1.3. Hydrodynamique	22
1.1.4. Dynamique sédimentaire	24
<b>1.2. Le Rhône et son bassin versant</b>	<b>26</b>
1.2.1. Présentation générale	26
1.2.2. Hydrologie	28
1.2.3. Transport sédimentaire	29
1.2.3.1. Transport en suspension	30
1.2.3.2. Transport par charriage	31
1.2.4. Phénomènes de crue	34
1.2.4.1. Typologie des crues	35
1.2.4.2. Temps de retour et enregistrement historique des crues	35
1.2.4.3. Influence de l'origine des crues sur la concentration en MES	35
<b>1.3. Le prodelta rhodanien</b>	<b>38</b>
1.3.1. Définition	38
1.3.2. Formation	39
1.3.3. Caractéristiques du prodelta rhodanien	40
1.3.4. Le panache du Rhône et la floculation des particules en suspension	43
1.3.4.1. Le panache du Rhône	43
1.3.4.2. Le processus de floculation	45
1.3.5. Taux d'accumulation sédimentaire sur le prodelta	46
<b>2. Les radioéléments</b>	<b>49</b>
<b>2.1. Les sources de radioactivité</b>	<b>51</b>
2.1.1. La radioactivité naturelle	51
2.1.2. L'industrie nucléaire rhodanienne	52
2.1.2.1. Les effluents radioactifs	52
2.1.2.2. Les centrales nucléaires	53
2.1.2.3. Le centre de retraitement du combustible de Marcoule	54
2.1.2.3.1. Présentation et historique	54
2.1.2.3.2. Rejets d'effluents	56
2.1.2.4. Autres installations nucléaires rhodaniennes	59
2.1.3. Les retombées atmosphériques	60
2.1.3.1. Les essais nucléaires atmosphériques	60
2.1.3.2. La désintégration atmosphérique d'engins nucléaires	61
2.1.3.3. L'accident de Tchernobyl	61
<b>2.2. Les radionucléides étudiés</b>	<b>62</b>
2.2.1. Présentation des radionucléides	62
2.2.1.1. Le plomb 210	62
2.2.1.1.1. Origine	62
2.2.1.1.2. Comportement en milieu aqueux	63
2.2.1.1.3. Le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , un outil de géochronologie	63
2.2.1.2. Le beryllium 7 et le thorium 234	64
2.2.1.2.1. Le beryllium 7	64
2.2.1.2.2. Le thorium 234	64
2.2.1.1.3. Etude des apports événementiels	64
2.2.1.3. Les isotopes 238, 239 et 240 du plutonium	65
2.2.1.3.1. Origine	65
2.2.1.3.2. Comportement en milieu aqueux	65
2.2.1.3.3. Traçage des rejets de l'industrie nucléaire rhodanienne	66
2.2.1.4. Le césium 137	66
2.2.1.4.1. Origine	66
2.2.1.4.2. Comportement en milieu aqueux	67

2.2.1.4.3. Traçage et bilan de radioactivité artificielle	68
<b>2.3. Processus d'interaction entre les radionucléides et les sédiments</b>	<b>68</b>
2.3.1. Comportement global des radionucléides dans le milieu marin	68
2.3.2. Adsorption/désorption des radioéléments	69
2.3.2.1. La constante de distribution K <sub>d</sub>	69
2.3.2.2. Les processus d'adsorption et de désorption	70
2.3.2.2.1. L'adsorption en fonction de la nature du sédiment hôte	70
2.3.2.2.2. La désorption et ses mécanismes	71
2.3.3. La remobilisation des radioéléments	71
<b>3. Matériels et méthodes</b>	<b>73</b>
<b>3.1. Suivis hydrologique et hydrodynamique à l'embouchure du Rhône</b>	<b>75</b>
3.1.1. Suivi hydrologique par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR)	75
3.1.2. Suivi de l'hydrodynamique	75
3.1.2.1. Etude des courants marins : utilisation des ADCP	75
3.1.2.1.1. Calibration de l'ADCP	76
3.1.2.1.2. Mouillages des ADCP	77
3.1.2.1.3. Traitement des données	79
3.1.2.2. Influence atmosphérique	79
3.1.2.2.1. Modèle de vents	79
3.1.2.2.2. Modèle de vagues	80
3.1.2.2.3. Vitesse orbitale U <sub>orb</sub> et coefficient de frottement des vagues f <sub>w</sub>	81
3.1.2.2.4. Contraintes de cisaillement au fond (BSS)	82
3.1.3. Suivi des paramètres physico-chimiques	82
3.1.3.1. Les sondes NKE de salinité-température-turbidité	83
3.1.3.1.1. La sonde STPS 100	83
3.1.3.1.2. La sonde STBD	84
3.1.3.1.3. La sonde Sea Bird 9 embarquée	85
3.1.3.1.4. Le transmissomètre WETLABS	85
<b>3.2. Etude sédimentologique des apports rhodaniens</b>	<b>88</b>
3.2.1. Mesures altimétriques (ALTUS)	89
3.2.2. Echantillothèque des prélèvements de sédiments	90
3.2.2.1. Campagnes REMORA (Programme européen REMOTRANS - 2001 à 2002)	90
3.2.2.1.1. Campagne REMORA 1	91
3.2.2.1.2. Campagne REMORA 2	92
3.2.2.1.3. Campagne REMORA 3	93
3.2.2.2. Campagnes BOBORHONE et SED2 (2003 à 2004)	95
3.2.2.2.1. Campagne BOBORHONE 1	95
3.2.2.2.2. Campagne BOBORHONE 2	95
3.2.2.2.3. Campagne SED 2	96
3.2.2.3. Campagnes récentes: CARMEX et EXTREMA (ANR EXTREMA - 2007 à 2008)	97
3.2.2.3.1. Campagne CARMEX	97
3.2.2.3.2. Campagne EXTREMA 1	99
3.2.2.3.3. Campagne EXTREMA 2	104
3.2.3. Analyses granulométriques des sédiments des différentes campagnes	105
3.2.3.1. Le granulomètre laser de laboratoire	105
3.2.3.1.1. Fonctionnement	105
3.2.3.1.2. Configuration du granulomètre laser de laboratoire	106
3.2.3.1.3. Traitement de données	107
3.2.3.2. Le granulomètre laser in situ (LISST)	107
3.2.3.2.1. Principe de fonctionnement	107
3.2.3.2.2. Traitement de données	108
<b>3.3. Etude radioécologique des apports du Rhône vers le Golfe du Lion</b>	<b>108</b>
3.3.1. Protocole de traitement des sédiments	108
3.3.1.1. Conditionnement des échantillons	108
3.3.1.2. Analyse des radionucléides	109
3.3.2. Taux de sédimentation	110
3.3.2.1. Modèles de radiochronologie au <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>	112
3.3.2.2. Modèles non biodiffusifs	111
3.3.2.2.1. Le modèle CF:CS (Constant Flux : Constant Sedimentation)	111
3.3.2.2.2. Le modèle C.I.C. (Constant Initial Concentration)	111
3.3.2.2.3. Le modèle C.R.S (Constant Rate of Supply)	111
3.3.2.2.4. Taux de sédimentation apparent (A.S.R.)	112



3.3.2.3. Modèles biodiffusifs.....	113
3.3.3. Bilan des radioéléments.....	115
<b>4. Hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône.....</b>	<b>117</b>
<b>4.1. Apports particuliers du Rhône.....</b>	<b>119</b>
4.1.1. MES mesurées en Arles.....	119
4.1.2. MES mesurées à l'embouchure.....	121
4.1.3. Granulométrie des MES à l'embouchure: campagne CARMEX.....	121
4.1.3.1. Résultats de l'analyse granulométrique.....	122
4.1.3.2. Résultats de l'analyse turbidimétrique.....	125
4.1.3.3. Rôle de la Matière Organique dans la floculation.....	128
<b>4.2. Hydrologie à l'embouchure du Rhône.....</b>	<b>129</b>
4.2.1. Campagne EXTREMA1 (mars 2008).....	130
4.2.1.1. Analyses du premier leg : processus de défloculation.....	130
4.2.1.2. Analyses du second leg : implication de la MO sur la floculation.....	135
4.2.2. Campagne EXTREMA2 (octobre 2008).....	138
4.2.2.1. Analyses du premier leg : importance de la thermocline.....	138
4.2.2.2. Analyses du second leg : descente de la thermocline.....	142
4.2.3. Devenir des particules à l'embouchure : exemple d'EXTREMA2.....	146
<b>4.3. Impact des courants et des vagues sur la dynamique sédimentaire.....</b>	<b>150</b>
4.3.1. Erodabilité des sédiments du prodelta.....	150
4.3.1.1. Flux d'érosion.....	151
4.3.1.2. Contraintes critiques d'érosion.....	153
4.3.2. Projet CARMA : suivi de la période hiver – printemps 2006/2007.....	156
4.3.3. Influence des crues sur les apports sédimentaires.....	157
4.3.4. Influence des tempêtes et des forts courants sur la remobilisation des sédiments.....	161
4.3.4.1. Génération des contraintes de cisaillement.....	161
4.3.4.2. Chronologie des épisodes érosifs durant l'hiver 2006-2007.....	162
4.3.5. Transport et bilan des sédiments à l'embouchure du Rhône.....	163
4.3.5.1. Transport des sédiments à l'embouchure.....	163
4.3.5.2. Bilans des sédiments à l'embouchure.....	165
<b>4.4. Variabilité spatiale de la distribution des sédiments.....</b>	<b>166</b>
4.4.1. Répartition des sédiments sur le prodelta.....	168
4.4.2. La couche superficielle de mélange.....	169
<b>4.5. Variabilité temporelle de la distribution des sédiments.....</b>	<b>174</b>
4.5.1. Etat initial avant le suivi temporel de la distribution sédimentaire en 2008.....	174
4.5.1.1. La campagne EXTREMA1 (mars 2008).....	174
4.5.1.2. Partie proximale de l'embouchure.....	176
4.5.1.3. Parties distale et latérale de l'embouchure.....	176
4.5.2. Variations de la colonne sédimentaire entre mars et octobre 2008.....	177
4.5.2.1. Apports liquides et solides.....	177
4.5.2.2. Granulométrie des carottes sédimentaires du projet EXTREMA.....	178
4.5.2.3. Interprétation des signaux sédimentaires.....	180
4.5.2.3.1. Le signal de scission.....	180
4.5.2.3.2. Le signal sableux.....	181
4.5.3. Evolution spatio-temporelle des sédiments superficiels du prodelta.....	181
<b>4.6. Conclusion sur l'hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône durant la période étudiée.....</b>	<b>183</b>
4.6.1. Apports particuliers rhodaniens.....	184
4.6.2. Hydrologie à l'embouchure.....	184
4.6.3. Impact des courants et des vagues sur la dynamique sédimentaire.....	185
4.6.4. Variabilité spatiale de la distribution des sédiments.....	185
4.6.5. Variabilité temporelle de la distribution des sédiments.....	185
<b>5. Bilan des sédiments et des radioéléments.....</b>	<b>187</b>
<b>5.1. Apports de radionucléides par le Rhône.....</b>	<b>189</b>
5.1.1. Radioactivité relevée dans l'eau et dans les MES en Arles.....	189
5.1.2. Constantes de distribution Kd des radionucléides dans le Rhône.....	191
5.1.3. Flux de radioéléments issus du Rhône.....	193
5.1.3.1. Comportement des radioéléments en fonction de la turbidité.....	193
5.1.3.2. Estimation des flux de radioéléments.....	194
<b>5.2. Distribution spatiale des radioéléments.....</b>	<b>196</b>
5.2.1. Répartition géographique dans le Golfe du Lion.....	196
5.2.1.1. Distribution des sédiments dans le Golfe du Lion.....	196

5.2.1.2. Cas du plomb 210 en excès	200
5.2.1.3. Cas du césium 137	201
5.2.1.4. Comparaison entre les deux radionucléides	203
5.2.2. Répartition géographique sur le prodelta	204
5.2.2.1. Cas du plomb 210 en excès	204
5.2.2.2. Equation du scavenging en domaine peu profond	205
5.2.2.3. Cas du césium 137	206
5.2.2.4. Corrélation entre les radionucléides sur le domaine prodeltaïque	207
5.2.2.5. Comparaison avec la distribution des isotopes du plutonium	208
5.2.3. Affinité des radionucléides avec les classes granulométriques des sédiments	210
<b>5.3. Distribution temporelle</b>	<b>211</b>
5.3.1. Evolution temporelle des dépôts de radioéléments dans le Golfe du Lion	211
5.3.1.1. Zone sous influence rhodanienne	213
5.3.1.2. Sur le plateau continental	217
5.3.2. Evolution temporelle des dépôts de radioéléments sur le prodelta	222
5.3.2.1. Dépôts des radionucléides sur la partie distale	222
5.3.2.2. Dépôts des radionucléides sur la partie proximale	228
5.3.3. Suivi de la station Roustan Sud de 1979 à nos jours	231
<b>5.4. Taux de sédimentation</b>	<b>237</b>
5.4.1. Calculs avec le modèle non-biodiffusif	237
5.4.1.1. Estimation des taux d'accumulation dans le Golfe du Lion	238
5.4.1.2. Estimation des taux d'accumulation en zone prodeltaïque	241
5.4.2. Calculs avec le modèle biodiffusif	241
5.4.3. Significativité des taux de sédimentation sur le prodelta rhodanien	245
5.4.4. Marquage radioactif et sédimentaire d'un épisode de crue	249
<b>5.5. Estimation des bilans des radioéléments associés aux sédiments</b>	<b>257</b>
5.5.1. Participation des crues aux apports de matières	257
5.5.1.1. Crue exceptionnelle de décembre 2003	257
5.5.1.2. Crues de faibles amplitudes de l'hiver 2006-2007	260
5.5.1.3. Apports annuels de matières dus aux crues (2006-2008)	264
5.5.2. Bilans sur le prodelta	265
5.5.2.1. Bilan sédimentaire sur le prodelta	267
5.5.2.2. Bilan des radioéléments sur le prodelta	267
5.5.2.3. Remobilisation physique du <sup>137</sup> Cs	272
5.5.3. Bilans sur le Golfe du Lion hors prodelta	275
5.5.4. Bilan global des radionucléides dans le Golfe du Lion et sur le prodelta	276
<b>5.6. Conclusion sur le bilan des sédiments et des radioéléments</b>	<b>280</b>
5.6.1. Apports de radionucléides par le Rhône	280
5.6.2. Distribution spatiale des radioéléments	281
5.6.3. Distribution temporelle	281
5.6.4. Taux de sédimentation	282
5.6.5. Estimation des bilans des radioéléments associés aux sédiments	282
<b>Conclusion générale</b>	<b>285</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>291</b>
<b>Annexes</b>	<b>303</b>
Annexe A : Projet CARMA	304
Annexe B : Campagne EXTREMA1	308
Annexe C : Campagne EXTREMA2	317
Annexe D : Enregistrements sédimentaires profonds de la campagne DEEP1	331
Annexe E : Les radioéléments dans l'eau du fleuve	332
Annexe F : Conditions hydrologiques rhodanienne durant la période d'étude	334
Annexe G : Granulométrie des sédiments superficiels du Golfe du Lion et du prodelta	347
Annexe H : Les radioéléments dans les sédiments	354
Annexe I : Le cycle du combustible nucléaire	360
Annexe J : Fonctionnement de l'ADCP et transformation du signal	362
Annexe K : L'altimètre S-ALTUS	368
Annexe L : Le granulomètre à diffraction laser	369
Annexe M : Résultats des analyses granulométriques et profils de profondeur de radioéléments	371
Annexe N : Publications éditées et soumises	375

Miralles, M., Arnaud, M., Radakovitch, O., <b>Marion, C.</b> , Cagnat, X., 2006 ( <b>publiée</b> ). <i>Radionuclide deposition in the Rhône River prodelta (NW Med. Sea) in response to the december 2003 extreme flood</i> . Marine Geology, 234, 179-189.....	376
<b>Marion, C.</b> , Dufois, F., Vassas, C., Arnaud, M., 2009 ( <b>sous presse, acceptée par Continental Shelf Research</b> ). <i>In situ record of sedimentary processes near the Rhône River mouth during winter events (Gulf of Lions, Mediterranean Sea)</i> .....	385
<b>Marion, C.</b> , Maillet, G., 2009 (soumise à La Houille Blanche). <i>Quantifications des flux solides rhodaniens à l'embouchure : apports de la Durance pendant la crue exceptionnelle de mai 2008</i> .....	422



# Introduction



Depuis plusieurs décennies, la dynamique des transferts de matière et leurs fluctuations sur la marge continentale du Golfe du Lion ont fait l'objet de divers programmes de recherche nationaux et internationaux (ECOMARGE, EUROMARGE, MATER, REMOTRANS, EUROSTRATAFORM). Ces différents projets ont permis une meilleure compréhension des mécanismes de transport des sédiments depuis l'embouchure des fleuves méditerranéens (Ebre, Pô, Rhône, Têt) vers la marge continentale, et de la stratigraphie résultante, ceci afin de prédire la réponse du système sédimentaire marin aux perturbations environnementales, comme les variabilités tectonique et climatique, l'évolution relative du niveau de la mer, ainsi qu'à l'utilisation des terres exploitées. L'étude du transport des sédiments en suspension et des flux de particules dans le Golfe du Lion a montré un export de matières particulaires issues principalement du Rhône vers la partie occidentale du plateau continental (Heussner et al., 2006) et des mécanismes de cascading, générés par les vents et tempêtes, régissant l'échange de matière particulaire entre le plateau et la pente (Palanques et al., 2006).

Connaître les sources, les mécanismes de transport et les zones de dépôt des apports sédimentaires fluviaux revêt un intérêt primordial pour l'homme et son environnement notamment à cause de l'industrialisation des bassins versants. Le Rhône est le fleuve le plus important au niveau du Golfe du Lion et son bassin versant est fortement anthropisé. Il comporte notamment sur ses rives de nombreuses installations du cycle du combustible nucléaire. Parmi ces installations, le centre de retraitement du combustible irradié de Marcoule, en fonctionnement jusqu'en 1997, a été localement la principale source de radioéléments artificiels pour le milieu marin. Il faut ajouter à ces sources les retombées atmosphériques des essais nucléaires et celles de l'accident de Tchernobyl en 1986 qui ont conduit à un marquage de l'ensemble du bassin versant qui est peu à peu lessivé. Depuis le lancement des programmes GEOSECS (Geochemical Ocean Sections Study) en 1971 et GEOTRACE (Study of the Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and their Isotopes) en 2006, les radioéléments artificiels et naturels ont été largement utilisés comme traceurs de divers processus en océanographie (e.g. Broecker et Peng, 1982 ; Guary et al., 1988 ; Kershaw et Woodhead, 1991 ; Ivanovich et Harmon, 1992 ; Schlosser et al., 1998). Dans le Golfe du Lion, leur utilisation a essentiellement porté sur l'étude du devenir des apports rhodaniens (e.g. Thomas, 1997 ; Charmasson, 1998 ; Radakovitch et al., 1999 ; Frignani et al., 2002 ; Lansard, 2005 ; Miralles et al., 2006 ; Arnaud et al., 2009).

Le prodelta du Rhône représente une zone prépondérante de stockage temporaire de sédiments et de radionucléides associés : le fleuve représente une source de matière qui alimente le prodelta, notamment en période de crue, alors que les vagues générées par les vents favorisent l'érosion et la remise en suspension des particules, remaniées ensuite par les courants (Charmasson, 1998 ; Radakovitch et al., 1999b ; Lansard, 2005). Les empreintes sédimentaires des radionucléides, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, témoignent des conditions météo-climatiques et hydrologiques affectant la zone.

Il est donc important d'étudier les événements extrêmes comme les crues et les tempêtes car ils jouent un rôle primordial dans les apports et la remobilisation des sédiments et des radioéléments associés, d'autant que le contexte actuel de réchauffement climatique pourrait se traduire par de profonds changements, tant au niveau de la fréquence des phénomènes extrêmes qu'au niveau de leur intensité.

Antonelli et al. (2008), Rolland (2006) et Miralles et al. (2006) ont notamment apporté des repères qualitatifs et quantitatifs sur les apports hydriques, sédimentaires et de contaminants radioactifs associés lors de la crue

rhodanienne du 4 décembre 2003 pendant laquelle le débit du fleuve a atteint  $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à Beaucaire, transportant à l'embouchure près de 5.4 Mt de sédiments et  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  de  $^{137}\text{Cs}$  sur le prodelta.

Parmi les fleuves du Golfe du Lion, le prodelta de la Têt, dont le débit avoisine  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a été instrumenté afin d'estimer les conséquences des phénomènes météo-climatiques extrêmes sur la dynamique sédimentaire de cette zone (Bourrin et al., 2006 ; Guillén et al., 2006). Le Rhône, premier fleuve de Méditerranée occidentale avec un débit moyen de  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , n'a à ce jour pas fait l'objet d'une instrumentation « lourde », notamment en raison de problèmes techniques engendrés par le chalutage intensif et les crues importantes.

D'autres fleuves mondiaux ont fait l'objet de suivis hydrosédimentaires, notamment le Pô (Fox et al., 2004 ; Frignani et al., 2005 ; Palinkas et al., 2007, Fain et al., 2007), l'Amazone (Nittrouer et DeMaster, 1986 ; Sternberg et al., 1996 ; Nittrouer et al., 2005), l'Eel (Sommerfield et al., 1999 ; Curran et al., 2002), le Mississippi (Corbett et al., 2004, 2007) ou la Têt (Law et al., 2008), afin de mieux connaître les processus de sédimentation aux embouchures de ces fleuves.

Cette thèse s'intéresse aux transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion, liés à l'hydrodynamique à l'embouchure du Rhône. Elle s'appuie sur les résultats acquis durant le programme régional CARMA (Midi-Pyrénées-PACA) et le projet ANR EXTREMA qui se sont intéressés à l'étude des événements météo-climatiques exceptionnels sur la redistribution des polluants au sein des différents compartiments de la géosphère (atmosphère, sols, fleuves, milieu marin côtier et profond). Dans ce cadre, 3 missions océanographiques de deux semaines et deux années d'instrumentation du prodelta ont été réalisées à l'embouchure du Rhône. Les données acquises durant ces campagnes, appelées CARMEX, EXTREMA1 et EXTREMA2, et périodes de suivis de l'hydrodynamique sédimentaire sont le fruit d'un travail conduit en collaboration avec François DUFOIS (2008). Elles ont permis d'estimer l'impact des apports sédimentaires fluviaux au prodelta et des tempêtes sur la remobilisation particulière.

Des données acquises et traitées lors de différentes campagnes menées par l'IRSN entre 2001 et 2008 sur le Golfe du Lion dans le cadre des projets européens REMOTRANS et EUROSTRATAFORM ont été également utilisées pour dresser des bilans de sédiments et de radioéléments apportés par le Rhône.

Ce manuscrit se décompose en cinq chapitres. Le premier chapitre est axé sur la situation de l'étude avec un aperçu global des paramètres environnementaux, acteurs de l'hydrodynamique sédimentaire de la zone. Le second chapitre traite davantage de l'origine des radioéléments étudiés, de leur comportement dans le milieu en question et leur utilité dans ce travail. Le troisième chapitre fait état des matériels et méthodes mis en jeu, des protocoles appliqués, des configurations intégrées aux instruments et du traitement des données. Le quatrième chapitre suit le transport des sédiments étape par étape, depuis leur source rhodanienne jusqu'à leur dépôt sur le prodelta voire leur remobilisation vers la mer ouverte. Il comprend les observations faites durant les campagnes en mer (CARMEX, EXTREMA1 et EXTREMA2) et la distribution des sédiments sur le prodelta et le Golfe du Lion. Le dernier chapitre dresse des bilans de sédiments et de radioéléments dans le temps et dans l'espace, après avoir déterminé les relations existant entre la phase particulière et les éléments radioactifs.



# 1. Situation de l'étude



Le domaine d'étude regroupe différents environnements aux conditions physico-chimiques et météorologiques bien distinctes. Cette partie fait un état des lieux et des caractéristiques de chacun des compartiments intéressant le sujet de l'étude.

En effet, comment ne pas tenir compte de la pression anthropique s'exerçant sur le bassin versant du Rhône alors que la zone analysée en est l'exutoire ? Comment éviter de passer en revue les facteurs météorologiques et hydrologiques affectant le Golfe du Lion, comme la houle et les courants qui ont un rôle important dans la dynamique des particules en suspension, lorsque l'on sait que ces conditions ont contribué à l'édification du prodelta rhodanien et de la marge méditerranéenne nord-occidentale ?

Il paraît ainsi évident que chacune des parties est indissociable et qu'elles interagissent toutes d'une manière ou d'une autre. Le suivi du transport sédimentaire et des contaminants radioactifs associés nécessite une connaissance du fonctionnement global depuis la source jusqu'à la zone de dépôt.

## 1.1. Le Golfe du Lion

### 1.1.1. Description générale

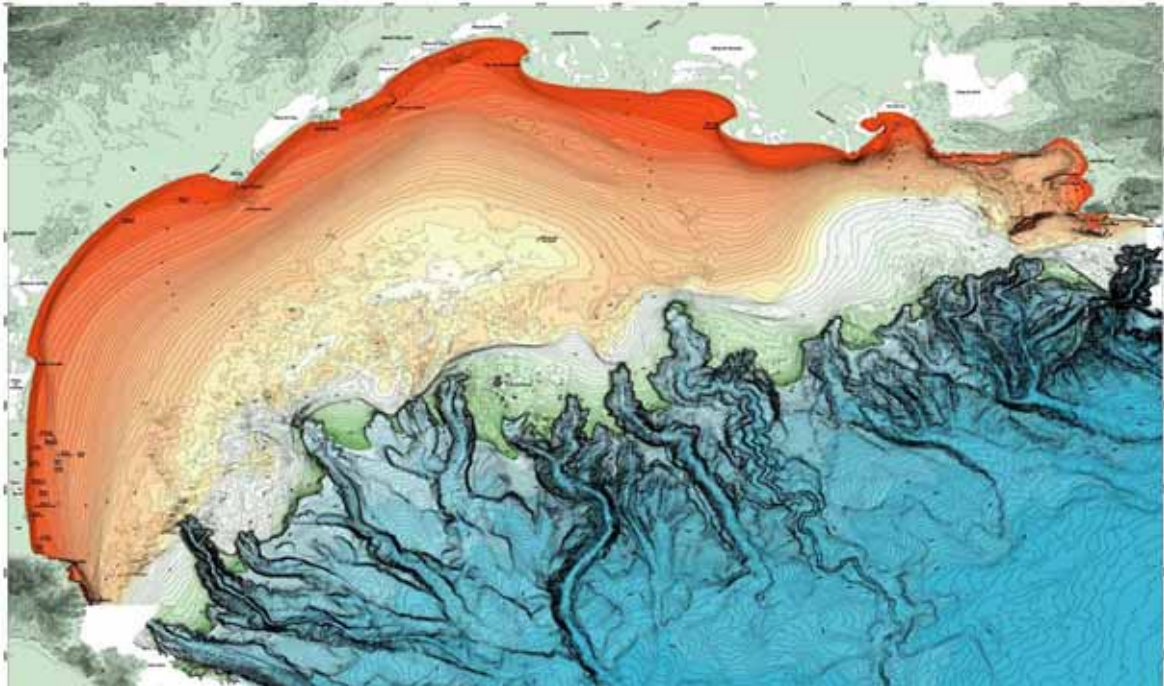
Le Golfe du Lion (**Figure 1.1**) se situe dans la partie nord-ouest de la Mer Méditerranée occidentale et se caractérise par une grande diversité dans la topographie, les conditions météorologiques et les régimes hydrologiques.



**Figure 1.1 : Carte de la Mer Méditerranée et du Golfe du Lion (encadré).**

Il est limité par le Cap Creus à l'ouest (frontière espagnole) et par le Cap Sicié à l'est (aux alentours de Toulon). Il présente un vaste *plateau continental* en forme de croissant (**Figure 1.2**) dont la largeur atteint 80 km au Cap d'Agde (Ulses, 2005) et 70 km au droit du delta du Rhône (Aloisi, 1986). Sa largeur se rétrécit en allant à l'est vers les premiers contreforts des Alpes et à l'ouest vers les Pyrénées. Ce plateau possède une pente très faible de l'ordre de 0.5 % mais qui peut se redresser au niveau des talus deltaïques et atteindre exceptionnellement 3 % face

au Rhône. La profondeur moyenne du plateau avoisine 76 m et sa limite externe oscille entre les isobathes 100 et 200 mètres (160 m selon Dufois (2008)).



**Figure 1.2 : Carte bathymétrique du Golfe du Lion (Berné S., IFREMER, 2002).**

Au-delà, le talus continental se développe jusque vers l'isobathe 1500 m, dont les épais séries plio-quaternaires sont incisées par de nombreux canyons sous-marins (Bourcart, 1945 ; Got et al., 1979 ; Vanney et Genesseeux, 1979) qui sont des conduites naturelles où transite la matière particulaire vers le large (Monaco et al., 1990). Les interfluves présentent des pentes moyennes (5 %) mais qui augmentent sur les versants des canyons (20 %), entraînant de nombreux phénomènes de glissement (Chassefière et al., 1983 ; Canals-Artigas et al., 1984). Les canyons consécutivement creusés et comblés pendant les périodes d'oscillations glacio-eustatiques quaternaires (Bourcart et al., 1961 ; Monaco, 1971) jouent un rôle prépondérant dans l'alimentation du bassin profond (Monaco et al., 1983 ; Fernandez, 1984).

Le pied de pente du Golfe du Lion, c'est-à-dire son glacis, atteint 2600 m de profondeur et témoigne des phénomènes d'accumulation par un éventail sédimentaire profond ou Deep Sea Fan (Droz, 1983) au débouché des canyons du Rhône, de Bourcart, du Lacaze-Duthiers et du Cap Creus notamment. Ces canyons sous-marins ont d'ailleurs fait l'objet de nombreuses études récentes concernant leur rôle dans le transit sédimentaire (Heussner et al., 2006 ; Palanques et al., 2006 ; Canals et al., 2006 ; DeGeest et al., 2008 ; Palanques et al., 2008).

### **1.1.2. Les régimes de vent**

Cette région est dominée par deux types de vents: la Tramontane, venant du nord-ouest, et le Mistral, venant du nord (Fieux, 1974). Canalisés entre les massifs montagneux, ils peuvent être violents l'hiver et souffler durant plusieurs semaines d'affilée. Ils entraînent des masses d'air polaire ou continental, froid et sec, qui peuvent provoquer des modifications hydrologiques par refroidissement et mélange vertical.

En été, ces vents de nord peuvent durer quelques jours et atteindre 10 à 15 m.s<sup>-1</sup> au plus (Millot, 1990). Leur influence sur le transport sédimentaire et la resuspension est faible, mais toutefois notable au niveau du Cap Creus (Bourrin et al., 2008). Ils gagnent en durée et en intensité l'hiver sans pour autant créer de houles très énergétiques mais ils sont à l'origine de la formation d'eau dense par refroidissement et évaporation, processus qui induisent l'exportation de matière vers le large (Durrieu de Madron, 1999 ; Ulses, 2005).

Cette plongée d'eau dense, appelée WIW (Winter Intermediate Water) s'établit à la vitesse de 10 cm.s<sup>-1</sup> à proximité des côtes, où la profondeur est faible, puis elle s'étend sur tout le plateau avant de s'écouler le long de la pente continentale et suivre les canyons (Bethoux et al., 1982). Elle atteint son équilibre hydrostatique vers 350 m de profondeur mais peut exceptionnellement contribuer à la formation de la WMDW (Western Mediterranean Deep Water) d'après Bethoux et al. (2002).

Les vents de sud-est sont moins fréquents que les vents de nord sur la majorité du Golfe du Lion, quoique très présents à l'embouchure du Rhône. Ils peuvent être violents de l'automne au printemps avec des pics de vitesse à 25 m.s<sup>-1</sup> (Millot, 1990). Ce sont eux qui induisent de fortes houles et des courants côtiers intenses (Dufois, 2008). En effet, le courant de fond induit par la houle peut atteindre des vitesses de 100 cm.s<sup>-1</sup> pour des profondeurs de 20 m et de l'ordre de 15 cm.s<sup>-1</sup> pour des profondeurs de 50 m (Lacombe, 1965). Ces vitesses régressent avec la profondeur jusqu'à 1 cm.s<sup>-1</sup> à l'isobathe 100 m. Les vents de sud-est influencent fortement la resuspension, jusqu'à 50 m de profondeur (Ulses, 2005), et sur le transport sédimentaire près des côtes (Aloisi et al., 1977).

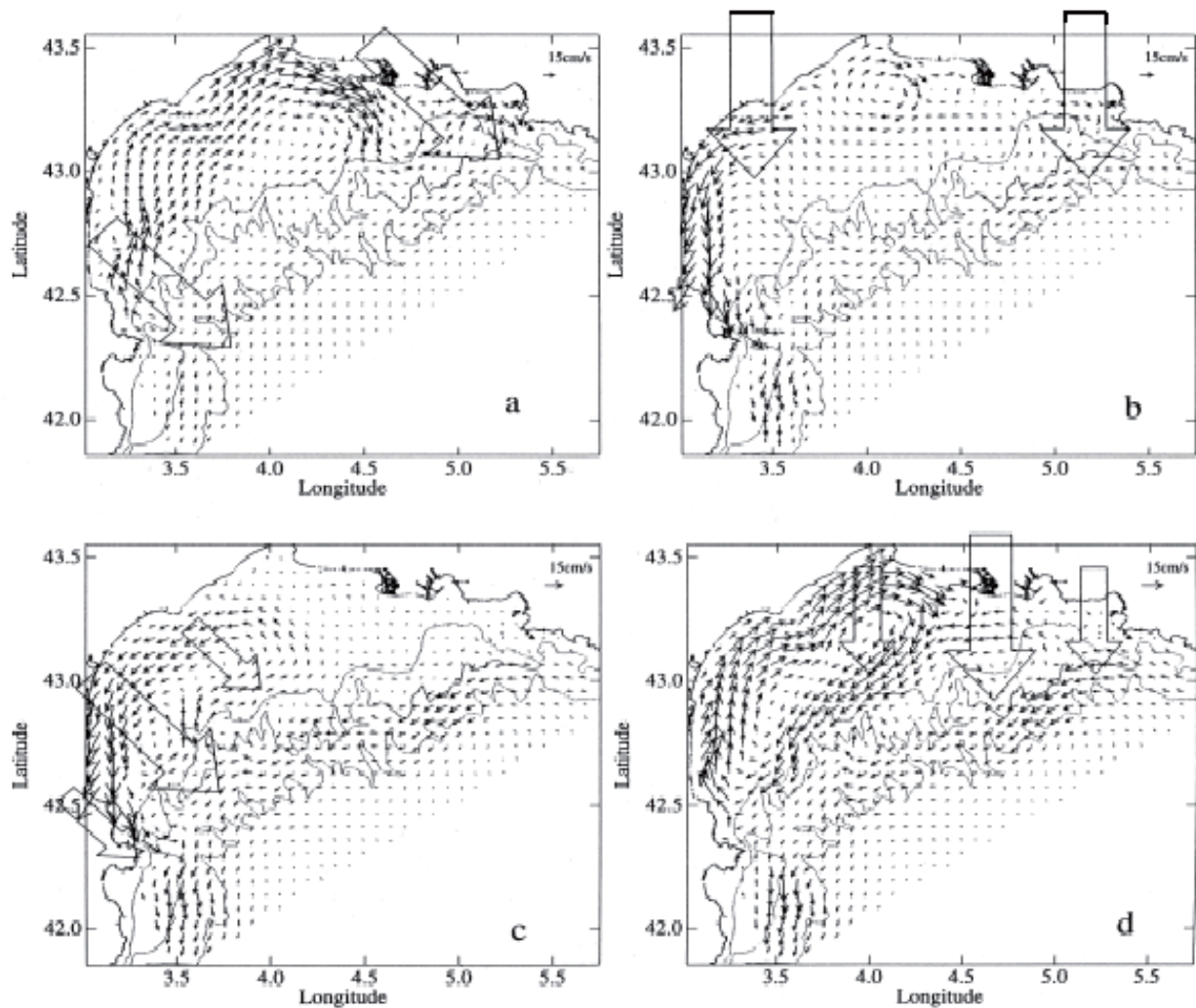
L'impact des vents sur la circulation des masses d'eau dans le Golfe du Lion est indubitable (**Figure 1.3**). Des vents de secteurs différents et de zones d'application différentes vont induire des mouvements de masses d'eau différents (Estournel et al., 2003).

Un vent de nord-ouest (NW) non canalisé décrira une circulation orientée vers le nord-est (NE) du Cap Creus jusqu'à l'embouchure du Rhône avec un upwelling côtier. Le même vent canalisé génère un gyre cyclonique sur la partie ouest du plateau.

Un vent de nord (N) non canalisé entraîne un courant côtier vers le sud et la création d'un downwelling le long des côtes du Roussillon. Le même vent canalisé produit un tourbillon anticyclonique localisé au nord du plateau.

La combinaison d'un Mistral et d'une Tramontane sur le Golfe du Lion fait apparaître deux tourbillons : l'un anticyclonique situé au centre du plateau et l'autre cyclonique à l'ouest.

Les phénomènes d'upwellings et de downwellings, initiés par les effets associés de la tension de vent et de la Force de Coriolis et mettant en mouvement les eaux de surface en raison du transport d'Ekman, sont observés sur tout le littoral méditerranéen français. Six cellules principales de remontées d'eaux profondes ont été recensées par Millot (1990) le long des côtes de la Provence, de la Camargue et du Languedoc alors que les plongées d'eaux denses se produisent davantage au large du Roussillon (**Figure 1.4**).



**Figure 1.3 : Courants moyennés sur la colonne d'eau (flèches fines) pour différents forçages de vent (flèches massives) d'après Estournel et al., 2003. a) vents homogènes de secteur nord-ouest, b) vents homogène de secteur nord, c) vents canalisés de secteur nord-ouest (Tramontane), d) vents canalisés de nord (Mistral).**

### 1.1.3. Hydrodynamique

La Mer Méditerranée connaissant un régime de marée microtidal ne dépassant généralement pas 30 cm (Masake et al., 1998), la circulation est influencée par les conditions atmosphériques (vents), les apports fluviaux et la circulation générale.

Les mécanismes régissant le comportement des masses d'eau ont été décrits pour la première fois par Millot (1990) et la plupart des figures ayant trait à ceux-ci sont tirées de son travail.

La Méditerranée Occidentale présente trois types de masses d'eau : les eaux de surface d'origine atlantique (Modified Atlantic Water ou MAW), les eaux levantines intermédiaires venant de l'est (Levantine Intermediate Water ou LIW) et les eaux profondes de Méditerranée Occidentale (Western Mediterranean Deep Water ou WMDW).

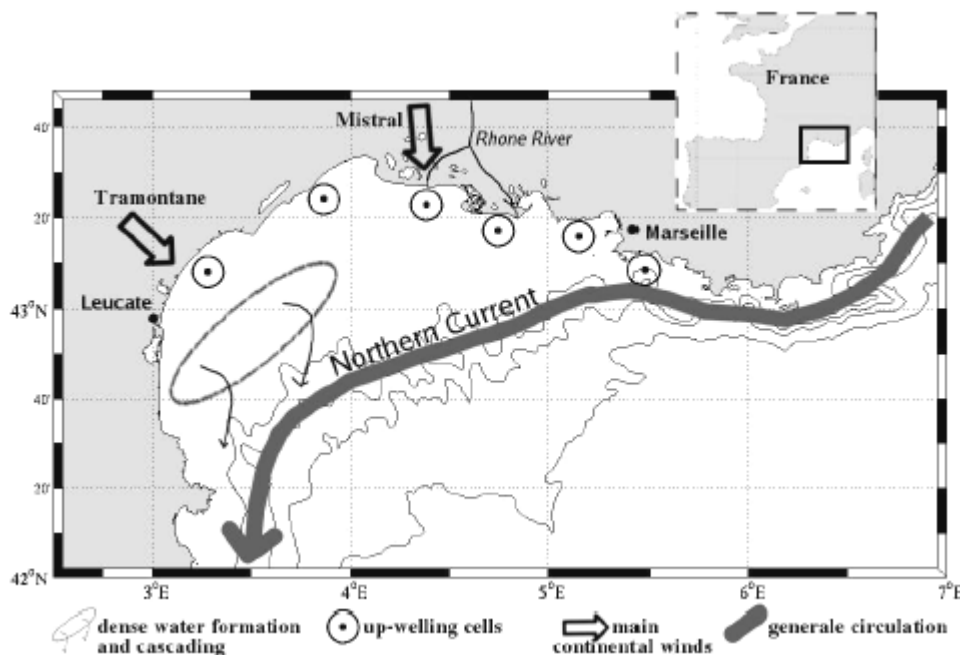
La salinité du bassin est en perpétuelle augmentation puisque le bilan des ruissellements et des précipitations reçu par la Méditerranée ne compense pas l'évaporation. C'est cette différence de salinité entre les eaux atlantiques et méditerranéennes qui engendre la circulation que connaît le Golfe du Lion et la Méditerranée en général.

Les masses d'eau en provenance de l'Océan Atlantique arrivent en surface au niveau du Déroit de Gibraltar et recouvrent les eaux méditerranéennes pour combler la variation de densité. De leur côté, les eaux méditerranéennes, densifiées par la surconcentration en sel due à l'évaporation, circulent en profondeur et ressortent par le Déroit de Gibraltar. L'eau de surface d'origine océanique suit une circulation cyclonique sous l'effet de la force de Coriolis qui la contraint à longer les côtes (Millot, 1991). Cette masse d'eau forme les MAW après une constante évaporation durant son parcours.

Les LIW sont créées en Méditerranée Orientale, dans le Bassin Levantin, puis elles franchissent le Déroit de Sicile pour entrer dans le bassin occidental et longer les côtes dans une trajectoire cyclonique. Cette masse chaude et salée, résultant de son milieu de formation, s'installe sous les MAW (La Violette, 1995).

Les WMDW, issues de l'évaporation et du refroidissement des eaux de surface, circulent sous les MAW et LIW entre 800 et 3000 m de profondeur. Ce sont les eaux les plus denses car très froides (12.5 à 13°C) et très salées (38.4 ‰) d'après Millot (1991).

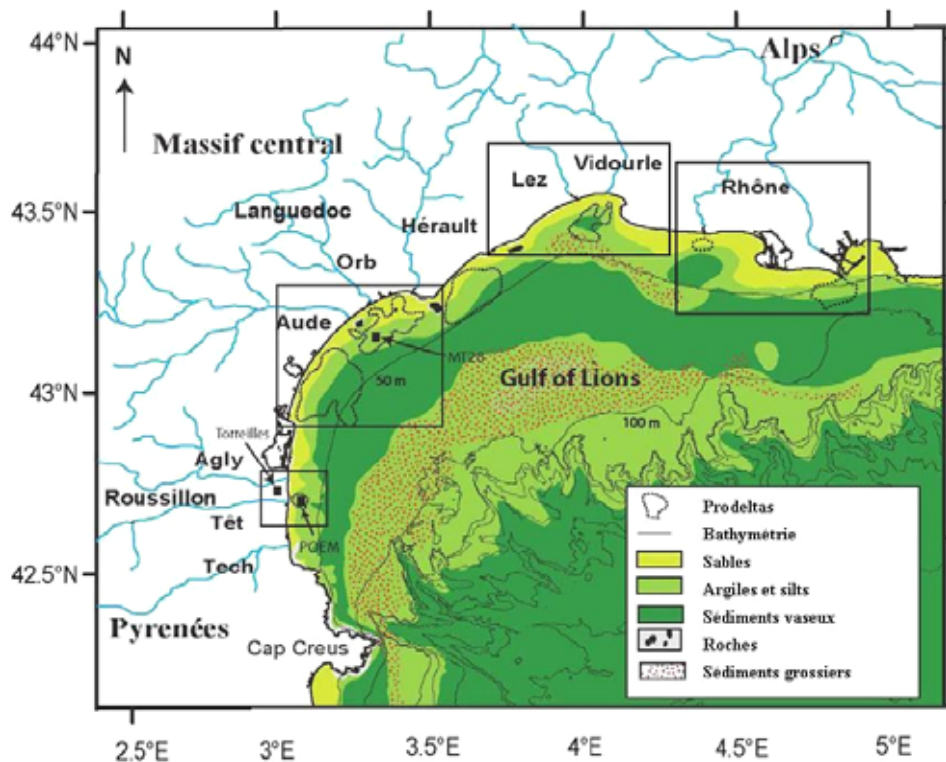
Le Courant Nord Méditerranéen (NMC) est présent dans la partie septentrionale de la Méditerranée Occidentale (**Figure 1.4**). Il est la branche nord de la circulation cyclonique entreprise par les LIW et MAW et ses vitesses les plus fortes sont observées le long du talus au-dessus des isobathes 1000 à 2000 m. Il est associé à une veine d'eau chaude peu salée (Millot, 1985) et sa largeur est de l'ordre de 30 à 50 km à l'entrée du Golfe du Lion. Sa forte variabilité saisonnière distingue un comportement estival calme avec une morphologie étalée d'un comportement hivernal avec un doublement de son flux (Albérola et al., 1995) et la formation de méandres susceptible d'affecter la circulation sur le Golfe du Lion (Albérola et Millot, 2003 ; Petrenko, 2003). Des échanges d'eau ont lieu entre le plateau continental et le large par le biais de cette dynamique (Durrieu de Madron et al., 1999).



**Figure 1.4 : Circulation principale des masses d'eau sur le plateau du Golfe du Lion (d'après Millot, 1990).**

### 1.1.4. Dynamique sédimentaire

L'édification du Golfe du Lion est le fruit du remaniement à la fin du Miocène des sédiments terrigènes continentaux, en majorité d'origine rhodanienne, et le facteur principal de sa progradation demeure le glacio-eustatisme (Lefebvre, 1980). Son étendue vers la plateforme externe s'est construite durant le Plio-Quaternaire.



**Figure 1.5 : Carte sédimentaire du Golfe du Lion (modifiée de Aloisi et al., 1973 et Bourrin et al., 2006). Les limites du prodelta du Rhône ne sont pas fixées.**

Aloisi (1986) a décrit les différents faciès sédimentaires retrouvés dans le Golfe du Lion (**Figure 1.5**) grâce à la synthèse de différents travaux (Got et al., 1972 ; Got et Monaco, 1972 ; Aloisi et al., 1973). Il distingue les dépôts côtiers sableux à sablo-péltiques trouvés sur des fonds de 0 à 30 mètres dont le diamètre est compris entre 0.1 et 1 mm, les dépôts péltiques médians contenant 50 % de lutites dont le diamètre médian est de l'ordre de quelques micromètres et se trouvant entre 30 et 80 m de profondeur, et enfin les dépôts du large constitués de sables fossiles dits 'reliques' qui affleurent de façon régulière sur la bordure externe de la plate-forme continentale entre 80 et 100 m de profondeur et dont le diamètre varie de 200 à 500  $\mu\text{m}$ . Ces sables témoignent d'anciens dépôts littoraux d'âge ante-holocène. Les formations rocheuses également présentes sur la carte sont des témoins de phases de sédimentation littorale interstadias, résultant d'une activité fluviale aux cours de périodes d'exondation de la plateforme, notamment au Pléistocène supérieur (régression).

La nature des argiles retrouvées dans le Golfe du Lion permet également de localiser la source de ces sédiments puisqu'elles sont un bon proxy de la nature lithologique du bassin versant lessivé : la chlorite et l'illite alpine dominent le bassin rhodanien, les terrains languedociens délivrent principalement de l'illite et de la montmorillonite (ainsi qu'un peu de kaolinite) et la province pyrénéenne draine de fortes proportions de smectite.



Le Golfe du Lion est donc le réceptacle des apports liquides et solides de nombreux fleuves français et particulièrement le Rhône (entre 90 % selon Noël (1996) et un peu moins de 95 % selon Bourrin et al. (2006)). Durrieu de Madron et al. (2000) estiment que 90% environ des sédiments rejetés par les fleuves bordant la Méditerranée sont piégés sur le plateau.

Fleuves	Débits liquides (min-max) moyens journaliers ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	Débits liquides moyens annuels ( $10^6 \text{ m}^3.\text{a}^{-1}$ )	Flux solides en suspension moyens annuels ( $10^6 \text{ t}.\text{a}^{-1}$ )
Tech	9.55 (<1 - 625)	301.47	$0.032 \pm 0.006$
Têt	10.82 (<1 - 471)	341.54	$0.061 \pm 0.018$
Agly	6.13 (<1 - 1020)	193.44	$0.098 \pm 0.030$
Aude	37.95 (<1 - 1300)	1197.61	$0.194 \pm 0.157$
Orb	26.67 (1.05 - 1430)	841.64	$0.110 \pm 0.044$
Hérault	40.61 (<1 - 1320)	1281.58	$0.088 \pm 0.028$
Lez	2.17 (<1 - 239)	68.65	$0.003 \pm 0.001$
Vidourle	6.83 (<1 - 783)	215.44	$0.051 \pm 0.016$
Rhône	1768.59 (322 - 10861)	55812.43	$10.147 \pm 3.360$

**Tableau 1.1 : Statistiques des débits solides et liquides des fleuves entourant le Golfe du Lion sur la période 1977-2004 (extrait de Bourrin et al., 2006).**

Le débit liquide annuel moyen de tous les fleuves côtiers vers le Golfe du Lion est de  $4441.10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$ , ce qui représente environ 8 % du débit liquide annuel moyen du Rhône (**Tableau 1.1**). Chamley (1971) évaluait son débit à  $55.10^9 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$ , soit une valeur supérieure à ceux du Nil et du Pô. En outre, le débit solide en suspension annuel moyen de ces fleuves approche  $0.637.10^6 \text{ t}.\text{an}^{-1}$ , soit 6.3 % de celui du Rhône. L'Hérault est le second fleuve du Golfe du Lion en terme de débit liquide annuel ( $1281.10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$ ) mais le troisième en terme de débit solide annuel ( $0.088.10^6 \text{ t}.\text{an}^{-1}$ ), alors que l'Aude est respectivement seconde avec  $1197.10^6 \text{ m}^3.\text{an}^{-1}$  et première avec  $0.194.10^6 \text{ t}.\text{an}^{-1}$  dans ce classement.

Des relations log-log ont été établies pour estimer les concentrations en matières en suspension (MES) en fonction du débit liquide. Elles diffèrent évidemment selon le fleuve et le bassin versant ciblés (**Tableau 1.2**).

La nature des apports et leur taux d'accumulation diffèrent également selon les mêmes critères mais également selon la proximité à l'embouchure et la profondeur de prélèvement. Roussiez et al. (2006) mirent en évidence l'importance de la concentration en carbone organique et de la fraction silteuse sur la régulation de la contamination métallique (Cd, P, Cu, Pb et Zn). Miralles et al. (2005) déterminèrent des taux de sédimentation dans tout le Golfe du Lion par le biais de la méthode au  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Ils évaluèrent des valeurs moyennes allant de  $0.02 \text{ cm}.\text{an}^{-1}$  dans les plaines abyssales,  $0.1 \text{ cm}.\text{an}^{-1}$  dans les canyons,  $0.2 \text{ cm}.\text{an}^{-1}$  sur le plateau continental à  $0.65 \text{ cm}.\text{an}^{-1}$  en bordure du prodelta du Rhône.

Fleuves	Relation concentration-débit	Références
Tech	$C=1.2485Q_i+6.0628$ ( $r^2=0.61$ , $n=250$ , $p<0.0001$ )	RMC data bank
Têt	$\log C=0.3866\log Q_i^2-0.0846\log Q_i+1.011$ ( $r^2=0.60$ , $n=1805$ )	Serrat et al. (2001) + RMC data bank and POEM station measurements
Agly	$Q_s=13.27Q_{dm}^{1.434}$ for $Q_{dm}>50\text{ m}^3/\text{s}$ and $Q_s=0.541Q_{dm}^{1.1829}$ for $Q_{dm}<50\text{ m}^3/\text{s}$ ( $r^2=0.81$ , $n=195$ )	Serrat (1999)
Aude	$\log C=0.1666\log Q_i^2-0.0872\log Q_i+1.42041$ ( $r^2=0.30$ , $n=80$ )	RMC data bank+ unpublished data
Orb	$C=0.0018Q_i^2-0.0228Q_i+13.92$ ( $r^2=0.50$ , $n=242$ )	RMC data bank + unpublished data
Hérault	$\log C=1.9247\log Q_i^2-4.3949\log Q_i+2.7407$ ( $r^2=0.70$ , $n=38$ )	ORME data bank (Ludwig, 2003)
Lez	$C=1.9177Q_i+8.0411$ ( $r^2=0.41$ , $n=241$ , $p<0.0001$ )	RMC data bank
Vidourle	$\log C=0.2443\log Q_i^2+0.1827\log Q_i+0.6983$ ( $r^2=0.57$ , $n=27$ )	RMC data bank
Rhône	$\log C=1.5006\log Q_i^2-8.1858\log Q_i+12.416$ ( $r^2=0.75$ , $n=521$ )	Pont (1997) + RMC data bank

**Tableau 1.2 : Equations mettant en relation le débit liquide instantané  $Q_i$  ou moyen  $Q_{dm}$  du fleuve ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et sa concentration en matières en suspension  $C$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) ou sa charge solide en suspension quotidienne  $Q_s$  ( $\text{t.j}^{-1}$ ), obtenue selon une compilation des sources affichées en références (Bourrin et al., 2006).**

## 1.2. Le Rhône et son bassin versant

### 1.2.1. Présentation générale

De tous les fleuves se jetant dans le Golfe du Lion, le Rhône est le plus important, tant au niveau du débit liquide que de l'apport de matière particulaire. Long de 814 km et prenant sa source à 1753 m d'altitude dans les Alpes Suisses, il possède un bassin versant balayant près de 96500 km<sup>2</sup>, soit un cinquième du territoire français environ.

Une multitude d'affluents rejoint le Rhône sur son parcours à travers le sud-est de la France. De par leurs propres bassins versants, leurs conditions climatiques différentes et leur pente (**Figure 1.6**), ils contribuent fortement aux apports liquides et solides du fleuve Rhône.

La composante alpestre suisse représente 10 % de la superficie du bassin rhodanien alors que la Saône draine le seul bassin de plaine représentant 30 % de la superficie totale.

Le Rhône est remarquable par sa composante montagnarde au relief élevé et accidenté qui conditionne les facteurs climatiques et hydrologiques du bassin.

Ses principaux affluents (**Figure 1.7**), à savoir l'Ain (3750 km<sup>2</sup>), la Saône (30000 km<sup>2</sup>), l'Isère (11800 km<sup>2</sup>) et la Durance (14300 km<sup>2</sup>) sont soumis à des influences climatiques variées : océaniques et méditerranéennes, dont les effets sur les crues sont différents.

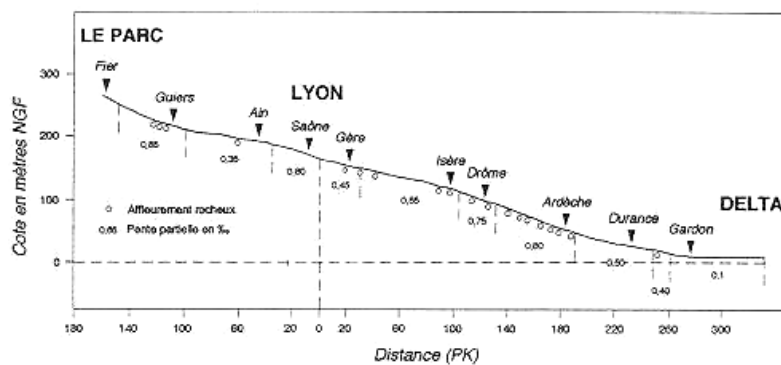


Figure 1.6 : Profil du Rhône et points de confluence dans sa partie française (Arnaud-Fassetta, 1998).



Figure 1.7 : Carte hydrographique du bassin versant du Rhône (Maillet, 2005).

Par l'étendue de son bassin versant, le Rhône lessive ainsi une grande diversité de terrains géologiques et subit des conditions climatiques variées (Rolland, 2006).

Le fleuve circule en effet du nord au sud à travers les calcaires du Jura Méridional, les calcaires et marnes sableuses du Dauphiné, les roches cristallines du Massif Central, les calcaires du Vercors, les massifs cristallins des Cévennes et les calcaires des Garrigues (affluents de la rive droite), les terrains détritiques des affluents de la rive gauche, les zones alpines ainsi que le bassin néogène de la Durance, pour étaler son delta (500 km<sup>2</sup>) à partir d'Arles dans des formations quaternaires.

La variabilité et la nature des grains reflètent la source sédimentaire (lithologie, sols, colluvions). Les cortèges alpins sont caractérisés par la présence d'illite en abondance et d'illite-chlorite interstratifiées alors que les formations lithologiques de Basse Provence livrent surtout de la smectite (Chamley, 1971 ; Roditis, 1993).

## 1.2.2. Hydrologie

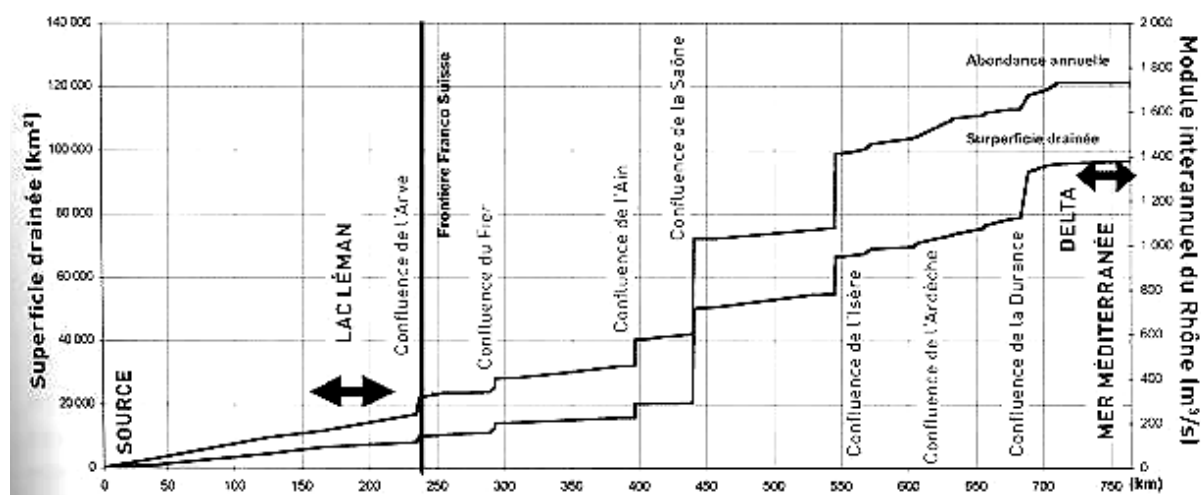
Le Rhône se sépare en Petit et Grand Rhône au niveau de la ville d'Arles. Le premier possède un débit liquide moyen équivalent à un dixième du second. La charge solide moyenne respecte la même proportion.

Un fleuve se caractérise principalement par son débit liquide et particulièrement les valeurs minimum (étiage), maximum (crue) et moyenne.

Concernant le Rhône, le débit caractéristique d'étiage, c'est-à-dire le débit seuil au-dessous duquel le fleuve est considéré en étiage, a été établi à  $520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la période 1920-2002. Le minimum de  $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a été relevé en 1921 par Pardé (1925).

Le débit de crue du Rhône est défini par un événement durant lequel la charge liquide augmente. Il peut être du à la fonte des neiges ou à des pluies importantes. Le débit seuil de crue du Rhône varie entre  $3000$  et  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  selon la littérature.

Le débit moyen annuel est obtenu en faisant la moyenne des débits mensuels sur une période donnée. Il est évalué à environ  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et Rolland (2006) l'a évalué à  $1714 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour la période 1920-2002, ce qui correspond à  $5.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$  d'eau à la Méditerranée.



**Figure 1.8 : Evolution des superficies drainées et de l'abondance annuelle du Rhône (Source CNR).**

La superficie drainée suit la même évolution que le débit moyen du Rhône (**Figure 1.8**) et les quatre affluents majeurs contribuent à 55 % de l'abondance du fleuve (**Tableau 1.3**).

La variété des climats et régions drainées confère au Rhône un régime complexe qui regroupe trois composantes : glaciale, nivale et pluviale. Par cette triple alimentation, les apports du Rhône sont diversifiés et abondants toute l'année, ce qui lui donne un régime saisonnier assez régulier qui présente des nuances tout au long de son cours :

- le Rhône Alpestre, le Haut Rhône français ainsi que l'Isère ont un régime nivo-glaciaire aux hautes eaux d'été, le Rhône Alpestre ayant un régime glaciaire.
- la Saône et l'Ain ont un régime océanique avec de hautes eaux hivernales dues aux pluies et de basses eaux estivales. L'influence nivale de l'Ain gonfle les débits printaniers du fleuve.
- les affluents méditerranéens du Rhône aval connaissent de sévères étiages estivaux et des crues rapides en automne.

Affluents du Rhône	Arve	Ain	Saône	Isère	Rhône
Débit moyen annuel ( $m^3.s^{-1}$ )	335	455	600	1400	1700
Débit d'étiage ( $m^3.s^{-1}$ )	120	180	215	480	580
Débit crue annuelle ( $m^3.s^{-1}$ )	700	990	1460	2415	4280
Débit crue décennale ( $m^3.s^{-1}$ )	1200	1800	3100	5600	8400
Débit crue centennale ( $m^3.s^{-1}$ )	1450	2400	4250	7500	11300
Débit crue millénaire ( $m^3.s^{-1}$ )	1800	2950	5300	9350	14150

**Tableau 1.3 : Régimes hydrologiques des principaux affluents du Rhône (Sources : Compagnie Nationale du Rhône et Etablissement Public Territorial du Bassin-Territoire Rhône).**

Sur le territoire français, le Rhône est par ses dimensions le deuxième fleuve du pays derrière la Loire (117000 km<sup>2</sup>) et dépasse de peu la Seine (78650 km<sup>2</sup>) mais il possède le plus fort débit moyen avec 1700 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> contre respectivement 900 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et 400 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Seul le Rhin a une charge liquide supérieure à celle du Rhône (2200 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) mais son embouchure se trouve à l'extérieur du pays.

Fleuve	Surface du bassin (km <sup>2</sup> )	Longueur (km)	Débit moyen (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Débit spécifique (L.s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup> )
Rhône	96500	810	1700	17.6
Amazone	6150000	6570	200000	32.5
Nil	3400000	6690	2800	0.82
Mississippi	3238000	3780	20000	6.17
Danube	801500	2870	6500	8.11
Rhin	185000	1320	2200	11.9

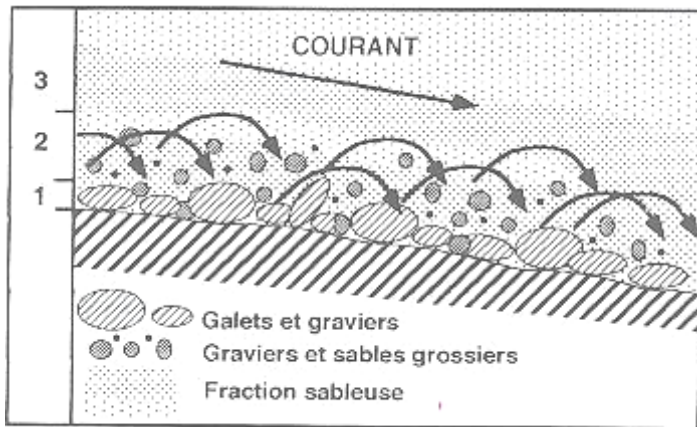
**Tableau 1.4 : Comparaison des caractéristiques de quelques fleuves du monde (Bravard et Clemens, 2008).**

Sur le plan international, il se place parmi les fleuves les plus importants en matière de débit spécifique puisque sa valeur est de 17.6 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> contre 0.82 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> et 6.17 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> pour respectivement le Nil et le Mississippi (**Tableau 1.4**). L'Amazone accuse un débit spécifique de 32.5 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> pour un débit moyen annuel de 200000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Il est l'exemple même du type de fleuve biostatique et peu anthropisé.

### 1.2.3. Transport sédimentaire

Le transport sédimentaire est effectué dans le Rhône selon deux modes : en suspension et par charriage (**Figure 1.9**). Le premier phénomène prime généralement sur le second, selon la masse et le diamètre des particules transportées. Les matériaux grossiers nécessiteront une intensité de courant plus importante que les matériaux fins pour être mis en mouvement (**Figure 1.10**). Ils se déplaceront d'ailleurs préférentiellement par saltation ou charriage alors que les particules fines seront transportées en suspension dans la colonne d'eau, suivant les courants horizontaux et verticaux et soumises à leur propre masse (vitesse de chute).

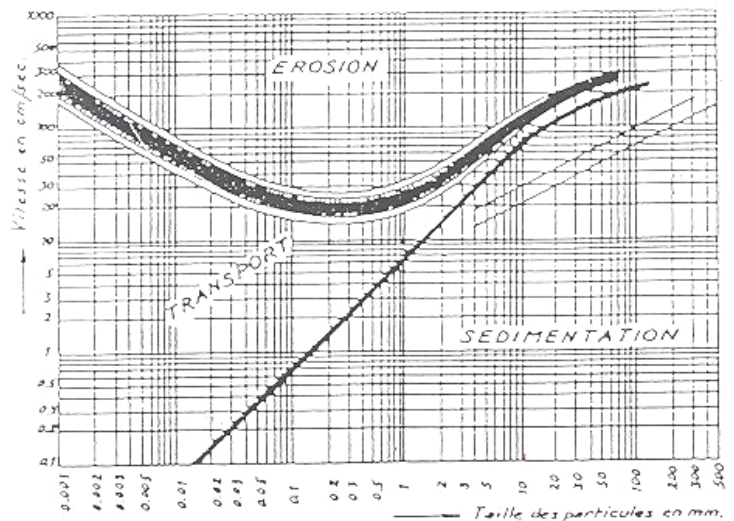
La taille des particules peut évoluer le long du fleuve en fonction de l'intensité du courant mais également des processus d'agrégation et floculation dans l'estuaire.



1 - charriage et roulement, 2 - saltation, 3 - suspension

Figure 1.9 : Modes de transport de la charge de fond.

Figure 1.10 : Diagramme de Hjulstrom mettant en relation la taille des particules en mm et la vitesse du courant en  $\text{cm.s}^{-1}$ .



### 1.2.3.1. Transport en suspension

Il n'existe pas exactement de relation directe entre le débit et la concentration en MES. Différents auteurs proposent leur équation :

Thomas (1997):  $\ln \text{CSS} = 13.2 - 4.45 \ln Q + 0.42 (\ln Q)^2$

Pont et al. (2002):  $\log \text{CSS} = 1.749 \log Q - 3.915$

Rolland (2006):  $\log \text{CSS} = 2.17 \log Q - 5.4$

avec CSS la concentration de la Charge Solide en Suspension en  $\text{g.L}^{-1}$  et Q le débit liquide en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ . La charge en MES moyenne pour un débit d'étiage ( $<700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) est estimée entre 0.01 et 0.1  $\text{g.L}^{-1}$ , pour un débit moyen ( $1700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) entre 0.04 et 0.2  $\text{g.L}^{-1}$  et pour un débit de crue ( $>4000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) entre 0.3 et 6  $\text{g.L}^{-1}$ . Roditis et Pont (1993) ont évalué que 80 % de la charge solide étaient apportées en seulement 20 % du temps, notamment par les crues.

La station SORA, située en Arles, effectue des prélèvements automatiques journaliers de l'eau de surface du fleuve. La fréquence d'échantillonnage peut être augmentée en période de crue. La charge en suspension est alors calculée même si les résultats superficiels ne permettent pas de conclure sur la totalité de la section mouillée, puisque les concentrations en MES ne sont homogènes ni sur la colonne d'eau, ni sur la largeur du fleuve.

Néanmoins, Antonelli (2002) assure que la concentration en MES est homogène sur l'ensemble de la section d'écoulement lorsque le débit observé en Arles est inférieur à  $3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Au-delà de cette valeur, elle constate

une augmentation de la charge en suspension depuis les berges vers le centre du chenal et de la surface vers le fond.

La concentration en MES a changé dans le Rhône au cours du temps avec l'apparition d'installations d'ouvrages hydrauliques sur tout le bassin versant depuis 1899. Surell (1847) mesura les premières charges solides en suspension en Arles et estima les turbidités équivalentes à 171 mg.L<sup>-1</sup> en étiage, 5.2 g.L<sup>-1</sup> au maximum des crues et 600 mg.L<sup>-1</sup> en moyenne (Noël, 1996). Dans la période 2002 à 2004, entre les 19 usines, barrages et écluses jonchant le Rhône, Rolland (2006) a évalué la charge solide en étiage entre 2 et 90 mg.L<sup>-1</sup> et en crue entre 63 et 3689 mg.L<sup>-1</sup>, soit la moitié de la turbidité mesurée un siècle et demi plus tôt.

Source	Débits (m <sup>3</sup> /s)	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins <sup>1</sup>	Sables moyens	Sables grossiers
Lorgere <sup>2</sup> (1957)	470 à 9 520	1 à 75% (d<5 µm)	0 à 61% (< 11 µm)	0 à 85% (<34 µm)	1 à 81% (d<125 µm)	0 à 36% (d>125 µm)	
Savey et Deléglise (1957)	-	20 à 25%	50 à 55%		20 à 30%		0
El Habr et Golterman (1987)	-	16 à 32%	18 à 34,2%	9,7 à 21,8%	7,8 à 11%	4,7 à 10,4%	4 à 34,5%
Roditis (1993)	1 698 à 5 604	9 à 45%	55 à 86%		0 à 5%		
Pont <sup>2</sup> (1992)	1 860 à 5 251	12 à 40%	40 à 70% (<10 µm)	5 à 32% (<63 µm)	0	0	0
Santiago et al., (1992)	-	21,3%	69,1%		9,6%		
Arnaud et Mannino (2001)	1 600 à 4 900	6 à 66%	20 à 81%	0 à 35%	0 à 44%	0 à 34%	0 à 7%

**Tableau 1.5 : Caractéristiques granulométriques des MES du Rhône aval (Antonelli, 2002).**

Pont (1997) met en évidence une augmentation de la fraction argileuse durant les crues alors que Antonelli et al. (2008) n'ont pas observé de réelle variation lors de la crue exceptionnelle de décembre 2003. La charge en suspension totale est globalement composée de 18 % d'argiles (< 4 µm), de 80% de silts (entre 4 et 63 µm) et de 2% de sables (> 63 µm). Ces valeurs donnent un ordre d'idée car il existe une très grande variabilité autour de ces valeurs en réalité (**Tableau 1.5**).

La présence d'ouvrages, les méthodes d'analyses et la différence des saisons de prélèvements s'ajoutent à l'impact du changement climatique pour expliquer l'évolution de la concentration en MES au cours du temps ainsi que la diminution du transport par charriage (**Tableau 1.6**).

#### 1.2.3.2. Transport par charriage

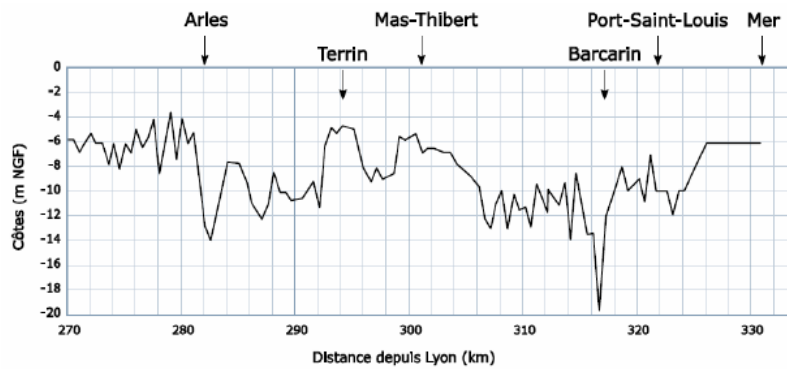
Le transport par charriage met particulièrement en mouvement des sédiments grossiers (sables, graviers) et s'effectue donc principalement dans le lit du chenal où l'hydrodynamique est la plus importante en raison de l'absence de l'effet de bords (amplification des frottements au niveau des rives).

Ce type de transport a diminué dans le Rhône aval à cause des aménagements du Rhône, notamment des barrages. Il est évalué en amont de Arles entre 0.065 10<sup>6</sup> et 10.7 10<sup>6</sup> tonnes par an (**Tableau 1.6**) contre 10 106 tonnes par an pour le transport en suspension (Bourrin et Durrieu de Madron, 2006). Les travaux de Antonelli (2002)

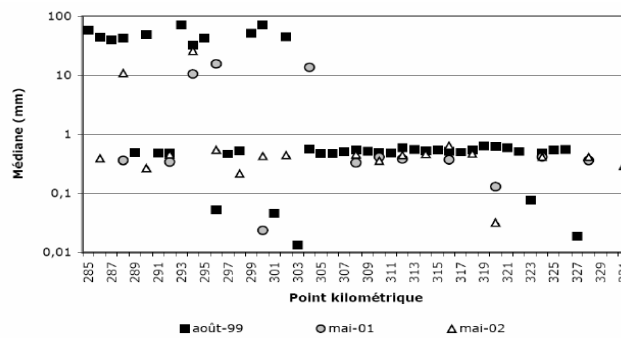
permettent d'avoir une idée de la répartition granulométrique des sédiments dans le Rhône amont, tant longitudinalement que latitudinalement.

La granulométrie du lit sédimentaire est fortement conditionnée par la morphologie accidentée du chenal du Rhône (**Figure 1.11**). Trois grandes zones sont alors distinctes sur le chenal deltaïque (**Figure 1.12**) :

- la partie amont du chenal (PK 286 à 304) montre une granulométrie grossière avec des graviers et des galets (la médiane atteignant 10 cm),
- la partie médiane (PK 304 à 320) voit une granulométrie homogène avec une majorité de sables grossiers (la médiane étant de l'ordre de 0.8 mm),
- la partie plus aval (PK 320 à embouchure) présente une variabilité plus importante et une tendance au dépôt de particules plus fines (médiane < 0.1 mm).



**Figure 1.11 : Profil longitudinal du Grand Rhône depuis une zone 12 km en amont de Arles jusqu'à l'embouchure (Antonelli (2002) d'après des données CNR).**



**Figure 1.12 : Variation du diamètre médian des particules prélevées au fond du chenal du Grand Rhône depuis Arles jusqu'à l'embouchure (Antonelli, 2002).**



AUTEURS	MATIERE EN SUSPENSION		CHARGE DE FOND		PERIODE CONCERNEE
	Masse (10 <sup>6</sup> .T.an <sup>-1</sup> )	Volumes (10 <sup>6</sup> .m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )	Masse (10 <sup>6</sup> .T.an <sup>-1</sup> )	Volumes (10 <sup>6</sup> .m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )	
Surell, 1847	27.2	17.0			1809-1837
De Roy, 1851	10.1	6.3	7.02	2.7	1841-1851
Guérard, 1895	8.36	5.22			1869
Guérard, 1895	5.76	3.60			1870
Guérard, 1895*		11.9 x 10 <sup>5</sup> .T.an <sup>-1</sup> / 18 x 10 <sup>6</sup> . m <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup>			1841-1872
Parde, 1925	25-30	18.75			Première partie du 20 <sup>ème</sup> siècle
Gemaehling et al., 1957			1.9	0.73	
Lorgere, 1957	13	8.12			
Henry et Gemaehling, 1958			3.1	1.20	
Van Straaten, 1959	5.5	3.44			
Gemaehling, 1962			0.91	0.35	
Baraillet et Bonnet, 1964	11.8	7.37			1956-1957
Larras, 1964	33.6	21			
Savey et Deleglise, 1967	5.1	3.19	0.26 to 0.13	0.1 to 0.05	1967
Colleman et Wright, 1975	64	40			
Pauc, 1976	2.2	1.37			
Blanc, 1977	2.2	1.37			
Ramette et Heuzel, 1982			0.06	0.022	
Milliman et Meude, 1983	31.0	19.37			Avant les barrages
El Habr et Golterman, 1987	2.6	1.62			
Leveau et Coste, 1987	6.0	3.75			1987
Cottureau, 1988			0.91	0.35	
Dugas, 1989	0.003 to 1.92	0.002 to 1.2		0.41 to 1.38	Synthèse de plusieurs travaux
Roditis, 1993	7.2	4.5			
Roditis et Pont, 1993	8	5			Pendant 7 mois en 1992
Bellaiche et Mart, 1995					
Pont et Blombéd, 1995	13.93	8.7			1994-1995
Arnaud-fassetta, 1997			5	1.91	1993
Arnaud-fassetta, 1997			10.7	4.12	1994
SOGREAH, 1999	13	8.12			Sept 1956 à Sept 1957
Antonelli 2002	6.8-11.8	4.25-6.9	0.6	0.23	1961 à 1996 / Mai 2000 à Mai 2001
Pont et al., 2002	7.4	4.62			1967 à 1996

Tableau 1.6 : Estimation des MES annuelles transportées par le Rhône (Maillet, 2005)

Des zones de stockage sédimentaire se mettent en place au cours du temps et des périodes météo-climatiques intenses. L'embouchure et le littoral rhodaniens montrent également leur sensibilité aux phénomènes de crue en présentant des zones érodées et engraisées (Blanc, 1977).

#### 1.2.4. Phénomènes de crue

Les événements de crue n'ont pas tous la même influence sur les flux et la nature de sédiments selon leur origine, leur durée et leur chronologie. Diverses études ont ainsi montré qu'ils étaient responsables de plus de 85 % du transport sédimentaire et 70 % des flux de certains radioéléments ( $^{137}\text{Cs}$  notamment) en moins de 5 % du temps (Rolland, 2006 ; Miralles et al., 2006).

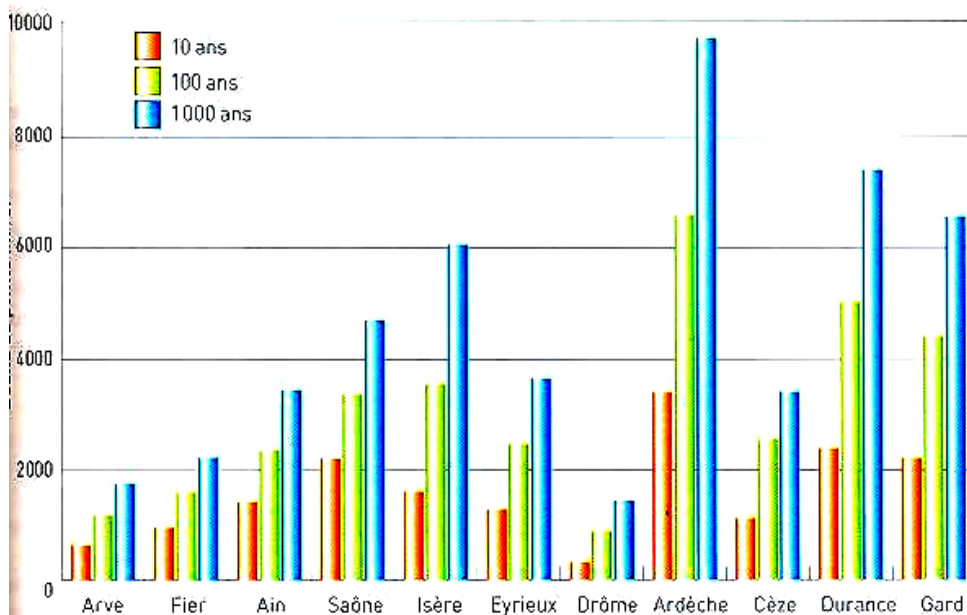
##### 1.2.4.1. Typologie des crues

L'étendue du bassin versant du Rhône est à l'origine de la diversité des crues qui touchent le fleuve (**Figure 1.13**), puisque, comme il a été écrit précédemment, les conditions météo-climatiques et la lithologie sont différentes d'une zone à une autre.

Pardé (1925) a dressé une classification des crues sur laquelle ses successeurs se sont basés pour effectuer leurs études :

- Les crues cévenoles : elles sont la conséquence d'événements pluvieux d'origine méditerranéenne remontant la Vallée du Rhône et affectant les affluents venant du massif des Cévennes (Ardèche, Cèze, Gard). Elles sont caractérisées par un régime torrentiel, rapide et violent et se produisent généralement en automne.
- Les crues méditerranéennes (dites extensives) : elles sont liées à des événements pluvieux affectant les affluents cévenols mais également les affluents méridionaux comme la Durance, l'Ouvèze, l'Aygues et la Drôme, ainsi que le sud du bassin versant de la Saône parfois. Elles se produisent en automne et quelquefois au printemps.
- Les crues océaniques : issues d'événements de pluie résultant de dépressions océaniques (Océan Atlantique), ces crues affectent le nord du bassin versant rhodanien et particulièrement les sous-bassins de la Saône et ceux au nord de Valence. Leur montée est plutôt lente et régulière. Elles se produisent entre les mois d'octobre et de mars.
- Les crues généralisées : elles sont une combinaison des crues décrites plus haut. Elles peuvent se produire simultanément ou se succéder et apparaître en automne et en avril-mai.

Les régimes glaciaires et nivaux sont à prendre en compte sur l'hydrologie du Rhône car ils peuvent entraîner la création de crues alpines. Celles-ci, liées respectivement à la fonte des glaciers alpins et des neiges des massifs des Alpes et du Jura, peuvent engendrer de forts débits entre les mois de juin et d'août pour la première et entre mars et juin pour la seconde.



**Figure 1.13: Débits des affluents pour les crues de période de retour 10, 100 et 1000 ans.**

#### 1.2.4.2. Temps de retour et enregistrement historique des crues

L'Ardèche, la Durance, le Gard, l'Isère et la Saône jouent des rôles prépondérants dans l'initialisation et la propagation des crues dans le Rhône. Des débits de crues décennale, centennale et millénale, c'est-à-dire dont la fréquence de retour est estimée à 10 ans, 100 ans et 1000 ans, sont imaginés pour caractériser l'amplitude de ces événements extrêmes.

L'Ardèche présente des débits de crues décennale de  $3400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , centennale de  $6500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et millénale de  $9700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (**Figure 1.13**) contre, respectivement pour le Rhône, des valeurs  $8400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $11300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $14150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (**Figure 1.8**).

La DIREN Rhône Alpes a enregistré les plus fortes crues annuelles du Rhône à Beaucaire depuis 1840. La crue exceptionnelle du 3 décembre 2003 atteignant un débit de près de  $11500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  se place historiquement en seconde position derrière celle du 31 mai 1856 où le débit du Rhône a dépassé  $12500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Bravard et Clémens, 2008). Elle est qualifiée de crue méditerranéenne extensive avec un temps de retour supérieur à 100 ans (Rolland, 2006).

Trois des cinq crues les plus extrêmes depuis que les débits du Rhône sont enregistrés se sont produites ces quinze dernières années, puisqu'en octobre 1993 et en janvier 1994 les charges liquides du fleuve ont été respectivement mesurées à  $9800$  et  $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

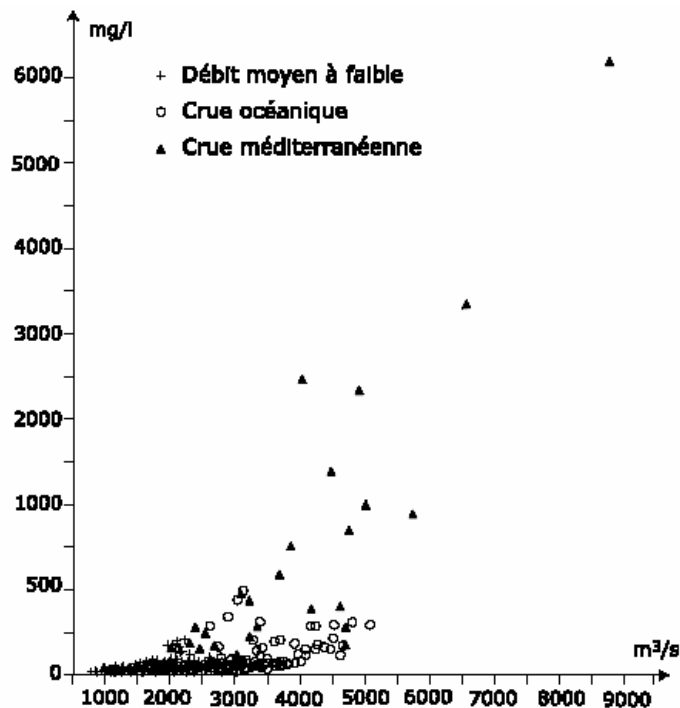
#### 1.2.4.3. Influence de l'origine des crues sur la concentration en MES

L'origine des crues, donc la zone du bassin versant affectée et la variabilité saisonnière de sa capacité d'érosion, est un paramètre qui joue un rôle important sur la concentration en MES dans le fleuve. Les éléments

issus d'un milieu à lithologie pulvérulente (terres alluvionneuses) sont plus facilement enclins à se retrouver en suspension dans l'eau que ceux d'un substrat rocheux ou induré (rocs alpins).

De fait, les crues méditerranéennes, mettant en scène les affluents du Rhône, tant originaires de l'ouest (cévenols) que de l'est (Durance, etc.), drainent de plus fortes concentrations en MES que les crues océaniques, issues du nord du bassin rhodanien (**Figure 1.14**). Les premières entraînent des débits du Rhône bien supérieurs aux secondes (respectivement 5000 et 9000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) et les concentrations atteignent difficilement 500 mg.L<sup>-1</sup> lors des crues océaniques contre plus de 6 g.L<sup>-1</sup> pendant les crues méditerranéennes. Ces échelles de valeurs ont été confirmées par Rolland (2006) alors qu'il étudiait la crue extrême de décembre 2003.

Il affirme que si la concentrations en MES augmente globalement avec le débit selon une régression non-linéaire de type  $y=ax^b$ , elle est également liée à l'occurrence et la chronologie des événements de crue. Pont et al. (2002) ont montré que les événements de type méditerranéen étaient caractérisés par des capacités de transport de matériaux particulaires plus importantes que les autres types de crue. Ils ont d'ailleurs proposé un modèle « Débit – Concentration en MES – Origine des crues », appliqué et vérifié lors de la période 2002-2004 analysée par Rolland (2006).



**Figure 1.14 : Variabilité des concentrations en MES en fonction de l'origine hydro-sédimentaire des crues (Pont, 1997).**

Outre le fait d'avoir confirmé l'influence de l'origine des crues sur la charge solide en suspension annoncée par Pont et al. (2002), Rolland (2006) a également démontré que les premiers événements d'une période de crue remobilisaient une grande partie du matériel particulaire accumulé auparavant et que ce processus d'épuisement des stocks sédimentaires disponibles contribuait à l'effet d'hystérésis prograde caractérisant l'évolution de la concentration en MES durant un événement de crue (**Tableau 1.7** et **Figure 1.15**).

Evénements de crues		Durée de l'événement	Date des pics de crues	Débit des pics de crues ( $m^3.s^{-1}$ )	Type de crue	Période de retour
Evénement 1:	Septembre 2002	40 heures	10/09/2002	9019	Méditerranéenne	50-60 ans
Evénement 2:	Novembre 2002	25 jours	1er pic (16/11/02)	8100	Généralisée	10-20 ans
			2ème pic (26/11/02)	9100		50-60 ans
Evénement 3:	Decembre 2003	5 Jours	03/12/2003	11500±600	Méditerranéenne extensive	>100 ans
Evénement 4:	Janvier 2004	10 jours	15/01/2004	3900	Océanique	1-2 ans
Evénement 5:	Oct. et Nov. 2004	9 Jours	1er pic (29/10/04)	4400	Généralisée	1-2 ans
			2ème pic (05/11/04)	4000		

Tableau 1.7 : Caractéristiques des crues étudiées par Rolland (2006) entre 2002 et 2004.

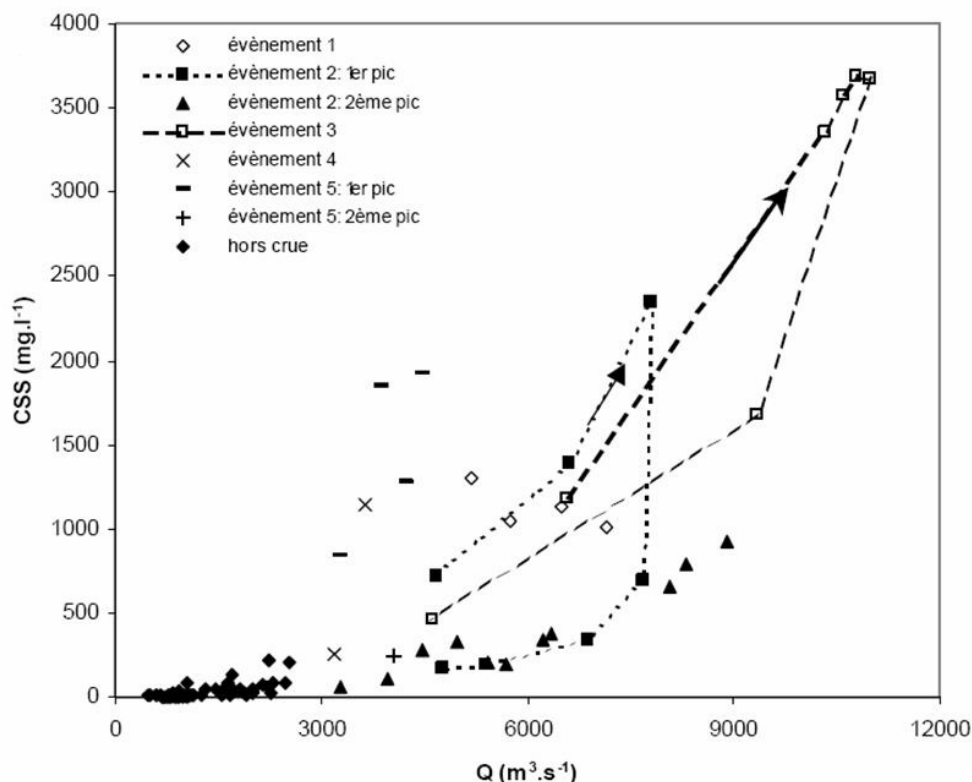


Figure 1.15 : Evolution de la charge solide en suspension (CSS) en fonction du débit du Rhône (Q) en Arles (Rolland, 2006). Discretisation des différents événements de crues suivis pendant la période d'étude. La numérotation des événements fait référence au Tableau 1.6. Les flèches indiquent le sens des deux cycles d'hystérésis observés lors des crues de la période d'étude.

Roditis (1993) parvint à caractériser l'origine même des crues en fonction de l'étude minéralogique de la matière en suspension, notamment des argiles. En temps normal, l'illite est le type d'argile courant en suspension. Les crues méditerranéennes apportent ainsi une grande quantité de smectite alors que les cortèges alpins sont la principale source d'illite et d'interstratifiées illite-chlorite.

Les crues ne transportent pas que des matériaux fins comme les argiles mais également des particules plus grossières, telles que des silts et des sables, en suspension et par charriage. Des analyses effectuées sur des

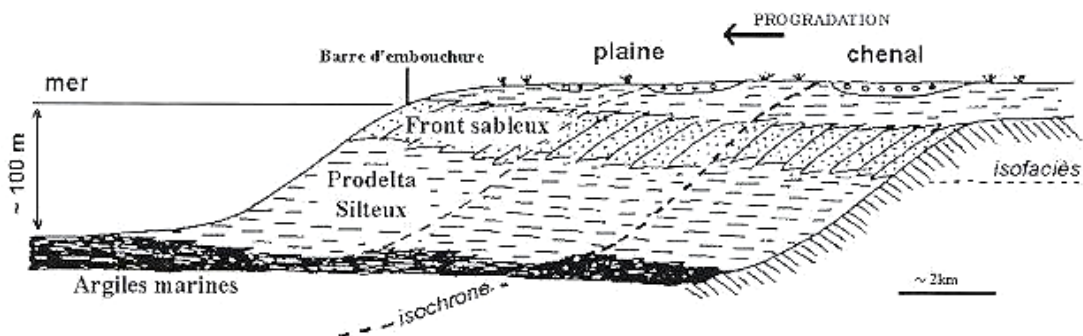
sédiments en suspension et des dépôts sédimentaires ont montré que la crue de décembre 2003 a transporté 3.7 Mt de silts, 0.85 Mt de sables et 0.84 Mt d'argiles, soit 5.4 Mt de sédiments en suspension (Antonelli et al., 2008).

### 1.3. Le prodelta rhodanien

#### 1.3.1. Description

Le prodelta est défini comme étant la partie sous-marine du delta aérien à la base du front deltaïque, constituée de l'ensemble des lobes d'épandage actuels et anciens d'un fleuve (**Figure 1.16**). Il est édifié au droit d'une embouchure active et comprend deux parties : la première, sommitale, où sont présents des sédiments grossiers, une barre d'embouchure sub-émergente et de fortes contraintes d'érosion, est située au-dessus de la limite d'action des houles. La seconde, basale et profonde, voit des sédiments fins et gorgés d'eau se déposer par décantation (Maillet, 2005). En outre, La matière organique et les particules fines qui s'y accumulent forment des ligands qui jouent un rôle important dans le piégeage des contaminants (sous forme cationique notamment).

Les prodeltas sont qualifiés de sites d'accumulation préférentiels à l'embouchure des fleuves sous la limite d'action des vagues, c'est-à-dire 20-30 m de profondeur (Aloisi et Monaco, 1975 ; Monaco, 1971 ; Bourrin et al., 2006). Ils sont également des acteurs majeurs dans le transfert de matières depuis le continent vers les eaux marines et les grandes profondeurs (**Figure 1.17**).



**Figure 1.16 : Séquence lithologique formée par la progradation d'un delta (Maillet, 2005, d'après Orton et Reading, 1993).**

La morphologie des deltas sous-marins varie avec le type d'embouchure rencontré, selon la classification de Galloway (1975) qui différencie les estuaires à dominance tidale, fluviale ou sous influence de la houle.

Le Rhône intègre les deux dernières catégories, tout comme le Pô (Nelson, 1970), l'Ebre (Maldonado, 1975) et le Nil (Stanley et Maldonado, 1977). D'une part, les apports du fleuve forment une barre d'embouchure de sédiments grossiers au front de l'exutoire qui limite l'action des houles et la remontée d'eaux de mer dans le fleuve (coin salé). D'autre part, les houles façonnent la barre d'embouchure par réfraction sur le sommet du front deltaïque en un large croissant sub-affleurant caractérisé par un profil transverse asymétrique (pente amont assez faible et pente aval très inclinée). Par la combinaison de ces deux incidences, la rencontre des eaux douces et salées engendrant un panache turbide de surface se complexifie car elle devient dépendante de l'afflux d'eau

douce et de sa charge solide mais également des propriétés physiques de l'eau de mer (température, salinité, vitesse du courant, vitesse orbitale des particules mues par les vagues, etc.).

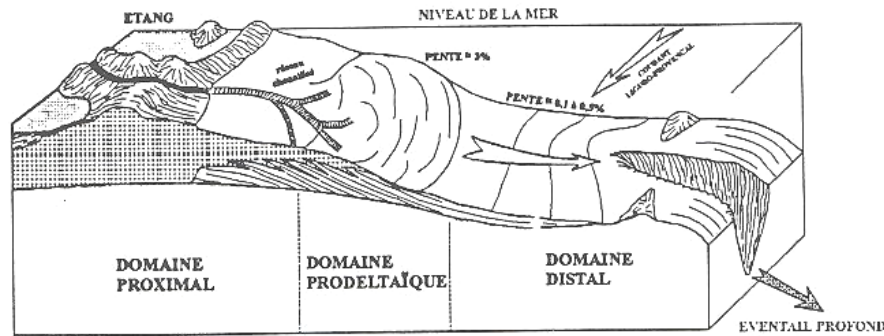


Figure 1.17 : Géométrie du prisme sédimentaire épicontinental (Aloisi et al., 1986).

### 1.3.2. Formation

La formation des prodeltas méditerranéens dépend de la dynamique microtidale estuarienne. Ils se forment dans des zones présentant un coin salé qui induit la formation de deux maxima de turbidité, créés par deux processus: d'une part, la chute du matériel de la taille des silts (4 à 63  $\mu\text{m}$ ), et d'autre part, le phénomène de floculation qui entraîne le dépôt de sédiments fins (Pauc, 1997 ; Pauc, 2005).

L'embouchure est la région où se confrontent eaux douces fluviales et eaux salées marines. Elle est le siège de phénomènes physico-chimiques de floculation et d'agrégation organo-minérale à l'origine de la formation en mer d'une structure hydrosédimentaire complexe: le néphéloïde. Ce phénomène assure le transport des particules fines dans l'aire littorale, de l'embouchure au large. Il est décomposé par Aloisi et al. (1982) en trois couches distinctes, formant le modèle multicouches de transfert des particules (**Figure 1.18**). Ce dernier est valable en présence de thermocline et pour de faibles débits du Rhône.

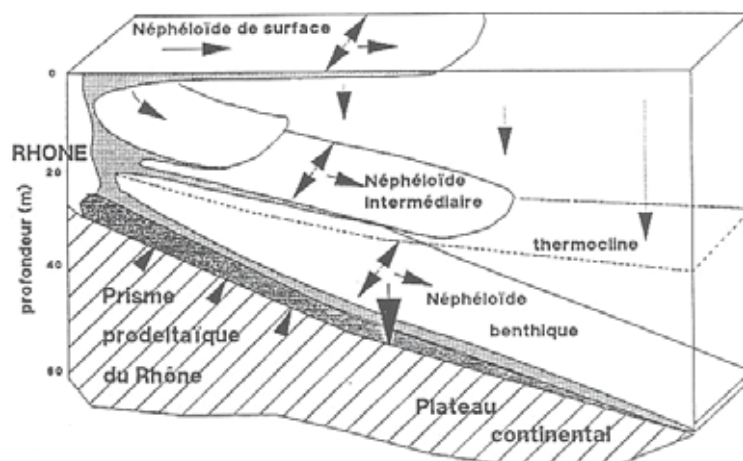


Figure 1.18 : Modèle de transfert multicouches de la zone littorale au large du Rhône (Aloisi et al., 1982).

Le modèle est donc constitué de plusieurs couches :

- une couche de surface d'eau saumâtre d'une épaisseur souvent inférieure à 1 m et dont la charge solide en suspension décroît rapidement de l'embouchure vers le large. Cette perte de matériel est estimée à 75% à 3 milles

de l'embouchure et constitue le panache rhodanien ou plume. Elle est expliquée par la chute brutale des MES en raison de phénomènes électro-chimiques amenant à la floculation, de processus mécaniques liant les particules entre elles et de la production de matière organique marine d'origine phytoplanctonique (Aloisi et al., 1982).

- une couche au contact du fond ou néphéloïde benthique, présente dès l'embouchure des émissaires et très développée sur les aires prodeltaïques. Il se forme dans le cours fluvial au niveau du coin salé : dès l'apparition du front de salinité, la matière se différencie en 2 couches (Aloisi, 1986). La couche de surface voit sa charge turbide diminuer fortement d'amont en aval au profit de la couche de fond formant une crème de vase. Ainsi, à 2 milles au large, 30 à 60 % des suspensions fines du néphéloïde de surface sont déjà passés dans la colonne d'eau (Naudin et al., 1992). Le transfert vertical de particules induit un gradient positif de concentration vers le bas. La charge varie globalement de 30 à 50 mg.L<sup>-1</sup> ce qui confère au néphéloïde de fond une importante capacité d'adsorption qui est à l'origine de l'édification d'aires prodeltaïques.

- des couches intermédiaires ou secondaires, faiblement chargées et pas forcément présentes, qui sont alimentées par la chute verticale de MES organo-minérales bloquées au niveau du gradient de densité. Les fluctuations de la profondeur du gradient de densité de faible amplitude, consécutives à l'alternance fréquente des deux régimes météorologiques dominants, expliquent vraisemblablement l'existence de plusieurs couches secondaires. Ces structures intermédiaires peuvent aussi se former par détachement du néphéloïde de fond à la rupture de pente et suivre les isopycnes pour alors se disperser au large (Sagnol, 1995).

Pauc (2005) étudia la formation de différents prodeltas méditerranéens comme ceux de l'Aude, de l'Orb et de l'Hérault. Il en déduisit que les épisodes de crues étaient les acteurs principaux dans la construction des prodeltas. En effet, en période de faibles débits, le coin salé remonte vers l'amont du delta et le fleuve présente ainsi une eau superficielle douce dans sa partie amont et une eau de fond salée dans sa partie aval. Lors des périodes de crues, la différence de salinité et de concentration en ions dissous entre les eaux douces et salées induit un processus physico-chimique de floculation de la fraction fine des sédiments décrit par Thill (1999). Deux maxima de turbidité existent tant que le fleuve fournit des MES (périodes de forts débits) : en amont du coin salé et au niveau du coin salé où les particules fines tendent à s'agréger. En début d'une période de crue, le coin salé est expulsé du chenal lorsque la pression hydrologique est suffisante pour surmonter la structure salée des eaux de fond (Eyre, 1998). Le contact avec l'eau salée se produit hors de l'estuaire et de fortes charges de particules fines floculées se retrouvent sur le plateau interne formant le prodelta. Ces particules fines sont constituées de silts et d'argiles, dont la répartition à l'embouchure est régie par leur taille. Les smectites, étant les minéraux argileux les plus fins parmi la chlorite, l'illite et la kaolinite, sont présentes majoritairement dans les néphéloïdes de surface et de fond. Ainsi, quand le bassin versant draine des faciès sédimentaires contenant ces minéraux, deux dépocentres de smectites sont observés à la proche embouchure du fleuve et très loin au large.

### **1.3.3. Caractéristiques du prodelta rhodanien**

Le prodelta rhodanien se situe au débouché du Grand Rhône et sa limite bathymétrique est comprise entre 20 et 80 m de profondeur (Radakovitch et al., 1999). Une zone à l'embouchure d'une superficie de 30 km<sup>2</sup> a été étudiée par Noël (1996) et de 500 km<sup>2</sup> par Lansard (2005). La proportion de sédiments issus du Rhône est



estimée à 54 % par le premier et près de 100 % par le second. Il reçoit environ 6 Mt de sédiment chaque année (Pont, 1997) qui se déposent et se remobilisent au gré des courants et des houles (Migniot, 1977).

Concernant la granulométrie de la colonne sédimentaire, la barre d'embouchure est majoritairement constituée de sables dont le diamètre est compris entre 120 et 430  $\mu\text{m}$ . Cette fraction sableuse égale la fraction vaseuse dès l'isobathe 15 m puis elle diminue rapidement avec la profondeur pour devenir minoritaire devant les silts et argiles totalisant plus de 85 % des sédiments. En outre, la médiane à l'isobathe 20 m est d'environ 15  $\mu\text{m}$ . Concernant la granulométrie de la colonne d'eau, le spectre de tailles de particules in-situ des sédiments du panache du Rhône varie beaucoup en fonction des conditions météorologiques. Des particules en suspension de tailles supérieures à 100  $\mu\text{m}$  ont été observées dans la partie aval du Rhône et au niveau du prodelta (Thill, 1999 ; Thill et al., 2001).

Etant une zone de transit et d'accumulation préférentielle des matériaux terrigènes, le prodelta voit sa morphologie changer régulièrement selon les événements hydrologiques et météo-climatiques. Depuis des décennies, de nombreux sondages bathymétriques ont permis de donner une idée physique du prodelta avec sa prééminence sommitale et sa pente non-négligeable de 5° environ (Figures 1.19 et 1.20).

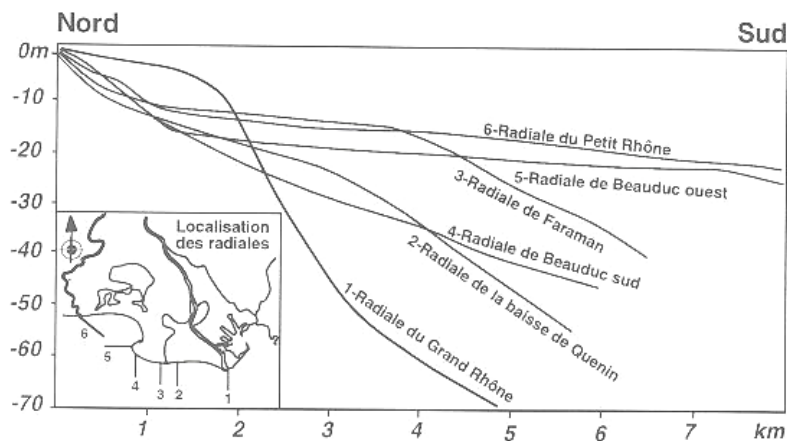


Figure 1.19 : Profils bathymétriques à l'ouest de l'embouchure du Rhône (Kruit, 1955).

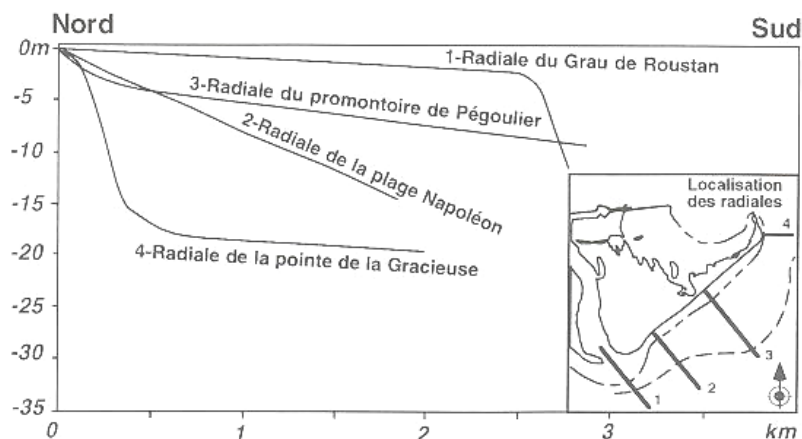
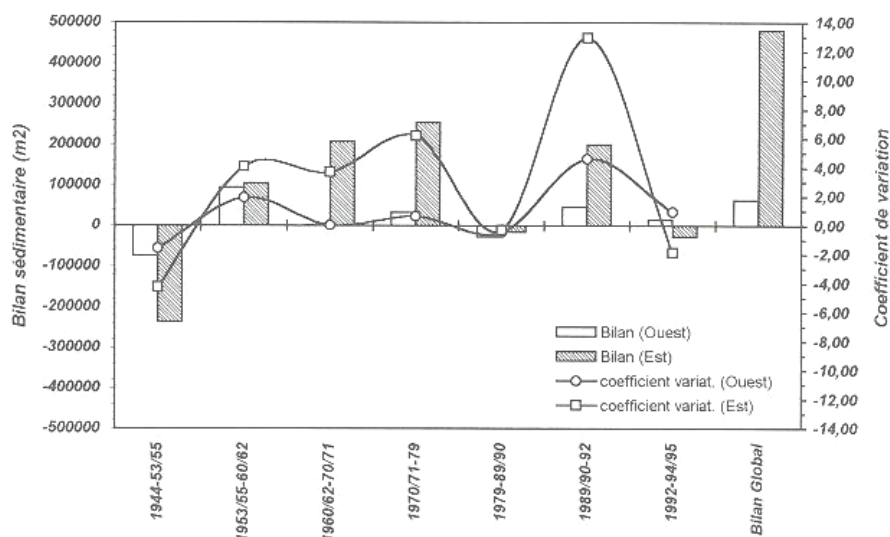


Figure 1.20 : Profils bathymétriques à l'est de l'embouchure du Rhône (Vernier, 1972).

Suanez (1997) établit également un bilan sédimentaire historique par décennie des apports solides du Grand Rhône à l'embouchure depuis 1944, basé sur des cartes et des travaux antérieurs. Il apparaît que la partie orientale s'engraisse et s'érode plus facilement que la partie occidentale (Figure 1.21). L'est de l'embouchure est

globalement plus affecté par la dynamique sédimentaire que l'ouest, puisque ces régions ont accumulé respectivement 480 000 m<sup>3</sup> et 60 000 m<sup>3</sup> de sédiment. Le They de la Gracieuse est un témoin de l'impact d'une dynamique sédimentaire vers l'est mais il demeure un courant littoral longeant la côte méditerranéenne d'est en ouest souligné par Ulses (2005).

Néanmoins, l'hydrodynamique s'avère dominée par les vents et leurs variations d'orientation et d'intensité comme l'ont démontré Pauc (1970) et différentes instrumentations ponctuelles, notamment les campagnes BIODYPAR entre 1998 et 1999 et des relevés courantométriques confirmant les analyses de Demarcq et Wald (1984). Le vent opère une action prépondérante et subite sur le panache et sur la partie superficielle de la colonne d'eau, puisque Pauc (1970) a observé un décollement du panache par Mistral et un rapprochement vers la plage du They de la Gracieuse par vents de sud-est. Il a aussi dissocié les courants de surface et de fond : le premier se séparant à 2 milles de l'embouchure en un courant vers l'est longeant la plage et un courant vers le sud-sud-ouest (200°), et le second orienté vers l'est mais issu de la convergence de deux courants venant de l'ouest dont l'un suit la côte provençale et l'autre vient du sud-sud-ouest (200°).



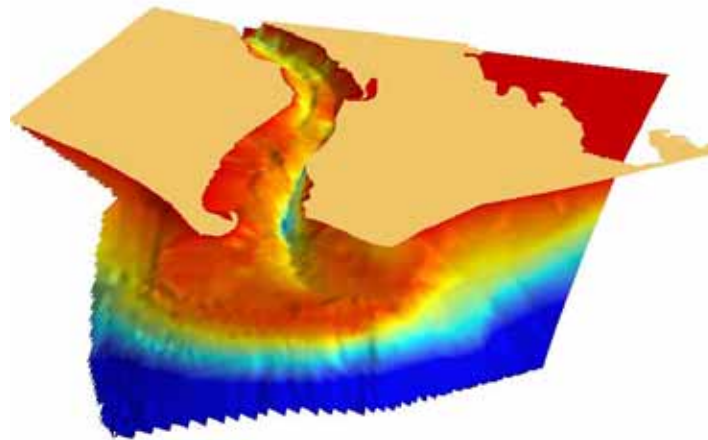
**Figure 1.21 : Evolution du bilan sédimentaire (m<sup>3</sup>) et du coefficient de variation de part et d'autre de l'embouchure du Rhône (Suanez, 1997).**

En plus d'une accrétion long-shore, un bilan du transport cross-shore a été estimé à plus de 2 millions de mètres cubes de sédiment en près de 40 ans (**Tableau 1.8**), soit une moyenne de 43500 m<sup>3</sup>.an<sup>-1</sup> d'après chaque période d'étude.

PERIODES	BUDGET TOTAL (m <sup>3</sup> )	BUDGET PAR AN (m <sup>3</sup> /an)
1944-55	585.000	53.000
1955-60	423.000	85.000
1960-71	485.000	44.000
1971-79	57.000	7.000
1979-89	482.000	48.000
1989-92	141.000	47.000
1992-95	0	0
<i>Total</i>	<i>2.173.000</i>	<i>43.500</i>

**Tableau 1.8 : Transports sédimentaires cross-shore estimés à partir du déplacement de la Flèche de la Gracieuse (Suanez, 1997).**

Les crues sont les principaux fournisseurs de matériel au prodelta et ce sont donc les courants et les vagues qui le façonnent. Maillet (2006) estime que 90 % des apports solides grossiers du Rhône liés à la crue de décembre 2003, pendant laquelle les débits ont atteint  $11500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ont été stockés au niveau du front deltaïque dans la zone comprise entre 0 et 20 m de profondeur. En comparant deux cartes numériques de terrain entre novembre 2003 et janvier 2004, il parvient à quantifier le volume et la masse de matière exportée par le Rhône sur le prodelta, soit  $7.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  ou 4 Mt de sédiment. Des relevés topobathymétriques ont révélé que des sédiments de fond de chenal avaient été transportés sur le front du delta rhodanien (**Figure 1.22**). En outre, les vagues de tempête ont repris les sédiments fraîchement accrétés à la proche embouchure du fleuve (0 à 6 m de profondeur). La resuspension nette de sédiments du fond durant l'événement est estimée à 20 Mt d'après le modèle de Ulses et al. (2008).



**Figure 1.23 : Représentation de l'embouchure du Rhône avec des données de sondeur monofaisceau (Maillet, 2005).**

### **1.3.4. Le panache du Rhône et la floculation des particules en suspension**

#### **1.3.4.1. Le panache du Rhône**

Les structures turbides de l'embouchure du Rhône sont à relier avec la résultante sédimentaire et la structure hydrologique avec la distribution des particules en suspension (Aloisi, 1986). En effet, dans les environnements estuariens, la distribution et le devenir des matières dissoutes et en suspension dépendent des changements biologiques, chimiques et physiques se produisant lorsque l'eau douce est transférée vers la zone côtière. Le comportement de la matière particulaire durant le mélange est influencé par divers processus comme l'adsorption/désorption, l'advection/chute, production/consommation ou la floculation/désagrégation (Naudin et al., 1997).

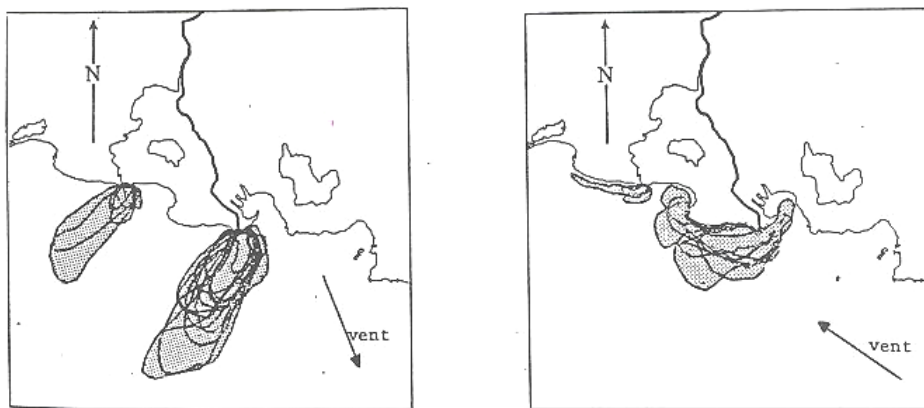
Lors d'une crue, des quantités importantes d'eau douce sont transférées vers le domaine marin. La forte densité des eaux salées méditerranéennes (38 ‰ à 40 ‰) empêche les eaux douces de se mélanger, ce qui entraîne la formation automatique d'une lentille turbide d'un à deux mètres d'épaisseur. Les conditions météorologiques influencent par la suite le mélange des masses d'eau mais la lentille s'affine par phénomène de dispersion vers le

large, pour ensuite disparaître. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres lors d'événements exceptionnels (**Figure 1.23**).



**Figure 1.23 : Image satellite MODIS des panaches turbides fluviaux, suite la crue de novembre 2002.**

Naudin et al. (1997) affirment que les crues participent activement à la progradation et l'aggradation du prodelta puisqu'ils observèrent de rapides décroissances de concentrations superficielles en MES totales et carbone organique particulaire (POC), attestant de la chute des particules vers le fond. Ils estiment également que les vents et forçages turbulents poussent les particules à s'agréger, chuter et se concentrer au niveau de la halocline. Les vents sont aussi à l'origine de l'orientation et l'étendue de la plume turbide (**Figure 1.24**).



**Figure 1.24 : Superposition de plusieurs contours de plumes obtenues à différentes dates pour un régime de vent de Nord-Nord-Ouest, et un régime d'Est à Sud-Est selon Demarcq et Wald (1984).**

La présence du panache de surface est expliquée par le type de l'estuaire du Rhône, qualifié de microtidal à coin salé. En régime normal, l'eau salée forme un point de concentration dans le lit du fleuve sous la couche d'eau douce. L'extension de ce coin salé est principalement contrôlée par le débit du fleuve (Thill et al., 2001). Lors de périodes de bas débit (environ  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'intrusion saline peut remonter vers l'amont du fleuve sur 20 km, et pendant des périodes de haut débit (plus de  $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), le coin salé est poussé vers le large à l'extérieur de l'embouchure du Rhône (Eisma, 1993). Les eaux douces forment alors une plume surnageant les eaux salées, sachant que le processus d'agrégation s'effectue pour des salinités comprises entre 1 et  $7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  (Thill et al., 2001).

La forme et l'étendue du panache sont influencées par le vent et la circulation côtière environnante (Estournel et al., 1997 ; Marsaleix et al., 1998).

Les MES sont exportées selon les deux modes préférentiels décrits précédemment : soit elles se concentrent dans la couche d'eau douce de surface appelée « néphéloïde de surface » (SNL), soit elles chutent et rejoignent le « néphéloïde benthique » (BNL), dont les concentrations en fonction du débit et de la zone géographique sont décrites dans le **Tableau 1.9**. La formation de la couche turbide profonde et l'accumulation de MES dans une petite région proche de l'embouchure sont expliquées par des phénomènes de floculation induits par la salinité.

Estimation of transported particulate flux								
	Rhône river mouth				Continental shelf			
	Plume (SNL)		Bottom (BNL)		Water column		Bottom (BNL)	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Total suspended matter	2 mg l <sup>-1</sup>	10 mg l <sup>-1</sup>	10 mg l <sup>-1</sup>	200 mg l <sup>-1</sup>	1 mg l <sup>-1</sup>	10 mg l <sup>-1</sup>	10 mg l <sup>-1</sup>	50 mg l <sup>-1</sup>
Current velocity l.m.a.b.	10 cm s <sup>-1</sup>	100 cm s <sup>-1</sup>	1 cm s <sup>-1</sup>	5 cm s <sup>-1</sup>	10 cm s <sup>-1</sup>	100 cm s <sup>-1</sup>	1 cm s <sup>-1</sup>	5 cm s <sup>-1</sup>
FLUX	17 kg m <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup>	850 kg m <sup>-3</sup> day <sup>-1</sup>	9 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	850 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	9 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	80 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	9 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	220 kg m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>

**Tableau 1.9 : Comparaison des flux et des concentrations de MES transportées au fond et en surface dans le panache du Rhône et sur le plateau continental (Naudin et Cauwet, 1997).**

#### 1.3.4.2. Le processus de floculation

Pendant le contact entre les eaux douces et salées, les MES subissent les importantes variations des propriétés physicochimiques de l'eau qui les contient. La force ionique augmente, réduisant la répulsion électrostatique, et les conditions hydrodynamiques sont complètement modifiées. Selon leur nature, les MES se comportent différemment durant ces changements physicochimiques. Les concentrations de fractions de tailles des suspensions de différentes espèces illustrent bien ce phénomène : la matière organique dissoute (DOM) et les colloïdes disparaissent dès les premiers stades de mélange, par exemple (Santschi et al., 1997). Ces observations attestent d'un départ des DOM du « pool dissous » (< 0.45 µm) vers le « pool particulaire » (> 0.45 µm) du à la floculation.

Les processus de floculation chimique et agrégation mécanique sont très lents et ne sont pas instantanés. Ils nécessitent une faible salinité et une forte concentration de matière en suspension (facteur de la cinétique chimique). Le temps de mélange de l'eau de surface dépend fortement du vent et est de l'ordre de quelques heures (Naudin et al., 1997). En outre, les particules très fines ne chutent pas et sont exportées vers le large alors que les particules floculées, plus grosses, tendent à chuter et sédimenter rapidement.

Le processus de floculation a été profondément étudié en Mer Adriatique, sur le prodelta du Pô notamment (Milligan et al., 2007 ; George et al., 2007 ; Mikkelsen et al., 2005 ; Fox et al., 2004 ; Fox et al., 2003) ainsi que dans divers estuaires mondiaux (Voulgaris et al., 2004 ; Curran et al., 2003 ; Thomsen et McCave, 2000).

### 1.3.5. Taux d'accumulation sédimentaire sur le prodelta

La dynamique sédimentaire prodeltaïque est sujette à de très nombreuses études à travers le monde depuis des années, particulièrement dans les zones d'accumulation préférentielle des sédiments. Ces zones où la sédimentation est importante intéressent les organismes d'aménagement du littoral car elles nécessitent parfois des infrastructures, les agences environnementales et les pétroliers car elles sont des milieux de piégeage de contaminants. En effet, les paléo-prodeltas sont des zones de stockage de matière organique décomposée, c'est-à-dire de futures réserves d'hydrocarbures.

De nombreux fleuves sont étudiés comme le Mississippi (Corbett et al., 2004 ; Allison et al., 2005 ; Corbett et al., 2007), l'Amazone (Nittrouer et DeMaster, 1986 ; Nittrouer et al., 1995 ; Kuelh et al., 1995 ; Moore et al., 1995 ; Sternberg, 1996), l'Eel (Sommerfield et al., 1999 ; Curran et al., 2002 ; Wheatcroft et al., 2003 ; Guerra et al., 2006) ou le Pô (Fox et al., 2004 ; Syvitski et al., 2005 ; Palinkas et al., 2005 ; Fain et al., 2007 ; Milligan et al., 2007 ; Palinkas et al., 2007). Le Golfe du Lion est également observé en apports fluviaux, outre le Rhône, puisque le prodelta de la Têt fait l'objet de nombreuses recherches (Guillén et al., 2006 ; Bourrin et al., 2007 ; Law et al., 2008).

Il ressort de ces comparaisons entre tous ces prodeltas que le Rhône connaît un taux d'accumulation exceptionnel. Charmasson et al. (1998) estiment le taux de sédimentation apparent sur le prodelta entre 37 et 48 cm.an<sup>-1</sup> à l'embouchure grâce aux rapports isotopiques <sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs, alors que Calmet et Fernandez (1990) l'évaluent à 30-35 cm.an<sup>-1</sup>.

Différentes méthodes de datation radioisotopique utilisées par Radakovitch et al. (1999) et Miralles et al. (2005) concluent respectivement aux mêmes ordres de grandeurs (plusieurs centimètres par an), soit 20 cm.an<sup>-1</sup> et 30-40 cm.an<sup>-1</sup>. Ils évaluèrent le taux de sédimentation dans le Golfe du Lion et au bord du prodelta rhodanien à respectivement 0.2 cm.an<sup>-1</sup> et 0.65 cm.an<sup>-1</sup>. La **Figure 1.25** montre des taux de sédimentation décroissants depuis la zone littorale, dans laquelle est localisé le prodelta du Rhône, vers les profondeurs du Golfe du Lion.

Une méthode basée sur la palynologie a permis à Beaudouin et al. (2005) de calculer un taux de sédimentation allant jusqu'à 60 cm.an<sup>-1</sup> sur le prodelta rhodanien.

En comparaison, les autres prodeltas de fleuves instrumentés de par le monde montrent des taux d'accumulation apparents bien moins importants, sauf celui de l'Amazone dont le taux de sédimentation approcherait 10 à 60 cm.an<sup>-1</sup> (Kuelh et al., 1996 ; Nittrouer et al., 2005). Le prodelta de l'Eel accumulerait 0.4 cm.an<sup>-1</sup> d'après Sommerfield et al. (1999) ou entre 0.1 et 1 cm.an<sup>-1</sup> selon Wheatcroft et al. (2003), celui du Pô présenterait des valeurs comprises entre 0.23 cm.an<sup>-1</sup> (Palinkas et al., 2007) et 0.77 cm.an<sup>-1</sup> (Frignani et al., 2005) et celui du Mississippi recueillerait 2 cm.an<sup>-1</sup> (Corbett et al., 2004).

Les taux de sédimentation à l'embouchure de fleuves ne sont pas faciles à déterminer car les signaux des radioéléments utilisés pour les définir sont très perturbés par des processus physiques (érosion, compaction, advection) et biogéochimiques (bioturbation, diagenèse précoce, diffusion).

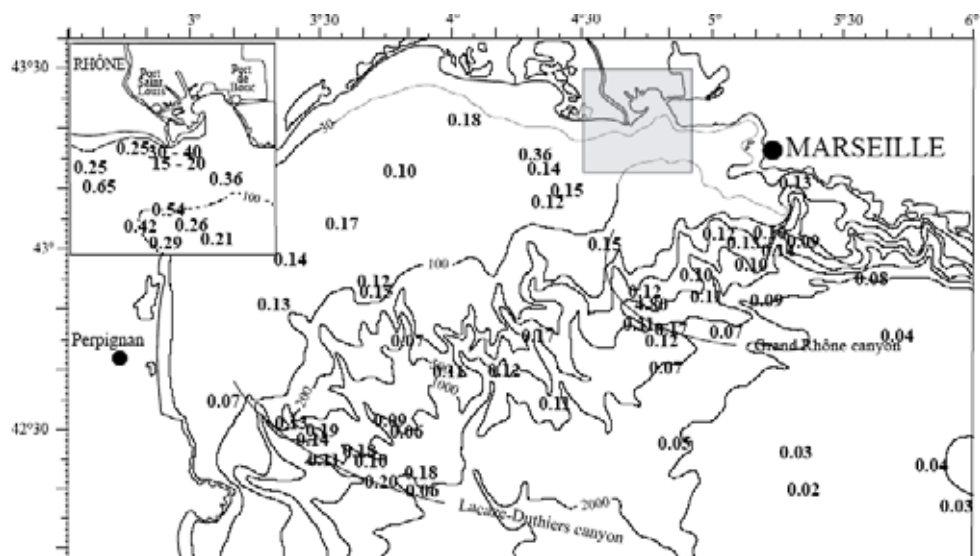


Figure 1.25 : Taux de sédimentation apparents sur la marge continentale du Golfe du Lion, basés sur la concentration du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (Miralles et al., 2005).





## 2. Les radioéléments



La radioactivité du milieu marin, comme celle du milieu continental, a deux origines : l'une naturelle due aux rayons cosmiques et à la présence dans le milieu de radionucléides qui font partie des éléments constitutifs du globe, et l'autre artificielle, c'est-à-dire issue d'apports de radionucléides liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire. Ce sont ces derniers qui constituent la pollution radioactive du milieu marin.

Les radioéléments introduits dans le milieu marin sont soumis à deux processus principaux : un phénomène de dispersion due essentiellement à la dilution dans l'eau de mer et un phénomène de fixation sur des supports en suspension dans le milieu récepteur comme des organismes (Charmasson et al., 1999), des sédiments (Miralles et al., 2004), des colloïdes (Eyrolle et al., 2004) et des MES (Antonelli et al., 2008). Les radionucléides peuvent donc se trouver sous trois formes dans ce milieu : dissoute, colloïdale ou particulaire. La première, très utile au traçage des masses d'eau (Molero et al. 1994 ; Sanchez-Cabeza et al., 2002 ; Lee et al., 2003 ; Aldridge et al., 2003) suit les masses d'eau sans jamais réellement s'accumuler car demeurant sous forme ionique. Les deux autres tendent à chuter en fonction de l'hydrodynamique ambiante, des conditions physico-chimiques mais également de la taille et du poids de la particule sur laquelle ils s'adsorbent ou s'agrègent (Eddington, 1984 ; Garnier-Laplace et al., 1997 ; Smith and Comans, 1996).

Ce travail concerne uniquement les radionucléides associés à la phase particulaire puisque la phase dissoute n'est pas destinée à être stockée dans les sédiments.

## 2.1. Les sources de radioactivité

### 2.1.1. La radioactivité naturelle

Les deux sources de radionucléides d'origine naturelle proviennent de l'atmosphère et du sein même de la Terre.

. En effet, ces radionucléides sont issus de réactions de spallation entre les particules du rayonnement cosmique et les éléments constitutifs de l'atmosphère et de la croûte terrestre. La spallation est une réaction nucléaire de fragmentation d'un noyau atomique en nucléides de masses atomiques plus petites par collision d'une particule incidente (proton, neutron) de haute énergie (de 100 MeV à plusieurs GeV). Cette réaction peut être naturelle ou provoquée artificiellement. Ces réactions conduisent naturellement à la formation de radionucléides cosmogéniques tels  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$  ou  $^{32}\text{P}$ .

. Les radionucléides d'origine tellurique, dits primordiaux, proviennent de la croûte terrestre qui contient naturellement les descendants des familles de  $^{238}\text{U}$ , de  $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$  (**Figure 2.1**). La lithosphère est composée à 11 ppm de  $^{232}\text{Th}$ , 2.8 ppm d' $^{238}\text{U}$  et 20 ppb d' $^{235}\text{U}$ , puisque ce dernier représente 0.7 % de la fraction d' $^{238}\text{U}$ . Ils ont des demi-vies suffisamment longues pour persister sur la Terre aujourd'hui, mais ils engendrent par décroissance des produits de demi-vies plus courtes.

En règle générale, les radionucléides cosmogéniques atteignent les milieux marins par l'atmosphère (précipitation, circulation atmosphérique) alors que les radionucléides primordiaux y arriveront par lessivage des roches continentales dans lesquelles ils sont stockés (Charmasson, 1998).

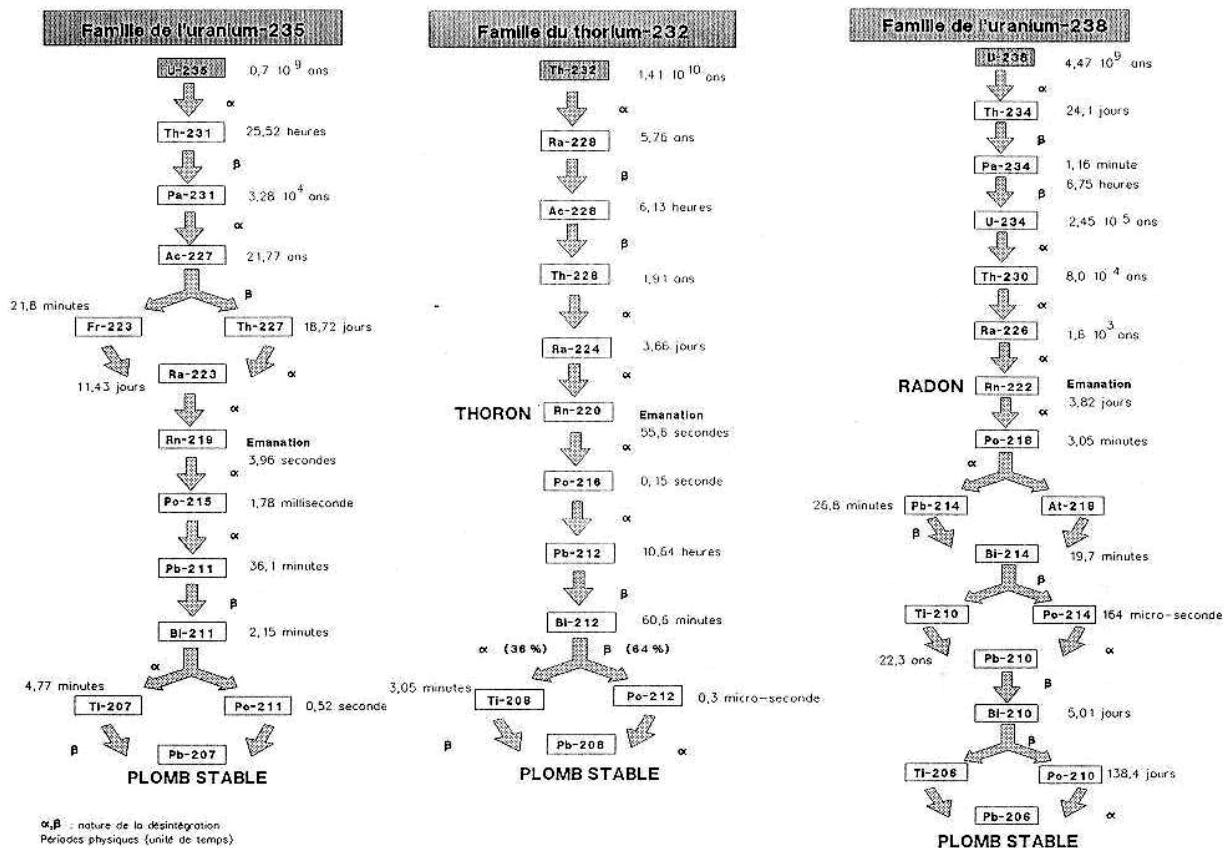


Figure 2.1: Les trois chaînes de désintégration radioactives issues de la décroissance de  $U-238$ , de  $U-235$  et du  $Th-232$  (Mace, 1993).

## 2.1.2. L'industrie nucléaire rhodanienne

### 2.1.2.1. Les effluents radioactifs

Les effluents radioactifs sont constitués de matières radioactives très diluées destinées à être dispersées de façon contrôlée dans l'environnement, directement ou après traitement, sous forme liquide, gazeuse ou d'aérosols. Les effluents gazeux sont issus par exemple du dégazage des circuits des centrales ou de l'ouverture des gaines de combustibles dans les usines de retraitement. Les effluents liquides, quant à eux, proviennent par exemple des opérations de décontamination, de lavage et de rinçage dans les centrales et dans les installations des usines de retraitement du combustible irradié. Le cycle du combustible nucléaire est explicité en **Annexe I**.

A la sortie des centrales et des usines de retraitement, les effluents liquides comprennent :

- les produits d'activation formés au cœur des réacteurs à partir d'éléments qui ont été soumis au flux neutronique, comme les impuretés présentes dans les liquides de refroidissement ou dans les alliages des structures, à savoir principalement  $^3H$ ,  $^{54}Mn$ ,  $^{57}Co$ ,  $^{58}Co$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{65}Zn$ ,  $^{110m}Ag$ .

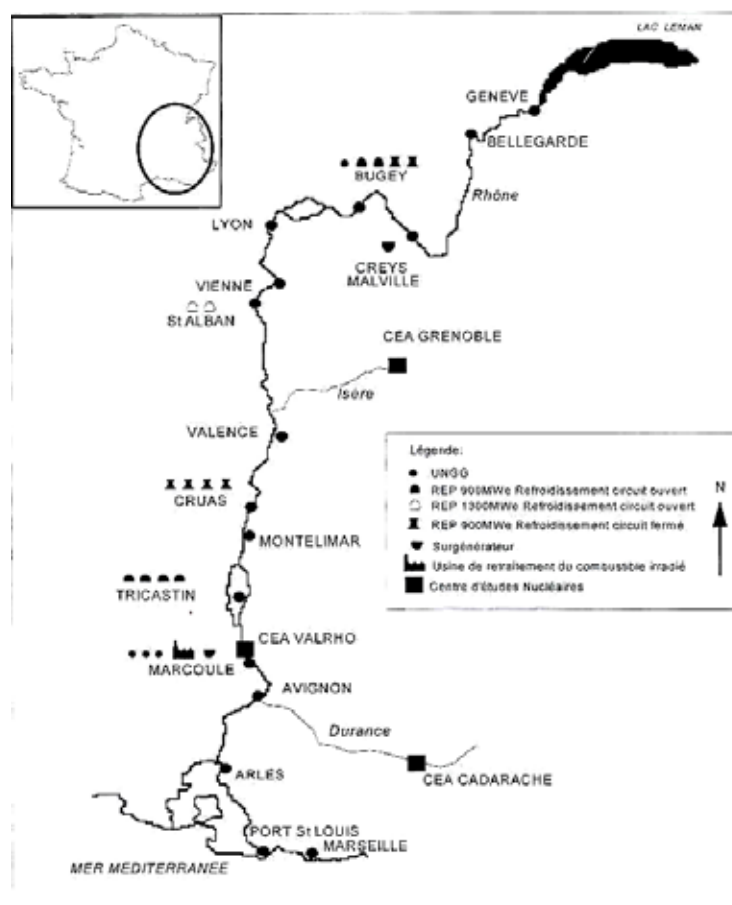
- les produits de fissions des noyaux d' $^{235}U$ , tels que  $^3H$ ,  $^{129}I$ ,  $^{131}I$ , ( $^{90}Sr+^{90}Y$ ),  $^{99}Tc$ ,  $^{125}Sb$ ,  $^{137}Cs$ ,  $^{141}Ce$ ,  $^{103}Ru$ ,  $^{106}Ru$ ,  $^{85}Kr$ , etc.

- les transuraniens issus des noyaux d'uranium par capture neutronique, comme  $^{238}Pu$ ,  $^{239}Pu$ ,  $^{240}Pu$ ,  $^{241}Am$ ,  $^{244}Cm$ .

Cette étude se base sur les rejets d'effluents radioactifs liquides dans le Rhône et le devenir des radioéléments avant et après le démantèlement de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule, terme source majeur de la présence de radionucléides artificiels dans les eaux du fleuve. En 1997, l'arrêt des rejets issus de Marcoule se conclut par une baisse de la concentration en radioéléments à la sortie du site mais l'eau du fleuve et les MES montrent toujours certaines quantités d'éléments radioactifs, comme le  $^{137}\text{Cs}$  ou le  $^{238}\text{Pu}$ , présentes en raison de la remobilisation sédimentaire et de la diffusion des radionucléides dans la colonne d'eau.

### 2.1.2.2. Les centrales nucléaires

Vingt réacteurs de puissance sont déployés sur 6 sites le long des rives du Rhône ou de ses affluents à Bugey, Cruas-Meysses, Marcoule, Creys-Malville, Saint Alban et Tricastin (**Figure 2.2**).



**Figure 2.2 : Localisation des installations nucléaires (centrales de production d'électricité, usine de retraitement du combustible irradié, centres d'étude nucléaire) sur le bassin versant rhodanien (Charmasson, 1998).**

Ces installations ont l'autorisation de rejeter différents types d'effluents liquides radioactifs émetteurs  $\gamma$  et  $\beta$  dans des quantités spécifiques. Les centrales nucléaires françaises ne sont pas autorisées à rejeter des émetteurs  $\alpha$ , tels les transuraniens  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Am}$ .

Trois réacteurs expérimentaux de type UNGG ont été arrêtés définitivement à Marcoule entre 1968 et 1984. Les 17 autres réacteurs couplés au réseau électrique appartiennent à différentes filières nucléaires : UNGG, REP

et Réacteur à Neutrons Rapides (RNR). Les Centrales Nucléaires Productrices d'Electricité (CNPE) évacuent leurs effluents radioactifs dans le Rhône dans le cadre d'opérations de décontamination et de lavage des structures des réacteurs.

Le **Tableau 2.2** reprend la chronique des bilans des rejets des CNPE rhodaniennes entre 1977 et 2004 établis par Charmasson (1998) et Rolland (2006) car les données récentes n'ont pu être fournies durant l'étude.

Le rejet d'effluents radioactifs liquides a fortement diminué (d'un facteur 10 à 100 selon les radionucléides ciblés) avec les efforts engagés par les exploitants des CNPE pour améliorer leur gestion (**Figure 2.3**). Le tritium et les isotopes 58 et 60 du cobalt sont majoritairement rejetés les centrales nucléaires. Le  $^3\text{H}$  issu des CNPE contribue à hauteur de 63.2 % du tritium total émis dans le Rhône, contre 26.8 % pour le centre de Marcoule. A l'exception du tritium, les CNPE rhodaniennes rejettent des quantités négligeables d'émetteurs  $\beta/\gamma$  (1.4 % du total).

Le  $^{137}\text{Cs}$  est rejeté selon un ratio de 2.5 % par les centrales nucléaires et 97.5 % par Marcoule (usine de retraitement du combustible) sur la période 1998-2004, alors que sa proportion originale des CNPE est inférieure à 1 % entre 1977 et 2004.

	$^3\text{H}$	$^{54}\text{Mn}$	$^{58}\text{Co}$	$^{60}\text{Co}$	$^{110m}\text{Ag}$	$^{124}\text{Sb}$	$^{131}\text{I}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	Autres éléments
1977	8,7			2,2				2	3,4	
1978	17,5	1,8	316	38,4		0,5		6,6	21	
1979	37	15,9	142	91,6		9,9	0,6	0,9	6,5	
1980	64800	37	1050	187		14,5	20,8	2,9	17,4	
1981	108000	41,3	1560	180		50,6	75,3	32,6	78,1	
1982	119000	9,94	288	73,7	4,37	27,6	11,3	17,7	28,5	
1983	130000	9,55	336	58,2	20,2	29,2	18,7	8,38	27,5	
1984	165000	4,6	292	65,9	42,6	43	9,74	21,8	26,1	
1985	228000	22,3	323	103	151	78,4	23,4	44,9	69,4	
1986	213000	9,48	213	89,9	68,4	92,5	16,7	28	64,6	63
1987	197000	6,58	184	83,2	80,3	109	5,03	22,2	30	28
1988	196000	5,24	122	52,7	64,8	52,9	5,4	10,5	13,5	26,5
1989	178000	7,07	112	78,7	59	59,1	4,1	4,91	9,7	53,9
1990	172000	5,6	138	71,3	54,1	86,6	2,6	8,9	10,8	38,1
1991	124000	3,42	64,6	39,3	26	33,8	2,9	2,14	3,33	13,3
1992	90000	1,2	23,2	26	17,5	12,4	0,7	1,3	2,2	5,4
1993	139000	0,6	9,1	12,9	8,6	4,4	0,92	1,22	2,24	4
1994	144000	0,37	7,82	8,3	6,73	6,32	0,37	0,52	1,23	2,01
1995	123000	0,31	7,29	4,86	3,89	3,59	0,22	0,41	0,87	1,5
1996	175000	0,32	10,7	4	4,16	1,66	0,22	0,53	1,23	1,38
1997	138000	0,51	9,53	6,26	4,82	0,96	0,17	1,53	1,84	0,75
1998		0,32	5,34	3,75	3,18	0,55	0,24	0,51	1,95	
1999		0,178	3,83	78,69	2,6	0,26	0,16	0,29	0,82	
2000		0,166	2,58	2,41	2,52	0,21	0,13	0,33	0,56	
2001		0,102	1,61	1,18	1,29	0,25	0,09	0,12	0,53	
2002		0,145	1,038	1,44	2,11	0,43	0,15	0,14	0,31	
2003		0,175	1,039	1,04	1,85	0,29	0,12	0,14	0,26	
2004		0,168	0,98	1,87	1,5	0,26	0,15	0,2	0,49	
Total	2703863	184	5225	1368	632	719	200	222	424	238

**Tableau 2.2 : Composition isotopique moyenne (en GBq) des rejets des centrales nucléaires dans le Rhône (Rolland, 2006).**

### 2.1.2.3. Le centre de retraitement du combustible de Marcoule

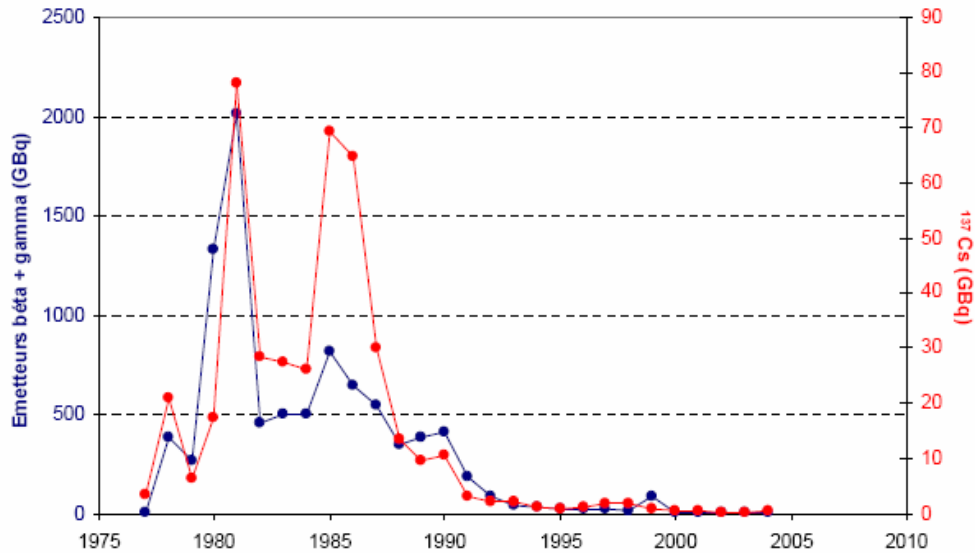
#### 2.1.2.3.1. Présentation et historique

Les rejets les plus importants de radionucléides en milieu fluvi-marin sont émis par les centres de retraitement du combustible irradié (CEC, 1989 ; Cigna et al., 1994), en l'occurrence le site de Marcoule en ce qui concerne le Rhône. En effet, les usines de retraitement rejettent des effluents nettement plus radioactifs que les centrales nucléaires avec les activités de cisailage, dégainage et dissolution du combustible irradié.

Situé à 210 km de l'embouchure et inauguré en 1955, l'établissement COGEMA de Marcoule a trois missions principales :

- la production de plutonium et de tritium,
- le retraitement des combustibles français et espagnols de la filière UNGG,
- le soutien aux installations du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) de la vallée du Rhône.

L'usine a commencé son activité de retraitement du combustible des réacteurs de la filière à uranium naturel, modérés au graphite et refroidi au gaz (UNGG) par séparation chimique (UP1) en 1958, mais avait du cesser son activité en 1997.



**Figure 2.3 : Evolution temporelle des rejets en émetteurs gamma et bêta hors tritium, toutes CNPE confondues, de 1977 à 2004, avec le <sup>137</sup>Cs en rouge (Rolland, 2006).**

Le facteur de décroissance d'émission du <sup>137</sup>Cs par les centrales est de 160 contre 100 par le centre de Marcoule lors de ces vingt dernières années. Le <sup>137</sup>Cs retrouvé en milieux fluvial et marin est préférentiellement issu des rejets du centre de retraitement de Marcoule plutôt que des centrales bordant le Rhône. La différenciation de l'origine devient difficile avec les faibles rejets parallèles de <sup>134</sup>Cs.

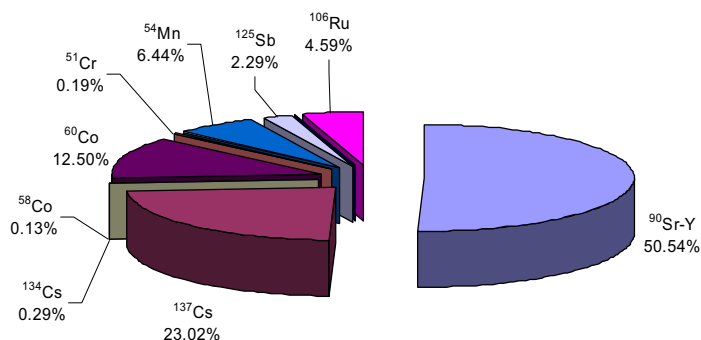
Malgré la cessation d'activité récente du centre de retraitement du combustible de Marcoule et la diminution draconienne de ses rejets, ses émissions en émetteurs  $\beta/\gamma$  sont toujours très importantes par rapport à celles des centrales, à savoir respectivement 2671 GBq et 133 GBq.

Entre-temps, le site a connu de nombreux événements comme la production du premier lingot de plutonium en 1959, la divergence des réacteurs Célestin destinés à fournir le tritium utilisé pour l'armement thermonucléaire entre 1967 et 1968, la divergence de Phénix avec le RNR en 1973, la mise en service de la nouvelle station de traitement des effluents liquides (STEL) et de la station d'évaporation EVA en 1990 et la mise en exploitation de l'usine MELOX chargée de la fabrication du combustible MOX utilisable dans les réacteurs de type REP (Rolland, 2006 ; Charmasson, 1998).

En plus des installations de COGEMA, le centre de Marcoule héberge aussi des activités diverses de recherche et de développement du CEA, avec le laboratoire ATALANTE et le réacteur Phénix.

### 2.1.2.3.2. Rejets d'effluents

La **Figure 2.4** représente la proportion globale des radionucléides rejetés par Marcoule en 2006, hors tritium  $^3\text{H}$ . Ce dernier domine d'ailleurs largement les rejets de  $\beta/\gamma$  de 1964 à 1997 (**Tableau 2.3**) avec une proportion de près de 87.3 % (**Figure 2.5.A**), suivi par le  $^{106}\text{Ru}$  avec un pourcentage de 10.9 % (Charmasson, 1998).



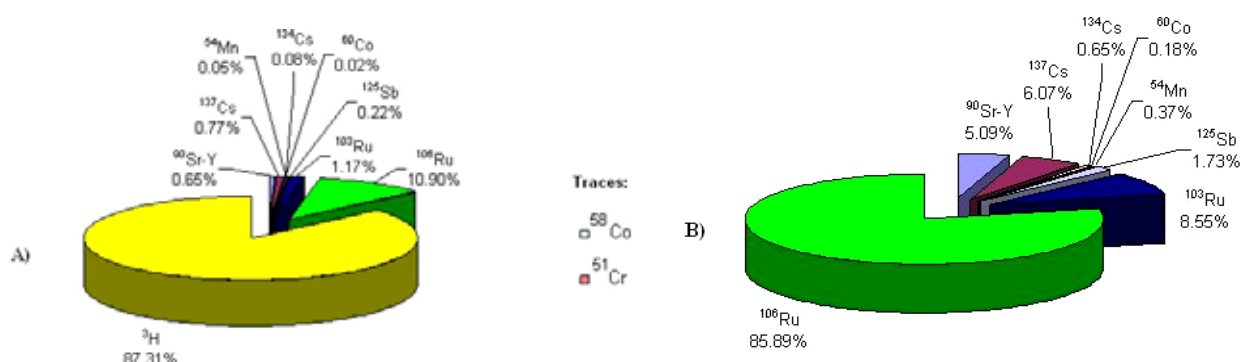
**Figure 2.4 : Proportion globale des radionucléides rejetés par Marcoule en 2006, hors tritium.**

Le  $^{106}\text{Ru}$  a atteint son pic de rejet en 1992 avec une valeur de 76200 GBq puis a déchu brutalement pour ne pas dépasser 100 GBq en 2001 et 15 GBq dès l'année suivante. Il totalise une moyenne de 86 % (**Figure 2.5.B**) entre 1961 et 2006 alors qu'il ne compte que pour 5 % en 2006.

S'ensuivent proportionnellement le  $^{103}\text{Ru}$  (8.5 %),  $^{137}\text{Cs}$  (6 %),  $^{90}\text{Sr-Y}$  (5 %),  $^{125}\text{Sb}$  (1.7 %) puis  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  et  $^{60}\text{Co}$  avec des valeurs inférieures à 0.7 %. D'autres radioéléments apparaissent dans le bas de classement mais prennent une place insignifiante dans les rejets.

Le  $^{137}\text{Cs}$  reste relativement stable avant et après la cessation d'activité de Marcoule, présentant respectivement 6.5 % et 7.2 % sur les périodes 1964-2003 et 1998-2003.

En comparaison, les rejets de  $^{90}\text{Sr-Y}$  ont beaucoup baissé également au cours du temps, passant de plus de 5000 GBq en 1986 à 54 GBq en 2006, mais restent proportionnellement élevés aujourd'hui, puisque comptant pour plus de la moitié des rejets hors tritium.



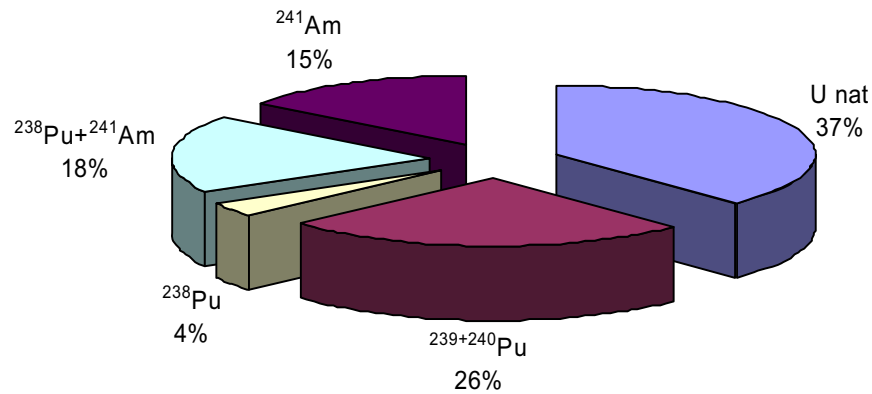
**Figure 2.5 : Proportion des radionucléides émetteurs gamma rejetés par Marcoule lors de son fonctionnement entre 1961 et 2006 avec tritium (A) et sans compter le tritium (B).**



	Radionucléides émetteurs gamma (en GBq)											Radionucléides émetteurs alpha (en GBq)				
	<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>58</sup> Co	<sup>60</sup> Co	<sup>51</sup> Cr	<sup>54</sup> Mn	<sup>125</sup> Sb	<sup>103</sup> Ru	<sup>106</sup> Ru	<sup>3</sup> H	U nat	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu+ <sup>241</sup> Am	<sup>241</sup> Am
1961	400											30	20			
1962	1600											100	30			
1963	400											100	20			
1964	1200	4700							20000	31700		100	30			
1965	1000	4300						100	42000	37700		20	100			
1966	1000	6800						20	26400	33100		40	30			
1967	600	5600							13000	21200		10	3			
1968	800	4800							1900	13100	42000	10	3			
1969	1720	1900						30	1800	20800	36000	20	20			
1970	2400	700			30				400	15300	51000	10	3			
1971	1000	100	100		3			100	700	13500	47000	3	3			
1972	600	1400	100		10			300	200	9000	83000	3	0			
1973	800	1000	200		10			300	300	16800	149000	3	0			
1974	1600	600	100		200			200	800	16100	107000	40	3			
1975	1800	900	100	1	70		3	500	1600	32600	138000	40	10			
1976	800	600	100	3	100		20	900	600	20000	168000	3	3			
1977	800	1300	200		100		40	1000	200	27100	117000	3	3			
1978	1800	4100	700	1	200		30	1000	400	25000	270000	10	3			
1979	1200	2900	600	1	200		90	500	100	14200	297000	12	5	1.38	8.5	7.12
1980	1600	3800	800	3	70		260	600	50	25100	414000	20.4	23	7.02	40.8	33.78
1981	1000	3800	800	3	100		130	800	40	26900	330000	8.9	19	5.61	16.8	11.19
1982	2420	5500	1300	4	80		440	1900	190	36600	348000	6	14	4.11	35.2	31.09
1983	860	1660	300	4	60		300	1000	410	53400	205000	20.6	12	3.60	21.7	18.10
1984	2000	2100	340	10	90		400	3610	120	28000	406000	26	26	7.71	40.1	32.39
1985	3940	2350	450	10	100		770	1840	230	34300	521000	24.3	27	7.98	21.7	13.72
1986	5460	2470	430	0.75	50		230	1380	0.68	33100	536000	30.3	25	7.44	34.7	27.26
1987	5300	2420	270	2	78		140	570	2.10	32200	437000	25.9	24	7.23	57.4	50.17
1988	4920	1950	190	0.70	59		630	760	2.30	50500	376000	20.1	29	8.64	40	31.36
1989	4500	1130	150	2	63		690	920	84	47600	457000	15.7	17	5.22	20.2	14.98
1990	2720	1670	390		37		170	1250	30	48800	463000	16.3	21	6.33	20.7	14.37
1991	1920	760	100	0.10	55		20	420	16	17400	376000	7.15	13	3.78	13.6	9.82
1992	317	220	27.30		32		5.55	145	0.39	76200	349000	3.79	3	0.99	4.53	3.54
1993	358	86.60	7.35		28.20		0.79	135	0.46	55400	352000	2.54	0.95	0.29	2.18	1.89
1994	379	155	12.10	0.04	10.50		0.58	109	0.03	34500	320000	5.79	1.27	0.38	2.66	2.28
1995	262	112	7.74	0.05	24.60		1.26	67.20	1.90	62700	258000	8.71	0.55	0.16	1.01	0.85
1996	362	115	8		32.59				0.07	6500	268000	8.59	0.81	0.24	1.54	1.30
1997	276	84.60	3.05		22.51				0.13	7692	162000	6.96	1.64	0.49	2.36	1.87
1998	220	32.30	1		15.16		3.07	30.23		922	18500	1.04	0.65	0.20	1.91	1.72
1999	147	46.90	1.14		22.53	1.23	12.85	55.38		380	24500	0.50	0.65	0.19	1.59	1.40
2000	115	37.60	0.70		24.68	1.52	0.55	47.53		133	34900	0.14	1.59	0.48	1.69	1.21
2001	91	20.50	0.52		24.41	0.13	0.15	15.81		29.30	3700	0.16	0.79	0.24	1.08	0.84
2002	56.30	40	0.54		21.22	0.23	0.37	10.43		15.90	25600	0.18	0.54	0.16	1.27	1.11
2003	29	38.67	0.47	0.02	21.33	0.24	0.25	16.21		12.53	23700	0.23	0.36	0.11	0.83	0.72
2004		92.70	0.66	0.02	20.97	0.23	0.14	11.09		15.09			0.47	0.14	1.21	1.07
2005		36.65	4.08	0.03	20.35	0.35	0.05	6.05		19.53			0.33	0.10	0.61	0.52
2006	54	24.59	0.32	0.14	13.36	0.20	6.88	2.45		4.91			0.14	0.04	0.39	0.35
Total	60826	72453	7795	46	2099	4	4395	20651	111578	1025624	8213900	817	552	80	396	316

**Tableau 2.3 : Activités en GBq des éléments identifiés dans les effluents liquides rejetés par le centre de Marcoule de 1961 à 2006.**

La contribution des rejets de  $^{125}\text{Sb}$  a nettement augmenté, 2.29 % en 2006 et 7.2 % sur la période 1998-2003 (Rolland, 2006) par rapport à la moyenne globale depuis 1965, à savoir 0.22 %.



**Figure 2.6 : Proportion des radionucléides émetteurs alpha rejetés par Marcoule lors de son fonctionnement entre 1961 et 2006.**

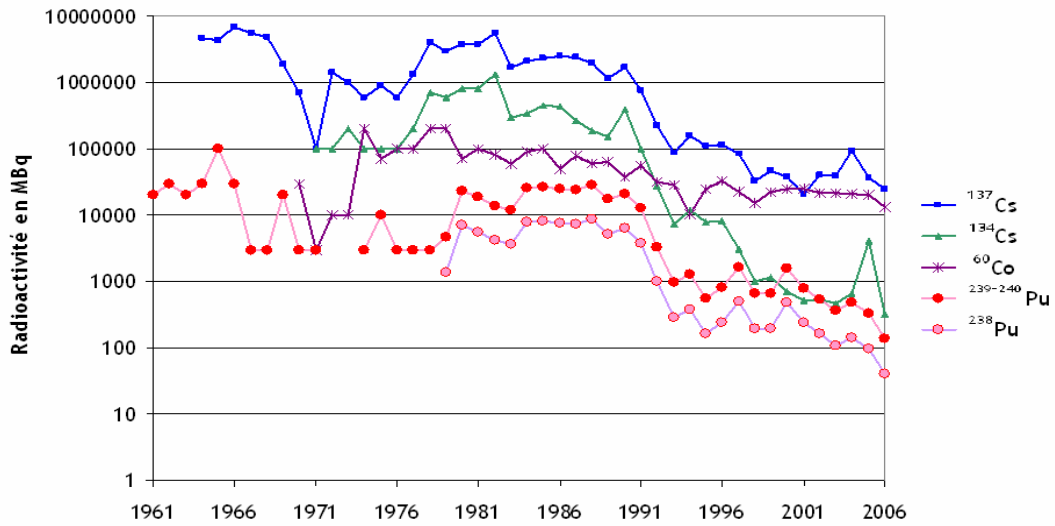
La **Figure 2.6** représentant la composition isotopique en émetteurs alpha des rejets de Marcoule entre 1961 et 2006 montre une dominance de l'uranium naturel (37 %), suivi des isotopes 239 et 240 du plutonium (26 %), du  $^{238}\text{Pu}$  et du  $^{241}\text{Am}$  (18 %) et de l' $^{241}\text{Am}$  (15 %).

Les rejets sur la période 1979-2003 étaient dominés par le  $^{238}\text{Pu}$  et l' $^{241}\text{Am}$  (39.5 %) complétés par le  $^{239+240}\text{Pu}$  et l' $\text{U}_{\text{nat}}$  à un peu plus de 25 % chacun.

Le bilan réalisé par Rolland (2006) couvrant la période 1998-2003, c'est-à-dire après le suivi de Charmasson (1998) et la fermeture de l'UP1 en 1997, montre que, hors tritium restant majoritaire, le  $^{106}\text{Ru}$  a diminué de 20 % et le  $^{137}\text{Cs}$  reste stable à 7 % environ alors que  $^{90}\text{Sr-Y}$ ,  $^{125}\text{Sb}$  et  $^{60}\text{Co}$  ont considérablement augmenté de respectivement 18 %, 5 % et 4.7 %. Quant au  $^{103}\text{Ru}$ , la COGEMA n'a répertorié aucun rejet dans le Rhône depuis 1997. Les fractions des émetteurs  $\alpha$ , contrairement aux émetteurs  $\beta/\gamma$ , n'ont pas subi de profonds bouleversements puisque le  $^{239}\text{Pu}$  et l' $^{241}\text{Am}$  se maintiennent en tête avec 55 %, suivis du  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{240}\text{Pu}$  à 30 % environ. En revanche, l'uranium naturel chute de moitié pour atteindre 14 % des rejets des émetteurs alpha.

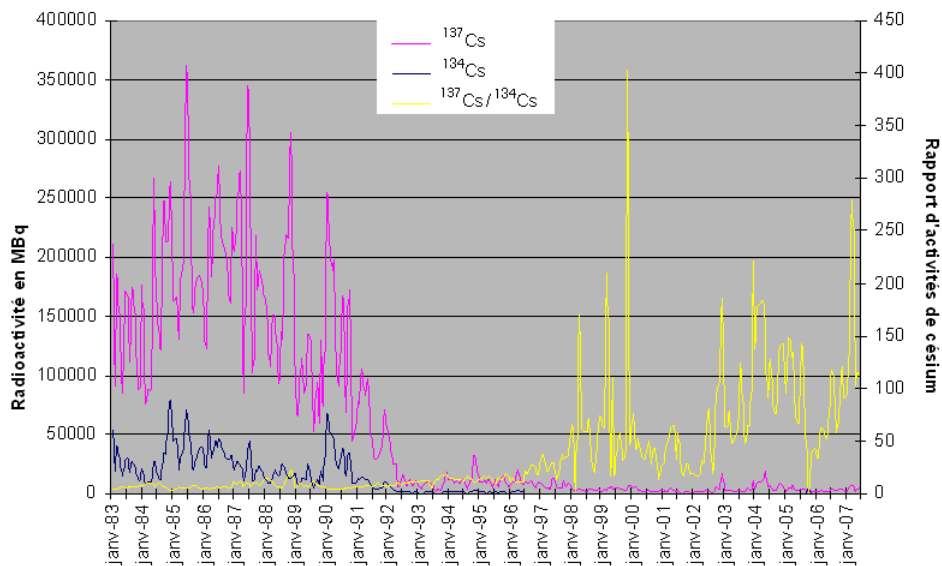
La **Figure 2.7** représente clairement la diminution des rejets de radioéléments du centre de Marcoule à partir de 1991. Cette baisse est notable tant au niveau des émetteurs alpha que gamma. Elle est directement engendrée par la mise en service d'une nouvelle station de traitement des effluents liquides STEL. La COGEMA réaménagea la STEL de Marcoule en y instaurant un nouveau procédé basé sur l'évaporation avec l'atelier EVA. Cet atelier a permis une diminution des rejets d'un facteur de 5 à 10 les années suivantes.

Entre 1990 et 2006, la radioactivité des rejets du centre de Marcoule a diminué d'un facteur 100 quels que soient les types d'émetteur.



**Figure 2.7 : Rejets annuels de quelques radionucléides artificiels par Marcoule en MBq depuis 1961 jusqu'à la période d'étude.**

A l'échelle mensuelle, la diminution des rejets depuis l'après Tchernobyl est flagrante (**Figure 2.8**) notamment pour les isotopes  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$ . Cette décroissance a augmenté et s'est stabilisée à l'été 1992, point d'inflexion de la courbe d'évolution des rejets.



**Figure 2.8 : Rejets mensuels de  $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$  par Marcoule en MBq ces 25 dernières années.**

Le  $^{137}\text{Cs}$ , utilisé dans cette étude, est rejeté avec parcimonie alors que le  $^{134}\text{Cs}$  a presque totalement disparu des rejets. Le rapport  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  est alors de plus en plus délicat à réaliser pour caractériser l'origine événementielle de ces isotopes.

#### 2.1.2.4. Autres installations nucléaires rhodaniennes

Il existe d'autres installations du cycle du combustible nucléaire sur le bassin versant rhodanien mais leurs rejets sont négligeables face à ceux des CNPE et du centre de retraitement de Marcoule.

. Deux usines de la Franco-Belge de Fabrication du Combustible (FBFC) situées à Romans et Pierrelatte fabriquent des assemblages de crayons d'UO<sub>2</sub> enrichi pour les REP. Localisée également à Romans, la Compagnie d'Etude et de Réalisation de Combustible Atomique (CERCA) fabrique des réacteurs de recherche et expérimentaux.

. Pierrelatte abrite aussi l'usine COMURHEX, convertissant l'uranium en UF<sub>6</sub> destiné à l'enrichissement pour la fabrication du combustible, ainsi que l'établissement EUODIF, travaillant sur l'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse de l'UF<sub>6</sub>.

. Les Centres d'Etudes Nucléaires (CEN) de Grenoble, Cadarache et Valrhô bordent également le Rhône mais leurs rejets sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur à ceux des CNPE et Marcoule.

La nature des radionucléides rejetés par la FBFC, la COMURHEX et les CEN est principalement composée d'uranium.

. Les installations hospitalières et les universités de médecine et de sciences émettent des effluents radioactifs en très faibles quantités, notamment du <sup>99m</sup>Tc (traitements anticancéreux, scintigraphie) pour les premières et <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>H, <sup>32</sup>P pour les secondes.

### **2.1.3. Les retombées atmosphériques**

#### 2.1.3.1. Les essais nucléaires atmosphériques

L'ère du nucléaire a commencé le 16 juillet 1945 par l'explosion d'une bombe atomique dans le désert du Nouveau Mexique aux Etats-Unis. S'ensuivirent les événements de Nagasaki et Hiroshima marquant la fin définitive de la Seconde Guerre Mondiale en août 1945. Un grand nombre d'essais en atmosphère, en milieu aquatique et sous la terre ont été menés ensuite par les plus grandes armées du monde, notamment l'URSS, la France, la Grande Bretagne, la Chine et l'Inde : un total de 541 essais nucléaires effectués à l'air libre entre 1945 et 1980. Ils ont eu pour conséquences de disperser divers radionucléides dans l'atmosphère qui ont touché quasiment toute la surface du globe, entraînés par les courants atmosphériques et retombés sur la planète via les précipitations.

Les années 1962 et 1963 ont connu un pic d'émission s'élevant à 160 Mt de charges explosives dont 90 % sont à mettre sur le compte des essais nucléaires soviétiques (Warneke et al., 2002). Les retombées ont diminué d'un facteur 10 environ depuis la signature en 1963 d'un moratoire interdisant les expérimentations atmosphériques entre certains pays, dont ne faisait pas partie la France qui a continué jusqu'en 1980. Notre pays a définitivement mis un terme à ses essais nucléaires en 1995 dans les atolls de Mururoa et Fangataufa.

L'atmosphère est entièrement touchée lors d'une explosion nucléaire, notamment la troposphère et la stratosphère. L'impact et la dispersion des radioéléments dépendent de la taille des particules et de la puissance de l'explosion. Leur temps de résidence dans l'atmosphère varie entre 70 jours pour de petites charges et plusieurs années pour des charges énormes. Leur distribution, quoique planétaire en raison de la circulation atmosphérique globale interconnectant toutes les masses d'air, affecte davantage les zones d'émission, à savoir l'hémisphère nord avec un rapport de 3 par rapport à l'hémisphère sud.

La nature des retombées des explosions nucléaires militaires est composée de matières fissiles non utilisées comme le  $^{239}\text{Pu}$ , de produits de fission tels que le  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{90}\text{Sr}$ , et des produits d'activation formés à partir de l'enveloppe de l'engin ( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ). L'UNSCEAR (1982) a répertorié des activités totales présentes dans l'atmosphère de 1000 PBq de  $^{137}\text{Cs}$ , 0.33 PBq de  $^{238}\text{Pu}$ , 7.8 PBq de  $^{239}\text{Pu}$  et 5.2 PBq de  $^{240}\text{Pu}$ . Les dépôts moyens annuels cumulés suite aux retombées des essais nucléaires atmosphériques ont été évalués à  $1.5 \text{ Bq.m}^{-2}$  pour le  $^{238}\text{Pu}$  et  $58 \text{ Bq.m}^{-2}$  pour le  $^{239+240}\text{Pu}$  dans les latitudes françaises.

### 2.1.3.2. La désintégration atmosphérique d'engins nucléaires

Le satellite de navigation américain Transit 5-BN-3, équipé d'un générateur auxiliaire de puissance SNAP-9A fonctionnant à l'énergie nucléaire, s'est désintégré dans le ciel de l'Océan Indien le 21 avril 1964. L'accident aurait libéré 630 TBq de  $^{238}\text{Pu}$  dont 5/6 se seraient déposés totalement. Le territoire français aurait reçu un cumul d'activités moyennes de  $1 \text{ Bq.m}^{-2}$  d'après Duffa (2001).

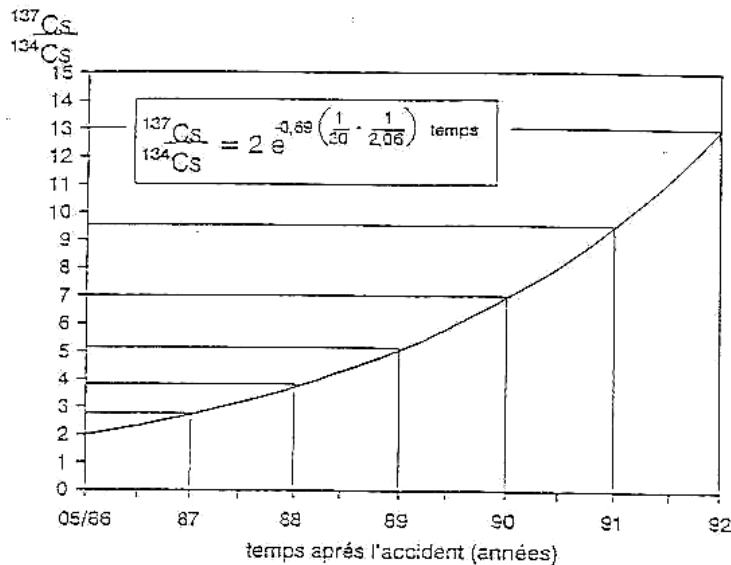
### 2.1.3.3. L'accident de Tchernobyl

L'événement le plus marquant de la fin du siècle dernier attestant de l'importance de l'impact du nucléaire sur l'environnement et l'humanité fut sans conteste l'accident de Tchernobyl. En effet, le 26 avril 1986, le réacteur n°4 de la centrale électrogène ukrainienne explose, entraînant la dispersion dans l'atmosphère de 38 PBq de  $^{137}\text{Cs}$ , 30 TBq de  $^{238}\text{Pu}$ , 36 TBq de  $^{239}\text{Pu}$  et 26 TBq de  $^{240}\text{Pu}$  (UNSCEAR, 1988).

Le nuage radioactif contaminé pendant l'accident a pris la direction du nord de l'Europe fin avril puis s'est orienté à l'ouest début mai 1986. Le bassin versant rhodanien présentait des dépôts de  $3200 \text{ Bq.m}^{-2}$  de  $^{137}\text{Cs}$  en moyenne à la suite de l'accident mais une carte des dépôts basée sur les travaux de Renaud et al. (2003) présente des valeurs autour de  $1500 \text{ Bq.m}^{-2}$  en moyenne. Cette diminution est expliquée par la décroissance radioactive du  $^{137}\text{Cs}$  et l'effet de l'érosion des sols du bassin versant.

Les radionucléides libérés dans l'atmosphère ont été considérés comme des traceurs dont le suivi permet d'analyser la réponse du milieu marin à une injection ponctuelle de contaminants. En l'occurrence, le rapport des isotopes 137 et 134 du césium était égal à 2 dans le cas des injections atmosphériques liées à Tchernobyl (Calmet et al., 1992) mais il a évolué au fil du temps (**Figure 2.9**), les deux isotopes n'ayant pas les mêmes demies-vies (plus de 30 ans pour le premier et près de 2 ans pour le second).

Contrairement au plutonium dont le rapport  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  égal à 0.3 est significatif de son origine rhodanienne, particulièrement de Marcoule (Lansard, 2006), le rapport isotopique de césium ne peut pas marquer une provenance géographique car le  $^{134}\text{Cs}$  est émis en trop petite quantité par l'industrie nucléaire dans le Rhône.



**Figure 2.9 : Evolution du rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  en fonction du temps, caractérisant l'accident de Tchernobyl le 26 avril 1986 (Mace, 1993).**

## 2.2. Les radionucléides étudiés

### 2.2.1. Présentation des radionucléides

Parmi les radionucléides pris en compte dans cette étude, certains ont une origine naturelle comme le  $^{210}\text{Pb}$ , le  $^{234}\text{Th}$  et le  $^7\text{Be}$ , alors que d'autres sont purement anthropogéniques tels que le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{238}\text{Pu}$ , le  $^{239}\text{Pu}$  et le  $^{240}\text{Pu}$ .

#### 2.2.1.1. Le plomb 210

##### 2.2.1.1.1. Origine

Le  $^{210}\text{Pb}$  est un élément radioactif naturel émetteur  $\beta^-$  et  $\gamma$  qui est généré dans la chaîne de décroissance de l' $^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2}=4.5$  Ga). Sa demi-vie  $T_{1/2}$ , c'est-à-dire la période au bout de laquelle la moitié de l'activité du radioélément est consommée par désintégration, est de 22.1 ans. Il provient plus spécifiquement du  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2}=3.8$  j), élément-fils du  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2}=1.62$  ka) qui s'échappe de manière permanente de la croûte terrestre sous la forme d'un gaz inerte. Différents paramètres régissent l'émission de radon 222, comme la nature du sol, la couverture végétale, la teneur des sols en radium 226 ou leur humidité. Lorsqu'il est libéré dans l'atmosphère, le  $^{222}\text{Rn}$  se désintègre par spallation en  $^{210}\text{Pb}$  qui s'adsorbe sur des aérosols submicroniques. Le plomb 210 atmosphérique atteint la surface terrestre sous forme de précipitations sèches et humides. Son temps de résidence dans l'atmosphère est estimé de 1 à 10 jours selon différents modèles de circulations.

La gamme des flux atmosphériques de  $^{210}\text{Pb}$  en zones continentales (de 60 à 700  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) s'avère plus importante que dans les zones océaniques (34 à 333  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) d'après Miralles (2004). Le continent européen est marqué par des retombées atmosphériques entre 80 et 120  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ , ce que confirment des mesures effectuées sur le pourtour méditerranéen.

On estime à 95 % la proportion de  $^{210}\text{Pb}$  délivré à l'environnement par l'atmosphère. Présent dans le milieu marin, ses sources sont les apports atmosphériques (appelé plomb en excès ou  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ), le  $^{210}\text{Pb}$  transitant dans les cours d'eau (formant également le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) et le  $^{210}\text{Pb}$  issu de la décroissance radioactive in situ du  $^{226}\text{Ra}$  qui s'échappe en permanence des sédiments (appelé plomb supporté).

#### 2.2.1.1.2. Comportement en milieu aqueux

La majorité du  $^{210}\text{Pb}$  est stockée dans les alluvions des cours d'eau en raison de sa forte affinité pour la phase particulaire (Abassi, 1998), d'autant que l'embouchure du Rhône est une zone de forte concentration de MES induisant un fort scavenging (enrichissement en  $^{210}\text{Pb}$  par fixation sur les particules marines) et des inventaires sédimentaires de  $^{210}\text{Pb}$  très importants.

Radakovitch (1995) et Abassi (1998) déterminent des valeurs de radioactivité du  $^{210}\text{Pb}$  dans la colonne d'eau comprises entre 0.38 et 3.31 Bq.m<sup>-3</sup> avec des valeurs croissantes avec la profondeur. La désintégration in situ du  $^{210}\text{Pb}$  en  $^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2}=138$  j) et son adsorption sur les particules marines (minérale ou organique) qui chutent au travers de la colonne d'eau sont des mécanismes qui aboutissent à son incorporation aux sédiments. Plus le temps de résidence est long et la colonne d'eau importante, plus le transport du  $^{210}\text{Pb}$  sera possible entre les zones de faible scavenging et celles de fort scavenging (Cochran et al., 1990). L'intégration du  $^{210}\text{Pb}$  dans le sédiment n'est pas un processus rapide car le radioélément peut rester de 10 à 100 ans dans les eaux profondes. Néanmoins, une fois incorporé au sédiment, le  $^{210}\text{Pb}$  est immobile et ne bouge plus qu'avec la particule sur laquelle il s'est adsorbé, suivant les phénomènes de resuspension et de redéposition (Miralles, 2004).

Le coefficient de distribution qui le caractérise en eaux douces et marines varie de  $5.10^4$  à  $2.2 \cdot 10^6$  L.kg<sup>-1</sup> (Matsunaga et al., 1995). La préférence du  $^{210}\text{Pb}$  pour sa forme particulaire est encore plus nette lors de conditions de haut débit liquide.

#### 2.2.1.1.3. Le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , un outil de géochronologie

Le cycle du  $^{210}\text{Pb}$ , qui est fortement lié au cycle des poussières atmosphériques, n'est pas perturbé par les activités anthropiques. Le calcul du plomb en excès, par la soustraction du plomb supporté in situ au plomb total, permet de suivre les apports particuliers issus de l'atmosphère et du bassin versant du Rhône.

Etant donné que l'on considère que les apports sont constants (ce qui n'est pas le cas d'émissions d'effluents radioactifs par exemple), on suppose que le  $^{210}\text{Pb}$  décrit un état stationnaire (Miralles, 2004), ce qui n'est pas tout à fait exact. Sa période de 22.3 ans correspond à l'échelle de temps des phénomènes transferts dans les réservoirs superficiels et permet d'établir des bilans de matières. Les phénomènes de crue sont observables sur les carottes s'ils sont exceptionnels. Une importante dilution de la concentration du  $^{210}\text{Pb}$  est mesurée lors de ces événements, stigmatisant l'apport bref et intense de grandes quantités d'eau. D'importantes radioactivités post-crues sont également notables, accompagnées de signaux granulométriques.

Plusieurs méthodes détaillées en Partie 3 de ce manuscrit existent pour évaluer des taux de sédimentation ou d'accumulation, d'autant qu'il permet un enregistrement sédimentaire d'une centaine d'années (Radakovitch et al., 1999). Le plomb 210 permet une couverture spatiale importante de calculs de taux de sédimentation puisque ses apports atmosphériques sont considérés comme constants et omniprésents.

### 2.2.1.2. Le béryllium 7 et le thorium 234

#### 2.2.1.2.1. Le béryllium 7

Radionucléide purement d'origine naturelle, le  $^7\text{Be}$  est un émetteur de rayonnement gamma qui provient de la spallation des atomes d'azote, d'oxygène et de carbone dans l'atmosphère. Il atteint la surface terrestre associé à des particules détritiques à travers des processus de dépôts secs et humides (précipitations) et est transporté vers le domaine marin après érosion des sols et transfert par les apports fluviaux. Le  $^7\text{Be}$  se trouve dilué et mélangé en arrivant à l'océan de surface, ce qui explique les faibles activités mesurées (Palinkas et al., 2006; Sommerfield et al., 1999). Pour que le fond sédimentaire contienne des activités de  $^7\text{Be}$  détectables, il est nécessaire que les particules aient été rapidement érodées et transportées vers l'océan côtier sans stockage prolongé dans le bassin versant. Sa courte période  $T_{1/2}$  de 53.2 jours ne permet pas de mesurer de taux d'accumulation sur le long terme car il disparaît en peu de temps.

Son  $K_d$  est estimé à  $4.10^4 \text{ L.kg}^{-1}$  en eaux fluviales, estuariennes et côtières d'après plusieurs études menées à travers la planète (Matsunaga et al., 1995).

#### 2.2.1.2.2. Le thorium 234

Tout comme le  $^{210}\text{Pb}$  et le  $^7\text{Be}$ , le  $^{234}\text{Th}$  est un radionucléide d'origine naturelle, émetteur d'un rayonnement gamma, issu de la décroissance de l'uranium 238 (Baskaran et al., 2007). Il se trouve d'ailleurs en amont de la chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$  et se retrouve en milieu marin par le lessivage de sols uranifères.

Son affinité avec la phase particulaire est témoignée par sa constante de distribution  $K_d$  comprise entre  $10^6$  et  $10^8 \text{ L.kg}^{-1}$  (Wei et Murray, 1992).

Il est utilisé dans la colonne d'eau pour étudier le scavenging puisque adsorbé fortement aux particules en suspension mais, tout comme le  $^7\text{Be}$ , sa demi-vie  $T_{1/2}$  de 24.1 jours ne permet de suivre que des épisodes de sédimentation extrême.

#### 2.2.1.2.3. Etude des apports événementiels

Tous deux d'origine naturelle, le  $^{234}\text{Th}$  et  $^7\text{Be}$  mettent en évidence les transports particuliers issus du Rhône et de l'atmosphère. Leur utilité réside sur leurs très courtes demi-vies, respectivement de 24.1 jours et 53.7 jours. Ces périodes induisent une désintégration très rapide puisque le premier ne sera détectable qu'une centaine de jours dans les sédiments et le second à peine deux fois plus longtemps. Ils sont donc très intéressants pour évaluer des apports soudains comme ceux des crues (Drexler et al., 2008).



### 2.2.1.3. Les isotopes 238, 239 et 240 du plutonium

#### 2.2.1.3.1. Origine

Le plutonium est un radioélément transurannique de la famille des actinides obtenu par transmutation artificielle de l'uranium. En fait, l' $^{238}\text{U}$  se transforme en  $^{239}\text{Np}$  après capture d'un neutron, qui lui-même se transforme en  $^{239}\text{Pu}$  par rayonnement bêta, élément fissile servant de combustible dans les centrales électronucléaires. Les isotopes les plus importants quantitativement sont le  $^{238}\text{Pu}$ , le  $^{239}\text{Pu}$ , le  $^{240}\text{Pu}$  et le  $^{241}\text{Pu}$ , dont les périodes (ou demi-vies) sont respectivement 87.75 ans, 24110 ans, 6570 ans et 14.4 ans. Les isotopes mis en évidence sont des émetteurs de rayonnements alpha, excepté l'isotope 241 qui est un émetteur de rayonnements bêta.

L'origine prépondérante du plutonium dans l'environnement est anthropique. La faible proportion de plutonium de source naturelle provient de l'effet des rayonnements cosmiques sur l' $^{238}\text{U}$  présent dans les minerais uranifères de la croûte terrestre.

La provenance des isotopes du plutonium en milieu marin et notamment à l'embouchure du Rhône est expliquée par les retombées atmosphériques des essais d'armes nucléaires, les accidents nucléaires et les rejets de centres de retraitement du combustible (tel que Marcoule sur le Rhône). Le **Tableau 2.4** met en évidence les activités des différents isotopes du plutonium liées à ses sources d'émission répertoriées par Lansard (2005).

	Activité due aux retombées des essais nucléaires (en PBq)	Activité due à Tchernobyl (TBq)	Activité due à Marcoule (GBq)
$^{238}\text{Pu}$	0.33	30	80
$^{239}\text{Pu}$	7.8	36	552
$^{240}\text{Pu}$	5.2	26	
$^{241}\text{Pu}$	170	-	-
<b>Rapport isotopique</b>	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} = 0.025$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} = 0.03$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} = 0.3$

**Tableau 2.4 : Activités des isotopes du plutonium introduits dans l'atmosphère par ses différentes origines d'émission et rapport isotopique significatif de ces émissions.**

#### 2.2.1.3.2. Comportement en milieu aqueux

Le comportement physico-chimique du plutonium est très complexe en solution car il peut afficher 4 états d'oxydation. Sa spéciation dépend de l'environnement considéré car sa solubilité, sa sorption et sa complexation sont variables et peuvent différer d'un état d'oxydation à un autre (Lansard, 2005).

On estime à 90 % la proportion de plutonium sous forme oxydée Pu (V) dans la colonne d'eau. Cette forme est peu réactive et entraîne la dispersion des radioéléments au gré des masses d'eau. Au contraire, la forme réduite Pu (IV) est insoluble et prédomine en phase particulaire car elle a tendance à s'hydrolyser et se complexer rapidement avec des ligands de toutes origines (organiques, minérales, FeOH, MnOH, acides fulviques et humiques). Le comportement du plutonium particulaire est gouverné par la dynamique sédimentaire.

Le Kd du plutonium en milieu marin est compris entre  $10^5$  et  $10^7$  L.kg<sup>-1</sup> et le Pu (IV) présente une plus forte affinité pour les particules que le Pu (V) car présentant une valeur de constante de distribution de 2 ordres de grandeur supérieur à celle de la forme oxydée.

En outre, comme de nombreux radioéléments comme le césium 137, le plutonium s'adsorbe préférentiellement sur les particules de faibles diamètres car elles présentent une plus grande surface d'échange spécifique.

#### 2.2.1.3.3. Traçage des rejets de l'industrie nucléaire rhodanienne

Tout comme les isotopes du césium, le plutonium sous ses formes étudiées est issu de l'activité humaine dans le domaine du nucléaire. Les concentrations inventoriées dans l'environnement permettent de dresser des bilans d'apports et de dépôts des radioéléments, puis de les comparer avec les rejets d'effluents et l'historique des retombées. L'affinité du plutonium pour la phase particulaire fine le rend très intéressant pour le suivi de la dynamique sédimentaire et du devenir des émissions de contaminants anthropiques dans l'environnement.

L'avantage principal que présente le plutonium reste sa capacité de traçage de ses émissions depuis son origine (Lansard, 2005). Les différents types de rejets possèdent leur propre rapport isotopique, ce qui est une caractéristique importante pour le suivi des polluants. Le rapport  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  serait égal à 0.3 en ce qui concerne les rejets de l'usine de Marcoule et de 0.03 pour les retombées des essais atmosphériques. Ces valeurs sont à prendre avec beaucoup de précaution car Marcoule a traité une grande diversité de combustibles, notamment provenant des armements militaires dont le rapport approcherait 0.05 (Duffa, 2001) ou d'origine civile de type MOX caractérisé par un rapport de 3 à 5 (Charmasson, 1998). En outre, les demi-vies de chaque isotopes sont assez longues (plusieurs dizaines voire milliers d'années) pour conserver le rapport de cet enregistrement radioactif pendant très longtemps.

#### 2.2.1.4. Le césium 137

##### 2.2.1.4.1. Origine

Le césium 137 est un radioélément d'origine strictement anthropique qui émet un rayonnement gamma et qui provient de la fission de l'uranium 235 et de l'uranium 238. Les sources atmosphériques de cet élément sont identiques au plutonium puisqu'il s'agit des essais de bombes nucléaires à ciel ouvert, notamment dans le désert du Sahara, et des accidents nucléaires. De fait, entre 1954 et 1962, période du maximum des émissions en rapport avec le Limited Test Ban Treaty, l'introduction dans l'atmosphère de 518 PBq de  $^{137}\text{Cs}$  a été effectuée. Cette radioactivité s'est répandue à l'échelle globale, marquée dans l'hémisphère nord par des retombées de près de 18 PBq de  $^{137}\text{Cs}$  en 1963.

L'accident de Tchernobyl a eu des conséquences plus locales : 79 % des retombées ont touché l'Europe. Les chiffres parlent de 37.7 PBq de  $^{137}\text{Cs}$  et 19 PBq de  $^{134}\text{Cs}$  émis dans l'atmosphère (UNSCEAR, 1988). Le matériel radioactif libéré sous forme de gaz et d'aérosols a été transporté et déposé principalement sur l'union soviétique et les pays européens. La volatilité du  $^{137}\text{Cs}$  a permis une large diffusion autour de la planète mais aussi localement puisque les retombées à la Méditerranée ont été évaluées à 5 PBq. Le  $^{134}\text{Cs}$ , autre isotope du césium, a été

fortement rejeté durant l'explosion du réacteur et le rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  de 2 est significatif de l'accident. La période de  $^{134}\text{Cs}$  (2.1 ans) ne permet plus de le détecter dans les retombées atmosphériques dues aux essais nucléaires (Calmet et al., 1992; Charmasson, 1998).

En plus des retombées sèches et humides, le  $^{137}\text{Cs}$  retrouvé dans les sédiments marins de l'embouchure du Rhône provient des rejets du site de retraitement du combustible de Marcoule. Les effluents radioactifs émis par Marcoule dans les eaux du Rhône totalisent 72 TBq en 1997. Le rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  caractérisant les installations nucléaires rhodaniennes a varié entre 4 et 14.5 sur la période 1980-1996.

#### 2.2.1.4.2. Comportement en milieu aqueux

Le  $^{137}\text{Cs}$  se comporte différemment en eaux douces et en eaux marines. Les facteurs physico-chimiques régissant son comportement sont la salinité, le potentiel rédox, la concentration en matières minérales en suspension, la présence de matière organique en suspension, les forces ioniques et la turbidité (Mahler, 1985).

En milieu fluvial, le césium dissous est très faible. Il se trouve rarement sous la forme  $^{137}\text{Cs}^+$  mais davantage complexé par la MOD ou fixé par des microcolloïdes. Il est retenu sous forme particulaire par les MES de manière rapide et intense (90 % en quelques heures). La complexation par la MOD et l'adsorption sur les particules minérales en suspension (surtout les argiles) entraînent la sédimentation par augmentation de la masse du corps.

En milieu marin, le césium est principalement sous la forme de cations  $^{137}\text{Cs}^+$  (ou de molécules  $\text{CsCl}$ ). Contrairement au milieu continental, il n'a pas d'affinité avec la MOD qui bloque les sites d'adsorption. Le césium particulaire issu du fleuve se retrouve sous la forme dissoute car il existe une compétition intense entre les ions  $\text{Cs}^+$  et les  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . Comme l'eau de mer est riche en ces ions sodium et potassium, le passage de l'eau douce à l'eau salée constitué par les estuaires implique une remise en solution importante du césium faiblement lié alors que le césium fortement lié resterait irréversiblement dans les sites de fortes énergies.

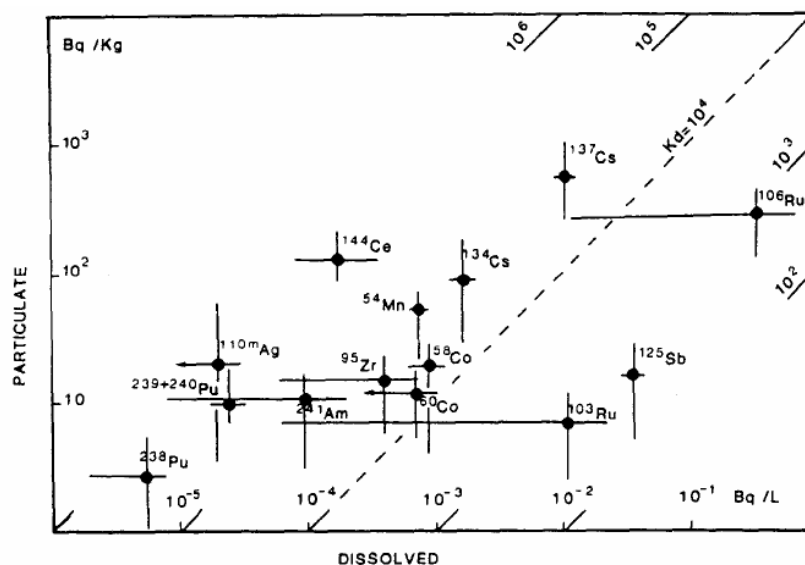


Figure 2.10 : Concentrations moyennes de divers radionucléides artificiels mesurés dans le Rhône à la station d'Arles sur la période 1982-1985 (Martin et Thomas, 1990). Les lignes obliques indiquent les valeurs des coefficients de distribution (Kd).

La constante  $K_d$  du  $^{137}\text{Cs}$  varie selon les auteurs et les environnements : Mahler (1985) l'estime à  $500 \text{ L.kg}^{-1}$  en eau de mer, de  $5000$  à  $10000 \text{ L.kg}^{-1}$  en domaine estuarien et jusqu'à  $40000 \text{ L.kg}^{-1}$  dans un système de faibles concentrations. Fuhrmann et al. (1997) le font varier de  $40$  à  $3800 \text{ L.kg}^{-1}$  avec une augmentation en fonction du ratio liquide/solide, et Topcuoğlu et al. (2002) l'ont évalué à  $500 \text{ L.kg}^{-1}$ . Des études dans le Rhône menées par Martin et Thomas (1990) montrent des valeurs de  $K_d$  du  $^{137}\text{Cs}$  entre  $10^4$  et  $10^5 \text{ L.kg}^{-1}$  (**Figure 2.10**).

#### 2.2.1.4.3. Traçage et bilan de radioactivité artificielle

Le premier atout que présentent les isotopes 134 et 137 du césium est leur origine purement anthropique, à savoir les essais nucléaires atmosphériques, l'accident de Tchernobyl et les rejets de l'industrie nucléaire rhodanienne. Ils permettent donc de suivre continuellement l'impact des émissions radioactives humaines sur l'environnement et d'en faire leurs bilans. De plus, l'utilisation de rapports isotopiques est intéressante pour qualifier les sources participant aux émissions évoquées précédemment. Malheureusement, la période du  $^{134}\text{Cs}$  étant de 2.1 ans, ses rejets ne sont plus détectables aujourd'hui alors qu'ils l'ont été durant les quelques années suivant Tchernobyl et les périodes de grands relargages de Marcoule (Martin et Thomas, 1990). Au contraire, le  $^{137}\text{Cs}$  de période 30.1 ans est toujours présent en quantité suffisante dans les différentes sources, puisqu'on considère la disparition d'un radioélément au bout de 4 à 5 demi-vies.

Le deuxième avantage constitué par le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  repose sur leurs capacités de traceurs des mouvements particuliers en eau douce auxquelles s'ajoutent des qualités de traceurs de déplacements des masses d'eau en milieu marin (Sanchez-Cabeza et al., 2002 ; Calmet et Fernandez, 1990). De nombreuses mesures à différentes stations de plusieurs profondeurs ont permis le traçage des couches d'eau en Méditerranée, l'estimation de leur âge et la mise en évidence d'échanges verticaux (Lee et al., 2003 ; Molero et al., 1995 ; Calmet et al., 1992).

L'enfouissement dans les sédiments de l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  retombé lors des mois suivants Tchernobyl permet également de situer temporellement les niveaux sédimentaires de certaines carottes sédimentaires aux abords des embouchures, sources de particules lessivées dans les bassins versants exposés aux retombées radioactives.

## 2.3. Processus d'interaction entre les radionucléides et les sédiments

### 2.3.1. Comportement global des radionucléides dans le milieu marin

La dispersion des radioéléments en phase liquide dans le milieu marin est régie par deux facteurs : les phénomènes hydrodynamiques que sont l'advection (courant océanique, de vents, de densité) et la diffusion turbulente (induite par les vagues, le vent et les forces entre les masses d'eau), et les caractéristiques physico-chimiques du milieu.

Les caractéristiques physico-chimiques englobent de nombreux facteurs comme la salinité, la température, le pH, la viscosité ou le potentiel d'oxydoréduction. Néanmoins, les points principaux reposent sur les constituants

en suspension pouvant fixer les radioéléments par adsorption et jouer le rôle de vecteurs de pollution, la teneur en matière organique entraînant des processus de complexation et la teneur en isotope stable dont la présence peut occasionner des phénomènes de « dilution isotopique ».

En raison de leurs propriétés de fixation des éléments, les particules en suspension et les sédiments peuvent jouer un rôle important, voire prépondérant, dans la distribution des radioéléments en milieu marin.

Les particules en suspension, fixent les radioéléments par co-précipitation, adsorption ou échanges d'ions. D'une façon générale, la fraction de radioélément adsorbée est d'autant plus importante que la granulométrie des matières en suspension est fine, observation imputable au fait que les particules fines offrent une plus grande surface de contact à masse égale (Guéguéniat et al, 1976 b). Il faut également noter que la minéralogie et la cristallographie induisent des surfaces d'adsorption différentes selon la nature des sédiments. Les argiles gonflantes par exemple, composées de superposition de feuillets, possèdent une capacité à piéger des éléments étrangers (Ancellin et al, 1979).

### 2.3.2. Adsorption/désorption des radioéléments

Les propriétés d'adsorption de divers hydroxydes métalliques sont bien connues, notamment la présence d'hydroxydes de fer ou de manganèse améliore la fixation de nombreux radioéléments.

En outre, la concentration en matière organique du sédiment facilite la fixation de certains radioéléments et provoque l'effet inverse pour d'autres.

La forme physico-chimique du radioélément est importante pour sa fixation et sa distribution dans le sédiment. Les radioéléments hydrolysables se fixent plus aisément sur les sédiments. Concernant les radioéléments présents sous forme cationique, comme le  $^{137}\text{Cs}$ , leur adsorption au niveau des sédiments résulte de mécanismes plus complexes que ceux correspondant à un simple échange ionique puisqu'une proportion plus ou moins importante du radioélément fixé n'est plus échangeable avec les cations du milieu ambiant.

#### 2.3.2.1. La constante de distribution $K_d$

La constante de distribution  $K_d$  permet de caractériser l'affinité d'un radioélément en solution pour la phase particulaire (**Tableau 2.5**). C'est un rapport d'activité spécifique fréquemment utilisé pour la description de l'équilibre chimique d'un radionucléide entre la phase solide et la phase liquide. Sa valeur est déterminée par la relation suivante et son unité est le  $\text{L.kg}^{-1}$  :

$$K_d = \frac{\text{Activité spécifique dans la phase particulaire (Bq.kg}^{-1}\text{)}}{\text{Activité spécifique dans la phase dissoute (Bq.L}^{-1}\text{)}}$$

La constante  $K_d$  varie avec le temps de contact entre le traceur et le sédiment (Salbu et al., 2004 ; Ciffroy et al., 2001 ; Borretzen et al. 2000) et selon que le radionucléide se trouve sous la forme de Low Molecular Mass (LMM) ou de High Molecular Mass (HMM). Les mécanismes de croissance des particules comme l'hydrolyse, la complexation et l'agrégation augmentent la masse moléculaire nominale des espèces LMM et diminuent ainsi leur

mobilité. En revanche, les processus de désorption, de dissolution et de dispersion mobilisent les espèces LMM à partir des espèces HMM. Généralement, plus le degré de fixation  $K_d$  est élevé, plus le coefficient de diffusion est faible.

	$K_d$ (fraction fine $\leq 28 \mu m$ )	$K_d$ (fraction fine $\leq 28 \mu m$ )
$^{90}Zr$	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$	$^{125}Sb$ $5 \cdot 10^1$
$^{144}Ce$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$	$^{51}Cr$ $1 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^4$
$^{65}Zn$	$3 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	$^{106m}Ag$ $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$
$^{60}Co$	$1 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$	$^{106}Ru$ (nitro) $5 \cdot 10^1$
$^{137}Cs$	$5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$	$^{106}Ru$ (nitrate) $2 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^2$
$^{54}Mn$	$2 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$	$^{106}RuCl_3$ $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$
$^{109}Cd$	$5 \cdot 10^1 - 1 \cdot 10^3$	

**Tableau 2.5 : Ordres de grandeur, déterminés expérimentalement, de taux de fixation ( $K_d$ ) de radionucléides sur la fraction fine ( $< 28 \mu m$ ) de sédiments marins de diverses provenances (Ancellin et al., 1979).**

### 2.3.2.2. Les processus d'adsorption et de désorption

Cette partie est particulièrement axée sur le radioélément  $^{137}Cs$  qui est largement suivi dans cette étude. Néanmoins, les processus d'adsorption et de désorption se vérifient pour bien des radioéléments, mais leurs supports peuvent varier selon leurs affinités.

#### 2.3.2.2.1. L'adsorption en fonction de la nature du sédiment hôte

En plus de la complexation du césium par la matière organique dissoute (MOD) et de sa fixation sur des microcolloïdes dans les eaux douces (qui reste faible d'après Eyrolle et al. (2001)), il existe un phénomène physico-chimique appelé adsorption qui permet la particularisation du  $^{137}Cs$ . Ce processus se produisant dans les milieux où la salinité est faible se trouve favorisé par la présence de particules fines dans la colonne d'eau, telles que des silts et particulièrement des argiles dont les Capacités d'Echange Cationique sont importantes (montmorillonite, vermiculite, kaolinite, illite, chlorite). Le  $^{137}Cs$  se fixe sur les particules fines dont les sites minéralogiques ont une forte affinité avec les cations (Lu et al., 2001 ; Mahler, 1985). Un gramme d'argile est susceptible d'adsorber  $2.33 \cdot 10^{11}$  Bq de  $^{137}Cs$  (Miralles, 2004). Si l'environnement ne comporte pas ou peu d'argiles, le  $^{137}Cs$  se fixera sur les sables (Solovitch-Vella et al., 2006).

L'illite est l'argile sur laquelle le césium montre le plus d'affinités d'adsorption en raison de son réseau cristallographique intéressant (Mahler, 1985). En effet, le radioélément présente des préférences pour des structures en feuillets de type T-O-T (Tétraèdre-Octaèdre-Tétraèdre) dont la distance interfoliaire est de 10 Å (1 nm). Cette structure présente des cavités à symétrie hexagonale formées par les atomes d'oxygène des couches tétraédriques qui retiennent mieux le césium de même rayon ionique que le potassium mais davantage polarisé.

De plus, contrairement à la montmorillonite, cette argile ne gonfle pas et la liaison est faible entre les feuillets. Elle est issue de l'altération de minéraux comme les micas.

Deux types de fixation existent sur les argiles illitiques : des liaisons à énergie faible et des liaisons à énergie forte. Le premier type est réversible et est créé sur la bordure des feuillets où est susceptible de se glisser des MOD sur lesquelles se fixent les cations  $^{137}\text{Cs}$ . Cette fraction est dite labile, c'est-à-dire susceptible d'être échangée entre la phase particulaire et la phase dissoute de manière réversible. Le second type, considéré comme irréversible, est représenté par l'intégration des ions  $^{137}\text{Cs}^+$  à l'intérieur des feuillets des minéraux phylliteux altérés en remplacement des ions  $\text{K}^+$  interfoliaires en déficit. Cette fraction est appelée non labile.

#### 2.3.2.2.2. La désorption et ses mécanismes

Le processus de désorption a principalement lieu lors du passage du milieu fluvial au milieu marin en raison de la compétition entre les cations en présence,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  et principalement  $\text{K}^+$ . Les radionucléides fixés se retrouvent à l'état dissous dans la colonne d'eau, après avoir été remplacés dans les supports argileux par les cations environnants.

La quantité de radioéléments désorbée dépend du ratio solide/liquide et des conditions environnementales (Morse et al., 2005 ; Rumynin et al., 2005). Par exemple, la constante de distribution est 4 fois supérieure pour la désorption que pour l'adsorption à l'équilibre dans les systèmes colloïdaux. Le rapport de ces constantes respectives montre la réversibilité des interactions opérées les premières minutes s'il est égal à 1 et le transfert de césium vers les sites particuliers impliquant de fortes interactions lorsqu'il propose de fortes valeurs après plusieurs jours (Ciffroy et al., 2001).

Hormis le paramètre de salinité, les mécanismes de désorption sont régis par les variations de pH, de la forme chimique du radionucléide, de sa force ionique et de sa taille (Solovitch-Vella et al., 2006 ; Topcuoğlu et al., 2002).

#### 2.3.3. La remobilisation des radioéléments

Le passage du  $^{137}\text{Cs}$  du sédiment vers l'eau est lent mais non-négligeable (30 % en quelques jours). Il est effectué selon trois modes de remobilisation : le mélange physique par action des vagues et de la bioturbation (dépendant de la hauteur de la colonne d'eau), la diffusion moléculaire dans les eaux interstitielles et l'advection résultant de flux à l'interface eau-sédiment (Morse et al., 2005 ; Smith et al., 1996).

Sans remobilisation, les sédiments de fond jouent le rôle de puits de radionucléides car surviennent des processus d'enfouissement de l'activité. En revanche, ils deviennent une source après remise en suspension et libération des radioéléments dissous.

En outre, Morse et al. (2005) ont étudié le comportement des ions  $\text{NH}_4^+$ , sensiblement comparables aux ions  $\text{Cs}^+$  dans des sédiments terrigènes marins de granulométrie uniforme (silts et argiles). Ils ont conclu que le comportement adsorbant des ions ammonium reste le même durant la diagenèse précoce mais évolue dans des conditions oxydantes ou réductrices. Il est en outre plus prononcé sous des conditions de réduction typique des sédiments marins que sous des conditions oxydantes présentes dans les couches d'eau sus-jacentes.





# 3. Matériels et méthodes



Différentes missions ont permis l'installation d'appareils capables d'enregistrer les courants dans toute la colonne d'eau à l'embouchure du Rhône, notamment pendant les hivers 2006-2007 et 2008-2009. Des suivis hydrologiques, atmosphériques et physicochimiques des masses d'eau ont été réalisés, ainsi qu'une évaluation des impacts sédimentologiques et radioécologiques.

### **3.1. Suivis hydrologique et hydrodynamique à l'embouchure du Rhône**

#### **3.1.1. Suivi hydrologique par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR)**

La période d'acquisition des données de débits liquides du Rhône s'est étendue du mois d'octobre 2006 au mois de juillet 2007 en ce qui concerne la mission CARMA, appelée ainsi pour Conséquences des Apports Rhodaniens sur le Milieu littoral Associé. Trois événements de crue ont été répertoriés à Beaucaire, avant la diffluence en Petit et Grand Rhône, durant ce laps de temps. Le débit seuil de crue est évalué entre  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Miralles et al., 2006) et  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Antonelli et al., 2008 ; Rolland, 2006) selon la littérature. Il est établi à  $4280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en amont du delta par la ZABR (Bravard et Clemens, 2008). La valeur la plus basse ( $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) a été admise comme seuil dans cette étude. De fait, les trois événements apparaissent comme des crues mineures, puisqu'ils ont atteint  $3775 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $3884 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivement les 18 novembre 2006, 9 décembre 2006 et 5 mars 2007. Le détail de ces crues est abordé dans le chapitre 'Résultats' de cette étude.

Toutes les stations de la CNR n'ont pas été étudiées lors de ce travail car certaines n'ont pas relevé de hausse du débit des eaux et ne se trouvent donc pas concernées par l'étude. Néanmoins, les affluents venus des Cévennes (Gard), des Alpes (Isère, Durance) et du nord du bassin rhodanien (Saône) ont été répertoriés afin de pouvoir situer l'origine des crues en fonction des débits mesurés sur une large étendue géographique. Cette distinction des origines des crues peut être très importante sur la nature des particules apportées et la remise en suspension des sédiments.

Il faut savoir que la CNR relève les valeurs de débit toutes les heures pour chaque station bordant le Rhône pour suivre son évolution progressive. Elle détermine le débit du Rhône en convertissant des mesures de hauteur d'eau à partir de courbes de tarage constamment réactualisées. Elle en fait également une moyenne quotidienne qu'elle met régulièrement à jour sur son site internet.

#### **3.1.2. Suivi de l'hydrodynamique**

##### **3.1.2.1. Etude des courants marins : utilisation des ADCP**

L'IRSN a organisé deux missions visant à déterminer les conditions hydrodynamiques à l'embouchure du Rhône: l'une durant l'hiver 2006-2007 rallongée jusqu'à l'été de la même année, et l'autre à l'automne 2008. La première consistait à immerger deux ADCP (**Figure 3.1**) à 20 m et 40 m de profondeur, près des bouées Roustan (Sud et Est). La seconde avait pour but de continuer les enregistrements de courants à 20 m de profondeur au niveau de la bouée Roustan Est.

Les deux courantomètres ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) sont produits par la société Teledyne RD Instruments pour mesurer les courants dans la colonne d'eau à la proche embouchure du Rhône. Ce sont des Workhorse Sentinel 600 kHz fonctionnant jusqu'à 200 m de profondeur. Ils ont été programmés pour recueillir des données de courants (intensité, direction) tous les quarts d'heure sur toute la colonne d'eau. Ils comportent 4 transducteurs sur leur tête, chacun émettant un faisceau acoustique (*beam*) d'une fréquence de 600 kHz, appelé "ping". L'écho de retour est dû à la réflexion de l'onde émise par des particules en suspension dans l'eau. Si les particules sont immobiles, le signal reçu par le transducteur aura la même fréquence que celui qui a été émis. Si un courant éloigne ou rapproche les particules, la fréquence qu'elles reçoivent (qu'elles entendent) est affectée d'un décalage, appelé effet Doppler. C'est ce décalage qui est mesuré pour en déduire la vitesse relative entre les particules et l'appareil (donc le courant). L'appareil émet/reçoit à plusieurs intervalles de temps consécutifs croissants et les vitesses calculées correspondent aux courants existant dans des couches d'eau à distances croissantes du transducteur, formant un profil de courant.

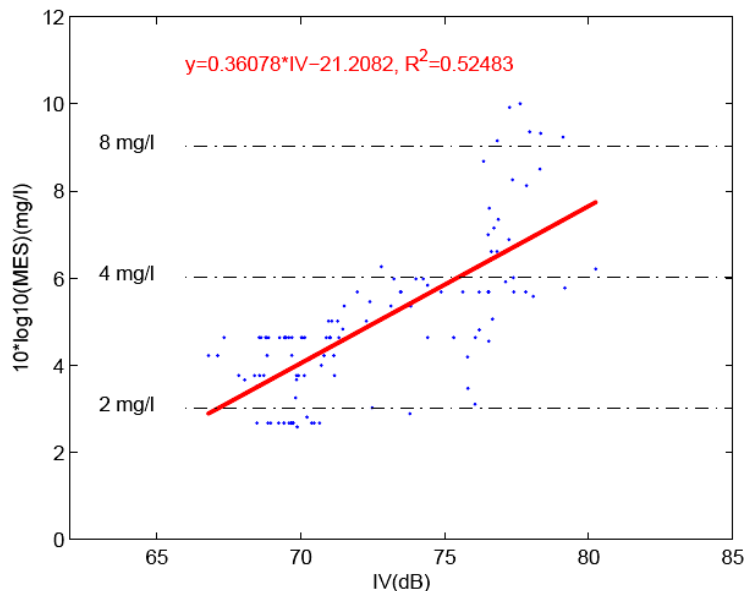


**Figure 3.1 : Image d'un ADCP Workhorse Sentinel couché sur le flanc. La capsule bleue ornée de 4 facettes rouges représente la tête qui est tournée vers le haut lors des enregistrements du courant dans la colonne d'eau. Le corps blanc renferme la carte d'acquisition, la carte mémoire et la batterie.**

#### 3.1.2.1.1. Calibration de l'ADCP

Afin de calibrer le signal rétrodiffusé de l'ADCP en  $\text{mg.l}^{-1}$ , il est nécessaire de calculer l'indice de rétrodiffusion volumique relatif  $\text{IV}_r$ , qui correspond à l'intensité rétrodiffusée corrigée des pertes de transmission. La calibration a été réalisée avec le turbidimètre STBD (**Figure 3.2**), lui-même calibré à l'aide des pesées de MES. Les mesures utilisées pour la calibration de l'ADCP proviennent des profils effectués au-dessus de la position du courantomètre pendant la campagne CARMEX entre le 11 et le 14 mars 2007.

Le nuage de points ne comprend pas de fortes concentrations en MES car l'ADCP n'a pu enregistrer la rétrodiffusion ni dans le néphéloïde de fond puisque la première cellule exploitable se situe 1.55 m au-dessus de l'interface eau-sédiment, ni dans le néphéloïde de surface puisque la dernière cellule représentant l'interface air-eau se trouve très bruitée. La gamme de concentrations s'avère donc réduite ( $2$  à  $8 \text{ mg.L}^{-1}$ ), ce qui expliquerait le coefficient de détermination  $R^2 = 0.52$ , mais l'équation de calibration (**Figure 3.3**) reste très proche de celle rencontrée par Romaric Verney lors de l'expérience SCOPE où le même type d'instrumentation a été immergé près de La Balancelle (Dufois, 2008).



**Figure 3.2 : Calibration empirique de l'indice IV (dB) de l'ADCP en fonction des mesures du turbidimètre calibrées par des pesées de MES.**

#### 3.1.2.1.2. Mouillages des ADCP

La proche embouchure du Rhône est une zone à fort risque de chalutage en raison du grand nombre de pêcheurs qui la fréquentent. Des dispositions de protection des appareils ont été prises afin de limiter leur perte ou leur endommagement, et de pouvoir les localiser.

Le profileur de courant situé à 20 m de profondeur lors de l'expérience CARMA a été installé dans une cage tubulaire en inox et monté sur collier en PVC (**Figure 3.3**). Il ne comportait pas de système de largage acoustique ni de *pinger* puisqu'il était relié directement à la bouée Roustan Est par un câble en acier. Sa proximité de la bouée assurait un probable évitement des chalutiers à cet endroit. Un lest en béton était accroché à la structure pour la maintenir au fond. La faible profondeur permettait à des plongeurs de la détacher.

L'ADCP mouillé à 20 m de profondeur lors de la campagne EXTREMA 2 en septembre 2008 a été immergé au même endroit et muni d'un largueur acoustique de type *pinger* capable de renseigner sur le paramètre de la distance. Pour éviter son enlèvement et le défaut de flottabilité, la cage a été conçue en trois parties : le toit, l'étage instrumenté et la base (**Figure 3.4**).

Le toit, coulé dans un bloc de polyuréthane, supporte l'ADCP et entraîne l'étage instrumenté dans sa remontée. Ainsi le potentiel de flottabilité se retrouve au sommet et non au pied de la structure et ainsi n'est pas susceptible de s'enliser dans la crème de vase.

L'étage instrumenté supporte le bloc batterie de l'ADCP et le largueur acoustique relié à la base. Il est physiquement séparé du toit afin de disposer les instruments mais il remonte avec l'ADCP une fois le largage effectué.

Enfin, la base sert de lest pour maintenir la structure au fond et contrecarrer l'effet du toit.

La cage anti-chalut est reliée à la bouée Roustan Est par un câble en acier pour éviter les passages des chaluts. Elle est également rattachée à un lest, lui-même relié à un couple de sonde CTD (Conductivity-Temperature-

Depth) et turbidimétrique, protégées du fooling par un chlorateur, maintenues dans la colonne d'eau par une bouée.

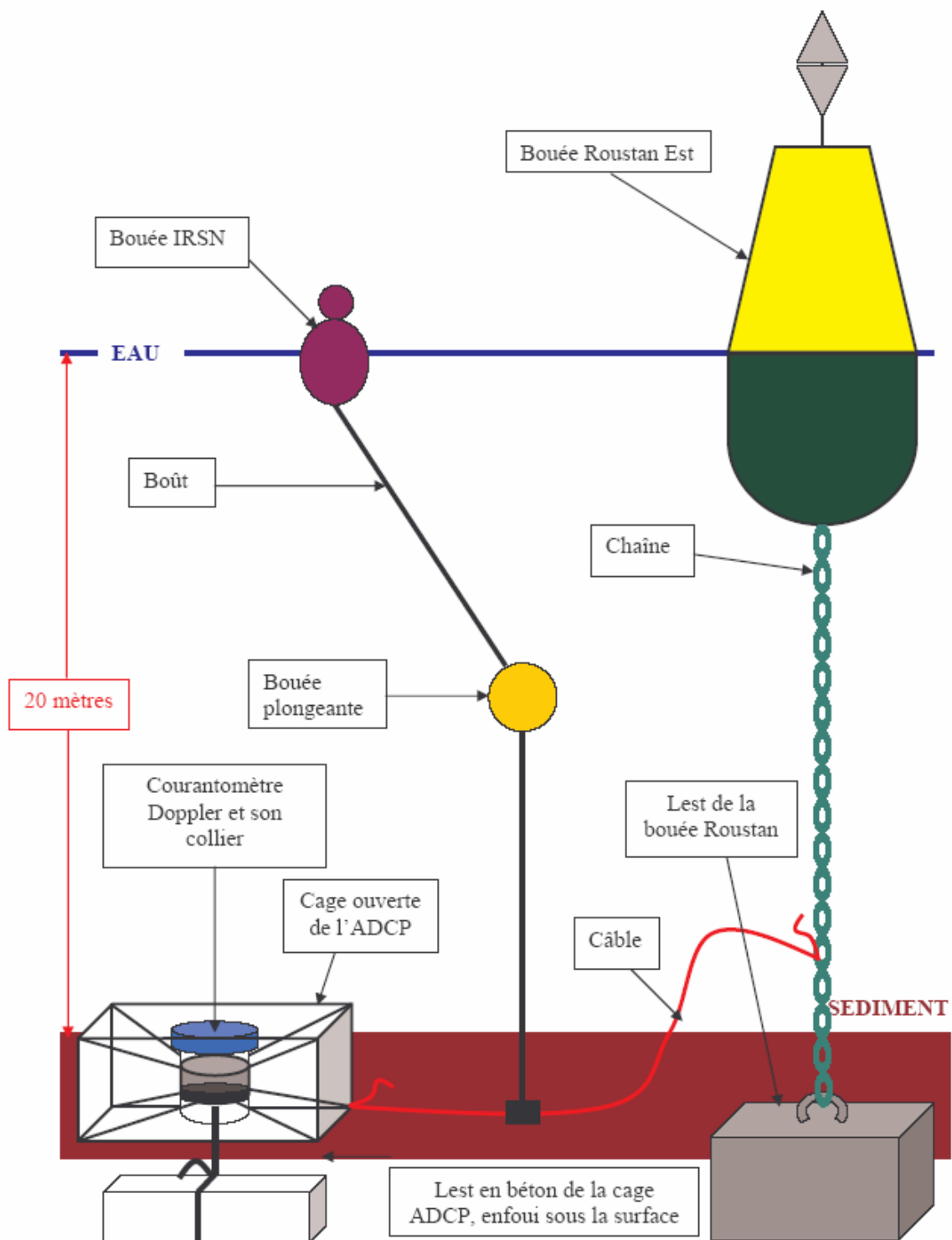


Figure 3.3 : Schéma de mouillage de l'ADCP immergé à 20 m de profondeur (expérience CARMA).



Météo-France sur la zone Europe. Il sert aussi dans plusieurs autres centres météorologiques étrangers sur des surfaces différentes.

Par rapport à un modèle global qui opère sur toute la planète, le modèle ALADIN ne s'intéresse qu'à une surface limitée ce qui lui permet de décrire les événements météorologiques à des échelles plus fines que le modèle ARPEGE -Arpège est le nom du logiciel informatique qui est utilisé pour établir chaque jour les prévisions du temps sur l'ensemble de la planète- pour un temps calcul raisonnable. Par exemple, la grille de l'application opérationnelle ALADIN de Météo-France comporte environ 2,5 millions de points. Pour obtenir la même résolution sur la France avec le modèle ARPEGE, il en faudrait environ 15,7 millions.

Ces modèles sont développés sous la responsabilité du service de recherche de Météo-France (CNRM), et ensuite confiés aux services d'exploitation pour être utilisés opérationnellement.

Ce type de logiciel est appelé "modèle de prévision numérique opérationnel" :

- "modèle" car la méthode de prévision consiste à représenter l'évolution de l'atmosphère via un ensemble des lois physiques de base (souvent connues depuis plus de cent ans), codées sous forme de plusieurs milliers de lignes de programme informatique. On calcule ainsi l'évolution de l'atmosphère à partir d'un état initial supposé connu parfaitement.

- "numérique" car l'état de l'atmosphère est décrit par une série de nombres et les lois physiques (par exemple Navier-Stokes) par des opérations sur ces nombres, le tout est traité par de puissantes machines de calcul (calculateur Fujitsu VPP 5000 de Météo-France).

- "opérationnel" car le modèle est pensé pour pouvoir fournir des prévisions tous les jours (il doit donc être très fiable) et dans un délai rapide (il doit donc être très optimisé pour fournir une prévision dans le meilleur délai possible).

L'atmosphère y est décrite grâce à différents paramètres : le vent, la température, l'humidité et la pression. Elle est découpée en petites "boîtes virtuelles" réparties à peu près régulièrement dans l'espace.

Le maillage du modèle ALADIN à l'embouchure du Rhône sépare chaque nœud de la grille de  $0.1^\circ$  et sa résolution temporelle est de 3 heures. Le profil météorologique couvre la période d'étude dans son intégralité en représentant les intensités et directions du vent.

#### 3.1.2.2.2. Modèle de vagues

Les ADCP immergés ne comprenaient pas tous des modules de houles permettant de suivre l'évolution des vagues en fonction du temps. Le modèle de vagues utilisé par Dufois (2008) a permis de reconstituer les événements de houle durant le projet CARMA.

Le vent crée une tension à la surface de l'eau qui, en fonction de son intensité et sa durée, initie une onde mettant en mouvement les molécules d'eau et les matières en suspension. Le milieu aquatique étant continu, cette onde se propage jusqu'à son ultime obstacle, à savoir le rivage sur lequel elle est ensuite réfléchi, diffracté et réfracté.

Les vagues sont modélisées dans la Mer Méditerranée Occidentale avec une résolution de  $0.1^\circ$  grâce à l'utilisation du modèle de vague de troisième génération WAVEWATCH-III (Tolman, 2002a) tournant avec les forçages atmosphériques délivrés par Météo-France. Ce modèle, développé par NOAA/NCEP (National Oceanic and



Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Predictions) et inspiré par le modèle WAM (Wave Model), a été appliqué avec succès à des études d'échelles globales et régionales dans différentes zones à travers les océans du monde (Tolman, 2002b ; Chu et al., 2004) et spécialement dans la partie ouest de la Mer Méditerranée (Ardhuin et al., 2007).

### 3.1.2.2.3. Vitesse orbitale $U_{orb}$ et coefficient de frottement des vagues $f_w$

Au large ou en zone côtière, les vagues ne se propagent pas dans la même direction ni à la même vitesse, et leur amplitude n'est pas constante temporellement et spatialement. Elles sont alors caractérisées par un spectre d'énergie, une période moyenne  $T_w$ , une hauteur significative  $H_s$  et une amplitude  $a$ . Ces paramètres permettent le calcul de la pulsation angulaire  $\omega$ , la longueur d'onde  $L$  et le nombre d'onde  $k$  (Ulses, 2005), comme suit :

$$\omega = \frac{2\pi}{T_w}$$

$$L = \frac{gT_w^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi a}{L}\right)$$

$$k = \left(\frac{2\pi}{L}\right)$$

Les particules fluides décrivent un mouvement circulaire dont le diamètre diminue en profondeur. Au fond, un mouvement oscillant se met en place à la vitesse dite orbitale  $U_{orb}$  qui s'exprime par :

$$U_{orb} = \frac{H_s \pi}{\sinh(kh) T_w}$$

La tension de fond créée par la houle seule s'exprime par :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_0 f_w U_{orb}^2 ,$$

où  $\rho_0$  est la masse volumique de l'eau de mer estimée à  $1024.8 \text{ kg.m}^{-3}$  et  $f_w$  est le coefficient de frottement des vagues. Son expression (Swart, 1974) est :

$$f_w = 0.00251 \exp\left[5.21 \left(\frac{A}{k_b}\right)^{-0.19}\right] \text{ si } \frac{A}{k_b} > 1.57 ,$$

avec  $k_b$  la rugosité physique dépendant de la taille du grain (la valeur du  $D_{50}$  dans l'étude a été estimée à  $15 \mu\text{m}$  après prélèvement sur zone) et de la dimension des rides (Harris et Wiberg, 2001) et  $A$  la distance parcourue par les particules sur le fond définie comme :

$$A = \frac{U_{orb} T_w}{2\pi}$$

En revanche, si  $\frac{A}{k_b} \leq 1.57$ , alors  $f_w = 0.3$ .

#### 3.1.2.2.4. Contraintes de cisaillement au fond (BSS)

Appelées Bottom Shear Stress (BSS), elles sont induites à la fois par la houle et par le courant. Ces derniers interagissent de façon non linéaire dans la couche du fond, où prédominent des processus de turbulence.

Soulsby et al. (1993) ont effectué une intercomparaison de modèles unidimensionnels verticaux à haute résolution qui décrivent explicitement l'action combinée de la houle et du courant près du fond. Le calcul des contraintes de cisaillement au fond a été réalisé par la combinaison linéaire de la tension induite par le courant seul  $\tau_c$  et la tension induite par la houle seule  $\tau_w$  définie précédemment.

La tension de fond créée par le courant seul s'exprime par:

$$\tau_c = \rho_0 C_D V_b^2 = \rho_0 u_*^2,$$

avec  $u_*$  la vitesse de friction et  $C_D$  le coefficient de traînée de fond relié à la rugosité du fond  $z_0$  (Blumberg et Mellor, 1987) :

$$C_D = \left( \frac{\kappa}{\log\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right)^2,$$

où  $\kappa = 0.41$  est le coefficient de Von Karman,  $z$  la hauteur du premier niveau du modèle au-dessus du fond et  $z_0$  la rugosité du grain égal à 0.1 mm (Soulsby, 1997). Cette relation est basée sur une forme logarithmique du courant de fond.

La tension de fond totale induite par les courants et la houle s'écrit donc :

$$\tau_{tot} = \frac{1}{2} \rho_0 (2u_*^2 + f_w U_{orb}^2)$$

### 3.1.3. Suivi des paramètres physico-chimiques

La salinité (calculée à partir de la conductivité), la température et la turbidité (la concentration en MES) sont des paramètres physico-chimiques influençant la densité de l'eau. Leur variation entraîne des répercussions sur le comportement et la circulation des masses d'eau. L'embouchure du Rhône est le point de rencontre de deux

milieux aquatiques différents: une eau douce chargée en matières terrigènes arrachées au bassin versant rhodanien et une eau salée riche en matières d'origine biogène. Ces paramètres varient selon les saisons et des conditions météorologiques.

### 3.1.3.1. Les sondes NKE de salinité-température-turbidité

Les sondes utilisées proviennent de la société française NKE. Tous les paramètres ne sont pas évalués par le même appareil : la sonde STPS 100 mesure la pression, la température et la salinité, alors que la sonde STBD mesure la pression, la température et la turbidité (**Figure 3.5**).

Elles n'ont pas été grées sur l'ADCP installé à 20 m de profondeur car indisponibles au moment de l'immersion mais elles ont servi à calibrer les données de rétrodiffusion à partir du suivi des conditions hydrologiques durant les campagnes CARMEX et EXTREMA 1 et 2, intégrées sur la rosette de prélèvement d'eau.



**Figure 3.5 : Les sondes STPS et STBD sont représentées avec leur chlorateur, respectivement de gauche à droite.**

Elles sont mises en route grâce à la connexion d'un stylo en PVC ou *data pencil* raccordé à un câble de 80 m depuis le PC portable. Une encoche est d'ailleurs prévue à cet effet.

Des chlorateurs (gros cylindres blancs sur la **Figure 3.5**) induisant un courant électrique ont été couplés aux sondes dans le but de jouer le rôle d'*anti-fouling* et d'empêcher la prolifération d'organismes sur les capteurs et récepteurs, susceptibles de modifier l'intensité des signaux émis et reçus.

#### 3.1.3.1.1. La sonde STPS 100

Equipée de capteurs de pression et salinité aux deux extrémités, elle présente également un capteur de température au centre. Les valeurs de pression et température sont assez comparables à celles montrées par la sonde STBD, et ce sont elles qui seront retenues dans cette étude car leur vitesse de stabilisation est plus importante (quelques secondes contre une dizaine de secondes). Elle est submersible jusqu'à 200 m, sans recalibrage, casse électrique ni mécanique (NKE Electronics, 2006c).

- La température est évaluée avec un capteur CTN et s'exprime en degrés celsius, avec une gamme de mesure de  $-5^{\circ}\text{C}$  à  $+35^{\circ}\text{C}$ . La résolution maximale est de  $0.011^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $0.013^{\circ}\text{C}$  à  $10^{\circ}\text{C}$  et  $0.02^{\circ}\text{C}$  à  $20^{\circ}\text{C}$ , et la précision de la sonde est d'environ  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$  dans la gamme  $0^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$ . Le temps de réponse est inférieur à 2 s dans 63 % des cas.

- La pression exprime la profondeur en mètres (ou en dbar pour le calcul de la salinité) au moyen d'un capteur céramique. Sa précision est estimée à  $\pm 0.3 \%$  de la pleine échelle et sa résolution est inférieure à  $0.04 \%$ .

- La salinité est calculée à partir des valeurs physiques de température, pression et conductivité selon l'algorithme EPS 78. Les valeurs d'étalonnage sont exprimées en mS/cm mais les données recueillies ont pour unité le ‰. La gamme de valeur s'étend de 2 à 42 ‰ selon une précision de  $0.1 \%$ .

### 3.1.3.1.2. La sonde STBD

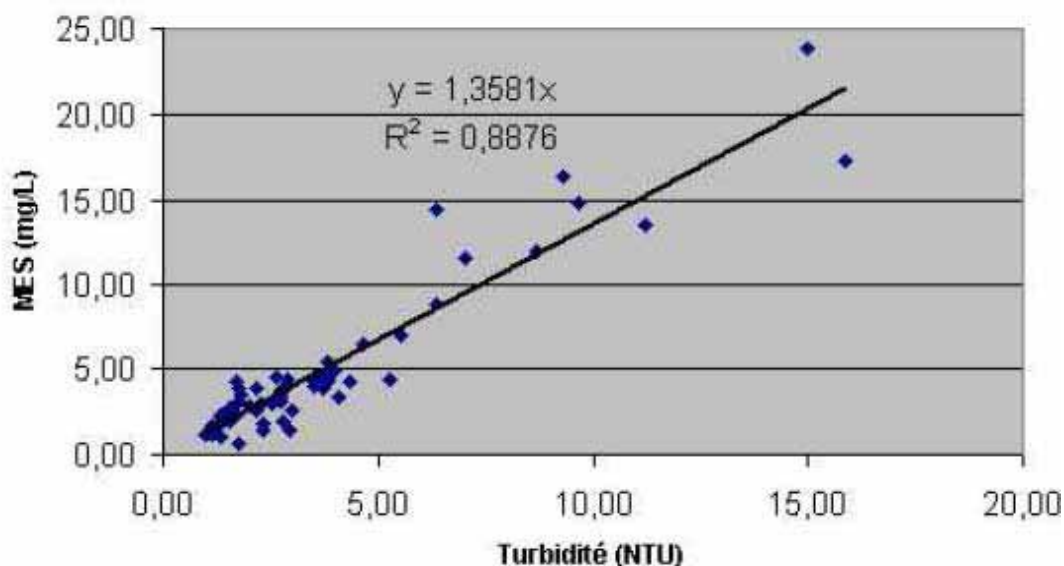
L'enregistreur autonome STBD permet la mesure et l'enregistrement de la pression, de la température et de la turbidité (ou la concentration de particules en suspension). Cette sonde est constituée d'un capteur Seapoint émettant une lumière modulée à 880 nm. La lumière réfléchiée par les particules (rétrodiffusée) est détectée par une cellule qui fournit un signal proportionnel à la concentration des particules en suspension dans le milieu à mesurer. Elle est submersible jusqu'à la même profondeur que la sonde STPS, soit 200 m, sans recalibrage, casse électrique ni mécanique (NKE Electronics, 2006b).

- La température est évaluée par le biais d'une thermistance intégrée au capteur de pression. Les caractéristiques de ce capteur sont identiques à celle de la STPS (gamme de mesure, résolution maximale, précision) mais son temps de réponse est bien supérieur, à savoir de l'ordre de 7 s, ce qui influe sur la stabilisation de la mesure.

- Le capteur de pression à membrane céramique a une précision de  $0.3 \%$  et une résolution inférieure à  $0.03 \%$ . Une immersion entre 0 et 100 m de profondeur connaît une précision de  $\pm 30$  cm selon une résolution de 3 cm.

- Le capteur Seapoint STM définit la turbidité en unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit) présente une linéarité de la mesure inférieure à  $2 \%$  quelle que soit la gamme de concentration de 0 à 750 NTU. En revanche, la résolution se dégrade d'un facteur 10 lorsque la turbidité augmente de ce même facteur, en partant de 0.0007 NTU pour une gamme de 0 à 2.5 NTU (soit 0.007 NTU pour 0 à 25 NTU, etc.).

Des prélèvements d'eau à l'embouchure du Rhône couplés à des immersions de la STBD à différentes températures et profondeurs ont permis de calibrer les données de turbidité de la sonde en  $\text{mg.L}^{-1}$  au lieu des NTU selon un  $R^2$  intéressant de près de 0.89 (**Figure 3.6**).



**Figure 3.6 : Courbe de calibration de la sonde de turbidité STBD (NTU) avec des prélèvements de matières en suspension ( $\text{mg.l}^{-1}$ ).**

Il est possible voire indispensable d'étalonner les 3 capteurs de la sonde pour vérifier leur bon fonctionnement. La fréquence d'échantillonnage configurée lors des campagnes océanographiques a été établie toutes les secondes en mode marche/arrêt manuel car les prélèvements d'eau se suivaient chaque demie-heure et les phases de descente/remontée ne prenaient pas plus de 2 minutes.

#### 3.1.3.1.3. La sonde Sea Bird 9 embarquée

La sonde CTD SBE 9 a été installée en pied de la rosette de bouteilles de prélèvements et est télécommandée depuis le Deck Unit de la passerelle (**Figure 3.7**). Parmi les paramètres qu'elle permet d'évaluer, ont été fixés l'altimétrie pour connaître instantanément la position de la structure par rapport au fond, la pression, la salinité, la température, le dioxygène dissous et la fluorimétrie. Les prélèvements d'eau réalisés par les bouteilles Niskin sont directement ordonnés depuis l'unité de bord.

La résolution d'échantillonnage de l'appareil est de 24 Hz, le flot d'eau est contrôlé par une pompe et sa capacité d'immersion maximale est de 10500 m.

Le suivi de 20 stations d'étude hydrologique a été mené durant la campagne CARMEX en 2007 (15 à l'embouchure du Grand Rhône et 5 devant le Petit Rhône) et plus de 50 durant les campagnes EXTREMA 1 et 2 en 2008 dont 2 legs de 25 points à l'embouchure du Grand Rhône et quelques stations devant le Petit Rhône.

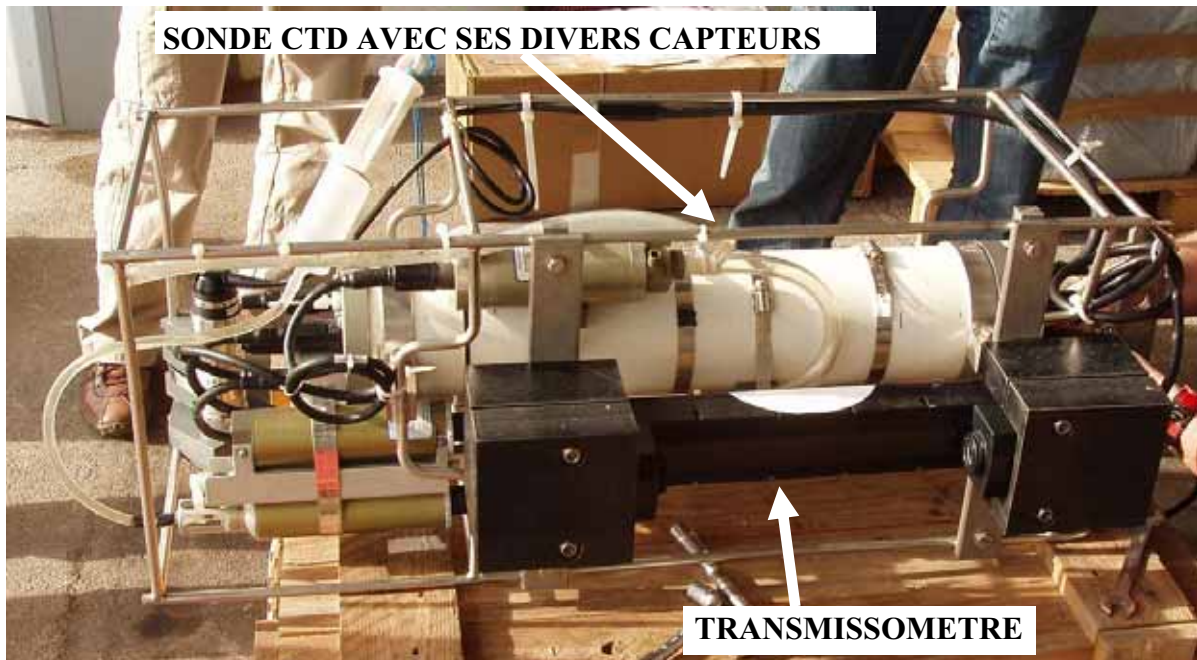
#### 3.1.3.1.4. Le transmissomètre WETLABS

Contrairement au capteur optique de la sonde STBD qui traite un signal rétrodiffusé, le transmissomètre analyse le signal transmis depuis sa cellule émettrice vers son récepteur (**Figure 3.7**).

La turbidité est donnée en pourcentage de l'intensité incidente :

$$\text{Incident} = \text{Réfléchi} + \text{Transmis} \text{ donc } \{\% \text{ Transmis}\} = \{(\text{Incident} - \text{Réfléchi}) / \text{Incident}\} = tr$$

Plus le pourcentage de signal transmis est faible, plus la turbidité est importante. La calibration du signal du transmissomètre a été effectuée par le prélèvement parallèle de l'eau au moyen de bouteilles Niskin. Les pesées de MES (filtrées dans un volume de 2 L au moyen de filtres millipore 0.2  $\mu\text{m}$ ) réalisées après un séjour minimum de 48 h en étuve, déshydratées par des billes de silicagel, ont permis de calibrer les données des sondes de turbidité. La gamme de validité de ces calibrations n'est pas très large car aucune concentration n'a dépassé 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Néanmoins, ces valeurs seront utilisées ultérieurement pour l'analyse des données.



**Figure 3.7 : La sonde CTD SBE 9 munie de ses capteurs d'O<sub>2</sub> dissous, de fluorimétrie, de salinité, de température et d'altimétrie ainsi que le transmissomètre.**

Pour calibrer le transmissomètre, l'atténuation lumineuse à 660 nm ( $c_{660}$  en  $\text{m}^{-1}$ ) a été calculée par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$c_{\lambda} = -\frac{1}{L} \ln(tr/100)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde, L la longueur du chemin optique parcouru par le transmissomètre et tr (en %) le pourcentage de lumière reçue.

On obtient pour le transmissomètre (en  $\text{m}^{-1}$ ) la calibration suivante (**Figure 3.8**):

$$MES_{\text{trans}} = 0.1458 c_{660}^2 + 1.4713 c_{660} \quad [\text{mg/l}] \quad (R^2 = 0.8434)$$

Précédemment, la sonde STBD (en NTU) révéla une calibration telle que :

$$MES_{\text{NKE}} = 1.3581 \text{Turb}_{\text{NKE}} \quad [\text{mg/l}] \quad (R^2 = 0.88)$$

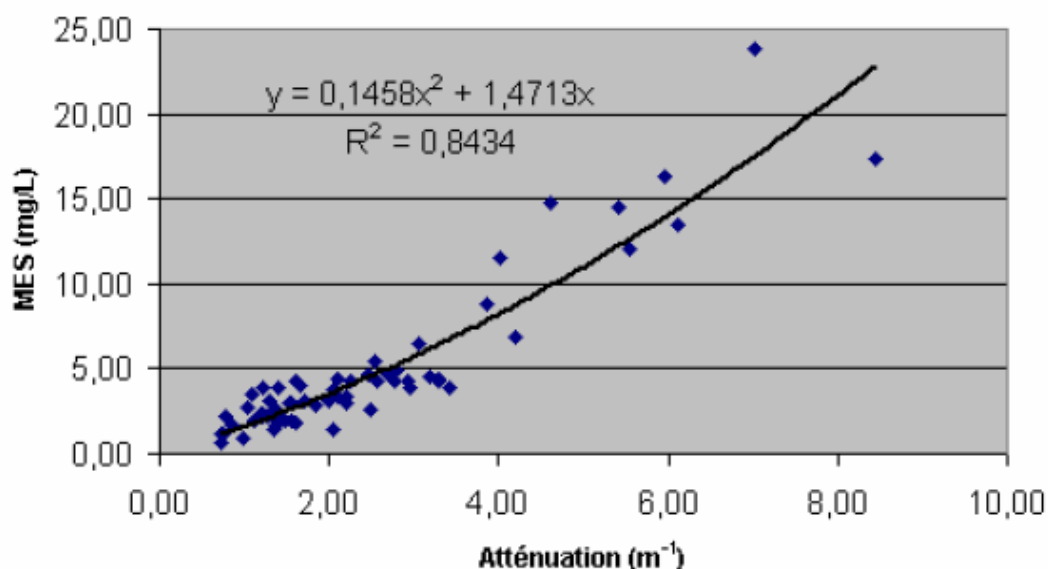


Figure 3.8 : Courbe de calibration du transmissomètre ( $m^{-1}$ ) en fonction de prélèvements de matières en suspension ( $mg.L^{-1}$ ).

Le rapprochement avec les données de la sonde de NKE donne des résultats concluants en matière de concentrations de matières en suspension à l'issue de la calibration des deux appareils grâce aux 71 prélèvements d'eau de la campagne CARMEX. On remarque par ailleurs que les valeurs révélées par le turbidimètre sont plus importantes pour les plus faibles concentrations en MES (Figure 3.9).

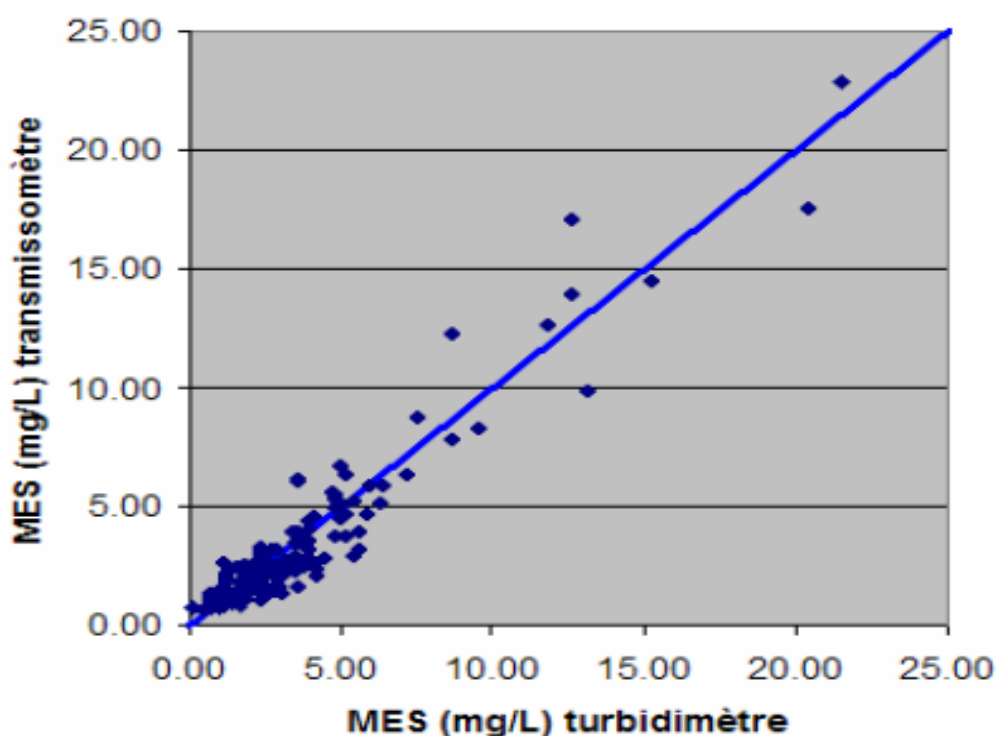


Figure 3.9 : Comparaison des résultats de concentrations en MES donnés par le transmissomètre et par la STBD.

### 3.2. Etude sédimentologique des apports rhodaniens

De nombreuses campagnes en mer auxquelles l'IRSN a participé activement se sont succédées entre 2001 et 2008, certaines vouées à l'étude du Golfe du Lion mais la plupart axée sur l'embouchure du Rhône et son prodelta (Tableau 3.1).

	Lieux	Dates de prélèvements	Nature	Utilisation des données	Participation
<b>REMORA 1</b>	Prodelta du Rhône	mars 2001	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments	Laboratoire
<b>REMORA 2</b>	Prodelta du Rhône	novembre 2001	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments	Laboratoire
<b>REMORA 3</b>	Golfe du Lion	novembre 2002	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments	Laboratoire
<b>BOBORHONE 1</b>	Prodelta du Rhône	décembre 2003	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments . Suivi d'une crue	Laboratoire
<b>BOBORHONE 2</b>	Prodelta du Rhône	février 2004	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments . Suivi d'une crue	Laboratoire
<b>SED 2</b>	Prodelta du Rhône	avril 2004	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments . Suivi d'une crue	Laboratoire
<b>US-EURO STRATAFORM</b>	Golfe du Lion	2003, 2004, début 2005	Granulométrie	. Bilan sédimentaire	Laboratoire
<b>CARMA</b>	Embouchure du Rhône	septembre 2006 à juillet 2007	. Courantométrie . Altimétrie . Sédimentologie	. Hydrodynamique sédimentaire	Embarqué Laboratoire
<b>CARMEX</b>	Prodelta du Rhône	mars 2007	. Hydrométrie . Spectrométrie gamma . Granulométrie	. Hydrologie . Bilans de radionucléides et de sédiments	Embarqué Laboratoire
<b>EXTREMA 1</b>	Prodelta du Rhône	mars 2008	. Hydrométrie . Spectrométrie gamma . Granulométrie	. Hydrologie . Bilans de radionucléides et de sédiments	Embarqué Laboratoire
<b>EXTREME</b>	Prodelta du Rhône	septembre 2008	. Courantométrie . Altimétrie . Sédimentologie	. Hydrodynamique sédimentaire	Embarqué Laboratoire
<b>EXTREMA 2</b>	Prodelta du Rhône	octobre 2008	. Hydrométrie . Spectrométrie gamma . Granulométrie	. Hydrologie . Bilans de radionucléides et de sédiments	Embarqué Laboratoire
<b>DEEP1</b>	Cap Creus	avril 2008	.Spectrométrie gamma .Granulométrie	. Taux de sédimentation . Bilans de radionucléides et de sédiments	Laboratoire

**Tableau 3.1 : Campagnes océanographiques menées en Mer Méditerranée et natures des résultats sont utilisés dans cette thèse.**

La multitude de carottages réalisée à différentes profondeurs en Mer Méditerranée Occidentale et particulièrement au débouché du Grand Rhône a permis l'élaboration de nombreuses cartes sédimentaires et de concentrations de radioéléments (Tableau 3.2).



Missions	Lieu de mission	Carottier utilisé	Nombre de carottes
REMORA 1	Embouchure du Rhône étendue	Multi-tubes	25
REMORA 2	Prodelta du Rhône	Kullenberg	19
REMORA 3	Golfe du Lion	Multi-tubes	62
BOBORHONE 1	Embouchure du Rhône	Benne Fluchat	6
BOBORHONE 2	Embouchure du Rhône	Benne Fluchat	9
SED 2	Embouchure du Rhône	Benne USNEL	30
CARMEX	Embouchure du Rhône	Tubes dans USNEL	9
EXTREMA 1	Embouchure du Rhône	Tubes dans USNEL	15

**Tableau 3.2 : Conditions et quantité de prélèvements sédimentaires durant les différentes campagnes.**

### 3.2.1. Mesures altimétriques (ALTUS)

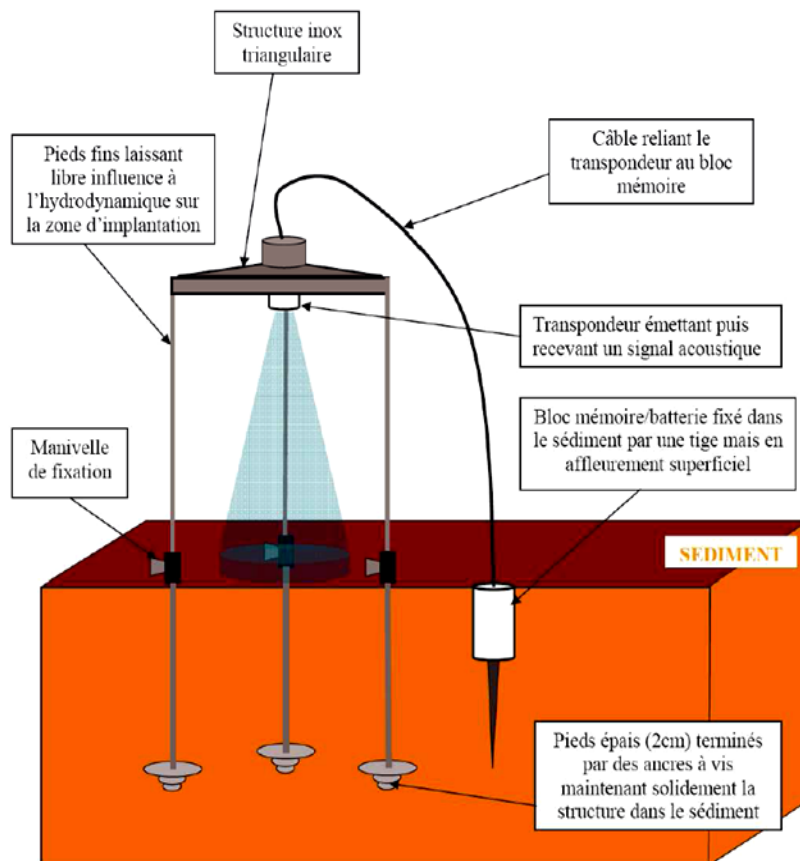
Le projet CARMA présente une étude hydrodynamique avec un ADCP et une étude sédimentologique avec des altimètres S-ALTUS. Le but était de suivre l'évolution du fond sédimentaire à l'embouchure du Rhône et de la relier à la dynamique sur le prodelta.

L'immersion de deux altimètres près du domaine de La Palissade, 2 km avant l'embouchure sur la rive droite du Rhône, et de quatre autres entre les deux bouées Roustan Sud et Est, s'est soldée par la récupération d'un appareil, en l'occurrence celui qui était localisé au niveau de l'ADCP retrouvé (Roustan Est). En effet, deux Altus placés entre les bouées Roustan ont été chalutés peu de temps après avoir été installés et les trois autres n'ont pas fonctionné correctement.

L'altimètre S-ALTUS élaboré par la société Micrel (**voir Annexe K**) a été conçu initialement selon les besoins de chercheurs d'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) dans le but d'étudier les zones immergées temporairement et régulièrement que constituent les estrans de la Seine ou de la Loire (Verney et al., 2007; Bally et al., 2004; Jestin et al., 1998).

Bourrin (2007) mit au point une bouée appelée POEM-L2R abritant en profondeur une station d'observation continue des conditions hydrosédimentaires à l'embouchure de la Têt, fleuve des Pyrénées Orientales. Cette station était équipée d'altimètres S-ALTUS notamment. Il put relier les enregistrements altimétriques avec les apports solides et liquides de la Têt, les courants marins affectant la zone et l'effet de la houle.

Il consiste en un transducteur envoyant un signal acoustique d'une fréquence de 2 MHz et le recevant après réflexion sur un substrat plus ou moins dense (**Figure 3.10**). Le faisceau d'un angle de 3.6°, émis depuis une hauteur de 70 cm, balaie une surface de 15.2 cm<sup>2</sup> environ. Il est constitué de deux parties : l'une enfoncée dans le sédiment sous la forme d'un boîtier étanche en ertalyte contenant les batteries, la carte mémoire et un capteur de pression, et l'autre fichée dans une structure en inox triangulaire à la verticale du point étudié comprenant le transducteur.



**Figure 3.10 : Schéma de mouillage d'un altimètre S-ALTUS et de sa structure dans le sédiment (expérience CARMA).**

Il permet de mesurer les grandeurs physiques transducteur-cible (altitude), le niveau maximum du signal reçu par le transducteur (Echomax) et la profondeur (NKE Electronics, 2006a).

L'épaisseur de vase et le fort taux de sédimentation prodeltaïque ont imposé quelques contraintes physiques, notamment l'ajout d'ancres à vis rigides sur un mètre de profondeur de sédiment.

### 3.2.2. Echantillothèque des prélèvements de sédiments

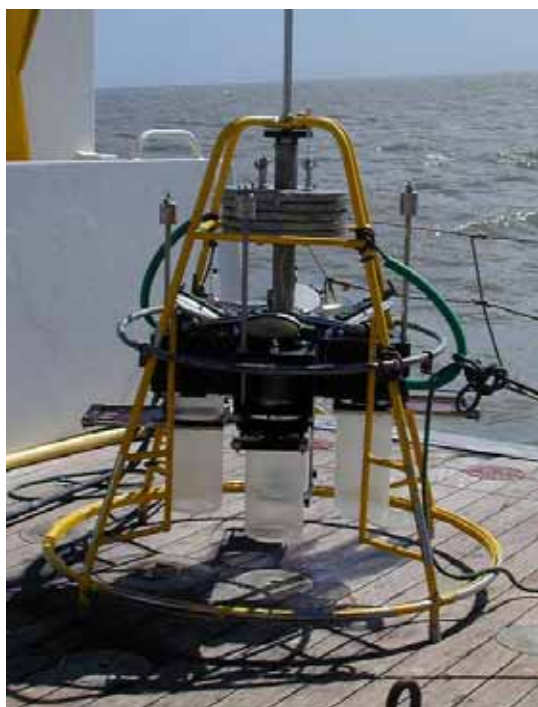
Le Golfe du Lion et l'embouchure du Rhône en particulier ont fait l'objet de nombreuses études et campagnes océanographiques depuis des années. La récurrence de ces missions permet un suivi sédimentologique et radioécologique de cette partie de la Mer Méditerranée nord-occidentale.

#### 3.2.2.1. Campagnes REMORA (Programme européen Remotrans - 2001 à 2002)

Réalisée en mars 2001 à bord du NO *L'Europe*, cette campagne ciblait l'embouchure du Rhône et particulièrement le prodelta sur lequel les taux de sédimentation varient du dixième de centimètres à plusieurs décimètres par an (Radakovitch et al., 1999; Zuo et al., 1991). Le domaine proximal présente logiquement les plus forts taux de sédimentation contrairement au domaine distal qui accumule beaucoup moins de sédiments.

### 3.2.2.1.1. Campagne REMORA 1

Les prélèvements de sédiment ont été effectués au moyen d'un carottier multitubes Minicorer Mark VI (Lansard, 2005), prototype créé en 1997 par Bowers et Connelly d'après le modèle décrit par Barnett et al. (1984). Ce carottier permet d'échantillonner simultanément 4 carottes de sédiment à l'aide de tubes en plexiglas de 15 cm de diamètre et de 50 cm de hauteur (**Figure 3.11**). Les contraintes de cisaillement et l'effet de compaction sont minimisés par le biais de cet appareil. De fait, les résultats obtenus sont moins perturbés par l'impact physique de la méthode usitée. Le principe de fonctionnement général du carottier multitubes est l'enfoncement des tubes par gravité puis la fermeture hermétique des tubes par un clapet muni d'un joint torique créant un effet de succion. Puis, un système de guillotine tranche l'excédent de sédiment à l'extrémité inférieure de chaque tube. 25 stations furent l'objet de prélèvements sur le plateau continental (**Figure 3.12**), couvrant une zone d'étude partant de la ligne bathymétrique -20 m (MTRous) jusqu'à la profondeur de 110 m (MT07). La longueur des carottes est très variable : elle s'étend de 11 cm pour MT17 à 30 cm pour MTRous, le paramètre de consolidation du sédiment impactant sur la pénétration du carottier dans le substrat. Cette épaisseur s'avère insuffisante car la fin du signal des radioéléments analysés, notamment du césium et du plutonium, n'a pas été atteinte même si elle était proche à certaines stations, ce qui n'a pas permis de clore les bilans.



**Figure 3.11 : Carottier multitubes sur la plateforme arrière avant échantillonnage.**

Pour à peu près chaque station, 3 carottes issues d'un même lancer de carottier ont été sommées afin de recueillir assez de matière dans le cadre des analyses spectrométriques et dépasser les seuils de détection pour les plus bas niveaux d'activité. Il a été établi de procéder à un découpage des carottes en tranches de 1 cm d'épaisseur dans le but d'obtenir une résolution assez fine dans toute la zone. Ces échantillons ont été lyophilisés et ont ensuite subi des mesures gamma puis des mesures alpha. Quelques grammes de sédiment frais ont été conservés avant la phase de lyophilisation afin de déterminer la distribution granulométrique.

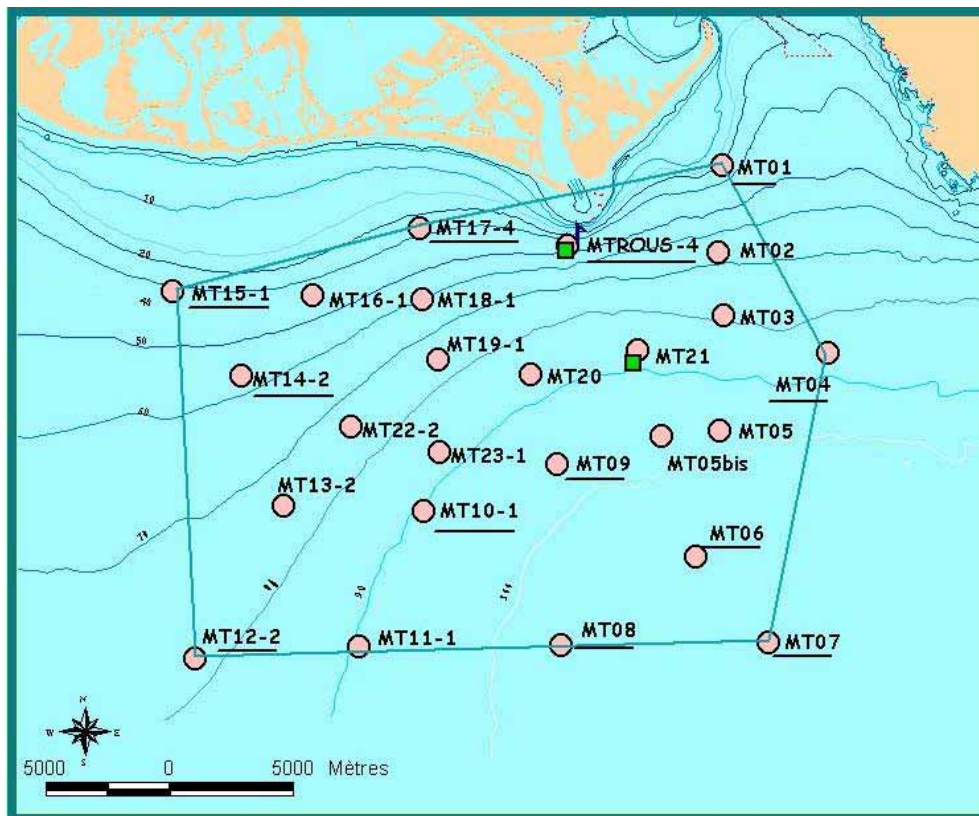


Figure 3.12 : Cartes des stations échantillonnées lors de la campagne REMORA 1.

### 3.2.2.1.2. Campagne REMORA 2

Comme le montre la **Figure 3.13**, la campagne REMORA 2, déroulée en novembre 2001, s'est davantage focalisée sur le prodelta du Rhône. La littérature évalue sa superficie à 30 km<sup>2</sup> environ (Durrieu de Madron et al., 2000 ; Boldin et al., 1988 ; Aloisi et al., 1982) et son étendue depuis la barre d'embouchure jusqu'à l'isobathe 80 m.

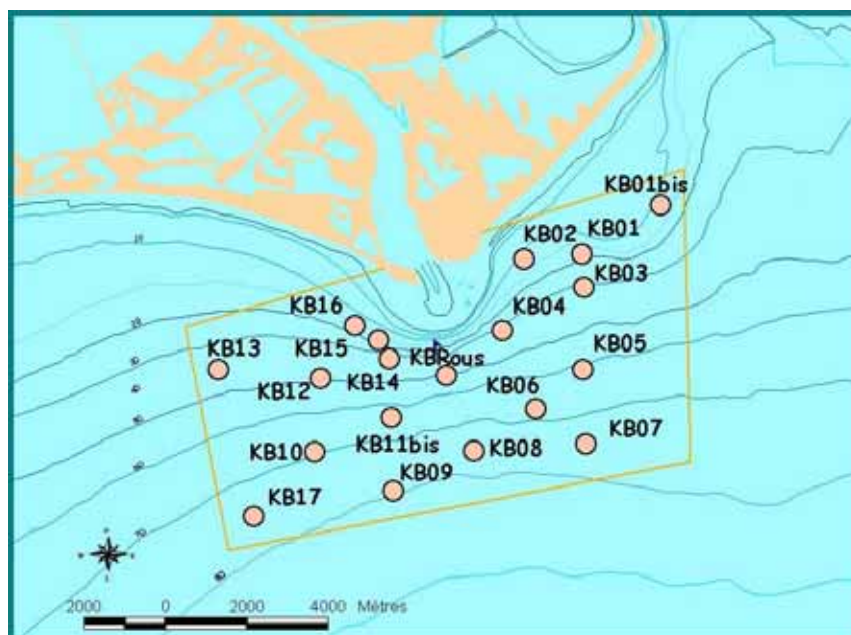
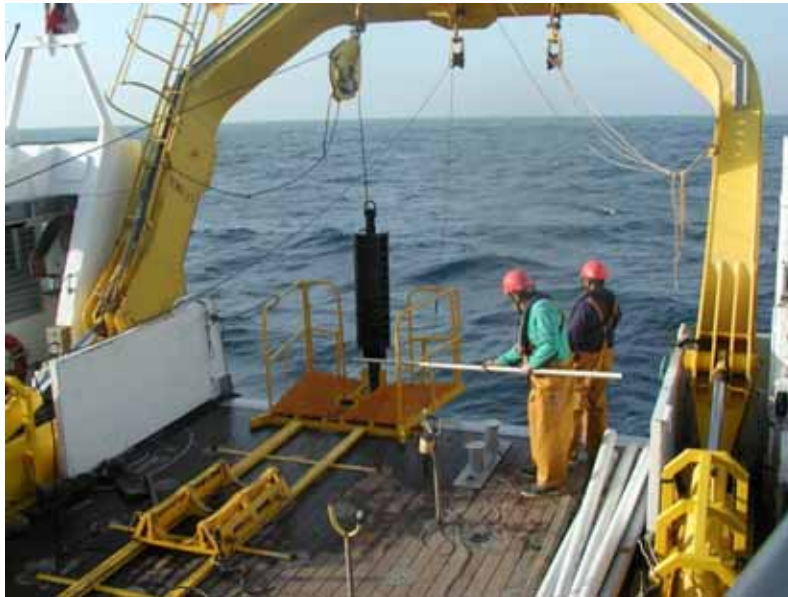


Figure 3.13 : Carte des stations échantillonnées lors de la campagne REMORA 2.

Le matériel de prélèvement utilisé consistait en un carottier Küllenberg (**Figure 3.14**), fonctionnant au moyen d'un piston et d'un lest de 700 kg, dont le diamètre de la chemise interne mesurait 9 cm. Sa pénétration dans le sédiment est bien supérieure au carottier multitubes mais conduit généralement à une compaction de la colonne sédimentaire et ainsi à une restitution erronée des strates superficielles. En effet, les longueurs des 19 carottes de sédiment échantillonnées lors de cette campagne s'échelonnent de 192 cm (KB16) à 474 cm (KBRous). Etant donné les forts taux de sédimentation en zone très proximale de l'embouchure, à savoir entre 20 et 30 cm.an<sup>-1</sup> (Calmet et Fernandez, 1990 ; Charmasson, 1998), il est inévitable de prélever de longues carottes pour repérer la fin du signal des radioéléments de moyenne demi-vie (comme le <sup>137</sup>Cs, le <sup>210</sup>Pb, etc.) et dresser leurs stocks.



**Figure 3.14 : Carottier Küllenberg (partie sommitale, lest) sur la plateforme arrière avant immersion.**

#### 3.2.2.1.3. Campagne REMORA 3

Déroulée sur 3 semaines entre octobre et novembre 2002, cette campagne avait pour objectif d'échantillonner des sédiments de l'ensemble du Golfe du Lion (**Figure 3.15**). Un quadrillage assez homogène du plateau continental a été réalisé au moyen de 67 stations, englobant les principaux canyons sous-marins (Aude, Lacaze-Duthiers, Petit-Rhône, Grand-Rhône) incisant le talus, les embouchures des fleuves littoraux français où se développent des prodeltas (Têt, Aude, Hérault, Petit Rhône, Grand Rhône). Les profondeurs d'échantillonnage varient d'une dizaine de mètres (MT09) à 1200 m (MT19) et les prélèvements ont nécessité l'utilisation du carottier multitubes complétée par un carottier boîte de type USNEL.

Comme les campagnes précédentes, les sédiments recueillis ont été analysés par spectrométrie (gamma, alpha pour certaines stations) et granulométrie afin d'établir des cartes de répartition granulaires et de radionucléides anthropogéniques à l'échelle du Golfe du Lion. Des représentations de distribution de sédiments par taille de grains ont déjà été effectuées auparavant (Aloisi et al., 1973). La faible concentration de points de référence proportionnellement à l'aire de la zone étudiée entraîna l'application de plusieurs méthodes d'interpolation.



**Figure 3.15 : Carte des stations échantillonnées lors de la campagne REMORA 3, représentant les legs réalisés et les zones étudiées pendant les missions REMORA 1 et 2.**

Le carottier boîte USNEL (**Figure 3.16**), appelé fréquemment ‘benne USNEL’ en raison de son aspect rappelant davantage une benne qu’un carottier, est équipé d’une boîte cubique qui permet de prélever des échantillons de sédiments peu perturbés par sa pénétration sur une hauteur de 50 cm environ. La benne est ouverte lors de son immersion et l’impact physique de la masse de la boîte permet son enfoncement. Une fois arrivée au fond et remplie, la traction exercée sur le câble pour remonter le carottier déclenche la fermeture de la boîte par un système de couteau. Par temps relativement calme, cette benne conserve la partie superficielle du sédiment de manière satisfaisante. Au contraire, les houles importantes empêchent le prélèvement dans de bonnes conditions (renversement du contenu) et rendent la manipulation dangereuse.



**Figure 3.16 : Benne USNEL en phase d’immersion à l’embouchure du Rhône.**

### 3.2.2.2. Campagnes BOBORHONE et SED2 (Programme Eurostrataform - 2003 à 2004)

Les campagnes BOBORHONE 1, 2 et SED 2 ont eu pour but de suivre bimestriellement les processus de sédimentation et de distribution radioélémentaire résultant d'événements extrêmes, comme des crues et des tempêtes. En effet, le 4 décembre 2003, une crue centennale se produisit sur le bassin versant du Rhône, entraînant une élévation du débit du fleuve concerné à plus de  $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 3.2.2.2.1. Campagne BOBORHONE 1

Cette première campagne d'une série de trois eut lieu à la mi-décembre 2003, quelques jours après la crue importante du début de mois. Des stations communes aux deux campagnes suivantes sont couvertes par le réseau de prélèvements, notamment BF05 et BF06, qui ne sont autres que les stations Chenal30m et MT04KB de la mission REMORA 3 (**Figure 3.17**). Six points d'échantillonnage ont été effectués au moyen d'une benne Fluchat (benne à section plus réduite que l'USNEL mais de hauteur plus importante et dont la fermeture est actionnée par le biais d'un système de 'mâchoire') et chaque contenu de benne a été sous-carotté au moyen de tubes en PVC de 15 cm de diamètre (issus de carottier multitubes). Les profondeurs de prélèvements s'étendent d'environ 30 m (BF05) à 70 m (BF13) et la longueur des carottes de 29 cm (BF07) à 39 cm (BF09).



**Figure 3.17 : Carte des stations échantillonnées à la proche embouchure du Grand Rhône lors de la campagne BOBORHONE 1.**

#### 3.2.2.2.2. Campagne BOBORHONE 2

Cette seconde campagne se déroula à bord du *NO L'Antédon* dans la même zone au mois de février 2004 et s'efforça de prélever aux mêmes coordonnées GPS que la campagne BOBORHONE 1 afin de pouvoir comparer les séquences temporelles de dépôt.

De la même manière, la benne Fluchat et un sous-carottage au moyen d'un tube de PVC ont permis les 9 prélèvements effectués dans la colonne sédimentaire entre 27 m (BF05) et 95 m (BF90) de profondeur (**Figure 3.18**).

Les carottes ont été découpées tous les centimètres puis conditionnées dans des barquettes en aluminium afin d'être analysées par la suite (spectrométrie, granulométrie).

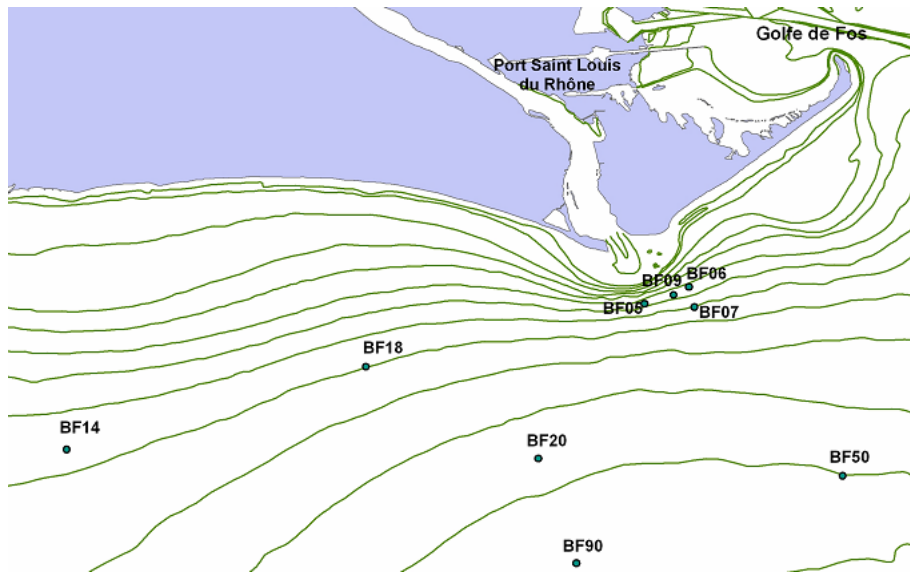


Figure 3.18 : Carte des stations échantillonnées lors de la campagne BOBORHONE 2.

#### 3.2.2.2.3. Campagne SED 2

Elle a eu lieu dans la même zone d'étude en avril 2004, soit 4 mois après la crue exceptionnelle de décembre. Un nombre de 30 carottes sédimentaires ont été prélevées durant cette campagne, dont la profondeur a varié de 11 m (HChenal20m) à 90 m (BF02bis).

Le matériel utilisé par l'IRSN demeure la benne USNEL et des tubes de plastique, au nombre de deux afin de recueillir assez de matière pour les analyses à suivre (Figure 3.19).

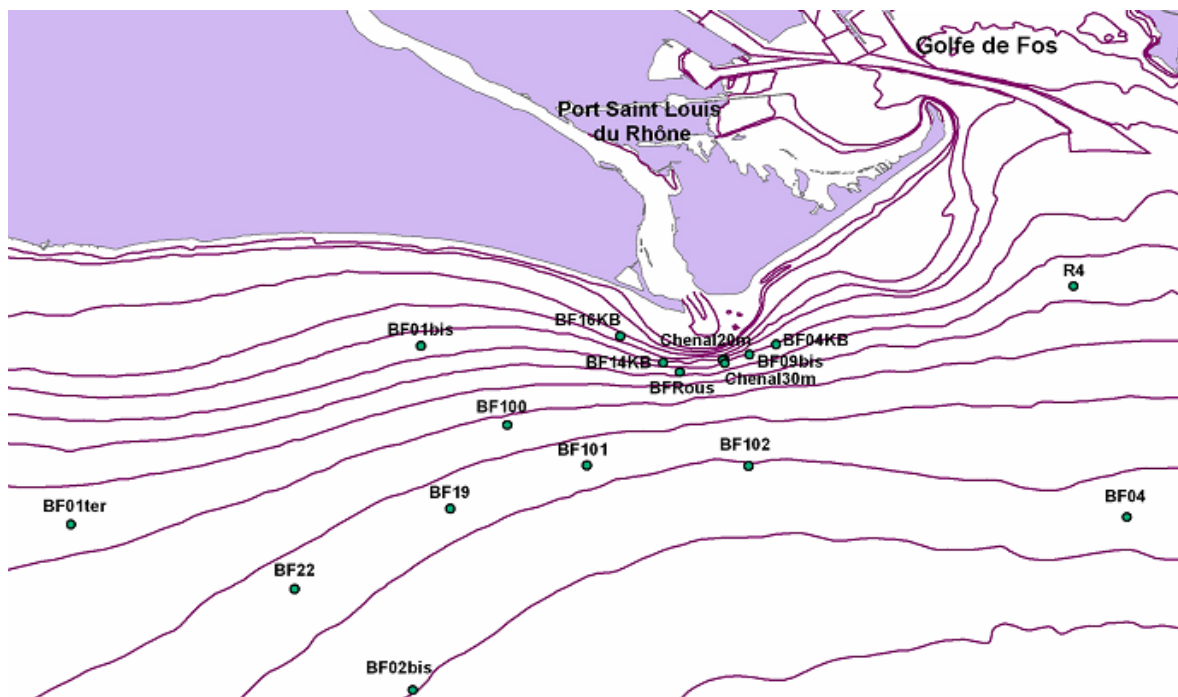


Figure 3.19 : Carte des stations échantillonnées lors de la campagne SED 2 (avril 2004).



### 3.2.2.3. Campagnes récentes: CARMEX et EXTREMA (ANR Extrema - 2007 à 2008)

Les campagnes CARMEX et EXTREMA ont gardé des stations récurrentes aux dernières missions à but de comparaison et de détermination de l'évolution du système sédimentaire prodeltaïque rhodanien aux niveaux des Petit et Grand Rhône.

Les prélèvements de sédiments ont été réalisés à la benne USNEL (**Figure 3.16**) et une étude hydrologique avec des échantillonnages d'eau et de MES à diverses profondeurs ainsi que l'enregistrement de paramètres géochimiques.

#### 3.2.2.3.1. Campagne CARMEX

##### ▪ **Etude hydrologique**

Les mesures hydrologiques ont été effectuées la première semaine de campagne (11-14 mars 2007) sur 20 stations à différentes profondeurs (de 7.3 m à 90 m) avec une sonde CTD SBE 9 montée sur une rosette comprenant 11 bouteilles Niskin (**Figure 3.20**). Un transmissomètre WET-Labs a été couplé à la sonde CTD, ainsi qu'un fluorimètre et un capteur d'O<sub>2</sub> dissous. Deux sondes NKE Micrel ont été adjointes pour mesurer parallèlement la température, la salinité et la turbidité.

Les analyses granulométriques in-situ ont été réalisées au moyen du LISST-100 X développé par Sequoia, et des mesures de granulométrie ont été effectuées en laboratoire à l'aide du même granulomètre à partir des matières en suspension prélevées par le biais des bouteilles Niskin. L'eau chargée en MES a ainsi été filtrée sur un volume d'environ 2 L avec des filtres millipore 0.2 µm GTTP et le filtrat a été insonifié (grâce au passage du filtre aux ultra-sons) dans le but d'obtenir pour la même zone, la granulométrie in-situ et la granulométrie après défloculation.

En raison de la panne survenue au niveau de la pompe de la CTD Seabird, les paramètres de température, salinité et O<sub>2</sub> dissous déterminés par cette sonde n'ont pas été retenus. Le système présente donc deux mesures différentes de turbidité dont une mesure de transmission optique (transmissomètre) et une mesure de rétrodiffusion optique (STBD).

Un ADCP Workhorse Sentinel de RDI à 600 kHz fonctionnant en mode « Bottom Tracking » fixé sur un mini-catamaran a également permis l'acquisition simultanée de données d'intensité rétrodiffusée.



**Figure 3.20 : Rosette de 11 bouteilles Niskin couplées au granulomètre laser in-situ (premier plan entre les bouteilles), à la sonde CTD (en bas du cylindre), au transmissomètre et aux sondes NKE (derrière la CTD).**

#### ▪ Etude sédimentologique

Le leg de la campagne océanographique dédié à l'étude sédimentologique s'est déroulé entre le 14 et 17 mars 2007 au moyen de la benne USNEL dans laquelle deux carottes sédimentaires ont été prélevées à chacune des stations grâce des tubes en plexiglas. Les carottages de sédiments ont été réalisés entre 7.3 m (US19bis) et 49 m (Chenal30) de profondeur sur 9 stations réparties à l'embouchure du Rhône (**Figure 3.21**) et les carottes mesurent de 22 cm (US17) à 41 cm (USRous). Les prélèvements ont été découpés sur le bateau en tranches de 1 cm d'épaisseur et de section 225 cm<sup>2</sup> afin de permettre des analyses granulométriques et spectrométriques en profondeur. Ces échantillons ont été conditionnés dans des barquettes d'aluminium après avoir été pesés et prélevés de quelques grammes de sédiments mis dans des piluliers en plastique dans l'optique d'analyses granulométriques.

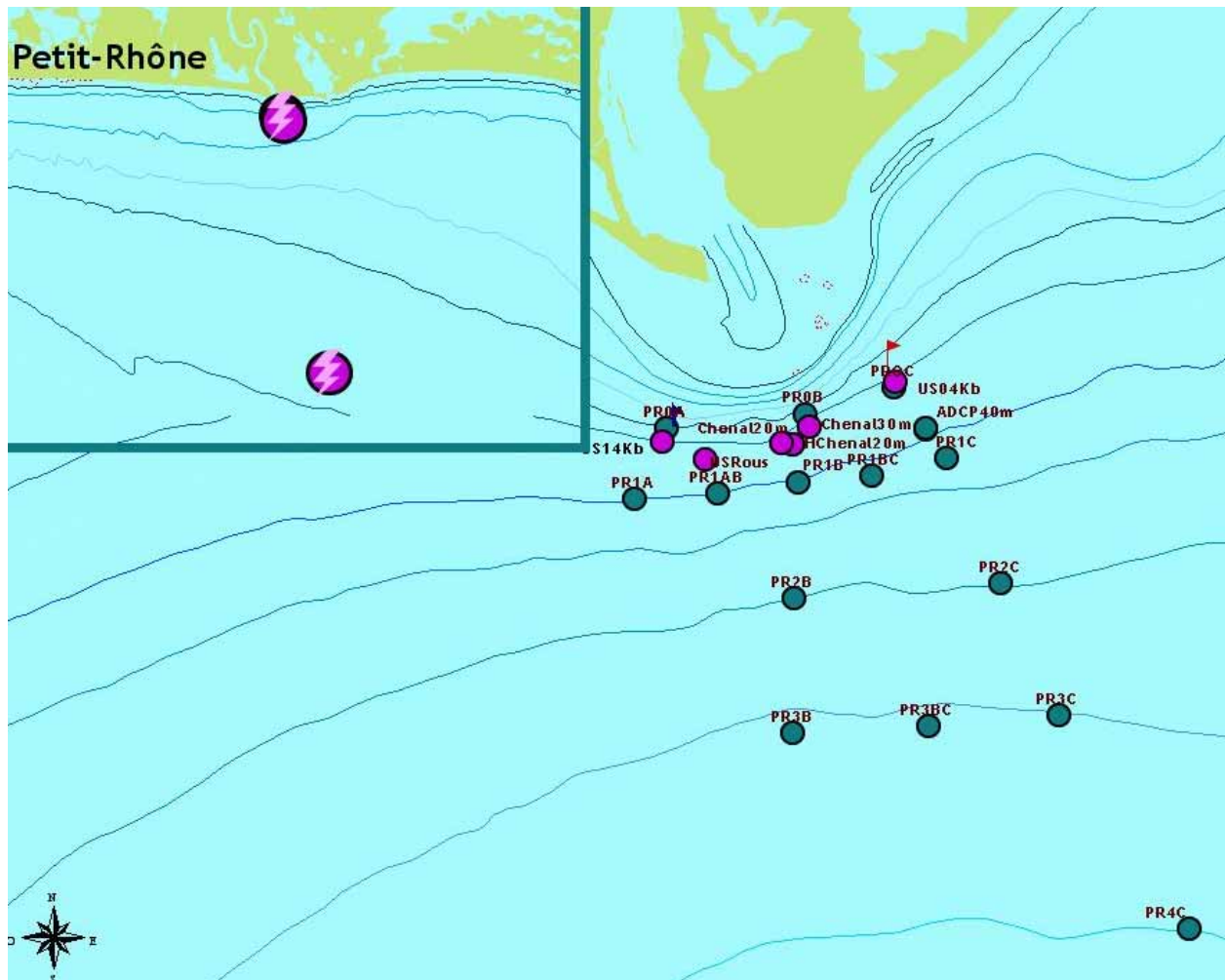


Figure 3.21 : Carte des stations échantillonnées à l’embouchure du Grand Rhône lors de la campagne CARMEX : les points violets correspondent aux prélèvements à la benne USNEL et les points verts correspondent aux stations hydrologiques.

#### 3.2.2.3.2. Campagne EXTREMA 1

##### ▪ Etude hydrologique

Comme pour la campagne CARMEX, les mesures hydrologiques ont été effectuées la première semaine de campagne (9-14 mars 2008) sur 54 stations à différentes profondeurs (de 8.2 m à 90.2 m) avec une sonde CTD SBE 9 montée sur une rosette comprenant 11 bouteilles Niskin (**Figure 3.22**). La rosette était également équipée d’un transmissomètre, d’un altimètre, d’un granulomètre laser in situ et de deux sondes STPS et STBD, détaillés précédemment.

Ces 54 stations se répartissaient comme suit : le premier leg comprenait 4 stations à l’embouchure du Petit Rhône, le second et le troisième legs comportaient 25 stations identiques au débouché du Grand Rhône à deux dates différentes. Ces deux legs comportant les mêmes stations ont servi à nourrir le modèle hydrodynamique de l’embouchure du Rhône de François DUFOIS, également en thèse à L’IRSN (Dufois, 2008).

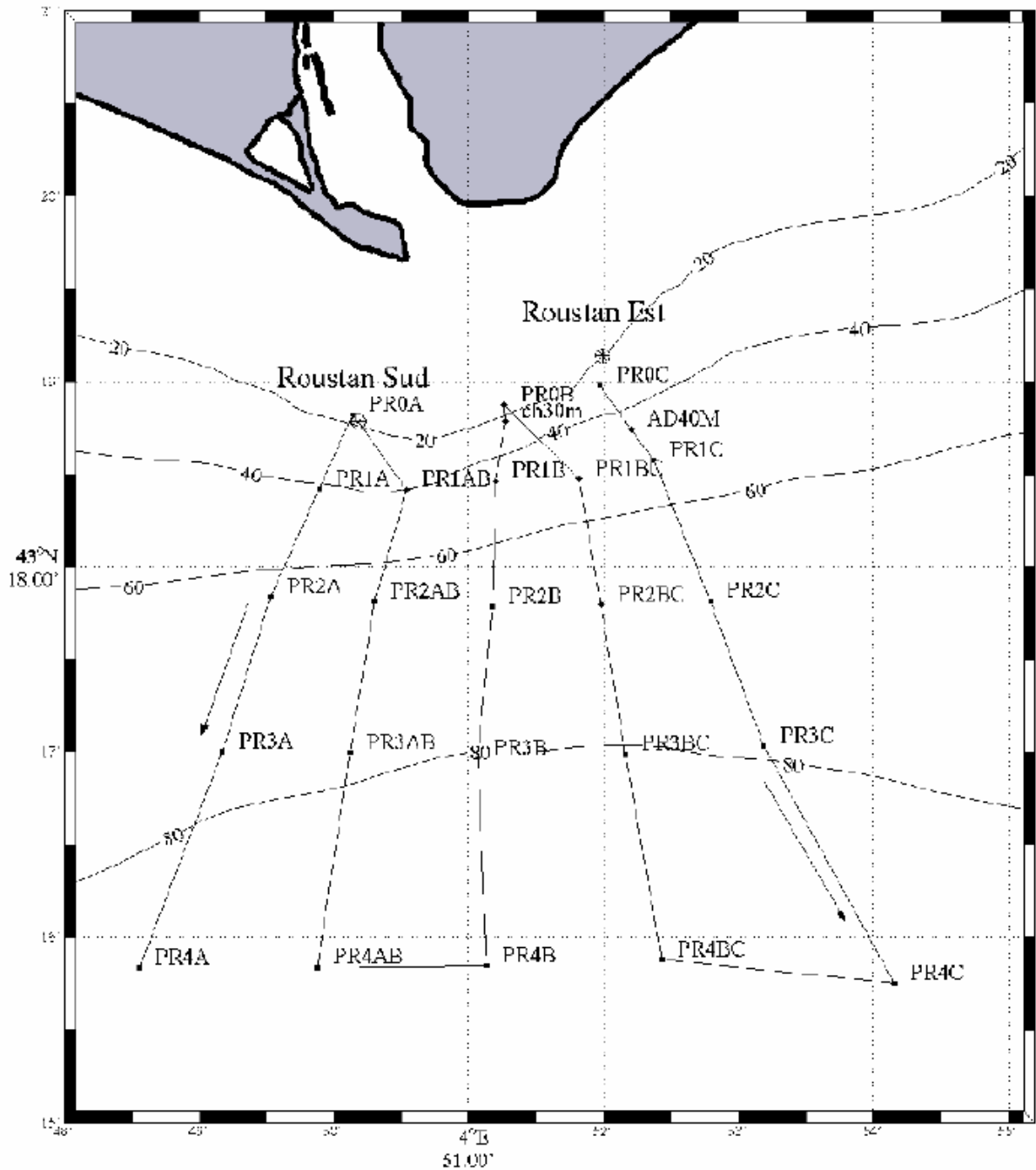
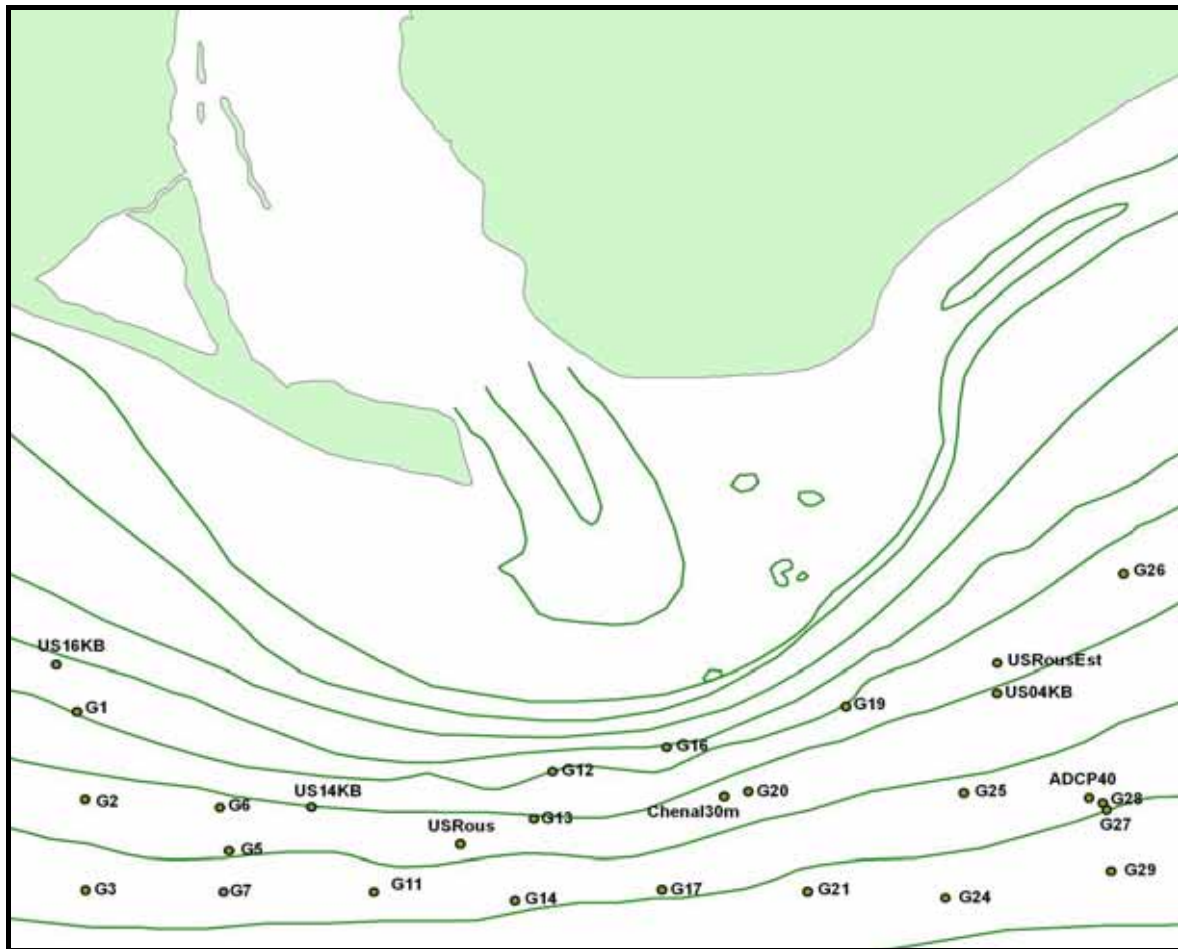


Figure 3.22 : Stations hydrologiques des legs situés à l’embouchure du Grand Rhône durant la campagne EXTREMA 1.

- **Etude sédimentologique**

La semaine de carottage a eu lieu à partir du 15 jusqu’au 23 mars, avec des phases à quai à cause du mauvais temps. La méthodologie de prélèvement et de traitement des échantillons est identique à celle opérée durant la campagne CARMEX.

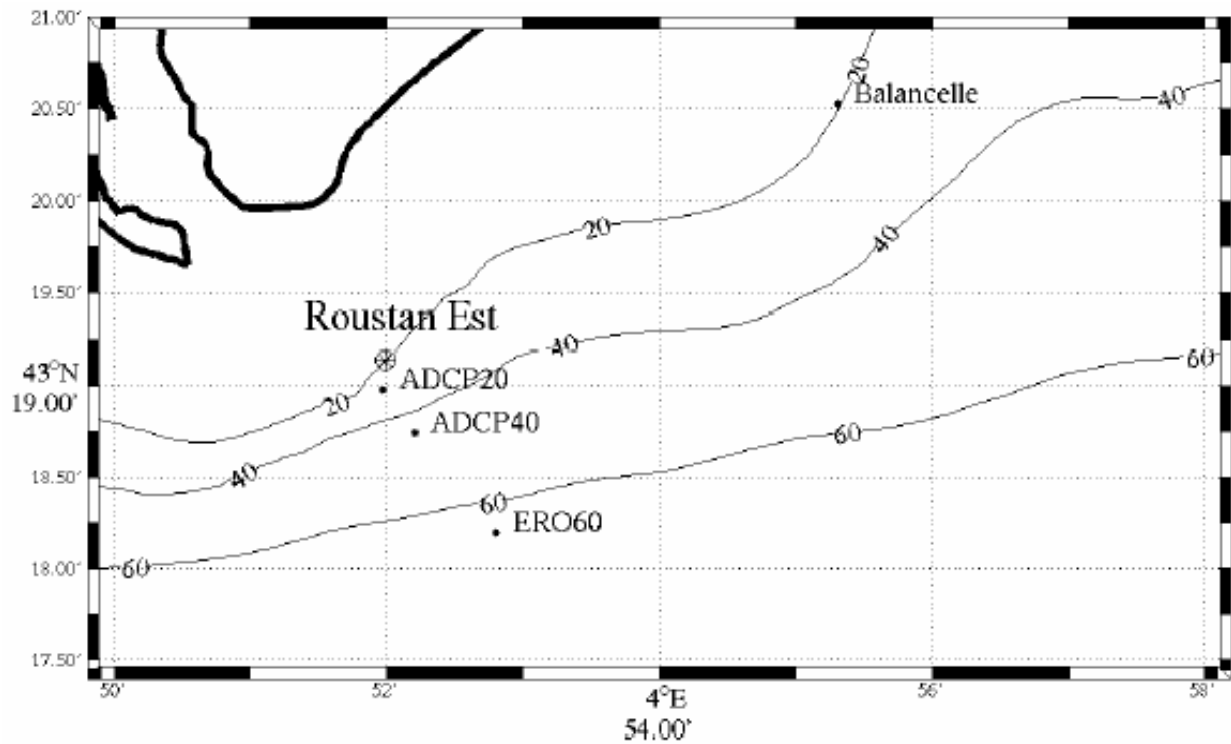


**Figure 3.23 : Carte des stations échantillonnées lors de la campagne EXTREMA 1 : les noms commençant par la lettre G correspondent à des prélèvements de surface réalisés avec une benne Van Veen et destinés à la granulométrie superficielle, et les autres noms correspondent à des carottages effectués à la benne USNEL.**

Les prélèvements de sédiments ont été réalisés de la même manière que pour la campagne CARMEX (sous-carottages dans des bennes USNEL au moyen de tubes en PVC) ainsi que leur traitement (découpage centimètre par centimètre) et leur conditionnement (forme fraîche dans des piluliers pour l'analyse granulométrique et forme lyophilisée dans des barquettes pour l'analyse spectrométrique).

Un nombre de 15 stations a été échantillonné lors de la campagne EXTREMA 1 dont 7 devant le Grand Rhône (**Figure 3.23**) et 4 devant le Petit Rhône, les autres étant des stations utilisées pour d'autres études (foraminifères, Université d'Angers). La station la plus profonde réside à 96 m de profondeur (2008MT11) et la moins profonde à 15 m (2008US16Kb).

La fin de campagne s'est focalisée sur des essais de mesures d'érodibilité à 3 profondeurs (20 m, 40 m, 60 m) grâce à un système de canal à érosion développé par IFREMER (**Figure 3.24**) Quatre sites ont été échantillonnés et les mesures ont été effectuées à différentes profondeurs le long de la carotte (surface, surface - 4 cm, surface - 8cm).

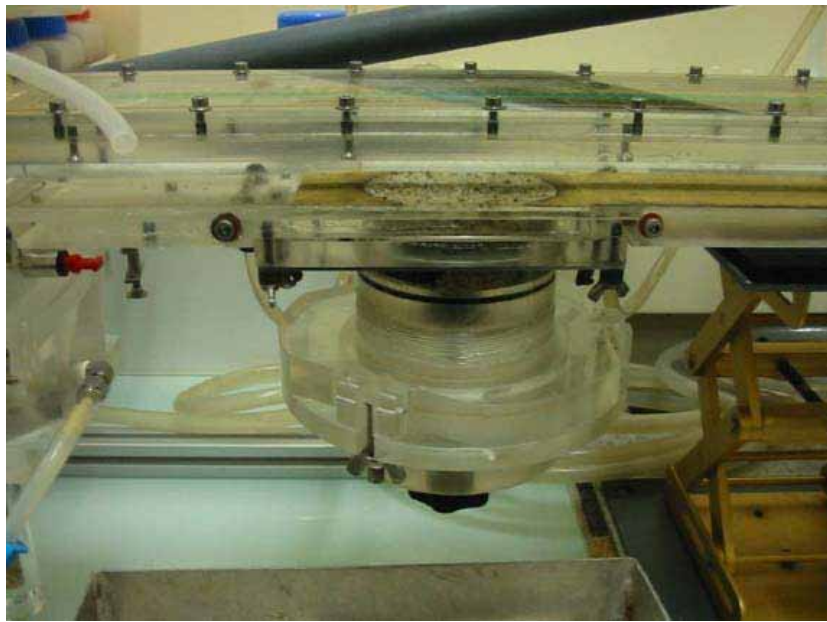


**Figure 3.24 : Positions des stations de prélèvements sédimentaires destinés à l'expérience d'érodimétrie.**

Un échantillon de sédiment de plusieurs centimètres d'épaisseur est prélevé avec l'eau surnageante et en préservant l'interface au moyen d'un carottier. La mesure quasi-in situ dans l'érodimètre est réalisée au plus vite après le prélèvement de la carotte de manière à ne pas dénaturer le matériau. Il est possible d'effectuer un profil d'érodimétrie en découpant successivement la carotte. Néanmoins, la découpe des tranches modifie les paramètres du sédiment et seule la surface n'est pas remaniée. La mesure superficielle est donc la plus intéressante. La carotte de sédiment après découpe est donc placée dans un support avant d'être positionnée dans le canal (**Figures 3.25 et 3.26**). Le débit dans le circuit est ensuite augmenté par paliers à l'aide d'une pompe commandée par un variateur de fréquence. La contrainte de cisaillement est déduite directement par calibration du débit en sortie de pompe. La turbidité dans le circuit est mesurée en continu à l'aide d'un turbidimètre optique et permet la détermination du seuil de mise en suspension. Les flux d'érosion sont calculés en faisant l'hypothèse que l'homogénéisation de la turbidité dans le canal est très rapide. Le flux  $E(t)$  à l'instant  $t$  est ainsi déduit directement de l'évolution de la turbidité dans le canal :

$$E(t) = \frac{(C(t) - C(t - \Delta t))V}{S\Delta t}$$

avec  $C$  la concentration,  $\Delta t$  le pas de temps considéré,  $S$  la surface de sédiment ( $0.003 \text{ m}^2$ ) et  $V$  le volume d'eau du canal ( $0.018 \text{ m}^3$ ).



**Figure 3.25 : Emplacement prévu pour la carotte sédimentaire caractéristique du milieu à étudier et susceptible de subir l'érosion d'un flux liquide.**



**Figure 3.26 : Erodimètre d'IFREMER ou canal à courant transportable chargé de simuler l'action érosive d'un flux liquide d'intensité variable.**

La charge en suspension dans le canal a été calculée à partir de la mesure en volts du turbidimètre en utilisant la calibration suivante déterminée à partir des prélèvements d'eau du canal et des pesées :  $MES (mg/L) = 222 \cdot turbidité(V)$

Les deux premières mesures de turbidité (ADCP20 et ADCP40) doivent être prises avec précaution en raison d'un problème de câblage. Il semble néanmoins que l'avarie ne se soit traduite que par l'ajout d'une constante au niveau de la mesure de turbidité et les mesures de flux ne seraient alors pas erronées.

En outre, durant le dernier palier de la mesure ERO60 à 4 cm sous la surface, le turbidimètre ayant saturé, le flux durant ce palier sera occulté pour l'analyse de données.

### 3.2.2.3.3. Campagne EXTREMA 2

#### ▪ Etude hydrologique

Les mesures hydrologiques ont été effectuées les 10 et 15 octobre 2008 sur 51 stations à différentes profondeurs (de 17 m à 90 m) avec une sonde CTD SBE 9 montée sur une rosette comprenant 11 bouteilles Niskin (**Figure 3.20**). La rosette était également équipée d'un transmissomètre, d'un altimètre, d'un granulomètre laser in situ et d'un turbidimètre Seapoint.

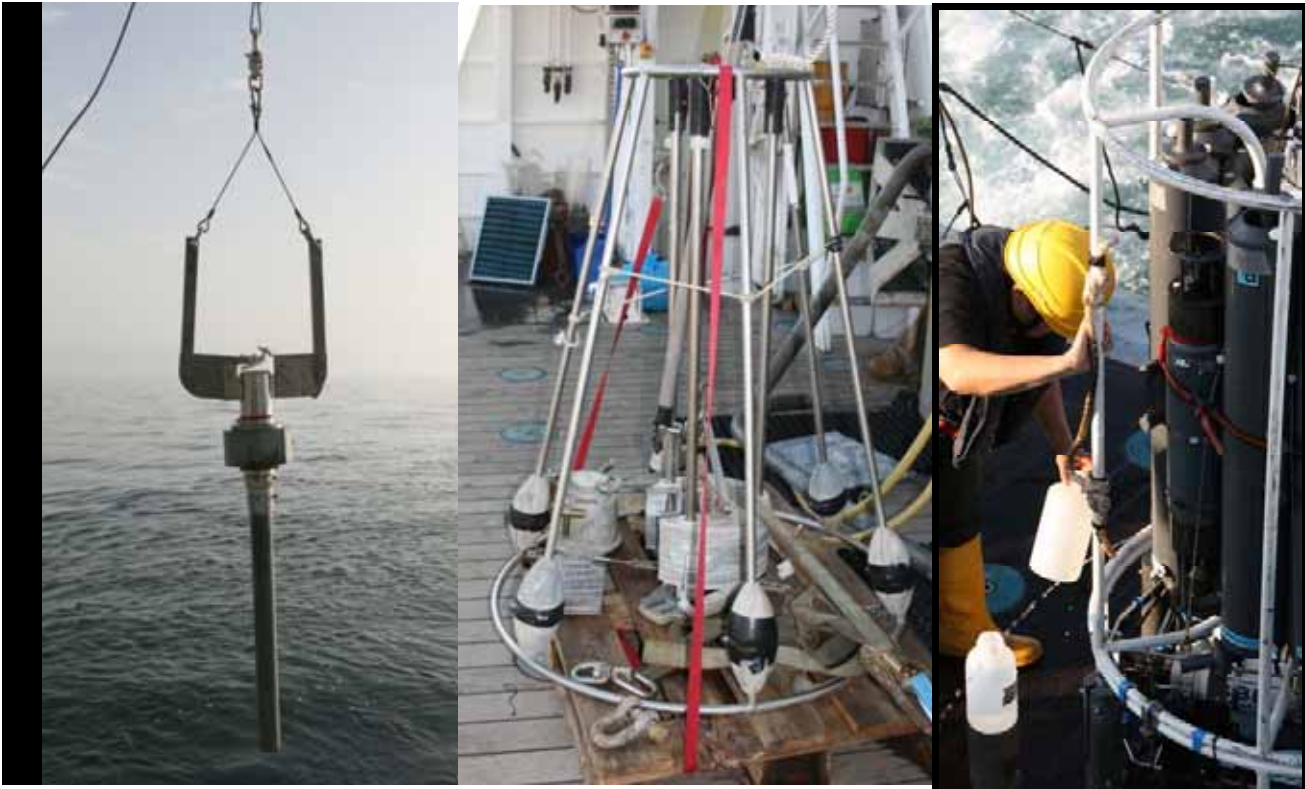
Les 51 stations se déclinent en deux legs de 25 et 26 stations identiques au débouché du Grand Rhône à des dates différentes. Les transects sont identiques à ceux étudiés lors de la mission EXTREMA 1 (**Figure 3.22**), à une station près, nommée Chenal20.

#### ▪ Etude sédimentologique

Le leg de la campagne océanographique dédié à l'étude sédimentologique s'est déroulé entre le 8 et 16 octobre 2008 au moyen de la benne USNEL et des carottiers Ronanberg conçu et prêté par l'IFREMER (**Figure 3.27**) et Abdallah emprunté à l'Université de Perpignan (**Figure 3.27**). Le Ronanberg a permis de prélever des carottes de sédiments de plus de 70 cm, contre environ 40 cm pour les sous-carottages dans l'USNEL. En contrepartie, la masse fraîche de sédiments échantillonnés est bien moins importante (environ 120 g contre presque 700 g avec la méthode de sous-carottage) et l'analyse spectrométrique du sédiment sec sera affectée d'une erreur ajoutée. Le carottier Abdallah, plus léger et pratique à l'utilisation, servit à prélever des sédiments en vue la réalisation de la carte granulométrique de surface du prodelta du Rhône.

Un total de 8 stations a été échantillonné durant la campagne, dont 2 pour le CEREGE, 3 pour l'Université de Perpignan et 3 pour l'IRSN. Les prélèvements IRSN, situés entre 20 m et 30 m de profondeur (stations récurrentes Roustan Sud, Roustan Est et Chenal30, visibles sur les **Figures 3.22 et 3.23** de la campagne EXTREMA 1) ont été découpés sur le bateau en tranches de 1 cm d'épaisseur et de section 63.62 cm<sup>2</sup> afin de permettre des analyses granulométriques et spectrométriques en profondeur.





**Figure 3.27 : De gauche à droite, l’immersion du carottier Abdallah, le carottier Ronanberg et la phase de prélèvement d’eau après remontée de la rosette.**

### **3.2.3. Analyses granulométriques des sédiments des différentes campagnes**

Les analyses granulométriques des sédiments de fond des campagnes REMORA 1 à EXTREMA 2 ont été réalisées au moyen du granulomètre laser *Beckman & Coulter LS 13320* du laboratoire du LERCM de La Seyne-sur-mer.

Le granulomètre laser vient en remplacement des colonnes à tamis et les surpasse dans de nombreux domaines, notamment la vitesse d’exécution (10 échantillons par heure environ contre 2 pour les tamis) et le nombre de classes évaluées (116 classes pour le LS 13320).

Contrairement aux tamis, le granulomètre laser est sensible au volume des particules et non pas leur masse. Le résultat est obtenu sous forme d’un histogramme en pourcentages de volume.

La granulométrie des particules en suspension a pu être définie, lors des campagnes CARMEX et EXTREMA 1 et 2, au moyen d’un granulomètre laser in situ (LISST) fonctionnant à peu près sous le même principe que le granulomètre de laboratoire.

#### **3.2.3.1. Le granulomètre laser de laboratoire**

##### **3.2.3.1.1. Fonctionnement**

Le granulomètre à diffraction laser de laboratoire est composé d’un banc optique comprenant un laser solide à arsenure de gallium ( $\lambda = 750 \text{ nm}$ ), une cellule échantillon à l’intérieur de laquelle va se faire la mesure, une

lentille de Fourier qui oriente toutes les particules vers le même détecteur, une cellule appelée PIDS (Polarization Intensity Differential Scattering) pour mesurer les diamètres entre 0.04  $\mu\text{m}$  et 0.4  $\mu\text{m}$ . Les petites particules sont difficiles à étudier car elles diffusent peu la lumière. Le PIDS comporte une source halogène au tungstène ainsi que 6 détecteurs placés à un angle de 90°. Il mesure de façon séquentielle l'intensité de diffusion lumineuse selon deux sens de polarisation (x, y), sous trois longueurs d'onde (450 nm, 600 nm et 900 nm) et pour chacun des six angles de détection.

Un modèle optique est créé lorsqu'un échantillon contient plus de 10 % de particules de diamètre inférieur à 5  $\mu\text{m}$ . Ce modèle est basé sur une matrice théorique mathématique établie en fonction de l'indice de réfraction et de l'absorption du matériau, liés respectivement à la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu homogène et à la couleur de l'échantillon. Outre le banc optique, le granulomètre à diffraction laser comprend un passeur d'échantillons qui permet l'installation automatique de 30 tubes à essai sur un carrousel, un module échantillon dans lequel sont mises en suspension les particules à analyser dans une cuve d'un volume d'un litre d'eau, et un ordinateur équipé du logiciel adéquat LS13320 fonctionnant sous Windows.

### 3.2.3.1.2. Configuration du granulomètre laser de laboratoire

Le granulomètre à diffraction laser *Beckman & Coulter LS 13320* (**Figure 3.28**) permet de réaliser une granulométrie sur un mélange de particules de diamètres compris entre 0.04  $\mu\text{m}$  et 2 mm, mais l'éventail de diamètres peut être modulé manuellement selon les études menées. La création d'un SOP (Standard Operating Procedure) fixe tous les paramètres d'analyse des échantillons, depuis le type de fluide utilisé lors du traitement jusqu'à la durée du rinçage des tubes à essai.



**Figure 3.28 : Granulomètre à diffraction laser Beckman & Coulter LS 13320 avec son banc optique, son module d'échantillonnage et son passeur d'échantillons.**

Le SOP imaginé pour cette étude répertorie tous les diamètres des particules possibles (autant de détecteurs) et les classe selon les normes ISO 13320 en argiles (<4  $\mu\text{m}$ ), silts fins (de 4 à 20  $\mu\text{m}$ ), silts grossiers (de 20 à 63

$\mu\text{m}$ ), sables fins (de 63 à 200  $\mu\text{m}$ ) et sables grossiers (de 200 à 2000  $\mu\text{m}$ ). Il détermine également les indices statistiques standard tels le D10, D25, D50, D75, D90, la médiane, la moyenne, l'écart-type et la variance. L'analyse d'un carrousel complet dure environ 2h30, à compter de 5 minutes par échantillon.

#### 3.2.3.1.3. Traitement de données

Pour chaque échantillon, les mesures granulométriques ont été réalisées sur trois aliquotes de 1 g de sédiment frais. Les sédiments ont été mis en solution dans un bécher d'eau (60 mL) en agitation à 400 tours.minute<sup>-1</sup> pendant 1 heure environ puis 700 tours.minute<sup>-1</sup> pendant une demie heure avant la mesure, afin d'obtenir une matière en suspension la plus représentative possible du milieu de prélèvement. De même, le prélèvement dans le bécher se fait sous agitation (700 tr.min<sup>-1</sup> à 800 tr.min<sup>-1</sup>) à l'aide d'une propipette graduée dans le vortex pour s'assurer de la collecte des particules les plus grossières. Trois échantillons de 10 mL de la solution sont donc prélevés puis versés dans trois tubes à essai différents dans le but de tester la répétabilité de l'expérience. Ces tubes à essai sont disposés sur le carrousel et reconnus par le laser du module échantillon puis leur contenu est déversé dans la cuve. La solution est transmise dans le banc optique qui va traiter l'échantillon.

### 3.2.3.2. Le granulomètre laser in situ (LISST)

#### 3.2.3.2.1. Principe de fonctionnement

Contrairement au Beckman Coulter LS 13320 décrit précédemment, le granulomètre laser LISST 100-X (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry, **Figure 3.29**) n'a pas été conçu pour être utilisé en laboratoire mais bien *in situ* dans la colonne d'eau. Il fonctionne selon les mêmes principes de diffraction laser comme le LS 13320 mais également par transmission du faisceau laser émis, pour avoir une distribution de taille de particules (PSD).

La composition des particules et leur indice de réfraction n'ont pas d'importance pour la diffraction puisque la diffusion de la lumière du laser est observée à de multiples petits angles. La lumière diffractée détermine entièrement la diffusion de la lumière alors que la lumière transmise contribue faiblement à la diffusion mesurée. Seul le paramètre constitué par la forme des particules engendre quelques questions mais il est rapidement inclus empiriquement grâce à la calibration par des particules naturelles standard de norme ISO.

Son principe réside sur la pénétration d'un faisceau laser de longueur d'onde 670 nm dans l'eau dont la lumière est diffusée par les particules et détectée par un senseur composé de 32 anneaux de silicone derrière une lentille réceptrice. Une photodiode placée derrière un trou centré mesure la transmission optique. Les anneaux couvrent une classe angulaire de 0.0017 à 0.34 radians, correspondant à un éventail de classes granulométriques comprises entre 1.25  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ .

La conversion de la diffusion multi-angles en une distribution de tailles des particules implique une inversion mathématique impliquant l'énergie angulaire diffusée par les anneaux de silicone, la matrice kernel de propriété de diffusion et le volume de diffusion, c'est-à-dire le PSD (Hirleman, 1987). La répétabilité des résultats est très

bonne mais la résolution est limitée dans le cas des classes de très petites particules en raison du bruit de fond (Agrawal and Pottsmith, 2000 ; Agrawal et al., 1991).



**Figure 3.29 : Granulomètre laser in situ LISST 100-X utilisé en laboratoire avec sa cuve et relié au logiciel Sequoia.**

#### 3.2.3.2.2. Traitement de données

La première étape consiste à enlever le bruit de fond des données brutes pour obtenir des fichiers de PSD, puis la conversion des données binaires en fichiers ASCII, grâce au logiciel LISST de Sequoia Inc. Ces fichiers ASCII ont été également transformés en fichiers Excel et filtrés sous différents critères.

Le capteur de pression affiche pour chaque station une phase d'immersion/émersion à 10 m de profondeur afin de mettre la pompe de la CTD (couplée au LISST) en marche et une phase d'immersion/émersion à la profondeur de la station. Seule la phase de descente a été préservée et étudiée lors des campagnes. La phase de remontée a été écartée de toute étude sous réserve des turbulences engendrées lors de la phase de descente qui influenceraient l'analyse. Les profils de descente et remontée présentent néanmoins les mêmes résultats d'après nos observations. Les données parasites du capteur de pression ont été filtrées ainsi que les doublons de profondeurs entraînés par la vitesse du treuil ( $0.2$  à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ) et le pilonnage du à la houle.

Les programmes et logiciels Matlab, Excel et Ocean Data View ont servi à la mise en forme des données de granulométrie dans la colonne d'eau.

### **3.3. Etude radioécologique des apports du Rhône vers le Golfe du Lion**

#### **3.3.1. Protocole de traitement des sédiments**

##### 3.3.1.1. Conditionnement des échantillons

Les échantillons destinés à des analyses spectrométriques sont conservés dans des barquettes aluminium ensachetées. Ils subissent une phase de lyophilisation afin de les sécher et d'obtenir un poids sec ainsi qu'un profil

de teneur en eau (rapport entre le poids frais et le poids sec) variant de plus de 2 en surface à 1.4 dans la colonne sédimentaire. Ils sont par la suite broyés et tamisés à 2 mm d'abord pour retenir les éventuels débris végétaux et animaux, puis dans deux tamis à mailles intermédiaires avant d'être triés dans le tamis de maille de 100  $\mu\text{m}$ . La chaîne de conditionnement se poursuit avec leur mise en géométries de 20, 60 ou 200  $\text{cm}^3$  de manière homogène afin qu'aucun vide ne soit présent dans l'échantillon.

### 3.3.1.2. Analyse des radioéléments

Le Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (LMRE) de l'IRSN basé à Orsay s'est chargé des nombreuses analyses spectrométriques gamma des sédiments.

L'émission gamma d'un échantillon constitue un spectre de raie caractéristique des radionucléides contenus dans l'échantillon. La détection des rayonnements gamma repose sur leur capacité à ioniser la matière qu'ils traversent. Ainsi ce sont des phénomènes d'ionisation au sein d'un cristal (détecteur à jonction) qui sont transformés en impulsion électrique. Ces impulsions sont amplifiées et comptées après un codage en fonction de leur taille (un spectre d'amplitude en fonction de l'énergie des photons détectés est ainsi obtenu). Un logiciel permet le traitement du spectrogramme obtenu. Les aires des raies sont déterminées et la composante du mouvement propre est déduite.

Des sources d'échantillonnage certifiées dans les diverses géométries de comptage utilisées (de 17 à 380 mL) permettent de réaliser un étalonnage en énergie et en efficacité. L'étalonnage en énergie conduit à l'identification des raies d'émission, donc des radionucléides par rapport à une bibliothèque connue (table des radioisotopes). Un traitement informatique des interférences est mis en œuvre lors de l'analyse des résultats afin d'identifier sans ambiguïté les radionucléides. L'étalonnage en efficacité, associé à une géométrie et à une matrice, permet ensuite de réaliser la quantification des radionucléides.

Les mesures présentées dans ce travail ont été réalisées au moyen de détecteurs au germanium hyper pur de type N sur lesquels ont été placés les géométries contenant les échantillons (Miralles et al., 2006). Ces détecteurs sont placés dans une salle souterraine à Orsay, préservant les analyses de tout rayonnement parasite pouvant fausser les résultats. Des calibrations efficaces de 22.5 keV à 1.8 keV ont été menées grâce à l'utilisation de sources mélangées de rayonnements gamma dans une matrice solide alliant résine et eau de densité 1.15  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Les résultats d'activité sont corrigés des effets combinés d'ajout et d'auto-absorption (Lefèvre et al., 2003).

Les activités du  $^7\text{Be}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  sont respectivement obtenues par les pics de 477.7 keV et 671 keV. Les activités du  $^{210}\text{Pb}$  en excès ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) sont déterminées en soustrayant l'activité du  $^{214}\text{Pb}$  mesurée (pic à 352 keV), utilisé comme indicateur du  $^{210}\text{Pb}$  supporté, au  $^{210}\text{Pb}$  total (pic à 46.5 keV). L'incertitude sur l'activité (à  $k = 2$ ) est calculée par l'incertitude de la source de calibration de la propagation standard, l'incertitude de comptage statistique (sur l'échantillon et le bruit de fond) et les incertitudes sur la correction de l'ajout et l'auto-absorption. L'intensité du pic d'émission (nombre de coups) est transformée en activité ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et corrigée de la décroissance radioactive.

### 3.3.2. Taux de sédimentation

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le taux de sédimentation ou le taux d'accumulation dans une zone. Elles dépendent des contextes environnementaux en matière d'apports sédimentaires et de la radioécologie du milieu (Miralles, 2004).

#### 3.3.2.1. Modèles de radiochronologie au $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$

Il est possible d'estimer le taux de sédimentation et de donner un âge aux différents niveaux d'une colonne sédimentaire en se basant sur des modèles mathématiques qui prédisent la distribution du  $^{210}\text{Pb}$  en profondeur. L'activité de  $^{210}\text{Pb}$  dans le sédiment est fonction du  $^{210}\text{Pb}$  apporté avec les particules (en excès,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) et du  $^{210}\text{Pb}$  produit par la décroissance *in situ* du  $^{226}\text{Ra}$  d'origine naturelle et de demi-vie 1620 ans, appelé  $^{210}\text{Pb}$  supporté.

L'activité totale  $A_t$  est définie par la relation :

$$A_t = A_{\text{excès}} + A_{\text{supportée}}$$

Selon les principes de radioactivité, l'activité  $A$  ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) se trouvant à une profondeur donnée s'exprime par la relation :

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

avec  $A_0$  l'activité en surface du sédiment,  $t$  le temps écoulé depuis que ce niveau n'est plus en surface et  $\lambda$  est la constante de désintégration du  $^{210}\text{Pb}$  (soit l'inverse de la demi-vie, c'est-à-dire  $0.0313 \text{ an}^{-1}$ ).

Le taux de sédimentation est obtenu à partir de l'équation suivante qui fait intervenir le flux de  $^{210}\text{Pb}$  qui arrive au sédiment à travers la colonne d'eau  $F_0$  ( $\text{Bq.cm}^{-2}.\text{a}^{-2}$ ) et le taux de sédimentation massique  $r_0$  ( $\text{g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) :

$$A_0 = \frac{F_0}{r_0}$$

Ces équations constituent la base de plusieurs modèles mais la distribution en profondeur du radioélément considéré et son profil tout au long de la carotte dépend de l'équilibre entre les transferts atmosphériques et fluviaux, des activités biologique et chimique, de la rythmicité de la sédimentation et de la bioturbation. Certains organismes tirent leur nourriture du sédiment, modifient sa structure et le réémettent en surface ou en profondeur sous forme de déjections ou de terriers (Matiscoff & Robbins, 1987). Ce paramètre n'est pas forcément présent ou visible dans toutes les carottes sédimentaires mais il est à prendre en compte car il constitue un biais dans la datation (altération des structures sédimentaires). Le facteur « mélange biologique » permet une classification des modèles de datation en deux classes : les modèles non biodiffusifs et les modèles biodiffusifs. Ces modèles se basent sur 3 conditions essentielles à leur application, à savoir une sédimentation continue, l'absence de phénomènes de remise en suspension à l'interface eau-sédiment et aucune mobilité post-dépôt du  $^{210}\text{Pb}$  ou de redistribution des sédiments.

L'équation de datation repose sur l'expression de l'activité totale  $A(t)$  de  $^{210}\text{Pb}$  ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) au temps  $t$  :

$$A(t) = \left\{ \frac{F(t)}{r(t)} \right\} e^{-\lambda t} + A_{\text{supp}}(t),$$

avec  $F(t)$  le flux de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ),  $r(t)$  est le taux de sédimentation massique ( $\text{g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ),  $A_{\text{supp}}$  est l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  supporté et  $\lambda$  la constante de désintégration radioactive du  $^{210}\text{Pb}$ .

### 3.3.2.2. Modèles non biodiffusifs

#### 3.3.2.2.1. Le modèle CF:CS (Constant Flux : Constant Sedimentation)

Ce modèle considère que les facteurs qui gouvernent l'accumulation de sédiment sont stables, qu'il arrive un flux constant de matériel donc un flux constant de  $^{210}\text{Pb}$ . C'est un modèle basique développé par Robbins (1978) où le profil de  $^{210}\text{Pb}$  est une droite continue en fonction de la profondeur. L'âge est déterminé à partir de la pente de la droite et des principes de décroissance radioactive.

Cette méthode de régression linéaire est fréquemment utilisée, notamment par Yeager et al. (2004), Mizugaki et al. (2006) ainsi que Palinkas & Nittrouer (2007). Ces derniers l'ont vérifiée avec une méthode de géochronologie au  $^{137}\text{Cs}$  à travers laquelle est déterminée une datation des événements nucléaires globaux, à savoir deux pics majeurs de  $^{137}\text{Cs}$  correspondant aux années 1963 et 1986 qualifiant respectivement les essais nucléaires atmosphériques et l'accident de Tchernobyl.

#### 3.3.2.2.2. Le modèle C.I.C. (Constant Initial Concentration)

Le rythme d'accumulation varie dans le temps, du à des variations naturelles ou à cause d'activités anthropiques qui favorisent ou défavorisent l'apport de matières. Il en résulte des profils de  $^{210}\text{Pb}$  non exponentiels en profondeur. L'hypothèse avancée par ce modèle demeure que la concentration initiale de  $^{210}\text{Pb}$  dans chaque tranche de sédiment est constante (Krishnawami et al., 1971 ; Robbins & Eddington, 1975 ; Pennington et al., 1976).

Plus récemment, Madsen et al. (2005) ont comparé ce modèle avec une nouvelle technique de datation basée sur l'OSL (Optical Stimulated Luminescence) et la charge ionique piégée par les minéraux composant le sédiment étudié. Il s'avère que les résultats sont très prometteurs, particulièrement pour des datations remontant à 1975.

#### 3.3.2.2.3. Le modèle C.R.S (Constant Rate of Supply)

Les apports de  $^{210}\text{Pb}$  sont supposés constants dans le temps d'après ce modèle. De fait, la concentration du radioélément diminue lorsque les apports de matières et le taux de sédimentation augmentent.

L'équation de datation du modèle devient :

$$A_{\text{excès}}(t) = \left\{ \frac{F}{r(t)} \right\} e^{-\lambda t}$$

L'âge de la couche  $t$  est donné par la relation :

$$t = \left( \frac{1}{\lambda} \right) \ln \left( \frac{S_0}{S} \right),$$

où  $S_0$  est l'inventaire total de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq.m}^{-2}$ ) sur l'ensemble de la colonne sédimentaire,  $S$  est l'inventaire cumulé de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq.m}^{-2}$ ) se trouvant sous une tranche sédimentaire d'épaisseur  $z$  et de masse  $g$ , comme suit :

$$S = \int_g^G A_{\text{excès}} dg = \int_z^Z \rho A_{\text{excès}} dz,$$

avec  $dg$  la masse de sédiment sec par unité de surface ( $\text{g.cm}^{-2}$ ),  $dz$  la profondeur et  $\rho$  la densité du sédiment ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

Le taux de sédimentation massique  $r$  et le flux de  $^{210}\text{Pb}$   $F$  pour chaque tranche de sédiment sont calculés respectivement par les équations (Goldberg, 1963 ; Bourrin et al., 2007):

$$r = \frac{\lambda S}{A_{\text{excès}}} \quad \text{et} \quad F = \lambda S_0$$

Sanchez-Cabeza et al. (2000) trouvent le fait de considérer des apports constants tout au long de la période d'accumulation trop restrictif et proposent d'admettre des flux constants sur des périodes de temps de l'ordre de l'année.

Madsen et al. (2005) ont également testé cette méthode de datation avec la technique de luminescence OSL et ont trouvé de bons résultats pour des datations remontant à 1940.

#### 3.3.2.2.4. Taux de sédimentation apparent (A.S.R.)

En absence de décroissance du profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , cette méthode basée sur le calcul du rapport  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ , appelé  $R$ , est utilisée pour définir des taux d'accumulation apparents.

Le rapport  $R_0$  correspond à aux rejets de Marcoule au moment du dépôt car il est le plus représentatif de l'activité contenue dans l'eau du Rhône. Le rapport  $R_z$  est déterminé par le niveau le plus profond de la carotte uniquement dans le but d'effectuer une évaluation de ces taux dans la zone prodeltaïque. L'équation du taux d'accumulation devient :



$$S \cong \frac{-0.3057z}{\ln\left(\frac{R_0}{R_z}\right)}$$

Les hauteurs de sédiments marqués s'évaluent en tenant compte du début de l'apparition du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'environnement. Concernant le Rhône, il est fréquemment daté par rapport à la mise en service de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule qui a eu lieu en 1958 car la zone sous influence rhodanienne est plus marquée par les rejets de cette usine que par les premiers essais nucléaires atmosphériques (Fernandez et al., 1991). Les hauteurs de sédiments marqués H (cm) sont déterminées par le produit de l'A.S.R. (S en  $\text{cm.a}^{-1}$ ) avec le temps de marquage des sédiments par le  $^{137}\text{Cs}$ , soit 51 ans (pour l'année 2009).

Des phénomènes de diffusion du césium par migration dans l'eau interstitielle sont également rencontrés. Il donc faut corriger les A.S.R. et les hauteurs de sédiments H par un coefficient de diffusion effective  $D_{\text{eff}}$ , calculé à partir de l'A.S.R. (Anderson et al., 1987) :

$$z = [2D_{\text{eff}}t]^{\frac{1}{2}}$$

$$H_{\text{corr}} = S.t + z$$

### 3.3.2.3. Modèles biodiffusifs

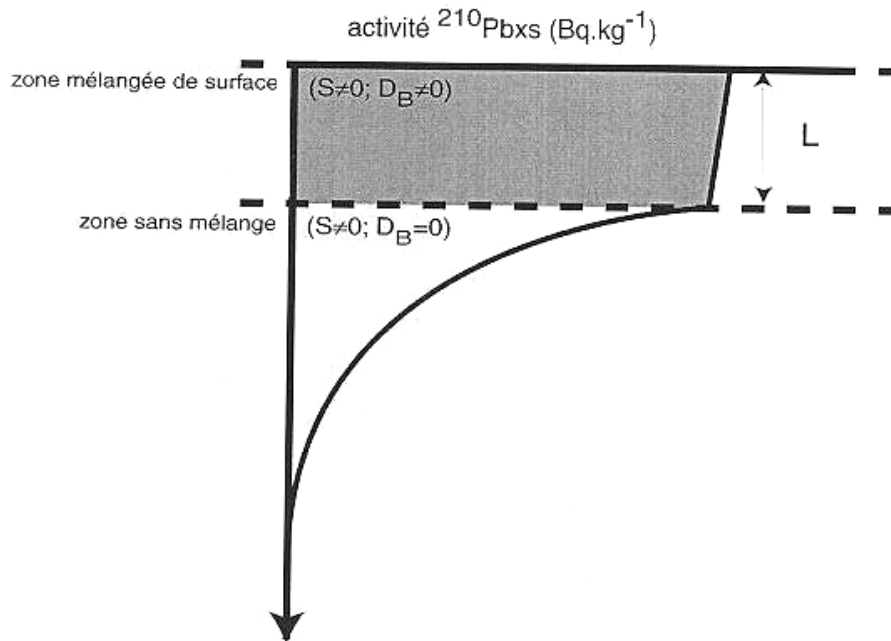
Le facteur de bioturbation implique un paramètre de diffusion dans l'équation décrivant le comportement du  $^{210}\text{Pb}$  dans la colonne sédimentaire. Cette équation globale contient donc une composante d'accumulation sédimentaire, une composante de mélange et une composante de décroissance radioactive (Radakovitch et al., 1999) et s'écrit telle que :

$$\rho \frac{\partial A_{\text{tot}}}{\partial t} = D_b \rho \frac{\partial^2 A_{\text{tot}}}{\partial z^2} - S \rho \frac{\partial A_{\text{tot}}}{\partial z} - \lambda \rho A_{\text{tot}},$$

avec  $A_{\text{tot}}$  l'activité totale de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ),  $D_b$  le coefficient de diffusion ( $\text{cm}^2.\text{a}^{-1}$ ), S le taux de sédimentation ( $\text{cm.a}^{-1}$ ) et  $\rho$  la masse volumique du sédiment sec ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) estimée uniforme avec la profondeur.

Le mélange peut ainsi être du à la fois à des processus physiques et biologiques comme des courants de fond ou des effets de remobilisation particuliers dus à la houle (notamment en milieu côtier), des activités d'enfouissement et de consommation des organismes benthiques. Il est généralement traité comme un processus de diffusion et d'advection à l'équilibre (Boudreau, 1986).

La colonne sédimentaire est composée d'une couche mélangée en surface et d'une couche sous-jacente sans mélange (**Figure 3.30**).



**Figure 3.30 : Représentation schématique de la conception de la colonne sédimentaire dans les modèles biodiffusifs (Miralles, 2004).**

Dans la couche mélangée, appelée SML (Surface Mixing Layer), le profil de  $^{210}\text{Pb}$  est induit par la combinaison entre le mélange et la sédimentation ( $S \neq 0$  ;  $D_b \neq 0$ ) et l'équation ne se simplifie pas. Néanmoins, la solution vient de la définition du taux de sédimentation dans la couche sous-jacente et de la réinjection de sa valeur dans l'équation globale afin d'obtenir le coefficient de diffusion.

. Dans le cas où le terme de mélange est négligeable ( $S \neq 0$  ;  $D_b = 0$ ), c'est-à-dire dans la couche sous-jacente où seule la sédimentation intervient, la solution de l'équation précédente devient :

$$S = \frac{\lambda z}{\ln\left(\frac{A_0}{A_z}\right)},$$

où  $A_z$  est l'activité du  $^{210}\text{Pb}_{xs}$  à la profondeur  $z$  et  $A_0$  l'activité à l'interface eau-sédiment.

. Dans le cas où le terme de sédimentation est négligeable ( $S = 0$  ;  $D_b \neq 0$ ), le taux de mélange est déterminé par la relation :

$$D_b = \lambda \left( \frac{z}{\ln\left(\frac{A_0}{A_z}\right)} \right)^2$$

Seuls les taux d'accumulation maximum et de mélange peuvent être calculés à partir du modèle estimant qu'ils sont chacun alternativement négligeables (DeMaster et al., 1985 ; Anderson et al., 1987). Le  $^{210}\text{Pb}$  étant un radioélément fortement fixé à la matière particulaire (Santschi et al., 1983), la diffusion est considérée comme négligeable et un coefficient de diffusion effective ne peut pas être estimé.

### 3.3.3. Bilan des radioéléments

Le bilan des radioéléments est définissable lorsque le signal radioactif est entier dans les carottes sédimentaires. Plus le nombre de carottes dans lesquelles la fin de signal n'est pas atteinte est élevé, plus l'incertitude sur les stocks sera importante, excepté pour les radioisotopes naturels à longue période.

Les régions où le taux de sédimentation est uniforme et faible sont de bons indicateurs de stocks de radioéléments car le calcul est fiable et des prélèvements de profondeurs moyennes ont plus de chance de comporter la fin du signal.

En revanche, les zones d'importante accumulation sédimentaire, fortement influencées par les facteurs météorologiques et hydrologiques comme la très proche embouchure du Rhône, restent des milieux délicats à évaluer en matière de bilan de radioéléments. Elles nécessitent des prélèvements très profonds avec du matériel adéquat et les dépôts relevés à un temps  $t$  peuvent avoir été remobilisés à un temps  $t+1$ . C'est la raison pour laquelle certains des calculs proposent un bilan sur les 20 à 25 premiers centimètres de sédiments. Une extrapolation est également réalisée mais l'erreur augmente inversement avec la longueur des carottes.

L'inventaire de radioéléments est calculé à partir de l'activité surfacique du radionucléide concerné pour chaque tranche de sédiment des carottes prélevées, tel que :

$$I = \sum_{i=1}^l \frac{P_i \cdot A_i}{S_i}$$

avec  $I$  l'inventaire ( $\text{Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),  $l$  la profondeur de la carotte à laquelle le signal radioactif disparaît,  $P_i$  le poids sec de la tranche de sédiment  $i$  après lyophilisation (kg),  $S_i$  la surface d'une tranche de sédiment  $i$  ( $\text{cm}^2$ ) et  $A_i$  l'activité massique du radioélément concerné sur la tranche de sédiment prélevée  $i$  ( $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).

La surface de la tranche de sédiment dépend du diamètre  $D$  (cm) du carottier utilisé :

$$A = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

Les diamètres du Küllenberg, du multitubes et du Ronanberg sont différents, respectivement 8 cm, 15 cm et 9 cm. La densité du sédiment est prise en compte dans le calcul de l'activité massique. La détermination d'un inventaire total sur une zone est réalisable en multipliant  $I$  par la surface recherchée. Néanmoins, la pénétration des radioéléments et le taux de sédimentation diffèrent d'une région à une autre et l'application linéaire de ce calcul nécessiterait un milieu dont la sédimentation est homogène. L'extrapolation d'un bilan en un point de mesure sur toute une surface d'étude n'est pas envisageable. Une diminution de l'erreur est possible avec l'évaluation du taux de sédimentation et son intégration dans l'équation précédente.

Le logiciel Surfer a permis d'évaluer des bilans de radioéléments sur une zone occupée par plusieurs points de prélèvements.



# 4. Hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône

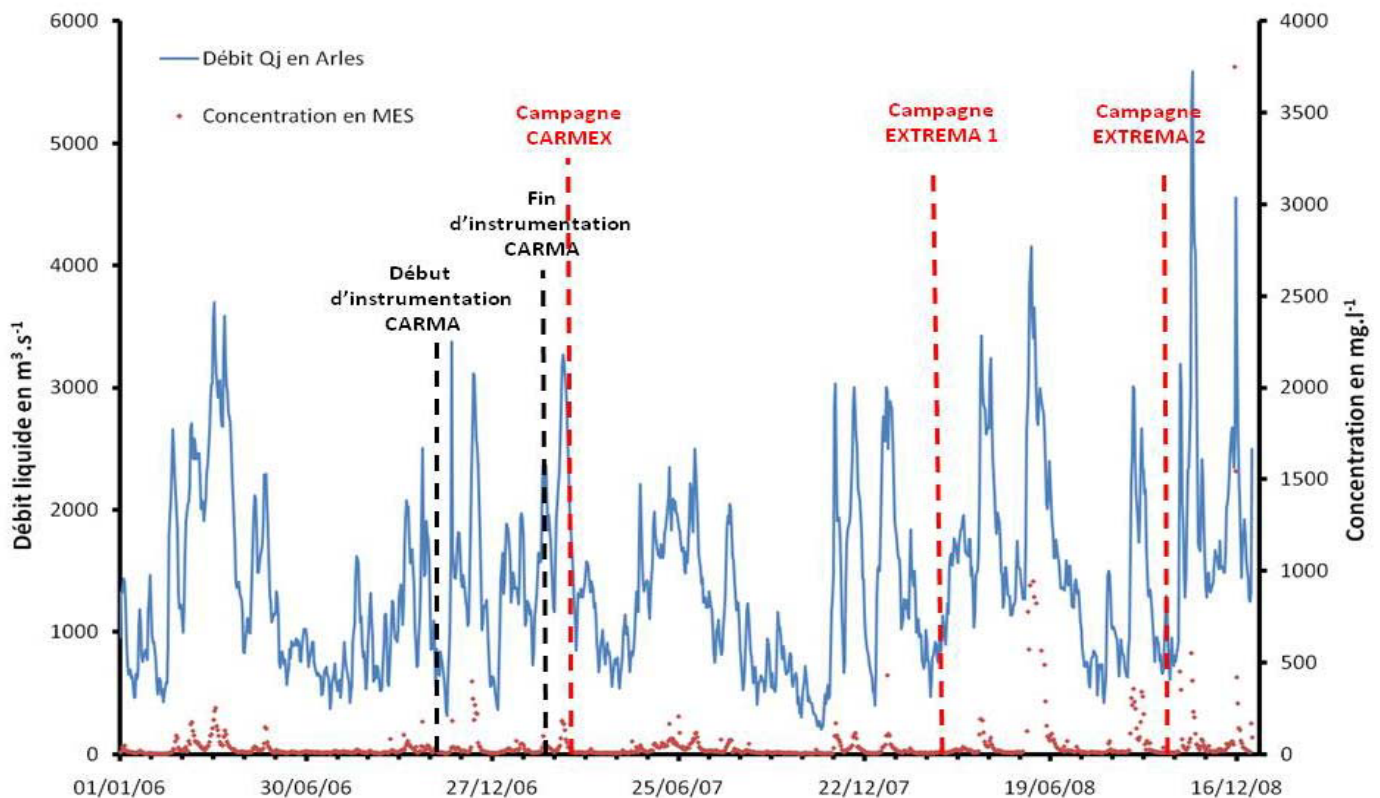


Ce travail est le fruit de la collaboration de deux autres étudiants en thèse, François Dufois (IRSN) et Carolyne Vassas (CEREGE), qui se sont intéressés respectivement à la modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône pour le premier, et à la dynamique morphosédimentaire de l'embouchure rhodanienne pour le second.

## 4.1. Apports particuliers du Rhône

### 4.1.1. MES mesurées en Arles

La station OPERA de l'IRSN située sur les bords du Grand Rhône en Arles enregistre les valeurs de débits liquides du fleuve ainsi que les concentrations en Matières En Suspension (MES) à la sub-surface du fleuve c'est-à-dire à 50 cm sous l'interface air-eau (**Figure 4.1**). Ces mesures de MES sont quotidiennes et deviennent plus fréquentes lors d'épisodes de crue avec des enregistrements toutes les deux heures.



**Figure 4.1 : Débits liquides du Grand Rhône (en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et concentrations en matières en suspension (en  $\text{mg}.\text{L}^{-1}$ ) mesurés par la station OPERA en Arles entre 2006 et 2008.**

Les débits de crue sont restés modérés ( $< 5500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) durant la période étudiée (janvier 2006-décembre 2008) avec 7 événements hydrologiques importants ( $> 3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Précisons que les chiffres présentés ici sont ceux du Grand Rhône, dont les apports liquides et solides représentent plus de 90 % de ceux du Rhône.

Les concentrations en MES suivent les débits du fleuve avec des pics lors des fortes charges liquides, notamment en mars 2006, décembre 2006, janvier 2008 et mai 2008 où les valeurs ont atteint respectivement  $251 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$ ,  $395.7 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$ ,  $429.8 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  et  $941.7 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  à des moments différents dans les épisodes de crue. Certains maxima de concentration en sédiments en suspension (CSS) ont été mesurés en phase de crue, d'autres à l'apogée de la

crue ou encore en phase de décrue. Néanmoins, la CSS moyenne annuelle à ce point kilométrique tourne autour de 10 mg.L<sup>-1</sup>.

En traçant les courbes log-log sur les 956 données de 2006, 2007 et 2008 (**Figure 4.2**), l'équation devient :

$$\log \text{CSS} = 1.765 \log Q - 4.231, \text{ avec } R^2 = 0.67 \text{ (n = 956), soit } R = 0.82.$$

Rolland (2006) obtenait une équation dont les coefficients se rapprochent de ceux obtenus ici, avec a = 2.17 et b = -5.4 pour un coefficient R<sup>2</sup> = 0.87 et un nombre d'échantillons n = 101.

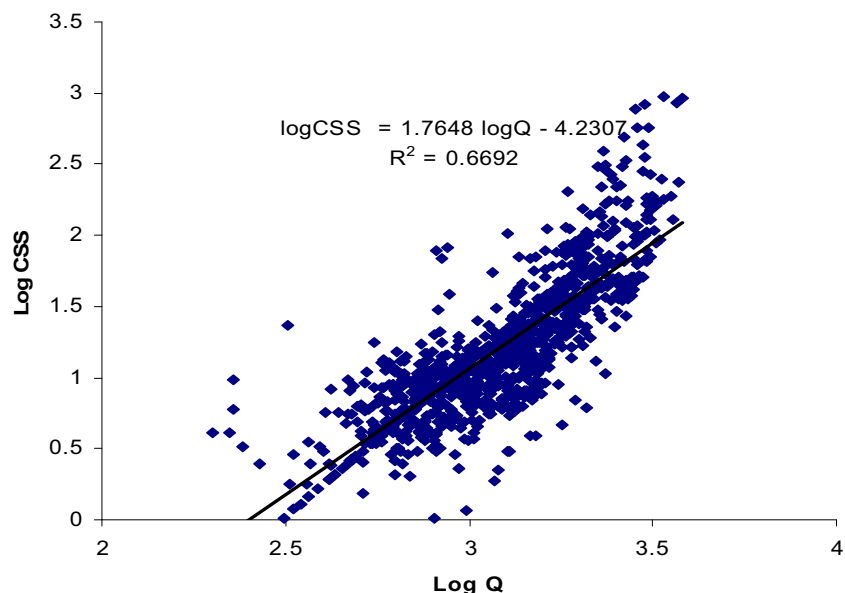
La Figure 4.2 souligne la différence de concentration en matières en suspension lors des crues puisqu'un cluster de points extrêmes dispatchés apparaît pour les débits importants. Néanmoins, pour une même valeur de débit à partir de Q = 10<sup>3.5</sup>, les valeurs de MES varient de plus d'un facteur 10, soit entre 10<sup>1.8</sup> et 10<sup>3.1</sup>. L'origine, la soudaineté et les antécédents hydrologiques de la crue jouent un rôle important sur la charge solide en suspension. Néanmoins, un phénomène d'hysteresis a été mis en exergue par Rolland (2006).

Les flux F de sédiments en fonction du temps sont calculés à partir des débits Q et de la concentration CSS par la relation :

$$F \text{ (g.s}^{-1}\text{)} = Q \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)} * \text{CSS (g.m}^{-3}\text{)}, \text{ qui devient :}$$

$$F \text{ (T.a}^{-1}\text{)} = 3600 * 24 * 365 * 10^6 * Q \text{ (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)} * \text{CSS (mg.L}^{-1}\text{)}$$

Les flux sur la période présentée précédemment, à savoir entre le 1<sup>er</sup> janvier 2006 et le 31 décembre 2008, ont ainsi été évalués à 13.27 Mt de sédiments transférés au niveau d'Arles, dont 2.79 Mt en 2006, 2.15 Mt en 2007 et 8.33 Mt en 2008 (**Tableau 5.18**). La crue de la Durance en mai 2008 et les fortes précipitations des mois de novembre et décembre 2008 ont fortement contribué à augmenter les bilans de matière en 2008.



**Figure 4.2 : Corrélation CSS-débit au moyen d'une régression linéaire simple après transformation logarithmique des deux variables.**

Néanmoins, excepté lors de crues, le matériel transporté en Arles, située à 40 km en amont de l'embouchure, n'atteint pas dans son intégralité la mer ouverte (Maillet et al., 2006). Il est amené à se déposer en partie avant le débouché du fleuve.

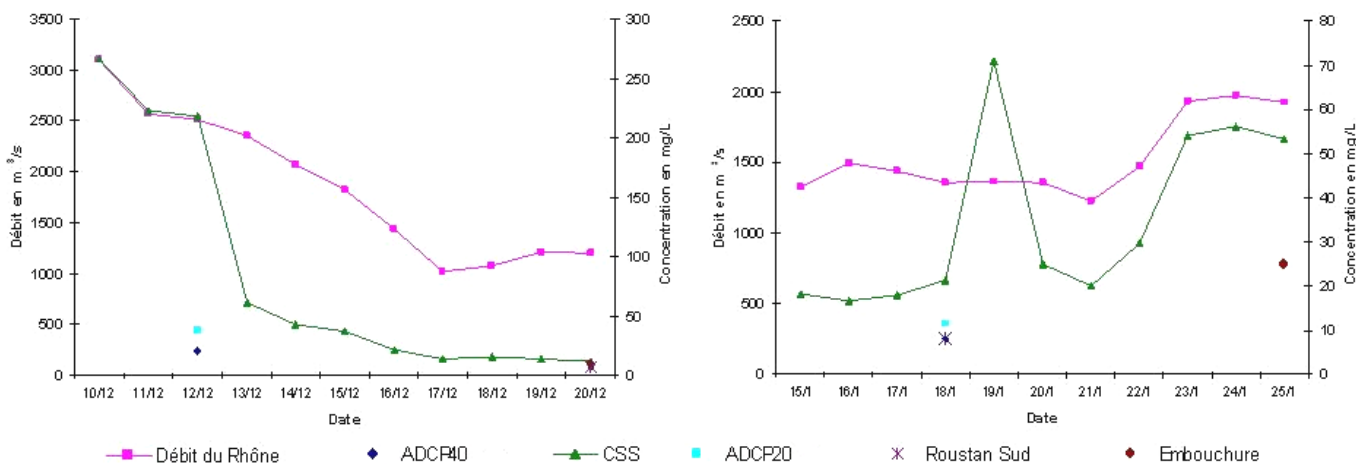


#### 4.1.2. MES mesurées à l'embouchure

Les mesures de concentrations de MES à l'embouchure du Rhône n'ont pas été régulières comme en Arles. Elles ont été réalisées afin de calibrer des sondes de turbidité et les signaux de rétrodiffusion des courantomètres mouillés à l'embouchure durant la période étudiée. La plupart des données ont été recueillies à bord de l'Europe lors des missions en mer (voir Annexe A).

La **Figure 4.3** représente quelques résultats de prélèvements d'eau de surface à plusieurs stations de l'embouchure du Rhône : 'Embouchure' située au niveau du débouché du Grand Rhône, 'Roustan Sud' au niveau d'une bouée de marquage de l'isobathe 20 m, 'ADCP20' localisée au niveau de la bouée Roustan Est sur la même isobathe 20 m et 'ADCP40' un peu plus au large. Les prélèvements n'ont pas été effectués à toutes les stations le même jour mais un mode de filtration identique a été utilisé pour chaque échantillon, à savoir un volume de 2 L avec des filtres millipore 0.22 µm.

La station de mesures SORA d'Arles, située à près de 40 km en amont de l'embouchure du Rhône, révèle logiquement des concentrations plus élevées qu'aux différents points de l'estuaire lors des périodes étudiées en raison des phénomènes de dilution (**Figure 4.3**). Les valeurs mesurées aux stations 'ADCP40', 'ADCP20', 'Embouchure' et 'Roustan Sud' respectent l'évolution temporelle de la concentration en MES, même si n'apparaissent seulement que quatre dates de mesures sur les profils. Il existe un facteur 2 à 4 entre les valeurs de CSS à l'embouchure et celles mesurées en Arles. Cette différence est sans doute due aux processus de dépôt dans les 40 derniers kilomètres mais également à l'importante dilution lors de l'arrivée des eaux fluviales en mer et à des processus physico-chimiques de floculation et d'agrégation.

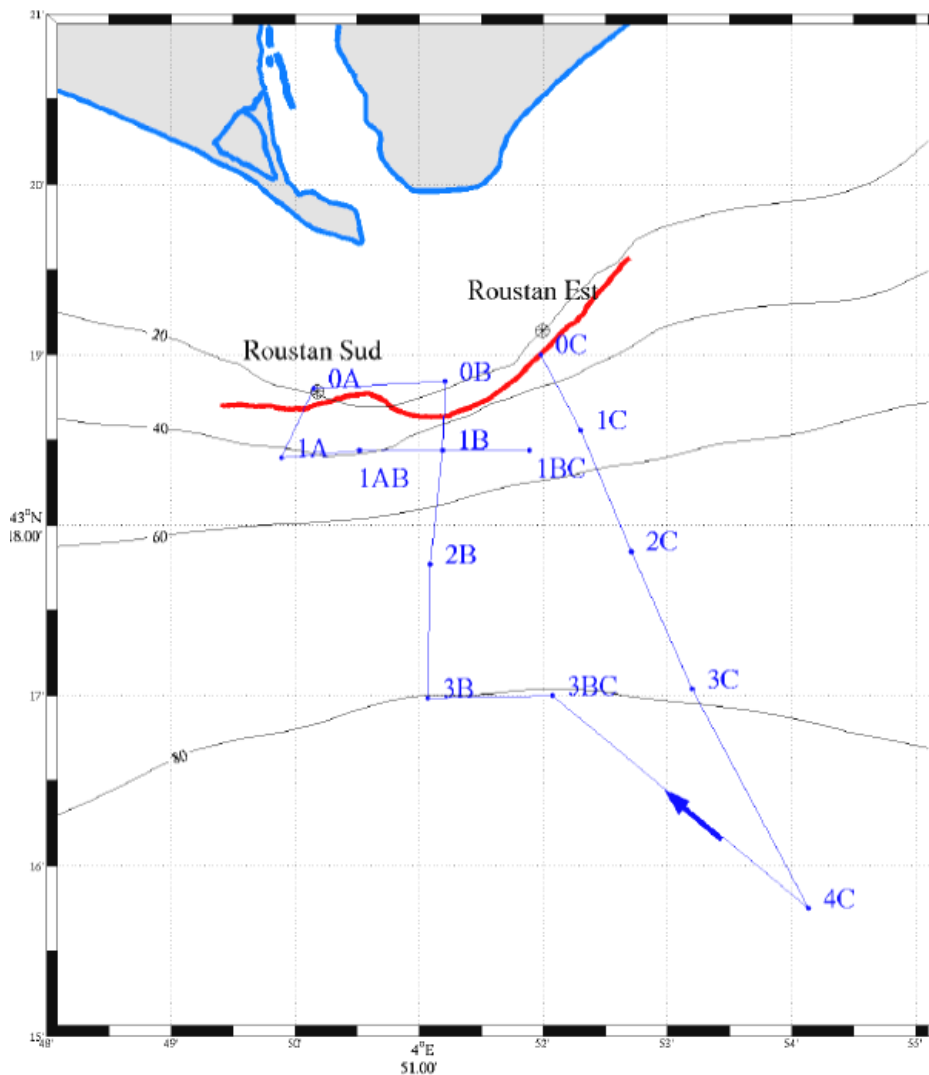


**Figure 4.3 : Mesures de MES de surface à différentes stations de l'embouchure du Rhône et comparaison avec les valeurs recueillies régulièrement en Arles (2006 et 2007).**

#### 4.1.3. Granulométrie des MES à l'embouchure : campagne CARMEX

Les 3 campagnes océanographiques menées à l'embouchure du Rhône en 2007 et 2008 ont permis d'évaluer la granulométrie des MES dans toute la colonne d'eau sur une aire trapézoïdale d'une quinzaine de kilomètres carrés entre 16 m et 90 m de profondeur (**Figure 4.4**).

Lors de la campagne CARMEX (mars 2007), les MES retenues par les filtres, après pesée pour déterminer la CSS, ont été passées aux ultrasons (ou insonifiées) durant une minute afin de détruire les floculats.



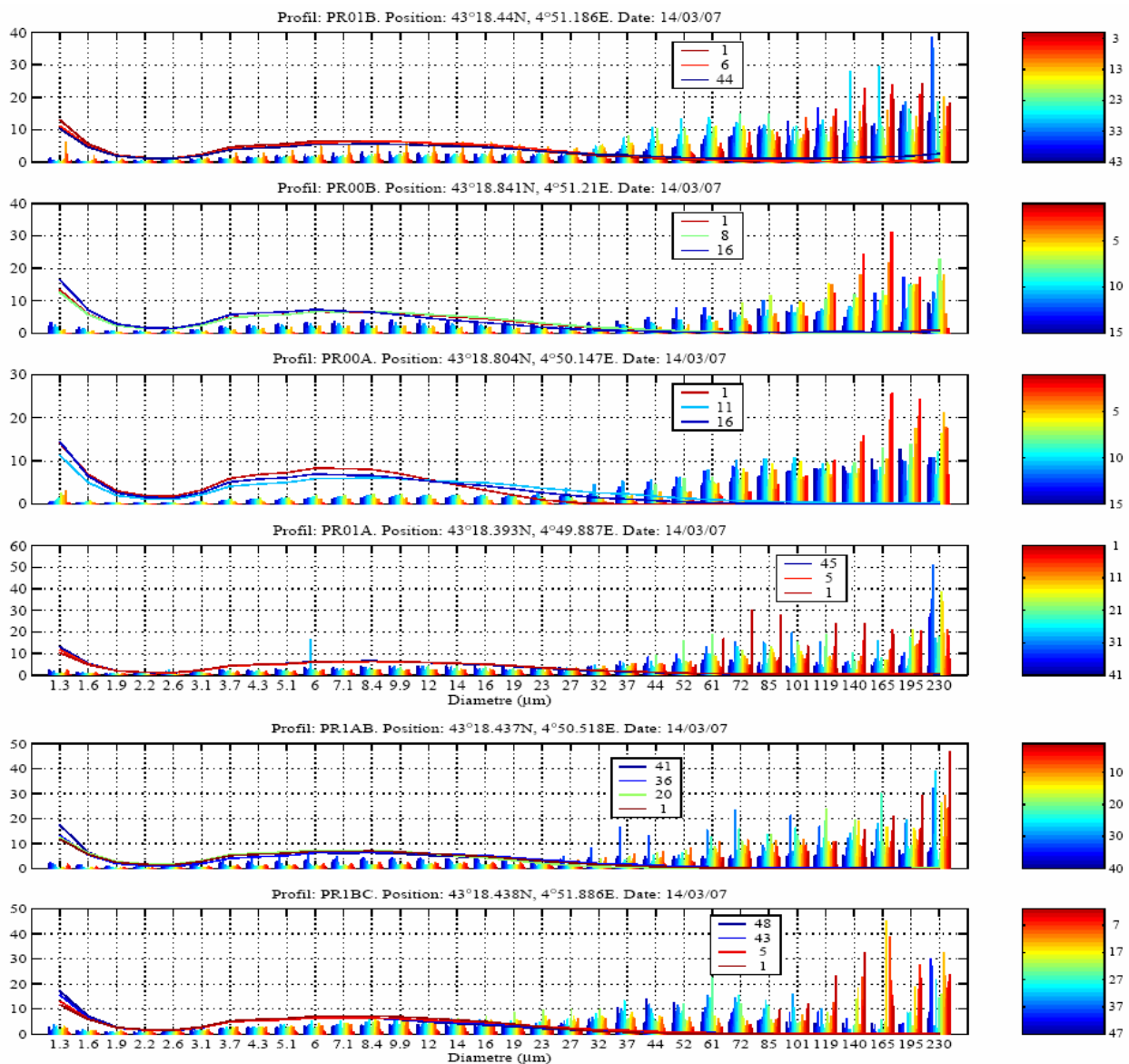
**Figure 4.4 :** Positions des mesures du 14 mars 2007 lors de la campagne CARMEX. Le trait rouge représente le transect effectué par un ADCP tracté le long de l’isobathe 20 m (voir Annexe A4).

#### 4.1.3.1. Résultats de l’analyse granulométrique

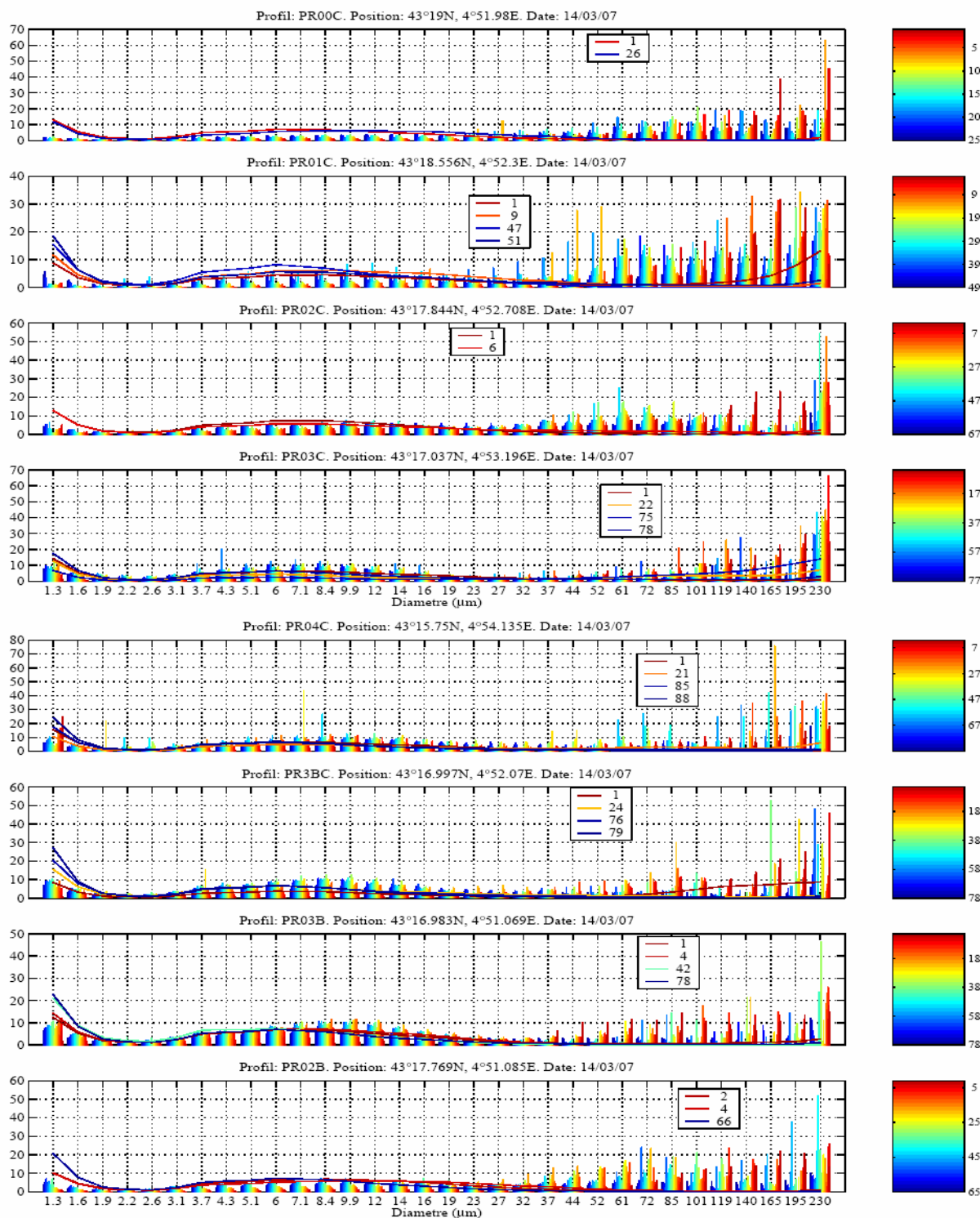
Les profils des **Figures 4.5(a,b)** représentent les fractions granulométriques déterminées par le LISST dans la colonne d’eau à différentes stations localisées à l’embouchure du Rhône (**Figure 4.4**). Les stations les plus proches de l’embouchure et moins profondes sont PR00A, PR00B et PR00C, alors que la plus lointaine de l’embouchure et la plus profonde demeure PR04C.

Le granulomètre laser in situ révèle que la fraction granulométrique supérieure à 63  $\mu\text{m}$  est la plus présente dans la colonne d’eau, quels que soient la profondeur et le point géographique de prélèvement. Cette classe équivaut aux sables dans la classification sédimentaire ISO 9001.

Les plus fortes proportions de diamètres supérieurs à 150  $\mu\text{m}$ , se trouvent en surface (histogramme rouge) et au fond (histogramme bleu). Les couches intermédiaires montrent des fractions plus fines dominantes, notamment inférieures à 150  $\mu\text{m}$  (histogrammes bleu clair et jaune).



**Figure 4.5.a : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés pour différentes profondeurs.**



**Figure 4.5.b : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés pour différentes profondeurs.**

Il est à noter qu'une répartition unimodale voire bimodale est visible sur ce spectre de taille de grains : le premier mode se situerait aux alentours de 8 µm et le second vers 180 µm.

En revanche, les fractions très fines ne sont pas présentes en grandes proportions dans la colonne d'eau, hormis aux stations les plus profondes donc plus éloignées de l'embouchure.

Il n'y a cependant pas de distinction particulière sur la proportion de fines MES entre la surface et le fond au niveau de ces stations. On observe bien une répartition bimodale des MES sur les profils des **Figures 4.5(a,b)**

avec un mode commun à 8  $\mu\text{m}$  mais un second proche de la limite de détection du LISST. La fraction grossière mesurée in situ n'est pas retrouvée après passage aux ultrasons.

L'hypothèse principale est donc que les MES ont subi une agrégation mécanique dans le fleuve et/ou une floculation physico-chimique à son embouchure lors de la confrontation entre les masses d'eau douces chargées en sédiments en suspension issues du Rhône et les masses d'eau salée méditerranéenne. La fraction grossière dominant les résultats quels que soient les points de prélèvements et la profondeur des stations serait constituée de floes, comme décrits dans la thèse de Thill (1999) sur la même zone d'étude.

La mission a été réalisée lors de la décrue du Rhône de mars 2007, dont le débit a diminué de près de 2000  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  en quelques jours (de 3500  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  le 7 à 1500  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  le 15). Lors de cette période, le coin salé a pu remonter en partie l'embouchure du Rhône comme le suggèrent Thill et al. (2001). L'intrusion saline aura augmenté les forces ioniques en présence dans l'eau du fleuve à l'interface supérieure eau salée-eau douce, causant la floculation des MES et participant à la création d'un panache de surface (Surface Nepheloid Layer). Thill et al. (2001) déterminent la salinité optimale apte à engendrer un processus de floculation entre 1 et 7  $\text{g.L}^{-1}$ , c'est-à-dire que ce phénomène se réalise à la très proche embouchure du fleuve, voire dans le fleuve lorsque le coin salé est remonté très en amont.

#### 4.1.3.2. Résultats de l'analyse turbidimétrique

La turbidité à l'embouchure a été mesurée par une sonde STBD et un transmissomètre durant la campagne CARMEX. Les résultats sont très proches après calibration avec les données de MES obtenues par filtration et pesée. La sonde STBD a légèrement tendance à surévaluer la concentration en MES par rapport au transmissomètre.

Les deux instruments mettent en évidence la Bottom Nepheloid Layer (BNL) et la Surface Nepheloid Layer (SNL) où les valeurs de turbidité au fond sont plus importantes que dans le reste de la colonne d'eau. La BNL montre des concentrations comprises entre 4 et 6  $\text{mg.L}^{-1}$  et la SNL entre 7 et 10  $\text{mg.L}^{-1}$  (**Figures 4.6 et 4.7**) alors que la colonne d'eau présente des valeurs inférieures à 2  $\text{mg.L}^{-1}$ .

La limite inférieure de la couche turbide de surface est visible in situ et sa frontière avec le reste de l'eau marine est généralement très nette, excepté en cas de tempête lorsque le mélange est intense et sa profondeur importante. Les limites des deux couches turbides apparaissent aussi sur les profils étudiés. Les stations les plus proches de l'embouchure, c'est-à-dire celles dont la profondeur est inférieure à 20 m, connaissent les plus fortes valeurs de CSS dans les BNL et SNL avec des valeurs approchant 10  $\text{mg.L}^{-1}$ . Ces couches n'apparaissent plus ou très peu au niveau des stations les plus lointaines et profondes (> 80 m), comme PR3B, PR3BC, PR3C et PR4C. Ce sont les matériaux les plus fins qui parviennent à ces distances et ces profondeurs. La faible densité des histogrammes des **Figures 4.5(a,b)** pour ces stations atteste de la raréfaction des particules grossières et la disparition progressive du panache de surface. Il existe également une variabilité latérale de la distribution des concentrations en MES. Les stations PR0A, PR0B et PR0C sont situées au-dessus de l'isobathe 20 m et se trouvent proches de l'embouchure du Rhône. Même si elles présentent clairement les BNL et SNL, leurs colonnes d'eau présentent des turbidités d'allure différentes.

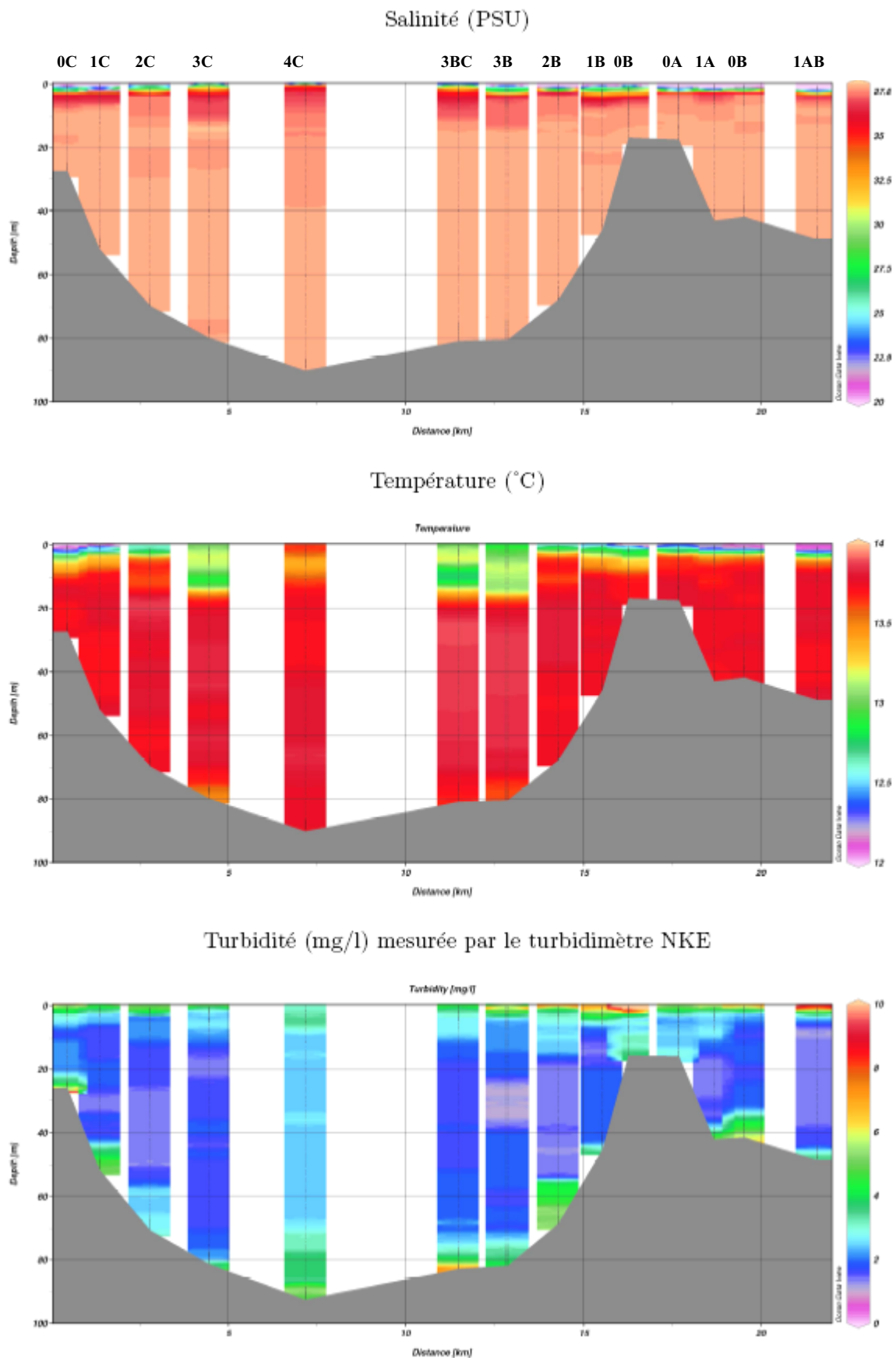


Figure 4.6 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission CARMEX le 14 mars 2007 : la salinité (en PSU), la température (en °C) et la turbidité mesurée avec la STBD ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

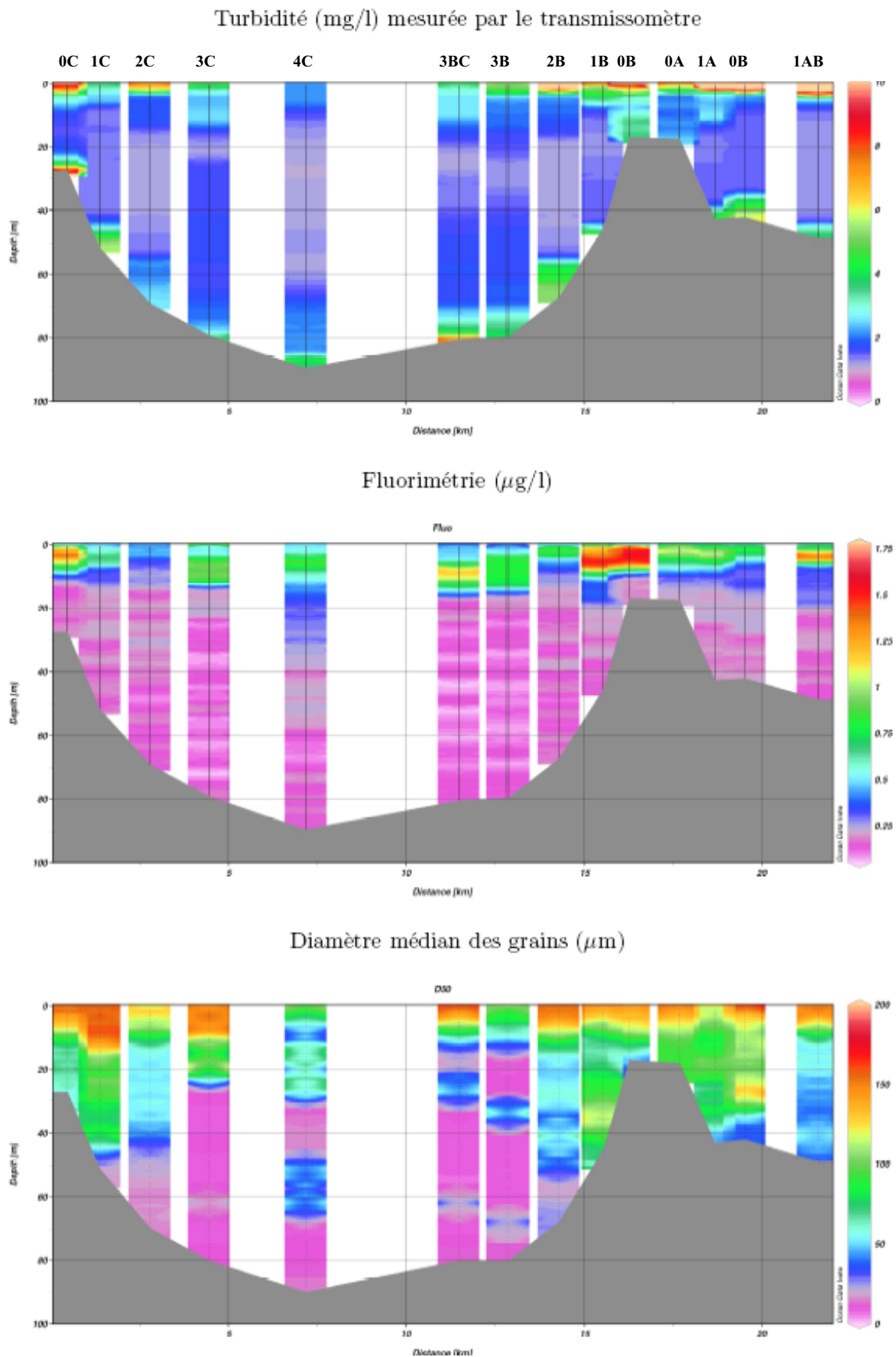


Figure 4.7 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission CARMEX le 14 mars 2007 : la turbidité mesurée par le transmissomètre (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ), la fluorimétrie (en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) et le diamètre médian des MES ou D50 (en  $\mu\text{m}$ ).

En effet, les deux stations les plus occidentales (PR0A et PR0B) montrent une colonne d'eau chargée en MES ( $3 \text{ mg.L}^{-1}$ ) alors que la station située plus à l'est (PR4C) a une colonne d'eau moins turbide ( $1 \text{ mg.L}^{-1}$ ). L'orientation du panache de sortie du fleuve influence logiquement ce paramètre de turbidité.

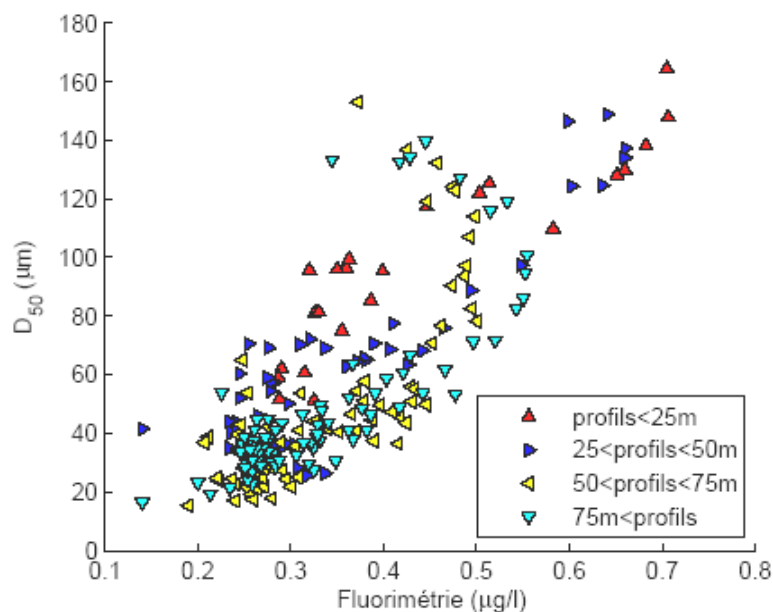
L'épaisseur des deux couches turbides de surface et de fond est de l'ordre du mètre d'après les profils. La SNL repose sur une masse d'eau chargée de  $3 \text{ à } 4 \text{ mg.L}^{-1}$  de  $2 \text{ à } 4 \text{ m}$  d'épaisseur alors que la BNL se trouve sous une masse d'eau de  $5 \text{ à } 10 \text{ m}$  épaisseur chargée à près de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ . Entre ces deux compartiments, la colonne d'eau montre une concentration de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$ . Le compartiment sous-jacent à la SNL semble issu de la défloculation et la décantation de la SNL, processus qui pourraient être vérifiés au moyen d'un LISST-ST mesurant la vitesse de chute des particules. Le compartiment sus-jacent à la BNL apparaît comme étant une zone de stockage dynamique des particules ayant chu dans la colonne d'eau, avant leur futur dépôt. Elle forme ainsi un gradient de concentration à proximité du fond.

Le D50 observé sur la **Figure 4.7** complète les résultats du LISST et précise la granulométrie de la turbidité évaluée. Rappelons que le D50 est le diamètre en dessous duquel se trouvent 50 % des particules en suspension. Il permet d'accéder à une valeur médiane de taille de particules sans être trop affectée par les valeurs extrêmes. Les valeurs de D50 diminuent avec la profondeur et sont les plus bas à proximité du fond. Malgré la forte CSS près de l'interface eau-sédiment, les particules ne s'agrègent ni ne flocculent puisque le D50 est le plus faible de toute la colonne d'eau. Il est compris entre  $1.3 \text{ }\mu\text{m}$  aux profondeurs supérieures à  $60 \text{ m}$  et  $60 \text{ }\mu\text{m}$  aux profondeurs inférieures à  $60 \text{ m}$ . Les matériaux grossiers présents dans la BNL des stations proches de l'embouchure telles que PR0A et PR0B (**Figure 4.7**) sont le résultat de la flocculation de matériaux beaucoup plus fins (**Figures 4.5(a,b)**) puisque le passage aux ultrasons a transformé des particules de plus de  $150 \text{ }\mu\text{m}$  en particules de moins de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . La gamme granulométrique insonifiée retrouvée au fond des stations les plus profondes est identique à celle des stations les moins profondes. Cependant, la gamme granulométrique in situ est plus élevée dans les zones proches de l'embouchure où la profondeur est la plus faible. La défloculation des MES s'opère donc tout au long de la colonne d'eau.

#### 4.1.3.3. Rôle de la Matière Organique dans la flocculation

Les blooms phytoplanctoniques sont généralement visibles dans les couches d'eau superficielle par la présence de matière organique. La présence de phytoplancton, producteur de chlorophylle, se manifeste par un taux de fluorimétrie et une quantité d' $\text{O}_2$  dissous importants. La **Figure 4.7** montre une nappe superficielle où la fluorimétrie est nettement plus importante ( $> 1 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ) que dans le reste de la colonne d'eau ( $< 0.2 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ ). L'épaisseur de la nappe approche  $10 \text{ m}$ , soit à peu près l'équivalent de la zone photique en milieu estuarien turbide.





**Figure 4.8 : Diamètre médian moyen des particules en fonction de la fluorimétrie pour les campagnes EXTREMA1 et CARMEX pour des profils de différentes profondeurs (Dufois (2008)).**

La **Figure 4.8** met en relation des données de fluorimétrie et de D50 mesurées lors des campagnes CARMEX (mars 2007) et EXTREMA1 (mars 2008). Il semblerait que les deux paramètres soient corrélés donc que le phytoplancton soit responsable de l'observation d'entités de forts diamètres. Il est probable que les particules en suspension mises en évidence par le LISST soient d'origine phytoplanctonique pure ou des MES liées par la MO sous la forme de phytoplancton (**voir Annexe A6**).

En outre, les points des profils situés entre 0 et 50 m de profondeur suivent à peu près la même droite de régression alors que les points dont la profondeur des profils est inférieure à 50 m sont un peu excentrés. L'absence de phytoplancton en profondeur peut expliquer les résultats obtenus.

L'analyse au Microscope Electronique à Balayage (MEB) réalisée par Yves Noak (CEREGE) n'a pas permis de conclure quant à la nature des matériaux retrouvés sur les filtres. Cela peut s'expliquer par le fait que les conditions de conservation des résidus de filtres n'étaient pas optimales et qu'aucune mesure de fixation de la MO n'a été adoptée.

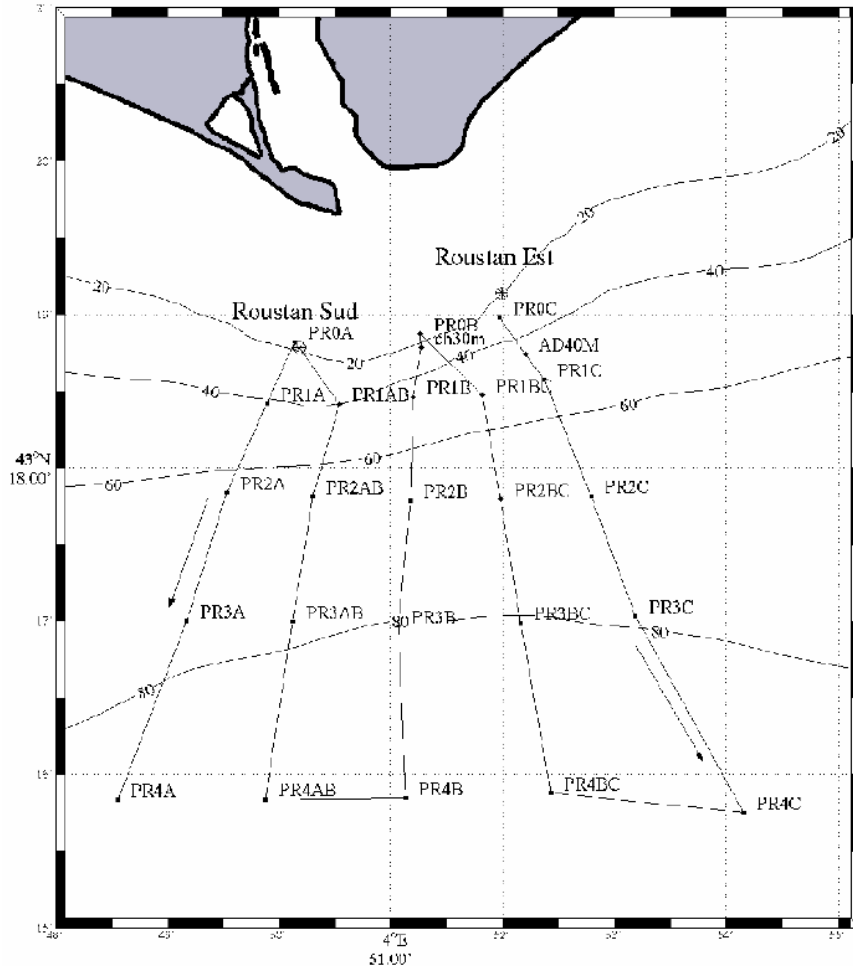
## 4.2 Hydrologie à l'embouchure du Rhône

En plus de la campagne CARMEX déroulée en mars 2007, deux autres missions ont été menées à l'embouchure du Rhône sur le N/O L'Europe dans le cadre du programme EXTREME. Il s'agit des campagnes EXTREMA1 et EXTREMA2 réalisées en mars et octobre 2008.

La comparaison de leurs contextes hydrologiques respectifs permet de comprendre le fonctionnement de la colonne d'eau à l'embouchure du Rhône en fin d'automne et fin d'hiver et de le relier à la dynamique sédimentaire du milieu. Les résultats des analyses granulométriques et hydrologiques des legs effectués sont exposés dans ce travail ainsi que les conditions de débits de la période étudiée.

#### 4.2.1. Campagne EXTREMA1 (mars 2008)

Cette campagne s'est déroulée sur deux legs réalisés les 11 et 14 mars 2008 (**Figure 4.9**). Les facteurs météorologiques et hydrologiques ont varié entre ces deux legs. Les vents avaient globalement à peu près les mêmes intensités et directions et les débits fluviaux ont augmenté de  $1233 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à  $1617 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , élevant les CSS de  $4.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  à  $12.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  en Arles. La mer était un peu agitée le 11 avec de la houle résiduelle mais calme le 14 mars.



**Figure 4.9 : Carte des stations de prélèvements des deux legs des campagnes EXTREMA1 et EXTREMA2 à l'embouchure du Rhône.**

##### 4.2.1.1. Analyses du premier leg : processus de défloculation

Cette partie passe en revue la répartition des tailles de particules en suspension de 25 profils du premier leg de la campagne EXTREMA1.

Il est important de représenter les résultats de l'analyse granulométrique pour chaque point d'observation afin d'avoir à la fois des visions d'ensemble et localisée de la distribution des sédiments aux échelles verticale et horizontale.

Le leg du 11 mars présente globalement deux modes granulométriques distincts sur toutes les stations : le premier entre 5 et 7  $\mu\text{m}$  particulièrement dans la deuxième moitié de la colonne d'eau en allant vers le fond et le second est supérieur à 150  $\mu\text{m}$  plutôt localisé en surface (**Figure 4.10**).

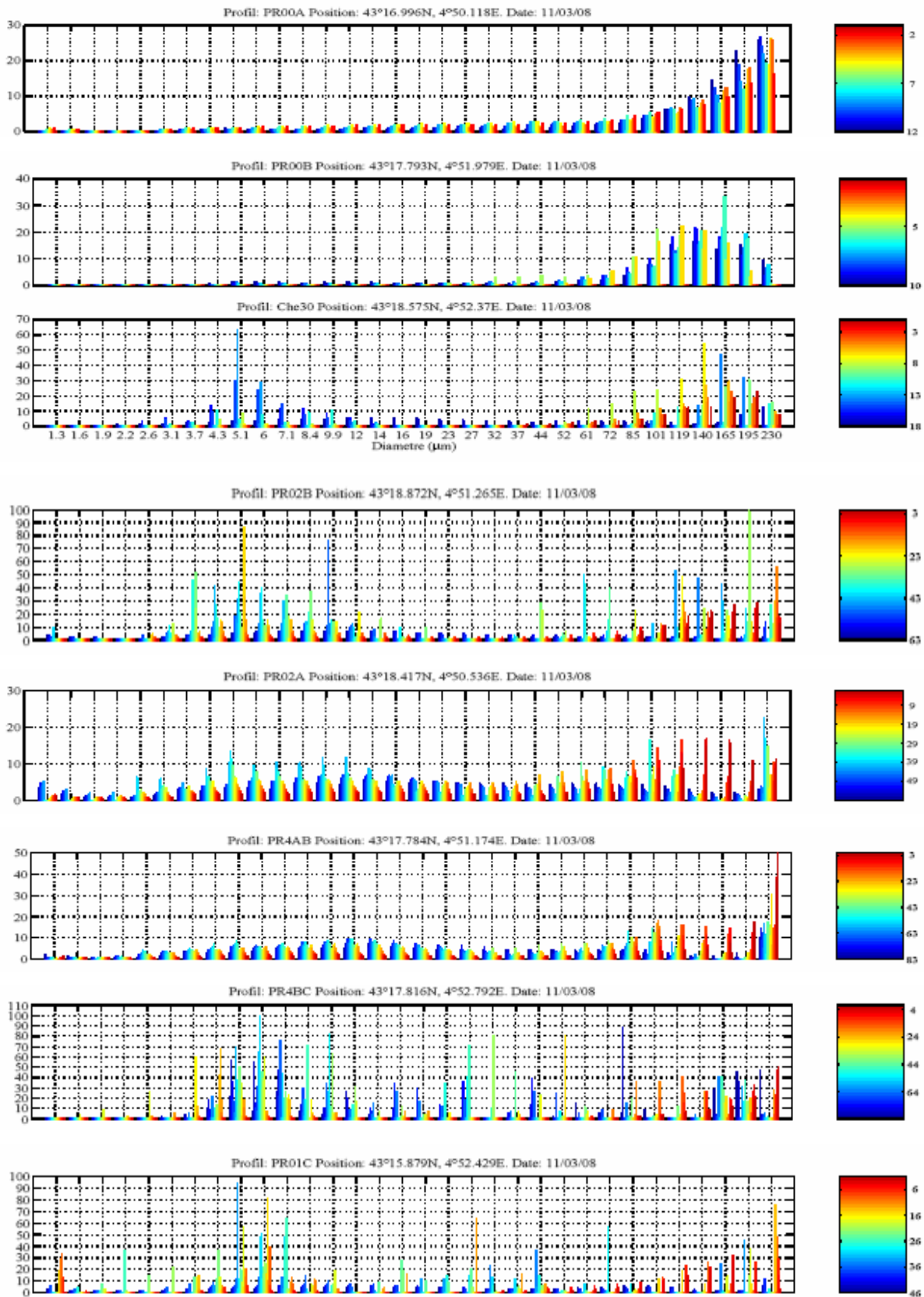


Figure 4.10 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil du premier leg de la campagne EXTREMA1. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface.

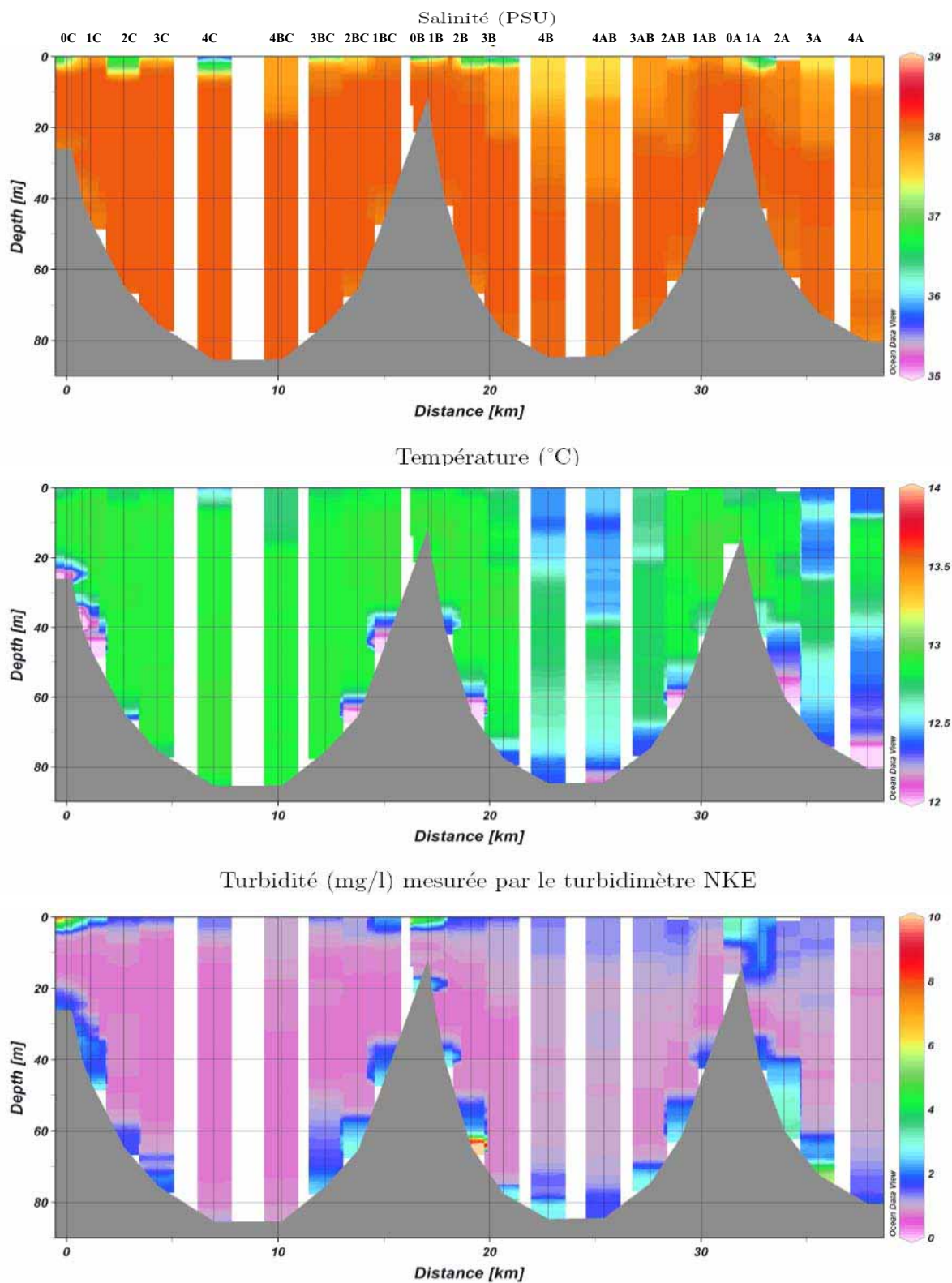
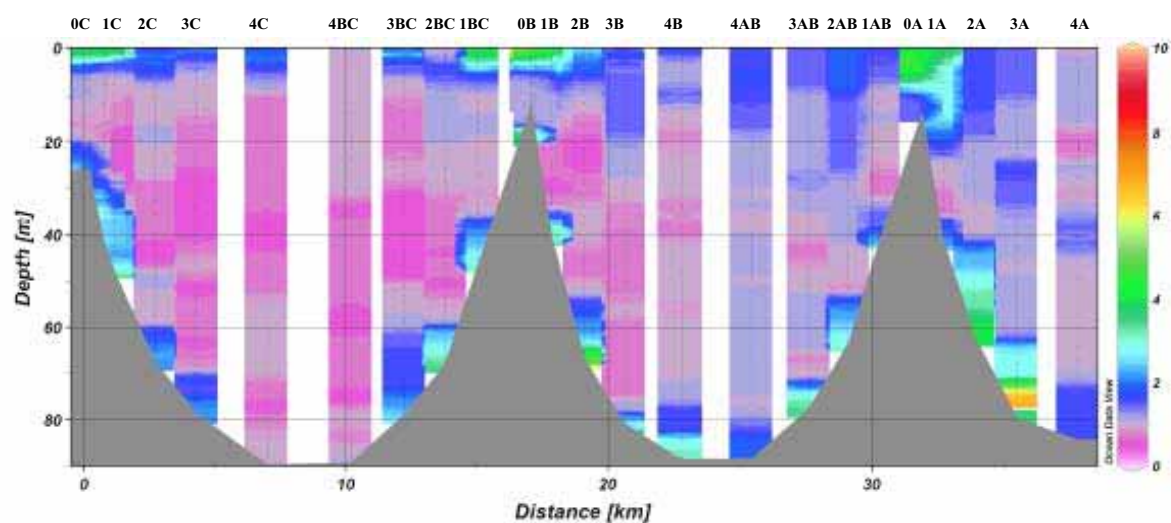
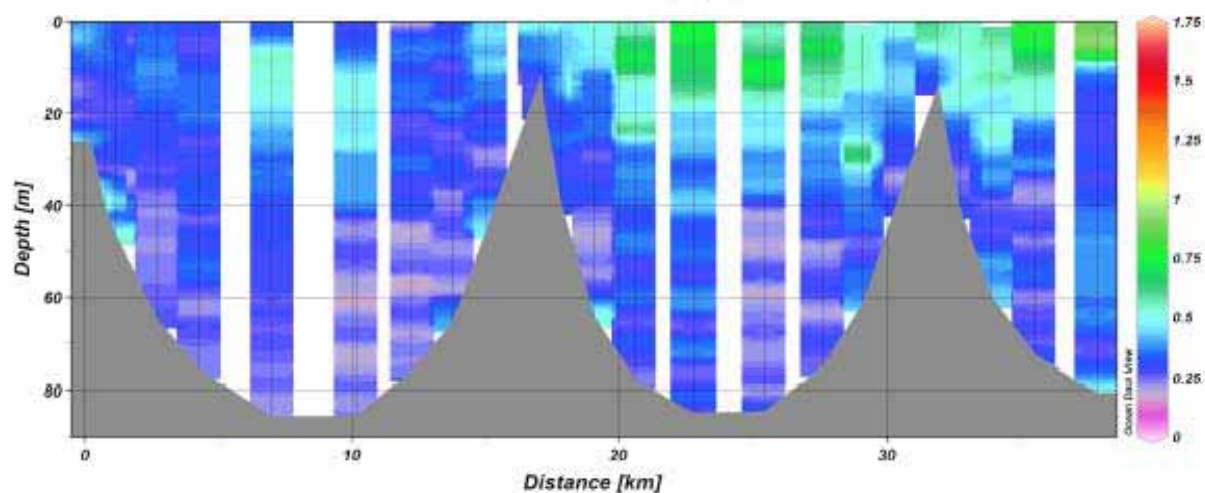


Figure 4.11 : Succession des profils hydrologiques à l’embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA1 le 11 mars 2008 : la salinité (en PSU), la température (en °C) et la turbidité mesurée avec la STBD (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ).

Turbidité (mg/l) mesurée par le transmissomètre



Fluorimétrie ( $\mu\text{g/l}$ )



Diamètre médian des grains ( $\mu\text{m}$ )

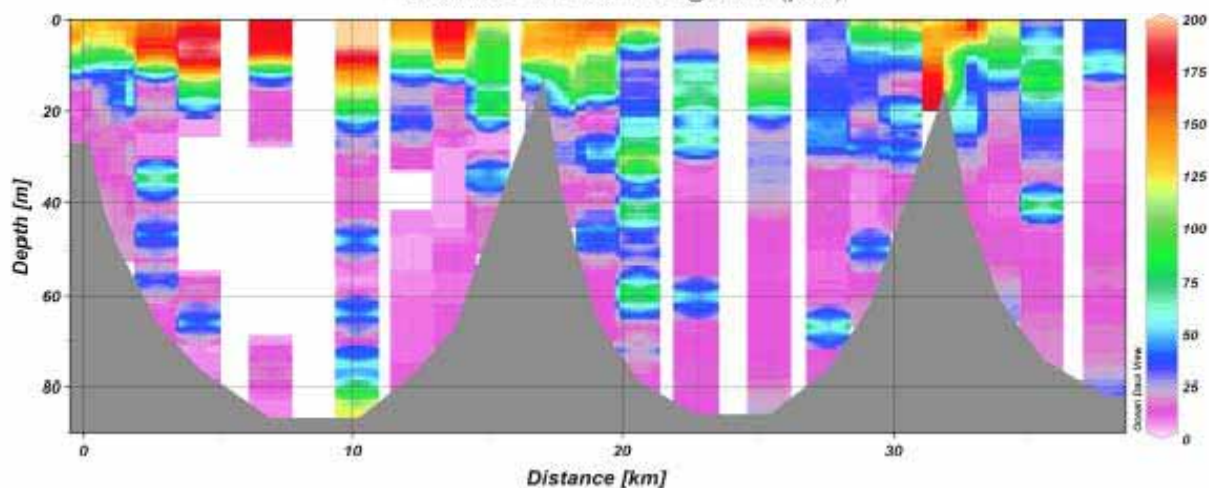


Figure 4.12 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA1 le 11 mars 2008 : la turbidité mesurée par le transmissomètre (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ), la fluorimétrie (en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) et le diamètre médian des MES ou D50 (en  $\mu\text{m}$ ).

Le panache rhodanien est plutôt composé de particules grossières qui tendent à décanter avec une certaine vitesse de chute et à défloculer puisque celles-ci ne sont plus trouvées au fond. Cette étude appuie les conclusions des travaux de Fox et al. (2004a et 2004b) ainsi que ceux de Milligan et al. (2007) sur l'estuaire du Pô. En effet, ils expliquent les fortes vitesses de chute de  $1 \text{ mm.s}^{-1}$  retrouvées à l'embouchure du fleuve italien par l'importante fraction particulaire floculée, jusqu'à un diamètre de 1 mm. Ils affirment également que tout ou partie de ces floes alimentent la BNL aux isobathes inférieures à 8 m. L'élargissement de la zone d'étude aux fonds supérieurs à 90 m permet d'apercevoir une variation du comportement des floes en milieu distal de l'embouchure. Les floes sont moins gros en surface à cette distance du débouché du Rhône mais un gradient du D50 montre la diminution du diamètre des grains avec la profondeur, suggérant un processus de défloculation (**Figure 4.12**), induit par les paramètres physiques et chimiques du milieu environnant comme la salinité, le pH, la concentration en MES, la pression (Verney, 2006).

Néanmoins, il est possible d'imaginer un transport de particules fines dans la colonne d'eau et au fond depuis le fleuve qui serait combiné au transfert vertical des sédiments de surface.

Les résultats obtenus à PR0A et PR0B (**Figure 4.10**), les points de prélèvements les plus proches de l'embouchure, démentent l'observation d'une défloculation puisqu'ils révèlent une proportion de matériel grossier sans équivoque. Ces résultats démontrent que les particules grossières chutent en premier lieu mais également qu'elles ne parviennent pas à défloculer sur des faibles hauteurs d'eau. Cette observation correspond à celles émises par Fox et al. (2004a).

Le panache semble orienté vers l'ouest d'après les profils de température, fluorimétrie et turbidité (**Figures 4.11 et 4.12**) mais le D50 a l'air plutôt étendu vers le large dans la partie orientale. Les eaux superficielles froides originaires du Rhône ( $12.3^{\circ}\text{C}$ ) couvrent les eaux salées méditerranéennes un peu plus chaudes ( $13^{\circ}\text{C}$ ). Une fine masse d'eau plus froide que la colonne d'eau sus-jacente repose au fond ( $12^{\circ}\text{C}$ ), contrairement aux observations faites à la fin de l'hiver 2007 pendant la campagne CARMEX où la température était restée homogène à  $13.6^{\circ}\text{C}$  jusqu'au fond. L'origine de cette eau semble marine puisque aucune lentille d'eau douce profonde ne paraît avoir été identifiée par la CTD.

L'activité phytoplanctonique mise en évidence par les pics de fluorimétrie se développe à l'ouest de l'embouchure d'après la **Figure 4.12** sur près de 20 m de profondeur. Elle est légèrement plus faible que l'année précédente puisqu'elle atteint  $1 \mu\text{g.L}^{-1}$  contre  $1.75 \mu\text{g.L}^{-1}$  en 2007 mais le signal de fluorimétrie est plus étendu verticalement.

Les zones superficielles où la turbidité est la plus importante, délimitant le panache fluvial principalement à la proche embouchure, ne comportent pas spécialement de matériel grossier en suspension, ni de forte valeur de fluorimétrie. Les valeurs de D50 les plus élevées (environ  $200 \mu\text{m}$ ) se situent à l'est sur une importante tranche d'eau alors que la partie occidentale présente des valeurs comprises entre 25 et  $100 \mu\text{m}$ . La floculation des particules sous forme de microflocs et de macroflocs ne nécessite donc pas l'intervention indispensable de ligand produit par une activité phytoplanctonique.

Aucune lentille turbide ne permet d'expliquer la présence de matières grossières assimilables à des floes dans la colonne d'eau. Ces entités situées entre deux eaux proviennent de la chute des particules flocuées de surface mais tardent à se désagréger. Les processus de floculation et de défloculation sont complémentaires et soumis aux conditions environnementales, qu'elles soient mécaniques ou chimiques.

#### 4.2.1.2. Analyses du second leg : implication de la MO sur la floculation

Cette partie présente l'analyse de la répartition des tailles de particules en suspension de 24 profils du second leg de la campagne EXTREMA1.

Les données de températures n'ont pas pu être correctement converties depuis le format utilisé par la CTD (.dat) vers un format lisible et exploitable (.txt). Elles ne sont donc pas disponibles pour ce leg.

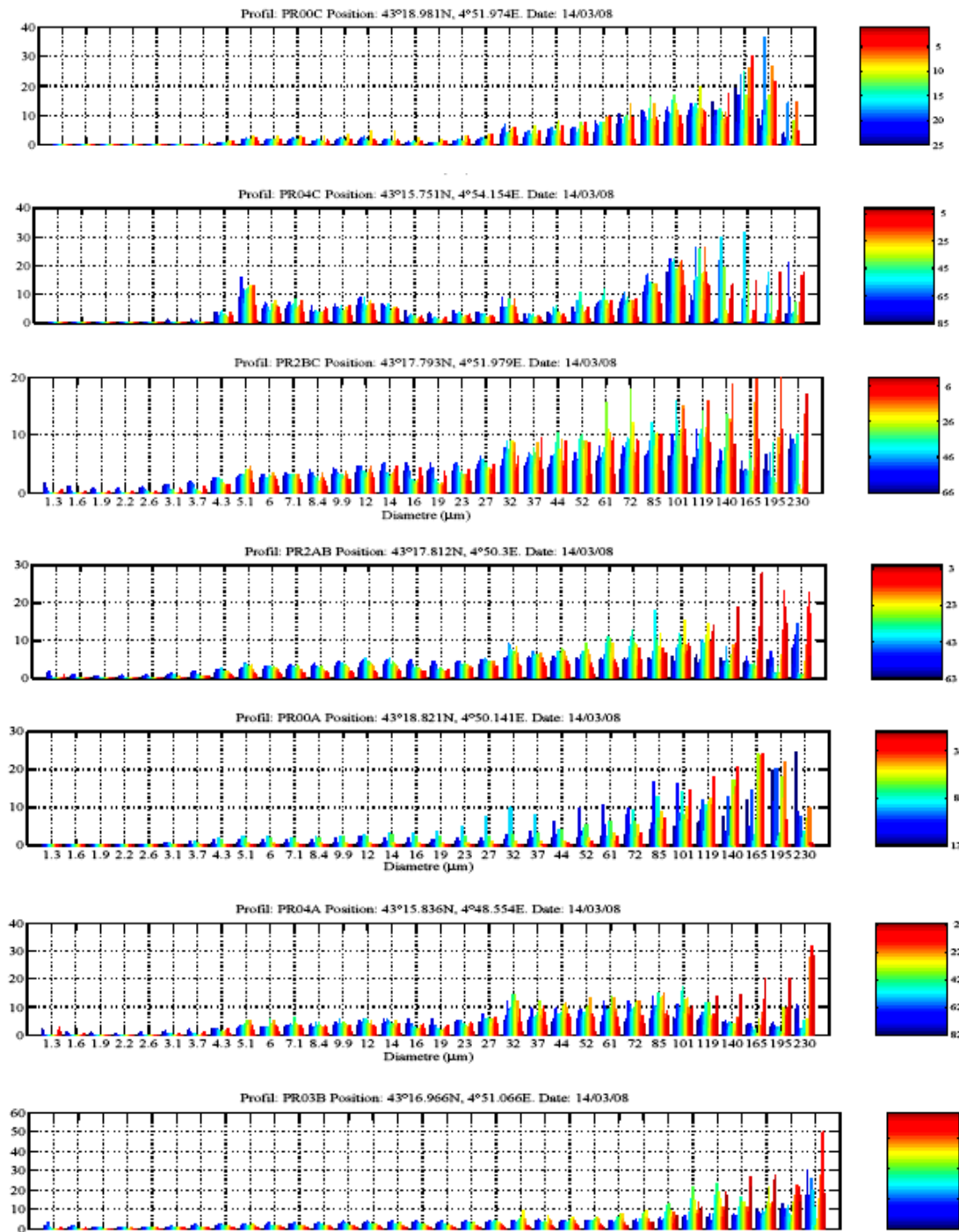
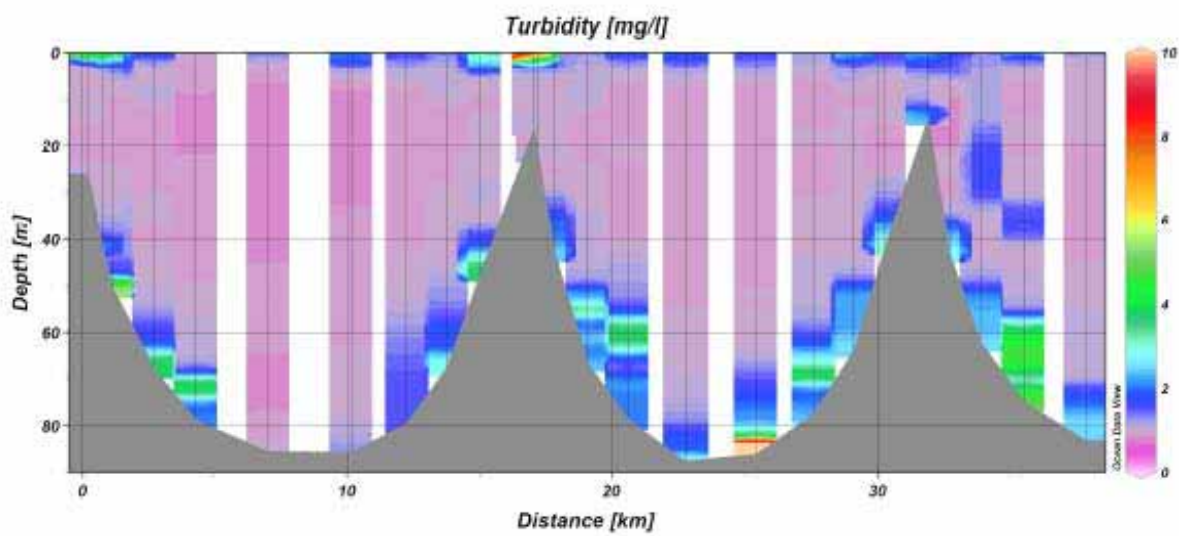
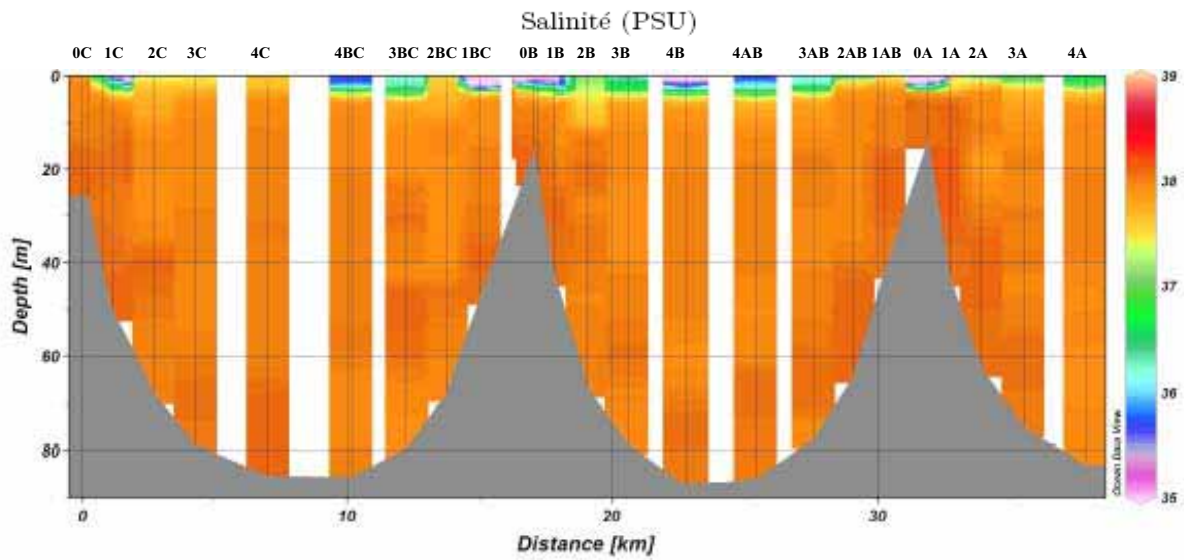


Figure 4.13 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil du second leg de la campagne EXTREMA1. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface.



Turbidité (mg/l) mesurée par le transmissomètre

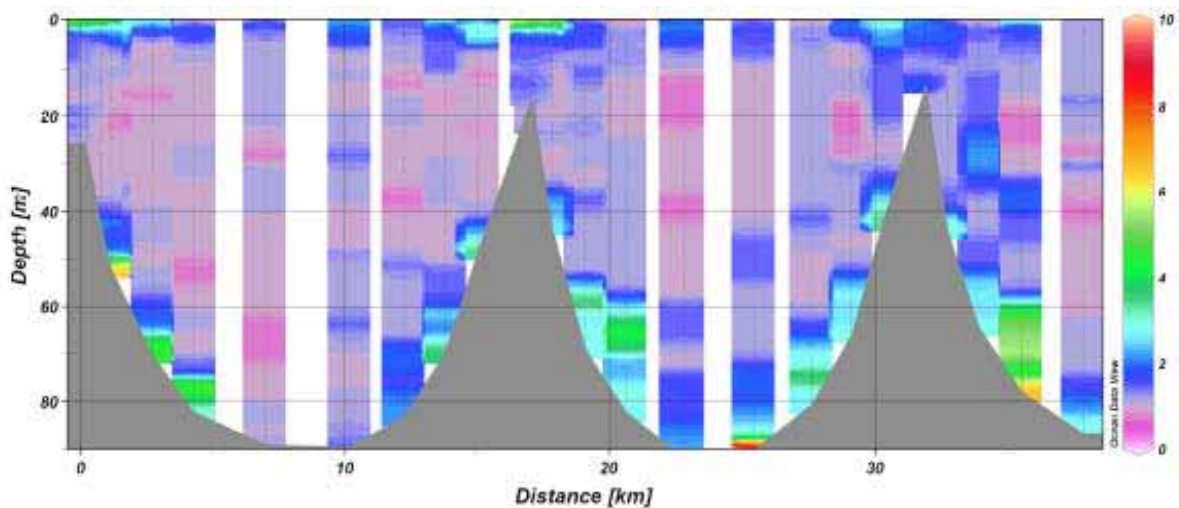
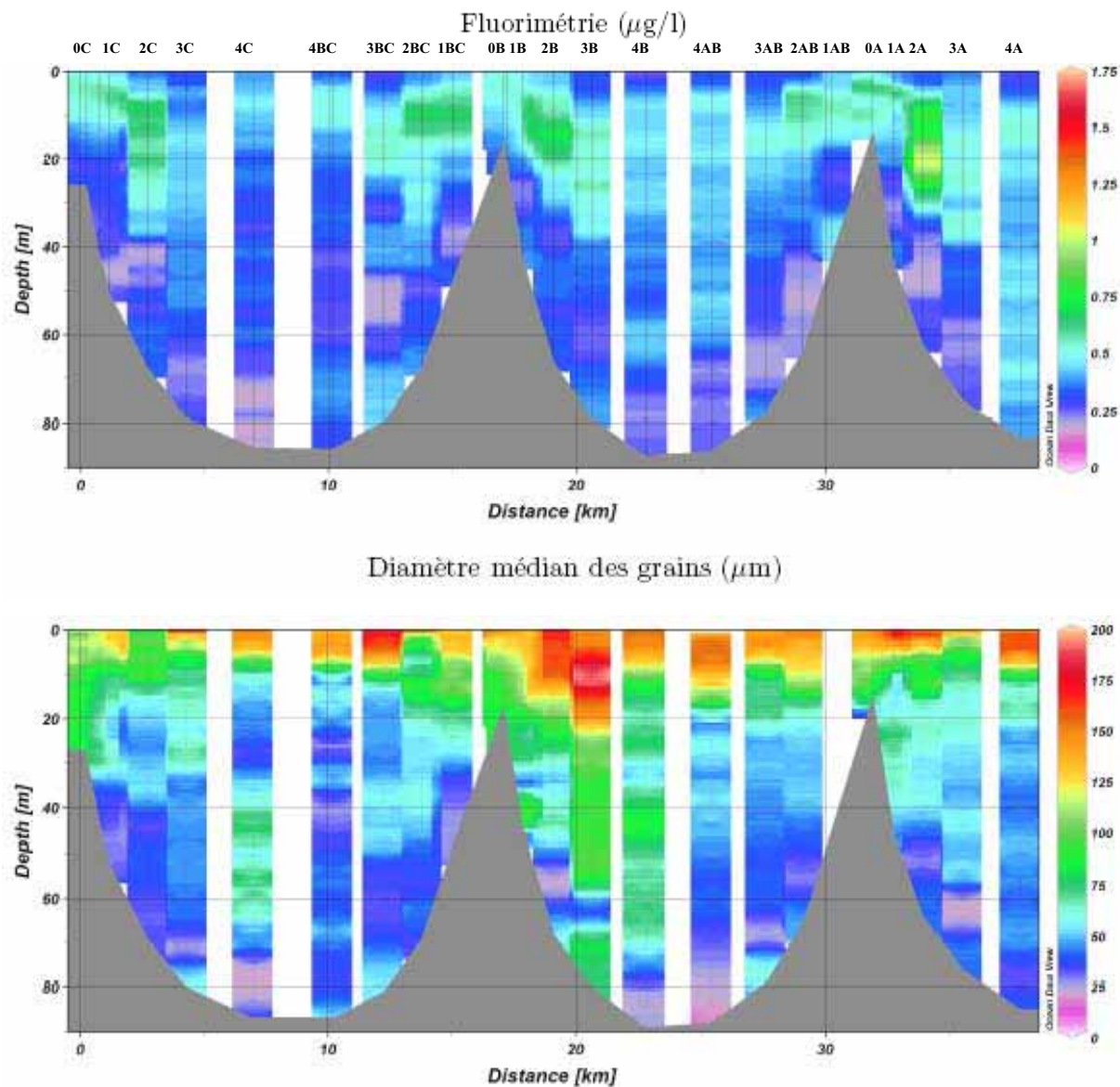


Figure 4.14 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA1 le 14 mars 2008 : la salinité (en PSU), la turbidité mesurée avec la STBD (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ), la turbidité mesurée par le transmissomètre (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ).





**Figure 4.15 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA1 le 14 mars 2008 : la fluorimétrie (en  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et le diamètre médian des MES ou D50 (en  $\mu\text{m}$ ).**

La distribution granulométrique du leg du 14 mars est unimodale sur pratiquement toutes les stations passées en revue. Le mode est placé aux alentours de  $150\ \mu\text{m}$  (**Figure 4.13**). Il existe cependant une certaine proportion de matériel fin présent dans toute la colonne d'eau mais qui ne constitue pas un mode de répartition granulométrique. Toutes les classes granulométriques sont représentées, notamment à partir du diamètre  $5\ \mu\text{m}$ . Néanmoins, plus de 90 % de la fraction granulométrique de surface de chacune des stations est supérieure au diamètre  $119\ \mu\text{m}$  ( $D_{10} = 110\ \mu\text{m}$ ). La fraction de fond est supérieure au diamètre  $72\ \mu\text{m}$  ( $D_{10} = 76\ \mu\text{m}$ ). Leurs D50 respectifs sont compris entre 120 et  $200\ \mu\text{m}$  (D50 moyen global calculé =  $165\ \mu\text{m}$ ) pour la surface et entre 1.3 et  $80\ \mu\text{m}$  (D50 moyen global calculé =  $40\ \mu\text{m}$ ) pour le fond (**Figure 4.15**).

Comme pour les transects précédents, le panache turbide du Rhône (**Figure 4.14**) est relativement peu épais : 50 cm pour ses plus fortes concentrations en MES à la proche embouchure ( $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et environ 2.5 m pour son nuage chargé sous-jacent ( $3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Le reste de la colonne d'eau ne contient presque pas de particules en suspension. Les floccs issus du panache du Rhône sont visibles jusqu'à 20 m de profondeur environ, tout comme les fortes valeurs fluorimétriques qui n'affleurent pas à la surface de l'eau mais qui se situent entre 5 et 20 m de

profondeur. Un signal de fluorimétrie remarquable est présent à 40 m de profondeur au droit de l'embouchure du Rhône jusqu'à la station PR3B. Le profil du D50 est d'ailleurs superposable à celui de la fluorimétrie. Il est vraisemblable que la MO vivante ait agglutiné les particules en suspension, augmentant leur vitesse de chute et entraînant le floc total vers le fond.

Contrairement à la SNL, la BNL accuse une épaisseur atteignant près de 20 m par endroit d'après la **Figure 4.14** : le tapis de fond dont la CSS est mesurée à  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  à une hauteur apparente de 1 m environ mais le nuage turbide sus-jacent dont la CSS est comprise entre 4 et  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  s'élève à une vingtaine de mètres au-dessus du substrat. La limite avec le reste de la colonne d'eau chargée à moins de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  est clairement visible.

Les deux legs se ressemblent globalement mais l'activité phytoplanctonique et le D50 ont évolué pendant les trois jours séparant les mesures. La fluorimétrie était uniforme entre la surface et 20 m de profondeur puis elle s'est retrouvée alternativement entre 10 et 40 m de profondeur. Les courants et les vagues initiées par la houle ont pu déplacer le phytoplancton.

De même, le D50 des MES superficielles a évolué puisque son maximum se situait à l'est de l'embouchure le premier jour et il s'est réparti sur l'horizon de l'embouchure trois jours tard, marquant une masse plongeante visible vers le large en droit de l'embouchure et correspondant à l'activité phytoplanctonique. Les flocons en suspension semblent ainsi être autant d'origine minérale qu'organique d'après les résultats de cette campagne.

En outre, les diamètres D50, homogènes sur toute la colonne d'eau, sont bien plus élevés lors du second leg avec des valeurs de  $50 \mu\text{m}$  que lors du premier leg présentant des valeurs autour de  $5 \mu\text{m}$ . La turbulence et les phénomènes d'advection peuvent expliquer ces observations mais il est également possible que la hausse progressive du débit du fleuve et la présence de phytoplancton en profondeur augmentent les apports solides et empêchent la défloculation.

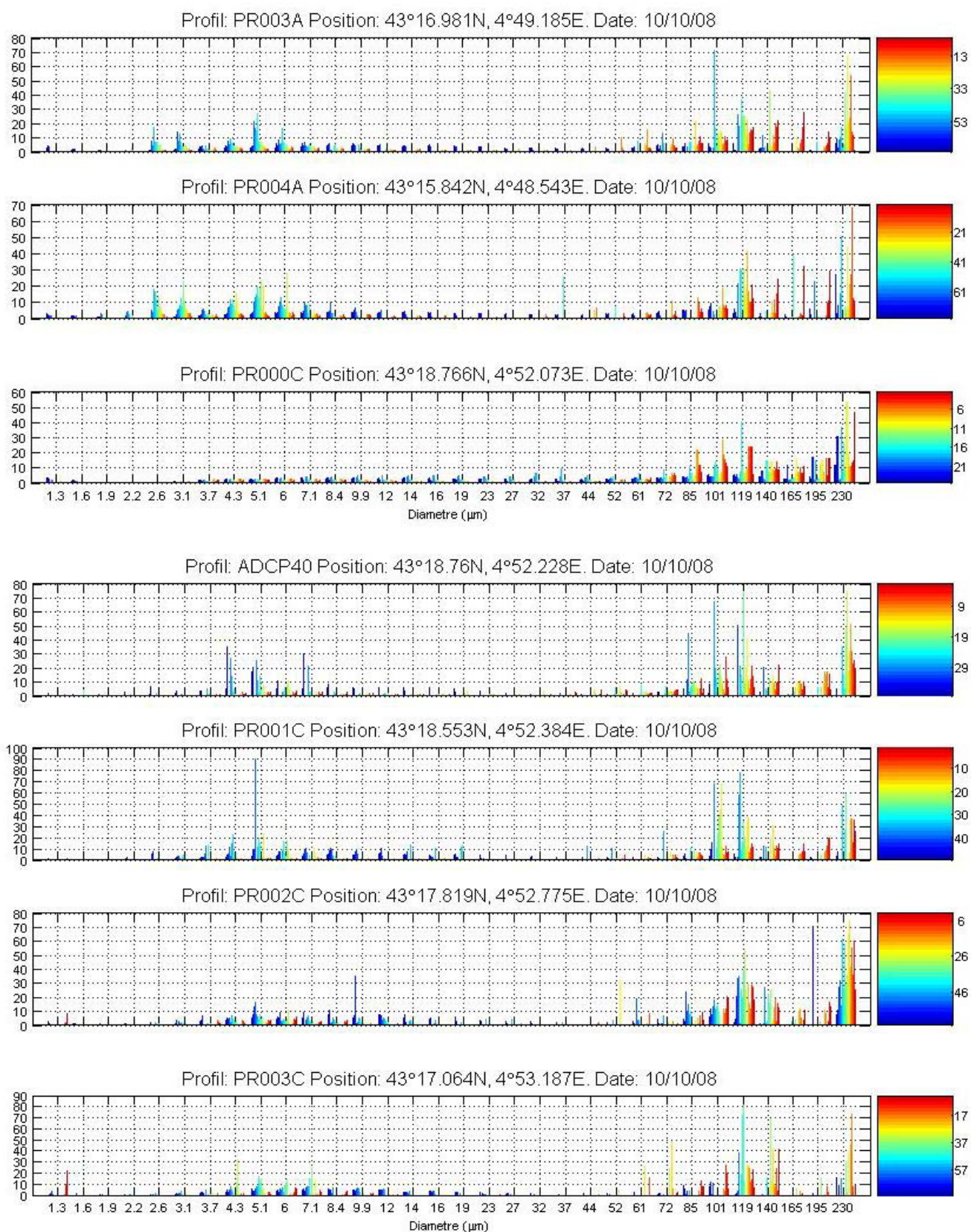
#### 4.2.2. Campagne EXTREMA2 (octobre 2008)

Cette campagne s'est déroulée sur deux legs réalisés les 10 et 15 octobre 2008. Les facteurs météorologiques ont assez peu varié pendant ces deux périodes. La mer était calme et le vent est tombé d'une journée à l'autre. La CNR a enregistré des débits de  $1100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $776 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  les 10 et 15 octobre, respectivement.

##### 4.2.2.1. Analyse du premier leg : importance de la thermocline

La campagne EXTREMA2 a également duré deux semaines du 8 au 24 octobre 2008. La température de l'eau atteint près de  $19^\circ\text{C}$  sur les 15 premiers mètres mais dénote une légère pellicule d'eau froide d'un peu plus de  $17^\circ\text{C}$  sus-jacente issue du Rhône, confirmée par une lentille d'eau plus douce entre 15 et 35 PSU contre près de 38 à 40 PSU deux mètres en dessous (**Figure 4.17**).

Le changement de saison est également remarquable à travers la nette définition d'une thermocline normale oscillant entre 15 et 25 m de profondeur. La température de la colonne d'eau décroît de  $3^\circ\text{C}$  sur 5 m de profondeur. Une barrière de densité importante défavorisant les échanges des masses d'eau semble se situer à 20 m de profondeur.



**Figure 4.16 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil du premier leg de la campagne EXTREMA2. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface.**

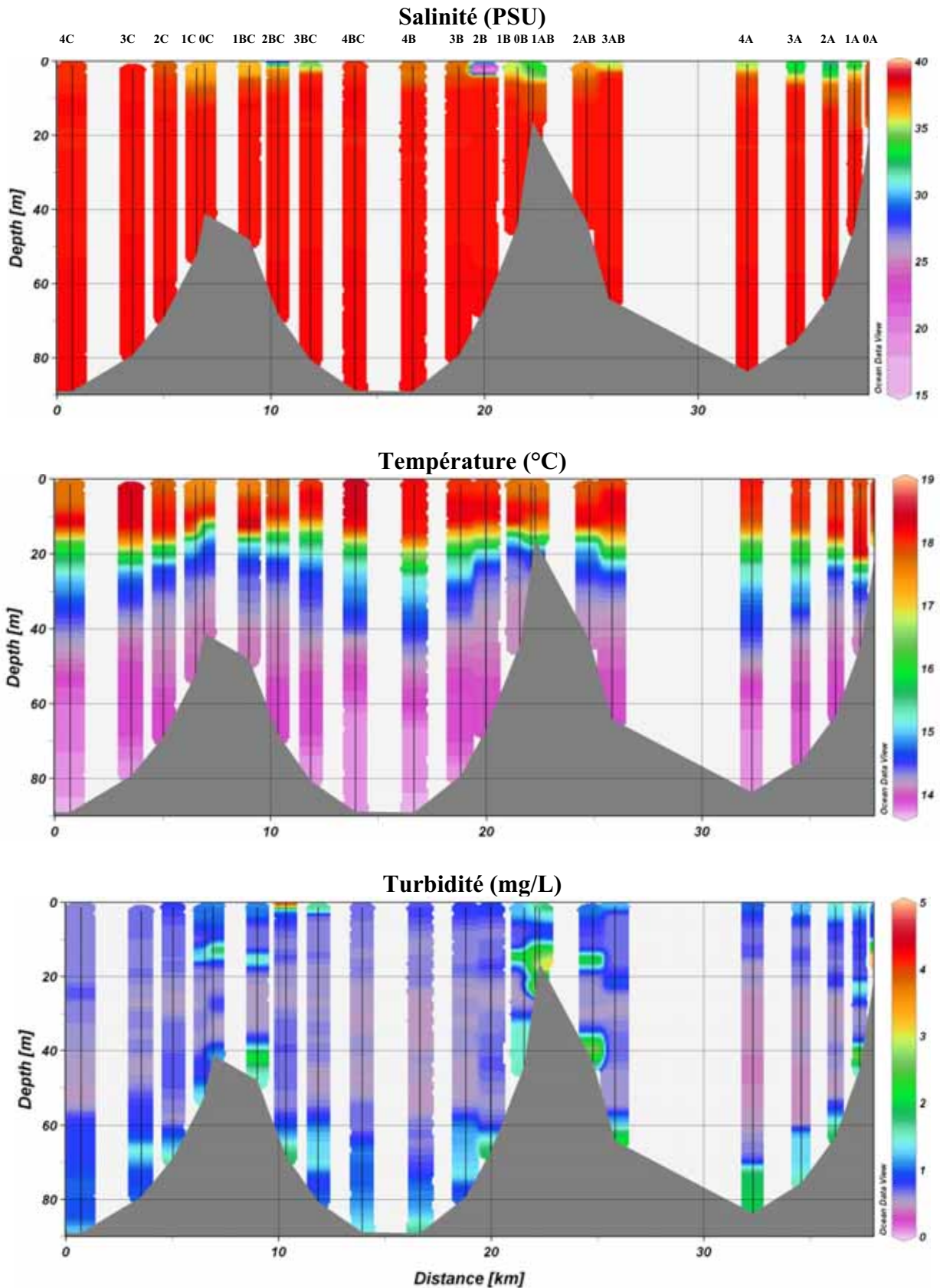
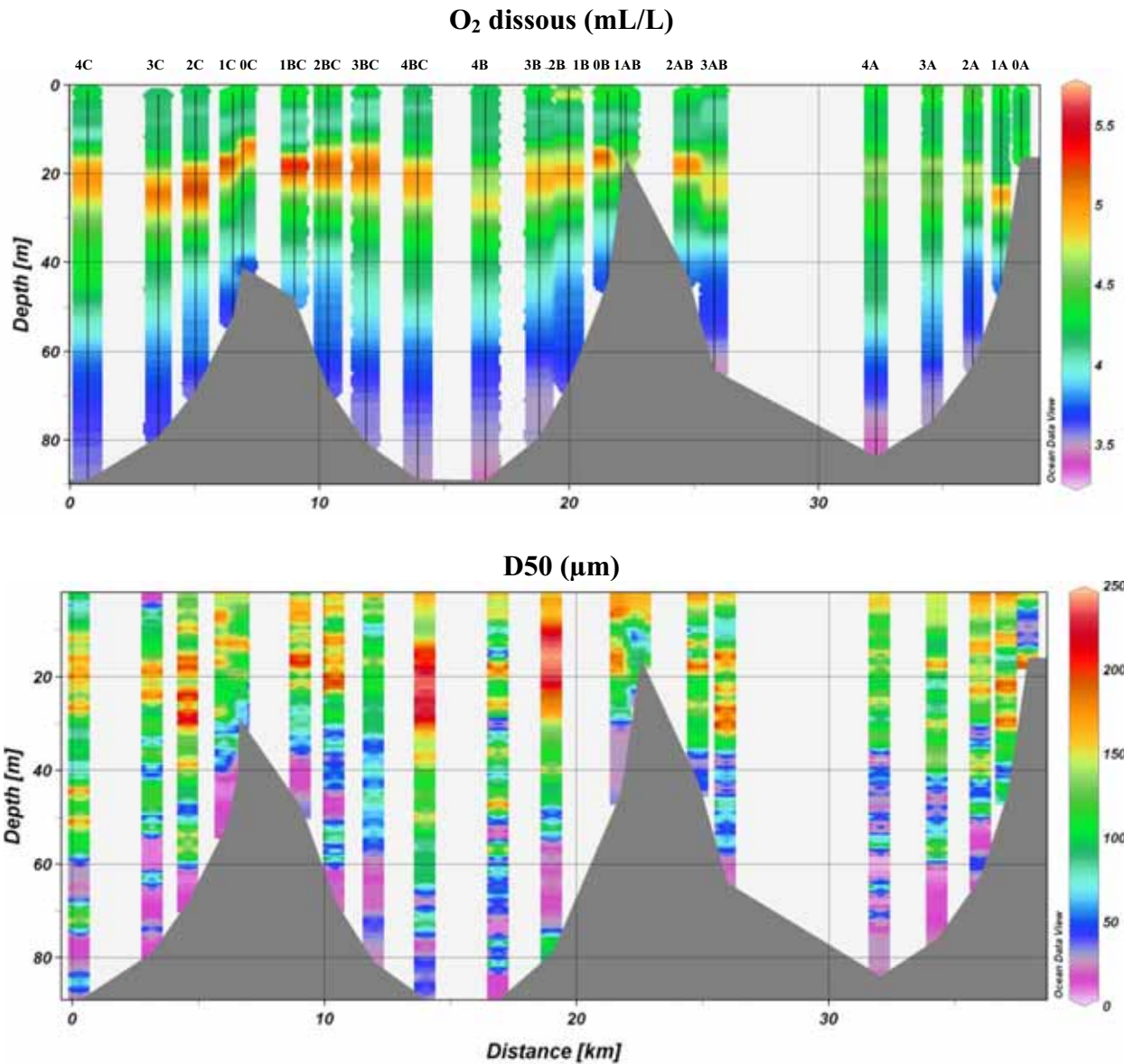


Figure 4.17 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA2 le 10 octobre 2008 : la salinité (en PSU), la température (en °C) et la turbidité mesurée avec le transmissomètre (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ).



**Figure 4.18 : Succession des profils hydrologiques à l’embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA2 le 10 octobre 2008 : l’oxygène dissous (en mL.L<sup>-1</sup>) et le diamètre médian des MES ou D50 (en µm).**

Néanmoins, les valeurs élevées des profils d’oxygène dissous repérés au niveau de cette thermocline suggèreraient la présence d’organismes vivants ou d’eaux fraîches issues des précipitations précédant la mission (**Figure 4.18**). Le fluorimètre n’était malheureusement pas disponible pour cette campagne. Il nous aurait davantage renseigné sur la présence potentielle d’organismes vivants. Le signal de production de d’oxygène dissous peut donc indiquer un processus de photosynthèse par du phytoplancton, ou bien de l’air piégé par une nappe d’eau fraîche récente (miction). L’allure ondulatoire reposant sur la thermocline et la présence de cette nappe d’O<sub>2</sub> dissous dans la zone photique laisse penser à du phytoplancton. En outre, le calcul de la concentration standard en O<sub>2</sub> dissous à cette profondeur ( $234.06 \mu\text{mol.kg}^{-1}$  soit  $5.38 \text{ mL.L}^{-1}$ ) au moyen de la formule de Benson et Krause (1984), impliquant la salinité et la température, semble montrer une légère sursaturation en O<sub>2</sub> dissous (de 102 à 106 %) à toutes les stations.

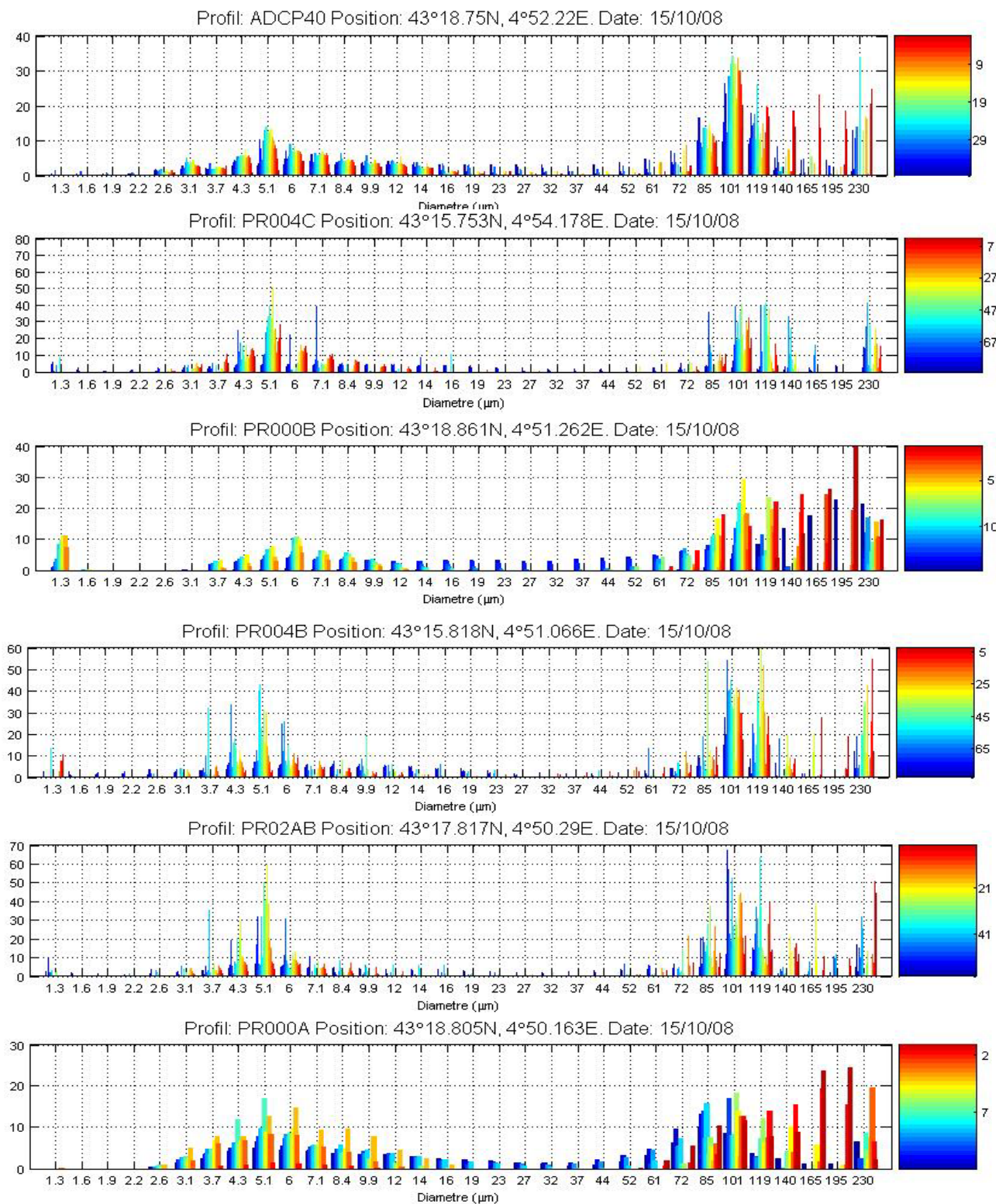
Le panache turbide est très peu visible en surface (moins d'un mètre d'épaisseur selon la **Figure 4.17**) mais reste présent proche de l'embouchure avec une concentration atteignant  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ , soit inférieure d'un facteur deux à celle observée durant les deux campagnes hivernales. La fraction granulométrique de surface reste grossière et supérieure au diamètre  $165 \mu\text{m}$  dans 90 % des cas. La répartition granulométrique reste unimodale grossière dans toute la colonne d'eau (**Figure 4.16**). La proportion de MES dont la taille est inférieure à  $100 \mu\text{m}$  est infime. Les particules retrouvées sur les filtres des bouteilles de prélèvement n'ont pas été insonifiées, ne nous permettant pas de conclure explicitement sur les sédiments en présence ou de discuter de leur classe granulométrique élémentaire qui semble être sableuse ( $> 63 \mu\text{m}$ ).

Les profils présentent des pics granulométriques entre 5 et  $7 \mu\text{m}$  (bleu clair) au niveau de la BNL (**Figure 4.16**). En revanche, le nuage turbide situé au niveau de la thermocline (**Figure 4.17**) est confirmé par des excès d' $\text{O}_2$  dissous et des pics de D50 allant jusqu'à  $250 \mu\text{m}$ . Les valeurs importantes de D50 (entre 150 et  $250 \mu\text{m}$ ) suivent la distribution des potentiels organismes vivants alors que l'isobathe 40 m marque la chute du D50 en dessous de  $10 \mu\text{m}$ . La BNL, d'une dizaine de mètres d'épaisseur et dont la CSS est comprise entre 1 et  $2 \text{ mg.L}^{-1}$ , est principalement constituée de fines particules dont le D50 est inférieure à  $10 \mu\text{m}$ , contrairement aux résultats de la campagne CARMEX où elle est constituée de sédiments dont le diamètre est compris entre 50 et  $100 \mu\text{m}$ , notamment à l'ouest de l'embouchure.

#### 4.2.2.2. Analyse du second leg : descente de la thermocline

Le second leg a été mené 5 jours après le premier et comporte trois stations de plus. Les profils granulométriques et hydrologiques sont tout à fait différents. Même si les températures sont pratiquement identiques et dépassent  $19^\circ\text{C}$  en surface, et que la salinité reste à peu près la même, la lentille d'eau douce superficielle et le panache turbide paraissent moins prononcés (**Figure 4.20**). La salinité de surface ne descend qu'à 33 PSU contre 15 PSU cinq jours plus tôt et le plume rhodanien présente une concentration en MES maximale de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  (**Figure 4.20**) contre  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  durant le premier leg. Ces résultats témoignent de la diminution des apports rhodaniens entre le 10 octobre et le 15 octobre 2008.

La thermocline est toujours très présente mais s'est enfoncée de 20 m pour osciller à 40-50 m de profondeur (**Figure 4.20**). La courbe d' $\text{O}_2$  dissous la suit (**Figure 4.21**), conformément au premier leg avec un pic de valeurs atteignant respectivement  $6.75 \text{ mL.L}^{-1}$  contre  $5 \text{ mL.L}^{-1}$ . Les quantités d' $\text{O}_2$  dissous sont proches de  $5.5 \text{ mL.L}^{-1}$  dans le reste de la colonne d'eau et diminuent franchement vers le fond. L'activité phytoplanctonique semblerait à écarter en raison de la profondeur, bien supérieure à celle de la zone photique, et l'hypothèse de la couche d'eau météorique fraîche pourrait être à privilégier au vu de la légère dessalure à cette profondeur. Néanmoins, la formule de Benson et Krause (1984) tend à confirmer une production de dioxygène par des organismes vivants puisqu'il aurait une sursaturation en  $\text{O}_2$  dissous de 122 à 127 % selon les stations à cette profondeur.



**Figure 4.19 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil du second leg de la campagne EXTREMA2. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface.**

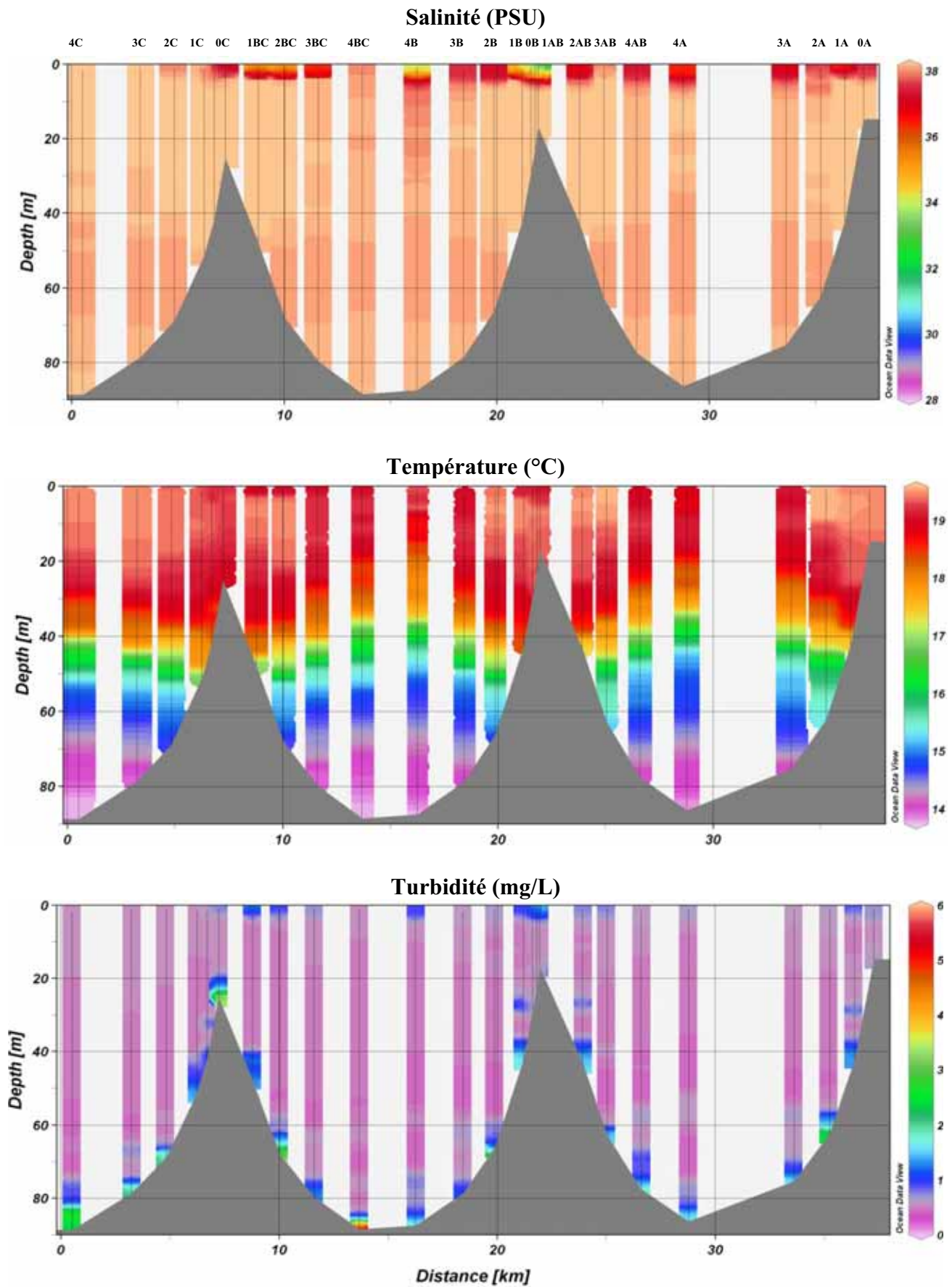


Figure 4.20 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA2 le 15 octobre 2008 : la salinité (en PSU), la température (en °C) et la turbidité mesurée avec le transmissomètre (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ).



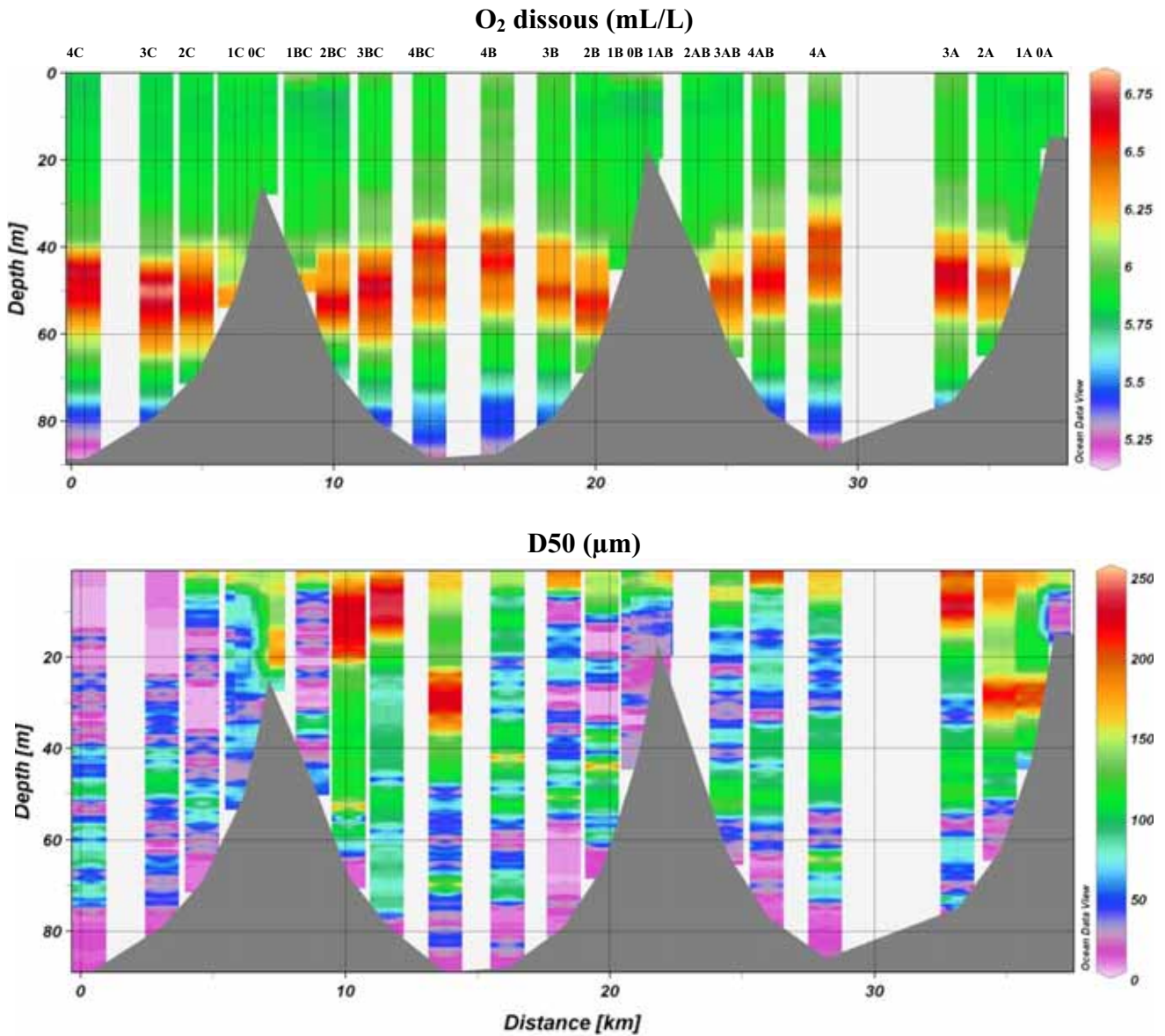


Figure 4.21 : Succession des profils hydrologiques à l'embouchure du Rhône lors de la mission EXTREMA2 le 15 octobre 2008 : l'oxygène dissous (en mL.L<sup>-1</sup>) et le diamètre médian des MES ou D50 (en µm).

La thermocline semble également soulignée par un D50 important à la même profondeur (130 µm) mais les pics de D50 se trouvent plutôt entre 15 et 25 m de profondeur où ses valeurs atteignent 250 µm au droit et à l'ouest de l'embouchure vers le large (Figure 4.21). La partie orientale de l'embouchure ne comporte pas de particules en suspension de forts diamètres depuis la surface jusqu'au fond (entre 1.3 et 50 µm).

La BNL, tout comme la SNL, semble très peu développée : une épaisseur inférieure à 10 m, une CSS comprise entre 2 et 3 mg.L<sup>-1</sup> et des valeurs médianes (ou D50) de près de 5 µm. L'observation paraît suivre une période de calme et d'absence de turbulence. Le D50 diminue toujours fortement dès l'isobathe 60 m.

L'analyse des caractéristiques granulométriques (Figure 4.19) montre que le contexte est totalement différent du premier leg puisque la distribution se trouve être franchement bimodale, voire trimodale, sur toutes les stations. Le mode superficiel est toujours très grossier avec une valeur approchant 170 µm alors que les particules en suspension près du fond sont réparties en deux modes : l'un à 5 µm et l'autre à 100 µm environ.

### 4.2.3. Devenir des particules à l'embouchure : exemple d'EXTREMA2

L'intérêt du travail mené dans cette partie repose sur le suivi du devenir des particules venues du Rhône, auxquelles sont potentiellement associés des contaminants radioactifs. En effet, déterminer l'importance de la floculation et la proportion de particules fines floculées à l'embouchure du Rhône permettrait de mieux connaître les processus de dépôts des radioéléments et de les quantifier plus précisément. George et al. (2007) rappellent à juste titre la capacité d'adsorption des sédiments fins en suspension et leur rôle dans le transfert des radionucléides vers la mer ouverte. Leur étude du plateau continental adriatique a permis de mettre en évidence l'effet de la floculation sur la chute de particules fines associées à des polluants.

L'expérience CARMEX a permis de montrer l'impact de la floculation sur le comportement des particules à l'embouchure du Rhône. Il aurait été intéressant de mesurer la radioactivité ou la teneur en métaux de ces flocs afin de pouvoir conclure sur l'effet indirect de la floculation sur les dépôts de contaminants sur le prodelta.

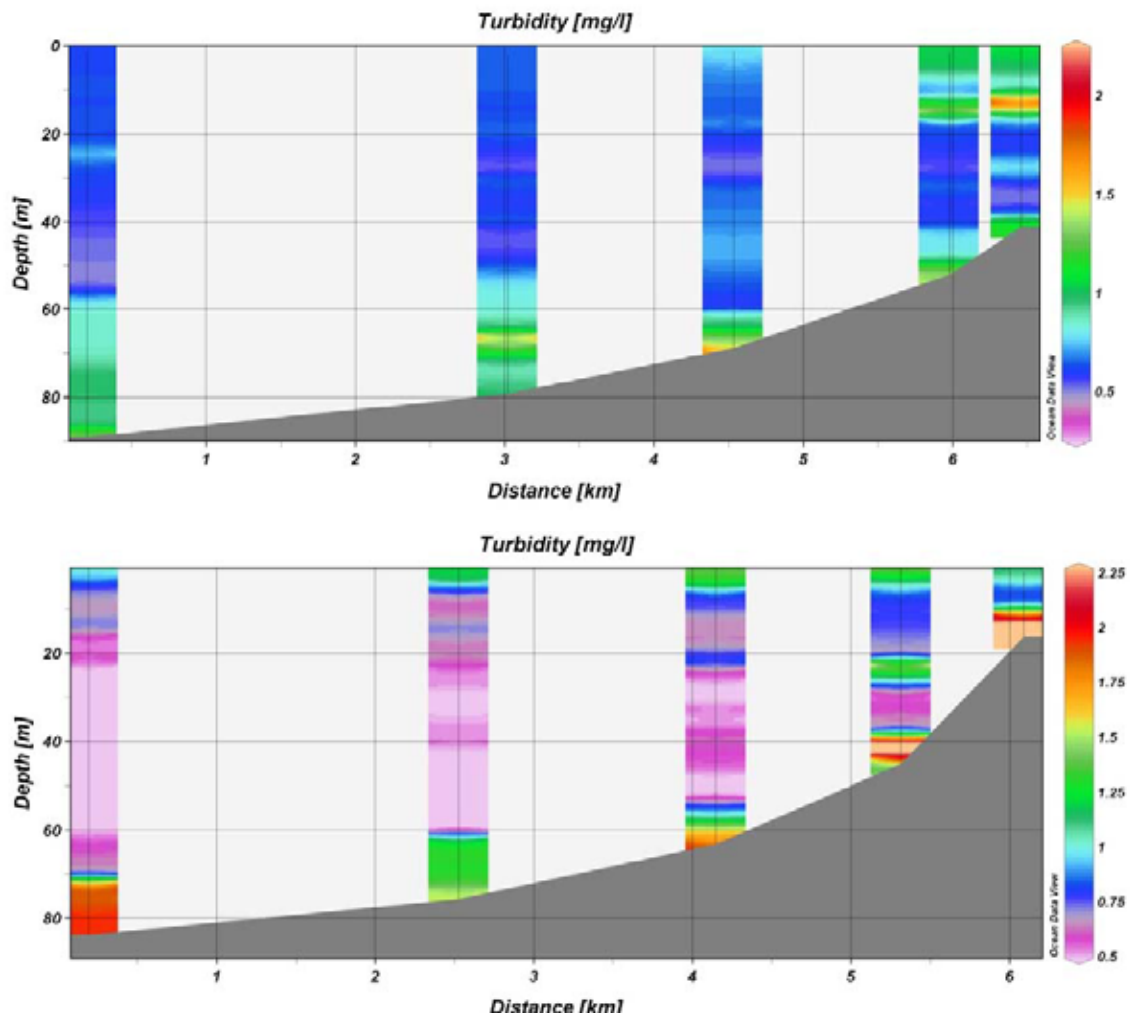
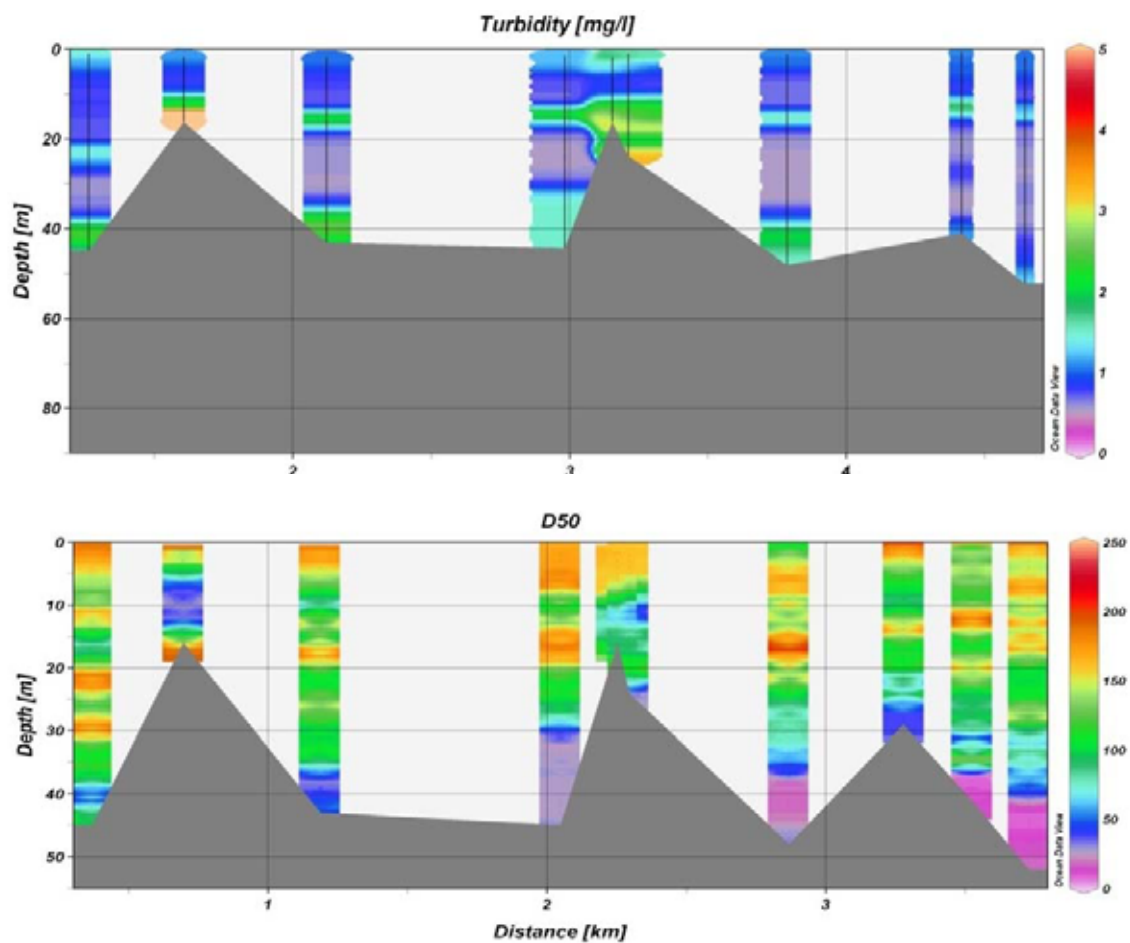


Figure 4.22 : Mesures de turbidité (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ) sur des coupes radiales de l'embouchure depuis le large vers le continent : en haut, le transect le plus à l'est, et en bas, le transect le plus à l'ouest (premier leg de la campagne EXTREMA2).

Malheureusement, ils se trouvent à l'état d'ultra-traces dans l'environnement marin et leurs extractions nécessitent de très grandes quantités de MES et d'eau à filtrer. Néanmoins, il ne fait aucun doute que le panache turbide est composé à plus de 90 % de floculats de particules fines révélées après passage aux ultra-sons. La décantation

progressive de la SNL dans la colonne d'eau favorise l'alimentation de la BNL en particules, initiée lors de l'affrontement entre les masses d'eaux douces et salées à l'embouchure du delta.

La **Figure 4.22** montre l'étendue du panache de surface au large vers l'ouest de l'embouchure (plus de 7 km) le 10 octobre 2008, alors qu'il s'arrête à 2 km dans la partie est. Cette situation est conforme aux clichés satellitaires et aux images aériennes qui lui attribuent deux orientations préférentielles : plein sud lorsque le Mistral se manifeste et ouest-sud-ouest voire pleinement sud-ouest en présence de vent marin venant de l'est. En période sans vent, son orientation reste SW en raison de la circulation générale. La SNL et la BNL apparaissent respectivement bien en surface et au fond, mais il y a une couche turbide à plus de  $2 \text{ mg.L}^{-1}$  autour de 20 m de profondeur qui s'étend apparemment sur la thermocline. Cette couche originaire du Rhône est décrite par Aloisi (1986) comme un néphéloïde intermédiaire initié par les apports du fleuve mais alimenté par la SNL à l'embouchure. La thermocline constitue donc une barrière physico-chimique pour la matière minérale et pour la matière organique comme le phytoplancton.



**Figure 4.23 : Mesures de turbidité (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ) et de D50 (en  $\mu\text{m}$ ) sur un transect tangent à l'embouchure du Rhône lors du premier leg de la campagne EXTREMA2.**

La turbidité recommence à diminuer lorsque les particules ont franchi la thermocline. Certaines ont été consommées par le zooplancton, les autres chutent et se déflocculent pour nourrir la BNL (**Figure 4.23**). Ces profils de turbidité et de D50 tangents à l'embouchure présentent la concentration et la granulométrie des MES au sortir du fleuve. Les 3 néphéloïdes sont mis en évidence sur les profils de turbidité en haut, alors que seuls les SNL et le néphéloïdes intermédiaires se distinguent en bas avec des valeurs de diamètre médian supérieures à  $150 \mu\text{m}$ .

La BNL ressort également de l'image par un D50 uniformément inférieur à  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  et est délimitée de la colonne d'eau sus-jacente par une frontière à environ 35 m de profondeur.

Le néphéloïde de surface est plus étendu que le néphéloïde de fond mais ne présente pas de concentrations aussi importantes puisqu'elles restent assez constantes spatialement entre 1 et  $2.5 \text{ mg.L}^{-1}$  alors que la BNL est très chargée à la proche embouchure avec une CSS dépassant  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  et présente une CSS uniforme sur le reste du prodelta d'une valeur moyenne de  $2 \text{ mg.L}^{-1}$  (Figure 4.24).

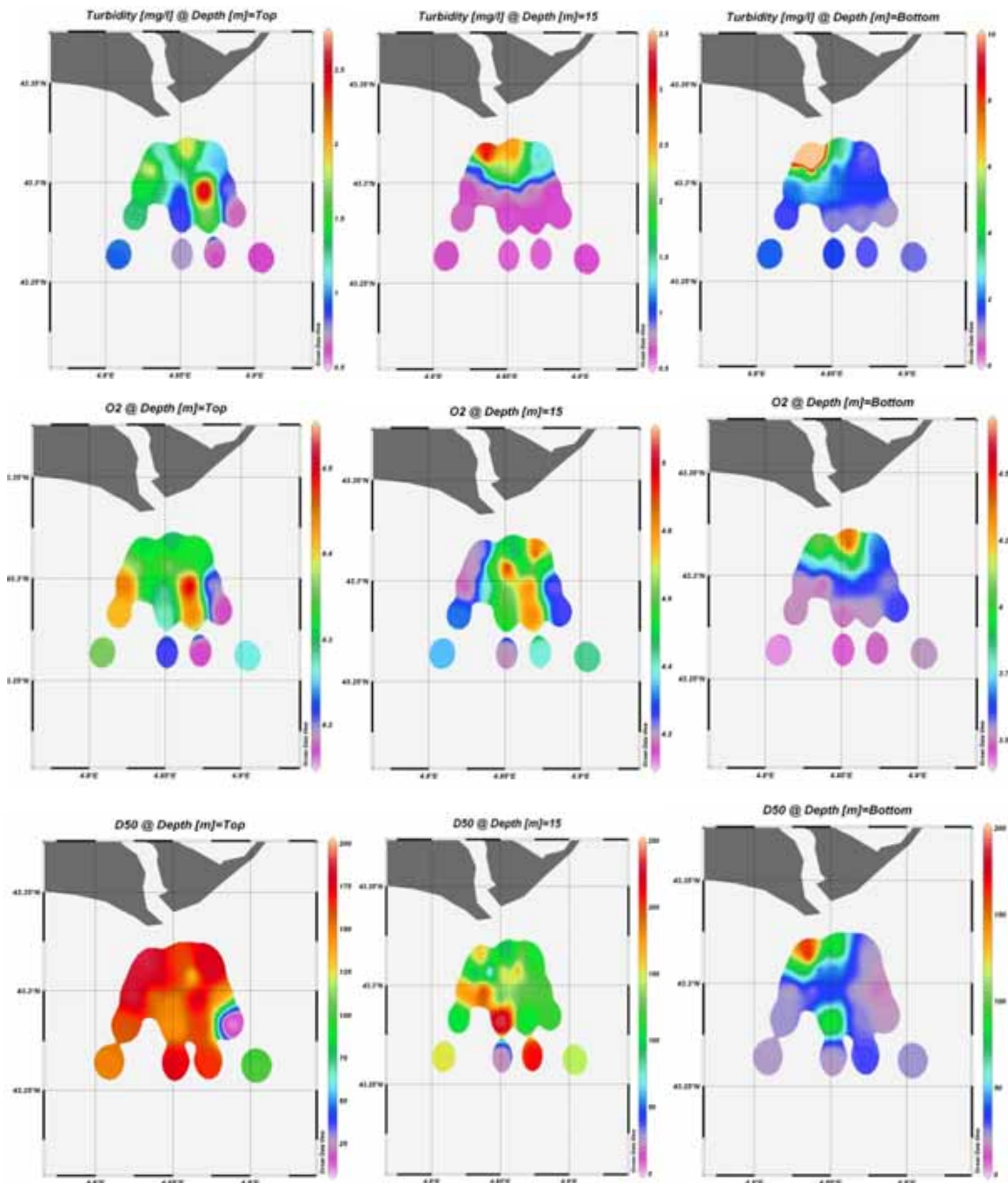


Figure 4.24 : Mesures en surface, à 15 m de profondeur et au fond de la turbidité (en  $\text{mg.L}^{-1}$ ), de la teneur en  $\text{O}_2$  dissous (en  $\text{mL.L}^{-1}$ ) et du D50 (en  $\mu\text{m}$ ) à toutes les stations du premier leg de la campagne EXTREMA2.

La lentille turbide observée à 15-20 m de profondeur révèle des concentrations supérieures à la SNL mais de moindre étendue. Ce résultat montrerait que ce néphéloïde intermédiaire bénéficie de la décantation des particules en suspension dans la plume de surface, qui nourrit lui-même la BNL. La présence d'organismes au niveau de la

thermocline, révélée par une production supérieure d'O<sub>2</sub> dissous à 15-20 m de profondeur qu'en surface, contribuerait à l'agrégation et au maintien des sédiments en suspension à l'état de floculats (**Figure 4.24**). Les teneurs significatives d'O<sub>2</sub> dissous au fond des stations les plus proches de l'embouchure sont expliquées par la profondeur de la zone photique.

Le panache de surface est constitué de particules ou d'associations de particules dont le D50 est compris entre 140 et 200 µm, quelle que soit la turbidité enregistrée (**Figure 4.24**). Cette granulométrie chute à 110 µm au niveau de la thermocline avec des pics de diamètre supérieurs aux valeurs maximales de surface (> 200 µm). Elle devient inférieure voire très inférieure à 30 µm au fond, sauf au-dessus de l'isobathe 30 m où elle dépasse 80 µm.

Les particules superficielles en suspension à l'embouchure du Rhône paraissent défloculer lors de leur décantation dans la colonne d'eau. Leur diamètre diminue d'un facteur 10 à 50 en arrivant dans le néphéloïde de fond. Elles ne sédimentent évidemment pas verticalement à l'aplomb de leur position en surface car elles sont soumises aux courants et turbulences, mais leur taille et leur nature (leur charge en matière organique, leur qualité) leur confèrent une certaine vitesse de chute qui entraîne leur dépôt sur le prodelta. Cette dernière peut être entravée par un dépassement de la concentration critique ou de forts niveaux de turbulence (Dufois, 2008). Il aurait d'ailleurs été intéressant de mesurer le courant dans la colonne d'eau afin d'évaluer les niveaux de turbulence durant la chute des particules observées.

Les contaminants associés aux particules fines en suspension chutent et sédimentent précocement en s'assemblant sous la forme de floes. Ils sont alors retrouvés dans des zones de dépôts préférentiels où l'hydrodynamique et les conditions physico-chimiques sont les plus favorables à la sédimentation.

Les campagnes CARMEX, EXTREMA1 et EXTREMA2 ont permis de suivre ponctuellement les processus de transport du sédiment liés aux conditions physico-chimiques du milieu sur deux saisons particulières : le début de l'automne (2008) et la fin de l'hiver (2007 et 2008). Les analyses granulométriques in situ et en laboratoire des MES prélevées en 14 stations différentes de l'embouchure du Rhône ont mis en évidence les phénomènes de floculation et agrégation, et permettraient de déterminer les néphéloïdes et le rôle qu'ils jouent dans le transfert des sédiments depuis leur source fluviale.

L'activité biologique a été soulignée par la fluorimétrie et la teneur en O<sub>2</sub> dissous pour expliquer la présence de matériel grossier au niveau de la thermocline sans que n'apparaisse de couche turbide. Des phénomènes de défloculation semblent avoir lieu dans la colonne d'eau pour expliquer la différence de granulométrie entre la surface et le fond, mais leur origine reste encore peu comprise. Certains ouvrages font particulièrement état de processus mécaniques de fragmentation des floculats. Il est néanmoins certain que des processus physico-chimiques de l'eau faisant intervenir la pression, les concentrations et les forces ioniques peuvent fractionner et dissoudre les liaisons entre les particules.

Le comportement des apports particuliers à l'embouchure du Rhône ayant été dressé ponctuellement, l'étude de l'hydrodynamique sédimentaire suivie durant plusieurs mois va permettre de déterminer l'impact de facteurs physiques comme la houle et les courants sur le transport et la remobilisation des sédiments rhodaniens. Les phénomènes de crues et de tempêtes seront développés pour caractériser les phases de dépôts et d'érosion événementielles.

### 4.3. Impact des courants et des vagues sur la dynamique sédimentaire

Le suivi de l'hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône a été effectué pendant deux périodes hivernales 2006-2007 et 2008-2009. Les campagnes d'instrumentation et d'observation s'inscrivent dans deux projets, à savoir CARMA et EXTREMA, qui ont pour but principal de suivre l'impact d'événements extrêmes comme les crues et les tempêtes sur le comportement des sédiments et des polluants associés à l'embouchure du Rhône.

Le projet initial CARMA (hiver 2006-2007) était bâti autour de la mise en place de courantomètres à effet Doppler (ADCP) au droit de l'embouchure du Rhône et d'altimètres sur le prodelta et dans le fleuve. Cette instrumentation devait permettre d'obtenir simultanément des mesures sur l'intensité et la direction des courants, des vagues, la charge particulaire en suspension et les dépôts sédimentaires. La saison hivernale a été privilégiée afin d'augmenter la probabilité d'enregistrer des paramètres durant des périodes de crue et de tempêtes. Malheureusement, l'ADCP installé à 40 m de profondeur a été perdu et deux altimètres mouillés sur le prodelta ont été chalutés. Les résultats obtenus ci-après proviennent d'un ADCP et d'un altimètre situés sur le prodelta, à 20 m de profondeur au niveau de la bouée Roustan Est. Le suivi à moyen terme de l'évolution du lit sédimentaire permet d'évaluer qualitativement l'impact des facteurs environnementaux et quantitativement la contribution des apports rhodaniens.

Un second ADCP a été installé en automne-hiver 2008 à 20 m de profondeur à l'embouchure du Rhône dans le cadre du projet EXTREMA qui a pu suivre une crue d'une intensité de près de  $3300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (**Annexe C**).

L'engraissement sédimentaire du fond du prodelta provient de la sédimentation des particules de différentes tailles issues principalement du Rhône. Il est fort probable que leur vitesse de chute augmente lorsqu'elles sont sous la forme de floculats, comme le suggèrent les résultats obtenus et ceux des différentes études menées sur le Pô (Milligan et al., 2007 ; Fox et al., 2004).

La remise en suspension des sédiments de fond dépend de leur cohésion, de leur état de compaction et de la tension critique d'érosion appliquée par la houle et le courant. Ces paramètres diffèrent avec la profondeur et la distance à la source de MES, c'est-à-dire selon la zone d'action des vagues et les taux de sédimentation. Des valeurs de tension critique d'érosion et de flux d'érosion ont été évaluées à l'embouchure du Rhône durant la campagne EXTREMA1 au moyen d'un canal à courant érodométrique, appelé « Erodimètre », développé et prêté par l'IFREMER.

#### 4.3.1. Erodabilité des sédiments du prodelta

Des prélèvements de sédiments ont été effectués en 4 stations : trois au droit de l'embouchure du Rhône, ADCP20 à 20 m de profondeur, ADCP40 à 40 m de profondeur, correspondant aux localisations d'installation des ADCP et altimètre, et ERO60 à 60 m de profondeur, et une quatrième à l'est du prodelta, Balancelle à 20 m de profondeur (**Figure 4.25**). Le canal à courant, embarqué sur le navire océanographique L'Europe, a été utilisé à quai car très sensible au moindre mouvement du bateau. Ainsi, toute perturbation de la mesure a pu être évitée.

Trois horizons sédimentaires ont été étudiés pour chaque prélèvement en vue d'évaluer l'impact de la compaction sur la cohésion du substrat : la surface, les niveaux -4 cm et -8 cm.

Chacun d'entre eux a été l'objet d'analyses sédimentologiques et granulométriques (**Tableau 4.1**) visant à déterminer leur concentration massique (densité sèche), leur fraction vaseuse (pourcentage de vase) et leurs tailles de grains (D50 entre autres).

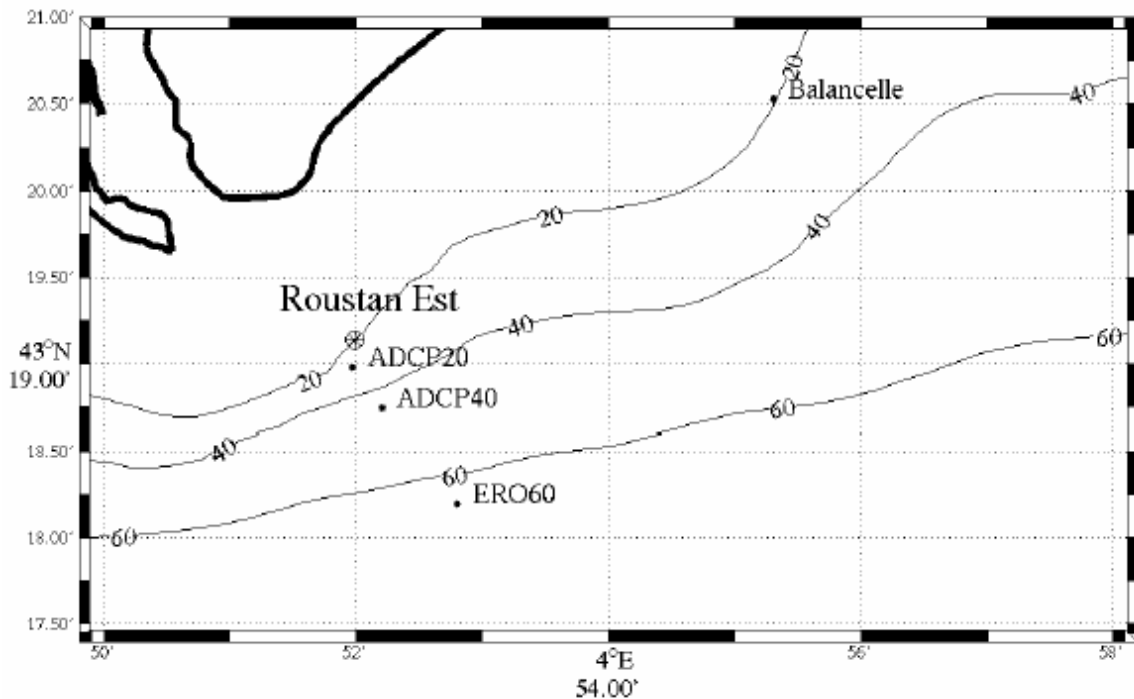


Figure 4.25 : Carte de localisation des prélèvements sédimentaires destinés aux analyses érodométriques.

	ADCP20			ADCP40			ERO60			Balancelle		
	C (kg/m <sup>3</sup> )	% vase	D50 (µm)	C (kg/m <sup>3</sup> )	% vase	D50 (µm)	C (kg/m <sup>3</sup> )	% vase	D50 (µm)	C (kg/m <sup>3</sup> )	% vase	D50 (µm)
Surface	930	58.6	45.7	590	82.8	18.1	N.D	87.5	13.7	919	59.1	38.7
s - 4 cm	1057	59.4	36.7	723	77.9	21.1	794	88.9	11.8	1104	85.3	9.1
s - 8 cm	X	X	X	X	X	X	898	86.5	12.7	X	X	X

Tableau 4.1 : Concentration massique du sédiment, fraction vaseuse volumique et diamètre médian aux points de prélèvement. *N.D = Non Déterminé. X = non réalisé (Dufois, 2008).*

#### 4.3.1.1. Flux d'érosion

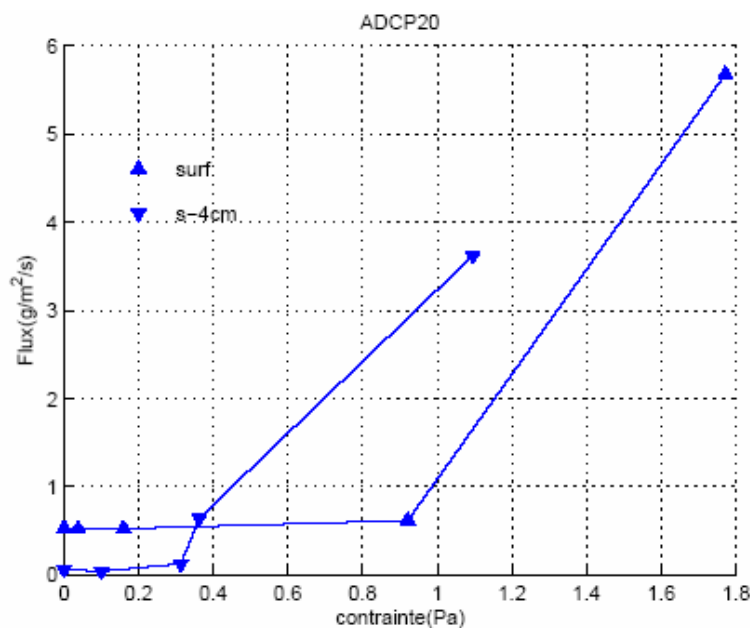
Ils sont calculés en se basant sur la variation de concentration de MES dans l'eau du canal à courant érodométrique entre le début et la fin du palier de contrainte. L'opération prend fin lorsque le milieu est trop turbide et/ou lorsque l'érosion crée un relief susceptible de modifier la contrainte de cisaillement. Exprimés en  $g.m^{-2}.s^{-1}$ , ils représentent la quantité de matière traversant la section de l'érodimètre par unité de temps. La **Figure 4.26** les présente en fonction de la contrainte de cisaillement au fond déduite de la calibration du débit.

Il apparaît que les résultats diffèrent entre les stations, notamment entre la station ADCP20 et les autres qui ne se situent pas à la même échelle puisqu'un facteur 10 les sépare tant au niveau des contraintes de cisaillement qu'à celui des flux d'érosion.

Le niveau superficiel de la station ADCP20 a connu une remise en suspension immédiate à la mise en eau du canal, ce qui explique que les premières valeurs de flux ne sont pas nulles et que le niveau s-4 s'érode plus tôt

(premier palier plus court). Les contraintes de cisaillement au fond entraînant les premiers flux d'érosion sont situées entre 0.3 et 0.9 Pa. Les autres stations accusent à peu près les mêmes chiffres pour l'horizon superficiel mais les valeurs atteignent 5 à 8 Pa pour les sédiments situés entre 4 et 8 cm sous la surface. Il existe une grande différence de consistance entre les sédiments des stations en présence.

Les sédiments de ADCP20 et Balancelle, stations pourtant à la même profondeur et donc subissant le même impact de remobilisation des houles, ne suivent pas les mêmes évolutions. Cela s'explique par le fait que la station Balancelle est moins touchée par les apports du Rhône qu'ADCP20. En outre, le D50 de Balancelle est bien plus faible que celui d'ADCP20, surtout pour s-4 qui est évalué respectivement à 9.1 μm et 36.7 μm. L'un est classé comme silt fin et l'autre comme silt grossier. La taille du grain élémentaire, sa minéralogie et sa cristallographie confèrent au sédiment des capacités de cohésion et de compaction très variables.



**Figure 4.26 : Flux d'érosion en g.m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> en fonction des contraintes de cisaillement pour le prélèvement à la station ADCP20.**

Le peu de variation entre les courbes des niveaux s-4 et s-8 de la station ERO60 laisse penser que la compaction entraîne les mêmes effets sur les contraintes de cisaillement à partir d'une certaine profondeur, d'autant que les diamètres médians du sédiment sont quasi-identiques (11.8 et 12.7 μm).

Dufois (2008) a calculé la concentration relative de vase  $C_{v,rel}$  correspondant à la concentration de la vase dans le volume non occupé par les grains de sable et qui semblerait être un paramètre pertinent de l'état de consolidation du sédiment :

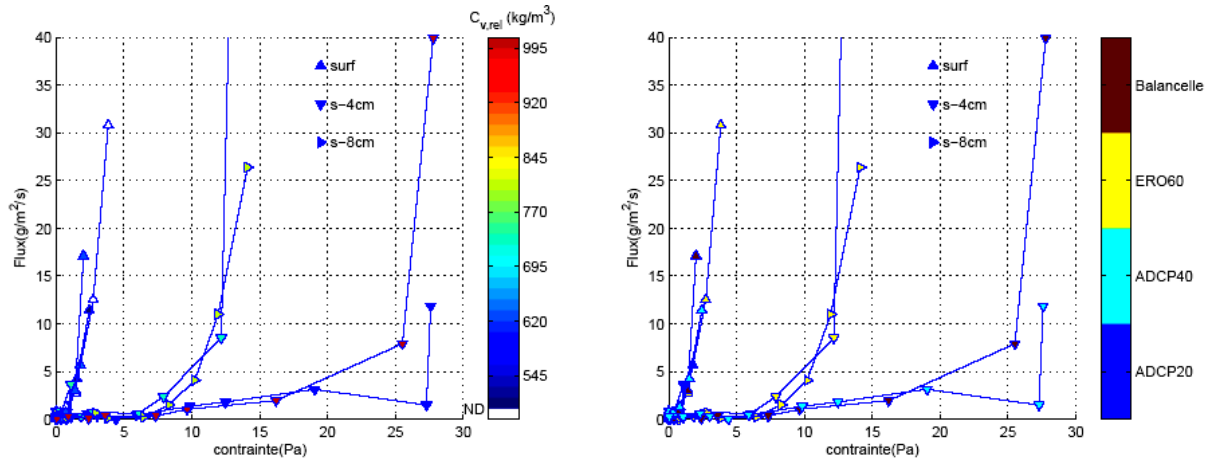
$$C_{v,rel} = \frac{f_v C}{1 - \frac{(1-f_v)C}{\rho_s}}$$

avec C la concentration massique du sédiment,  $f_v$  la fraction massique vaseuse et  $\rho_s$  la densité sèche du sable et des vases (2650 kg.m<sup>-3</sup>). Les fractions massique et volumique sont supposées équivalentes pour le calcul de  $C_{v,rel}$  (Tableau 4.2).



	ADCP20	ADCP40	ERO60	Balancelle
surf	637	508	<i>N.D.</i>	632
s-4cm	749	599	730	1003
s-8cm			814	

**Tableau 4.2 : Concentration relative de vase  $C_{v,rel}$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). *N.D.* = *Non Déterminé*. *Vides* = *non réalisé* (Dufois, 2008).**



**Figure 4.27 : Flux d'érosion pour l'ensemble des prélèvements effectués en fonction de la concentration relative de vase et de la position (Dufois, 2008).**

La **Figure 4.27** reprend les flux d'érosion mesurés par l'érodimètre en fonction des contraintes de cisaillement (**Figure 4.26**) auxquels sont ajoutées les données de concentration relative d'une part et les positions d'autre part. Il en ressort que les prélèvements de surface dont les  $C_{v,rel}$  sont faibles présentent des courbes d'évolution de flux similaires. Concernant les niveaux sédimentaires profonds, à savoir ERO60 s-4, ERO60 s-8, ADCP s-4 et Balancelle s-4, les flux d'érosion semblent retardés et les contraintes appliquées sont bien plus fortes que celles des prélèvements de surface. Les niveaux sédimentaires profonds apparaissent comme étant bien plus consolidés que ceux de surface, sauf ADCP40 s-4 dont l'état de consolidation s'apparenterait à celui de l'interface. Dufois (2008) souligne cependant qu'il est important de prendre les mesures en profondeur avec délicatesse car la mesure est moins fiable lorsque la résistance à l'érosion est forte. En outre, le découpage des tranches peut également modifier l'état de compaction du sédiment et biaiser la mesure.

#### 4.3.1.2. Contraintes critiques d'érosion

Par définition, la contrainte critique d'érosion correspond au seuil de contrainte de cisaillement de fond à partir duquel l'érosion du substrat sédimentaire est entamée. Différents travaux précédents menés sur le prodelta du Rhône et dans le Golfe du Lion proposent des résultats très inégaux. El Ganaoui et al. (2004) développent un protocole expérimental basé sur un modèle multi-classes pour déterminer les flux et les contraintes d'érosion au niveau du prodelta. Ils différencient la couche turbide superficielle, à laquelle ils attribuent une contrainte critique d'érosion  $\tau_c$  comprise entre  $0.025 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  (ou Pa) et  $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ , du sédiment plus cohésif pour lequel ils calculèrent une contrainte  $\tau_c$  atteignant  $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Lansard et al. (2006) évaluèrent  $\tau_c$  entre  $0.068 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  et  $0.087 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  pour les sédiments du prodelta rhodanien. Schaaff et al. (2006) estimèrent cette contrainte entre  $0.02 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  et  $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  dans le Golfe de Fos. Le plateau du Golfe du Lion accuse quant à lui des contraintes critiques

d'érosion entre 0.016 et 0.069 N.m<sup>-2</sup> (Schaaff et al., 2002). Les variations dans les résultats proviennent en partie de l'évaluation du début de la séquence d'érosion.

Trois méthodes de détermination de  $\tau_c$  sont comparées par Dufois (2008) : la méthode visuelle qui consiste à observer le seuil de remise en resuspension des sédiments (obscurcissement du canal), la méthode de suivi de la concentration en MES dans le système pour laquelle une pente de turbidité est calculée, et enfin la méthode posant pour hypothèse que le flux d'érosion est proportionnel à l'excès de contrainte ( $\tau_c$  lue sur l'axe des abscisses) appliquant la « loi de Partheniades ». Cette dernière méthode permet objectivement et numériquement de calculer  $\tau_c$  grâce à une régression linéaire des courbes  $E = f(\tau)$ .

Le flux d'érosion  $E$  (g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) est déterminé par la relation :

$$E = E_0 \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^\alpha$$

avec  $E_0$  la constante d'érosion (g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>),  $\tau$  la contrainte exercée (N.m<sup>-2</sup>),  $\tau_c$  la contrainte critique de cisaillement (N.m<sup>-2</sup>) et  $\alpha$  la puissance à l'excès de cisaillement. Le **Tableau 4.3** présente les valeurs qui correspondent le mieux aux paramètres précédents après régression linéaire des courbes de la **Figure 4.26**.

	ADCP20	ADCP40	ERO60	Balancelle
surf	$E_0=0.077$ $\tau_c=0.28$ $\alpha=2.61$ $R^2=0.99$	$E_0=0.012$ $\tau_c=0.07$ $\alpha=1.96$ $R^2=1$	$E_0=0.011$ $\tau_c=0.14$ $\alpha=2.42$ $R^2=1$	$E_0=0.08$ $\tau_c=0.38$ $\alpha=3.66$ $R^2=1$
s-4cm	$E_0=2$ $\tau_c=0.31$ $\alpha=0.64$ $R^2=1$	$E_0=0.0019$ $\tau_c=0.28$ $\alpha=1.79$ $R^2=0.56$	$E_0=0.00012$ $\tau_c=0.29$ $\alpha=3.03$ $R^2=0.98$	$E_0=6.10^{-5}$ $\tau_c=0.31$ $\alpha=2.68$ $R^2=0.99$
s-8cm			$E_0=9.10^{-7}$ $\tau_c=0.12$ $\alpha=3.56$ $R^2=0.96$	

**Tableau 4.3 : Paramètres de la loi d'érosion déterminés pour chacune des expériences (Dufois, 2008).**

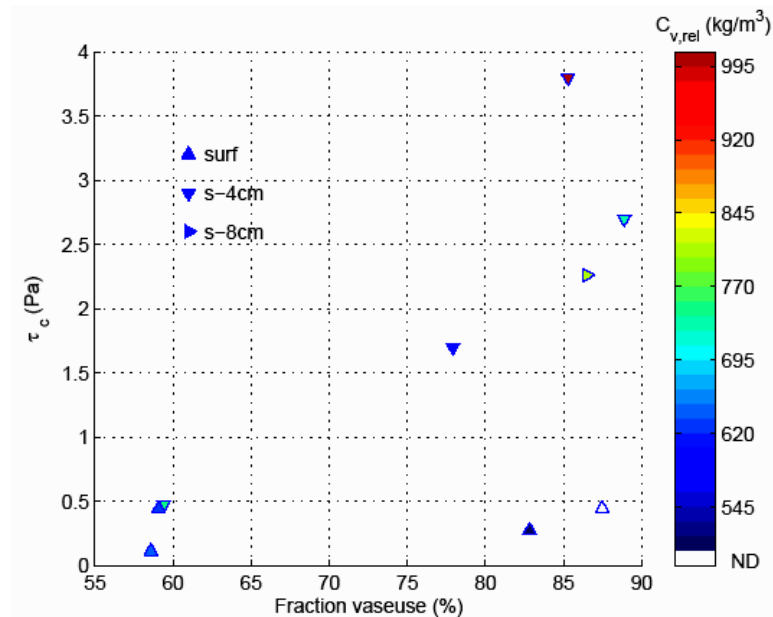
Les deux autres méthodes donnent des résultats différents (**Tableau 4.4**). Il faut préciser que  $\tau_{c1}$  est le résultat de la méthode numérique,  $\tau_{c2}$  celui de la méthode purement visuelle et  $\tau_{c3}$  celui défini en analysant les courbes de flux d'érosion et de concentration en MES.

	ADCP20	ADCP40	ERO60	Balancelle
surf	$\tau_{c1}=0.28$ $\tau_{c2}=0.11$ $\tau_{c3}=N.D.$	$\tau_{c1}=0.07$ $\tau_{c2}=0.05$ $\tau_{c3}=0.27$	$\tau_{c1}=0.14$ $\tau_{c2}=0.21$ $\tau_{c3}=0.44$	$\tau_{c1}=0.38$ $\tau_{c2}=0.44$ $\tau_{c3}=0.44$
s-4cm	$\tau_{c1}=0.31$ $\tau_{c2}=0.21$ $\tau_{c3}=0.47$	$\tau_{c1}=0.28$ $\tau_{c2}=3.2$ $\tau_{c3}=1.7$	$\tau_{c1}=0.29$ $\tau_{c2}=2.7$ $\tau_{c3}=2.7$	$\tau_{c1}=0.31$ $\tau_{c2}=1.49$ $\tau_{c3}=3.8$
s-8cm			$\tau_{c1}=0.12$ $\tau_{c2}=N.D.$ $\tau_{c3}=2.26$	

**Tableau 4.4 : Contraintes critiques d'érosion  $\tau_c$  (N.m<sup>-2</sup>) évaluées avec les trois méthodes différentes (Dufois, 2008).**

Il apparaît que  $\tau_{c1}$  sous-estime la valeur de  $\tau_c$  particulièrement pour les couches sous la surface (**Tableau 4.4**). Les valeurs de  $\tau_{c2}$  et  $\tau_{c3}$  semblent assez proches quelle que soit la profondeur de sédiment observée, sauf pour la surface de la station ADCP40 où on note une différence d'un facteur proche de 5, contre un facteur atteignant 2 tout au plus dans les autres cas. Les tensions critiques de surface sont difficiles à évaluer car il se crée une légère couche turbide (« fluffy layer ») dès la mise en eau du canal et la détection du seuil reste très vague.

Les résultats du calcul de la contrainte critique d'érosion concluent sur des valeurs comprises entre  $0.11 \text{ N.m}^{-2}$  et  $0.44 \text{ N.m}^{-2}$ , c'est-à-dire près de 5 fois supérieures à celles établies par Lansard et al. (2006). Leurs calculs se porteraient apparemment davantage sur la «fluffy layer» plutôt que sur le sédiment dans son ensemble.

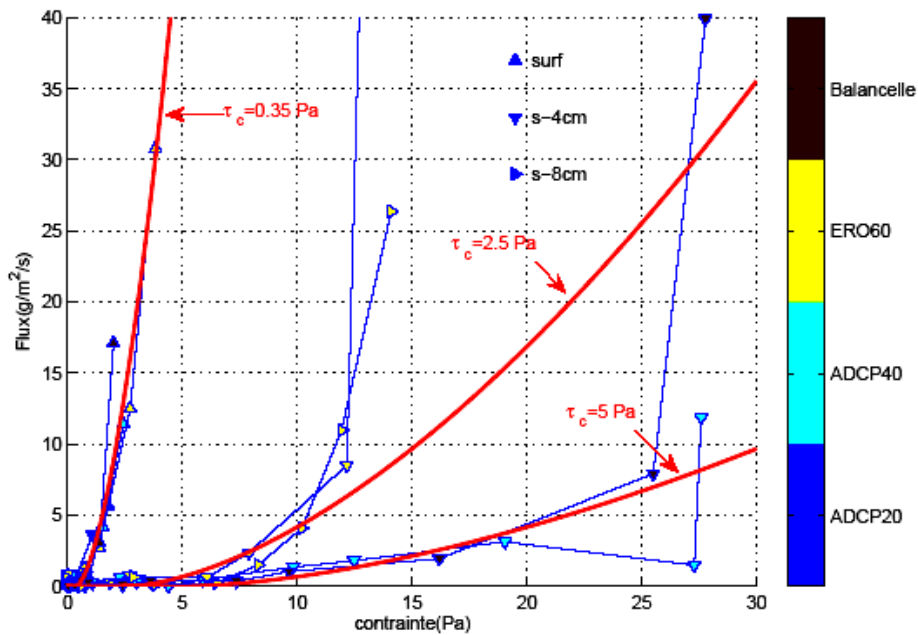


**Figure 4.28 : Tension critique d'érosion en fonction de la fraction vaseuse (%) et de la concentration relative de vase  $C_{v,rel}$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) (Dufois, 2008).**

La contrainte d'érosion semble peu dépendante de l'état de consolidation de la vase lorsque la fraction vaseuse est inférieure à 60 % (**Figure 4.28**). En revanche, l'augmentation de la contrainte critique d'érosion paraît assez bien corrélée avec l'augmentation de  $C_{v,rel}$  pour des fractions vaseuses supérieures à 60 %. Les sédiments du prodelta rhodanien semblent se comporter comme des sédiments non-cohésifs pour les fractions vaseuses inférieures à 60 % puisque la contrainte critique d'érosion ne paraît pas liée à l'état de compaction du mélange. La résistance du sédiment à l'érosion est d'autant plus forte que la concentration relative en vase et l'état de compaction sont forts lorsque la fraction vaseuse est supérieure à 60 %. Finalement, les paramètres de la loi d'érosion ont été revisités pour obtenir une formule de flux d'érosion optimale :

$$E = E_0 \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^\alpha$$

avec  $E_0 = 0.68 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ,  $\tau_c = 0.35 \text{ N.m}^{-2}$  et  $\alpha = 1.65$ . Cette régression a été réalisée pour les sédiments de surface en raison de la fiabilité de ce type de mesure. La fonction établie a été tracée pour des valeurs de  $\tau_c$  différentes sur la **Figure 4.29** ( $2.5$  et  $5 \text{ N.m}^{-2}$ ) pour évaluer la qualité de cette fonction pour les mesures aux niveaux inférieurs.



**Figure 4.29 : Flux d'érosion pour l'ensemble des prélèvements et formule de flux proposée pour différentes valeurs de  $\tau_c$  (Dufois, 2008).**

Concernant les niveaux inférieurs, cette fonction s'approche des résultats recueillis pour des flux allant jusqu'à  $10 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  mais elle paraît impossible de retranscrire exactement une  $\tau_c$  représentative en profondeur comme il a été réalisé en surface.

Connaître les tensions critiques d'érosion et leurs flux sédimentaires associés sur le prodelta revêt un intérêt important pour l'étude des radioéléments à l'embouchure du Rhône. Leur remise en suspension s'opère lors d'événements contribuant à augmenter les contraintes de cisaillement au fond et leur transport s'effectue principalement par l'intermédiaire des courants. Le dépôt a lieu lorsque l'effet de l'hydrodynamique est annihilé par la vitesse de chute des particules. Les projets CARMA et EXTREMA avaient pour but le suivi des particules en suspension sur le prodelta et ont indirectement contribué à déterminer le devenir des radioéléments issus du Rhône.

#### 4.3.2. Projet CARMA : suivi de la période hiver – printemps 2006/2007

Le projet CARMA a permis l'installation à l'embouchure du Rhône de deux instruments de mesure à 18 m de profondeur près de la bouée Roustan Est ( $4^{\circ}51.986' \text{ E}$ ,  $43^{\circ}19.936' \text{ N}$ ). Un altimètre acoustique (voir § 3.2.1.) a enregistré l'évolution du lit sédimentaire du 8 novembre 2006 au 23 février 2007 et un ADCP (voir § 3.1.2.), sans module de vagues, a mesuré les courants pendant cette même période mais également entre le 5 avril et le 19 juillet 2007.

Le régime hydrologique du Rhône a été suivi durant l'intégralité du temps d'acquisition par l'intermédiaire des données de débits liquides quotidiens délivrés par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). La station OPERA de l'IRSN en Arles a permis d'obtenir les valeurs de concentration en MES en surface du Grand Rhône.

Les contraintes de cisaillement au fond dues aux vagues  $\tau_w$  et aux courants  $\tau_c$  ont pu être calculées grâce aux équations citées précédemment (voir § 3.1.2.2.3. et § 3.1.2.2.4.). Les contraintes liées au courant ont été définies

grâce aux données de l'ADCP durant la période d'acquisition mais l'appareil ne possédait pas de module de calcul de houle. Les valeurs caractéristiques de houle nécessaires au calcul des contraintes liées aux vagues ont donc été définies par les sorties du modèle SWAN utilisé par Dufois (2008). Ce modèle s'est d'ailleurs révélé très fidèle aux relevés atmosphériques de Météo-France.

La synchronisation des données (**Figures 4.30 et 4.31**) de vent de surface et de vagues recueillies respectivement par les modèles ALADIN et SWAN, de débits du Rhône délivrés par la CNR, de niveau sédimentaire révélées par l'Altus et de courant au fond issus des profils de l'ADCP souligne l'effet des facteurs atmosphériques et hydrologiques sur la dynamique hydrosédimentaire du prodelta, tant en phase de dépôt qu'en phase d'érosion.

#### 4.3.3. Influence des crues sur les apports sédimentaires

Deux épisodes de crue modérée ont été enregistrés par la CNR à Beaucaire les 18 novembre et 9 décembre 2006 avec des débits de respectivement  $3775 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $3520 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . La première (C1) semble d'origine cévenole car toute la partie occidentale du bassin versant du Rhône (la Cèze, le Gard, l'Ardèche) traversant les Cévennes a connu des débits dépassant trois fois le débit seuil de crue. La seconde crue (C2) peut plutôt être qualifiée de généralisée car toute la partie aval du Rhône a subi une augmentation du niveau d'eau du fleuve.

Ces événements de crue ont entraîné des vitesses de courant atteignant  $50 \text{ cm}.\text{s}^{-1}$  dans toute la colonne d'eau, surtout lors de l'épisode de vents de sud-est à plus de  $10 \text{ m}.\text{s}^{-1}$  qui a accompagné C1 et l'épisode de mistral à plus de  $12 \text{ m}.\text{s}^{-1}$  concomitant à C2 (**Figure 4.30**). Un important transport particulaire au fond s'est ainsi mis en place lors de la première crue, avec des vitesses de près de  $50 \text{ cm}.\text{s}^{-1}$  orientées vers le sud-ouest (SW). La turbidité dans la colonne d'eau durant C1 avoisine  $30 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  contre  $20 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  pendant C2 (**Figure 4.31**), mais sa valeur atteint près de  $40 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  au fond durant les deux événements.

Un panache turbide de surface (SNL) d'une concentration de  $30 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  est visible pendant les forts apports particuliers rhodaniens sur le profil de concentration en MES (**Figure 4.31**), même après filtrage de la cellule de l'interface air-eau. En revanche, le néphéloïde de fond (BNL) ne se démarque pas vraiment sur la globalité de la période étudiée, ce qui s'explique par une hauteur de première cellule d'observation de 1.55 m. Cependant, la turbidité moyenne à 1.55 m au-dessus du fond est évaluée à  $5 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$ , comme l'ont confirmé les mesures faites grâce aux sondes de turbidité durant les campagnes océanographiques.

L'évolution de la concentration en MES en Arles est liée aux apports liquides du Rhône et est également synchrone avec la turbidité au fond du prodelta enregistrée par l'ADCP et calibrée par le turbidimètre (**Figure 4.32**). Les événements C1 et C2 ont provoqué des pics de concentration dans le Rhône de respectivement  $190 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  et  $405 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  et de  $38 \text{ mg}.\text{L}^{-1}$  au niveau de l'isobathe 20 m du prodelta. Ce sont ces valeurs extrêmes de charge solide qui empêchent certainement l'enregistrement de valeurs sur le niveau du lit sédimentaire lors des périodes de dépôt ou d'érosion et qui se traduit par des zones vierges sur le profil altimétrique (fin novembre, mi-décembre).

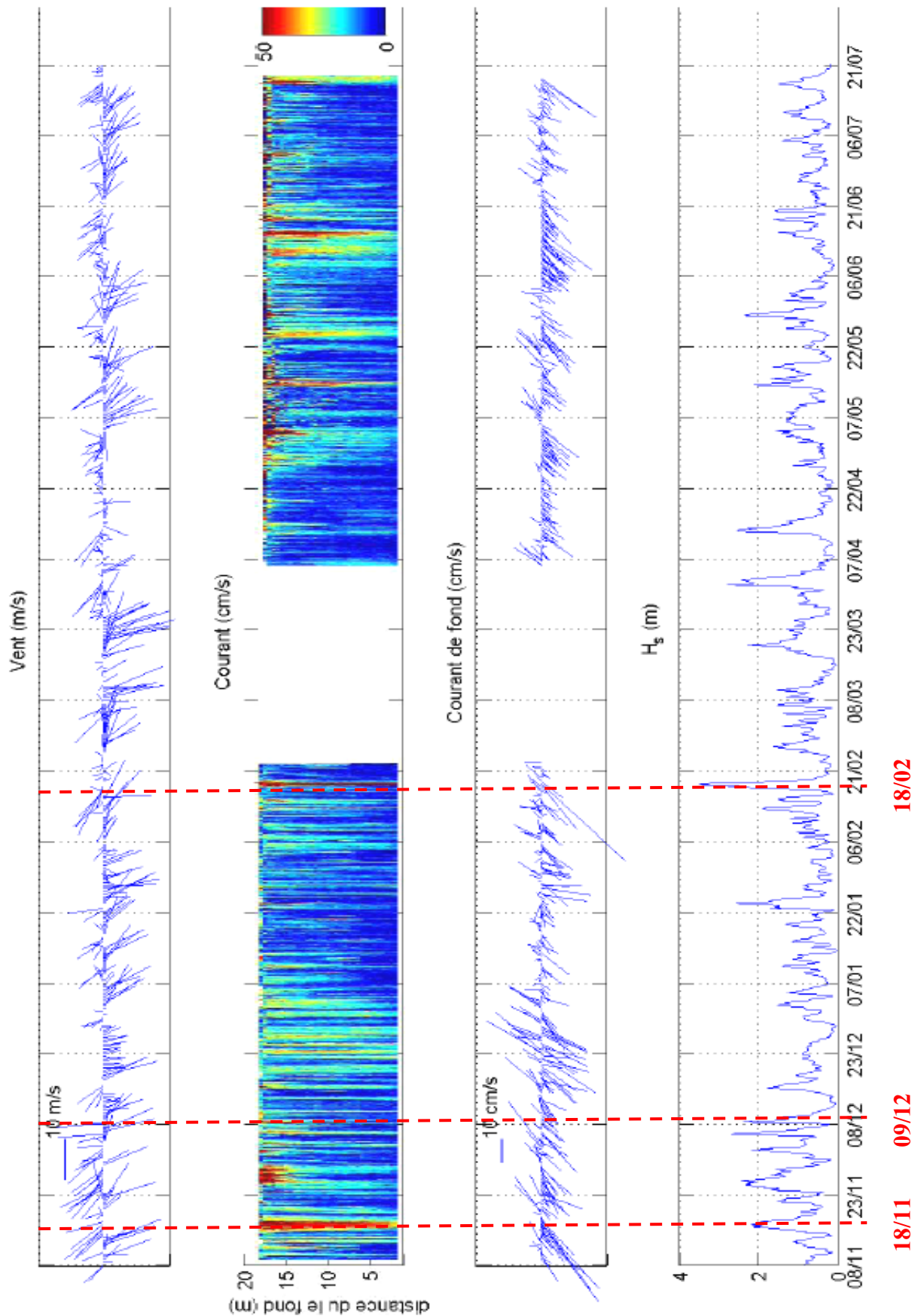


Figure 4.30 : Evolution temporelle du vent (en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), de la vitesse des courants sur la colonne d'eau et au fond (en  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et de la hauteur significative de la houle (en m) pendant l'hiver 2006-2007 (vents de Météo-France Aladin, vagues du modèle SWAN).

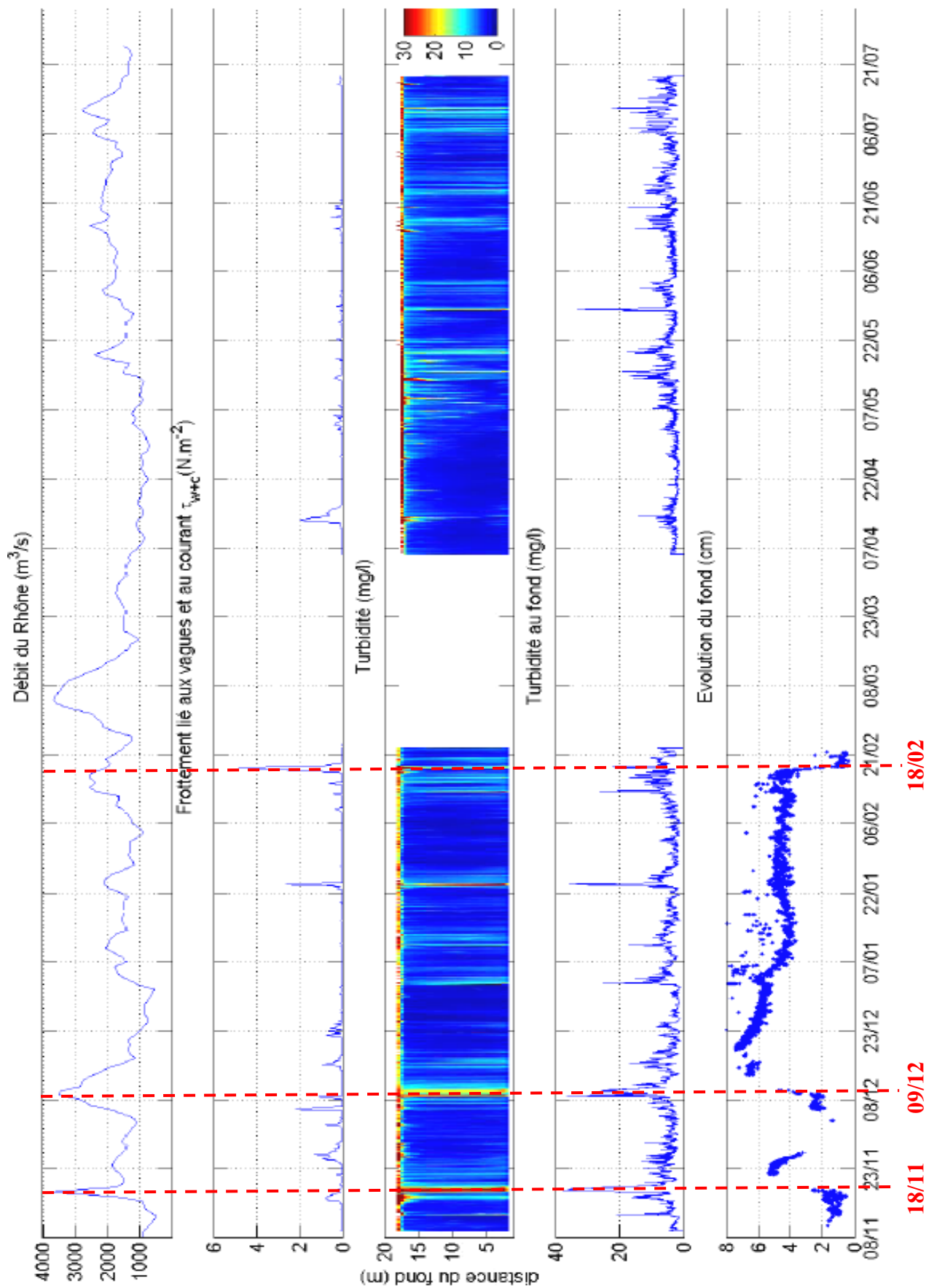
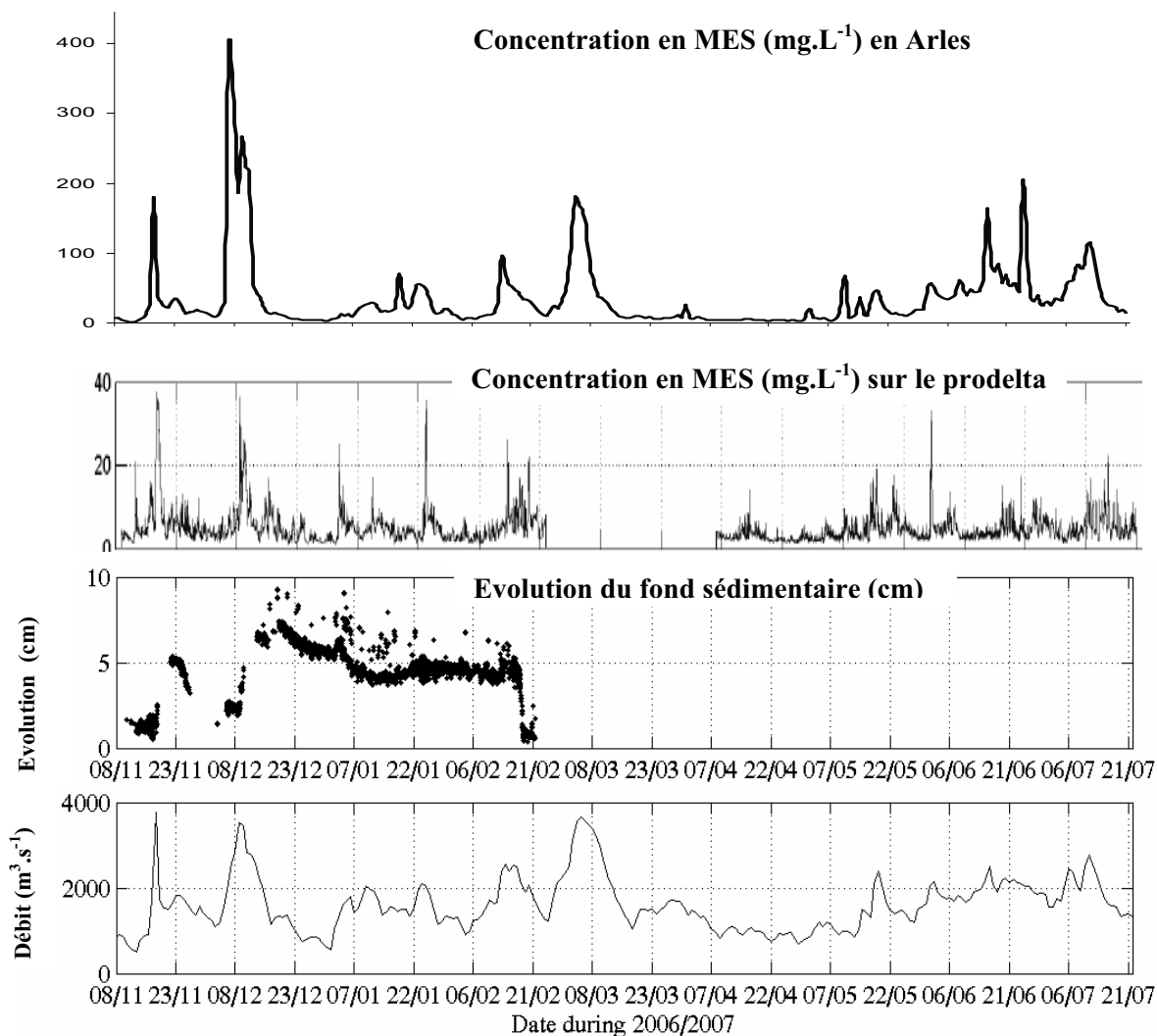


Figure 4.31 : Evolution temporelle du débit du Rhône en Arles (en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), du frottement lié aux vagues et aux courants (en  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ), de la turbidité dans la colonne d'eau et au fond (en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) et du niveau du lit sédimentaire (en cm) pendant l'hiver 2006-2007.

L'impact des crues sur le fond sédimentaire est très net sur la **Figure 4.32**, puisque les événements de forts débits du Rhône C1 et C2 présentent une corrélation parfaite avec le début de la phase d'accrétion. Par ailleurs, les dépôts de sédiments correspondant aux événements C1 et C2 durent chacun 4 jours d'après les relevés altimétriques. La première crue a apporté 4.5 cm de sédiment à l'embouchure contre 5.5 cm environ pour la seconde, soit des taux d'accumulation moyens de respectivement  $1.125 \text{ cm.j}^{-1}$  et  $1.375 \text{ cm.j}^{-1}$ . Même si le débit de C2 est plus faible que celui de C1, la proximité temporelle des deux événements, c'est-à-dire 20 jours, n'a laissé que peu de temps aux sédiments du fond pour se consolider. On peut supposer que C1 a permis une érosion et une remobilisation des sédiments du Rhône ainsi qu'un dépôt temporaire sur le prodelta alors que C2 en a assuré le transport plus massif et le dépôt plus pérenne. La courbe de concentration de MES en Arles (**Figure 4.32**) atteste de la charge supérieure de C2 par rapport à C1 et d'une très probable remise en suspension des sédiments puisqu'elle double entre les deux pics de crue. Une succession de crues semble efficace en ce qui concerne le transport et le dépôt de sédiments sur le prodelta. En revanche, lors de l'expérience SCOPE, Dufois (2008) ne montre pas de dépôt sur le site de La Balancelle situé hors de l'influence rhodanienne.



**Figure 4.32 :** Evolution temporelle de la concentration en MES ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) dans le Rhône et sur le fond du prodelta comparée aux variations temporelles du niveau sédimentaire du prodelta (cm) et du débit du fleuve ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).



Le reste du temps pendant lequel les débits du Rhône ne dépassaient pas  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , le niveau du lit sédimentaire est resté constant ou a baissé. Cette diminution de hauteur du fond sédimentaire pourrait être due à un effet de compaction du sédiment de surface avec l'expulsion de l'eau interstitielle et densification du substrat, prémisses à la diagenèse précoce. Le fond sédimentaire a en effet perdu 3 cm en un mois, soit environ 1 mm par jour. Cette période du 21/12/2006 au 22/01/2007 ne montre pas d'événement extrême particulier, hormis un pic de houle qui n'a pas créé d'érosion absolue du substrat puisque les courants sont quasi-nuls. Le sédiment remis en suspension s'est redéposé au même endroit.

#### 4.3.4. Influence des tempêtes et forts courants sur la remobilisation des sédiments

##### 4.3.4.1. Génération des contraintes de cisaillement

Les phénomènes de houle sont générés principalement par les vents de sud-est (SE) dans ce secteur (**Figure 4.30**). Les vents continentaux (mistral), quant à eux, soufflent régulièrement à plus de  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  vers le large et ont tendance à pousser les masses d'eau du Rhône en surface, provoquant de fortes accélérations superficielles du courant à l'embouchure (**Figure 4.30**). L'influence de la houle peut être ressentie sur les fonds étudiés car la hauteur d'eau reste assez faible (20 m environ). Elle génère des contraintes de cisaillement  $\tau_w$  capables d'éroder les sédiments du fond. Les courants de fond créent aussi des contraintes de cisaillement de fond ( $\tau_c$ ) qui peuvent dépasser la contrainte critique d'érosion  $\tau_{cr}$  de  $0.35 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  (entre  $0.11$  et  $0.44 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ) définie précédemment et donc être susceptibles de remettre des sédiments en suspension. L'événement C1 en atteste sur la **Figure 4.33** où  $\tau_c$  atteint  $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , accompagné d'un pic de turbidité.

De nombreux épisodes de vents de SE d'une vitesse supérieure à  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ont été répertoriés durant la période d'étude et ont induit la formation de vagues dont la hauteur significative  $H_s$  a dépassé plusieurs fois 2 m, voire 3.5 m le 18 février 2007 (**Figure 4.30**). Les vagues ont un impact érosif important qui dépasse celui du courant car les contraintes de cisaillement  $\tau_w$  qu'elles engendrent sont bien plus fortes que  $\tau_c$  et  $\tau_{cr}$  puisqu'elles peuvent atteindre  $5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  (**Figure 4.33**). Les épisodes de vent marin influencent généralement davantage  $\tau_{w+c}$  que le Mistral. Néanmoins, du 24 au 27 janvier 2007, plusieurs jours de fort Mistral ( $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ont initié une contrainte totale de cisaillement au fond  $\tau_{w+c}$  de  $3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  alors que le 18 février 2007, la valeur de  $\tau_{w+c}$  a atteint  $5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  après 3 jours de vents de SE de  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Ces deux événements sont très bien marqués par des turbidités dépassant  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  mais les relevés altimétriques ne dévoilent qu'un impact limité pour le premier événement.

D'autres périodes de vents marins se sont produites, notamment la séquence qui s'est tenue le 13 avril 2007 où  $\tau_{w+c}$  a encore dépassé  $2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ .

La contrainte de cisaillement au fond  $\tau_{w+c}$ , résultant de l'impact des vagues et du courant, est calculée principalement à partir de la houle, de la vitesse au fond et de la cohésion du matériel (Soulsby, 1997). Les contraintes liées aux courants sont bien moins importantes en efficacité – de l'ordre d'un facteur 10 – que les contraintes dues aux vagues. La forte concentration en MES est non seulement due à la resuspension de particules mais également à l'apport concomitant de matières par le fleuve.

#### 4.3.4.2. Chronologie des épisodes érosifs durant l'hiver 2006-2007

Cinq pics de contraintes de cisaillement  $\tau_{w+c}$  supérieurs à  $1 \text{ N.m}^{-2}$  ont été calculés durant la période étudiée, dont quatre dépassant  $2 \text{ N.m}^{-2}$  (**Figure 4.33**).

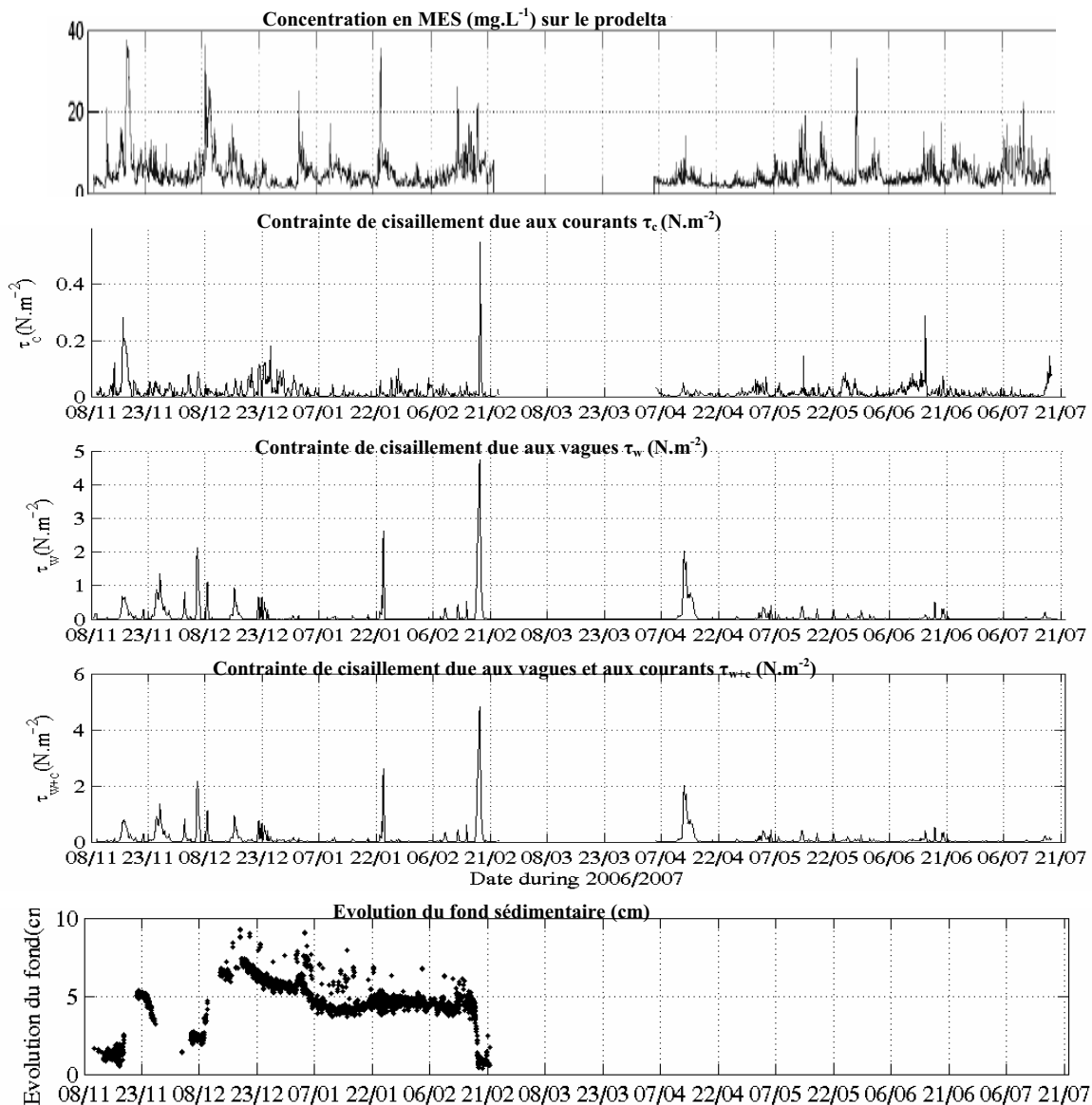
- Le premier est enregistré le 26 novembre, juste après la brutale séquence de dépôt de crue. Il a été évalué à  $1.3 \text{ N.m}^{-2}$  et correspond exactement avec un épisode érosif E1 de 3.5 cm de sédiment. Le fait que les dépôts ne soient pas consolidés a permis un transport par les courants de fond après remise en suspension par les vagues.
- Un second événement atteignant  $2 \text{ N.m}^{-2}$  apparut lors de la crue C2, pendant laquelle les courants initiés par le fleuve étaient moins intenses, expliquant une contrainte  $\tau_c$  ordinaire. Les vagues ont remis les sédiments en suspension alors que les apports de matières venant du fleuve affluaient. La combinaison entre les phases de dépôt et d'érosion s'est finalement conclue par une accrétion. Les courants de fond n'étant pas élevés, le matériel s'est redéposé à peu près au même endroit sans avoir été transféré ailleurs.
- Le troisième pic a mis fin à la phase de tassement du sédiment le 24 janvier 2007 avec une valeur de  $2.7 \text{ N.m}^{-2}$ . La phase de remise en suspension, non accompagnée de courant, a entraîné un nouveau dépôt comportant la même quantité de matière. Une nouvelle compaction commençait à avoir lieu puisque le fond sédimentaire a diminué de 1 cm jusqu'au quatrième pic de  $\tau_{w+c}$ , c'est-à-dire le 18 février 2007 (vitesse de tassement de  $0.5 \text{ mm.j}^{-1}$ ).
- Le quatrième pic correspond à la séquence érosive E2 majeure de la période pendant laquelle 5 cm de sédiment ont été remis en suspension et évacués vers le SW. La valeur de  $\tau_{w+c}$  a dépassé  $5 \text{ N.m}^{-2}$  avec  $\tau_c$  de l'ordre de  $0.6 \text{ N.m}^{-2}$  et  $\tau_w$  approchant  $4.8 \text{ N.m}^{-2}$ . La hauteur de houle a culminé à 3.5 m à ce moment-là et la turbidité approchait  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ .
- Le cinquième pic a eu lieu le 13 avril 2007 avec une valeur de  $2 \text{ N.m}^{-2}$  mais il n'a pas eu d'impact au fond.

Le bilan érosion/dépôt absolu sur la période hivernale 2006-2007 est finalement nul puisque le fond sédimentaire n'a pas bougé entre le 08/11/2006 et le 21/02/2007. Le suivi de la dynamique sédimentaire prodeltaïque n'est pas assez long dans la durée et la surface d'instrumentation n'est pas assez étendue pour pouvoir conclure sur un bilan sédimentaire équilibré de la zone. Néanmoins, cet hiver 2006-2007 peut être considéré comme modéré à l'embouchure du Rhône, sans très forte crue ni tempête extrême, et il peut être intéressant de suivre ce site à plus long terme.

La seconde partie de l'étude, du 5 avril au 22 juillet 2008, ne permet pas d'évaluer l'impact de l'hydrodynamique sur le fond sédimentaire car l'altimètre a été relevé. Même si la colonne d'eau ne présente pas de fortes valeurs de turbidité, la turbidité de surface est témoin d'une forme de panache (**Figure 4.30**).

En outre, les houles générées durant la phase printanière de l'expérience sont très peu énergétiques (une seule générant des valeurs de  $\tau_{w+c}$  au-dessus de  $0.2 \text{ N.m}^{-2}$ ). Un pic de houle à 2.3 m produit le 29 mai 2007 et généré par des vents continentaux semble avoir induit un fort pic de turbidité ( $32 \text{ mg.L}^{-1}$ ) mais pas de forte contrainte  $\tau_{w+c}$ . Il résulte certainement de phénomènes d'advection ou de l'action d'un chalut sur la zone.

Les courants ont une forte influence sur les MES et les contaminants associés, notamment durant les phases d'érosion car ils définissent les flux de particules en suspension et régissent les directions de transport et les lieux de dépôts des sédiments.



**Figure 4.33 : Evolution temporelle des contraintes de cisaillement au fond ( $\text{N.m}^{-2}$  ou Pa)  $\tau_c$  dues aux courants,  $\tau_w$  dues aux vagues et  $\tau_{w+c}$  dues aux courants et vagues mise en relation avec la variation du fond sédimentaire (cm) sur le prodelta.**

#### 4.3.5. Transport et bilan des sédiments à l'embouchure du Rhône

##### 4.3.5.1. Transport des sédiments à l'embouchure

La direction du transport sédimentaire varie beaucoup entre la cellule de surface, qui est très influencée par le vent car à l'interface air-eau, et celles de la colonne d'eau, qui suivent à la spirale d'Ekman forcée par l'effet Coriolis (**Figure 4.34**).

Il s'avère néanmoins que le transport au fond est orienté vers le SW dans plus de 80 % du temps. La direction secondaire du courant est le NE pour moins de 20 % du temps. Elle paraît s'atténuer en descendant dans la colonne d'eau pour s'annihiler totalement au fond.

Le transport est orienté vers le SW à chaque événement extrême, que ce soit pendant les crues ou pendant les tempêtes de SE. Les vitesses au fond atteignent près de  $60 \text{ cm.s}^{-1}$ , notamment lors de très fortes houles. Elles sont comprises entre 10 et  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  la plupart du temps et perdent environ 50 % de leur norme depuis la sub-surface. Les sédiments originaires du Rhône qui ne restent pas sur le prodelta ou qui sont remis en suspension sont transportés en direction du SW, c'est-à-dire vers le plateau continental du Golfe du Lion. Cette capacité de transport est concomitante avec une capacité d'érosion et de remise en suspension intense liées à des houles très énergétiques.

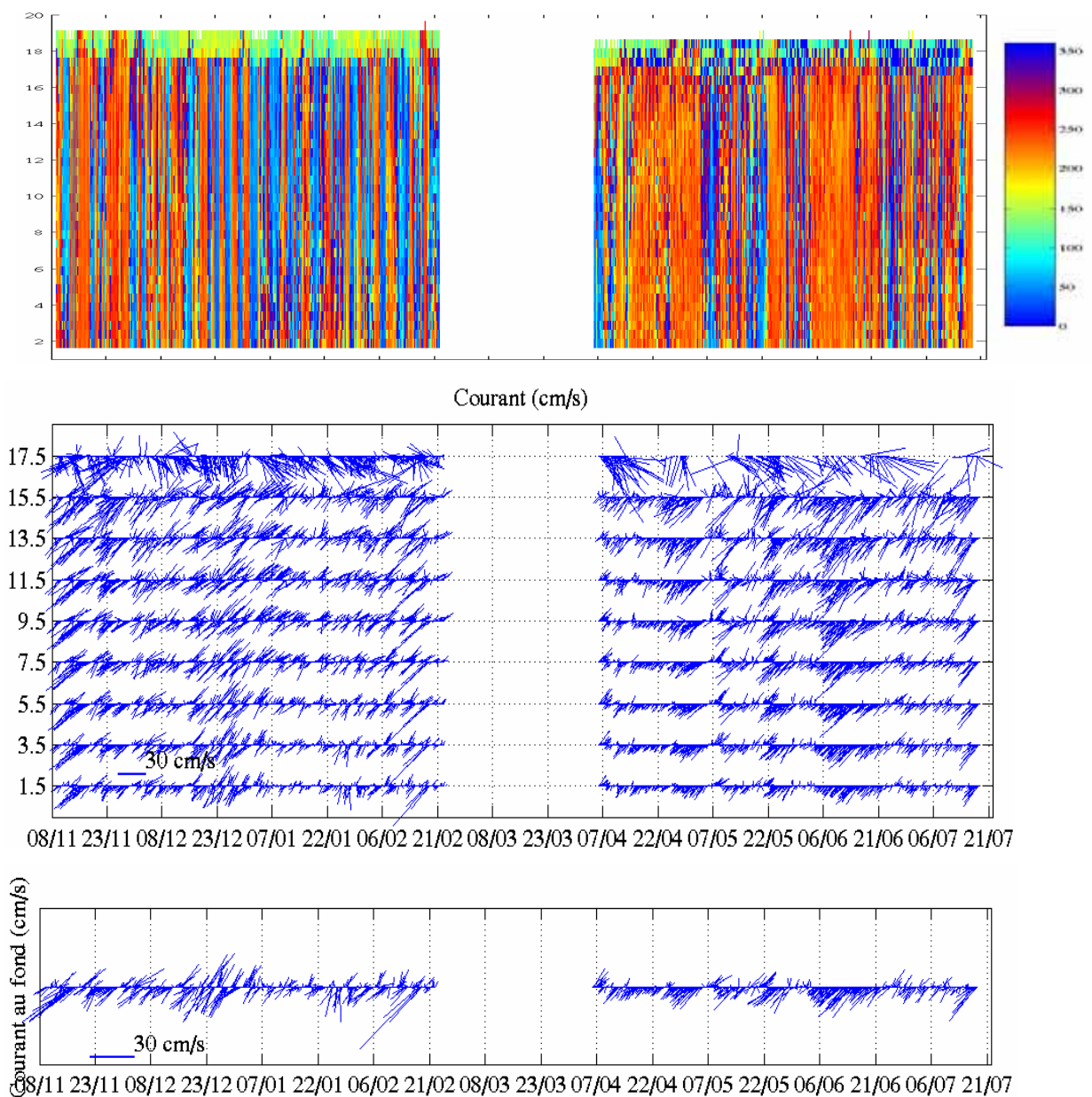


Figure 4.34 : Evolution de la direction du courant dans la colonne d'eau (en haut, relevé ADCP, et au milieu, moyenne des cellules ADCP par 4) et au fond (en bas, première cellule ADCP du fond) durant la période étudiée (du 08/11/06 au 22/07/07).

#### 4.3.5.2. Bilans des sédiments à l'embouchure

Les événements C1 et C2 génèrent des élévations de 4.5 et 5.5 cm de dépôt sédimentaire. Dans l'hypothèse où la sédimentation est uniforme sur une zone de 30 km<sup>2</sup> proche de l'embouchure et en tenant compte des paramètres sédimentologiques recueillis lors de la mission CARMEX au niveau de la station Roustan Est, à savoir un ratio moyen poids frais sur poids sec  $P_f/P_s$  de 2.8 sur les 5 premiers cm, un poids sec moyen  $P_s$  de 200 g et une masse volumique moyenne de sédiment sec  $\rho_s$  de 3.55 kg.L<sup>-1</sup> (ou 3550 kg.m<sup>-3</sup>), les apports des crues s'élèveraient respectivement à 4.77 et 5.83 GT de matière, soit 10.6 GT pour les crues de fin d'année.

Cependant, la surface de dépôt de sédiments post-crue paraît vraiment excessive, car elle couvrirait une zone de 3 km de part et d'autre de l'embouchure jusqu'à l'isobathe 70 m, tout comme la quantité de sédiments qui équivaut à 1000 fois les apports annuels du Rhône. En outre, de telles épaisseurs de sédiment n'atteignent pas ces profondeurs sur un épisode de crue. Il est néanmoins possible de calculer la surface de répartition S (km<sup>2</sup>) des sédiments de crue en évaluant le flux F de matières issu du Rhône (T.j<sup>-1</sup>) :

$$F = Q \cdot C,$$

avec C la concentration en MES (mg.L<sup>-1</sup>) et Q le débit du fleuve (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) mesurés en Arles et présentés sur la **Figure 4.32**. Les apports de matière A (T) sont calculables grâce à la relation :

$$A = F \cdot t,$$

avec t la durée de la crue (j), et le volume de sédiment frais V (m<sup>3</sup>) apporté à l'embouchure s'écrit en fonction de la masse volumique du sédiment frais  $\rho_f$  (kg.m<sup>-3</sup>) et les apports A (T), tel que :

$$V = \rho_f \cdot A$$

Enfin, la surface effective de dépôt S (m<sup>2</sup>) représente le rapport du volume de matière V<sub>h</sub> par la hauteur de sédiment retrouvée à l'embouchure h (m), soit 0.045 m pour C1 ou 0.055 m pour C2. La relation devient :

$$S = \frac{A \cdot \rho_f}{h}$$

Le calcul de la masse volumique du sédiment frais  $\rho_f$  fait intervenir la masse de sédiment frais lors du prélèvement  $P_f$  (g) et le volume du sédiment frais  $V_f$  (m<sup>3</sup>) déterminé à partir des volumes de l'eau  $V_e$  et du sédiment sec  $V_s$ . Les équations deviennent :

$$\rho_f = \frac{P_f}{V_f} \quad \text{et} \quad P_f = 2.8 P_s,$$

avec  $V_f = V_{\text{eau}} + V_s$  et  $V_s = \frac{P_s}{\rho_s}$  ainsi que  $V_e = \frac{P_e}{\rho_e}$  avec  $\rho_e = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ .

La masse volumique de sédiment frais  $\rho_f$  a donc pour valeur moyenne 1345.18 kg.m<sup>-3</sup>. Les aires de dépôts S du **Tableau 4.5** ont été calculées au moyen de cette valeur.

Le caractère temporel limitant l'épisode de crue pose également problème. Il peut s'agir du pic (méthode M1), de la période pendant laquelle le débit s'est maintenu à  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (méthode M2), la période durant laquelle la concentration en MES a été supérieure aux valeurs moyennes annuelles du fleuve à savoir  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (méthode M3) ou les 4 jours suivant le pic de crue (méthode M4). Ces méthodes sont comparées pour donner un ordre quantitatif des apports sédimentaires du Rhône durant ces deux événements. D'autre part, Maillet (2005) et Ulses (2005) estiment que 90 % des sédiments sont stockés sur le front deltaïque et que 10 % sont transférés vers le Golfe du Lion.

Méthodes	M1 (kT)		Aire de dépôt (km <sup>2</sup> )	M2 (kT)		Aire de dépôt (km <sup>2</sup> )	M3 (kT)		Aire de dépôt (km <sup>2</sup> )	M4 (kT)		Aire de dépôt (km <sup>2</sup> )	
	Zone	Total		Prodelta	Total		Prodelta	Total		Prodelta	Total		Prodelta
Crue C1		52,520	47,268	1,413	54,31	48,879	1,461	61,660	55,494	1,659	64,470	58,023	1,734
Crue C2		49,970	44,973	1,344	121,33	109,197	3,264	397,210	357,489	10,685	218,300	196,470	5,872

**Tableau 4.5 : Evaluation des apports des 2 événements de crues C1 et C2 à la mer ouverte, sur le prodelta et estimation de la superficie de la zone de dépôt.**

La méthode M3 semble d'ores et déjà inadéquate puisqu'elle ne reflète pas la conséquence d'un événement extrême, surtout pour le cas C2 pendant lequel la concentration en MES s'est maintenue au-dessus de  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  pendant plus d'une vingtaine de jours. Ce ne fut pas le cas pour la crue C1 qui mérite son nom de crue éclair puisqu'elle a mobilisé de grandes quantités de sédiment pendant 3 jours exactement.

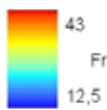
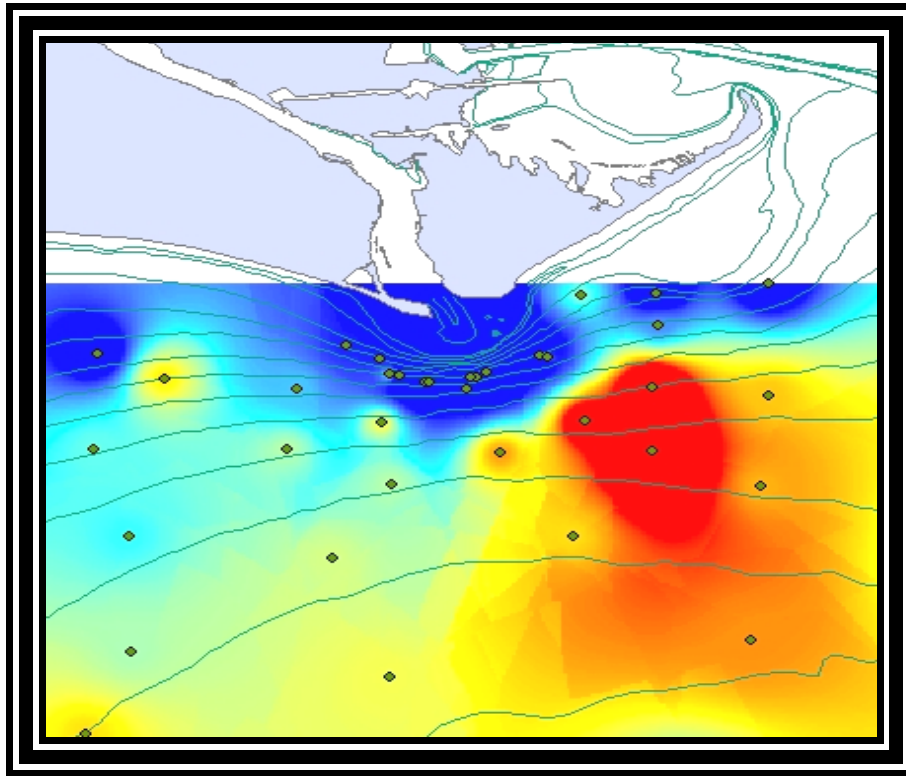
La période de crue du Rhône a duré 36 h pour la crue C1 et 72 h pour la crue C2, d'après une analyse fine des enregistrements de débit. La méthode M4 paraît proposer un éventail temporel trop large pour évaluer la quantité de matières apportées. La méthode M1 semble montrer l'effet inverse en négligeant la durée de la crue, ce qui biaise les résultats de la crue C2 qui aurait fourni moins de matériel terrigène que la crue C1 (44 973 T contre 47 268 T).

La méthode M2 apparaît comme étant la plus recevable et estime l'apport des crues C1 et C2 au prodelta à respectivement 48 879 T et 109 197 T. Les surfaces des zones de dépôt de sédiments de respectivement 4.5 km<sup>2</sup> et 5.5 km<sup>2</sup> issues des crues sont évaluées à 1.461 km<sup>2</sup> et 3.264 km<sup>2</sup>, sous hypothèse d'une accumulation uniforme.

## 4.4. Variabilité spatiale de la distribution des sédiments

### 4.4.1. Répartition des sédiments sur le prodelta

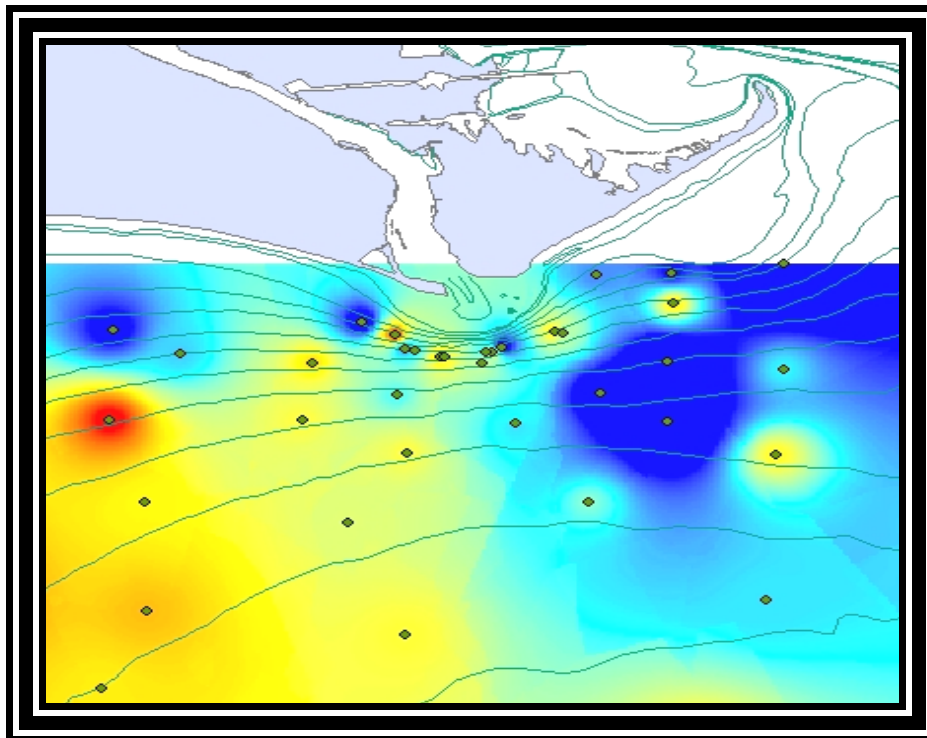
L'embouchure du Rhône suit globalement la disposition sédimentaire de la plateforme continentale du Golfe du Lion avec une zone infralittorale où la fraction sableuse est importante : de 0 à 20 m de profondeur de part et d'autre du débouché, et jusqu'à 50 m de profondeur au droit de l'embouchure (**Figure 4.37**). La proportion de sable atteint 34 % à son maximum contre des valeurs atteignant 98 % dans certaines zones internes du Golfe du Lion. Elle est complétée par au moins 50 % de silts et 12.5 % d'argiles (**Figures 4.35 et 4.36**).



Fraction argileuse superficielle (en %)

0 5 10 km

Figure 4.35 : Distribution spatiale de la fraction argileuse de surface (0-1 cm) sur le prodelta rhodanien (campagnes REMORA 1 & 2 et CARMEX).



Fraction silteuse superficielle (en %)

0 5 10 km

Figure 4.36 : Distribution spatiale de la fraction silteuse de surface (0-1 cm) sur le prodelta rhodanien (campagnes REMORA 1 & 2 et CARMEX).

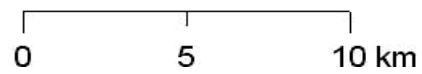
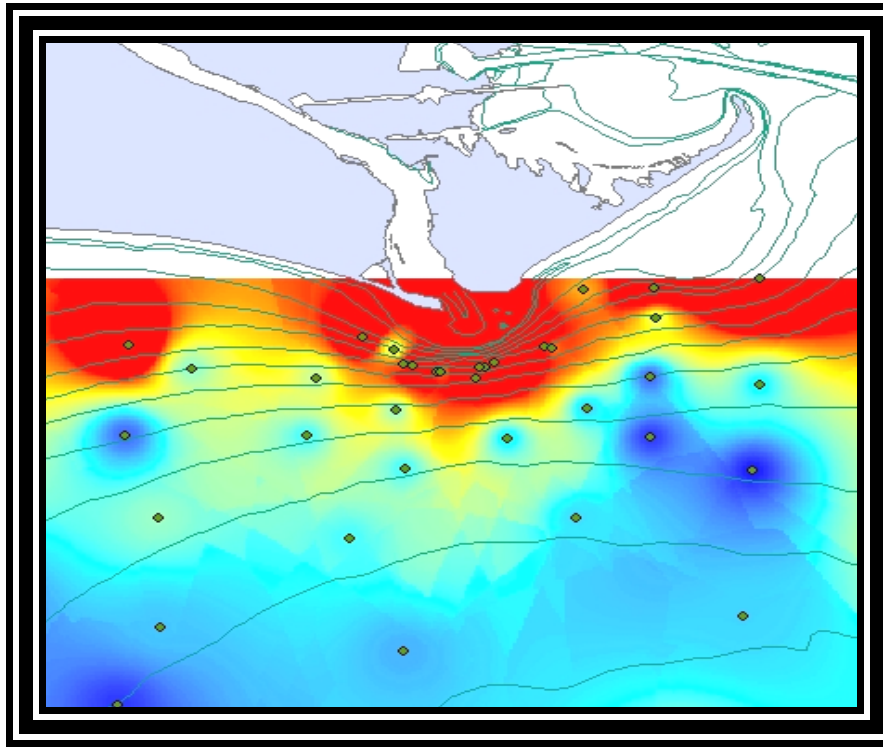


Figure 4.37 : Distribution spatiale de la fraction sableuse de surface (0-1 cm) sur le prodelta rhodanien (campagnes REMORA 1 & 2 et CARMEX).

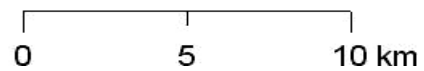
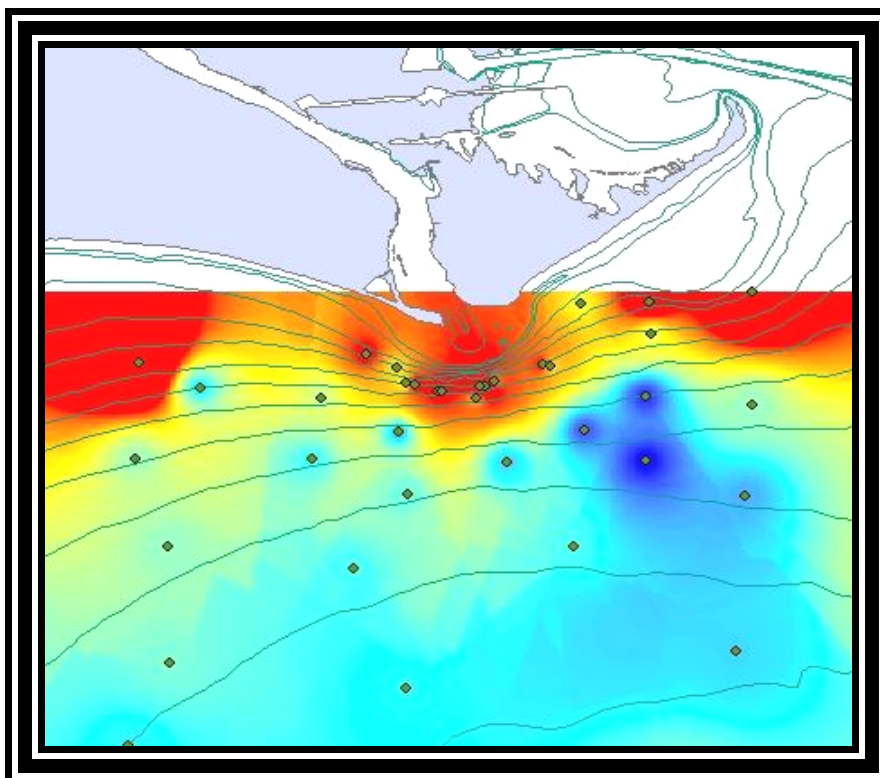


Figure 4.38 : Distribution spatiale du diamètre médian de surface (0-1 cm) sur le prodelta rhodanien (campagnes REMORA 1 & 2 et CARMEX).



Les données granulométriques issues des campagnes REMORA1, REMORA2 et CARMEX, qui se répartissent sur la surface du prodelta entre 20 m et 75 m de profondeur, montrent que les sédiments pélitiques de la couche superficielle 0-1 cm (62.5 % au minimum) dominent largement la zone et que le substrat est principalement cohésif puisque la limite entre les domaines cohésif et non-cohésif, évaluée à 30 % de vase, est largement dépassée.

En outre, les silts et les argiles ne se retrouvent pas stockés aux mêmes endroits. Les premiers se concentrent (60 à 75 %) au sud-ouest de l'embouchure sur de grandes superficies alors que les seconds sont focalisés (jusqu'à 43 %) dans une zone d'une quinzaine de kilomètres carrés au sud-est de l'embouchure. La densité des points de prélèvement et le gradient de valeurs permettent de confirmer que ces résultats ne sont pas le fruit d'une erreur de mesure, d'échantillonnage ou d'interpolation. Ces deux sites de concentration de silts et d'argiles sont expliqués par le contexte hydrodynamique sévissant à l'embouchure. En effet, le courant étant dirigé vers le SW durant 80 % du temps et très rarement vers le SE, le transport de particules grossières comme les sables et les silts s'effectue dans cette direction. Les sables se déposent d'abord près de l'embouchure (**Figure 4.37**) puis les silts plus loin (**Figure 4.36**). Les argiles, particules très fines qui ne se déposent que si la turbulence est proche de zéro, sont majoritairement dispersées sur le plateau continental du Golfe du Lion. Les dépôts sédimentaires du SE du prodelta, dont la fraction argileuse est importante, semblent être issus des apports directs du Rhône et s'être formés après floculation et chute dans la colonne d'eau. Leur création est certainement facilitée par une faible turbulence et un transport massif vers le SW.

La **Figure 4.38** confirme la forte domination des pélites dès l'isobathe -30 m et la présence d'argiles au SE avec un D50 minimum de 5  $\mu\text{m}$  très répandu, signifiant que la fraction argileuse représente près de la moitié du sédiment total. Les sédiments plus grossiers (D50 de l'ordre de 30  $\mu\text{m}$ ) se répartissent le long de l'isobathe -30 m tant à l'ouest qu'à l'est de l'embouchure et semblent alimenter la Flèche de la Gracieuse dont la plage immergée et la pente sont exclusivement sableuses d'après différents prélèvements opérés en collaboration avec le CEREGE dans le cadre du projet CARMA.

L'affinité que présentent les radioéléments d'origines anthropique et naturelle pour les particules fines permet d'évaluer leurs sites de stockage, d'autant que les zones prodeltaïques sont reconnues pour leur environnement vaseux et que le Rhône est particulièrement vecteur de grandes quantités de sédiments et aux contaminants radioactifs associés.

#### 4.4.2. La couche superficielle de mélange

La couche superficielle de mélange, appelée dans la littérature Surface Mixing Layer (SML) correspond à la profondeur de sédiment remanié par les courants de fond, les vagues si la zone est peu profonde et la bioturbation. La Bottom Boundary Layer (BBL), étudiée par Curran et al. (2007), se trouve à la fine interface eau-sédiment et caractérise les sédiments maintenus en suspension permanente au-dessus du fond par les courants et les vagues ou les particules fraîchement sédimentées qui ne sont pas destinées à se déposer à long terme.

Cette couche superficielle de mélange dépend énormément du milieu de dépôt, de ses caractéristiques hydrodynamiques et de sa profondeur. Elle est très importante car souvent composée de particules fines en régulière mobilité sur lesquelles sont adsorbés des radioéléments provenant du Rhône.

La mission EXTREMA 2 d'octobre 2008 comportait un volet de cartographie granulométrique de l'embouchure du Rhône. Les échantillonnages ont été réalisés jusqu'au quatrième centimètre sous la surface afin d'avoir une bonne représentativité du fond sédimentaire à haute fréquence spatiale. Le premier centimètre et la moyenne des quatre premiers sont comparés sur des cartes de répartition présentées sur les **Figures 4.39 et 4.40**, tandis que les valeurs de fraction granulométrique des stations et leurs écarts-types sont établis dans le **Tableau 4.6**.

Les écart-types, déterminés par la somme du carré des écarts à la moyenne rapportée au nombre d'échantillons, ont été calculés pour les fractions argileuse, silteuse, sableuse et pour le diamètre médian des sédiments. Ils prennent en compte 4 niveaux sédimentaires par station pour avoir une idée de la dispersion des résultats. Leurs valeurs sont assez faibles en ce qui concerne les argiles puisqu'elles sont comprises entre 0.5 et 4.8 avec une moyenne approchant 2.7 et un écart-type de 1.34. Elles sont également faibles pour les fractions silteuses, sableuses et le diamètre médian avec des moyennes et écarts-types respectifs de 2.13 et 2.26, 2.53 et 3.16, et 2.11 et 3.29. Elles présentent des pics à certaines stations, notamment G6 et G19 pour les silts, sables et D50, et G6 et G12 pour les argiles (**Tableau 4.6**). Ce sont les stations les plus proches de l'embouchure, entre 10 et 15 m de profondeur. G16 et G19 se situent directement à l'est de l'embouchure alors que G6 et G12 sont localisées à l'ouest. Les zones proximales du fleuve sont davantage confrontées à une hétérogénéité de la taille des sédiments de fond sur les premiers centimètres, tandis que les zones distales et latérales présentent une homogénéité notable de la granulométrie avec des écarts-types inférieurs à 1.

Il existe également des variations de distribution verticale sur les premiers centimètres en fonction de la fraction granulométrique puisque la fraction sableuse paraît bien plus hétérogène sur le toit de la colonne sédimentaire que les autres fractions. L'écart-type relatif moyen, déterminé par la moyenne des rapports entre l'écart-type et la moyenne de chaque station, s'élève à 0.65 pour la fraction argileuse, 1.74 pour la fraction silteuse, 2.38 pour la fraction sableuse et 4.47 pour le D50.

La **Figure 4.39** confirme le peu de variation de la fraction argileuse dans la couche de mélange puisque les cartes sont presque superposables, tant qualitativement (délimitation des zones) que quantitativement (même échelle de valeurs). La fraction silteuse répond moins bien à cette affirmation puisque le premier centimètre a tendance à sous-estimer la proportion de silts tant à l'embouchure (50 % contre 65 %) que plus au large (moins de 50 % contre près de 70 %). La **Figure 4.40** montre que les cartes de répartition du diamètre médian et des sables sont superposables, ce qui signifie que le sable influence largement le D50. En outre, les valeurs superficielles de la fraction sableuse et du D50 sont très supérieures à la moyenne sur les 4 premiers centimètres avec des maxima atteignant respectivement 43.5 % contre 27 % et 48.5  $\mu\text{m}$  contre 29.5  $\mu\text{m}$ . Cette tendance à obtenir des fractions plus grossières en surface que quelques centimètres plus profond s'explique par l'irrégularité des apports rhodaniens. Le Rhône ne transporte pas que du matériel grossier à son embouchure mais cet événement est toujours accompagné de cortèges de particules plus fines. De plus, en périodes normales ou d'étiage précédant les crues ou les forts débits, les MES fines sont continuellement amenées sur le prodelta. De fait, en zone proximale où la turbulence est accrue, les particules fines transportées avec les particules plus grossières sont généralement balayées et la fraction sableuse se dépose. L'état granulométrique du prodelta dépend du contexte hydrologique du prélèvement. En effet, le fleuve sortait d'une période de débits de crue ( $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

En plus des variabilités spatiales horizontales (prodelta) et verticales (couche de mélange) de la répartition des sédiments, il faut prendre en compte leur dimension temporelle. Ils nous renseignent sur les taux d'accumulation et sont des témoins de l'activité du fleuve et de celle des hommes.

Station	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	D50 (µm)	E (argiles)	E (silts)	E (sables)	E (D50)
G1	26.98	69.15	3.88	8.47	3.88	2.72	1.28	1.25
G2	27.53	68.58	3.90	8.32	2.25	2.22	0.66	0.74
G3	27.38	68.95	3.68	8.38	2.85	1.80	1.07	1.03
G4	27.65	69.60	2.75	8.29	1.83	0.77	1.53	0.61
G5	25.70	66.40	7.90	9.34	3.13	3.53	2.13	1.24
G6	25.25	69.68	5.08	9.41	5.79	3.98	2.08	2.38
G7	26.58	69.78	3.65	8.58	0.63	1.04	0.68	0.16
G8	27.50	69.93	2.58	8.26	1.78	0.73	1.42	0.57
G10	27.70	69.68	2.63	8.20	1.07	0.67	0.78	0.36
G11	25.73	69.45	4.82	9.12	3.43	2.81	1.09	1.39
G12	19.18	69.25	11.58	17.31	6.87	2.38	8.02	9.80
G13	24.78	69.50	5.72	9.67	2.35	1.91	0.57	0.89
G14	26.43	69.23	4.35	8.58	1.65	1.16	1.21	0.55
G15	26.73	70.48	2.80	8.57	1.51	0.88	1.43	0.63
G16	14.15	59.43	26.43	24.67	3.10	10.69	13.49	11.63
G17	23.30	71.10	5.60	9.87	1.73	1.01	0.81	0.46
G18	27.53	69.18	3.30	8.29	0.73	0.75	0.67	0.19
G19	12.84	60.03	27.13	29.28	3.69	9.48	13.11	14.00
G20	22.08	72.30	5.63	10.75	3.56	1.85	3.81	2.04
G21	22.78	72.03	5.20	10.21	2.87	1.50	1.44	1.47
G22	26.18	71.63	2.20	8.53	1.70	1.01	0.97	0.52
G23	27.45	69.48	3.08	8.20	2.69	1.89	0.81	0.73
G24	24.85	71.98	3.18	9.05	2.72	1.04	2.07	1.05
G25	21.45	71.93	6.63	11.09	2.81	0.68	2.24	1.81
G26	24.23	69.90	5.87	9.95	2.43	1.15	1.56	1.19
G27	24.10	70.90	5.00	9.85	4.84	1.31	3.55	2.66
G28	27.68	68.58	3.75	8.15	1.50	0.69	0.93	0.65
G29	25.65	71.85	2.50	8.67	2.28	2.04	1.70	0.68
G30	28.10	70.83	1.07	7.89	2.49	2.20	1.32	0.61
Ch30	23.35	68.00	8.65	10.15	1.92	0.85	2.58	1.06
RoEst	18.10	69.18	12.73	14.43	2.71	2.41	3.45	2.78
RoSud	23.23	68.78	8.00	10.37	3.55	1.02	2.60	2.36

**Tableau 4.6 : Données granulométriques moyennes et écart-types des 4 premiers centimètres à la moyenne des stations de la proche embouchure du Rhône échantillonnées lors de la campagne EXTREMA 2 (octobre 2008).**

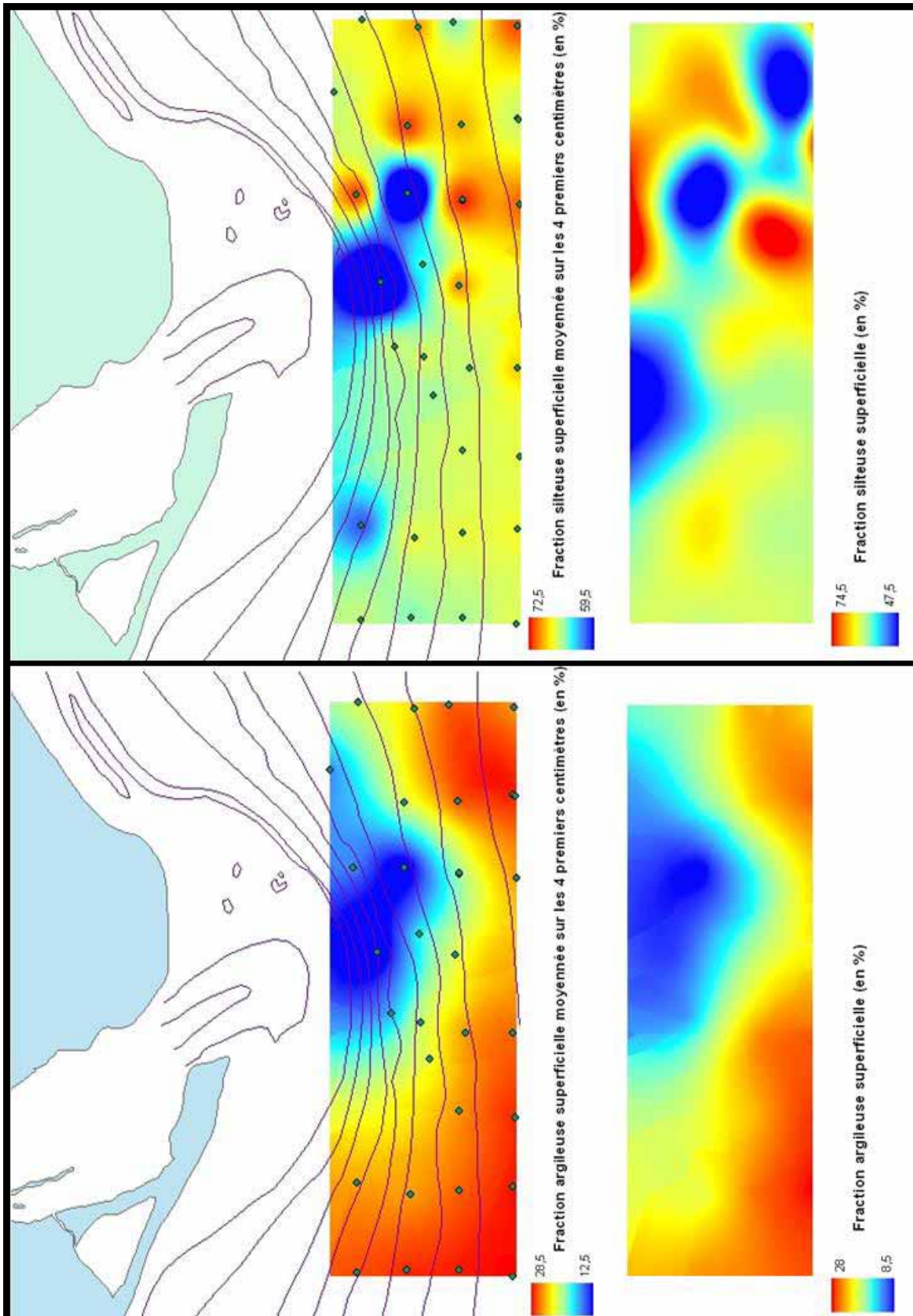


Figure 4.39 : Comparaison des fractions argileuses et silteuses à l'embouchure du Rhône analysées sur le premier centimètre et sur les 4 premiers centimètres (octobre 2008).

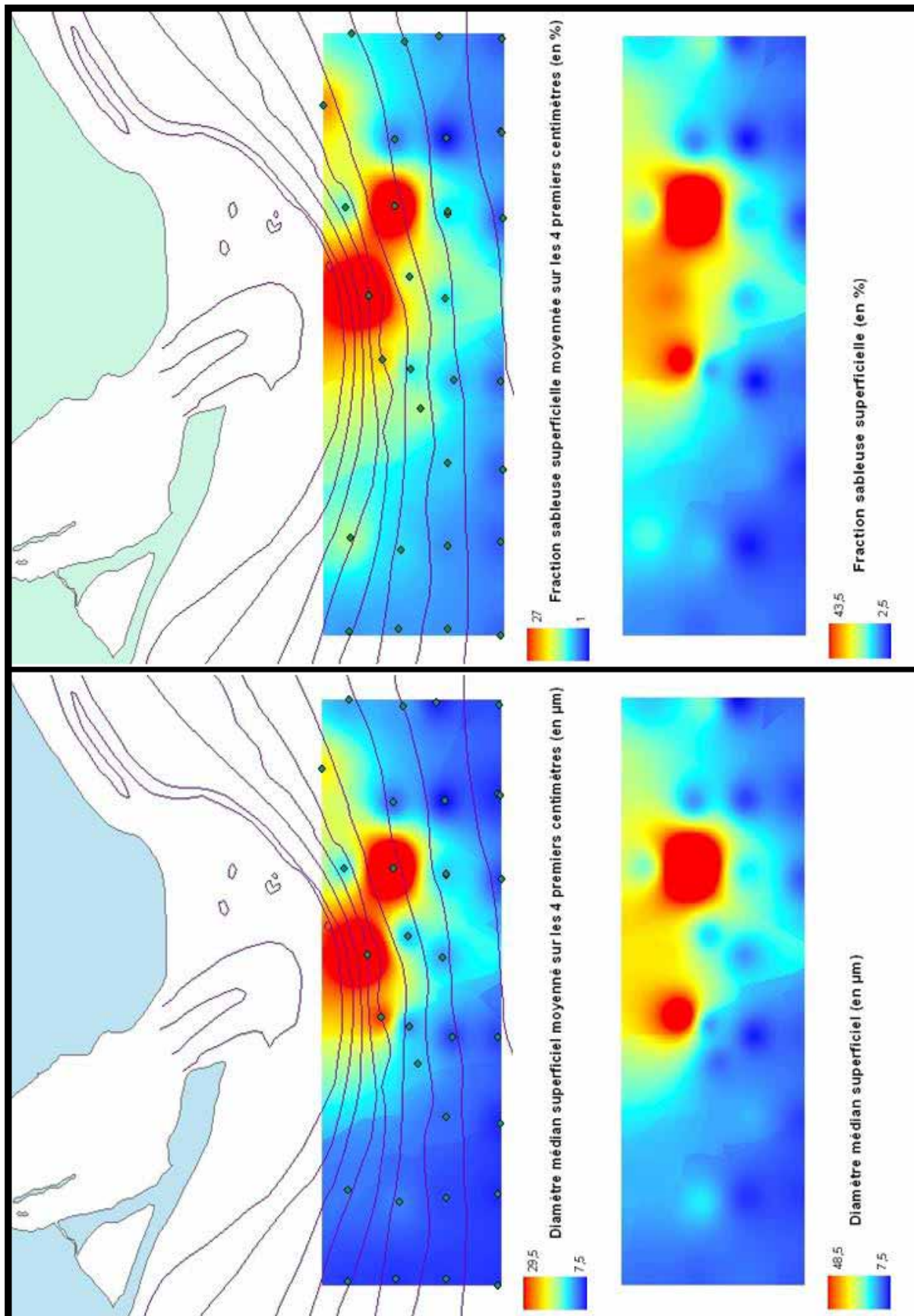


Figure 4.40 : Comparaison de la fraction sableuse et du diamètre médian des sédiments à l'embouchure du Rhône analysées sur le premier centimètre et sur les 4 premiers centimètres (octobre 2008).

## 4.5. Variabilité temporelle de la distribution des sédiments

### 4.5.1. Etat initial avant le suivi temporel de la distribution sédimentaire en 2008

#### 4.5.1.1. La campagne EXTREMA1 (mars 2008)

La mission océanographique de mars 2008 a permis le prélèvement de 11 carottes à l'embouchure du Grand Rhône (**Figure 4.41**) et 4 à l'embouchure du Petit Rhône. L'embouchure du Petit Rhône n'a pas été finement étudiée mais les analyses granulométriques ont révélé de très fortes teneurs en sables avec un gradient décroissant depuis la côte vers le large (de 88 % à 22 %).

Même si la partie aval de la branche orientale du fleuve a fait l'objet d'une attention plus approfondie, aucune instrumentation de suivi des courants et des vagues n'a été prévue avant la campagne EXTREMA1 ni pendant l'intervalle entre les deux missions. Néanmoins, la CNR et la station OPERA de l'IRSN fonctionnant continuellement, elles ont pu nous fournir les données de débit du Rhône et de concentration en MES durant les périodes voulues (**Figure 4.42**).

Par ailleurs, l'expérience SCOPE menée parallèlement par l'IFREMER nous a renseigné sur l'état des courants et du transport sédimentaire au niveau de la station de La Balancelle peu de temps avant la campagne de prélèvement du mois de mars 2008.

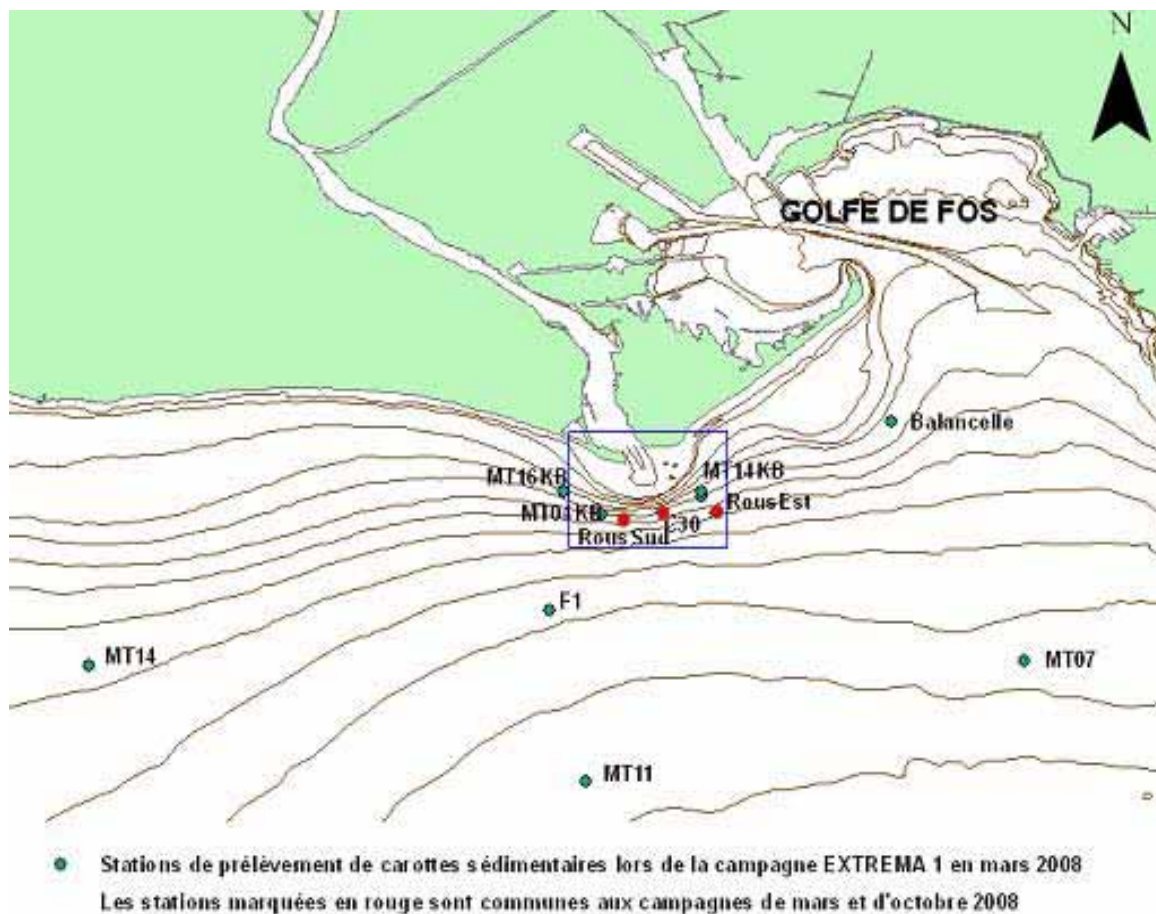
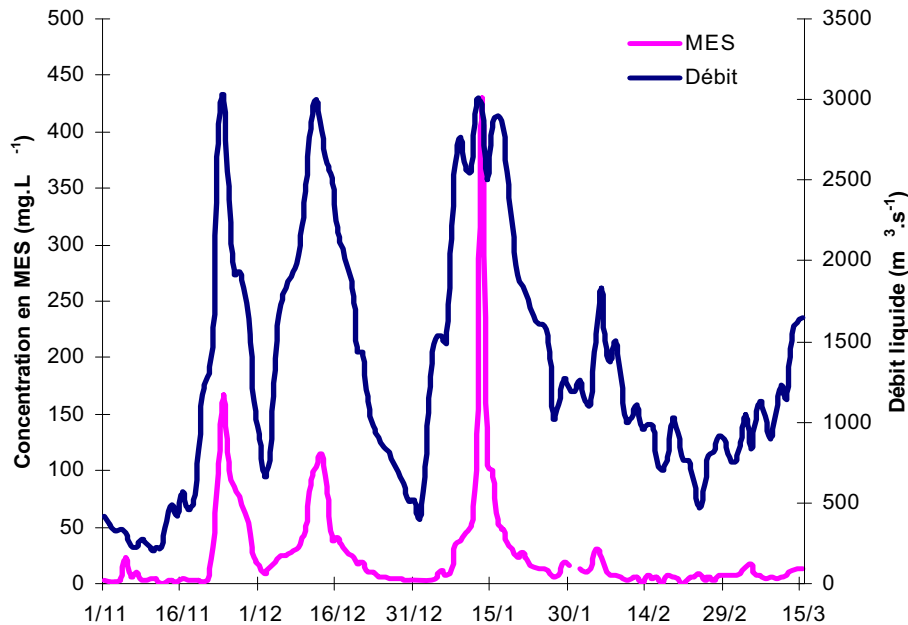


Figure 4.41 : Représentation des stations de prélèvements sédimentaires profonds de la campagne EXTREMA1 (mars 2008).

Les résultats du projet SCOPE, réalisé du 26 octobre 2007 et le 29 janvier 2008 montrent des événements de forte houle de SE en novembre 2007 et janvier 2008, créant des épisodes de contraintes de cisaillement au fond atteignant  $6 \text{ N.m}^{-2}$  (Dufois, 2008). Les sédiments ont été transportés massivement vers le SW. Tout comme les résultats relevés par l'ADCP à la station Roustan Est, le transport sédimentaire est orienté vers le SW dans 80 % du temps, quels que soient les épisodes météorologiques ou hydrologiques.

Parallèlement, le débit du Rhône atteint le seuil de crue ( $3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) par trois fois en deux mois, mais en étant revenu à un débit proche de l'étiage à chaque intervalle ( $700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ). Ces événements ont induit trois pics de concentration en MES à  $170 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $112 \text{ mg.L}^{-1}$  et  $441 \text{ mg.L}^{-1}$  (Figure 4.42).



**Figure 4.42 : Débit liquide (en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et concentration en MES ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) en Arles durant les 18 semaines précédant la campagne EXTREMA1 (mars 2008).**

Le **Tableau 4.7** précise les caractéristiques physiques des stations de prélèvement lors de la campagne EXTREMA1.

Stations	Lon D	Lon MD	Lat D	Lat MD	Profondeur
2008US04kb	4	51.985	43	19.053	25 m
2008Chenal30m	4	51.235	43	18.756	24,6 m
2008MTRous	4	50.509	43	18.619	28,7 m
2008US16kb	4	49.399	43	19.134	15 m
2008RousEst	4	51.986	43	19.138	19 m
2008US14kb	4	50.100	43	18.725	23,30 m
2008 Balancelle	4	55.517	43	20.411	25,10 m
2008MT07	4	58.015	43	16.052	86,7 m
2008MT11	4	49.807	43	13.874	96 m
2008MT14	4	49.807	43	13.874	56 m
F1	4	49.136	43	16.979	77 m

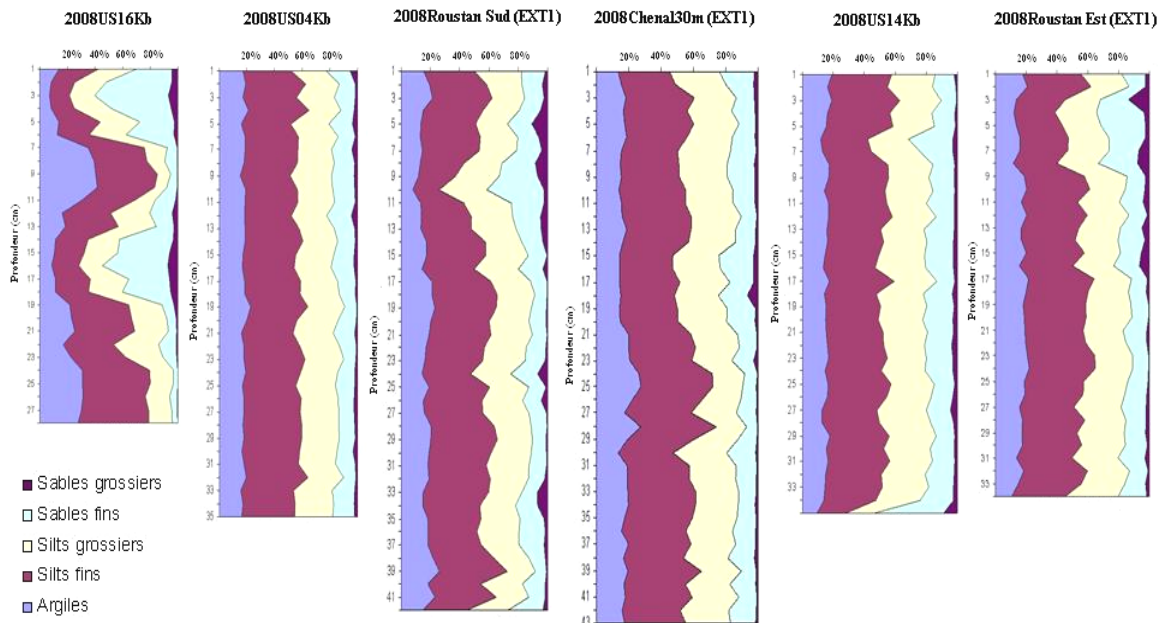
**Tableau 4.7 : Localisation des carottes sédimentaires de la campagne EXTREMA1.**

#### 4.5.1.2. Partie proximale de l'embouchure

En plus d'une disparité granulométrique latitudinale sur le prodelta, il existe également une disparité latérale (**Figure 4.43**) puisque des profils situés sur quasiment la même isobathe (entre 15 m et 25 m de profondeur) de part et d'autre de l'embouchure ne présentent pas les mêmes caractéristiques.

La teneur en sables ( $> 63 \mu\text{m}$ ) de chacune des stations approche 20 % sauf dans le cas de 2008US16Kb (**Figure 4.41**) où sa valeur atteint 60 % à 16 cm et 3 cm de profondeur. Certaines présentent une légère fraction de sables grossiers ( $> 200 \mu\text{m}$ ), témoignant de l'impact de l'hydrodynamique du milieu. Les plus fortes variations granulométriques sont observées dans les stations les plus occidentales de la proche embouchure, notamment 2008US16Kb et 2008RoustanSud. Il est probable que la succession de petites crues qui se sont produites entre novembre 2007 et janvier 2008 (**Figure 4.42**) ait causé le dépôt de plusieurs centimètres de sédiments.

La présence de grains grossiers peut être qualifiée de dépôt syn-crue, c'est-à-dire déposés durant la crue, alors que la présence de grains plus fins apparaissant graduellement peut être qualifiée de dépôt post-crue. Le profil 2008US16Kb présente une sinusoïde parfaite de l'alternance crue/étiage (**Figure 4.43**).



**Figure 4.43 : Mesures granulométriques des carottes sédimentaires prélevées lors de la campagne EXTREMA1 (mars 2008) et localisées à la proche embouchure du Rhône.**

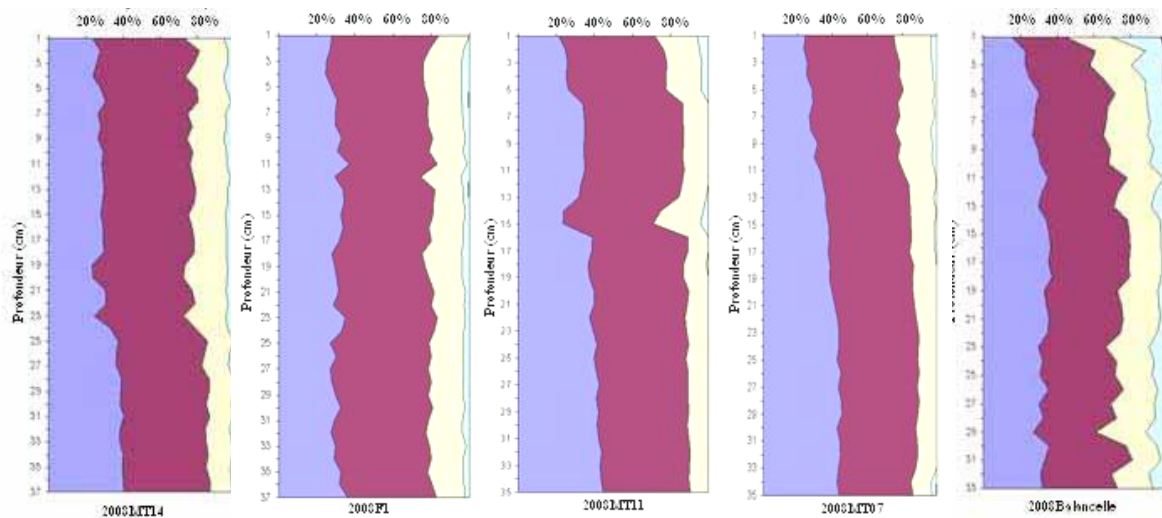
Des tempêtes de SE ont également eu lieu et ont très certainement remobilisé de grandes quantités de particules, qui ont été transportées vers le SW du prodelta. Le § 4.3.5 a expliqué que les courants étaient orientés préférentiellement vers le SW quelles que soient les conditions, même sans fort débit ni vent. L'observation est identique et amplifiée pour des épisodes de vents de SE et des crues.

#### 4.5.1.3. Parties distale et latérale de l'embouchure

La granulométrie s'affine avec la distance par rapport à l'embouchure (**Figure 4.44**). Les sédiments les plus grossiers ou les associations de particules fines chutent avant les sédiments les plus fins. Les profils mesurés



aux stations localisées à des profondeurs supérieures à 50 m présentent moins de 5 % de sables en surface, diminuant avec la hauteur de la carotte, avec une absence de sables grossiers (2008MT14, 2008F1, 2008MT11 et 2008MT07).



**Figure 4.44 : Mesures granulométriques des carottes sédimentaires prélevées lors de la campagne EXTREMA1 (mars 2008) et localisées dans les zones latérale et distale de l’embouchure du Rhône.**

La fraction sableuse des stations latérales 2008US16Kb, 2008US04Kb et 2008US14Kb s’y trouve 4 à 5 fois plus élevée que sur les autres carottes, même à la station de La Balancelle, pourtant loin de l’embouchure. Celle-ci est d’ailleurs touchée par la dérive littorale affectant la Flèche de la Gracieuse et par les houles de SE.

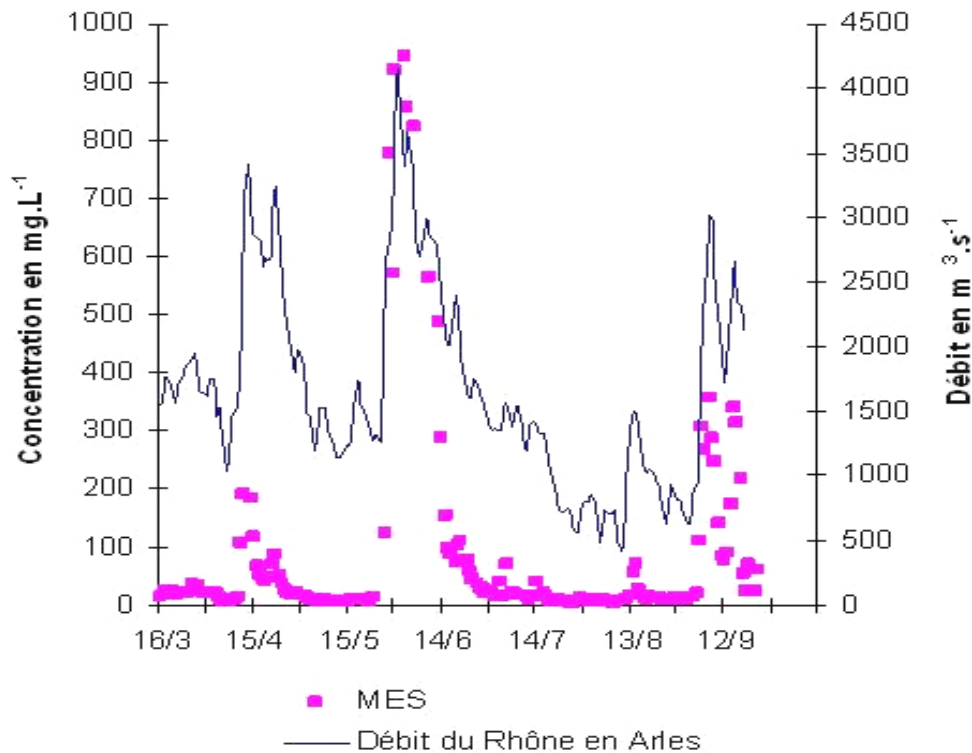
Aucune vraie analyse temporelle ou reconstitution des épisodes sédimentaires n’est envisageable en n’ayant qu’une série de carottes sédimentaires ponctuelles. Seule une tendance à l’accrétion de matériel grossier dans la partie occidentale du prodelta peut être suggérée par ces résultats, ce qui ne signifie pas que du matériel fin ne se dépose pas ailleurs.

#### 4.5.2. Variations de la colonne sédimentaire entre mars et octobre 2008

##### 4.5.2.1. Apports liquides et solides

La période séparant les campagnes EXTREMA1 et EXTREMA2 n’a pas été suivie en terme de houlographie ni courantologie mais les apports solides et liquides du fleuve ont été enregistrés en permanence (**Figure 4.45**). Trois épisodes de crue ont eu lieu à plus de  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  dont un à plus de  $4200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  entraînant un pic de concentration en MES à  $950 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  en Arles.

Le pic de débit supérieur à  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  maintenu durant près d’une semaine et initié par la Durance a mis en suspension près de 2.28 Mt de sédiments dans le Rhône aval et les 2 semaines de débit supérieur à  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  près de 4.13 Mt de sédiments. Les sept mois d’enregistrement de MES en fonction du débit du Rhône permettent de conclure à l’apport de 5.2 Mt de particules, ce qui est très supérieur aux apports des crues de l’hiver 2006-2007. La semaine du 28/05 au 05/06, formant le pic d’intensité du débit ( $> 4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), totalise 46.44 % des apports particuliers des 7 mois de suivi contre 79.4 % pour les deux semaines du 28/05 au 12/06 ( $> 3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). L’importance des dépôts post-crues est comparable voire supérieure à celle des dépôts syn-crues.



**Figure 4.45 : Débit liquide (en  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et concentration en MES ( $\text{mg}.\text{L}^{-1}$ ) en Arles durant les 7 mois séparant les deux campagnes EXTREMA1 (mars 2008) et EXTREMA2 (octobre 2008).**

#### 4.5.2.2. Granulométrie des carottes sédimentaires du projet EXTREMA

Les deux campagnes EXTREMA1 et EXTREMA2 présentent trois stations de prélèvements de carottes sédimentaires en commun, appelées Roustan Sud (ouest), Roustan Est (est) et Chenal 30m (centre), situées entre 20 et 30 m de profondeur. Peu de distance sépare les points de prélèvements puisque Chenal 30m se situe à 900 m de Roustan Sud et 1400 m de Roustan Est. En outre, les carottes de la mission EXTREMA2 sont près de deux fois plus longues que celles de la mission EXTREMA1 (environ 70 cm contre 35 à 43 cm) car elles ont été réalisées au moyen d'un carottier Ronanberg.

Les trois stations inscrites dans un cercle de moins d'un kilomètre de rayon ont enregistré les mêmes événements sédimentaires durant l'intervalle de temps entre mars et octobre (**Figure 4.46**). Les 3 profils du mois d'octobre présentent tous une fracture granulométrique brutale située sur un unique niveau (scission). La fraction sableuse disparaît entièrement lors de cet épisode. Elle passe de 20-30 % (dont une bonne partie de sables grossiers) selon la station à 0 %, puis réapparaît dans des dépôts plus récents à 5-10 %. Cette scission est observée à 35 cm de profondeur sur la carotte de Roustan Sud, 42 cm sur celle de Roustan Est et 44 cm sur celle de Chenal 30m. Cette observation signifie que, même si les taux d'accumulation sont élevés à la proche embouchure, la sédimentation est plus importante au droit de l'embouchure que latéralement. En outre, aucune mesure bathymétrique n'est venue confirmer la présence pérenne du chenal situé à 30 m de profondeur (d'où le nom de la station) et observée par Maillet et al. (2006) après la crue de décembre 2003. Si cela était le cas, l'explication d'une zone préférentielle de dépôt serait envisageable dans ce chenal.

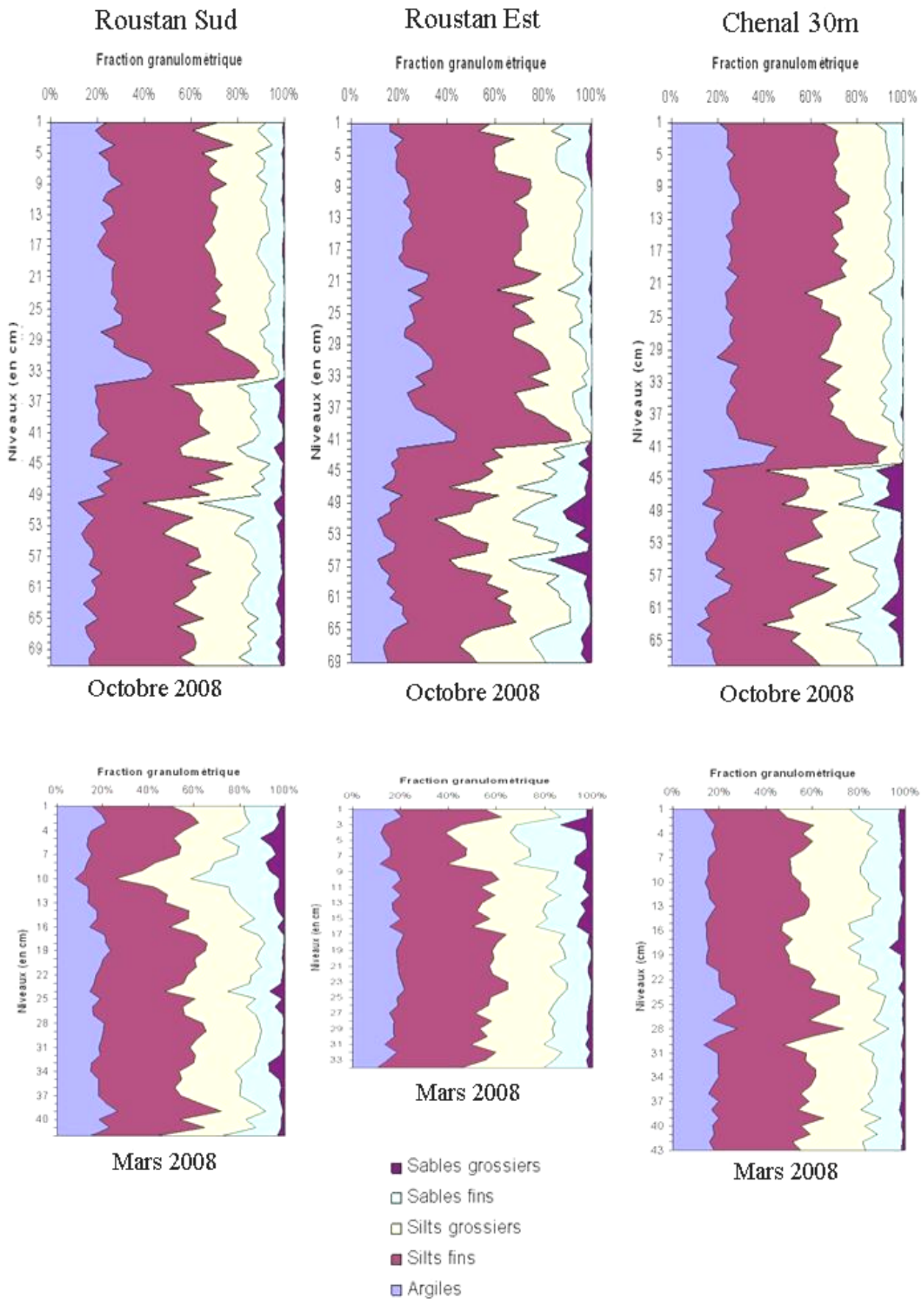


Figure 4.46 : Comparaison des profils granulométriques de carottes sédimentaires prélevées en trois stations identiques (RoustanSud, RoustanEst, Chenal30m) lors des campagnes EXTREMA1 (mars 2008) et EXTREMA2 (octobre 2008).

Les carottes sédimentaires échantillonnées 7 mois plus tôt lors de la campagne EXTREMA1 et servant de base de départ pour suivre l'évolution granulométrique présentent de nombreuses similitudes avec les bases des carottes d'EXTREMA2. Nous avons vu précédemment qu'une scission était indéniable sur les trois profils et que ceux-ci pouvaient donc être divisés entre deux parties : le toit (partie haute) et la base (partie basse).

Ces ressemblances sont quantitatives et qualitatives (**Tableau 4.8**):

- les profils EXTREMA1 (mars 2008) montrent une fraction sableuse supérieure à 20 % dans toute la colonne sédimentaire avec une proportion de sables grossiers continue à 5 % au moins, ce qui n'apparaît en aucun cas au niveau du toit des carottes d'EXTREMA2 (octobre 2008) mais indéniablement au niveau de la base,
- les profils EXTREMA1 présentent des pics de fraction sableuse à 30-40 %, avec un fort ratio de sables grossiers, qui sont retrouvés à la base des carottes d'EXTREMA2.

Stations	Roustan Sud		Roustan Est		Chenal 30m	
	mars-08	oct-08	mars-08	oct-08	mars-08	oct-08
Scission	-	35 cm	-	42 cm	-	44 cm
Pic de sable	10 cm	50 cm	4 cm	51 cm	18 cm	63 cm
Accumulation	40 cm		47 cm		45 cm	

**Tableau 4.8 : Caractéristiques observées sur les profils granulométriques de la Figure 4.48, notamment les profondeurs de scission et de pics de sable.**

Rien ne confirme que les pics sableux présents à la fois sur les profils EXTREMA1 et la base des profils EXTREMA2 correspondent aux mêmes événements sédimentaires car les interprétations sont très subjectives. Cependant, ils permettraient de raccorder les carottes deux à deux et de définir des taux d'accumulation à comparer avec le point commun de scission. L'écart est assez faible entre ces valeurs, entre 1 cm et 5 cm, soit entre 1.5% et 10 % de la hauteur de sédiment. Ces chiffres représentent l'erreur sur l'interprétation mais également la quantité de sédiment remaniée jusqu'à l'épisode de scission.

#### 4.5.2.3. Interprétation des signaux sédimentaires

##### 4.5.2.3.1. Le signal de scission

Il semble que 35 cm, 42 cm et 44 cm de sédiments fins se sont respectivement déposés au niveau des stations Roustan Sud, Roustan Est et Chenal 30m à partir d'un Événement Sédimentaire ES1. Le moment ES1 est postérieur à la mission EXTREMA1 puisque n'apparaissant pas sur les profils mesurés en mars 2008. On peut supposer qu'il est à lier à la crue de la Durance du 31 mai 2008 (**Figure 4.45**), seul réel événement printanier. Il est intéressant de voir que les crues printanières de la Durance sont chargées en particules fines et non grossières, notamment en raison de la présence de barrages (dont celui de Serre-Ponçon). Le fleuve aurait déposé entre 35 et 44 cm en l'espace de 18 semaines. Ces valeurs constituent un taux d'accumulation relatif sur le prodelta. Le taux de sédimentation apparente, basé sur des rapports isotopiques de césium, est estimé à 30-35 cm.an<sup>-1</sup> par Radakovitch et al. (1999), Charmasson et al. (1998), Calmet et Fernandez (1990).

#### 4.5.2.3.2. Le signal sableux

En admettant que les pics sableux à 50 cm, 51 cm et 63 cm confirment un même événement sédimentaire ES2 qui aurait donc eu lieu avant la campagne EXTREMA1 puisque présents sur les profils des deux missions. Il pourrait s'agir de la crue ( $4200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  environ) du 13 janvier 2008 (**Figure 4.42**), le dernier événement d'une série de trois hausses de débit en deux mois caractérisé par de hautes valeurs de MES ( $950 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Le fleuve aurait déposé sur son prodelta entre 50 et 63 cm de sédiment en 9 mois (soit entre 67 cm et 84 cm par an). L'échelle du taux d'accumulation relatif annuel rétrécit au fur et à mesure que le facteur temps augmente.

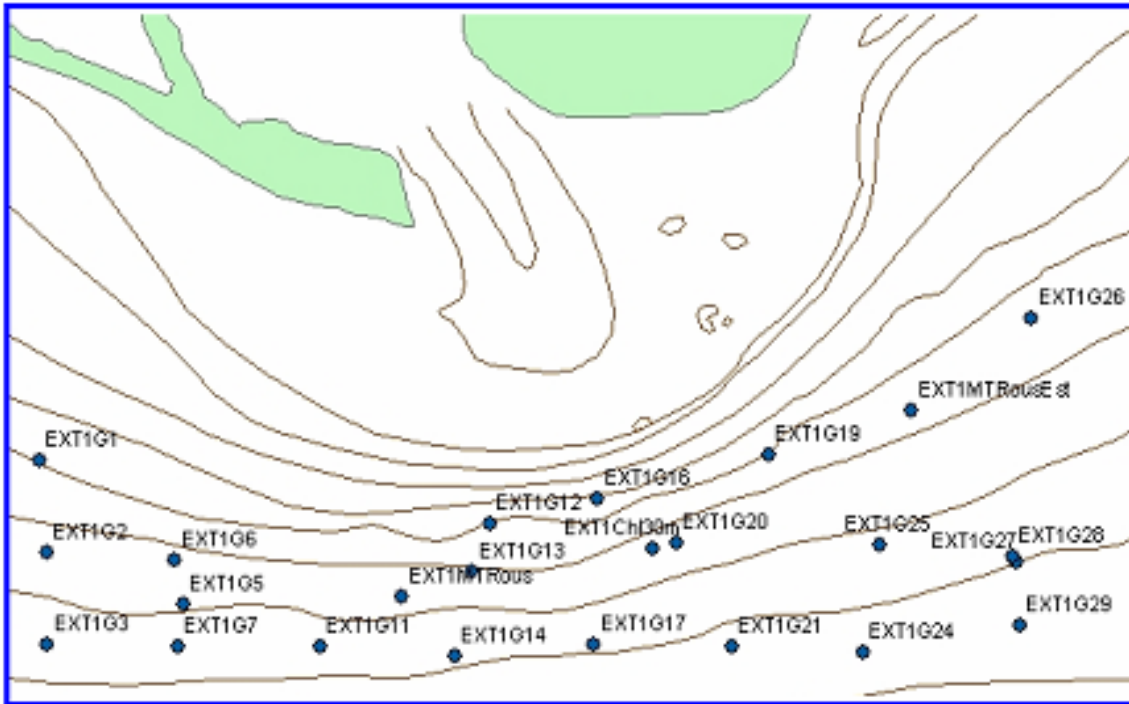
Le prodelta est soumis aux apports sédimentaires permanents du Rhône. Les quantités de matières transportées et déposées annuellement sont très importantes, principalement en période de crues, qu'elles soient hivernales ou printanières. La nature des particules change néanmoins saisonnièrement puisqu'elles sont principalement grossières pendant l'hiver et fines au printemps. Le prodelta peut accuser un dépôt relatif net de sédiment de près de 44 cm en 18 semaines, voire 63 cm pour le double du temps, mais la remise en suspension des sédiments, assurée par les vagues et les courants induits par les tempêtes saisonnières, limite le bilan annuel des dépôts.

#### 4.5.3. Evolution spatio-temporelle des sédiments superficiels du prodelta

Les sept mois séparant les campagnes EXTREMA1 et EXTREMA2 ont été marqués par des variations spatiales verticales de la colonne sédimentaire à l'embouchure du Rhône, ce qui correspond véritablement à des variations temporelles. La surface du front prodeltaïque a également évolué d'après une comparaison différentielle des analyses granulométriques superficielles (**Figures 4.47 et 4.48**).

Les fractions fines ( $< 63 \mu\text{m}$ ) ont subi une augmentation sur toute la zone étudiée, même si les silts accusent une diminution maximale de 3 % par endroit, ce qui est proche du statu quo. Les argiles ont cru de 2 à 16 % en 7 mois et les silts jusqu'à près de 50 %. La zone de croissance principale des particules fines est la proche embouchure du Rhône, non loin des stations étudiées précédemment (**Figure 4.41**).

En revanche, la fraction marque une décroissance de 4 à 65 % avec des valeurs maximales d'absence à la proche embouchure du Rhône. Le reste du prodelta semble relativement inchangé puisque les sables ont seulement diminué de 5 à 15 % dans l'ensemble. L'évolution négative de la présence des matériaux grossiers est également stigmatisée par la chute du diamètre médian de 21 à 78 %, particulièrement à l'embouchure et vers le SW.



- Stations de prélèvements sédimentaires granulométriques communes aux campagnes de mars et d'octobre 2008

**Figure 4.47 : Carte des prélèvements sédimentaires communs aux campagnes EXTREMA 1 et 2 de mars et d'octobre 2008 en vue des analyses granulométriques.**

La crue printanière de la Durance de l'année 2008 et ses apports post-crués ont révélé que le Rhône ne transportait pas uniquement de grandes quantités de sédiments lors d'événements hivernaux extrêmes, comme la crue du 4 décembre 2003 (4 Mt en quelques jours), mais qu'il en dispensait continuellement et épisodiquement. Les apports semblent plus concentrés en particules fines lors des événements printaniers. Ceux-ci sont donc à considérer avec beaucoup d'attention car vecteurs du transport et du dépôt des radioéléments.

La collecte et la compilation de données récentes de granulométrie du Golfe du Lion et du prodelta ont réactualisé l'aperçu des faciès sédimentaires rencontrés en Méditerranée Occidentale et mettent à jour les connaissances sur les réserves particulières proches de l'embouchure.

La finalité de ce travail repose sur l'application de l'hydrodynamique sédimentaire aux radioéléments d'origine anthropique et naturelle et de déterminer leur comportement lorsqu'ils sont soumis à l'environnement marin au débouché du Rhône. Le chapitre suivant analysera leur répartition, leurs réserves et transferts associés aux sédiments et leur remobilisation. Un bilan sera dressé sur les quantités de radionucléides qui ont été apportées par les crues.

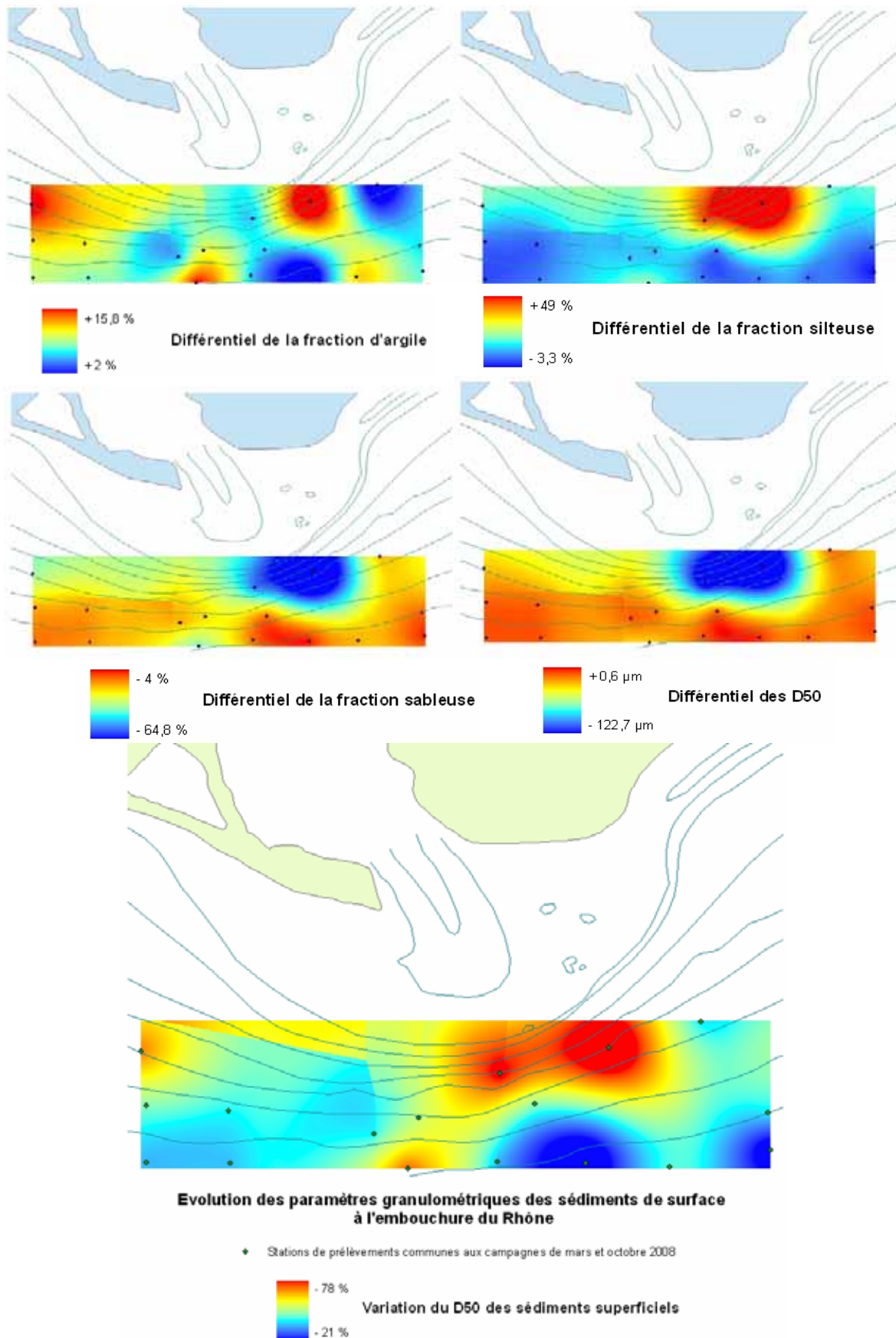


Figure 4.48 : Evolution différentielle des paramètres granulométriques des sédiments de surface (0-1 cm) à l'embouchure du Rhône entre mars et octobre 2008.

## 4.6. Conclusion sur l'hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône durant la période étudiée

### 4.6.1. Apports particuliers rhodaniens

- La concentration moyenne des MES en Arles est  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  mais les crues faibles à moyennes ( $4000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) peuvent entraîner des valeurs de concentration proches de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ . L'origine, la soudaineté et les antécédents hydrologiques des crues jouent un rôle important sur la charge solide en suspension.
- Les eaux fluviales sont diluées d'un facteur 2 à 10 environ au niveau de l'estuaire.
- Les MES sont les cibles de processus physico-chimiques (électrostatisme, sursalinité, surconcentration) et apparaissent majoritairement sous la forme d'agrégats et de flocculats à l'embouchure.
- Les Bottom Nepheloid Layer (BNL) et Surface Nepheloid Layer (SNL) sont visibles à l'embouchure sur plus d'une dizaine de kilomètres vers le large. Leur concentration en MES est de l'ordre de 8 à  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  dans la zone proximale (stations dont la profondeur est inférieure à 20 m) et 3 à  $5 \text{ mg.L}^{-1}$  dans la zone distale, alors que la turbidité de la colonne d'eau est quasi-nulle.
- La partie occidentale du panache est plus chargée que la partie orientale, ce qui dénote une orientation des apports vers l'ouest.
- Le diamètre médian D50 moyen diminue avec la profondeur  $z$ :  $1.3 \text{ }\mu\text{m}$  pour  $z > 60\text{m}$  et  $60 \text{ }\mu\text{m}$  pour  $z < 60\text{m}$ .
- Le D50 est probablement corrélé avec la présence de phytoplancton et de matière organique MO ; en effet, l'observation régulière dans la colonne d'eau d'une couche d'eau riche en matériaux grossiers sursaturée en  $\text{O}_2$  dissous semble être expliquée par la présence de phytoplancton à la même profondeur, dont le biofilm superficiel jouerait le rôle de ligand entre les particules.

### 4.6.2. Hydrologie à l'embouchure

- Le processus de défloculation entre la SNL et la BNL semble être confirmé sur les profils de turbidité recueillis pendant les campagnes océanographiques EXTREMA en conditions d'apports rhodaniens faibles.
- Durant la campagne EXTREMA 1, deux modes granulométriques ont été répertoriés au 1<sup>er</sup> leg dont un très fin à  $5 \text{ }\mu\text{m}$ , mais un unique mode grossier lors du 2<sup>nd</sup> leg, c'est-à-dire 3 jours plus tard. Cette granulométrie unimodale correspondrait à la présence de phytoplancton (détectée par fluorimétrie), intervenant comme facteur d'agrégation entre les particules en suspension.
- La thermocline constitue une barrière thermique sur laquelle sont présentes des entités phytoplanctoniques, responsables directement ou indirectement d'une couche d'eau turbide dans la colonne d'eau. La corrélation entre les trois paramètres mesurés (fluorimétrie, turbidité, température), auxquels peut être ajouté le D50, s'affirme à travers leurs évolutions similaires, tant géographiquement que temporellement.
- Le néphéloïde intermédiaire décrit par Aloisi (1986) a pu être observé durant la campagne EXTREMA 2. Il semblerait que ce néphéloïde soit alimenté en partie par le transfert de particules sus-jacentes de la SNL, en plus du transfert horizontal rhodanien.



### 4.6.3. Impact des courants et des vagues sur la dynamique sédimentaire

- Des expériences menées avec François Dufois (thésard à l'IRSN) et Philippe Cann (technicien à l'IFREMER) par le biais d'un érodimètre de terrain montrent que la teneur en vase et l'effet de compaction influencent l'intensité de la tension critique de fond nécessaire à l'érosion et à la mise en suspension des sédiments de fond.
- La contrainte critique d'érosion déterminée pour les sédiments de l'embouchure du Rhône a été estimée à 0.35 Pa, soit une valeur bien supérieure à celle mise en avant par Lansard et al. (2006) c'est-à-dire 0.08 Pa qui devait plus probablement correspondre à la mise en suspension de la fluffy layer.
- Pour la première fois, l'embouchure directe du Rhône a été instrumentée pour connaître les courants et dépôts sédimentaires en continu.
- Deux crues du Rhône en novembre et décembre 2006, dont les débits dépassaient  $3500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , ont provoqué le dépôt cumulé de 8 cm de sédiment quelques heures après le pic de débit en Arles. Les vents de sud-est observés, contrairement à des vents de nord de même intensité (mistral), ont un impact important sur la remise en suspension puisqu'ils ont induit une contrainte de cisaillement au fond de plusieurs pascals (5 Pa) en février 2007 par le biais des houles qu'ils ont générées.
- L'effet de tassement sédimentaire (2 cm) pendant une longue période dénuée d'événements hydrologiques et la tempête du mois de février 2007 (5 cm) ont ramené la balance sédimentaire dépôt/érosion à zéro.
- Le transport sédimentaire général à l'embouchure du Rhône, notamment à la bouée Roustan Est, est orienté vers le sud-ouest dans plus de 80 % du temps, quels que soient les vents et la profondeur dans la colonne d'eau.
- Quelles que soient les méthodes employées pour délimiter temporellement les crues des mois de novembre et décembre 2006, l'aire de dépôt des sédiments a été évaluée entre 1.5 et 10 km<sup>2</sup> pour des quantités de 90 kT à 400 kT.

### 4.6.4. Variabilité spatiale de la distribution des sédiments

- La fraction sableuse est maximale en zone proximale de l'embouchure rhodanienne, jusqu'à l'isobathe 50 m, même si la fraction silteuse domine (minimum 50 %).
- La Surface Mixing Layer (SML) est majoritairement argileuse au sud-est de l'embouchure et sableuse au sud-ouest, ce qui est expliqué par le contexte hydrodynamique et les propriétés sédimentologiques des argiles.
- La granulométrie des 4 premiers centimètres de sédiments de la SML est quasi-semblable à celle du tout premier centimètre, notamment concernant la fraction argileuse. Les résultats sont moins marquants pour les fractions silteuse et sableuse qui ont tendance à plaquer les sédiments plus fins.

### 4.6.5. Variabilité temporelle de la distribution des sédiments

- La majorité des particules grossières sédimente dans la partie occidentale du prodelta en raison du transport général des sédiments rhodaniens vers l'ouest.

- Une succession de petites crues peut remobiliser plus de matières qu'une unique crue d'une intensité exceptionnelle.
- La dernière semaine du mois de mai 2008 qui a connu une très importante crue de la Durance a apporté à la Mer Méditerranée plus de 46 % des sédiments totalisés durant les 7 mois de suivis entre mars et octobre 2008. En outre, l'étude des profils granulométriques et spectrométriques ont révélé que les dépôts post-crues sont aussi importants que les dépôts syn-crues.
- L'évolution granulométrique peut servir de proxy pour dater certains événements hydrosédimentaires. La crue de la Durance de mai 2008, caractérisée par de forts débits (près de 50 fois le débit normal), et une fraction fine fortement majoritaire, a pu être reportée sur les logs de carottes sédimentaires et leurs profils granulométriques. Ainsi, un bilan des apports rhodaniens sur le prodelta a été estimé à 4.1 MT.
- L'impact de cette crue est souligné sur la variation de la répartition granulométrique superficielle à l'embouchure entre mars et octobre 2008, présentant une hausse de la fraction péltique de près de 60 % et une baisse de 75 % du D50 jusqu'à l'isobathe 40 m.

# 5. Bilan des sédiments et des radioéléments



## 5.1. Apports de radionucléides par le Rhône

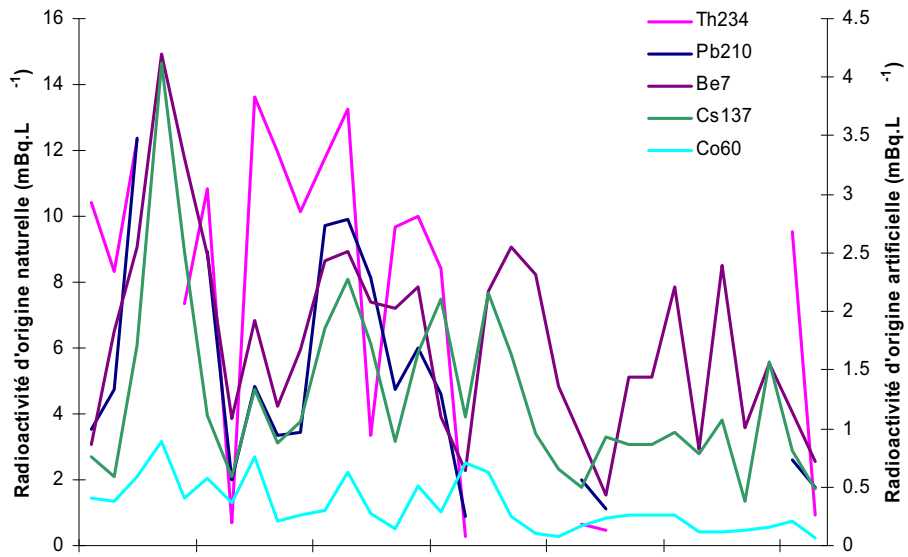
### 5.1.1. Radioactivité relevée dans l'eau et dans les MES en Arles

M'intéressant dans cette thèse aux apports particuliers du Rhône, mon attention s'est particulièrement portée sur certains radionucléides auxquels ils sont associés, qu'ils soient d'origine naturelle comme le  $^7\text{Be}$ , le  $^{210}\text{Pb}$ , le  $^{234}\text{Th}$  ou d'origine anthropique comme le  $^{137}\text{Cs}$ . Les radionucléides, sous forme dissoute ou particulaire, constituent de bons traceurs des masses d'eau pour de nombreuses études (Molero et al., 1995 ; Sanchez-Cabeza et al., 2002 ; Gascó et al., 2002). Des prélèvements d'eau et de MES sont effectués à la station OPERA de l'IRSN afin d'évaluer les flux solides et liquides des radioéléments (**Figure 5.1**).

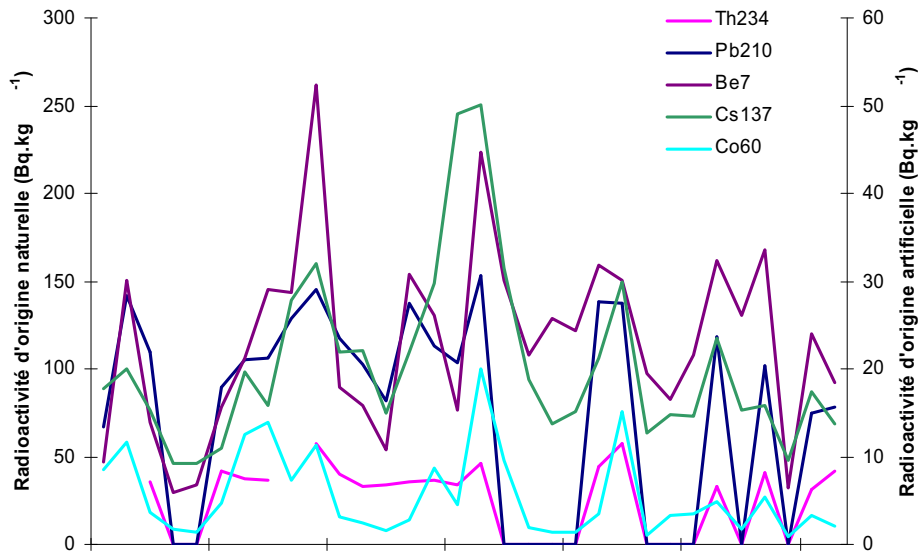
Il apparaît que la radioactivité d'origine anthropique est bien plus faible que la radioactivité d'origine naturelle dans la fraction dissoute comme dans la fraction particulaire. En effet, les concentrations de  $^{234}\text{Th}$ , de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^7\text{Be}$  sont respectivement comprises entre 0.26 et 13.61  $\text{mBq.L}^{-1}$ , entre 0.88 et 9.9  $\text{mBq.L}^{-1}$  et entre 1.5 et 14.9  $\text{mBq.L}^{-1}$  dans la fraction dissoute, et respectivement entre 31.7  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et 57.3  $\text{Bq.kg}^{-1}$ , entre 75  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et 152.8  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et entre 29.8  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et 262.1  $\text{Bq.kg}^{-1}$  dans la fraction particulaire. Les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{60}\text{Co}$  sont respectivement comprises entre 0.38  $\text{mBq.L}^{-1}$  et 4.1  $\text{mBq.L}^{-1}$  et entre 0.06 et 0.89  $\text{mBq.L}^{-1}$  pour la fraction dissoute, et respectivement entre 9.2  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et 50  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et entre 0.9  $\text{Bq.kg}^{-1}$  et 20  $\text{Bq.kg}^{-1}$  pour la fraction particulaire. Les valeurs moyennes de  $^{137}\text{Cs}$  sont bien moins importantes qu'il y a 25 ans alors que le centre de Marcoule fonctionnait et où les concentrations avoisinaient 20  $\text{mBq.L}^{-1}$  avec des pics à 60  $\text{mBq.L}^{-1}$  après l'accident de Tchernobyl (Charmasson, 1998). Les variations d'activité de chacun des radioéléments sont concomitantes quelle que soit la fraction considérée (**Figure 5.1 a, b**). Dans la fraction dissoute, les concentrations de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^7\text{Be}$  sont proches et supérieures d'un facteur 4 à celles de  $^{137}\text{Cs}$ . Dans la fraction particulaire, l'évolution commune à tous les radionucléides est plus évidente, notamment entre le  $^{210}\text{Pb}$ , le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^7\text{Be}$ . Le  $^{60}\text{Co}$  reste concentré à des niveaux plus faibles que le  $^{137}\text{Cs}$  mais il suit la même tendance.

La quantité de radioéléments dans l'environnement marin dépend de leur source (naturelle ou artificielle) mais également des conditions environnementales (débit et concentrations en MES) et de leurs affinités avec les phases solides et liquides caractérisée par une constante de distribution  $K_d$ .

a)



b)



c)

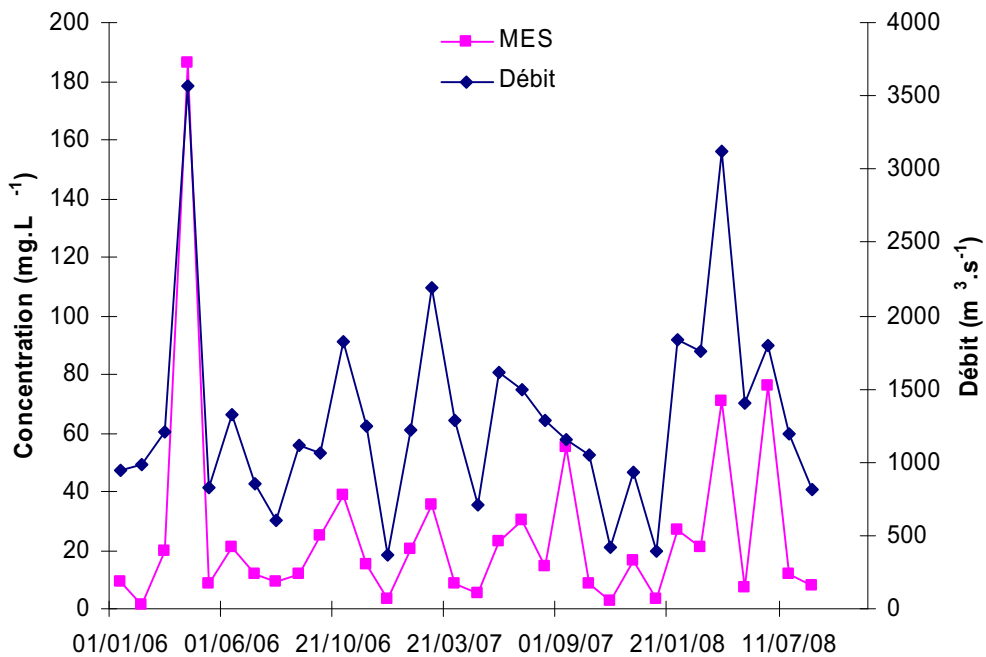


Figure 5.1 : Concentration des radionucléides d'origines naturelle ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^7\text{Be}$ ) et anthropique ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) dans l'eau du Rhône (a), dans les MES du Rhône (b) et débits et MES associés (c).

### 5.1.2. Constantes de distribution Kd des radionucléides dans le Rhône

Les mesures mensuelles de concentrations volumique (fraction dissoute) et massique (fraction particulaire) en différents radioéléments effectuées dans le Rhône durant la période étudiée donnent la possibilité d'évaluer des constantes de distribution Kd pour chacun des radionucléides (**Tableaux 5.1 et 5.2**). Le Kd varie énormément selon les conditions environnementales car l'affinité avec la phase particulaire évolue avec de nombreux paramètres dont le pH, la salinité et la turbidité.

Les radionucléides d'origine artificielle comme le césium 137 et le cobalt 60 montrent clairement qu'ils ont le moins d'affinité avec la phase particulaire en comparaison avec le thorium 234, le plomb 210 et le béryllium 7. Leurs Kd est compris entre  $2.10^3$  et  $6.10^4$  avec un Kd moyen à  $2.10^4$ . Les radionucléides d'origine naturelle présentent des affinités particulières avec la phase particulaire avec des constantes de distribution allant de  $2.10^3$  à  $2.10^5$  et une moyenne de  $4.10^4$ , conformément aux différents travaux de Martin et Thomas (1990) et Mahler (1995).

Le **Tableau 5.1**, réalisé à partir des données du **Tableau 5.2**, montre que seule la fraction dissoute est corrélée avec les conditions environnementales. La corrélation est meilleure d'environ 15 % avec la turbidité qu'avec le débit liquide du fleuve. Cette différence est expliquée par la relation qui existe entre ces deux paramètres détaillée au début du § 4. Le  $^{60}\text{Co}$  dissous affiche une liaison un peu plus faible que les autres (28 % contre 63 % pour le  $^{137}\text{Cs}$  notamment).

Corrélation	$^{137}\text{Cs}$ dis	$^{60}\text{Co}$ dis	$^{234}\text{Th}$ dis	$^{210}\text{Pb}$ dis	$^7\text{Be}$ dis
MES	0.6279	0.2829	0.4455	0.4586	0.5791
Débit	0.4867	0.1584	0.2827	0.2609	0.5482

Corrélation	$^{137}\text{Cs}$ part	$^{60}\text{Co}$ part	$^{234}\text{Th}$ part	$^{210}\text{Pb}$ part	$^7\text{Be}$ part
MES	-0.2924	-0.3129	-0.0908	0.0580	-0.3146
Débit	-0.1579	-0.3316	-0.3142	0.0043	-0.1596

**Tableau 5.1 : Coefficients de corrélation entre les radionucléides étudiés sous différentes formes et les débits et concentrations en MES du Rhône sur la période 2006-2008.**

Dates	fraction dissoute (mBq.L <sup>-1</sup> )						fraction particulaire (Bq.kg <sup>-1</sup> .sec)						Kd (L.kg <sup>-1</sup> )						[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
	Th234	Pb210	Be7	Cs137	Co60		Th234	Pb210	Be7	Cs137	Co60		Th234	Pb210	Be7	Cs137	Co60			
01/01/2006	10.402	3.514	3.055	0.760	0.411		37.143	66.667	46.667	17.714	8.571		3671	18971	15274	23294	20872	8.98	950	
01/02/2006	8.314	4.755	6.510	0.595	0.378		ND	141.905	150.476	20.000	11.619		ND	29846	23114	33626	30751	1.17	980	
01/03/2006	12.314	12.389	9.086	1.711	0.592		35.780	109.174	69.725	15.229	3.578		2906	8812	7674	8901	6045	19.57	1213	
01/04/2006	ND	ND	14.920	4.118	0.891		ND	ND	29.808	9.231	1.769		ND	ND	1998	2242	1987	186.25	3565	
01/05/2006	7.357	ND	11.779	2.508	0.401		ND	ND	33.981	9.223	1.330		ND	ND	2885	3677	3315	8.60	826	
01/06/2006	10.851	8.947	8.831	1.109	0.573		41.346	89.423	77.885	10.962	4.615		3810	9995	8820	9884	8050	20.85	1330	
01/07/2006	0.711	2.003	3.838	0.594	0.367		37.255	104.902	105.882	19.706	12.549		52372	52372	27585	33160	34214	11.50	849	
01/08/2006	13.610	4.850	6.848	1.333	0.760		36.538	105.769	145.192	15.769	13.846		2685	21810	21202	11831	18211	9.00	608	
01/09/2006	11.932	3.363	4.236	0.876	0.214		ND	128.846	143.269	27.885	7.308		ND	36316	33820	31830	34078	11.75	1113	
01/10/2006	10.128	3.433	5.943	1.061	0.265		57.282	145.631	262.136	32.039	11.369		5656	42420	44111	30196	42798	24.85	1060	
21/10/2006	11.775	9.744	8.636	1.856	0.307		40.000	117.143	89.524	21.905	3.048		3397	12022	10367	11802	9930	38.70	1822	
01/12/2006	13.256	9.926	8.921	2.277	0.631		33.333	102.857	79.048	22.000	2.381		2515	10363	8861	9661	3771	15.05	1241	
01/01/2007	3.343	8.119	7.383	1.733	0.270		33.654	81.731	53.846	15.000	1.635		10066	10066	7293	8654	6056	3.55	366	
21/01/2007	9.666	4.749	7.224	0.891	0.150		35.275	137.386	154.095	21.907	2.785		3649	28928	21332	24587	18570	20.05	1226	
01/03/2007	10.011	5.988	7.845	1.655	0.508		36.402	112.940	130.675	29.682	8.681		3636	18680	16657	17940	17072	35.70	2186	
21/03/2007	8.397	4.624	3.889	2.108	0.293		33.976	103.815	76.445	49.076	4.530		4046	22451	19655	23283	15453	8.40	1283	
01/05/2007	0.267	0.884	2.267	1.100	0.700		46.226	152.830	223.585	50.000	20.000		172817	172817	98607	45455	28571	4.95	709	
21/05/2007	ND	ND	7.734	2.153	0.622		ND	ND	150.000	31.415	9.528		ND	ND	19394	14590	15310	22.70	1613	
01/07/2007	ND	ND	9.068	1.632	0.250		ND	ND	108.032	18.738	1.998		ND	ND	11914	11480	7991	30.35	1500	
21/07/2007	ND	ND	8.240	0.958	0.099		ND	ND	128.571	13.810	1.476		ND	ND	15603	14410	14944	14.45	1283	
01/09/2007	ND	ND	4.840	0.659	0.082		ND	ND	122.115	15.096	1.442		ND	ND	25232	22892	17680	55.35	1152	
01/10/2007	0.645	2.017	3.274	0.500	0.164		44.340	138.679	159.434	21.226	3.491		68739	68740	48697	42477	21336	8.50	1044	
01/11/2007	0.466	1.124	1.537	0.927	0.237		57.009	137.383	150.467	29.907	15.047		122272	122271	97888	32251	63405	2.40	420	
01/12/2007	ND	ND	5.130	0.861	0.261		ND	ND	97.170	12.736	1.123		ND	ND	18942	14792	4303	16.55	929	
01/01/2008	ND	ND	5.130	0.861	0.256		ND	ND	82.867	14.762	3.333		ND	ND	16152	17145	13019	3.05	400	
21/01/2008	ND	ND	7.853	0.964	0.267		ND	ND	107.619	14.571	3.524		ND	ND	13705	15109	13196	27.10	1838	
01/04/2008	0.500	1.770	2.933	0.783	0.121		33.333	118.519	162.037	23.426	4.907		66667	66960	55240	29921	40414	20.90	1762	
21/04/2008	ND	ND	8.511	1.070	0.124		ND	ND	130.476	15.333	1.781		ND	ND	15331	14326	14341	70.80	3125	
21/05/2008	0.637	1.578	3.561	0.385	0.124		41.121	101.869	168.224	15.794	5.327		64545	64545	47243	41025	42798	7.25	1410	
21/06/2008	ND	ND	5.533	1.567	0.160		ND	ND	32.039	9.515	0.913		ND	ND	5790	6071	5704	75.85	1800	
11/07/2008	9.524	2.596	4.068	0.812	0.204		31.731	75.000	120.192	17.404	3.365		3332	28896	29546	21430	16499	11.95	1200	
01/08/2008	0.933	1.758	2.565	0.489	0.062		41.748	78.641	92.233	13.786	2.039		44744	44744	35960	28170	33145	7.65	819	

Tableau 5.2 : Radioactivité d'origine anthropique (<sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co) et naturelle (<sup>234</sup>Th, <sup>210</sup>Pb, <sup>7</sup>Be) dans les fractions dissoute et particulaire des MES du Rhône durant la période d'étude 2006-2008. Comparaison avec les variations de débit et de concentration en MES. Données OPERA.



Les mesures de radioactivité résumées dans le **Tableau 5.2** concernent le milieu fluvial rhodanien. Néanmoins, différentes études ont montré que le  $^{137}\text{Cs}$  avait tendance à se désorber des particules en suspension au contact avec les eaux marines en raison de la forte compétitivité de plusieurs cations en présence comme  $\text{K}^+$  et  $\text{NH}_4^+$ . Sa désorption reste cependant partielle puisqu'il est retrouvé en quantités non-négligeables dans les sédiments de l'embouchure. Ce résultat s'explique par les deux types de liaisons développées par les cations  $\text{Cs}^+$  au contact de particules fines : l'une forte qui ne permet pas de relargage du radioélément, l'autre faible qui s'opère superficiellement et qui le rend soluble lors de compétitions cationiques dans l'environnement. Le  $^{137}\text{Cs}$  est d'ailleurs un bon marqueur des apports du Rhône au voisinage de l'embouchure (Charmasson, 1998), contrairement aux métaux dont les sources sont très diffuses.

### 5.1.3. Flux de radioéléments issus du Rhône

#### 5.1.3.1. Comportement des radioéléments en fonction de la turbidité

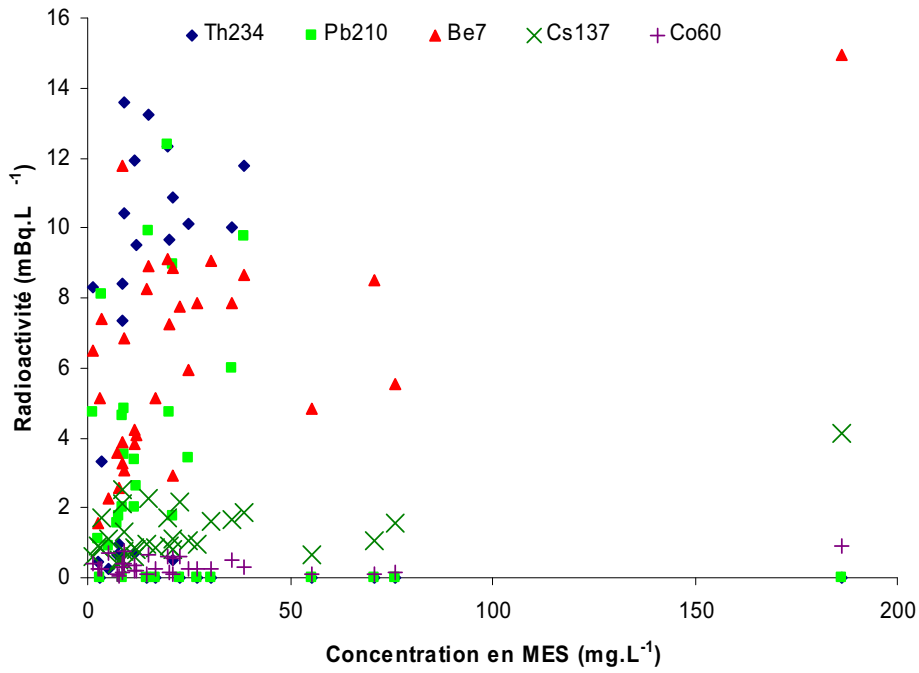
L'estimation des flux de radioéléments d'origine industriel permet de dresser des bilans de contaminants et d'évaluer l'impact des activités humaines alors que celle des radioéléments d'origine naturelle caractérise les apports sédimentaires rhodaniens.

Même si l'éventail de concentrations en MES et débits du Rhône est inégalement dense (sur 32 échantillons, 5 ont été réalisés par un débit supérieur au débit moyen ( $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et 4 par un débit inférieur au débit d'étiage ( $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )), la **Figure 5.2** révèle des tendances pour lesquelles il n'est pas possible de conclure.

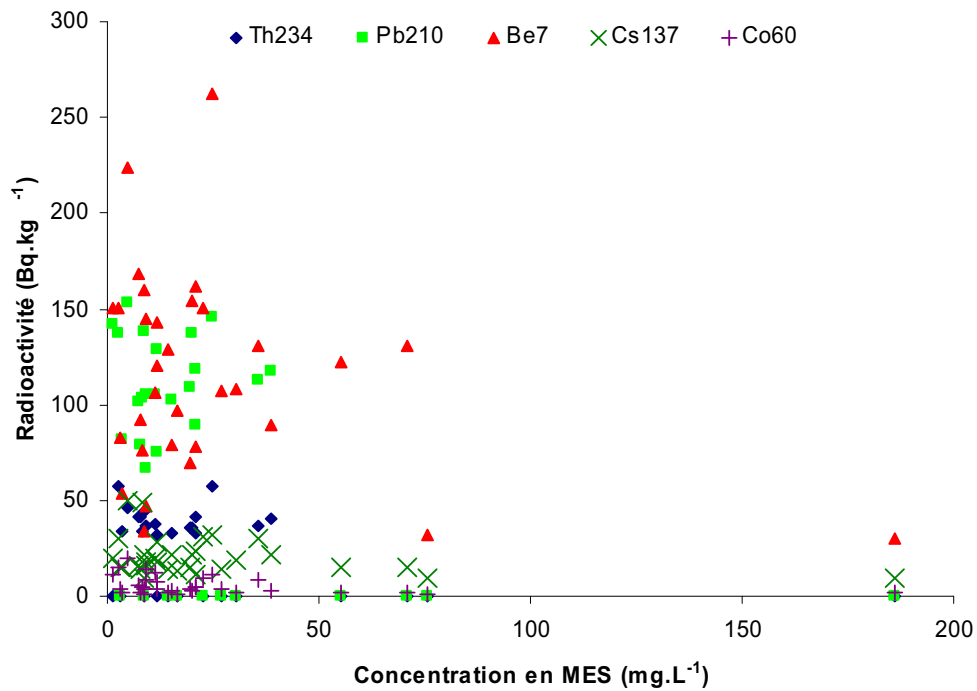
La **Figure 5.2.a** suggère une augmentation du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^7\text{Be}$  avec la concentration en MES. En effet, leurs maxima correspondent au pic de concentration. La significativité de cette tendance est discutable car un seul échantillon connaît une forte valeur de concentration. La corrélation est effectivement moins nette avec les autres radionucléides, notamment le  $^{210}\text{Pb}$  qui présente des valeurs minimales pour les mesures de turbidité maximum (supérieures à  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Les valeurs minima de radioactivité se situent pour des concentrations comprises entre 0 et  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  alors que les valeurs maxima correspondent à des mesures de turbidité comprises entre 10 et  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Au-delà de  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , les radioéléments réagissent différemment.

Concernant la fraction particulaire, la corrélation entre la turbidité et la radioactivité n'a pas été démontrée (§ **5.1.2**). Néanmoins, les résultats montrent globalement que la radioactivité massique diminue lorsque la concentration en MES augmente (**Figure 5.2.b**). Ils suivent d'ailleurs la même évolution que la radioactivité volumique de la fraction dissoute avec des valeurs maxima pour une turbidité comprise entre 10 et  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

a)



b)



**Figure 5.2 : Concentration des radioéléments en fonction de la concentration en MES dans la fraction dissoute (a) et dans la fraction particulaire (b).**

### 5.1.3.2. Estimation des flux de radioéléments

La radioactivité totale est évaluée à partir du produit entre la concentration en radioéléments, le débit liquide et le temps. La radioactivité totale issue de la fraction particulaire est évaluée à partir du produit entre la concentration en radioéléments associée à la phase particulaire, la turbidité, le débit liquide et le temps. La

connaissance de l'erreur sur les paramètres entrant en jeu dans le calcul des radioactivités totales permet de vérifier l'ordre de grandeur des valeurs acquises et de les corriger.

Calculé sur les 2.5 ans d'étude au moyen des données du **Tableau 5.2**, c'est-à-dire avec des valeurs intégrées mensuellement, le volume total d'eau drainé par le Rhône est évalué à  $107881.10^6 \text{ m}^3$  contre  $114650.10^6 \text{ m}^3$  lorsqu'il est évalué au moyen de valeurs quotidiennes de débit. L'erreur est d'environ 6 % sur le débit liquide. En opérant de la même manière pour la concentration en MES, on obtient 4304 kT contre 6206 kT par l'intermédiaire du relevé quotidien, soit une erreur de près de 44 %. Dans les deux cas, le résultat de l'extrapolation des valeurs mensuelles sous-estime les valeurs totales estimées à partir de l'extrapolation des valeurs quotidiennes.

Valeurs	Années	Bilans fraction dissoute (GBq)					Bilans fraction particulaire (GBq)				
		<sup>234</sup> Th	<sup>210</sup> Pb	<sup>7</sup> Be	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>234</sup> Th	<sup>210</sup> Pb	<sup>7</sup> Be	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
Valeurs brutes	2006	387.226	252.828	363.407	80.945	21.728	90.727	254.616	110.967	27.154	6.054
	2007	239.596	158.863	223.843	47.823	11.351	30.746	91.893	101.876	18.701	3.861
	2008 (8/12)	167.051	112.413	181.993	30.016	5.064	48.153	136.717	126.217	17.614	2.578
	Bilan (32 mois)	793.873	524.104	769.243	158.783	38.143	169.626	483.226	339.059	63.469	12.493
Valeurs corrigées	2006	411.520	268.691	386.208	86.023	23.092	139.040	237.376	170.057	39.095	9.278
	2007	254.629	168.830	237.887	50.823	12.063	47.118	182.49	156.126	30.062	5.917
	2008 (8/12)	177.532	119.466	193.411	31.899	5.382	73.795	410.488	193.429	53.871	3.950
	Bilan (32 mois)	843.681	556.987	817.505	168.745	40.536	259.954	830.344	519.612	122.96	19.145

**Tableau 5.3 : Estimation brute et corrigée des apports rhodaniens annuels en radioéléments d'origines anthropique et naturelle.**

Les valeurs corrigées ont été calculées à partir des valeurs brutes (**Tableau 5.3**) auxquelles ont été appliquées un coefficient de proportionnalité déterminé sur la base de l'erreur déduite sur le débit liquide et sur la concentration en MES. Les chiffres sont à prendre avec prudence car il n'existe pas de relation linéaire claire entre la concentration en radioéléments et les paramètres cités précédemment, particulièrement pour la phase particulaire. Néanmoins, même s'il est impossible de conclure sur la quantité de radioéléments apportée par le Rhône dans l'absolu, des valeurs hypothétiques peuvent être émises en tenant compte de l'incertitude sur la fréquence temporelle de mesure.

L'année 2006, plus riche en événements hydrologiques, dresse un bilan de radionucléides supérieur à celui de 2007, tant au niveau de la fraction dissoute qu'à celui de la fraction particulaire (**Tableau 5.3**). Le Rhône a rejeté 843.7 GBq de <sup>234</sup>Th, 557 GBq de <sup>210</sup>Pb, 817.5 GBq de <sup>7</sup>Be, 168.7 GBq de <sup>137</sup>Cs et 40.5 GBq de <sup>60</sup>Co en 32 mois de suivi, dont près de la moitié en 2006. Les épisodes de crue seront abordés dans la suite de cette étude.

Moyenne annuelle	Bilans fraction dissoute (GBq)					Bilans fraction particulaire (GBq)				
	<sup>234</sup> Th	<sup>210</sup> Pb	<sup>7</sup> Be	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>234</sup> Th	<sup>210</sup> Pb	<sup>7</sup> Be	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
Valeurs brutes	292.466	193.437	286.746	57.930	13.558	64.568	183.861	134.056	24.092	4.594
Valeurs corrigées	310.816	205.573	304.737	61.565	14.409	98.951	276.781	205.442	40.986	7.040

**Tableau 5.4 : Apports moyens annuels des radioéléments sous leurs formes dissoute et particulaire entre 2006 et 2008.**

Les apports moyens annuels du Rhône entre 2006 et 2008, respectivement sous forme dissoute et particulaire, sont évalués à 310.8 GBq et 98.9 GBq de  $^{234}\text{Th}$ , 205.6 GBq et 276.8 GBq de  $^{210}\text{Pb}$ , 304.7 GBq et 205.4 GBq de  $^7\text{Be}$ , 61.6 GBq et 41.0 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  et 14.4 GBq et 7 GBq de  $^{60}\text{Co}$  (**Tableau 5.4**). L'échelle de grandeur correspond aux valeurs relevées dans la littérature, notamment avec celle de Charmasson (1998) qui a évalué les flux particuliers cumulés de  $^{137}\text{Cs}$  depuis le bassin versant rhodanien vers la Méditerranée sur la période 1954-1990. Ils ont été estimés entre 5.3 TBq et 5.6 TBq à partir des données de turbidité et débit liquide de Noël (1996).

Aucun événement extrême n'a entraîné la remobilisation de grandes quantités de radionucléides durant les deux dernières années (§ 5.5), comme ce fut le cas en 2003 où la crue du 4 décembre a mobilisé  $77 \pm 17$  GBq de  $^{137}\text{Cs}$  (Antonelli et al., 2008). Cet épisode exceptionnel a non seulement augmenté la moyenne annuelle des flux de radioéléments mais également lessivé les berges du fleuve et remobilisé des stocks accumulés depuis des années, entraînant la mise en suspension de quantités considérables de contaminants.

Tous les radionucléides associés aux particules retrouvés en suspension dans le Rhône ne s'accumulent pas sur le prodelta. Ils peuvent se désorber ou se disperser en Mer Méditerranée suivant les courants et la vitesse de chute des particules sur lesquelles ils sont adsorbés. Ils alimentent ainsi la couverture sédimentaire du plateau continental du Golfe du Lion. Miralles et al. (2006) estimèrent les dépôts de  $^{137}\text{Cs}$  dus à la crue de décembre 2003 à  $27 \pm 2$  GBq, soit 35 % des apports du fleuve durant cette période. Ces chiffres sont également à prendre avec précaution car le nombre de carottes sédimentaires s'avère restreint pour conclure sur des dépôts établis sur 30 km<sup>2</sup> de prodelta.

Les phases de mise en suspension et de transport des radionucléides aboutissent à leur sédimentation à l'embouchure du Rhône et dans le Golfe du Lion. Certaines zones apparaissent comme étant plus propices au dépôt, notamment la proche embouchure du Rhône, et d'autres zones présentent des valeurs importantes de radioactivité superficielle.

## 5.2. Distribution spatiale des radioéléments

Deux radionucléides ont été particulièrement suivis, le  $^{210}\text{Pb}$  en excès et le  $^{137}\text{Cs}$  : le premier représente un traceur naturel et le second un traceur artificiel des masses sédimentaires. Les autres éléments présentés précédemment ne forment pas de bons marqueurs sur le long terme : soit ils se caractérisent par des périodes de décroissance courtes, soit ils sont présents en trop faible quantité dans les sédiments.

### 5.2.1. Répartition géographique dans le Golfe du Lion

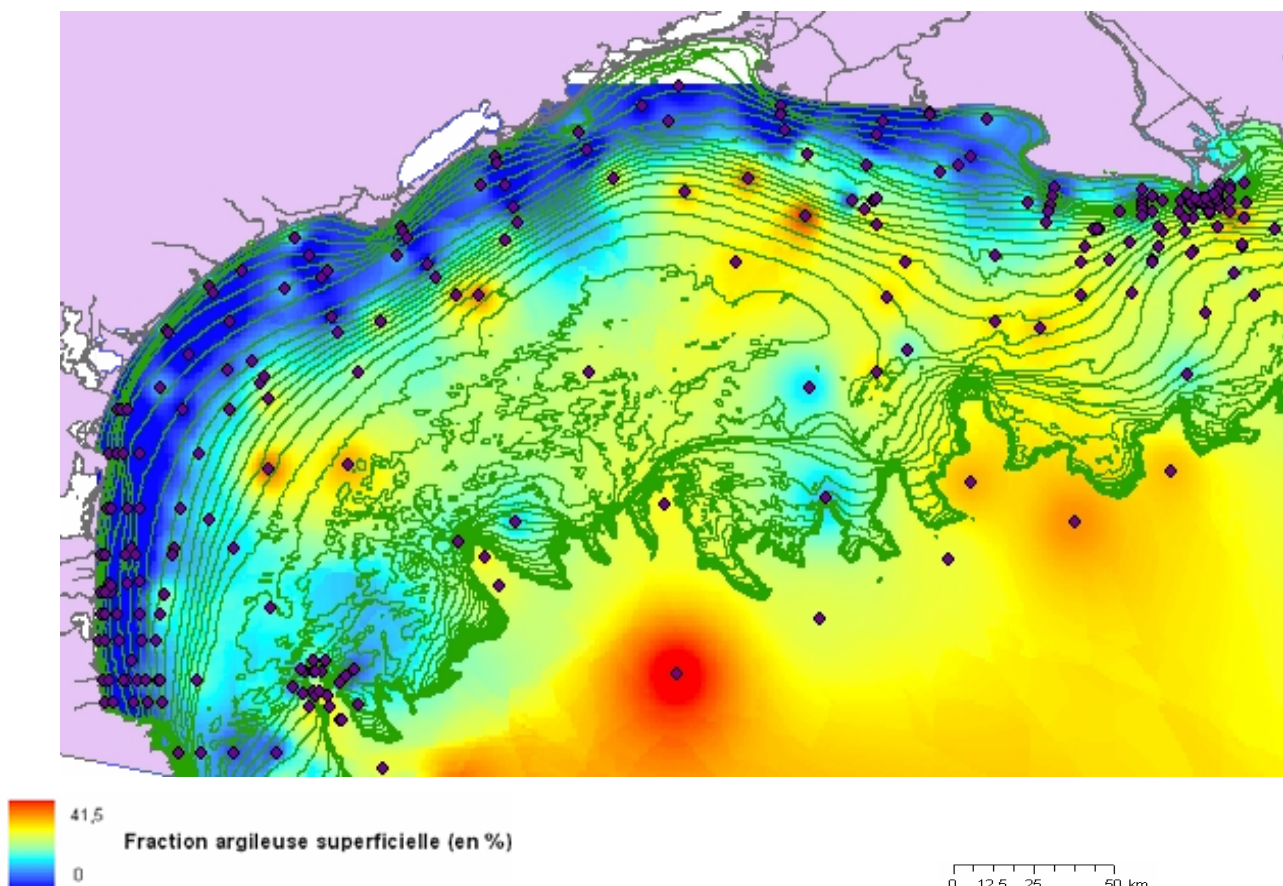
#### 5.2.1.1. Distribution des sédiments dans le Golfe du Lion

Le Golfe du Lion est principalement alimenté en sédiments par les petits fleuves côtiers et principalement par le Rhône à hauteur de 90 % environ (Bourrin et al., 2006). La compilation de données récentes présentées sur les **Figures 5.3 à 5.6** fait état de la couverture sédimentaire du Golfe du Lion grâce à l'analyse granulométrique

des sédiments superficiels prélevés lors de missions issues de projets tels que REMOTRANS (Miralles et al., 2005 ; Roussiez et al., 2006 ; Roussiez, 2006 ; Lansard et al., 2007), METROC, EUROSTRATAFORM (Miralles et al., 2006), REDIT ainsi que d'autres campagnes très ponctuelles (comme DEEP1, MINERCOT, etc.).

Les campagnes citées précédemment ont été réalisées entre 2001 et 2008. Leurs résultats dressés sous le logiciel ArcGIS par l'intermédiaire d'une méthode d'interpolation de krigeage confirment les travaux de Got et Aloisi (1990) sur la distribution qualitative des faciès sédimentaires sur le plateau continental du Golfe du Lion. L'approche quantitative de la comparaison entre leurs résultats obtenus entre 1970 et 1990 est plus délicate car le spectre granulométrique utilisé alors se résumait à des fractions inférieures et supérieures à 40  $\mu\text{m}$ . En outre, les techniques de prélèvement employées à cette époque diffèrent des méthodes et technologies actuelles et avaient tendance à remanier fortement l'interface. De fait, les données anciennes et nouvelles n'ont pas été compilées ensemble même si elles paraissent complémentaires.

La distance est de 5 m entre les isobathes qui commencent à 0 m au trait de côte pour prendre fin à -160 m au bord du plateau externe. La densité de points de prélèvements est assez inégale dans le Golfe du Lion et le produit de l'interpolation des données granulométriques en souffre quelque peu : la partie littorale du plateau est bien couverte jusqu'à 50 m de profondeur avec des transects radiaux tous les 30 km alors que la partie centrale du plateau continentale montre un nombre de stations d'échantillonnage faible.



**Figure 5.3 : Distribution spatiale de la fraction argileuse de surface (0-1 cm) dans le Golfe du Lion (données recueillies lors des campagnes effectuées entre 2001 et 2008).**

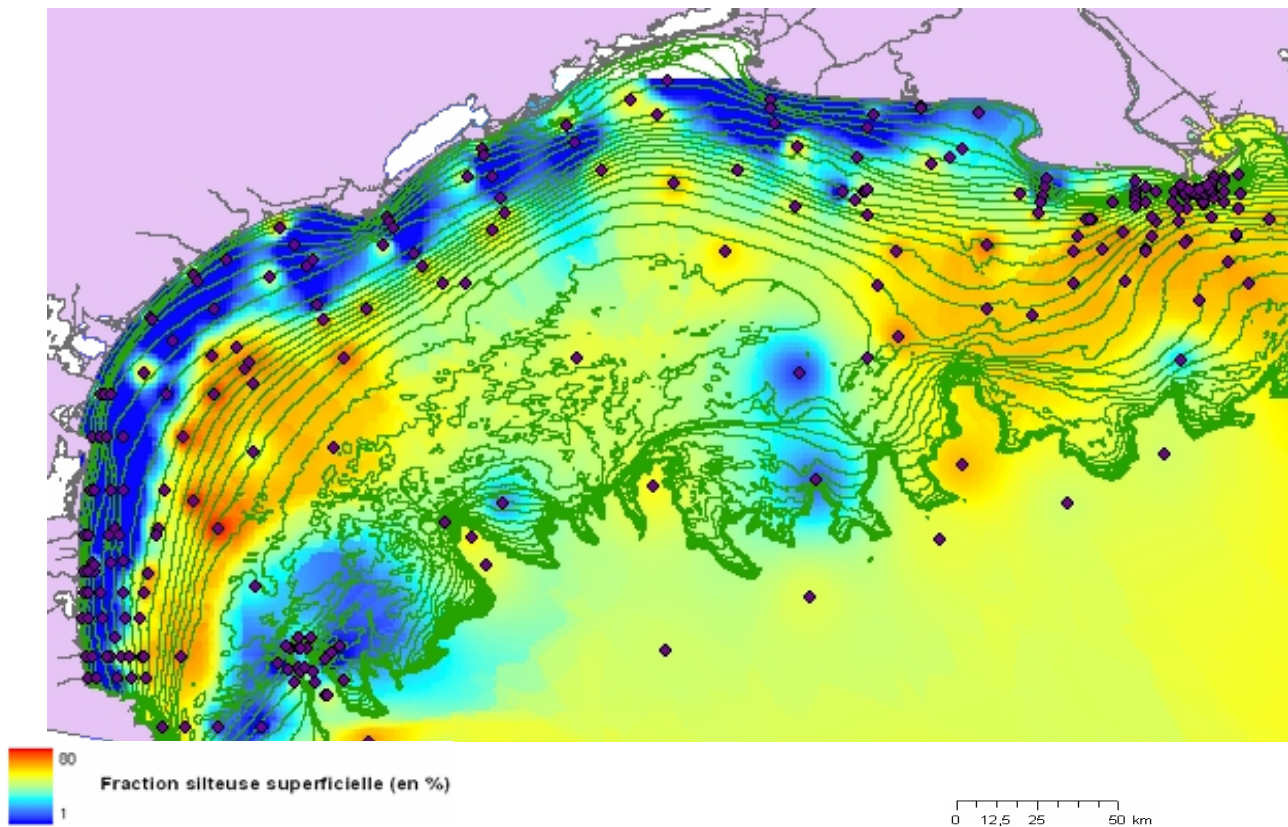


Figure 5.4 : Distribution spatiale de la fraction silteuse de surface (0-1 cm) dans le Golfe du Lion (données recueillies lors des campagnes effectuées entre 2001 et 2008).

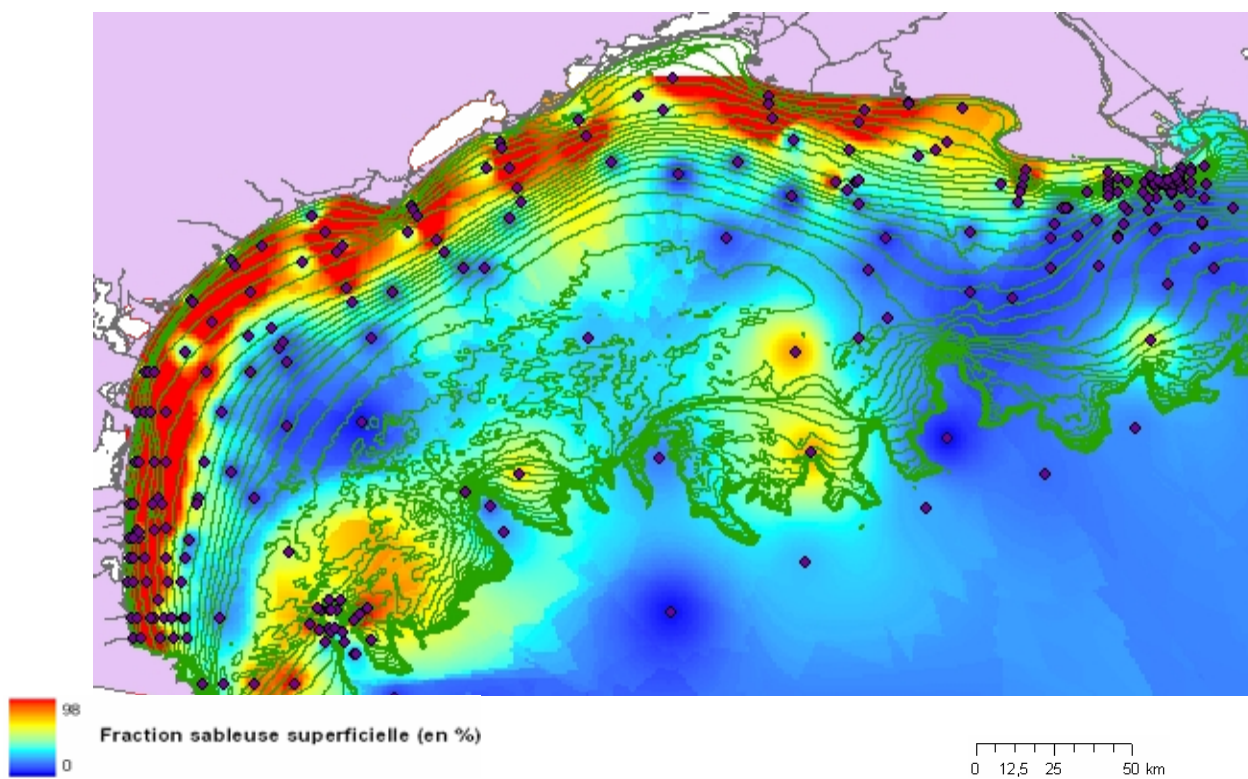
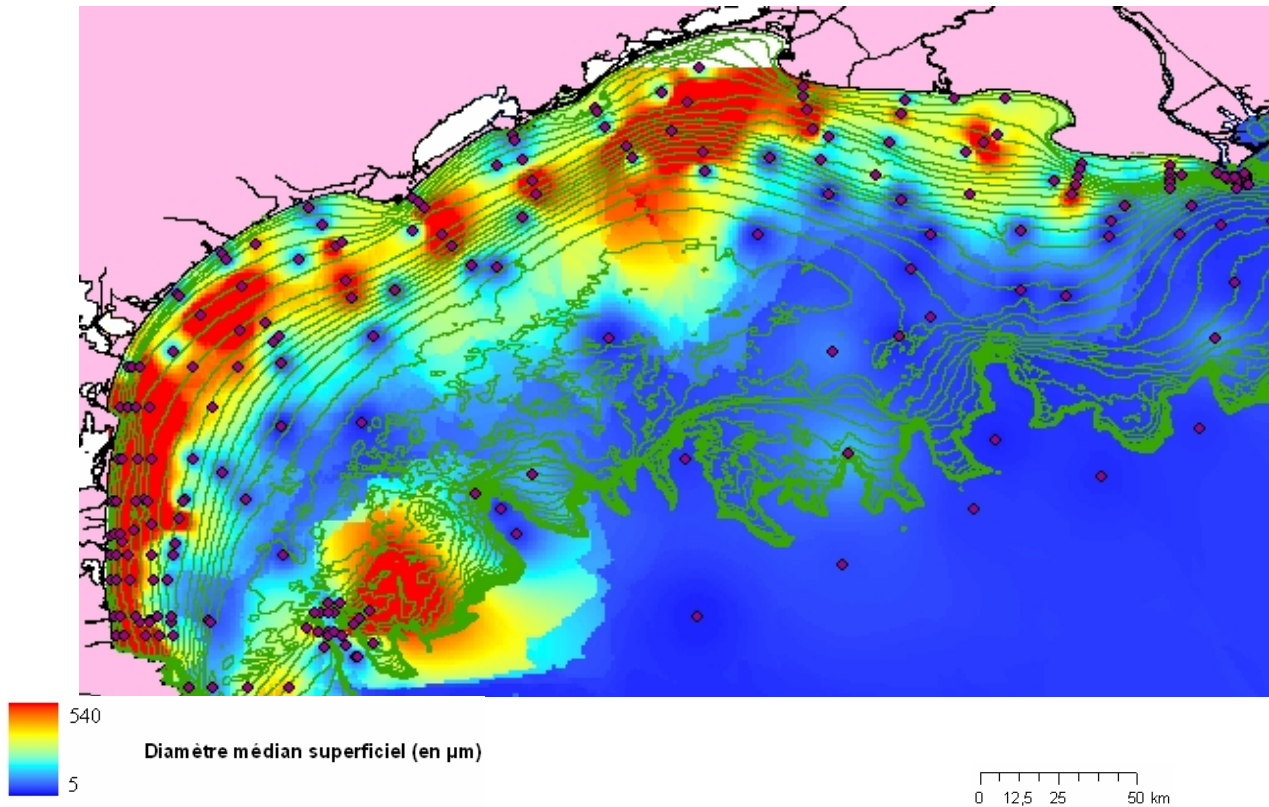


Figure 5.5 : Distribution spatiale de la fraction sableuse de surface (0-1 cm) dans le Golfe du Lion (données recueillies lors des campagnes effectuées entre 2001 et 2008).



**Figure 5.6 : Distribution spatiale du diamètre médian D50 de surface (0-1 cm) dans le Golfe du Lion (données recueillies lors des campagnes effectuées entre 2001 et 2008).**

L'évolution des faciès sédimentaires évoquée par Got et Aloisi (1990) est visible depuis la côte vers la rupture de pente avec un plateau interne (0 à -30 m) sableux (**Figure 5.5**) concomitant à un plateau médian (-30 à -100 m) très vaseux (**Figures 5.3 et 5.4** dont la somme des fractions représente la fraction pélitique). Le plateau externe présente une anomalie sableuse ou sablo-vaseuse (60 % de sable avec un diamètre médian pouvant atteindre 500 µm) dans son granoclassement horizontal au niveau de la rupture de pente et de la partie incisée définissant les canyons sous-marins. Ces sables dits « reliques » sont issus de dépôts littoraux d'âge ante-holocène, lorsque le plateau continental était quasi-aérien. Ils ont pu être délimités géographiquement par les nombreuses missions des programmes nationaux STRATAFORM et internationaux US-EUROSTRATAFORM.

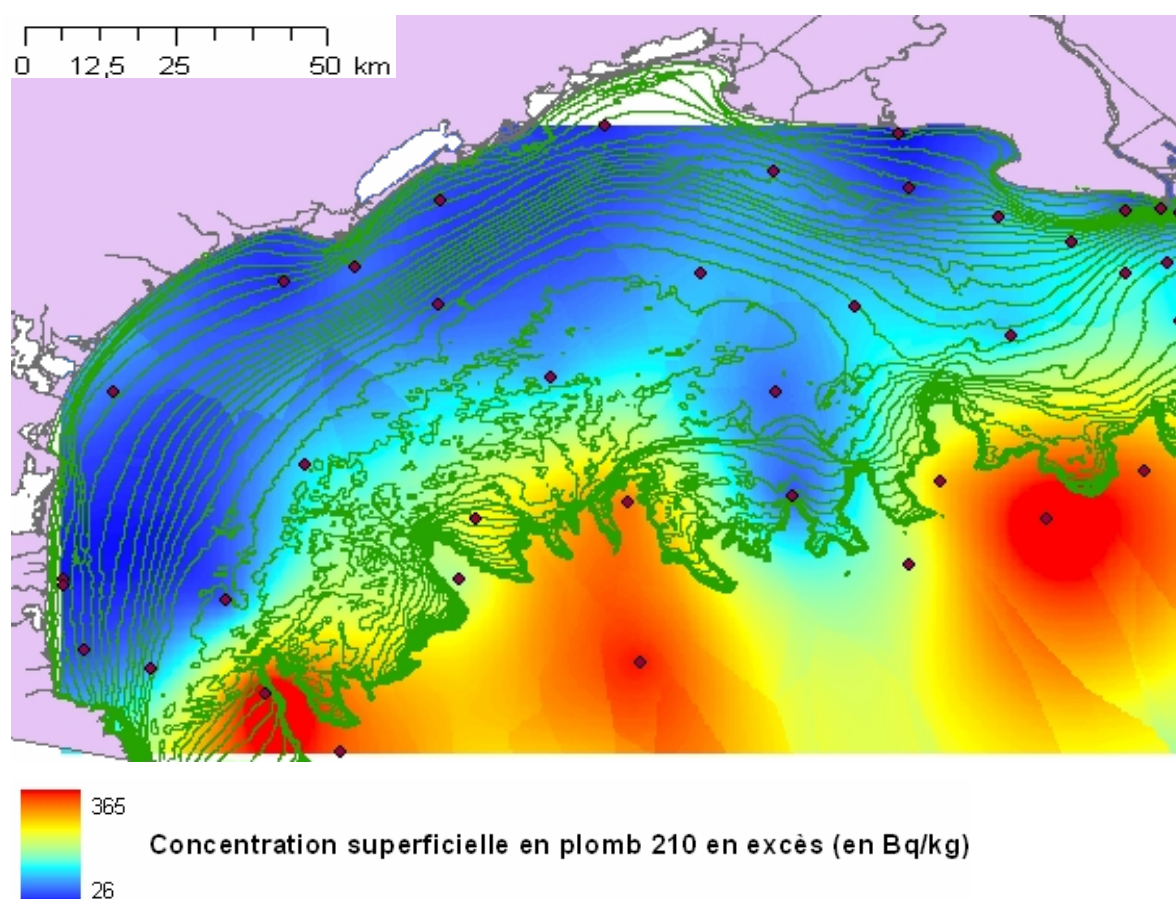
La fraction pélitique dominant le plateau médian est davantage silteuse (comprise entre 4 et 63 µm) qu'argileuse (< 4µm). Cette zone présente deux tailles de sédiments : le diamètre médian reste élevé (50 à 80 µm) entre -30 et -50 m alors qu'il tombe invariablement entre 10 et 15 µm dès l'isobathe -50 m. Cette tendance est plutôt marquée près des embouchures de fleuves, notamment le Petit Rhône, l'Orb et l'Hérault.

Le Grand Rhône, plus importante source de particules du Golfe du Lion, ne présente pas la même physionomie car il débouche sur un prodelta qui ne s'est pas développé sur un vaste plateau continental à pente quasi-nulle. La pente moyenne de la zone prodeltaïque a été évaluée à 5° et l'isobathe -100 m se trouve à une dizaine de kilomètres de l'embouchure du Rhône contre plus de 50 km pour la majeure partie de la côte méditerranéenne française du Golfe du Lion. Les apports fluviaux rhodaniens subissent en outre une dynamique de transport vers l'ouest et le sud-ouest (**voir § 4.3.5.1**) qui entraîne une circulation des particules sur tout le plateau continental du Golfe du Lion et leur évacuation potentielle quand elles rencontrent la tête d'un canyon sous-marin (Durrieu de Madron et al., 1990).

### 5.2.1.2. Cas du plomb 210 en excès

La demi-vie de 22.3 ans permet à sa radioactivité de ne décroître qu'à moyen terme et de ne disparaître réellement qu'au bout d'une centaine d'années (4 à 5 périodes). Miralles et al. (2005) reprirent les travaux de différents auteurs, notamment Radakovitch (1995) et Abassi (1998), pour compléter les données de concentration superficielle en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans le Golfe du Lion. Les mesures qu'ils ont compilées varient de 16 à 333  $\text{Bq.kg}^{-1}$  dans les zones de prodeltas et du plateau continental, et dépasse 600  $\text{Bq.kg}^{-1}$  sur la pente continentale. Une des valeurs enregistrée dans un canyon atteint même 849  $\text{Bq.kg}^{-1}$ . Les sédiments superficiels récoltés durant la campagne REMORA 3 (2002) révèlent des valeurs comprises entre 26 et 365  $\text{Bq.kg}^{-1}$  dans le Golfe du Lion, dont la plupart ne dépassait pas 100  $\text{Bq.kg}^{-1}$  sur le plateau continental (**Figure 5.7**). Les résultats des deux études concordent et montrent l'augmentation de la radioactivité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  avec la profondeur.

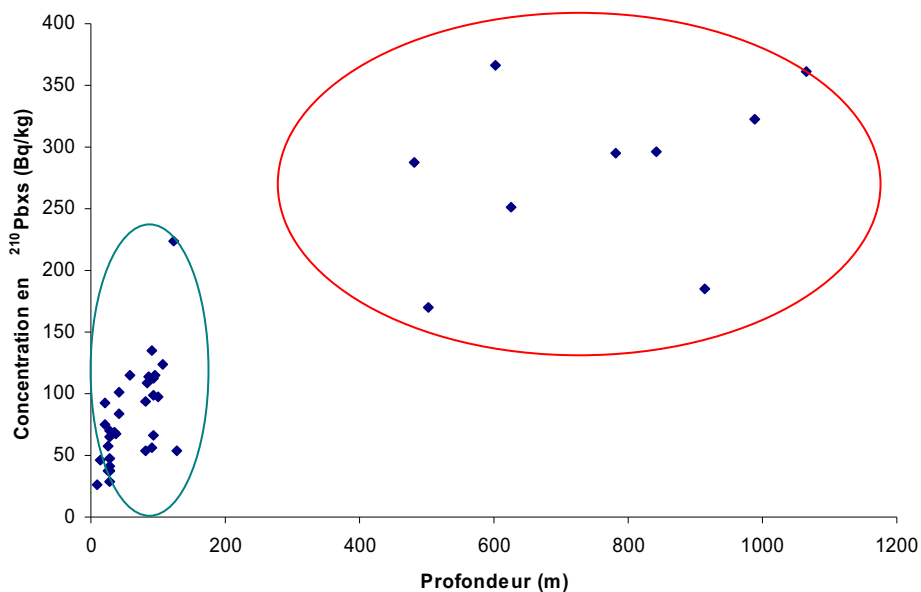
Cet accroissement est imputable au processus physique de scavenging provoquant l'enrichissement en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  des particules en suspension lorsqu'elles arrivent à la base de la colonne d'eau. En outre, un coefficient de corrélation de 88.17 % a été déterminé entre la radioactivité superficielle en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et la hauteur d'eau (**Figure 5.8**).

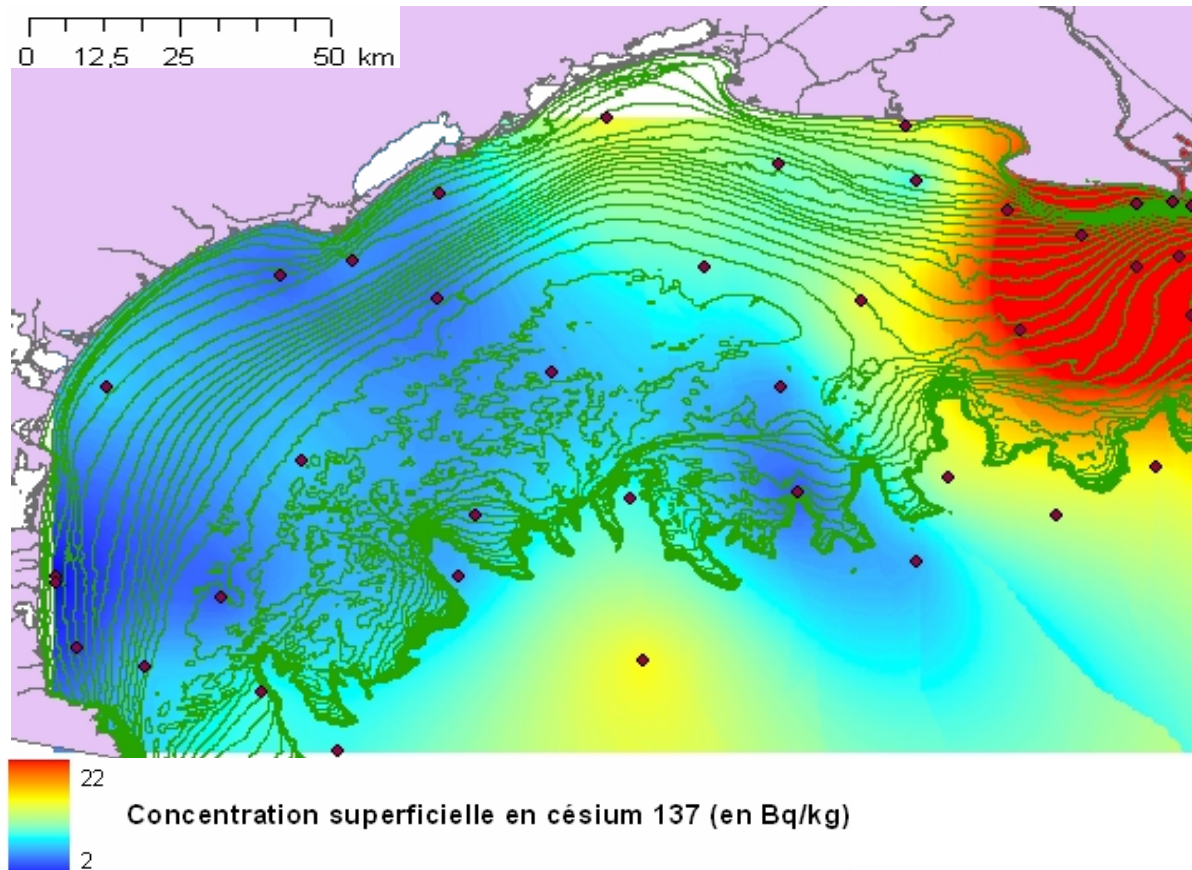


**Figure 5.7 :** Répartition superficielle de la concentration en  $^{210}\text{Pb}$  en excès dans le Golfe du Lion. Données récoltées durant la campagne océanographique REMORA 3 (octobre 2002).



Miralles et al. (2005) ne trouvent pas de corrélation significative entre la profondeur et la concentration en plomb 210 en excès sauf sur le prodelta, mais les **Figures 5.7 et 5.8** ainsi que les données qui ont servi à tracer cette carte, toutes issues de la campagne REMORA 3, tendent à prouver le contraire.

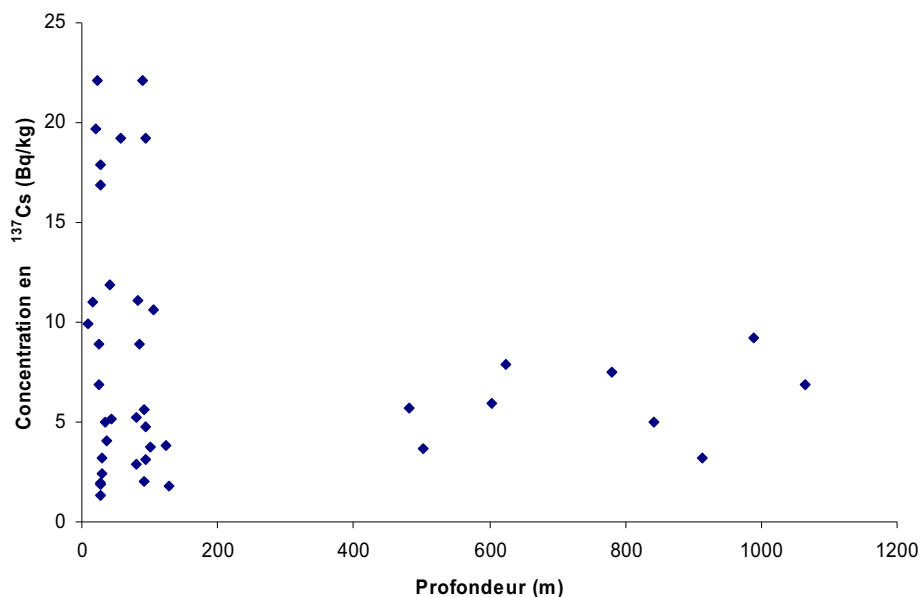




**Figure 5.9 : Répartition superficielle de la concentration en  $^{137}\text{Cs}$  dans le Golfe du Lion. Données récoltées durant la campagne océanographique REMORA 3 (octobre 2002).**

En dessous de 160 m de profondeur, les valeurs de  $[^{137}\text{Cs}]$  semblent être réparties entre 1.3 et 22.1  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  autour d'une droite parallèle à l'axe des ordonnées d'équation  $z = 60$  m.

En revanche, au-dessus de 160 m de profondeur, entre 481 m et 1064 m, les valeurs de concentration semblent être réparties autour d'une droite parallèle à l'axe des abscisses d'équation  $[^{137}\text{Cs}] = 5 \text{ Bq/kg}$



**Figure 5.10 : Evolution de la concentration massique de  $^{137}\text{Cs}$  en fonction de la profondeur. Données issues de la campagne REMORA 3 dans le Golfe du Lion (2002).**

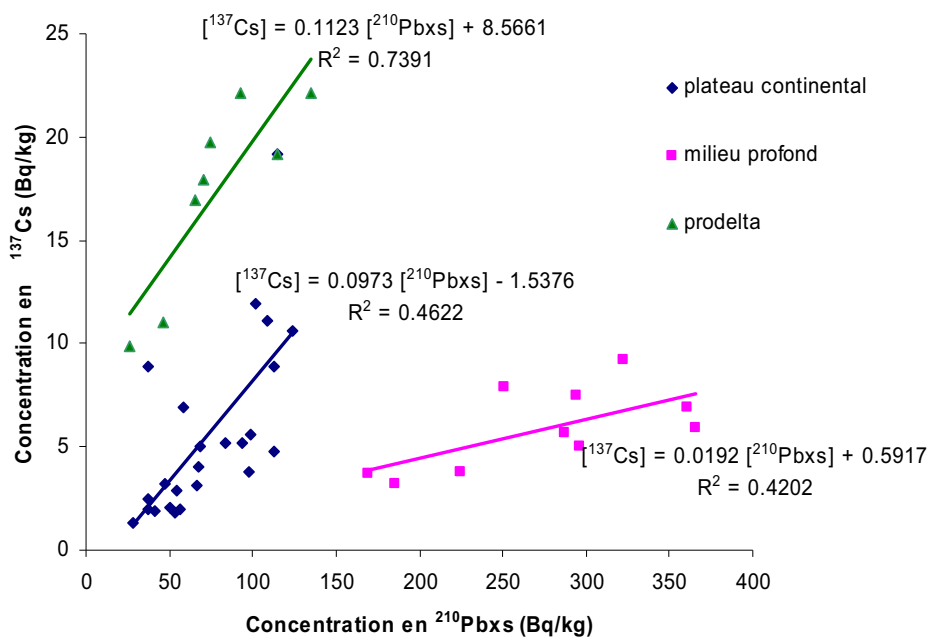
Ces observations signifient que la radioactivité de  $^{137}\text{Cs}$  est très hétérogène sur la zone délimitée par le plateau continental de part et d'autre de l'isobathe 60 m et qu'elle est homogène en milieu profond, aux alentours de 5 Bq.kg<sup>-1</sup>.

Des phénomènes de cascading et de courants gravitaires (turbidites, tempestites) décrits par Durrieu de Madron et al. (1999) et Palanques et al. (2006, 2008) pourraient peut-être expliquer ces valeurs supérieures aux pieds de canyons.

#### 5.2.1.4. Comparaison entre les deux radionucléides

Contrairement au plomb 210 en excès, le césium 137 retrouvé dans les sédiments superficiels du Golfe du Lion témoigne principalement des apports de matières issus du Rhône. Leur répartition dans la partie nord-ouest de la Méditerranée Occidentale est bien différente puisque la quantité de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  augmente avec distance au littoral alors que le  $^{137}\text{Cs}$  se comporte de manière inverse.

En les compartimentant par zones géographiques, à savoir le prodelta, le plateau continental et le milieu profond, les données de la campagne REMORA3 révèlent trois évolutions différentes (**Figure 5.11**).



**Figure 5.11 : Evaluation de la corrélation entre les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans le Golfe du Lion (REMORA 3, 2002). En bleu, les données du plateau continental. En rouge, les données du milieu profond. En vert, les données de la zone sous influence prodeltaïque.**

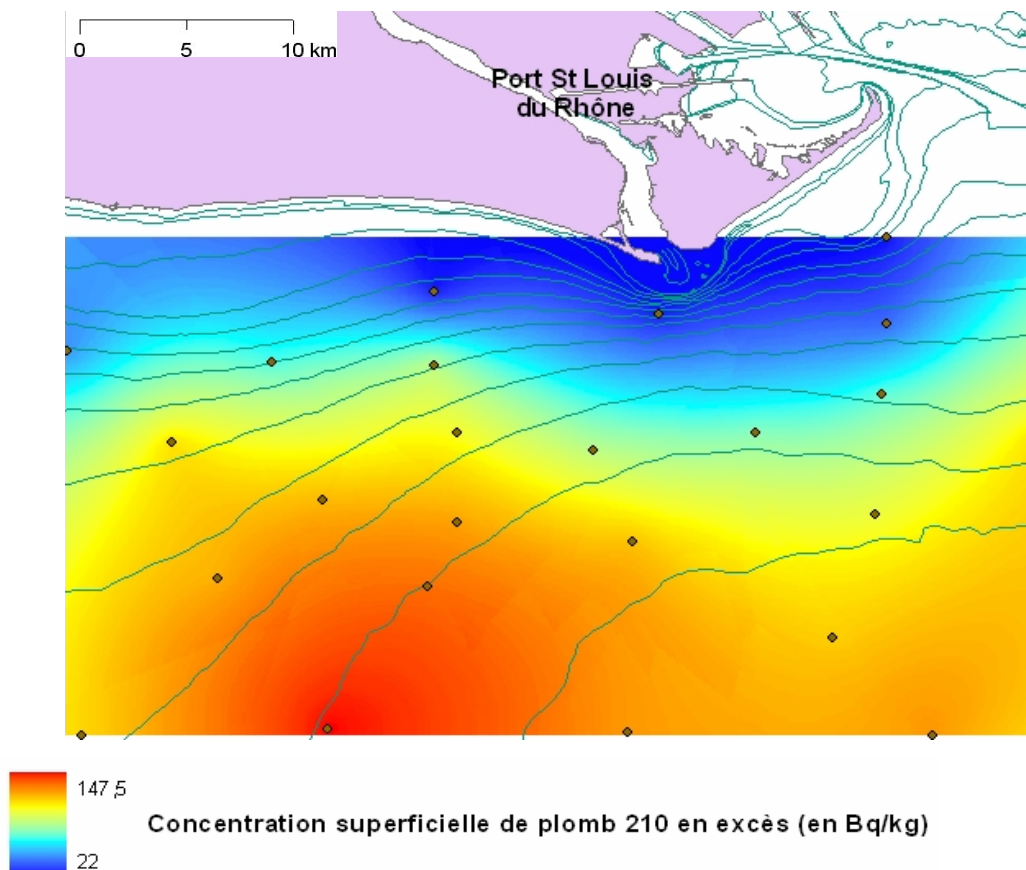
Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est transporté loin car associé par affinité à la fraction fine argileuse et résultant du processus de scavenging (Roussiez et al., 2006) alors que le  $^{137}\text{Cs}$ , dont l'unique source est le Rhône, se dépose plus rapidement puisqu'il s'adsorbe préférentiellement sur des particules argilo-silteuses (Mabit et al., 2008). La corrélation semble satisfaisante à l'échelle du prodelta en raison de l'influence du Rhône.

## 5.2.2. Répartition géographique sur le prodelta du Rhône

La campagne REMORA1, effectuée en 2001, s'est intéressée à la colonne sédimentaire de la zone prodeltaïque rhodanienne jusqu'à 120 m de profondeur vers le large. Les zones superficielles de fortes concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  témoignent de milieux de dépôts préférentiels.

### 5.2.2.1. Cas du plomb 210 en excès

Les résultats recueillis à l'échelle du Golfe du Lion montrent l'importance du processus de scavenging dans la colonne d'eau. Wei et Murray (1992) ont montré l'impact de l'activité biologique et de la turbidité sur ce phénomène physique et ont déterminé sa saisonnalité en évaluant les flux de  $^{234}\text{Th}$  à différentes profondeurs et périodes de l'année dans le Golfe de Dabob (Washington). Affirmant l'affinité des radionucléides d'origine naturelle pour le scavenging, ils laissent entrevoir des résultats analogues entre le  $^{234}\text{Th}$  et le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ .



**Figure 5.12 : Répartition des concentrations superficielles de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur la zone prodeltaïque rhodanienne en 2001 (REMORA 1).**

La proximité de l'embouchure du Rhône fournissant des nutriments nécessaires à la photosynthèse et la présence d'un prodelta formé de particules fines remobilisées sous l'action des vagues apportent donc les conditions requises au processus de scavenging. La concentration en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  du sédiment superficiel croît depuis la proche embouchure du Rhône vers le large, affichant des valeurs variant de 22 Bq.kg<sup>-1</sup> à 150 Bq.kg<sup>-1</sup> au niveau de l'isobathe 120 m (**Figure 5.12**). La forme du dépôt prodeltaïque est épousée par le front de concentration du radioélément. La limite bleu clair représentant la courbe d'isovaleur à 70 Bq.kg<sup>-1</sup> suit les contours de la zone

d'embouchure, tout comme la courbe d'isovaleur à  $100 \text{ Bq.kg}^{-1}$  qui, en outre, coupe perpendiculairement les isobathes jusqu'à 120 m de profondeur. Même si cet effet est en partie du aux paramètres d'interpolation, les valeurs de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  impliquées et leur nombre ( $n = 23$ ) confirment nettement l'influence des apports du Rhône sur la répartition du radioélément sur le plateau.

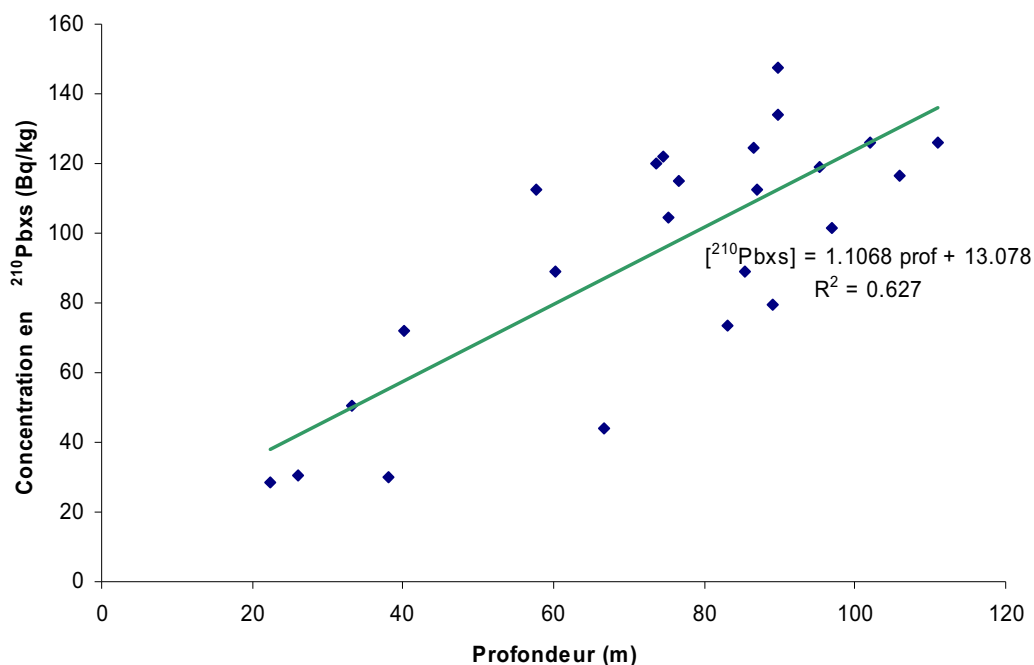
Une zone de fortes concentrations de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est observée à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de l'embouchure du Rhône (**Figure 5.12**). Les courants, majoritairement orientés vers le SW, ont tendance à transporter les sédiments dans cette direction. Ce milieu présente un maximum de concentration dans cette zone définie par la campagne REMORA1. Les valeurs de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  augmentent sans défaut perpendiculairement aux isobathes dans le Golfe du Lion (**Figure 5.7**).

### 5.2.2.2. Equation du scavenging en domaine peu profond

Présentée précédemment à l'échelle du Golfe du Lion, la relation qui lie le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  à la hauteur d'eau se vérifie également sur le prodelta du Rhône (**Figure 5.13**). L'équation de la droite de régression linéaire et les coefficients de corrélation sont très proches de ceux observés lors de l'étude des données de la campagne REMORA3 et s'écrivent sous la forme :

$$[^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}] = 1.1 z + 13.8,$$

avec le couple  $\{a ; b\}$  exprimé par les valeurs  $\{0.68; 39.4\}$  avec  $R = 69.3 \%$  pour REMORA3 et  $\{1.1 ; 13.8\}$  avec  $R = 79.2 \%$  pour REMORA1.



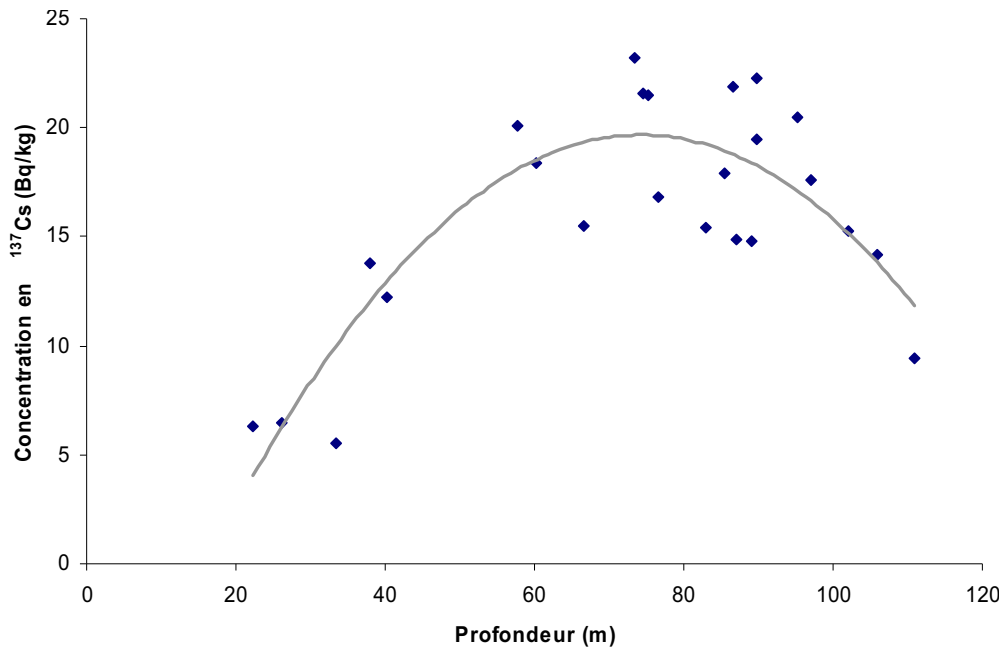
**Figure 5.13 : Evaluation de la corrélation entre la concentration de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et la profondeur sur le prodelta rhodanien d'après les données de REMORA1.**

### 5.2.2.3. Cas du césium 137

Contrairement aux radionucléides d'origine naturelle, le césium 137 n'affiche pas de tendance au scavenging, même en milieu profond (**Figures 5.9 et 5.10**).

La concentration de  $^{137}\text{Cs}$  ne diminue pas en fonction de la profondeur mais en fonction de la distance à la source. Comme la profondeur augmente avec la distance à l'embouchure, la concentration de  $^{137}\text{Cs}$  suit la même évolution en fonction des deux paramètres (**Figure 5.14**).

Le profil  $[^{137}\text{Cs}] = f(z)$  est croissant entre 20 et 80 m de profondeur puis une décroissance s'opère jusqu'à 120 m. Le  $^{137}\text{Cs}$  est apporté en quantités massives par le Rhône jusqu'à l'isobathe -80 m, distance moyenne d'étendue du panache turbide rhodanien et du néphéloïde de fond évoquée au § 4 (**Figures 4.11 ; 4.12 ; 4.14 ; 4.17 ; 4.20**). Au-delà, les apports du Rhône s'estompent vers le Golfe du Lion.



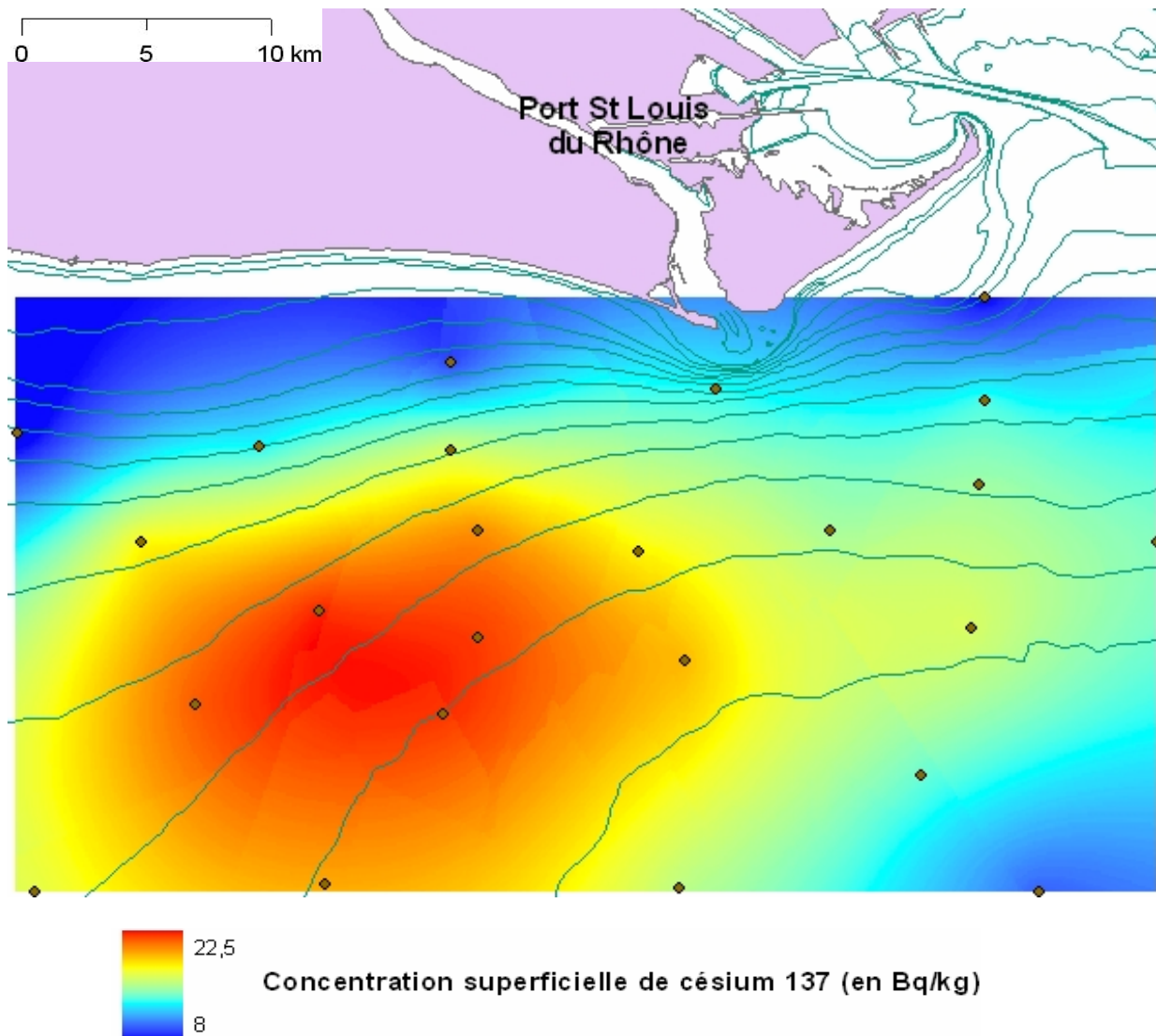
**Figure 5.14 : Concentration en  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments en fonction de la profondeur sur le prodelta rhodanien d'après les données de REMORA1.**

Les courants principalement orientés vers le sud-ouest influencent les dépôts de sédiments et, de la même manière, les radioéléments associés. Les concentrations superficielles de  $^{137}\text{Cs}$  (0-1 cm) les plus importantes sont localisées sur la partie sud-ouest du prodelta en 2001 (**Figure 5.15**). Parmi les 11 stations de prélèvements situées dans l'axe de l'embouchure (orienté NW-SE) et à l'est, une seule station présente une concentration en  $^{137}\text{Cs}$  supérieur à 11  $\text{Bq.kg}^{-1}$ , contre 10 sur 12 à l'ouest. La limite longitudinale est clairement dessinée sur la **Figure 5.15**.

Un pool elliptique de valeurs dépassant 20  $\text{Bq.kg}^{-1}$  se distingue sur un fond de valeurs comprises entre 5 et 11  $\text{Bq.kg}^{-1}$ . Cette zone est distante d'une dizaine de kilomètres au sud-ouest de l'embouchure et limitée par les isobathes -60 m et -100 m sur la latitude.

Ce stock superficiel de  $^{137}\text{Cs}$  s'étend sur une surface de 150  $\text{km}^2$  environ, de 43°10'N à 43°16'N et de 4°41'E à 4°50'E. Il constitue une zone délimitée par des fortes valeurs de concentrations en radioéléments, malgré des taux de sédimentation étudiés dans la suite de ce travail qui sont bien plus faibles qu'à la proche embouchure du Rhône (d'un facteur de l'ordre de 50 à 100). Cette zone ne constitue néanmoins pas réellement un milieu préférentiel de

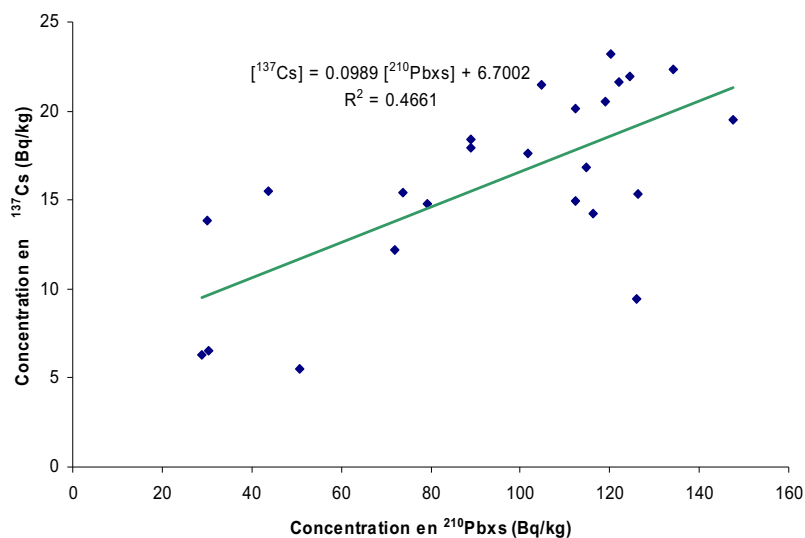
dépôt de radioéléments ou de contaminants lorsque ceux-ci ont échappé au piège à sédiments représenté par le prodelta du Rhône. Le bilan de  $^{137}\text{Cs}$  réparti dans cette zone est plus amplement abordé dans la suite de cette étude.



**Figure 5.15 :** Répartition des concentrations superficielles de  $^{137}\text{Cs}$  sur la zone prodeltaïque rhodanienne (REMORA 1, 2001).

#### 5.2.2.4. Corrélation entre les radionucléides sur le domaine prodeltaïque

Les deux radioéléments montrent une bonne corrélation ( $R = 68.3\%$ ) et appuient les résultats mis en évidence précédemment. En effet, les coefficients de la droite de régression de la **Figure 5.16** sont très proches de ceux affichés par la droite de régression de la **Figure 5.11** représentant les valeurs du domaine prodeltaïque.



**Figure 5.16 : Evaluation de la corrélation entre les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur le prodelta. Données de REMORA 1 (2001).**

Les deux coefficients directeurs sont proches de 0.1 (0.112 et 0.099) et la constante s'approche de 7.5 (6.7 et 8.6), alors que les équations des deux autres domaines, à savoir le plateau continental et le milieu profond, sont très différentes. La différence entre les coefficients de corrélation (68.3 % et 86 %) sont exclusivement dus au nombre d'échantillons plus élevé pendant la campagne REMORA1 ( $n = 24$  contre  $n = 8$ ). Ces deux radioéléments restent très corrélés aussi bien en surface que dans la colonne sédimentaire où ils affichent des coefficients de corrélation proches de 90 %, expliqués par la proximité à la source commune représentée par le Rhône.

#### 5.2.2.5. Comparaison avec la distribution des isotopes du plutonium

La répartition des isotopes 238 et 239, 240 du plutonium, autre radioélément d'origine anthropique, a été étudiée à l'embouchure du Rhône par Lansard (2005). Les apports du fleuve marqués par un rapport isotopique  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  proches de 0.3, correspondant à la signature radioisotopique des rejets de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule, se retrouvent stockés à la proche embouchure (**Figure 5.17**). Le plutonium originaire de Marcoule contribue respectivement de 63 à 97 % du  $^{238}\text{Pu}$  et de 12 à 70 % du  $^{239,240}\text{Pu}$  mesurés dans les sédiments de surface. Une structure bilobée des apports fluviaux (lobe WSW et lobe SSE) reflétant la dispersion du matériel particulaire rhodanien (**Figure 5.17**) a déjà été décrite par Fernandez (1984) et atteste de l'exportation préférentielle du matériel particulaire en direction du sud-ouest et une exportation secondaire vers le sud-est. La zone d'accumulation préférentielle des sédiments du Rhône, ainsi que des radioéléments associés, se situe donc à la proche embouchure du Rhône d'après les valeurs de rapport isotopique du Pu.

Les isotopes 238, 239 et 240 du plutonium n'ont pas la même répartition à l'embouchure du Rhône, comme le témoigne la **Figure 5.18**. Le  $^{239,240}\text{Pu}$  est concentré dans la même zone que le  $^{137}\text{Cs}$ , c'est-à-dire à 10 km environ au SW de l'embouchure. En revanche, les valeurs maximales de concentration du  $^{238}\text{Pu}$  se situent au débouché du fleuve avec une zone secondaire de fortes concentrations semblable à celles du  $^{239,240}\text{Pu}$  et du  $^{137}\text{Cs}$ . Le pool elliptique de sédiments marqués par le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et les isotopes du Pu au sud-ouest de l'embouchure correspond vraisemblablement à une zone de dépôts anciens et l'absence de marquage superficiel à la proche embouchure serait due au recouvrement des dépôts anciens par des dépôts frais moins marqués.



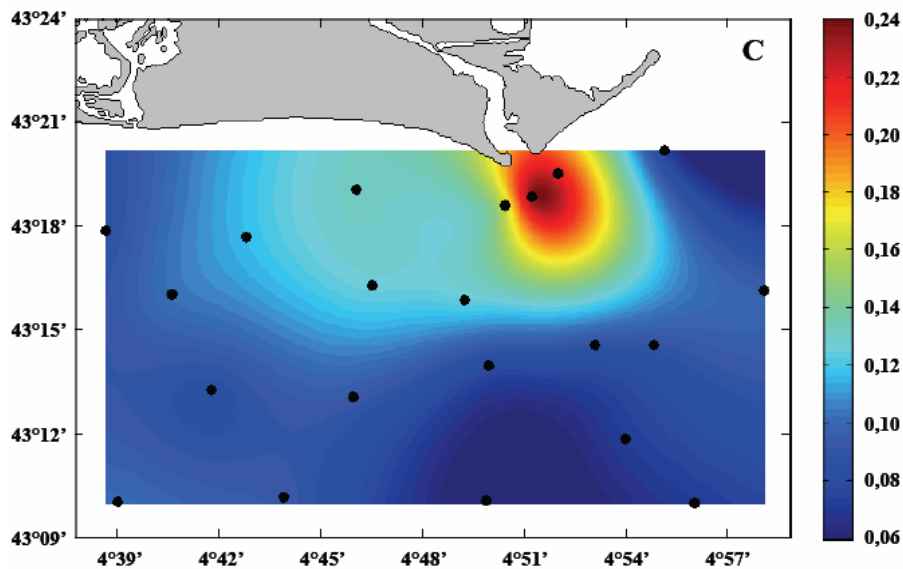


Figure 5.17 : Distribution spatiale du rapport d'activités  $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$  dans les sédiments de surface face à l'embouchure du Rhône (2001). Carte tirée de Lansard (2005).

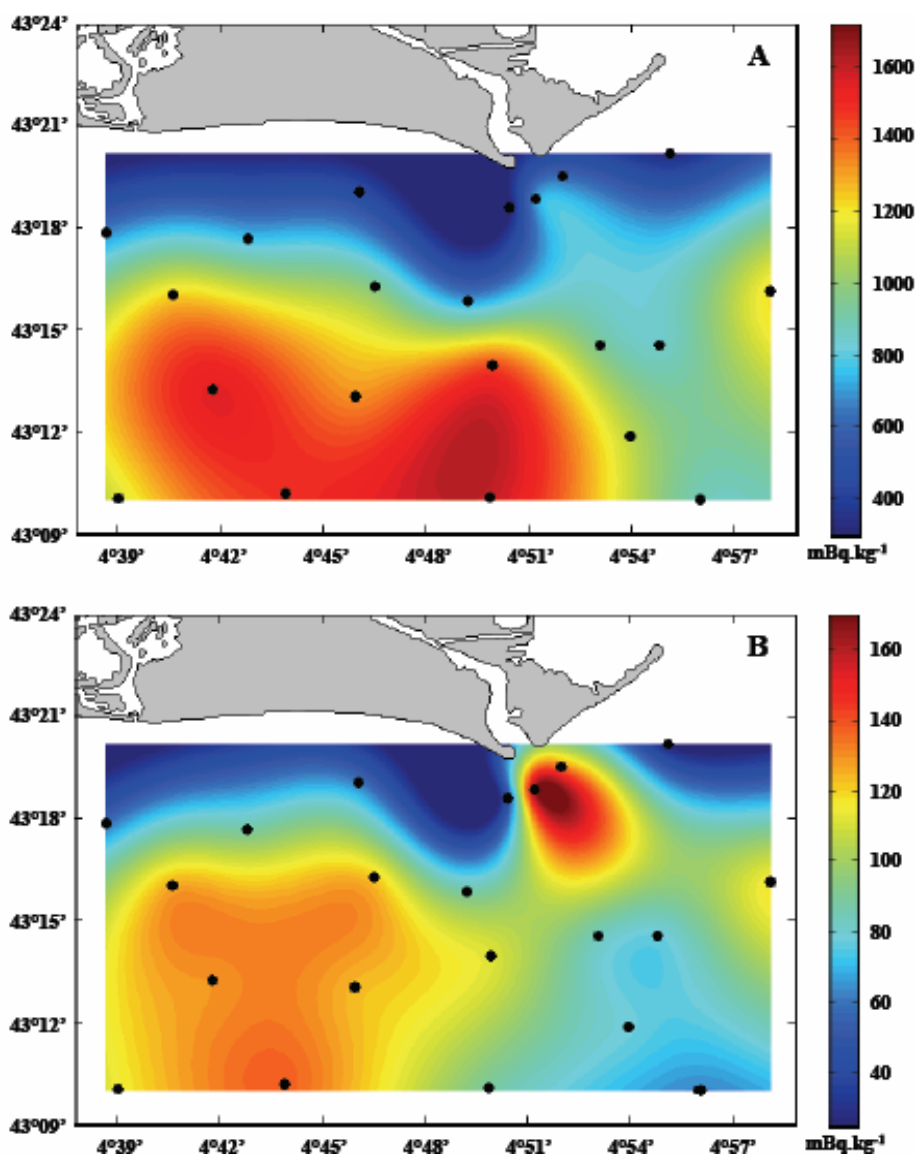


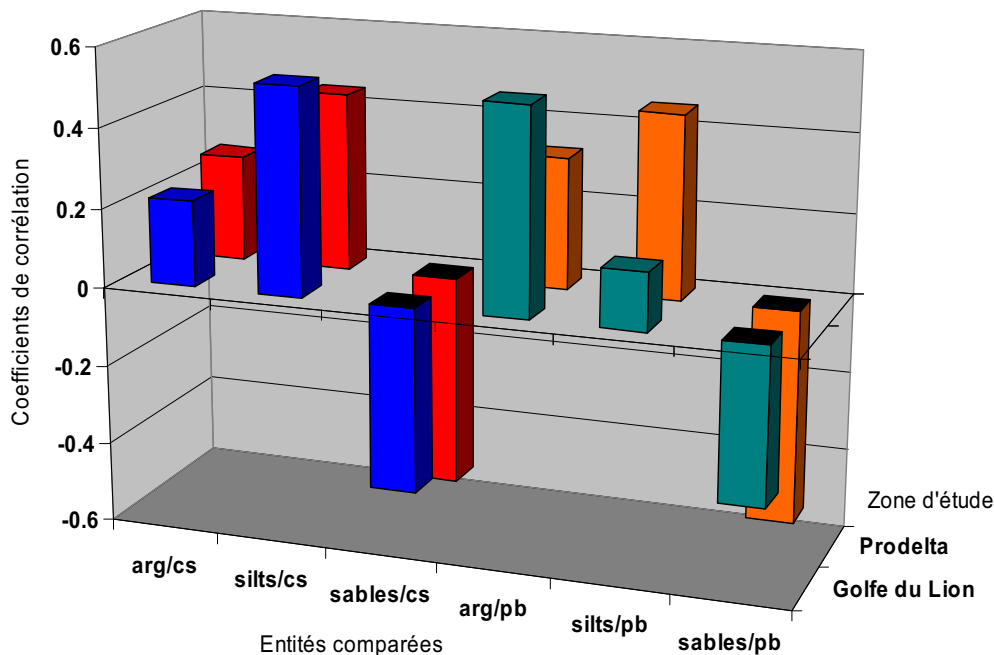
Figure 5.18 : Distribution spatiale des activités en  $^{239,240}\text{Pu}$  (A) et  $^{238}\text{Pu}$  (B) dans les sédiments de surface face à l'embouchure du Rhône (2001). Cartes tirées de Lansard (2005).

Cette répartition, notamment le pool de fortes activités du SW, ressemble beaucoup à celle du  $^{137}\text{Cs}$  (**Figure 5.15**). Les distributions du césium et du plutonium dans les sédiments de surface à l'embouchure du Rhône présentent de nombreuses similitudes alors qu'ils ont des comportements physico-chimiques très différents, particulièrement au niveau de la mobilité dans la colonne sédimentaire et de leur remobilisation. Même si une fraction du césium est susceptible de se désorber facilement, une autre est irréversiblement associée aux particules et forme un bon traceur des apports solides du Rhône (Calmet et Fernandez, 1990).

### 5.2.3. Affinité des radionucléides avec les classes granulométriques des sédiments

La littérature générale fait référence à une affinité particulière entre les radionucléides et les particules fines (Ancellin et al., 1979; Guéguéniat et al., 1976 b) en raison de la plus grande surface de contact offerte par les argiles notamment. Les résultats suivants dissocient les sédiments superficiels fraîchement déposés par les masses d'eau turbides et les sédiments de la colonne sédimentaire ayant subi différentes transformations physico-chimiques.

Les données de granulométrie et de spectrométrie à disposition sur l'ensemble du Golfe du Lion et du prodelta, c'est-à-dire toutes les campagnes entre 2001 et 2007, permettent de nous renseigner sur la corrélation existant potentiellement entre les radioéléments  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et la nature du sédiment superficiel. La dynamique sédimentaire est différente entre le prodelta rhodanien, influencé par les apports particulaires permanents du fleuve et par les vagues, et le reste du Golfe du Lion où les MES ne sont affectées que par leur vitesse de chute et les courants marins. Les principaux vecteurs de transport des radioéléments sont donc susceptibles d'évoluer en fonction du milieu.



**Figure 5.19 :** Comparaison des coefficients de corrélation entre la nature des sédiments de surface et deux radioéléments ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ) selon les zones d'étude (prodella et Golfe du Lion). arg = argiles, cs =  $^{137}\text{Cs}$  et pb =  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Données de campagnes réalisées entre 2001 et 2007.

Les résultats de la **Figure 5.19** attribuent une corrélation entre les radioéléments et la fraction fine ( $< 63 \mu\text{m}$ ). La corrélation demeure satisfaisante et uniforme sur le prodelta et le Golfe du Lion entre le  $^{137}\text{Cs}$  et la classe silteuse avec R compris entre 45 % et 55 %. Les argiles semblent montrer moins d'affinité avec le  $^{137}\text{Cs}$  qu'avec le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , surtout dans le Golfe du Lion. En effet, ce dernier paraît statistiquement très liés aux silts dans le domaine prodeltaïque puis aux argiles dans le Golfe du Lion en général. Ces résultats s'expliquent notamment par la présence décruée de silts avec la distance par rapport à l'embouchure alors que les argiles, plus fines et plus légères, sont transportées très loin en suspension. Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , adsorbé sur les particules fines et soumis au processus de scavenging, se retrouve donc en grande quantité à des profondeurs où seules des argiles peuvent se déposer, à moins d'écoulements gravitaires (turbidites, tempestites).

En revanche, les sables ne paraissent avoir aucune corrélation avec les radioéléments avec des coefficients négatifs. La surface de contact des grains de sable est moins importante que celle des argiles ou des silts, et leur réseau cristallin n'est pas composé de feuillets permettant à des éléments extérieurs de diamètre adéquat de s'y insérer. Néanmoins, il est reconnu qu'à de rares exceptions, comme l'absence de matériels fins ou la présence d'une gangue de matière organique autour des particules sableuses, les radioéléments trouvent des affinités avec les sables (Solovitch-Vella et al., 2006).

La relation entre les radioéléments,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  en l'occurrence, et la fraction fine n'est pas toujours observée. Elle est particulièrement complexe à l'embouchure et masquée par des facteurs environnementaux (variations de débits du Rhône) et par les fluctuations des rejets de radioéléments. La normalisation des radioéléments la fraction sédimentaire fine a permis de délimiter des zones de dépôt des radionucléides identiques à celles sans la normalisation.

### 5.3. Distribution temporelle

Les corrélations sont très difficiles à établir avec certitude au niveau des stations très proches de l'embouchure car les signaux sont très bruités en raison de tous les facteurs environnementaux qui les influencent, notamment les variations des apports rhodaniens. Les relations radionucléides/sédiments sont aussi moins évidentes en profondeur qu'en surface en raison des processus de compaction et des phénomènes de diffusion verticale et latérale. Les sables et les argiles/silts possèdent des propriétés mécaniques et hydrauliques différentes mais complémentaires dans le piégeage de substance. Ils sont respectivement poreux et imperméables, ce qui permet aux eaux interstitielles de se diffuser. Avec des forts taux de sédimentation et une remobilisation restreinte, le prodelta rhodanien constituerait ainsi une importante zone de piégeage de contaminants radioactifs.

#### 5.3.1. Evolution temporelle des dépôts de radioéléments dans le Golfe du Lion

La colonne sédimentaire enregistre les apports classiques, les signaux des événements météoclimatiques et des activités humaines. Elle permet un traçage temporel, notamment via l'étude de la nature des sédiments

apportés et de divers traceurs comme les pollens, les radionucléides, les métaux lourds et composés chimiques, etc.

Campagne	Station	Long. (DD)	Lat. (DD)	Prof (m)	Campagne	Station	Long. (DD)	Lat. (DD)	Prof (m)
CARMEX	US04Kb	4.86653	43.31728	25	REMORA3	2002MT31	3.72458	42.82348	124
	US14Kb	4.83535	43.31202	23.5		2002MT31bis	3.69795	42.72705	503
	USCh20m	4.85267	43.31135	23		2002MT33	3.14653	43.02615	34
	US19	4.40140	43.44017	9		2002MT34bis	3.32563	42.69202	91
	USHCh20m	4.85117	43.31150	22		2002MT35	3.06478	42.71545	27
	US18	4.41970	43.35245	28		2002MT37 bis	3.20622	42.58247	81
	USRous	4.84107	43.31025	29		2002MT38bis	3.38948	42.54182	603
	US19bis	4.40105	43.44203	7.3		2002MT39bis	3.50908	42.44833	843
USCh30m	4.85488	43.31310	49	2002MT352		3.06380	42.72783	27	
SED2	2004USCh30m	4.85375	43.31275	30		2002MT353	3.15228	42.71192	51
	2004USCh20m	4.85345	43.31413	22		2002Chenal20m	4.85353	43.31420	21
	2004US01ter	4.66805	43.26667	58		2002hchenal20m	4.85302	43.31402	22
	2004USRous	4.84098	43.31027	32		2002MT04kb	4.86778	43.31805	27
	2004USCh2	4.86083	43.31548	23		2002MT14kb	4.83652	43.31315	27
	2004US353	3.15203	42.71190	52		2002MT16kb	4.82385	43.32032	15
	2004US16Kb	4.82405	43.32067	14	2002MTPlanier1	5.22128	43.09513	561	
	2004US14Kb	4.83630	43.31307	23	2002MT36	3.09980	42.61463	50	
BOBORHONE2	2004BF06	4.86692	43.31678	27	2002Chenal30m	4.85383	43.31267	35	
	2004BF05	4.85328	43.31160	26.5	2001Kb01	4.89275	43.33390	16.5	
	2004BF07accu	4.86863	43.31060	43	2001Kb02	4.87587	43.33317	8.8	
BOBORHONE1	2003BF09Ch2	4.31425	43.31425	29	2001Kb03	4.89337	43.32515	32.2	
	2003BF07	4.31060	43.31060	45	2001Kb04bis	4.86858	43.31693	29.3	
	2003BF05Ch30	4.31160	43.31160	28	2001Kb05	4.89177	43.30877	57	
	2003BF06MT04kb	4.31160	43.31160	26.5	2001Kb06	4.87677	43.30008	62.7	
	2003-8-Ch1	4.31450	43.31450	27	2001Kb07	4.89202	43.29213	71.2	
	2003BF13	4.29505	43.29505	68	2001Kb08	4.85800	43.29167	75	
REMORA3	2002MT01	4.91422	43.24120	96	2001Kb09	4.83343	43.28335	74.7	
	2002MT01bis	4.76762	43.31752	26	2001Kb10	4.81000	43.29250	69	
	2002MT01ter	4.67822	43.26702	57	2001Kb11	4.83133	43.29950	62	
	2002MT02	4.85427	43.13945	106	2001Kb12	4.81250	43.30867	47	
	2002MT02bis	4.76457	43.21808	90	2001Kb13	4.78248	43.31127	38.2	
	2002MT03	4.82160	43.04768	112	2001Kb14bis	4.83298	43.31230	26	
	2002MT04bis	4.79692	42.90065	781	2001Kb15	4.83075	43.31642	29.3	
	2002MT05	4.56410	43.30538	41	2001Kb16	4.82352	43.32023	12.5	
	2002MT06	4.58199	43.11754	83	2001Kb17	4.85797	43.29185	69.7	
	2002MT08bis	4.63795	42.82248	1064	2001KbRous	4.85033	43.30850	45	
	2002MT09	4.40242	43.44125	9	2001MTROUS	4.84200	43.31033	34	
	2002MT09x	4.83235	43.23277	95	2001MT01	4.91783	43.33617	22	
	2002MT10	4.42057	43.35328	28	2001MT02	4.91792	43.30671	66	
	2002MT11	4.33345	43.16310	86	2001MT03	4.91630	43.28278	81	
	2002MT12bis	4.46913	42.88230	625	2001MT04	4.96667	43.26667	87	
	2002MT13bis	4.43390	42.76698	913	2001MT05	4.91393	43.24211	97	
	2002MT14	4.20135	43.38083	43	2001MT06	4.90000	43.20000	106	
	2002MT15	3.93337	43.45217	25	2001MT07	4.93333	43.16667	111	
	2002MT16	4.08583	43.21787	92	2001MT09	4.83317	43.23250	95	
	2002MT17	4.20587	43.02637	93	2001MT10	4.76517	43.21733	90	
	2002MT18bis	4.23313	42.85880	129	2001MT11	4.73171	43.16886	90	
	2002MT19	4.22250	42.67570	1133	2001MT12	4.65000	43.16667	75	
	2002MT20	3.66782	43.33348	29	2001MT13	4.69510	43.22038	74	
	2002MT21b	3.53388	43.22558	37	2001MT14	4.67983	43.26650	57	
	2002MT22	3.41735	43.20488	29	2001MT16	4.71342	43.29385	40	
	2002MT23bis	3.35033	43.17777	31	2001MT17	4.76750	43.31800	26	
	2002MT24	3.66648	43.16642	81	2001MT18	4.76695	43.29265	60	
	2002MT25	3.84717	43.04853	100	2001MT19	4.77472	43.26971	75	
	2002MT26bis	3.96988	42.85067	481	2001MT20	4.82037	43.26388	85	
	2002MT27bis	3.98942	42.59253	988	2001MT21	4.87418	43.26981	89	
	2002MT28	3.28018	43.20357	20	2001MT22	4.73003	43.24679	73	
	2002MT29bis	3.45093	42.91068	93	2001MT23	4.77496	43.23924	87	

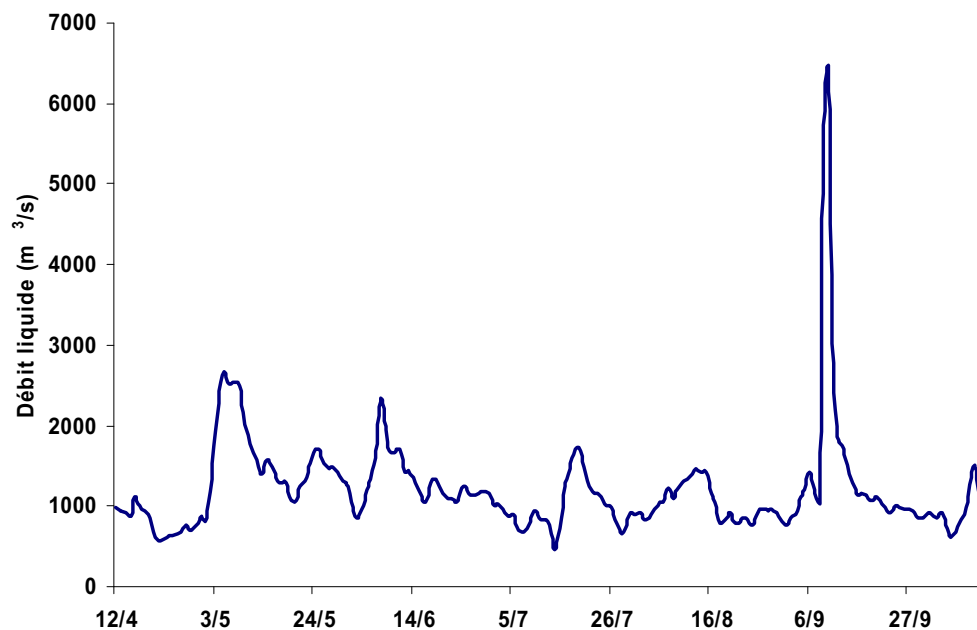
**Tableau 5.5 : Coordonnées et profondeurs des stations de prélèvements échantillonnées entre 2001 et 2007 sur le Golfe du Lion.**

Le plateau continental du Golfe du Lion, ainsi que nous le verrons dans le chapitre § 5.4, est une zone de faible accumulation en comparaison avec le prodelta rhodanien et les autres embouchures fluviales. Les dépôts sédimentaires diminuent avec la profondeur et la distance par rapport aux sources particulières. Le **Tableau 5.5** récapitule les coordonnées et profondeurs des stations de prélèvement des missions opérées entre 2001 et 2007 afin de situer plus précisément les contextes de sédimentation ainsi que les profils granulométriques et de radioéléments associés.

La campagne REMORA3, qui s'est déroulée en octobre 2002, a permis d'étudier l'ensemble du Golfe du Lion, y compris la zone prodeltaïque du Rhône.

### 5.3.1.1. Zone sous influence rhodanienne

Le Rhône influence le transport et les dépôts sédimentaires sur plusieurs dizaines de kilomètres depuis son embouchure par l'intermédiaire de son panache de surface dont les paramètres physiques et dynamiques ont été analysés dans différentes études (Thill et al., 2001; Broche et al., 1998). Le plateau continental est assez étroit au droit de l'estuaire du Grand Rhône (**Figure 1.2**) et les profondeurs s'accroissent considérablement, laissant place à des canyons sous-marins dont la morphologie ne facilite pas les dépôts stratifiés mais plutôt les faciès d'écoulements gravitaires du type turbidites ou tempestites.



**Figure 5.20 : Enregistrement du débit du Rhône en Arles durant les 6 mois précédant la campagne REMORA3 qui a débuté le 12 octobre 2002.**

La proximité de l'embouchure du Rhône et les faibles profondeurs expliquent la présence d'une granulométrie variée jusqu'à l'isobathe 50 m environ. Une fraction fine composée de silts et d'argiles domine statistiquement la composition des carottes proches du littoral comme 2002MTChenal30, 2002MTChenal20 ou 2002MTHChenal20 (80 % en moyenne) mais une fraction grossière sableuse prend également une part importante (20 %), voire prépondérante à certaines profondeurs puisqu'elle peut atteindre 60 % de la granulométrie d'un horizon sédimentaire (2002MTChenal20m entre 15 et 20 cm de profondeur par exemple). Ces variations témoignent d'un

changement du contexte hydrodynamique ambiant, probablement marqué par des événements de crues et/ou de tempêtes (**Figure 5.20**). Les pics sableux présents sur les profils des 5 stations les plus proches de l'embouchure, à savoir MT16Kb, MTChenal30m, MTChenal20m, MTHChenal20m et MT04Kb (**Figure 5.21**), pourraient correspondre à la crue survenue un mois auparavant avec un débit du Rhône qui a atteint  $6440 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (**Figure 5.20**). Présents à différentes profondeurs puisqu'ils apparaissent respectivement à 8.5 cm, 7 cm, 16 cm, 12 cm et 9 cm, ils attestent de l'hétérogénéité de l'accumulation sédimentaire sur le prodelta. Notons que la **Figure 5.21**, comme les suivantes, est agencée de telle manière que les stations les plus occidentales sont à gauche, les plus orientales à droite, les plus septentrionales en haut et les plus méridionales en bas. Les zones de plus forte accumulation sédimentaire restent au droit et proches de l'embouchure, puisque si ce pic sableux marque un même événement, la quantité de matière déposée varie du simple au double des stations localisées latéralement. Les profils de radioéléments révèlent des variations importantes relativement concomitantes avec les variations de sables (**Figure 5.22**). Des points d'inflexion à  $5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  faisant la transition entre une rapide baisse et une rapide hausse de la concentration en radioéléments apparaissent sur les profils des stations MTChenal20m, MTChenal30m et MTHChenal20m. Les profondeurs de ces points où la tangente à la courbe est parallèle à l'axe des ordonnées, correspondant à l'effet de dilution, sont identiques à celles répertoriées sur les profils granulométriques, c'est-à-dire à 8.5 cm, 7 cm, 16 cm, 12 cm et 9 cm. Les deux courbes de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ont la même évolution et sont presque confondues en ajustant les échelles de tracé. Elles confirmeraient donc l'hypothèse que ces inflexions correspondent à l'enregistrement de la crue subite du 10 septembre 2002. En prenant comme signal de crue la base du pic de concentration en radioéléments correspondant à la phase de dépôt syn-crue (synchrone avec la crue), le taux d'accumulation mensuel serait évalué à 21 cm pour MTChenal20m, 13 cm pour MTHChenal20m et 11 cm pour MTChenal30m. L'augmentation soudaine du débit du Rhône (multiplié par 7) a entraîné la diminution de la concentration en radioéléments d'un facteur 4 à 5 au niveau des stations d'embouchure du fleuve. Les apports post-crues sont plus concentrés en radioéléments que les sédiments ante-crues selon un rapport 1.5 ( $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ).

Ces augmentations de radioactivité pourraient être dues à la forte remise en suspension de sédiments marqués par des dépôts plus anciens et à leur dépôt en fin de crue. Des niveaux légèrement supérieurs sont également trouvés aux stations latérales MT16Kb et MT04Kb dont les profils de radionucléides et de taille de grains ne correspondent pas aussi bien que ceux de la proche embouchure car les points de changement de sédimentation ne sont pas systématiquement synchrones avec ceux de variation de concentration. Aucun réel pic de dilution de  $^{137}\text{Cs}$  à  $5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  n'apparaît au sommet des profils mais plutôt en base à 25-30 cm de profondeur. Les extrema sableux et de faible radioactivité ne sont donc pas synchrones. Néanmoins, l'horizon grossier superficiel correspond à peu près à un creux à  $10 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  dans les courbes de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Il est très difficile d'attribuer ces dépôts sableux au même événement que les stations de proche embouchure et de conclure sur les taux d'accumulation.

Les stations plus éloignées, MT01ter, MT02bis, MT02 et MT09X, situées entre 50 et 100 m de profondeur en périphérie du prodelta, possèdent des faciès sédimentaires beaucoup plus fins avec 90 % de pélites en moyenne et 10 % de sables. Les proportions moyennes granulométriques sont assez uniformes avec 20 % d'argiles, 50 % de silts fins et 20 % de silts grossiers. Les profils de radioéléments associés sont perturbés en surface mais décroissants avec la profondeur (**Figure 5.22**).

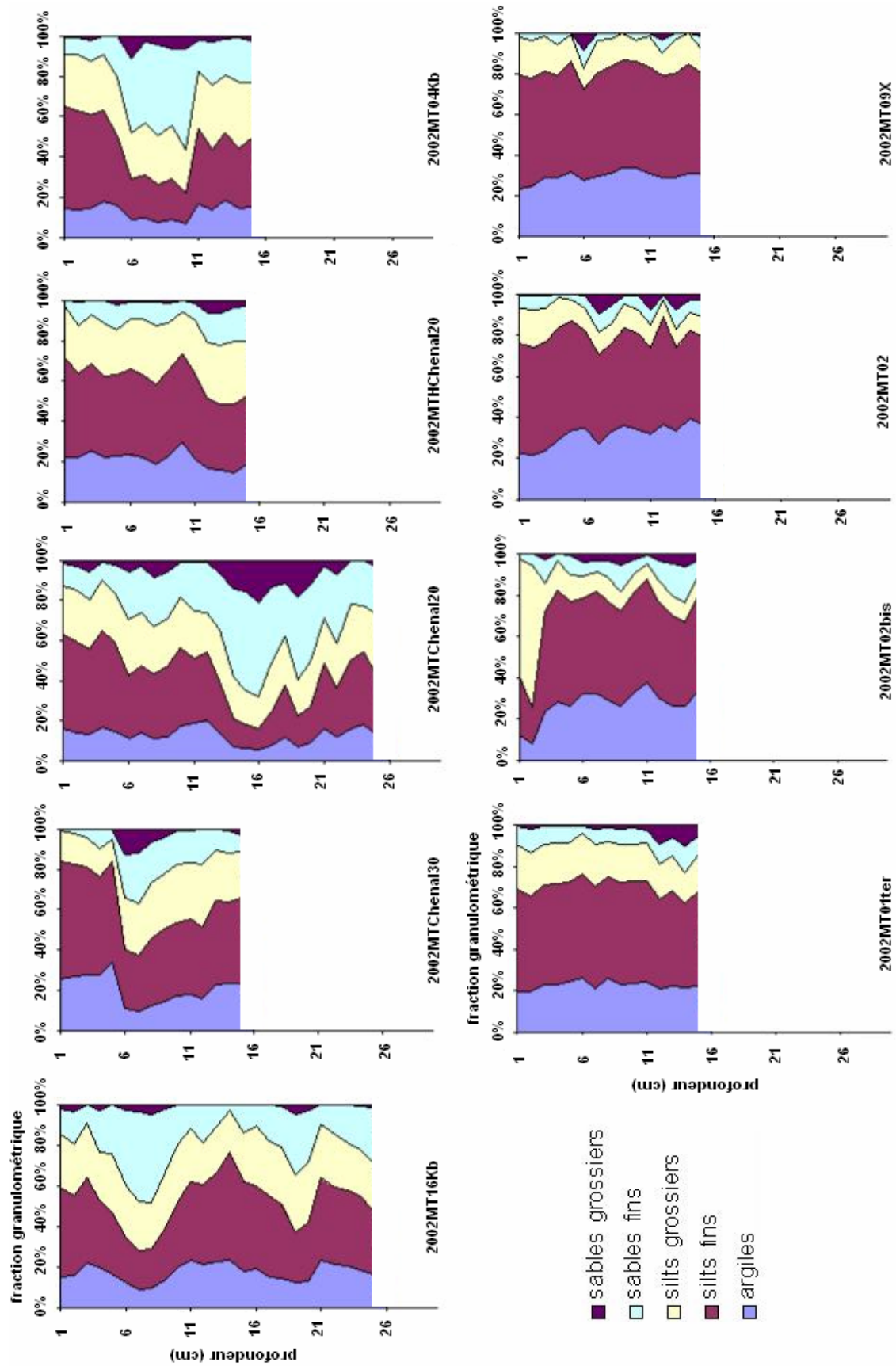


Figure 5.21 : Profils granulométriques des prélèvements des stations situées sur le prodelta du Rhône, issus de la campagne REMORA3 (2002).

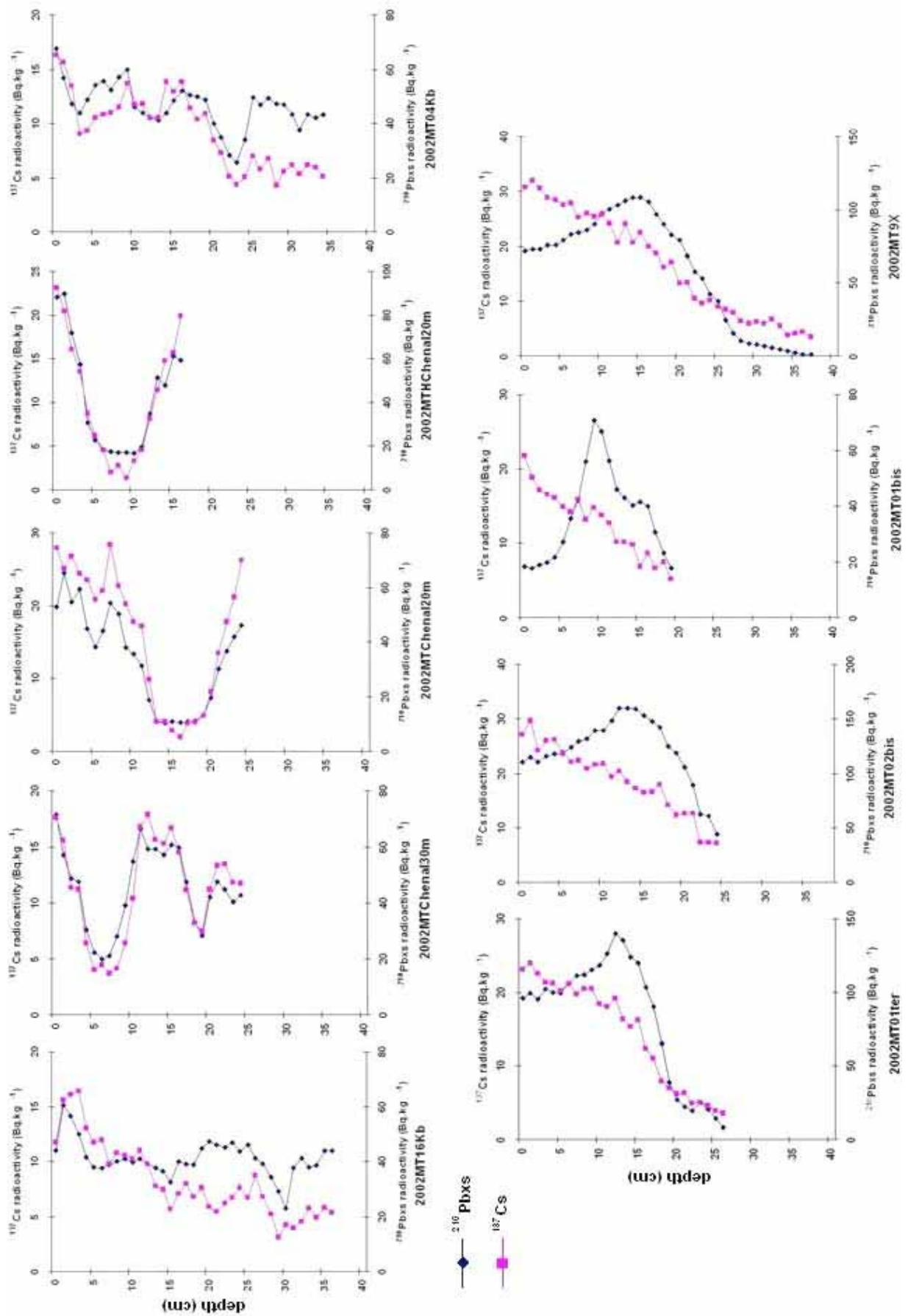


Figure 5.22 : Profils de concentrations de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $^{137}\text{Cs}$  avec la profondeur au niveau des stations localisées sur le prodelta du Rhône et en périphérie, issus de la campagne REMORA3 (2002).



Une couche superficielle de mélange (Surface Mixing Layer ou SML) est visible sur les profils de radioéléments des stations plus lointaines (**Figure 5.22**). Cette couche serait le résultat de la bioturbation causée par des organismes benthiques et de la remobilisation sédimentaire par les vagues (certainement moins efficaces à ces profondeurs) et les courants de fond (Radakovitch et al., 1999; Miralles et al., 2005).

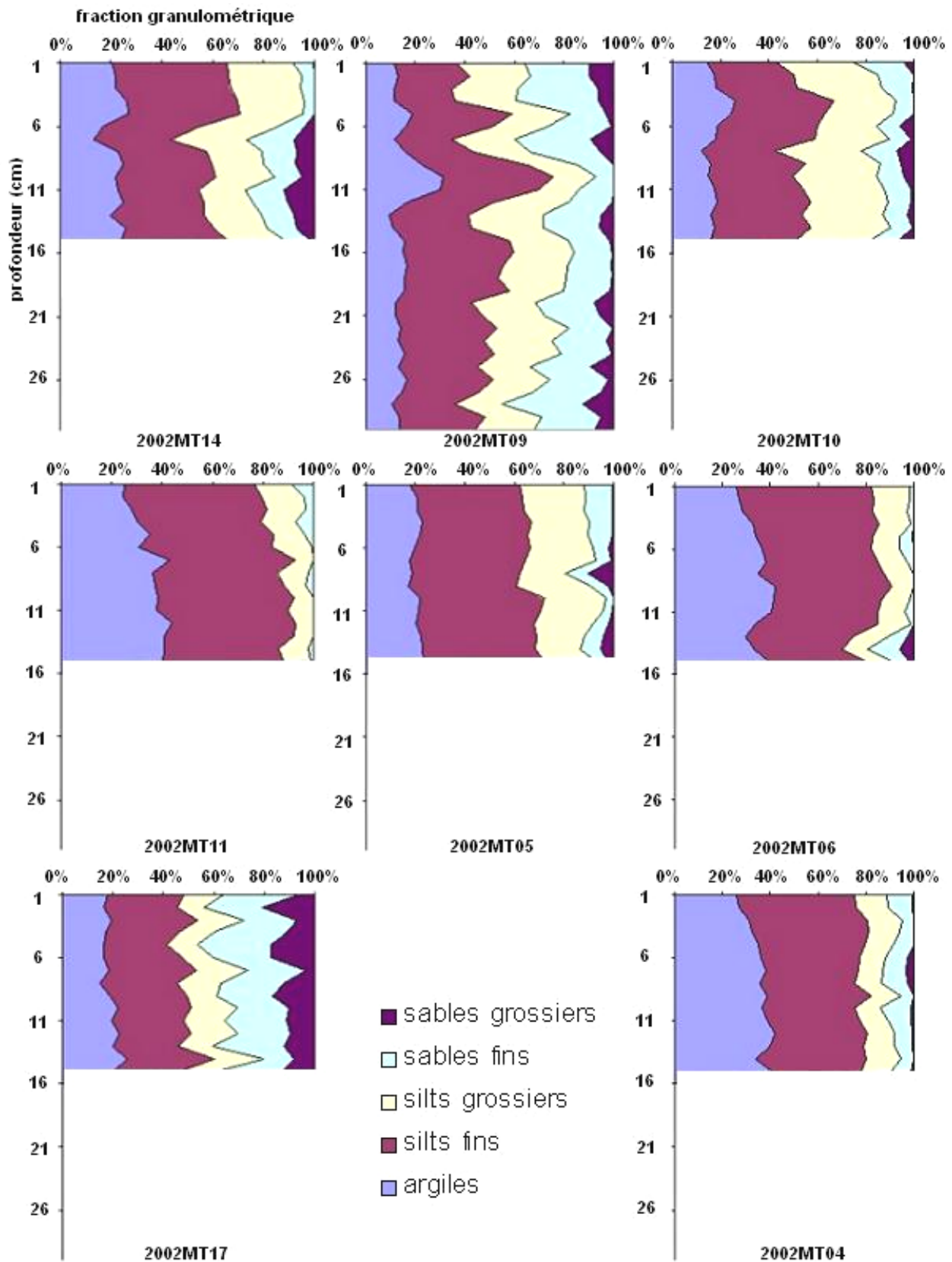
La SML varie de 10 cm pour la station MT01bis à 16 cm pour la station MT9X et montre une évolution croissante depuis la surface (7 à 20 Bq.kg<sup>-1</sup>) vers sa base (30 Bq.kg<sup>-1</sup>). Les profils de granulométrie restent relativement uniformes sur près de l'intégralité de la longueur, conséquences de l'homogénéisation effectuée par le mélange des horizons sédimentaires par la faune benthique.

#### 5.3.1.2. Sur le plateau continental

La totalité des carottes prélevées sur le plateau continental et du pourtour occidental du prodelta n'a pas été analysée au moyen du granulomètre laser et par spectrométrie gamma. La **Figure 5.23** fait état de la taille des particules des 15 premiers centimètres de sédiments (sauf pour la station MT09) dans la zone transitoire entre le prodelta et le reste du Golfe du Lion alors que la **Figure 5.24** rend compte des 5 premiers centimètres des sédiments du Golfe du Lion s'étendant depuis le débouché de la Têt jusqu'au canyon du Grand Rhône. Les profils de radionucléides de la **Figure 5.25** représentent toutes les stations qui ont été analysées.

Les stations MT09, MT05, MT10 et MT14 sont localisées à proximité de l'embouchure du Petit Rhône, dans une zone comprise entre 9 m (MT09) et 43 m (MT14) de profondeur. L'action de la houle est importante et la couverture sédimentaire sableuse à cet endroit. La présence de pics de sable réguliers à peu près tous les 5 cm témoigne d'un hydrodynamisme important à relier à des tempêtes ou des phases d'augmentation du débit du fleuve.

Plus au large sur les carottes MT11 et MT06, vers 85 m de profondeur, la fraction grossière diminue fortement. En revanche, la station MT17 située à 93 m de profondeur présente 40 % de sable sur les 15 premiers centimètres reposant sous la surface. Ceci pourrait s'expliquer par sa proximité de la rupture de pente du plateau continental, siège des sables reliques décrits par Aloisi (1986), ainsi que par un contexte hydrodynamique important. La station MT04, localisée à une centaine de kilomètres de l'embouchure et une quarantaine de kilomètres de MT17, a été sondée à 781 m dans le canyon sous-marin du Grand Rhône. Elle présente près de 10 % de sable majoritairement fin. Sa position dans une structure chenalisée profonde tend à expliquer sa composition sableuse. En effet, les canyons sous-marins, comme les chenaux littoraux, sont des zones préférentielles de transit sédimentaire par lesquelles les apports terrestres sont transportés vers les plaines abyssales. Les matériaux grossiers sont transférés dans le fond du chenal alors que les particules plus fines demeurent en suspension et forment généralement des levées alimentant les parois des chenaux (overspill). Ce transport en milieu profond s'effectue principalement sous forme de coulées turbiditiques reconnaissables à leur séquence sédimentaire décrite par Kuenen et Bouma (1962), à savoir une alternance spécifique de 5 litages stratifiés et obliques de matériaux grossiers et fins.



**Figure 5.23 : Profils granulométriques des prélèvements des stations entourant le prodelta du Rhône, issus de la campagne REMORA3 (2002).**

En ce qui concerne les autres prélèvements du reste du plateau continental du Golfe du Lion (**Figures 5.24 et 5.25**), ils révèlent une augmentation évidente de la fraction péltique avec la profondeur et de la fraction sableuse aux abords des embouchures des différents fleuves connectés à la Méditerranée, tels que la Têt (MT35),

l'Aude (MT33), l'Hérault (MT21), le Lot (MT15), le Petit Rhône (MT09) et le Grand Rhône (stations présentées précédemment). La proportion de sable tend à disparaître dès l'isobathe 600 m alors qu'elle stagne à 10-20 % entre 100 et 600 m de profondeur et peut atteindre 50 % en domaine littoral (**Figure 5.24**).

Les niveaux superficiels de  $^{137}\text{Cs}$  trouvés dans les sédiments des stations les plus profondes (MT04 à 781 m et MT08 à 1064) se situent entre 4 et 9  $\text{Bq.kg}^{-1}$  de  $^{137}\text{Cs}$  au niveau de l'interfluve entre les canyons du Petit Rhône et du Grand Rhône (**Figure 5.25**), conformément aux valeurs reportées par Garcia-Orellana et al. (2009) pour des profondeurs supérieures à 2000 m en Méditerranée Occidentale. Le faible taux de sédimentation ajouté à la décroissance radioactive entraîne une courbe décroissante régulière avec une quasi-disparition du signal à 10 cm de profondeur à la fois pour le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . En revanche, la plupart des profils des stations de la partie occidentale du Golfe du Lion (par exemple, MT29, MT25, MT15) et dans des zones profondes (par exemple, MT31 et MT13 à respectivement 503 m et 913 m) ne montrent pas de décroissance de ces deux éléments sur les 10 premiers centimètres.

Les zones de dépôt directement influencées par les apports rhodaniens présentent des concentrations en radioéléments légèrement plus élevées en comparaison avec le reste du Golfe du Lion. Les stations les plus à l'ouest, représentées par les profils de droite sur la **Figure 5.25**, révèlent des concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  qui atteignent 15  $\text{Bq.kg}^{-1}$  à 41 m de profondeur (MT05) et 12  $\text{Bq.kg}^{-1}$  à 83 m et 106 m (respectivement, MT06 et MT02).

Alors que seule la campagne REMORA3 a été axée sur l'ensemble du Golfe du Lion, la plupart des campagnes réalisées par l'IRSN ont été menées sur le prodelta rhodanien. Divers matériels de prélèvement ont alors été utilisés pour mieux comprendre la dynamique sédimentaire en profondeur. Il en résulte de nombreuses données sédimentologiques et de radioéléments analysées centimètre par centimètre sur des carottes de 40 cm environ (REMORA1) ou par tranches de 10 cm sur des carottes de plusieurs mètres (REMORA2).

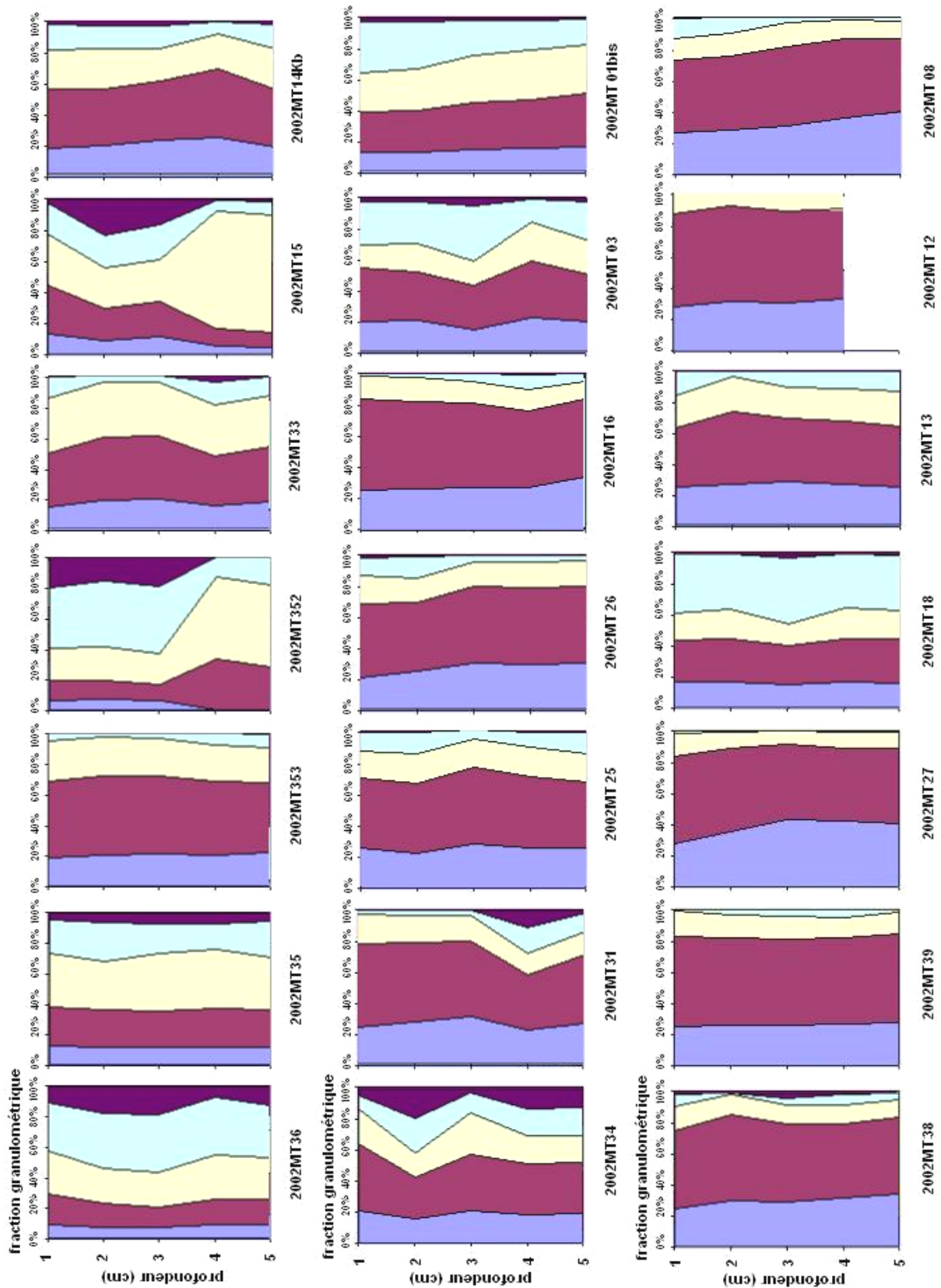


Figure 5.24 : Profils granulométriques des prélèvements des stations du plateau continental du Golfe du Lion, issus de la campagne REMORA3 (2002).

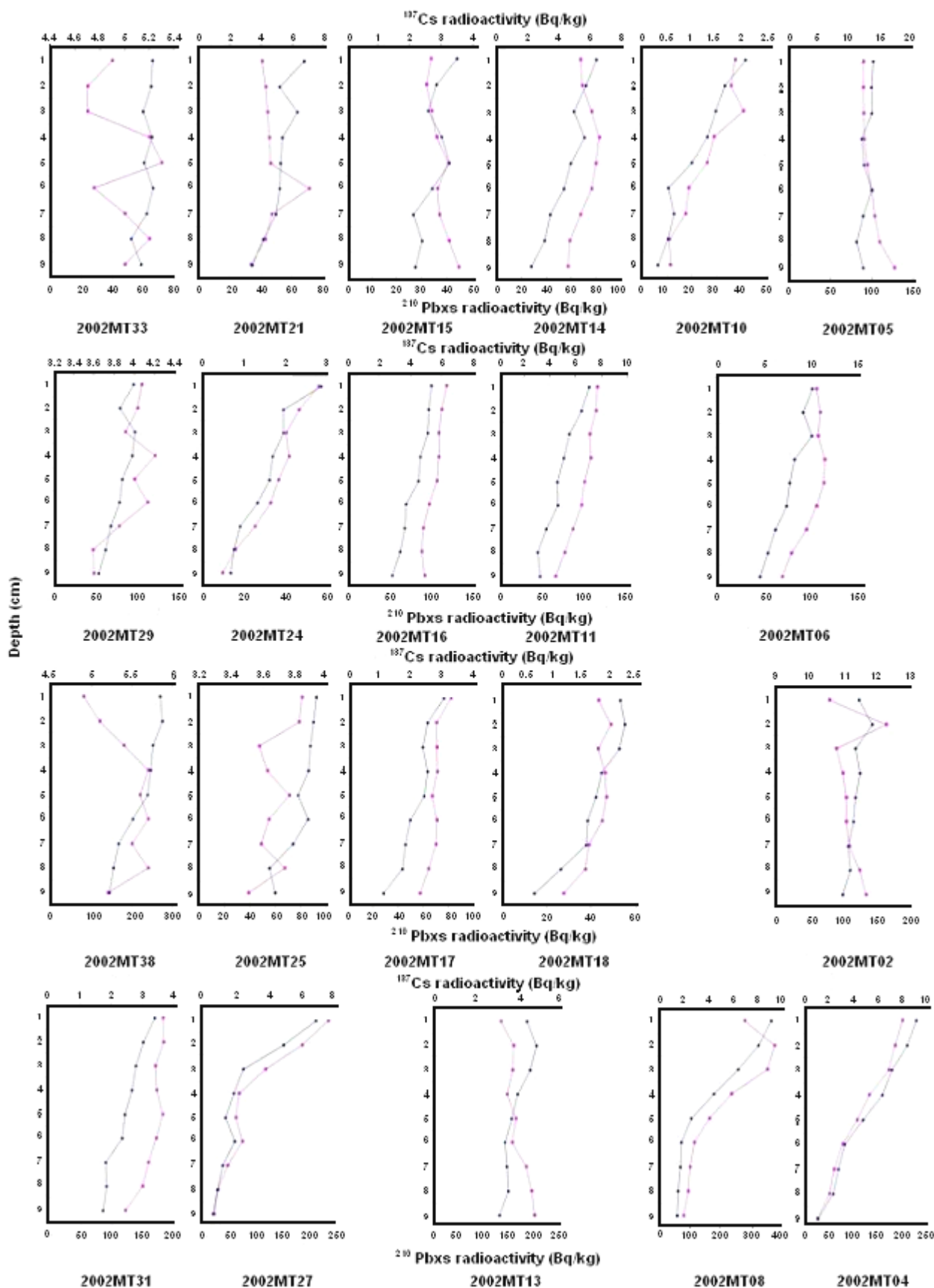


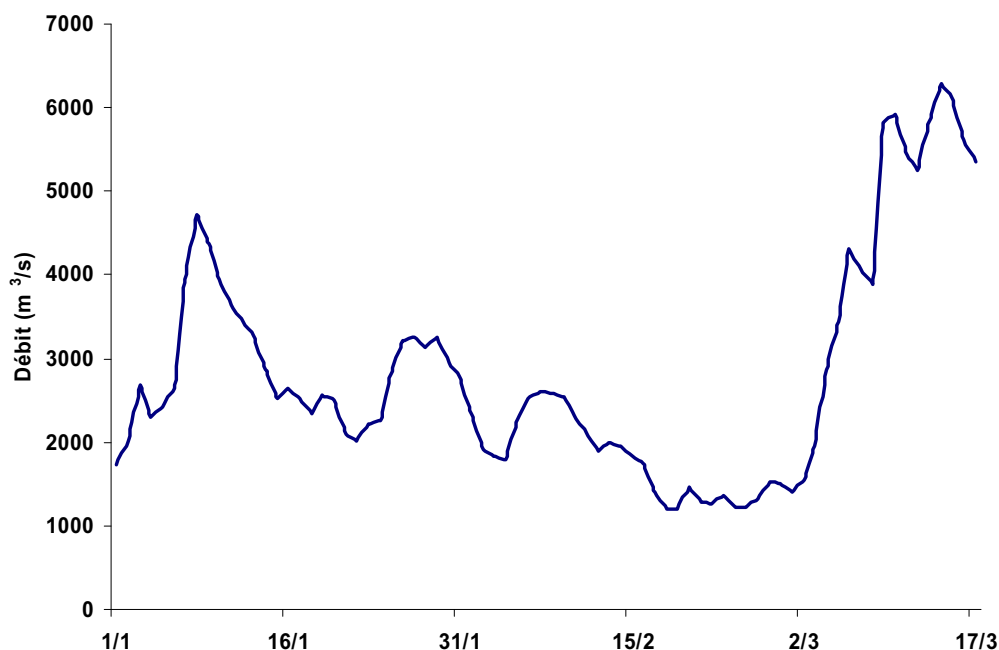
Figure 5.25 : Profils spectrométriques des prélèvements des stations du plateau continental du Golfe du Lion, issus de la campagne REMORA3 (2002) représentées sur la Figure 3.16.

### 5.3.2. Evolution temporelle des dépôts de radioéléments sur le prodelta

Une étude de la répartition des radioéléments drainés par le Rhône vers la Méditerranée a été réalisée dans la zone sous influence rhodanienne durant les campagnes REMORA 1 et 2. La première a concerné la partie la plus distale de l'aire alors que la seconde a été focalisée sur la très proche embouchure du Rhône. Etant donné les forts taux d'accumulation observés dans cette dernière zone (30 à 50 cm.an<sup>-1</sup>), un carottier de type Küllenberg a été utilisé durant cette deuxième campagne afin d'obtenir des carottes de plusieurs mètres d'épaisseur.

#### 5.3.2.1. Dépôts des radionucléides sur la partie distale

La campagne REMORA1 (mars 2001) a succédé à deux événements de crue du Rhône importants puisque le débit a atteint 4730 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> le 08 janvier 2001 et 6280 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> le 14 mars 2001 (**Figure 5.26**).



**Figure 5.26 : Débits du Rhône en Arles (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) durant la période de 3 mois précédant la mission REMORA1 (mars 2001).**

Ces événements n'ont pas apporté beaucoup de matériels sableux à l'embouchure, même si les 5 premiers centimètres semblent avoir vu leur fraction sableuse augmenter (5 % contre 30 % en surface) pendant ces deux événements (**Figure 5.27**). Seules les trois stations les plus proches du débouché du fleuve (MT17, MTRous et MT01) dévoilent une sédimentation qui n'est pas totalement pélictique. Il est probable que la succession des deux hausses événementielles du débit en l'espace de 2 mois et demi ait épuisé le stock de matériels grossiers lors de la première crue et ait remis finalement en suspension et déposé de grandes quantités de particules fines lors de la seconde crue. Les profils granulométriques sont cependant trop peu profonds pour pouvoir en tirer des conclusions (**Figure 5.27**). Les profils de <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de chacune des stations montrent l'influence des apports rhodaniens (**Figure 5.28**), particulièrement MTRous.

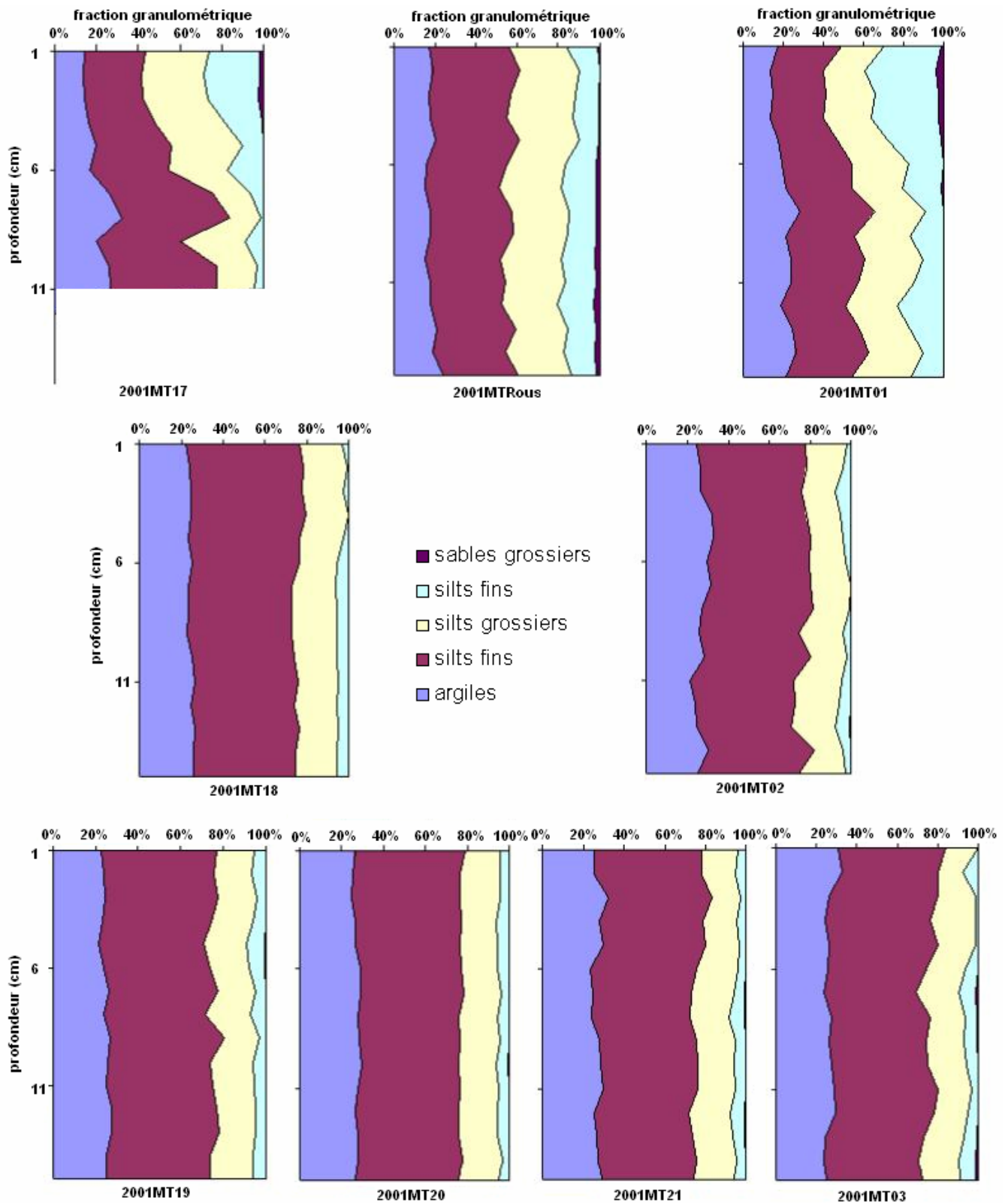


Figure 5.27 : Profils granulométriques des prélèvements des stations entourant l'embouchure du Rhône effectués lors de la campagne REMORA1 (2001) dont la position est représentée sur la carte centrale de la Figure 5.28.

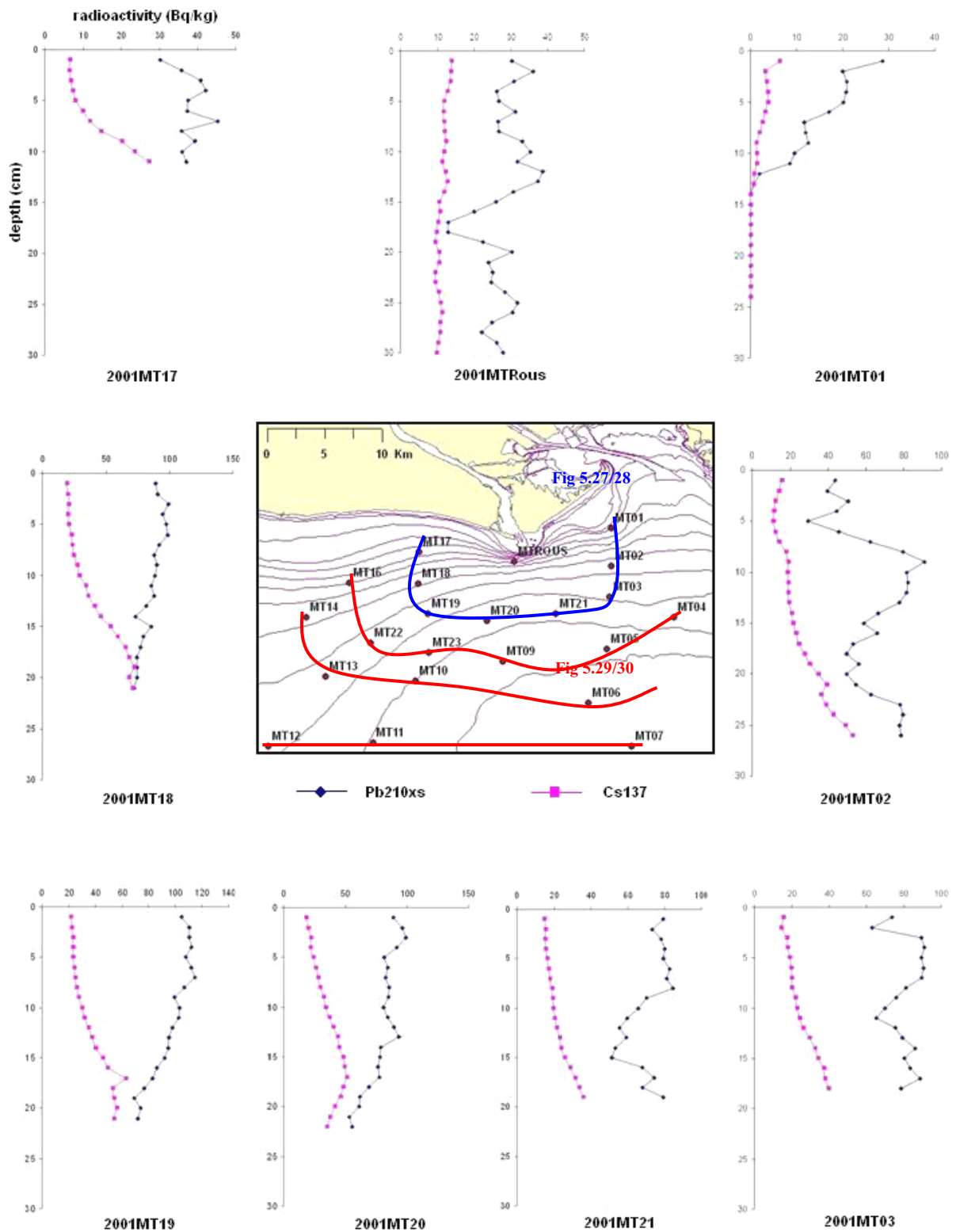


Figure 5.28 : Profils de  $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  des prélèvements des stations proximales entourant l'embouchure du Rhône effectués lors de la campagne REMORA1 (2001) dont la position est représentée sur la carte centrale.



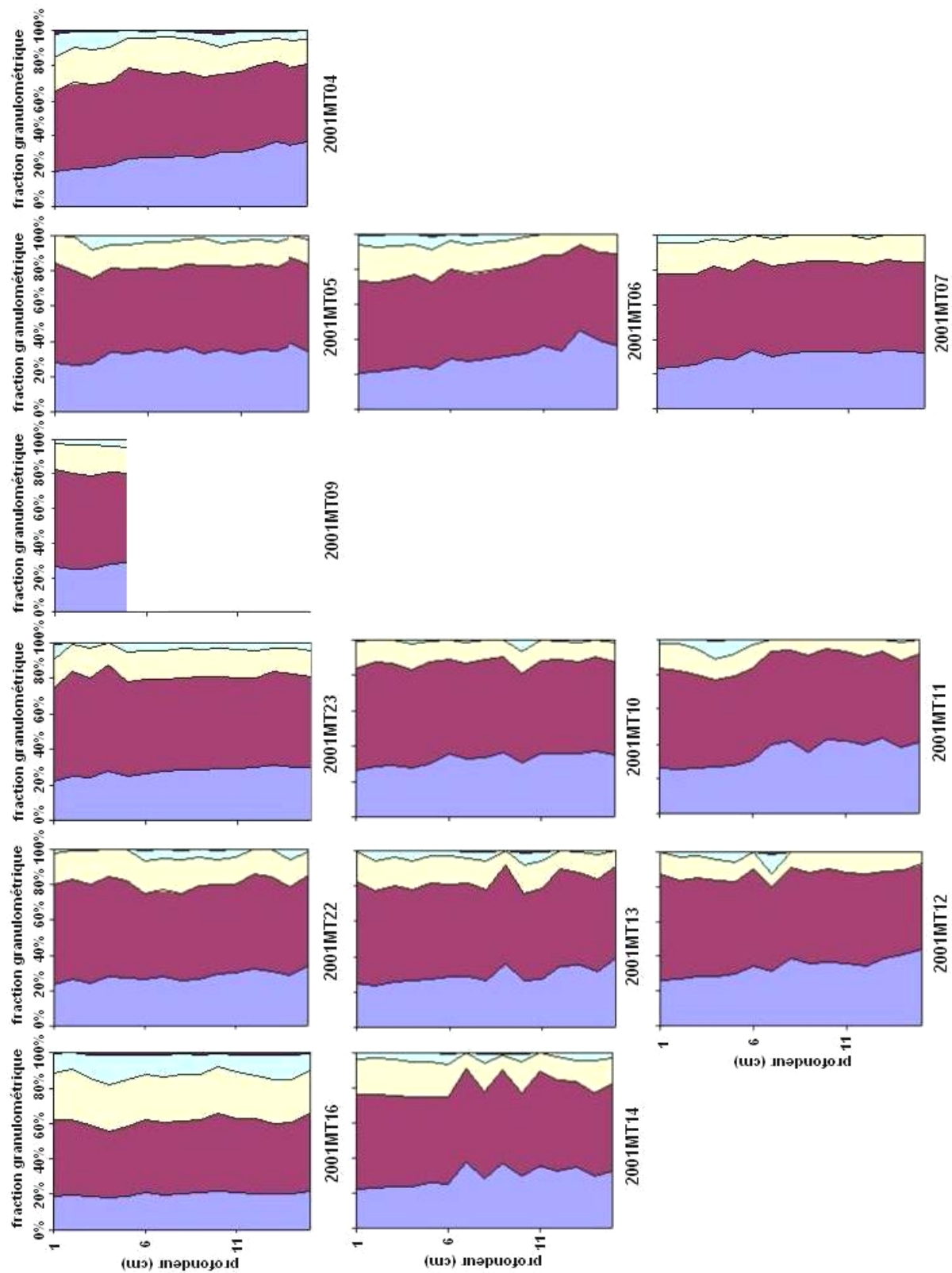
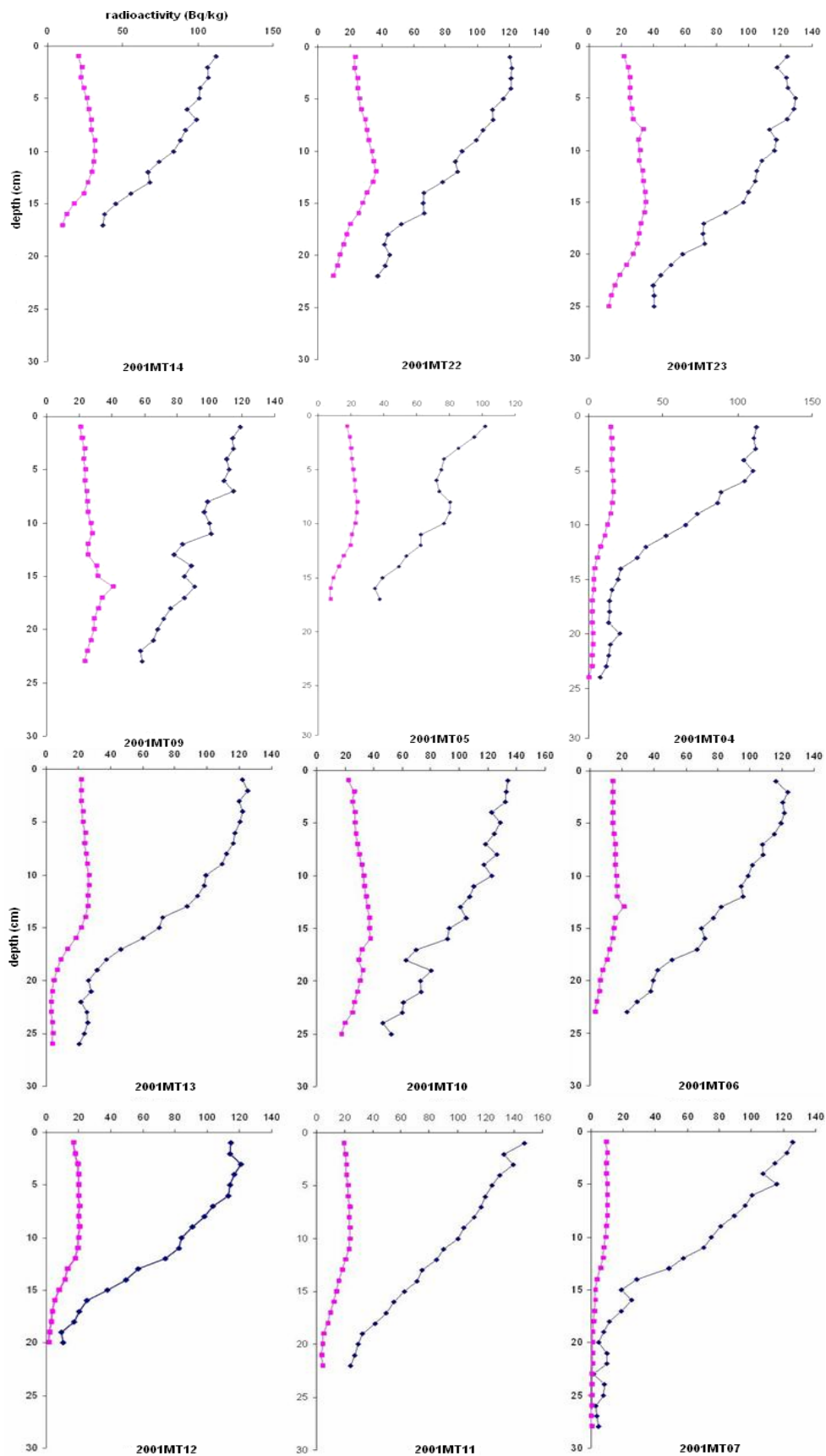


Figure 5.29 : Profils granulométriques des prélèvements des stations entourant l'embouchure du Rhône effectués lors de la campagne REMORA1 (2001) dont la position est représentée sur la carte centrale de la Figure 5.28.

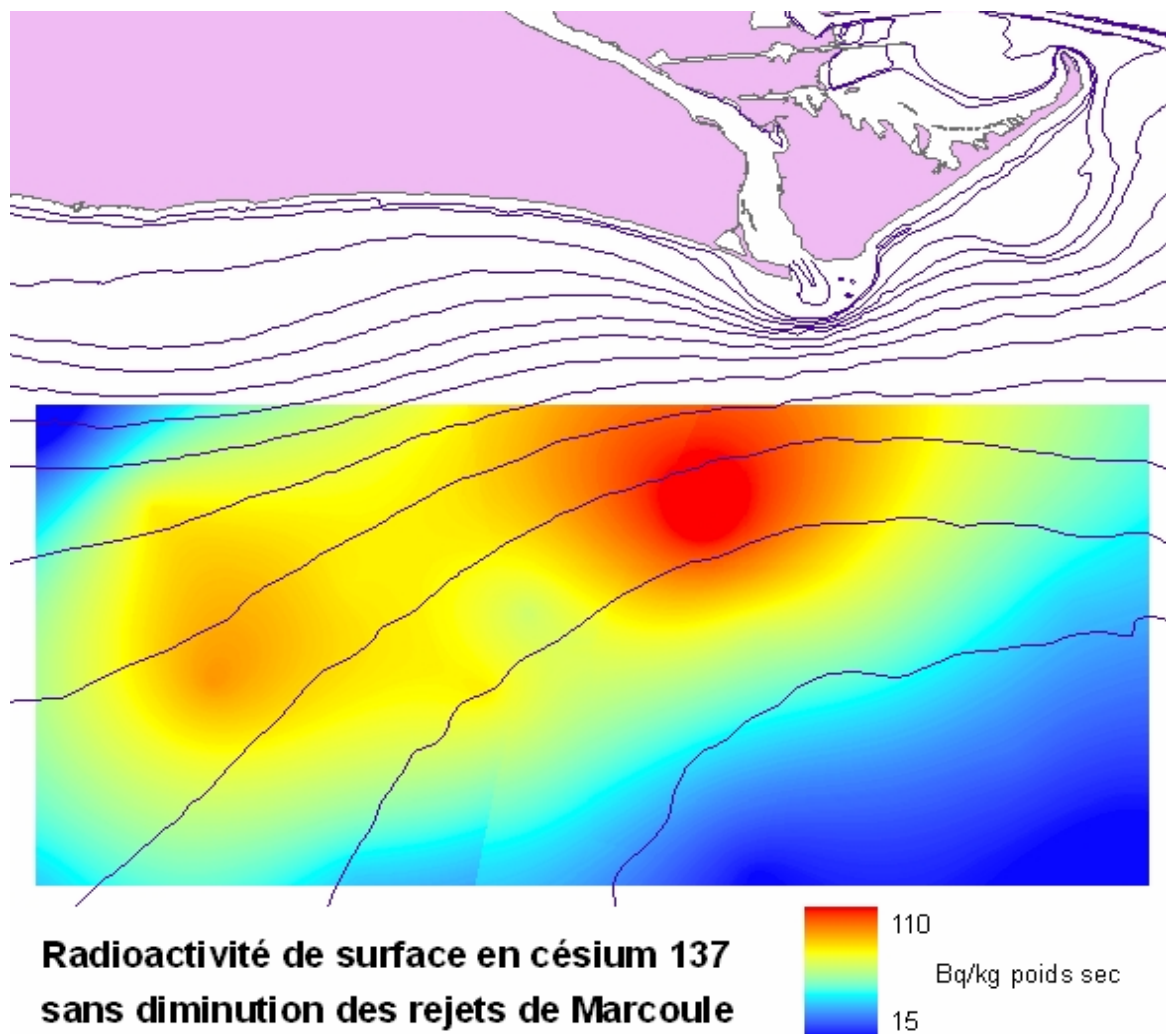


**Figure 5.30 : Profils spectrométriques des prélèvements des stations à l’embouchure du Rhône (voir carte Figure 5.28) effectués lors de la campagne REMORA1 (2001).**

En effet, les profils des stations entourant l'embouchure présentent une concentration croissante en  $^{137}\text{Cs}$  avec la profondeur alors que celle de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est décroissante. Cette augmentation du  $^{137}\text{Cs}$  avec la profondeur est due à la diminution des rejets d'effluents radioactifs dans l'eau du Rhône au début des années 1990.

Ce phénomène est observé sur les 10-15 premiers centimètres des profils des stations plus distantes de l'embouchure avec une granulométrie constituée majoritairement de pélites (90%) qui ne semble pas varier dans la colonne sédimentaire (**Figures 5.29 et 5.30**). Cependant, à des stations plus profondes, il semble que l'épaisseur de sédiment prélevé ait permis d'obtenir la totalité de la colonne sédimentaire marquée par le  $^{137}\text{Cs}$  ; ce qui n'est pas le cas pour les stations les plus proches de l'embouchure.

En faisant abstraction de la diminution des rejets de Marcoule, donc en gardant la pente de la régression linéaire appliquée à la partie décroissante du  $^{137}\text{Cs}$  et en la prolongeant jusqu'à l'axe des abscisses, on obtient des valeurs de radioactivité bien supérieures à ce qui est déposé au moment de la campagne. Les sédiments de surface affichent des concentrations allant de  $15 \text{ Bq.kg}^{-1}$  (soit environ les valeurs révélées par REMORA1 au niveau de l'embouchure) au large et au sud-est à  $110 \text{ Bq.kg}^{-1}$  non loin de l'embouchure et  $80 \text{ Bq.kg}^{-1}$  au sud-ouest (**Figure 5.31**). Les profils verticaux de  $^{137}\text{Cs}$  reflètent ainsi les zones de dépôt préférentiel et le transport des masses sédimentaires.



**Figure 5.31 : Représentation des concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  à l'embouchure du Rhône en  $\text{Bq.kg}^{-1}$  en supposant que les rejets de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule n'aient pas diminué dans les années 1990 et particulièrement en 1997.**

### 5.3.2.2. Dépôts des radionucléides sur la partie proximale

Les prélèvements au carottier Küllenberg renseignent davantage sur l'historique hydro-sédimentaire que ceux effectués au moyen d'un carottier multi-tubes car ils permettent de remonter plus profondément dans les temps de dépôts. Cependant, la faible section de ce type de carottier nécessite un découpage décimétrique pour obtenir assez de matière pour les analyses. Ainsi, chaque tranche de sédiment analysé correspond à 10 cm d'accumulation. Les événements météoclimatiques ne sont donc pas mis précisément en valeur comme pour des carottes découpées centimètre par centimètre. Néanmoins, de nombreux pics de sables témoignent d'apports importants venant du Rhône et de l'impact de forts événements hydrodynamiques à sa proche embouchure (**Figure 5.32**).

La fraction sableuse diminue logiquement vers le large mais également avec la profondeur. En revanche, les longues carottes prélevées lors de la campagne REMORA2 présentent des taux de sable maxima avoisinant 25 % avec une proportion de sables grossiers de 5 %. Le sable paraît donc plus rare dans les prélèvements de grande épaisseur.

Deux raisons semblent expliquer cette observation : l'une statistique, l'autre mécanique. La première explication repose sur le fait que des niveaux épais lissent le signal d'événements exceptionnels. Ceux-ci sont visibles à l'échelle centimétrique mais s'ils sont encadrés par des niveaux fins, ils deviennent moins visibles à l'échelle décimétrique. La seconde explication que j'apporte personnellement se base sur le phénomène de compaction. Lorsque les sédiments grossiers viennent de se déposer, l'espace inter-granulaire est important et rempli d'eau et de sédiments fins. Plus les dépôts sus-jacents sont épais, plus la contrainte de pression est forte. L'eau interstitielle est remplacée par les sédiments les plus fins, ce qui est prouvé par les courbes décroissantes de rapport du poids frais sur le poids sec avec la profondeur. Les phénomènes de tassement occasionneraient l'expulsion des eaux interstitielles et le comblement des espaces inter-granulaires par les sédiments fins environnants. De fait, la proportion de sables diminuerait puisque la proportion de particules fines augmenteraient, sans pour autant que la quantité de matériaux grossiers ne décroisse.

Les niveaux sableux de la **Figure 5.32** sont plus en phase avec des pics de dilution de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  que ceux de  $^{137}\text{Cs}$  (**Figure 5.33**). Les deux radioéléments ont des profils dont les évolutions sont totalement différentes en fonction de la profondeur. Les courbes du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  témoignant des apports particuliers rhodaniens ne montrent pas de pic de concentration important comme le  $^{137}\text{Cs}$  au niveau de toutes les stations sauf Kb04bis. Cela s'explique par les rejets continus et irréguliers de  $^{137}\text{Cs}$  dans les eaux du Rhône.

La profondeur d'enfouissement des pics de concentration de  $^{137}\text{Cs}$  et leurs fortes valeurs, à savoir respectivement 240 cm et 180 Bq.kg<sup>-1</sup> pour la station 2001KbRous (**Tableau 5.6**), pourraient rappeler le signal enregistré par l'accident de Tchernobyl dans les sédiments de l'embouchure du Rhône.

Le signal associé à l'accident de Tchernobyl pourrait avoir été isolé en mars 1991 à la station KLRous lors de la campagne DYPOL09b et confirmé par l'étude du rapport  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  (Charmasson, 1998). Le profil de  $^{137}\text{Cs}$  y est marqué d'un pic de 600 Bq.kg<sup>-1</sup> à 130 cm de profondeur. Les radionucléides issus du cycle de fabrication du combustible nucléaire comme le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{241}\text{Am}$  sont également présents en concentrations très élevées à ce niveau.

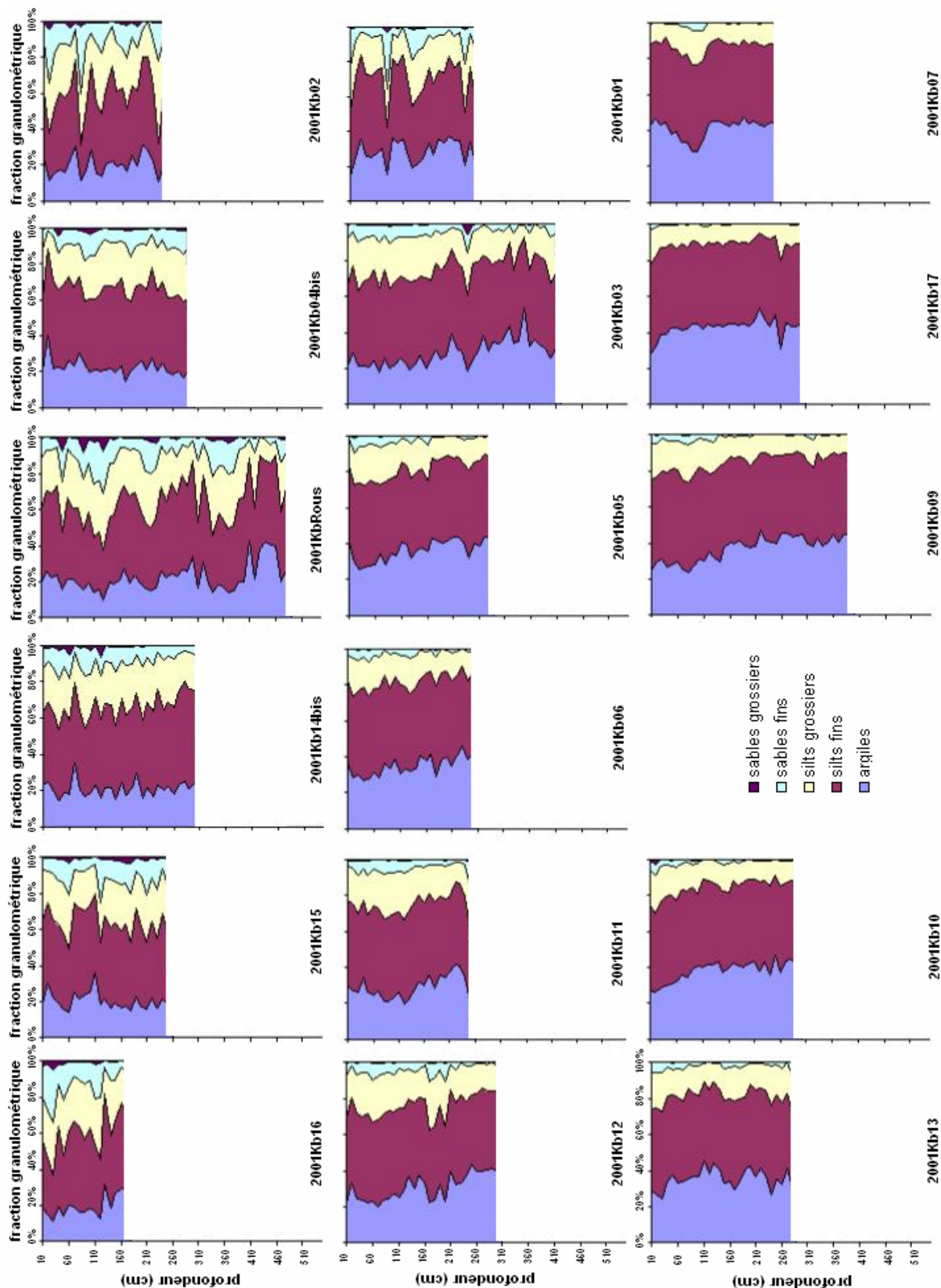


Figure 5.32 : Profils granulométriques des prélèvements des stations à l’embouchure du Rhône effectués lors de la campagne REMORA2 (2001) dont la position est représentée sur la carte de la Figure 5.37.

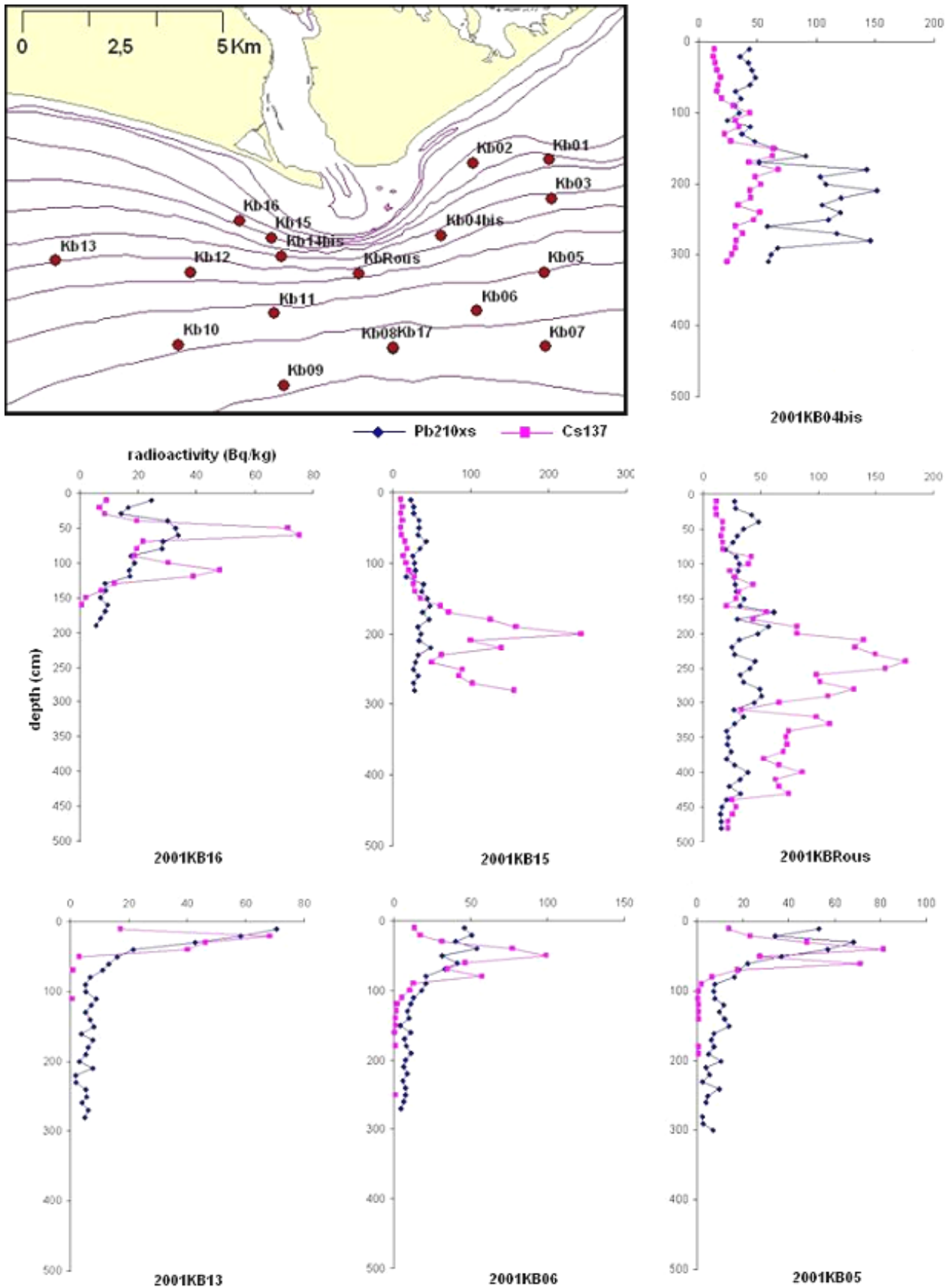


Figure 5.33 : Profils de concentrations des radioéléments des prélèvements à l’embouchure du Rhône effectués lors de la campagne REMORA2 (2001) avec une carte de localisation des stations.

Si on estime que le pic de  $^{137}\text{Cs}$  à 240 cm sur la carotte KbRous prélevée en mars 2001 est lié à l'explosion du réacteur nucléaire ukrainien de Tchernobyl du 26 avril 1985 alors le taux d'accumulation sédimentaire peut être évalué à 240 cm en 15 ans, soit une moyenne de 16 cm par an. Selon la même méthode, Charmasson et al. (1998) ont déduit des taux d'accumulation annuelle pluridécimétriques à partir des profils de la station KLRous. Les valeurs de taux de sédimentation varient beaucoup en fonction du temps car les apports du Rhône sont très variables et des phénomènes de compaction et de remise en suspension des sédiments superficiels par les vagues à un temps T+1 peuvent éroder les stocks présents à un temps T. En outre, les profils de  $^{137}\text{Cs}$  de la **Figure 5.33** montrent presque tous la fin du signal avant les derniers niveaux de la carotte, avant la fin du signal de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , ce qui signifie que les horizons basaux témoigneraient de l'ère ante-nucléaire, soit avant les années 1950.

Stations	$^{137}\text{Cs}]_{\text{max}}$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Profondeur de $^{137}\text{Cs}]_{\text{max}}$ (m)	$^{137}\text{Cs}]_{\text{max2}}$ (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Profondeur de $^{137}\text{Cs}]_{\text{max2}}$ (m)
2001KB16	77	60	49	110
2001KB15	250	200	145	220
2001KBRous	180	240	140	280
2001KB13	68	30	-	-
2001KB06	100	50	58	80
2001KB05	84	40	72	60

**Tableau 5.6 : Pics de concentration en  $^{137}\text{Cs}$  et localisation de leur profondeur dans les carottes dans lesquelles ils ont été observés.**

En corrigeant la décroissance radioactive du pic de  $^{137}\text{Cs}$  montré par KbRous selon l'équation :

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t},$$

avec  $A(t)$  la radioactivité à un temps  $t$  (Bq),  $A_0$  la radioactivité initiale (Bq),  $\lambda$  la constante radioactive du radioélément (an<sup>-1</sup>) et  $t$  le temps (an), on obtient une radioactivité en 1991 de 226.6 Bq.kg<sup>-1</sup> et de 254.3 Bq.kg<sup>-1</sup> en 1986. La carotte prélevée à la station KLRous présente un pic à 600 Bq.kg<sup>-1</sup> et une valeur de 673.2 Bq.kg<sup>-1</sup> après correction de la décroissance radioactive. On ne retrouve donc pas ces mêmes résultats observés dix auparavant. On peut l'expliquer par le fait que les concentrations en radioéléments varient dans le temps en fonction des rejets et dans l'espace comme le montre la carte de la **Figure 5.33** associée aux profils de radioéléments. De faibles variations spatiales peuvent constituer un biais pour le suivi des radionucléides au cours du temps.

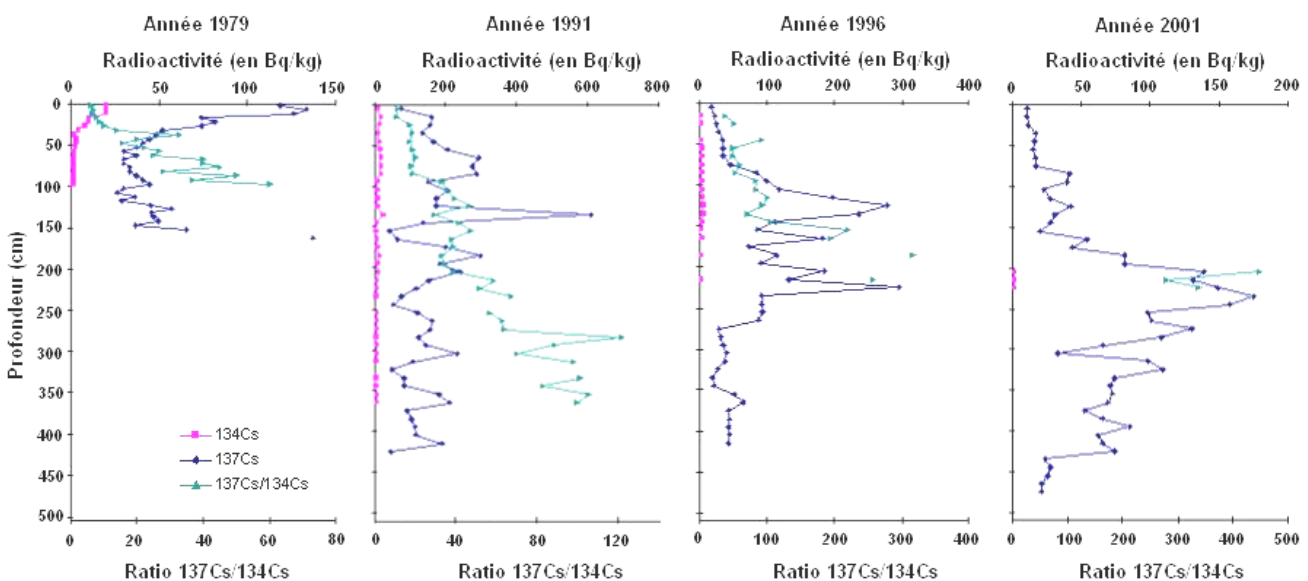
### 5.3.3. Suivi de la station Roustan Sud de 1979 à nos jours

Une station de prélèvement a été régulièrement étudiée depuis 1979, de coordonnées 4° 50'24'' de longitude est et 43°18'26'' de latitude nord. Appelée 'Roustan Sud', elle est la cible directe des apports rhodaniens ce qui en fait une station de référence pour un suivi temporel des dépôts de sédiments et de contaminants apportés par le Rhône.

Les 14 carottes sédimentaires recueillies entre 1979 et 2001, à des profondeurs variant entre 17 et 25 m, nous donnent des informations diverses selon leur mode de prélèvement : Küllenberg ou sous-carottage dans des bennes Usnel. La première technique permet de conserver une colonne sédimentaire profonde pouvant remonter à

plusieurs dizaines d'années, malgré le fort taux d'accumulation de la zone, mais sans toutefois préserver l'interface eau-sédiment (**Figure 5.34**). La seconde technique, basée sur des carottes sédimentaires plus courtes, nous renseigne davantage sur la variation de la quantité de radioéléments déposés sur le prodelta au cours du temps et permet de préserver une bonne interface eau-sédiment (**Figure 5.35**).

Les dépôts de radionucléides issus du Rhône ont beaucoup varié entre 1979 et 2007 sur le domaine prodeltaïque. Ces apports sont conditionnés par le régime hydrologique du fleuve qui remobilise davantage de sédiments et de contaminants associés en période de hauts débits liquides et par les rejets de l'industrie nucléaire rhodanienne. L'impact de l'événement de Tchernobyl est visible à certains niveaux sédimentaires des carottes longues à partir de 1986.



**Figure 5.34 : Evolution des concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{134}\text{Cs}$  dans la colonne sédimentaire prélevée à la station Roustan Sud entre 1979 et 2001 au moyen d'un carottier Küllenberg.**

Les sédiments de surface attestent de concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  comprises entre 150 et 400  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  jusqu'en 1986, année de l'accident de Tchernobyl, puis inférieures à 100  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  par la suite et entre 10 et 20  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  depuis le début du démantèlement de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule en 1997 (**Figure 5.35**). Les valeurs fluctuent néanmoins avec la profondeur puisqu'elles peuvent être minimales à 20  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  entre 1979 et 1984, à 100  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  entre 1986 et 1990, 20  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  entre 1994 et 1997, et à 5  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  depuis 2001.

Les concentrations en  $^{134}\text{Cs}$  suivent la même évolution que celles du  $^{137}\text{Cs}$ , quoique inférieures d'un facteur 5 à 10 (entre 20 et 60  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Le signal radioactif du  $^{134}\text{Cs}$  disparaît néanmoins dès 1997, année de la cessation d'activités du site de Marcoule. Un léger signal, proche de la limite de détection, perdure sur 3 niveaux (30 cm) de la carotte longue de 2001 (**Figure 5.34**) correspondant à un pic de  $^{137}\text{Cs}$ , signe d'une radioactivité supérieure à la moyenne au moment du dépôt.

Parallèlement, le rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  des sédiments de surface compris entre 5 et 10 de 1979 à 1990, confirmant les observations de Charmasson (1998), est supérieur à 40 après 1996 pour disparaître les années suivantes. Les dernières traces sont observées en 1997 à une profondeur de 15 cm dans la carotte. Ce rapport isotopique, marquant la source de l'activité nucléaire rhodanienne et permettant de suivre l'origine des



contaminations (fluviale, atmosphérique, accidentel), peut être mis en équation en fonction de la profondeur de la carotte. Etant donné que le  $^{134}\text{Cs}$  possède une période de décroissance radioactive de 2.1 ans contre 30.1 ans pour le  $^{137}\text{Cs}$ , le rapport a tendance à augmenter au fil du temps.

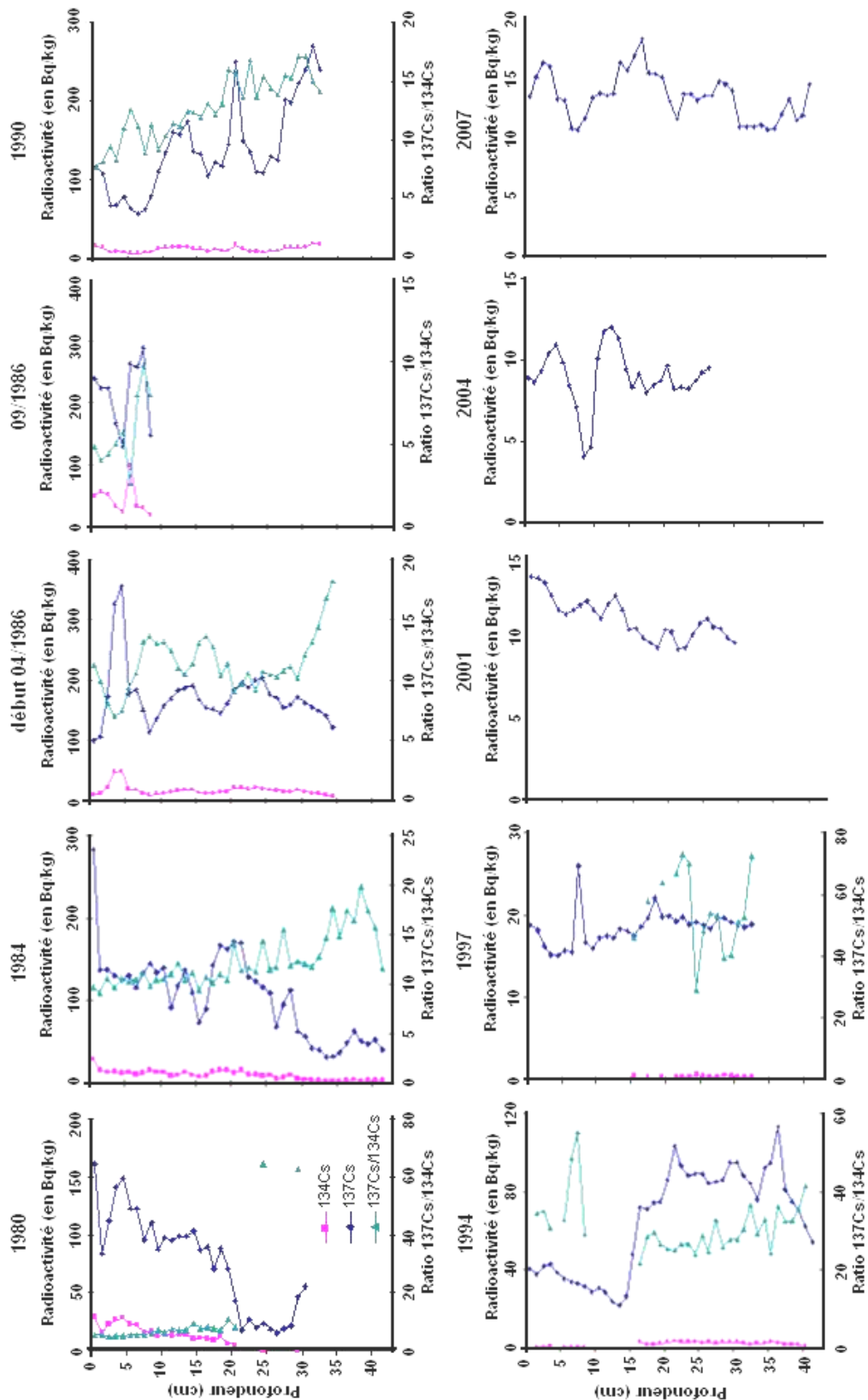


Figure 5.35 : Evolution des concentrations en  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{134}\text{Cs}$  dans la colonne sédimentaire prélevée à la station Roustan Sud entre 1980 et 2007 au moyen d'une benne Usnel dans laquelle ont été réalisés des sous-carottages avec des tubes de plexiglas.

Il suit logiquement les équations de décroissance radioactive des deux entités pour s'exprimer par la relation:

$$\frac{{}^{137}A_t}{{}^{134}A_t} = \frac{{}^{137}A_0}{{}^{134}A_0} e^{0.307 t},$$

avec  ${}^{137}A_t$  et  ${}^{134}A_t$  les activités respectives du  ${}^{137}\text{Cs}$  et du  ${}^{134}\text{Cs}$  au temps  $t$  en  $\text{Bq.kg}^{-1}$ ,  ${}^{137}A_0$  et  ${}^{134}A_0$  les activités respectives du  ${}^{137}\text{Cs}$  et du  ${}^{134}\text{Cs}$  au moment du prélèvement en  $\text{Bq.kg}^{-1}$ , et  $t$  le temps en années. Le coefficient 0.307 a été calculé à partir du quotient des parties exponentielles de l'expression de la décroissance radioactive de chaque isotope  $A_t = A_0 e^{-\lambda t}$ , c'est-à-dire du rapport des  $e^{-\lambda t}$  du  ${}^{137}\text{Cs}$  et du  ${}^{134}\text{Cs}$ .

Sachant que la constante radioactive  $\lambda$  ( $\text{s}^{-1}$  ou  $\text{an}^{-1}$  selon l'unité de temps  $t$ ) est liée à la demi-vie des radioéléments  $t_{1/2}$  par la relation :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}},$$

on retrouve alors la formule :

$$\frac{e^{-\lambda_{137} t}}{e^{-\lambda_{134} t}} = \frac{e^{-\frac{t \ln 2}{30.1}}}{e^{-\frac{t \ln 2}{2.1}}} = e^{t \ln 2 \left( \frac{1}{2.1} - \frac{1}{30.1} \right)} = e^{0.307 t}.$$

Les courbes de régression exponentielle du rapport isotopique en fonction de la profondeur de sédiment calculées à partir des profils révèlent les équations présentées dans le **Tableau 5.7**, associées à des coefficients de détermination, plutôt satisfaisants pour la plupart ( $> 0.6$ ) voire très satisfaisants ( $> 0.8$ ). Elles sont de la forme :

$$\frac{{}^{137}A_t}{{}^{134}A_t} = \frac{{}^{137}A_0}{{}^{134}A_0} e^{\alpha z},$$

avec  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) qui est égale au rapport  $R/\lambda$  avec  $R$  le taux de sédimentation ( $\text{cm.an}^{-1}$ ), et  $z$  la profondeur de sédiment (cm).

Les paramètres des équations vérifient les observations graphiques avec des rapports isotopiques entre 5 et 10 dans les années 1980, dont une baisse significative juste après l'incident de Tchernobyl due aux retombées du nuage dont le ratio était de 2 (Charmasson, 1998) et qui a donc fait diminuer la moyenne générale. Les rapports à l'origine ainsi trouvés fluctuent de 3.51 à 13.89 entre 1979 et 1991, conformément aux rejets dans le Rhône du complexe de Marcoule observés par Charmasson (1998) rapportant des valeurs comprises entre 3.31 et 14.21. Le rapport isotopique a néanmoins débuté son augmentation dans les années 1990 pour atteindre 40 en 1996 en raison de la diminution progressive des rejets de Marcoule (disparition du  ${}^{134}\text{Cs}$ ) et de la crue événementielle du Rhône de novembre 1994.

$\alpha$  varie globalement d'un facteur 10 entre les carottages au Küllenbergl et à l'Usnel en raison de l'épaisseur de sédiments, à savoir 10 cm pour les premiers et 1 cm pour les seconds.

Année	Equation (avec z la prof en cm)	R <sup>2</sup>	Carottage	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] <sub>0</sub>	α (cm <sup>-1</sup> )
1979	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 5.76 e <sup>0.12z</sup>	0.87	Küllenberg (1 niv = 10 cm)	5.76	0.12
1991	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 13.89 e <sup>0.06z</sup>	0.89		13.89	0.06
1996	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 30.07 e <sup>0.10z</sup>	0.78		30.07	0.1
1980	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 4.76 e <sup>0.03z</sup>	0.79	Benne Usnel (1 niv = 1 cm)	4.76	0.03
1984	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 9.16 e <sup>0.01z</sup>	0.64		9.16	0.01
04/1986	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 9.56 e <sup>0.009z</sup>	0.19		9.56	0.009
09/1986	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 3.51 e <sup>0.087z</sup>	0.34		3.51	0.087
1990	[ <sup>137</sup> Cs/ <sup>134</sup> Cs] = 8.82 e <sup>0.02z</sup>	0.77		8.82	0.02

**Tableau 5.7 : Equations des courbes de régression exponentielle du rapport isotopique <sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs et coefficient de détermination R<sup>2</sup> des profils des carottes prélevées entre 1979 et 1996.**

Des taux d'accumulation moyens pourront être calculés au moyen d'une reconnaissance analogique des termes des équations de décroissance radioactive et des profils des rapports isotopiques dans les sédiments (voir § 5.4).

Les profils de Küllenberg permettent de bien suivre les événements comme l'accident de Tchernobyl. Les prélèvements à l'Usnel sont plus efficaces à l'échelle saisonnière que décennale car la faible compaction ne comprime pas les signaux. Charmasson (1998) pourrait avoir identifié le pic de <sup>137</sup>Cs (plus de 600 Bq.kg<sup>-1</sup>) au niveau 130-140 cm de KLRous de 1991 (Figure 5.34) comme correspondant à l'événement ukrainien de 1986, puisqu'aucun niveau élevé de <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> n'a pu confirmer l'apport important de MES par le Rhône.

Les analyses de la carotte sédimentaire de 1979 ne remarquent pas de pic particulier, sauf en surface à moins de 150 Bq.kg<sup>-1</sup>. Un prélèvement profond réalisé en 1996, soit 5 ans après KLRous de 1991, présente deux pics de <sup>137</sup>Cs à près de 300 Bq.kg<sup>-1</sup>: l'un à 120-130 cm et l'autre à 220-230 cm. Il serait logique de considérer le signal original à 220-230 cm de profondeur, mais une carotte réalisée en 2001 affiche de très fortes valeurs (180 Bq.kg<sup>-1</sup>) à 230-240 cm. Les effets compactant du tassement sédimentaire et érosif des vagues de tempêtes peuvent expliquer à certaines occurrences le défaut de sédiment au fil du temps. Il n'est cependant pas possible de véritablement trancher sur l'origine des pics de <sup>137</sup>Cs, notamment pour le prélèvement de 1996 (Tableau 5.8). Les estimations de taux d'accumulation varient du simple au double, même pour les profils ne présentant qu'un seul pic (1991 et 2001). Il semblerait que le niveau à 220-230 cm soit plus probablement issu des retombées de Tchernobyl car nettement plus radioactif lors de sa création que le pic à 120-130 cm, puisqu'il est présent un bon mètre au-dessous (Figure 5.36). Le calcul des taux de sédimentation (voir § 5.4) permet d'estimer la valeur des pics de radioactivité présents sur les profils lors des dépôts sédimentaires.

Les valeurs de radioactivité A<sub>0</sub> lors du dépôt après correction de la décroissance radioactive ont été calculées par le biais de la relation :

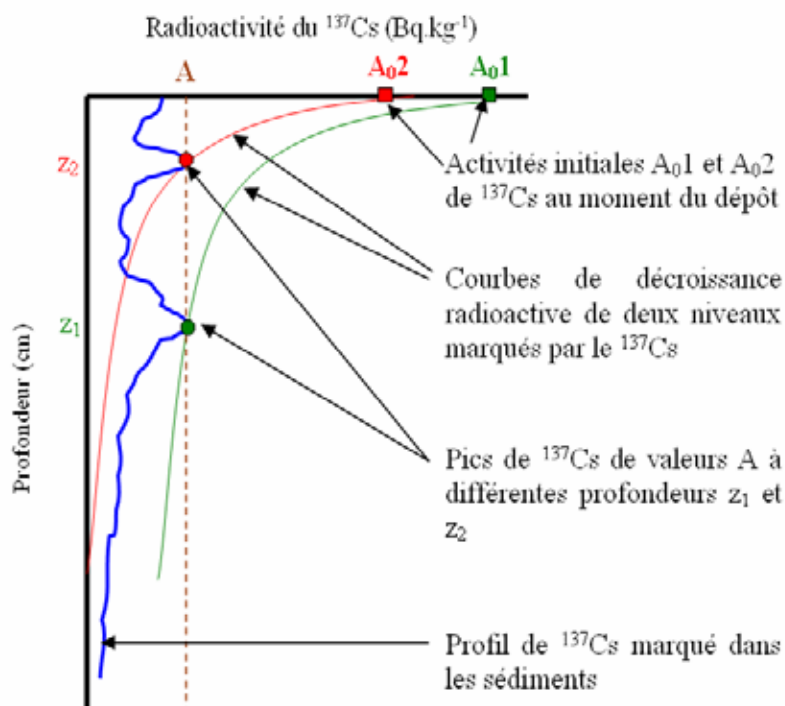
$$A_0 = A_t e^{\frac{\lambda z_t}{R}},$$

avec A<sub>t</sub> la valeur de radioactivité au temps t (en Bq.kg<sup>-1</sup>), λ la constante de radioactivité du césium 137 telle que λ = ln2/t<sub>1/2</sub>, soit λ = ln2/30.1, z<sub>t</sub> la profondeur du point considéré (en cm) au temps t et R le taux de sédimentation (en cm.an<sup>-1</sup>).

Année	Prof. pic (cm)	Valeur (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Valeur en 1986 (Bq.kg <sup>-1</sup> )	$\tau$ sédimentation (cm.an <sup>-1</sup> )
1991	130-140	600	670.3	26-28
1996	120-130	300	328.3	12-13
	220-230	300	353.8	22-23
2001	230-240	180	213.9	15.3-16

**Tableau 5.8 : Estimation des valeurs des pics de <sup>137</sup>Cs en 1986 après correction de la décroissance radioactive et évaluation des taux d'accumulation représentés par les profils en prenant pour hypothèse la correspondance entre la valeur maximum et l'événement de Tchernobyl.**

Les valeurs de radioactivité corrigées de la décroissance radioactive ne permettent pas de vraiment conclure sur la correspondance des pics avec l'accident de Tchernobyl. Néanmoins, même si les taux d'accumulation apparents ne sont pas identiques, ils semblent correspondre deux à deux mais ne témoignent pas tous d'un seul et même événement.



**Figure 5.36 : Explication graphique du profil de radioactivité du <sup>137</sup>Cs de la station KbRous 1996.**

La sédimentation est un processus physico-chimique complexe en règle générale et est d'autant plus difficile à quantifier dans cette zone de proche embouchure soumise aux apports fluviaux et aux profondeurs étudiées influencée par l'action érosive et remobilisatrice des vagues. Ce paramètre est cependant crucial pour l'évaluation des bilans sédimentaires et radioélémentaires.

## 5.4. Taux de sédimentation

Il existe différents modèles de calculs de taux de sédimentation selon l'activité biologique des stations étudiées (Radakovitch et al., 1999). Le premier est dit non-biodiffusif lorsque le signal superficiel de radioactivité n'est pas perturbé. Le second est appelé biodiffusif quand le profil de concentration en radioéléments présente des anomalies à l'interface eau-sédiment. Le modèle non-biodiffusif est généralement appliqué dans les zones où la faune benthique est réduite, c'est-à-dire à partir de certaines profondeurs, tandis que le modèle biodiffusif est rencontré dans des milieux à forte pression biologique, où la profondeur est faible et les apports en matières organiques sont importants.

Hors de la proche embouchure du fleuve, le  $^{210}\text{Pb}$  s'avère être le radioélément le plus intéressant pour le calcul de taux de sédimentation en raison de son affinité pour les particules et le fait que sa concentration ne varie pas en fonction des rejets anthropiques. Le  $^{137}\text{Cs}$  est un bon marqueur dans la zone de proche embouchure mais son origine anthropique, reflétant une maîtrise plus ou moins efficace de ses flux, et ses capacités de désorption peuvent biaiser les résultats.

Les processus gouvernant les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans le sédiment sont présents sous la forme de 3 modules dans l'équation qui les régit : un module d'accumulation, un module de mélange et un module de décroissance radioactive (Radakovitch et al., 1999 ; Cochran, 1985), sous la forme :

$$D\rho \frac{\partial^2 A_{\text{tot}}}{\partial z^2} - \rho R \frac{\partial A_{\text{tot}}}{\partial z} - \rho \lambda A_{\text{tot}} = \rho \frac{\partial A_{\text{tot}}}{\partial t} = 0,$$

avec  $D$  le taux de mélange ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) supposé constant dans la couche de mélange SML,  $A_{\text{tot}}$  l'activité du radionucléide ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ),  $z$  la profondeur sous la limite eau-sédiment (cm),  $R$  le taux d'accumulation linéaire ( $\text{cm.an}^{-1}$ ),  $\lambda$  la constante radioactive du radioélément ( $\text{an}^{-1}$ ) et  $\rho$  la masse volumique sèche du sédiment ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) estimée uniforme avec la profondeur. L'analyse dimensionnelle de l'équation montre bien que chaque module se décline sous une même unité égale au module de décroissance radioactive, c'est-à-dire en  $\text{Bq.m}^{-3}.\text{an}^{-1}$ .

### 5.4.1. Calculs avec le modèle non-biodiffusif

Le modèle non-biodiffusif considère que la couche de mélange est inexistante. Il est appliqué selon l'évolution graphique du profil de concentration du radioélément en fonction de la profondeur. Si le terme de mélange est négligeable, alors on suppose que :

$$D\rho \frac{\partial^2 A_{\text{tot}}}{\partial z^2} = 0,$$

et l'équation générale précédente devient :

$$\rho R \frac{\partial A_{\text{tot}}}{\partial z} = -\rho \lambda A_{\text{tot}},$$

soit :

$$R = \lambda z \ln \frac{A_0}{A_z}$$

avec  $A_0$  l'activité à l'interface eau-sédiment et  $A_z$  la radioactivité à la profondeur  $z$ .

#### 5.4.1.1. Estimation des taux d'accumulation dans le Golfe du Lion

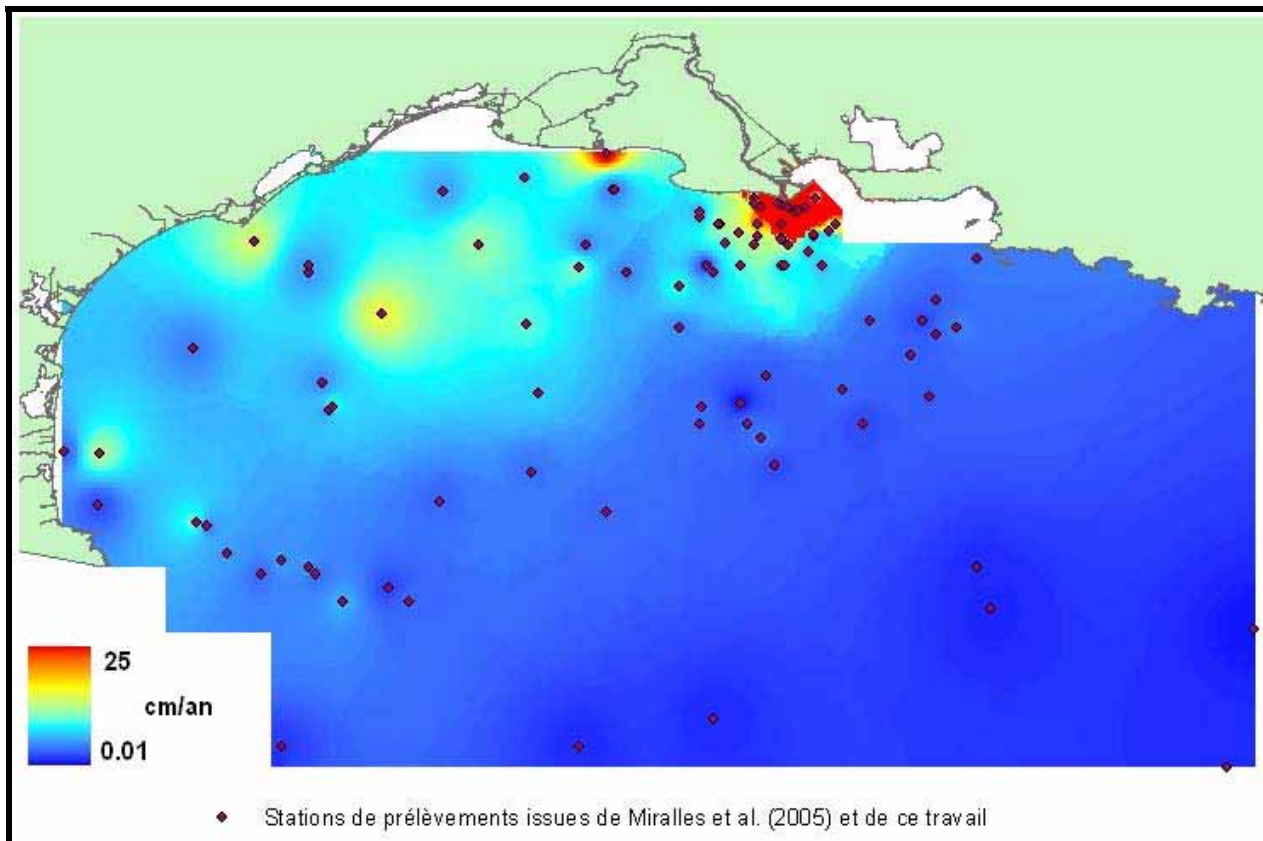
La couche superficielle de mélange SML est peu fréquemment visible à de grandes profondeurs. La faune benthique s'y trouve rare et les courants de fond pouvant entraîner la formation de dépôts contouritiques (Chamley, 1987) sont peu actifs en Méditerranée Occidentale. Même si l'épaisseur analysée ne mesure pas plus de 10 cm, les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  localisés dans le Golfe du Lion, hors prodelta rhodanien, ne présentent apparemment que très rarement de SML (**Figure 5.25**). En revanche, la décroissance rapide du radioélément en excès atteste de faibles taux de sédimentation, notamment sur les profils MT27, MT08, MT04, MT24, etc. La plupart des profils de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sont d'ailleurs du même type.

Les valeurs de taux de sédimentation calculés à partir des mesures de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  lors de la campagne REMORA3 sont du même ordre de grandeur (**Tableau 5.9**). Elles diminuent logiquement avec l'augmentation de la profondeur, sauf pour les stations MT25 à 100 m et MT38 à 603 m qui montrent des valeurs élevées, respectivement  $5.3 \text{ mm.an}^{-1}$  et  $3.6 \text{ mm.an}^{-1}$ . Les autres zones situées à plus de 100 m de profondeur présentent des taux de sédimentation proches de  $1 \text{ mm.an}^{-1}$ . Au-dessus de l'isobathe -50 m, les valeurs sont globalement comprises entre 3 et  $5 \text{ mm.an}^{-1}$ .

Stations	Profondeur (m)	R ( $\text{cm.an}^{-1}$ ) calculé avec le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	R ( $\text{cm.an}^{-1}$ ) calculé avec le $^{137}\text{Cs}$
MT21	37	0.4796	-
MT14	43	0.2647	-
MT10	28	0.1373	0.1310
MT24	81	0.1845	0.1227
MT16	92	0.3950	0.6203
MT11	86	0.3063	0.3632
MT06	83	0.3136	0.1768
MT38	603	0.3588	-
MT25	100	0.5343	-
MT17	93	0.3230	0.7942
MT18	129	0.2316	-
MT31	124	0.3643	-
MT27	988	0.1080	0.0750
MT08	1064	0.1186	0.1296
MT04	781	0.0929	0.0939
MT353	52	0.4171	-

**Tableau 5.9: Taux d'accumulation sédimentaire dans le Golfe du Lion calculés à partir de la décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  (REMORA3).**

Les taux de sédimentation révélés par cette étude sont en accord avec les résultats présentés par Miralles et al. (2005). Malgré la nette décroissance des radionucléides sur les 10 premiers centimètres de chacun des profils étudiés, on ne peut pas écarter l'hypothèse de l'expression d'une SML.



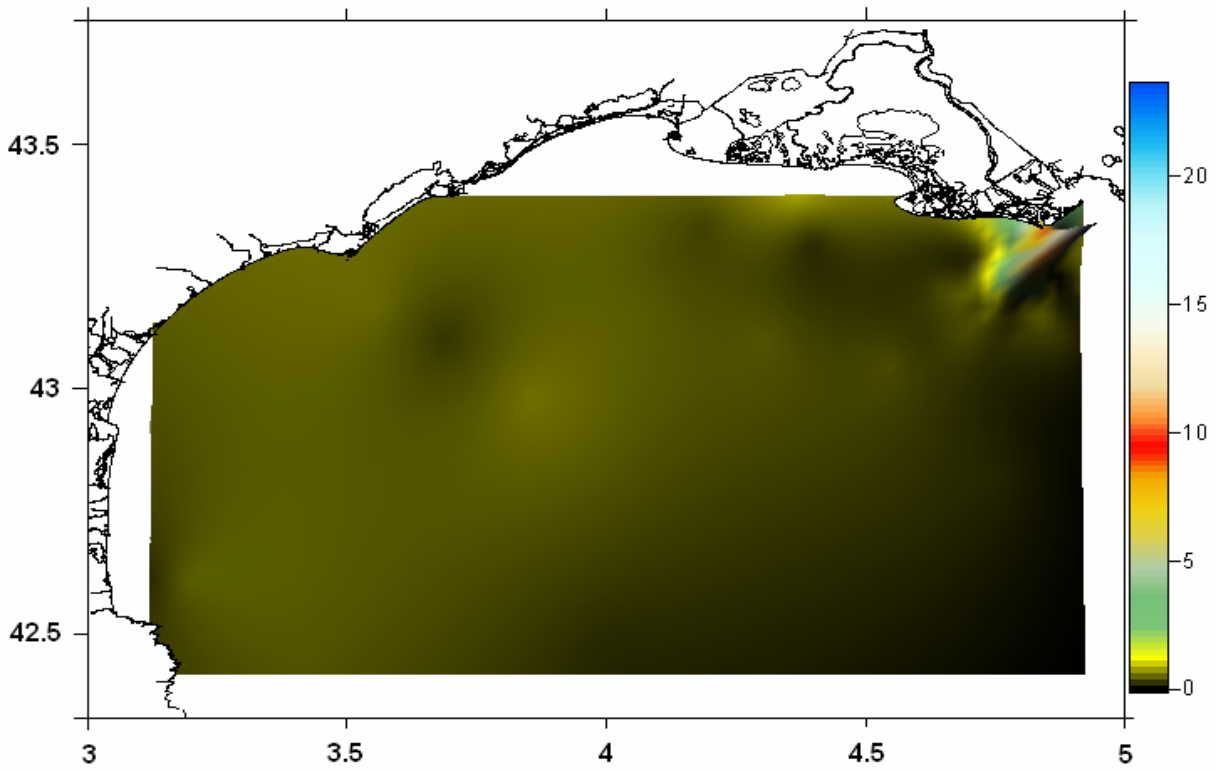
**Figure 5.37 : Distribution des taux de sédimentation dans le Golfe du Lion réunissant les données de ce travail et celles présentées par Miralles et al. (2005).**

Les données de taux de sédimentation apparents (ASR) calculées dans cette étude par permettent de compléter celles de Miralles et al. (2005) et de réaliser une carte de leur répartition dans le Golfe du Lion (**Figures 5.37 et 5.38**), mais de rapporter une tendance d'accumulation préférentielle dans les zones de dépôts de sables reliques. Les zones profondes au-delà du plateau continental témoignent naturellement d'une sédimentation peu active. Le masque appliqué évite de mauvaises extrapolations au niveau du Golfe de Fos et à l'est de l'embouchure du Rhône où les données sont rares. Les lignes isobathymétriques n'ont pas été générées afin d'avoir un meilleur aperçu de l'interpolation des données.

Les taux de sédimentation les plus élevés sont trouvés au niveau du prodelta ( $25 \text{ cm.an}^{-1}$  à la station Roustan) et à l'embouchure de fleuves (Petit Rhône, Hérault, Têt) alors que les plus faibles sont localisés en bas de pente continentale ou à la rupture du plateau (moins de  $1 \text{ mm.an}^{-1}$ ).

Deux points d'analyse (MT25 et MT17) situés dans les zones de sables reliques (en superposant les **Figures 1.5 et 5.37**) font état de forts taux d'accumulation par rapport à leur environnement (entre  $3 \text{ et } 5 \text{ mm.an}^{-1}$ ). C'est une zone où les taux de sédimentation devraient logiquement être très faibles, puisque des sables dits « reliques » affleurant témoigneraient d'une faible dynamique sédimentaire. Seuls deux points d'analyse présentent une anomalie parmi une douzaine dans la zone : des incertitudes sur l'étendue de l'aire des sables reliques et la méthode de traitement ne sont pas à exclure. En outre, une dynamique hydrosédimentaire locale importante expliquerait la granulométrie et le taux d'accumulation légèrement supérieurs des sédiments dans cette zone.

(a)



(b)

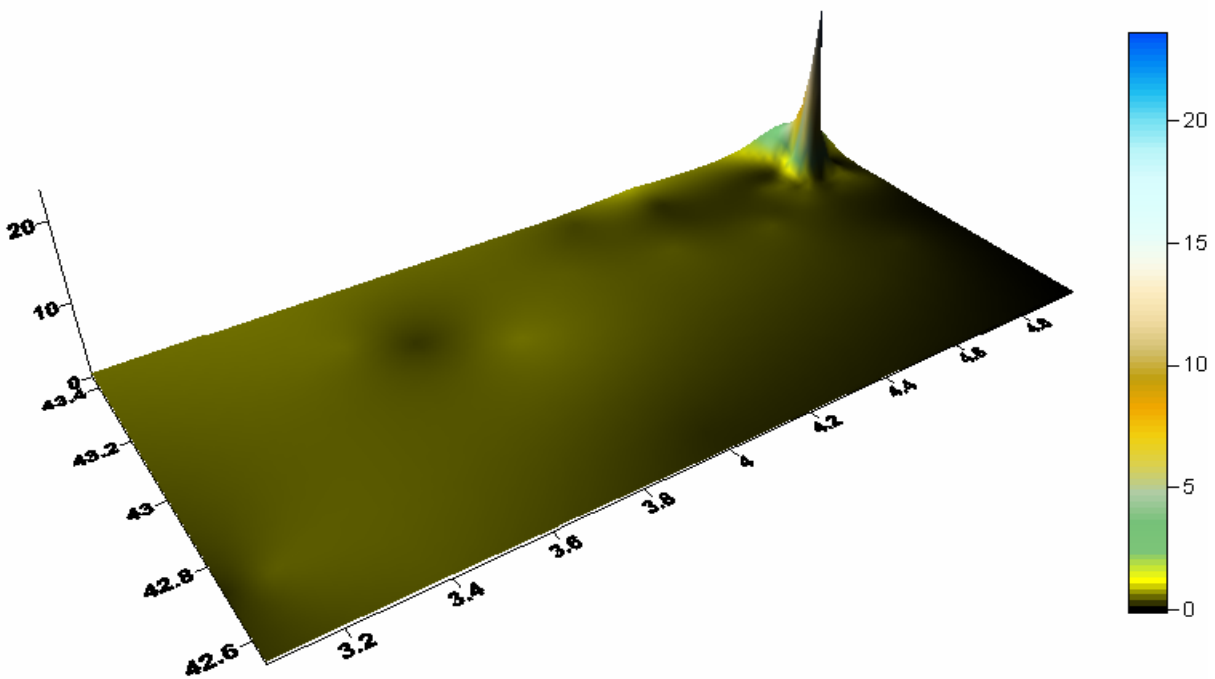


Figure 5.38 : Représentation graphique en 3 dimensions des taux de sédimentation dans le Golfe du Lion ( $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ ) : vue de dessus et calée avec une carte du trait de côte du littoral français (a) et vue de côté avec les coordonnées de longitude et latitude (b).



### 5.4.1.2. Estimation des taux d'accumulation en zone prodeltaïque

La banque de données localisées sur le prodelta rhodanien est très importante mais assez ténue si on exclut les profils qui présentent une SML. Seules 6 stations répondent aux critères de calcul du taux de sédimentation : MT09, MT01, MT11, MT07, MT08 pour REMORA1 et KB13, KB05, KB06, KB16 pour REMORA2 (**Tableau 5.10**). Les autres affichent une couche de mélange pluri-centimétrique.

Campagne	Stations	Profondeur (m)	R (cm.an <sup>-1</sup> ) calculé avec le <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>
REMORA1	MT01	34	0.1568
	MT11	90	0.3638
	MT09	95	1.0053
	MT08	105	0.2240
	MT07	111	0.2010
REMORA2	KB13	38	0.9925
	KB05	57	0.9334
	KB06	62.7	1.5884
	KB16	12.5	2.3062

**Tableau 5.10: Taux d'accumulation sédimentaire calculés à partir de la décroissance radioactive du <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> (REMORA 1 et 2).**

La majorité des profils de radioéléments du prodelta rhodanien dont la décroissance peut être interprétée en terme de taux de sédimentation comportent une SML, c'est-à-dire une vingtaine toutes campagnes confondues. Il est donc indispensable d'utiliser le modèle deux couches prenant en compte le coefficient de mélange D.

### 5.4.2. Calculs avec le modèle biodiffusif

A l'inverse du modèle non-biodiffusif, le modèle biodiffusif prend en compte la couche de mélange générée par la bioturbation et la dynamique sédimentaire de fond. Cette couche est visible sur les profils de concentration en radioéléments et peut être nulle, pluri-centimétrique voire pluri-décimétrique. Pour calculer le coefficient de mélange D, on considère le taux de sédimentation R négligeable, tel que :

$$\rho R \frac{\partial A_{tot}}{\partial z} = 0,$$

et l'équation générale devient alors :

$$D\rho \frac{\partial^2 A_{tot}}{\partial z^2} = \rho\lambda A_{tot},$$

soit :

$$D = \lambda \left( \frac{z}{\ln \frac{A_0}{A_z}} \right)^2$$

La décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans la colonne sédimentaire est due aux processus de mélange ou d'accumulation ou encore la combinaison des deux. Seules les valeurs maxima de taux d'accumulation et de mélange peuvent être calculées par le modèle qui estime alternativement chacun des deux comme étant négligeables (Radakovitch et al., 1999 ; DeMaster et al., 1985).

Le **Tableau 5.11** présente les valeurs de taux de sédimentation  $R$  ( $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ ) et du coefficient de mélange  $D$  ( $\text{cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$ ) sur la globalité des profils. Les deux radioéléments ainsi que leurs SML apparentes ont été utilisés afin de comparer leurs efficacités. Il est admis que le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , marqueur des apports particuliers, fait davantage référence pour ces estimations que le  $^{137}\text{Cs}$ . Afin de pouvoir comparer l'efficacité des radionucléides, on a utilisé les radioéléments dans les mêmes conditions et les mêmes paramètres de mélange, notamment l'épaisseur de la SML déduite du profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  d'autant que le  $^{137}\text{Cs}$  ne montre pas de SML dans la plupart des stations.

Les profils des deux radioéléments ne présentent pas forcément la même épaisseur de couche superficielle de mélange. La SML représentée par le  $^{137}\text{Cs}$  est bien plus épaisse que celle représentée par le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (plus du double) ou alors elle n'est pas déterminable. Elle ne paraît pas être due au mélange des sédiments superficiels mais plutôt à l'évolution temporelle des rejets de contaminants radioactifs issus du parc nucléaire rhodanien. C'est la raison pour laquelle la suite de l'étude a été menée avec les valeurs de SML déduite du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ .

Les taux de sédimentation au  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  déduits respectivement des SML relevées par les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  sont assez proches mais montrent surtout la même évolution : lorsque l'un croît, l'autre croît également, et inversement lors de phase de décroissance. On remarque la même chose en comparant les deux méthodes de géochronologie au  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et au  $^{137}\text{Cs}$ , même si la seconde sous-estime de moitié la première et qu'elle n'est pas vérifiable dans tous les cas. Au final, un facteur 3 sépare les valeurs de taux de sédimentation calculées avec un profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  seul (SML  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) et avec un profil de  $^{137}\text{Cs}$  seul (SML  $^{137}\text{Cs}$ ).

Il est quasiment impossible d'évaluer une épaisseur de SML dans une carotte sédimentaire prélevée au Küllenberg car elle constitue à peine un niveau sédimentaire et, par-dessus tout, le toit de la carotte n'est pas préservé lors du prélèvement.

Les résultats obtenus concordent avec ceux répertoriés par Radakovitch et al. (1999) qui ont évalué le mélange entre  $0.84$  et  $41.6 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$  sur 9 carottes dans la même zone, ainsi que par Zuo et al. (1996) qui a déterminé des valeurs entre  $0.002$  et  $7 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$ . Dans notre cas, en exceptant les longues carottes citées précédemment, les valeurs sont comprises entre  $0.22$  et  $89.28 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$  autour d'une moyenne de  $12.22 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$ . Les zones les plus proches de l'embouchure ne sont pas nécessairement les plus affouillées. Comme l'impact remobilisateur des vagues ne sévit plus à partir d'une certaine profondeur, la faune benthique est essentiellement impliquée dans cette épaisseur de mélange.

Les taux de mélange ont été calculés avec les deux radioéléments mais en gardant la SML déduite des profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  pour pouvoir les comparer. Ils sont très proches pour des valeurs comprises entre  $0$  et  $20 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$  mais bien différents pour les autres cas. Des anomalies sont parfois relevées, notamment à la station MT01bis où le taux de mélange atteint  $8595.25 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$  avec le  $^{137}\text{Cs}$  contre  $4.98 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$  avec le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ .

Campagne	Stations	Prof. (m)	SML <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (cm)	SML <sup>137</sup> Cs (cm)	R <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (cm.an <sup>-1</sup> ) avec SML <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>	R <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (cm.an <sup>-1</sup> ) avec SML <sup>137</sup> Cs	R <sup>137</sup> Cs (cm.an <sup>-1</sup> ) avec SML <sup>137</sup> Cs	D <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (cm <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )	D <sup>137</sup> Cs (cm <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )
REMORA1	MT14	57	7	13	0.3030	0.1976	0.0879	6.5137	11.7156
	MT22	73	4	12	0.4552	0.3752	0.1696	10.2880	12.9998
	MT23	87	10	19	0.3925	0.2656	0.1409	14.5360	35.5349
	MT05	97	10		0.2803	0.2803	0.1261	8.1532	8.0754
	MT04	87	6	10	0.2081	0.1383	0.1136	2.3758	3.2415
	MT15	50	4	7	0.1414	0.1092	0.1037	1.0519	2.5497
	MT19	75	7	nd	0.9362	nd	nd	89.2767	10.8249
	MT13	74	9	15	0.2826	0.1905	0.0986	6.2694	4.5099
	MT10	90	10	19	0.5445	0.3118	0.2250	20.2940	205.1084
	MT06	106	6	13	0.4165	0.2622	0.1255	5.8667	4.6756
REMORA3	MT01ter	57	12	nd	0.2475	nd	nd	5.5148	2.2765
	MT02bis	90	17	nd	0.1886	nd	nd	9.5049	14.3192
	MT01bis	26	10	nd	0.2556	nd	nd	4.9795	8595.2545
	MT09X	95	16	nd	0.3940	nd	nd	8.7141	1.7197
CARMEX	MT18	28	3	nd	0.1376	nd	nd	0.2200	2.6164

**Tableau 5.11 : Taux de sédimentation R (cm.an<sup>-1</sup>) et taux de mélange D (cm<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>) calculés au moyen de la décroissance radioactive du <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> et du <sup>137</sup>Cs en prenant en compte l'épaisseur de la SML. Comparaison entre les valeurs de R selon les valeurs de SML évaluées avec chacun des radionucléides. Les valeurs non déterminées (nd) s'expliquent par l'absence de limite de la SML.**

De la même manière que pour les taux de sédimentation, le <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> ne peut être substitué par le <sup>137</sup>Cs pour estimer les taux de mélange. Néanmoins, en attribuant à un échantillon une radioactivité de surface que l'on trouve actuellement dans les sédiments de l'embouchure rhodanienne à savoir 15 Bq.kg<sup>-1</sup>, en intégrant une masse sédimentaire de référence (environ 250 g en surface) et son rapport poids frais/poids sec (2.5 environ) ainsi que son application sur une surface équivalente à celle du multi-tubes (56.25 cm<sup>2</sup>), on obtient un mélange annuel moyen de 0.815 Bq en prenant le taux de mélange moyen de 12.22 cm<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>.

Radakovitch et al. (1999) ont également calculé les taux de mélange séparément dans la SML et le reste de la colonne sédimentaire. Ils arrivent à la conclusion que la SML est effectivement plus mélangée que le reste de la carotte, ce qui est confirmé par les profils de toutes les stations de prélèvements de notre étude quels que soient les radioéléments mis en cause (**Tableau 5.12**). Les valeurs de <sup>137</sup>Cs varient de 0.51 à 12.27 cm<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup> dans la partie sous-jacente à la SML contre 0.14 à 329.15 cm<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup> pour le <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>. Les valeurs augmentent d'un facteur 10, 100 voire 1000 au sein même de la SML.

Campagne	Stations	Prof. (m)	Épaisseur L de la SML déduite du $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (cm)	D $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) au niveau de la SML	D $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) en dessous de la SML	Coefficient D $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) global	D $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) au niveau de la SML	D $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) en dessous de la SML	Coefficient D $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) global
REMORA1	MT14	57	7	41.31	3.2181	6.5137	13.24	1.9743	11.7156
	MT22	73	4	20240.58	7.4622	10.2880	93.56	7.5495	12.9998
	MT23	87	10	339.51	6.3277	14.5360	20.51	4.7931	35.5349
	MT05	97	10	56.79	2.6971	8.1532	30.07	0.9394	8.0754
	MT04	87	6	2889.70	1.5331	2.3758	89.81	1.7387	3.2415
	MT15	50	4	173.66	0.7729	1.0519	6.31	1.3710	2.5497
	MT19	75	7	328.92	37.8240	89.2767	80.36	8.4212	10.8249
	MT13	74	9	354.10	3.2855	6.2694	91.97	1.6914	4.5099
	MT10	90	10	168.55	9.7354	20.2940	18.55	12.2671	205.1084
	MT06	106	6	15166.91	3.8629	5.8667	356.85	2.4419	4.6756
MT12	75	6	5731.80	1.1741	1.9792	27.18	0.7354	1.5952	
REMORA3	MT01ter	57	12	136.13	2.1192	5.5148	23.66	0.5409	2.2765
	MT02bis	90	17	53.95	1.8506	9.5049	102.55	0.8144	14.3192
	MT01bis	26	10	14.97	4.0261	4.9795	0.13	1.4688	8595.2545
	MT09X	95	16	39.25	7.0912	8.7141	44.71	1.0969	1.7197
CARMEX	MT18	28	3	1204.84	0.1366	0.2200	260.29	0.5114	2.6164

**Tableau 5.12 : Taux de mélange D ( $\text{cm}^2.\text{an}^{-1}$ ) calculés au moyen de la décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  en prenant en compte l'épaisseur de la SML déduite des profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ .**

La SML est une profondeur d'affouillement et de mélange intenses dans laquelle les radioéléments ont la possibilité de se diffuser dans les trois dimensions et principalement vers le bas.

Il est d'ailleurs possible d'estimer un coefficient de diffusion effective des radionucléides  $D_{\text{eff}}$  en  $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ . Ce phénomène physico-chimique explique notamment la différence entre les profondeurs de pénétration du  $^{137}\text{Cs}$  observée sur les profils et calculée selon la formule développée par Nittrouer et al. (1983/1984) à savoir  $h = R.t + L$  avec h la profondeur de pénétration du  $^{137}\text{Cs}$  prédite par le modèle deux couches, R le taux de sédimentation apparent déterminé par le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , t le temps écoulé depuis le moment où le radioélément a atteint le fond sédimentaire et L l'épaisseur de la SML. La détermination de t repose sur le principe de datation des premiers signaux de  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments et leur caractérisation par rapport aux premiers apports du radionucléides en Mer Méditerranée par le biais d'essais nucléaires atmosphériques de haute altitude qui ont débuté en 1958 (Radakovitch et al., 1999 ; Carter et Moghissi, 1977). Seuls les profils montrant la fin du signal de  $^{137}\text{Cs}$  ont donc été représentés dans le **Tableau 5.13**.

Le coefficient de diffusion effective  $D_{\text{eff}}$  est censé représenter la migration du  $^{137}\text{Cs}$ . Il dépend de la porosité du sédiment, du coefficient de distribution du radioélément Kd et de la diffusion moléculaire (Anderson et al., 1987). En supposant que la différence entre les deux profondeurs de pénétration ne soit due qu'à un phénomène de diffusion, Crank (1956) a posé une relation pour calculer  $D_{\text{eff}}$  telle que :

$$z = \sqrt{2 D_{\text{eff}} t} ,$$

$$\text{soit } D_{\text{eff}} = \frac{z^2}{2t}$$

avec z la différence entre les profondeurs de pénétration du  $^{137}\text{Cs}$  observée et prédite par le modèle (cm). Le coefficient  $D_{\text{eff}}$  varie de  $8.37 \cdot 10^{-10}$  à  $4.07 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$  dans notre étude contre  $3.3 \cdot 10^{-8}$  à  $1.1 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$  pour Radakovitch et al. (1999) dans la même zone, et  $1.58 \cdot 10^{-9}$  à  $2.31 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$  pour Ligero et al. (2005) dans le

Golfe de Cadiz. Les plus fortes valeurs sont détectées dans les profils Küllenberg mais elles sont assez faibles ou normales ailleurs.

Le coefficient de diffusion moléculaire  $D^{\text{molec}}$  estimant la capacité des radioéléments à migrer dans les sédiments est défini par Ligeró et al. (2005) tel que :

$$D^{\text{molec}} \approx \frac{w^2 D_o^{\text{molec}}}{1 + \frac{\rho}{w} k_D}$$

avec  $w$  et  $\rho$ , respectivement la porosité et la masse volumique ( $\text{kg.L}^{-1}$ ) du sédiment,  $D_o^{\text{molec}}$  le coefficient de diffusion moléculaire du  $^{137}\text{Cs}$  dans l'eau (environ  $10^{-5} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ ) et  $k_D$  le coefficient de distribution du radioélément. Les données de  $k_D$  ne sont pas disponibles pour chacune des stations mais cette étude a montré des valeurs variant entre  $5 \cdot 10^3$  et  $5 \cdot 10^4$ . En prenant  $k_{D\text{moy}} = 10^4$ ,  $w_{\text{moy}} = 0.4$  et  $\rho_{\text{moy}} = 1.4$  d'après les données de teneur en eau et de densité sèche des sédiments, on arrive à un coefficient de diffusion moléculaire  $D^{\text{molec}}$  de  $4.57 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ .

Campagne	Stations	Prof. (m)	SML $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (cm)	R $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (cm.an <sup>-1</sup> ) avec SML $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	Prof. de pénétration du $^{137}\text{Cs}$ calculée (cm)	Prof. de pénétration du $^{137}\text{Cs}$ observée (cm)	Coefficient de diffusion $D_{\text{eff}}$ du $^{137}\text{Cs}$ (cm <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )	Coefficient de diffusion $D_{\text{eff}}$ du $^{137}\text{Cs}$ (cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
REMORA1	MT04	87	6	0.2081	16.4	23	0.4349	$1.37919 \cdot 10^{-8}$
	MT15	50	4	0.1414	11.1	22	1.1946	$3.78821 \cdot 10^{-8}$
	MT12	75	6	0.1714	14.6	20	0.2948	$9.34960 \cdot 10^{-9}$
REMORA2	KB16	12.5	60	2.3062	175.3	160	2.3440	$7.43265 \cdot 10^{-8}$
	KB06	62.7	20	1.5884	99.4	250	226.7434	$7.18998 \cdot 10^{-6}$
	KB05	57	30	0.9334	76.7	190	128.4369	$4.07271 \cdot 10^{-6}$
REMORA3	MT01ter	57	12	0.2475	24.4	26	0.0264	$8.37337 \cdot 10^{-10}$
	MT09X	95	16	0.3940	35.7	37	0.0169	$5.35895 \cdot 10^{-10}$
CARMEX	MT18	28	3	0.1376	9.9	17	0.5069	$1.60751 \cdot 10^{-8}$

**Tableau 5.13 : Comparaison des profondeurs de pénétration du  $^{137}\text{Cs}$  observées avec celles calculées à partir de l'épaisseur de la SML et des taux d'accumulation maximum déterminés à partir des activités en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Evaluation du coefficient de diffusion du  $^{137}\text{Cs}$  dans la colonne sédimentaire.**

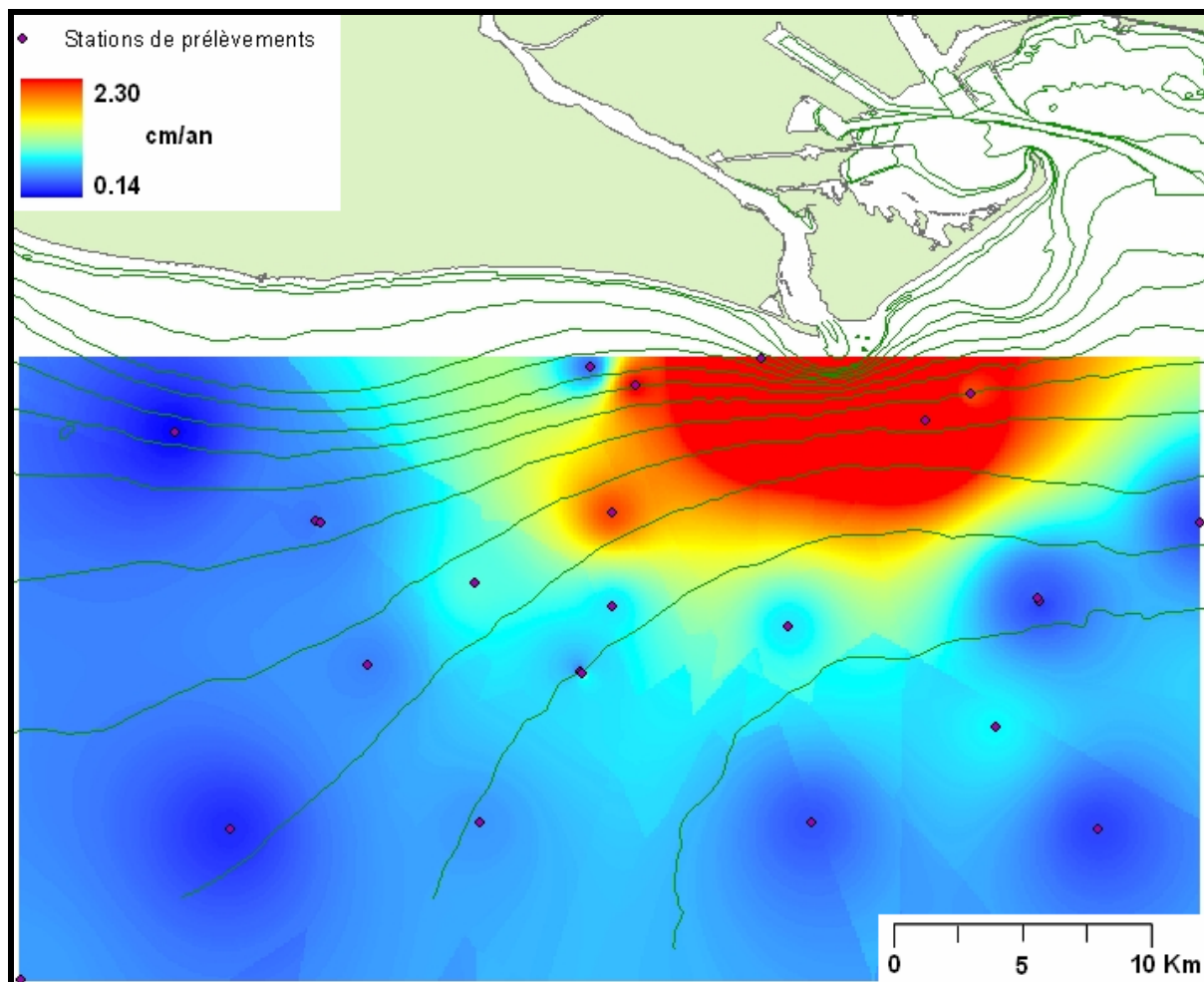
Le coefficient de mélange est donc supérieur au coefficient de diffusion effective, lui-même supérieur au coefficient de diffusion moléculaire ( $D_{\text{mix}} > D_{\text{eff}} > D_{\text{molec}}$ ). Le processus de mélange du radioélément aurait donc pour origine prépondérante la bioturbation benthique.

#### 5.4.3. Significativité des taux de sédimentation sur le prodelta rhodanien

La littérature fait état de taux de sédimentation importants sur le prodelta du Rhône, notamment après des événements de crue, mais ils ne concernent qu'une petite partie du prodelta. Charmasson et al. (1998) et Beaudoin et al. (2005) évoquent respectivement des chiffres tels que 37 à 48 cm.an<sup>-1</sup> au moyen de la méthode d'estimation basée sur le rapport  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  et 60 cm.an<sup>-1</sup> grâce à l'étude des pollens. Les dépôts sédimentaires du printemps

2008 exposés dans ce manuscrit (§ 4.5.2.) confirment des taux d'accumulation de plus de 40 cm en quelques mois en se basant sur les données granulométriques. Les taux de sédimentation diminuent très rapidement avec la distance à la source.

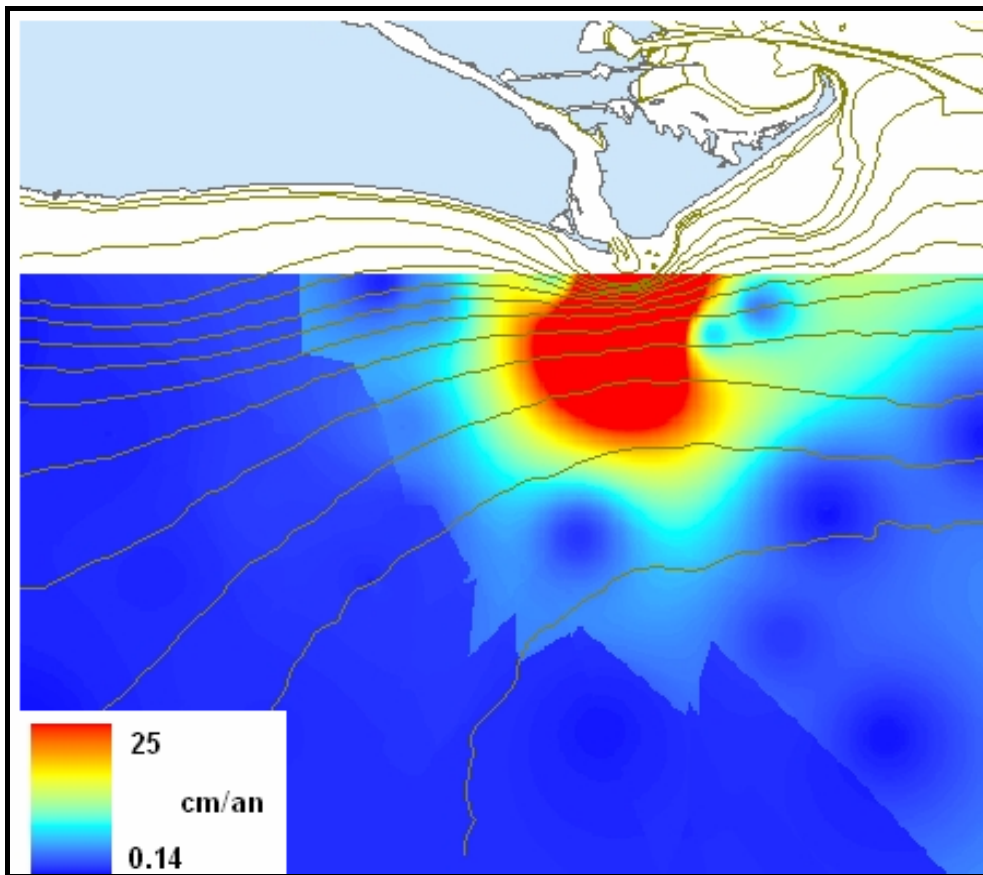
En effet, des taux de l'ordre de  $0.14 \text{ cm.an}^{-1}$  sont trouvés en périphérie du prodelta à  $2.30 \text{ cm.an}^{-1}$  à 12.5 m de profondeur à l'ouest de l'embouchure (**Figure 5.39**). Ils sont cohérents avec les résultats de Drexler et al. (2008) et Zuo et al. (1996), de l'ordre respectivement de 2.5 à  $10 \text{ cm.an}^{-1}$  près de l'embouchure et  $0.6 \text{ cm.an}^{-1}$  sur le prodelta en général.



**Figure 5.39 : Distribution des taux de sédimentation sur le prodelta rhodanien calculés avec la méthode du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et à partir des données des campagnes REMORA1, REMORA2 et REMORA3.**

Les stations très proches de l'embouchure ont été volontairement écartées de la sélection de la **Figure 5.39**, notamment Roustan Sud, car elles tirent les valeurs de taux de sédimentation vers le haut et l'interpolation devient incohérente. La **Figure 5.40** montre une certaine morphologie sédimentaire du prodelta rhodanien qui semble proche de la réalité, mais la représentation spatiale des taux de sédimentation devient insatisfaisante, particulièrement vers le sud-est où apparaît une frontière clairement dessinée. Ceci est expliqué par une certaine homogénéité des données de R ( $< 1 \text{ cm.an}^{-1}$  en général) et la présence d'un unique point sortant du cluster à  $25 \text{ cm.an}^{-1}$  qui biaise l'interpolation des valeurs. En outre, ce point dont la valeur est excentrée se situe dans une zone isolée à la très proche embouchure du Rhône dans laquelle peu de taux de sédimentation ont pu être déterminés.

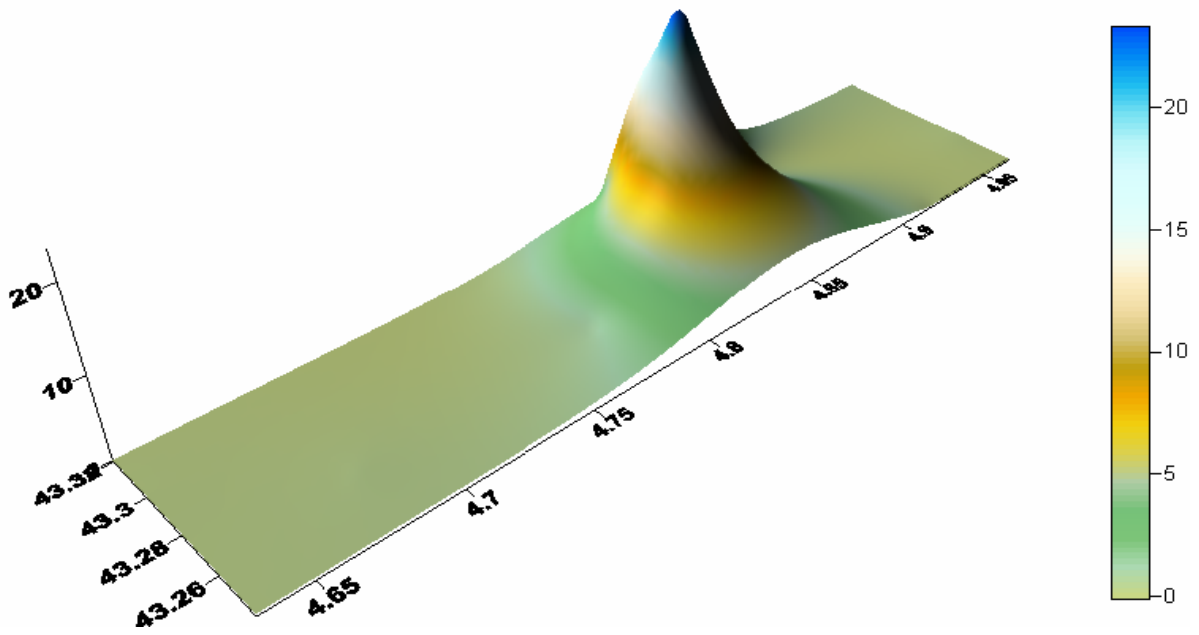
Une image 3D créée avec Surfer 8 au moyen d'un procédé de krigeage montre néanmoins l'importance du prodelta rhodanien en matière de piégeage sédimentaire (**Figure 5.41**).



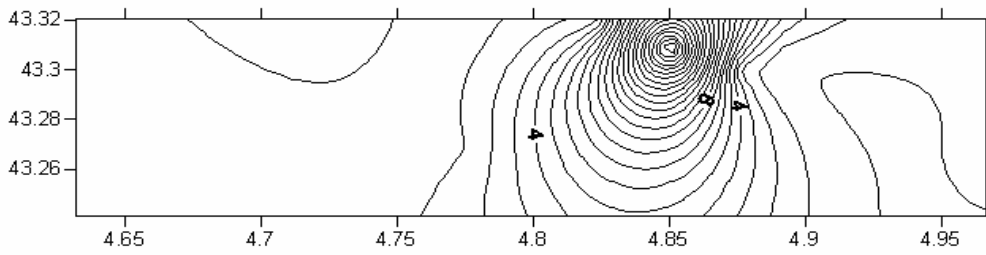
**Figure 5.40 : Distribution des taux de sédimentation sur le prodelta rhodanien calculés avec la méthode du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  à partir des données des campagnes REMORA1, REMORA2 et REMORA3, ainsi que l'estimation du taux d'accumulation à la station Roustan.**

Les profils de radioéléments des stations très proches de l'embouchure sont généralement trop perturbés pour pouvoir être interprétés correctement (**Figures 5.42 et 5.43**). En effet, directement soumises aux apports particuliers et dissous du Rhône et à la remobilisation sédimentaire due à l'effet de la houle, elles ne proposent pas de profils de radioéléments très lisibles en matière de taux de sédimentation. Les dépôts fréquents de sables lors de périodes de forts débits liquides (**Figures 5.44 et 5.45**) ne facilitent pas l'utilisation des radioéléments pour déterminer des taux de sédimentation par la méthode de décroissance radioactive puisqu'il a été démontré que leurs affinités avec les particules grossières étaient limitées. Ils restent cependant des marqueurs intéressants d'un contexte hydrodynamique turbulent entraînant l'accumulation de matériaux grossiers.

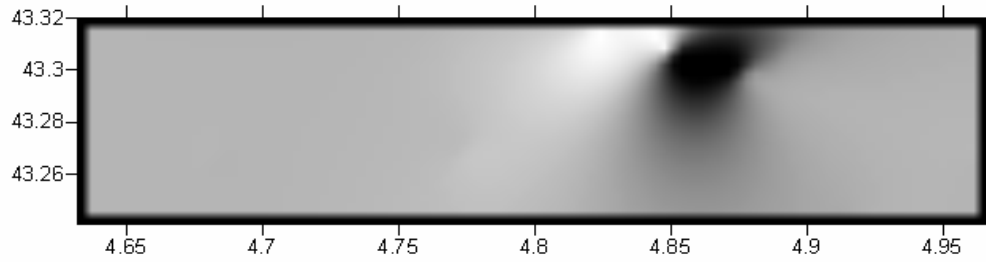
(a)



(b)



(c)



(d)

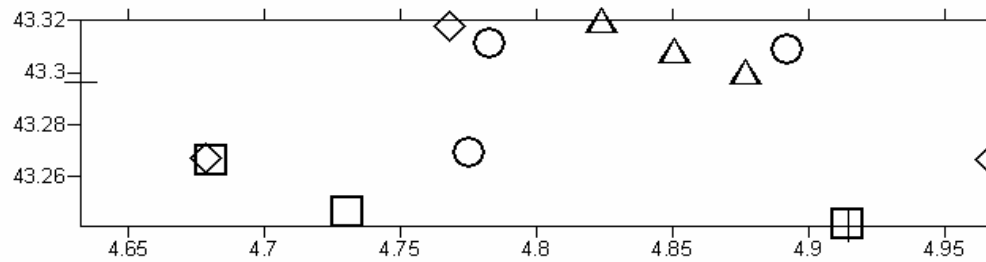


Figure 5.41 : Représentations des taux de sédimentation sur le prodelta (cm.an<sup>-1</sup>) en 3D (a), de courbes d'isovaleurs (b), surface ombrée (c) et la position des stations (d).



#### 5.4.4. Marquage radioactif et sédimentaire d'un épisode de crue

L'association des analyses granulométriques et de concentrations de radioéléments permet de situer les crues épisodiques ou les violentes tempêtes sur les dépôts sédimentaires résultant (Miralles et al., 2006). Drexler et Nittrouer (2008) ont utilisé la granulométrie, les radioéléments à demi-vie courte comme le  $^7\text{Be}$ , des observations stratigraphiques couplées à des analyses radiographiques aux rayons X, pour déterminer la signature sédimentaire de dépôts de deux crues à un peu plus de  $4000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à l'embouchure du Rhône durant l'année 2004. Ces travaux ont suivi ceux de Miralles et al. (2006) qui ont porté sur la crue événementielle du mois de décembre 2003, dont le débit a dépassé  $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , grâce au suivi de 3 stations étudiées pendant 3 campagnes en décembre 2003 (BOBORHONE1), en février 2004 (BOBORHONE2) et en avril 2004 (SED2).

Les coordonnées de la station appelée BF05 lors des 2 premières missions correspondent à celles de la station BFChenal30m de la troisième mission. Les carottes prélevées à cette station présente des conséquences sédimentaires post-crue sur une période de 4 mois puisque BOBORHONE1 a été effectuée mi-décembre 2003 (**Figure 5.42**) et SED2 mi-avril 2004 (**Figure 5.43**), alors que la crue a connu son pic le 4 décembre 2003.

Miralles et al. (2006) ont suivi l'évolution de la radioactivité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur les trois carottes BF05, BF06 et BF07 prélevées à 2 mois d'intervalle les unes des autres (décembre 2003, février 2004 et avril 2004). Ils ont identifié la signature de dilution comme étant une diminution de la concentration du radionucléide ( $6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) dans le sédiment provoquée par la crue de décembre 2003. Cette marque se retrouve à une profondeur croissante avec le temps : 6 cm (12/2003), 11 cm (02/2004) et 19 cm (04/2004). Ils en ont déduit un taux d'accumulation de 13 cm en 4 mois ( $57 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$  en extrapolant). Le pic de dilution correspond à des dépôts syn-crues puisqu'il atteste d'une baisse brutale de la quantité de radioéléments dans le sédiment, notamment due au transport dynamique de sables sur lesquels ils ne s'adsorbent pas. Si on suppose que le commencement précis de la crue est matérialisé sur les profils de BF05 (Chenal30m) par le début de la décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , c'est-à-dire le point de concentration  $60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  commun aux 3 profils (**Figures 5.42 et 5.43**), limite entre les dépôts ante-crue et post-crue, l'évolution est relativement différente mais le résultat est proche : 19 cm (12/2003), 19 cm (02/2004) et 29 cm (04/2004). En outre, les apports de la crue de décembre 2003 ont pu être tracés par des signaux de  $^7\text{Be}$  sur une profondeur de 18 cm au niveau de la station BF05 (Miralles et al., 2006) signalant des dépôts récents ( $< 200$  jours). Le profil de la station BF06 analysé sur deux mois (entre décembre 2003 et février 2004) est moins explicite que celui de BF05 car il ne montre pas de réels pics de concentration en  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  mais des signaux de dilution à 3 cm (12/2003) et 10 cm (02/2004), soit 7 cm en 2 mois (**Figure 5.42**). En extrapolant sur une année, le taux d'accumulation s'élèverait donc à  $42 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$ .

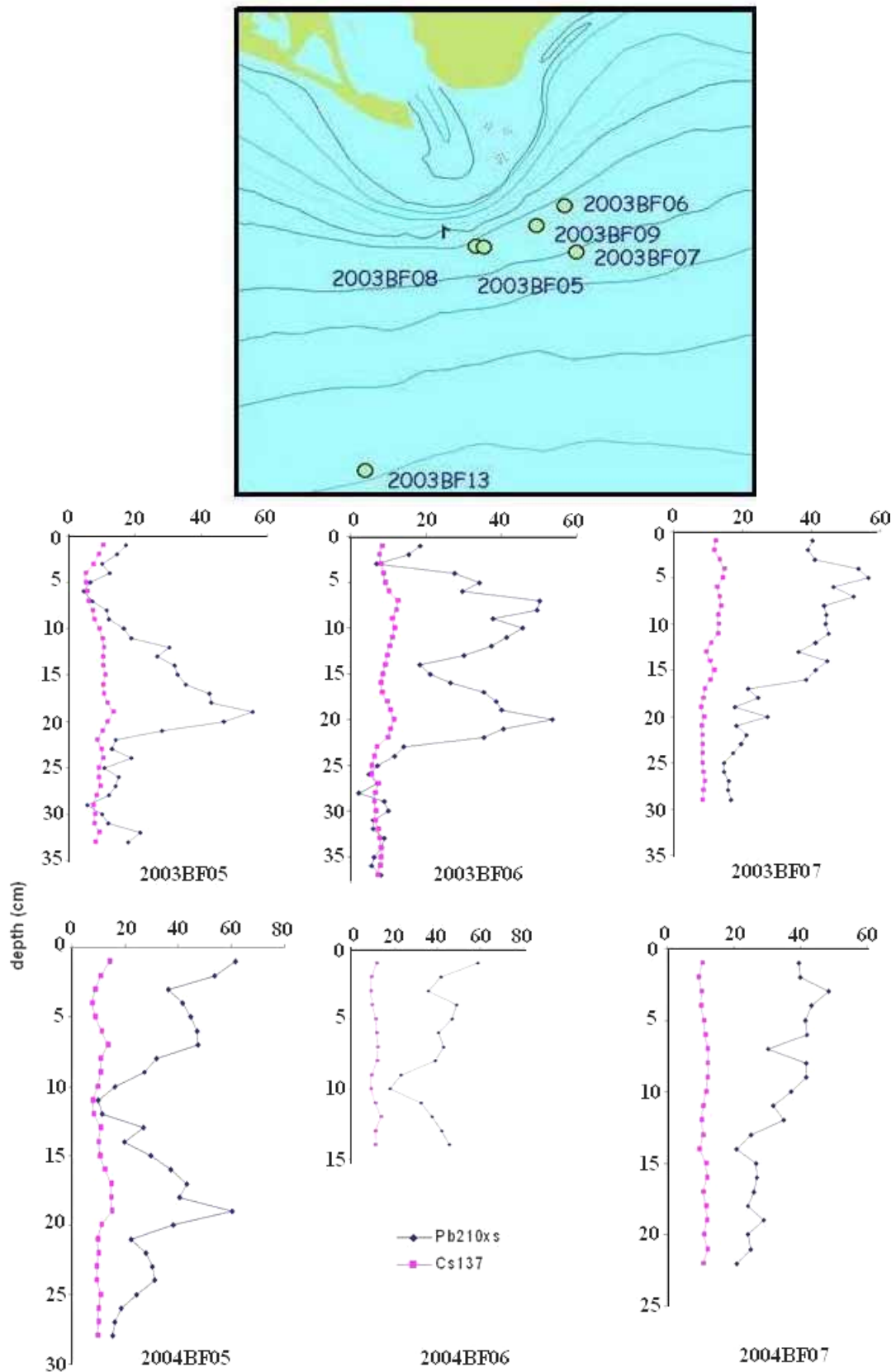


Figure 5.42 : Comparaison des profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $^{137}\text{Cs}$  des stations 05, 06 et 07 dans la colonne sédimentaire issus des missions BOBORHONE1 (ligne du haut notés 2003) et BOBORHONE2 (ligne du bas notés 2004).

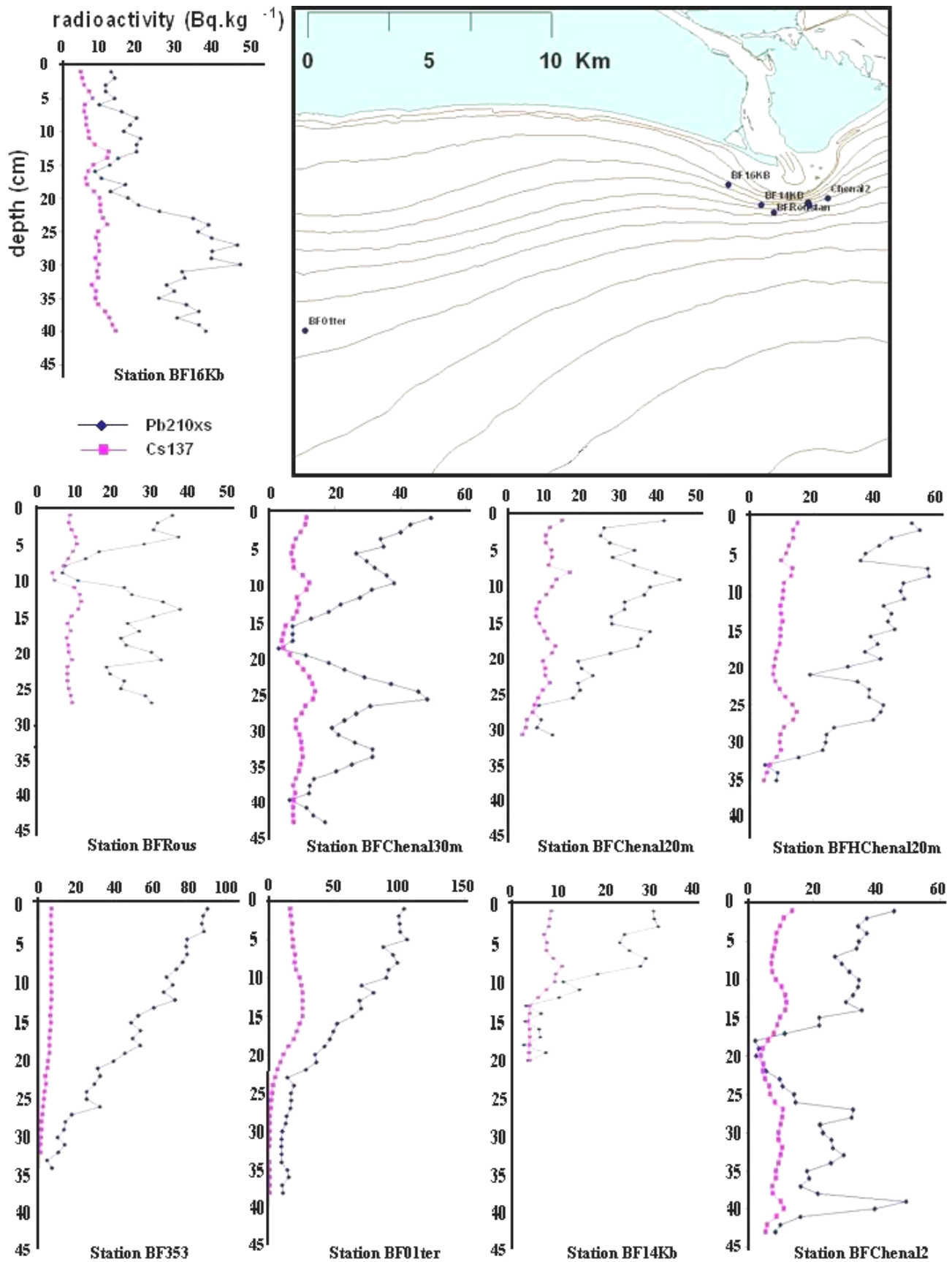


Figure 5.43 : Profils de <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> et <sup>137</sup>Cs dans la colonne sédimentaire issus de la mission SED2. La station BFChenal30m est la station BF05 des missions BOBORHONE1 et BOBORHONE2.

Parmi les stations prospectées en avril 2004, certaines affichent nettement l'effet de dilution radioactive correspondant vraisemblablement au pic de crue : 9 cm à BFRous, 15 cm à BFChenal20m, 21 cm à BFHChenal20m, 18 cm à BFChenal2 et 16 cm à BF16Kb. L'allure générale des profils tendrait à confirmer l'origine événementielle de ces baisses de concentration et le fait qu'elle soit commune à chacune des stations permettrait de penser que ces épisodes ont marqué l'embouchure en différents endroits. En ciblant le pic de débit au 4 décembre 2003 correspondant au minimum de radioactivité et en considérant la date du prélèvement au 14 avril 2004, on peut établir une accumulation sédimentaire relative pendant 100 jours exactement. La nature exceptionnelle de ces accumulations ne permet pas de présenter un taux de sédimentation annuel, mais à titre informatif, il en résulte des taux moyens de  $32.85 \text{ cm.an}^{-1}$  pour BFRous,  $54.75 \text{ cm.an}^{-1}$  pour BFChenal20m,  $76.65 \text{ cm.an}^{-1}$  pour BFHChenal20m,  $65.7 \text{ cm.an}^{-1}$  pour BFChenal2 et  $58.4 \text{ cm.an}^{-1}$  pour BF16Kb. En appliquant le même calcul à BFChenal30m, le taux moyen s'élève à  $69.35 \text{ cm.an}^{-1}$  et non plus  $57 \text{ cm.an}^{-1}$  déduit de pic à pic. Les taux de sédimentation relative sont donc différents selon les points du prodelta et particulièrement à la proche embouchure du Rhône, mais durant la crue de décembre 2003 la partie proximale occidentale (BFHChenal20m, BFChenal30m, BFChenal20m) a eu tendance à accumuler davantage de sédiments que la partie proximale orientale (BFChenal2). L'accumulation observée sur les carottes sédimentaires est relative et les taux de sédimentation évalués ne constituent pas des valeurs absolues. Néanmoins, en considérant que les stations sondées sont très proches et qu'elles se trouvent dans une même zone, on peut estimer grossièrement le taux de sédimentation à l'embouchure de  $54.1 \pm 16.1 \text{ cm.an}^{-1}$ , soit 30 % d'erreur.

La méthode de définition des taux d'accumulation utilisant les signatures des pics de dilution radioactive ne permet pas de conclure à des taux absolus mais les valeurs qu'elle délivrent s'intègrent parfaitement aux mesures réalisées lors de projets antérieurs par d'autres techniques: 37 à  $48 \text{ cm.an}^{-1}$  avec le rapport  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  (Charmasson et al., 1998),  $60 \text{ cm.an}^{-1}$  avec les pollens (Beaudoin et al., 2005) et de 20 à  $50 \text{ cm.an}^{-1}$  avec la décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  associée au rapport isotopique du césium (Calmet et Fernandez, 1990).

La correspondance des pics de dilution avec des événements de forts débits fluviaux est relativement peu discutable puisqu'elle est vérifiée par des apports sableux dans les carottes sédimentaires témoignant de périodes hydrologiques agitées (**Figures 5.44 et 5.45**). Drexler et Nitrouer (2008) montrent que les épisodes de crue sont marqués dans les sédiments par des signatures de radioéléments jusqu'à des stations profondes : l'une à 30 m de profondeur avec un enregistrement sableux explicite et l'autre à 62 m de profondeur sans discontinuité dans la proportion de particules fines. La nature des sédiments déposés sur le prodelta lors des crues dépend de la distance à la source des apports.

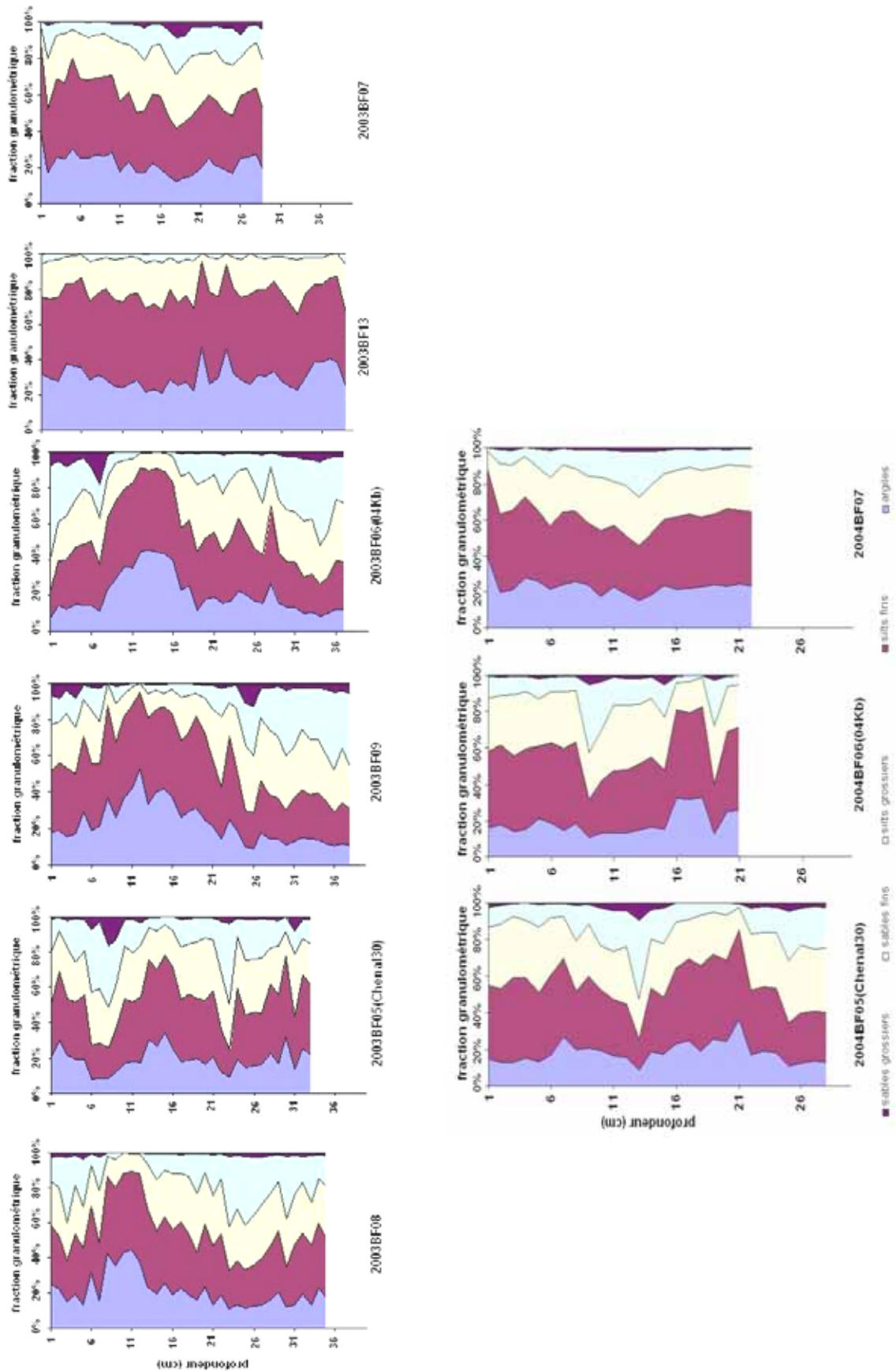
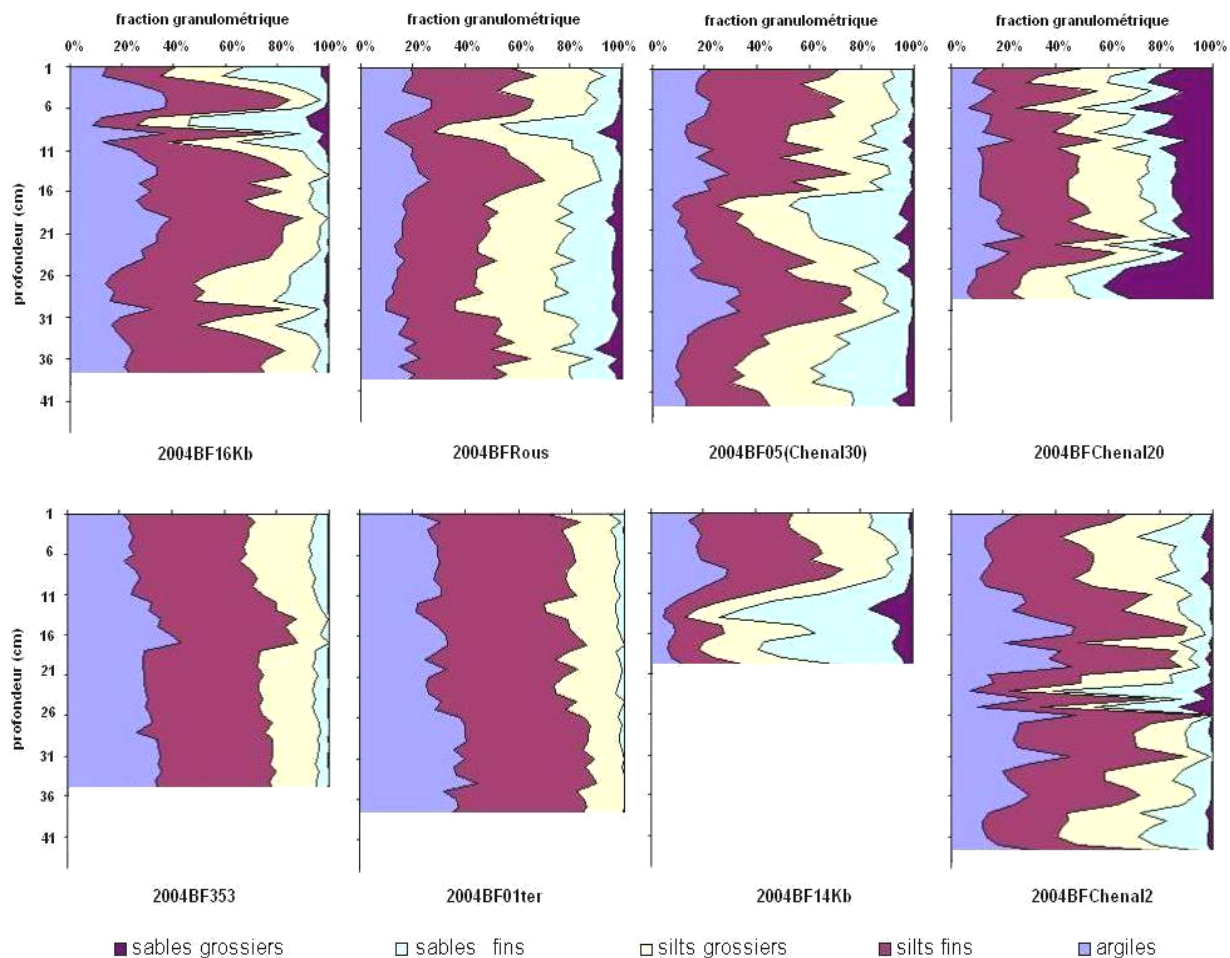


Figure 5.44 : Fraction granulométrique des profils des missions BOBORHONE1 (colonne de gauche) et BOBORHONE2 (colonne de droite).



**Figure 5.45 : Fraction granulométrique des profils des stations de la mission SED2.**

Les profils granulométriques 2003BF08, 2003BF05, 2003BF06, 2003BF09 (**Figure 5.44**) montrent très explicitement des alternances de niveaux très argileux et très sableux témoignant d'épisodes hydrologiques différents. Des horizons riches en sables (60 % dont un tiers de grossiers) se trouvent à 8 cm et 7 cm de profondeur, respectivement aux stations 2003BF05 et 2003BF06 (**Tableau 5.14**). Ils sont précédés de niveaux constitués majoritairement de particules fines : 30 % d'argiles et 65 % de silts dont 4/5 de fins. L'augmentation progressive du débit du fleuve s'accompagne d'une intensification du transport par charriage et par saltation de matériaux grossiers, ce qui explique le granoclasement inverse observé sur les profils granulométriques. Le point d'inflexion passant du fin au grossier correspond donc au début de la crue et inversement pour le point d'inflexion passant du grossier au fin.

Les mêmes observations sont réalisées sur les profils 2004BF05 et 2004BF06 (**Figure 5.44** et **Figure 5.45**) avec un décalage de près de 5 cm vers le bas des structures sédimentaires évoquées précédemment. Il en va de même entre les profils 2003BF05 et 2004BF05 (SED2) qui présentent la même allure avec un décalage compris entre 5 et 7 cm selon la structure sédimentaire (**Figure 5.45**). Les signatures granulométriques et radioéléments concordent de manière satisfaisante avec la profondeur, à plus ou moins 2 cm.

		Station BF05			Station BF06	
		BB1	BB2	SED2	BB1	BB2
Profils de radio-activité	Début de la dilution	19 cm	19 cm	26 cm	7 cm	15 cm
	Pic de dilution	6 cm	11 cm	21 cm	3 cm	10 cm
	Fin de la dilution	surface	7 cm	10 cm	surface	4 cm
Profils granulométriques	Limite fin/grossier	15 cm	21 cm	30 cm	12 cm	17 cm
	Pic de grossier	8 cm	13 cm	18 cm	7 cm	13 cm
	Limite grossier/fin	2 cm	7 cm	13 cm	surface	7 cm

**Tableau 5.14 : Profondeurs d'apparition des signatures radioélémentaires et sédimentaires visibles sur les profils des stations BF05 et BF06 durant la période d'étude. BB1 et BB2 correspondent respectivement aux campagnes BOBORHONE 1 et BOBORHONE 2.**

Les résultats spectrométriques et granulométriques de la campagne SED2 confirment la corrélation entre le marquages sédimentaire et radioactif (**Tableau 5.15**), à une exception près : la station BF16Kb. Les profondeurs des signaux sont totalement discordantes. La difficulté réside sur l'interprétation du profil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  qui ne montre pas vraiment de pic de dilution dans le sens où une phase de diminution de la concentration est bien visible alors que la phase d'augmentation est inexistante. En revanche, le profil granulométrique marque bien un épisode hydrodynamique important, identique à celui de la station BFRous.

Stations SED2		BF16Kb	BFRous	BFChenal20	BFChenal2	BF14Kb
Profils de radio-activité	Début de la dilution	24 cm	14 cm	-	26 cm	-
	Pic de dilution	16 cm	9 cm	27 cm	20 cm	17 ± 3 cm
	Fin de la dilution	-	4 cm	-	14 cm	7 cm
Profils granulométriques	Limite fin/grossier	14 cm	14 cm	-	26 cm	-
	Pic de grossier	8 cm	9 cm	28 cm	22 cm	14 cm
	Limite grossier/fin	5 cm	4 cm	-	17 cm	7 cm

**Tableau 5.15 : Profondeurs d'apparition des signatures radioélémentaires et sédimentaires visibles sur les profils des stations BF16Kb, BFRous, BFChenal20, BFChenal2 et BF14Kb.**

Certains profils de radioactivité et de granulométrie sont cependant parfaitement superposables, comme ceux de la station BFRous, ou concordent plutôt bien, comme ceux des stations BFChenal2, BFChenal20 et BF14Kb (**Tableau 5.15**).

Les régimes hydrologiques sont étroitement liés à la dynamique sédimentaire, elle-même associée à la distribution de divers contaminants (métaux lourds, radioéléments, PCB, TBT). Les événements météorologiques, tels que les crues, génèrent un marquage sédimentaire qui peut être interprété étape par étape avec l'étude de ses signatures sédimentaires et de radioéléments (**Tableau 5.16**).

Contexte hydrologique	Signature radioactive	Signature sédimentaire
Normal ou étiage : débit liquide de l'ordre de 1700 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .	Profils de radioéléments rectilignes uniformes sur la profondeur avec des valeurs de <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> et de <sup>137</sup> Cs de l'ordre de respectivement 40 Bq.kg <sup>-1</sup> et 15 Bq.kg <sup>-1</sup> .	Pas de granoclassement particulier et fraction fine supérieure à la fraction grossière (80 % pélites et 20 % de sables) avec un D50 de 15 µm environ.
Début de crue : élévation du débit liquide du fleuve au-dessus du seuil (> 3000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ).	Diminution progressive ou brutale de la concentration de <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> d'un facteur 5 à 10 (5 à 10 Bq.kg <sup>-1</sup> ), ressentie également par le <sup>137</sup> Cs (2 à 4 Bq.kg <sup>-1</sup> ). Effet de dilution.	Granoclassement inverse dans la colonne sédimentaire avec dépôts progressifs de sédiments de plus en plus grossiers. La fraction maximum de sables est visible un peu avant l'inversement de la tendance du débit.
Pic de crue : niveau max du débit liquide du fleuve.	Concentration minimum de radioéléments.	Fraction maximum de matériaux grossiers déjà suivie d'un horizon sédimentaire dont la fraction granulométrique s'affine, en raison du début de la baisse du débit.
Décru : diminution du débit liquide du fleuve en dessous du seuil (< 3000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ).	Augmentation progressive ou brutale de la concentration de <sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> et de <sup>137</sup> Cs d'un facteur 5 à 10 pour revenir à la situation normale.	Granoclassement normal dans la colonne sédimentaire avec dépôts progressifs de sédiments de plus en plus fins en remontant vers le toit du profil.
Fin de crue : retour à la normale avec un débit proche du débit moyen ou à l'étiage.	Profils de radioéléments de retour au contexte initial.	Profils granulométriques de retour au contexte initial.

**Tableau 5.16 : Description des signatures sédimentaire et radioactive des dépôts fluviaux liée au contexte hydrologique (valeurs de concentrations valables pour les événements postérieurs à 2003).**

La découpe des carottes de sédiments fraîchement prélevés, l'interprétation de leurs logs stratigraphiques et leur analyse aux rayons X permettent également de situer les activités hydrosédimentaire (laminations entrecroisées, litages) et benthique (bioturbation, trous d'annélides) du milieu (Drexler et Nittrouer, 2008).

Seuls les impacts de tempêtes ne peuvent pas être matérialisés car ils représentent des défauts de matériel sédimentaire, sauf par la présence de sables due aux vagues ou de surfaces discordantes sur les logs stratigraphiques. Ces signatures sont aussi respectivement associables à des forts débits liquides et à des figures d'érosion de fond. Il est donc fort peu évident de conclure suite à leurs observations dans la colonne sédimentaire. Les épisodes de crue, qu'ils soient brefs ou durables, d'intensité moyenne ou exceptionnelle, jouent le rôle de vecteurs principaux de radioéléments vers la mer ouverte via le prodelta rhodanien à hauteur de 75 % (Rolland, 2006). L'estimation de leurs bilans quantitatifs durant ces événements est importante dans la mesure où leur suivi nous renseigne directement sur leur stockage dans les sédiments et leur contamination des eaux, et indirectement sur leur intégration dans les réseaux trophiques.



## 5.5. Estimation des bilans des radioéléments associés aux sédiments

Suivre le devenir de contaminants radioactifs d'origine anthropique en phase non-dissoute est comparable à suivre les sédiments en suspension sur lesquels ils sont adsorbés. Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  nous sert à caractériser les phases de dépôt mais le  $^{137}\text{Cs}$  nous intéresse en tant que produit de l'industrie nucléaire. Il sera donc l'objet des bilans dressés dans ce travail comme le furent les isotopes du plutonium dans les travaux de Lansard (2005).

Les événements hydrologiques rhodaniens participent aux apports de radioéléments de manière importante. Les épisodes de crue de 2003 et de l'hiver 2006-2007 vont être les sujets de l'étude suivante. Leurs contributions à l'alimentation du prodelta du Rhône en contaminants et à leur répartition dans le Golfe du Lion y seront quantifiées globalement.

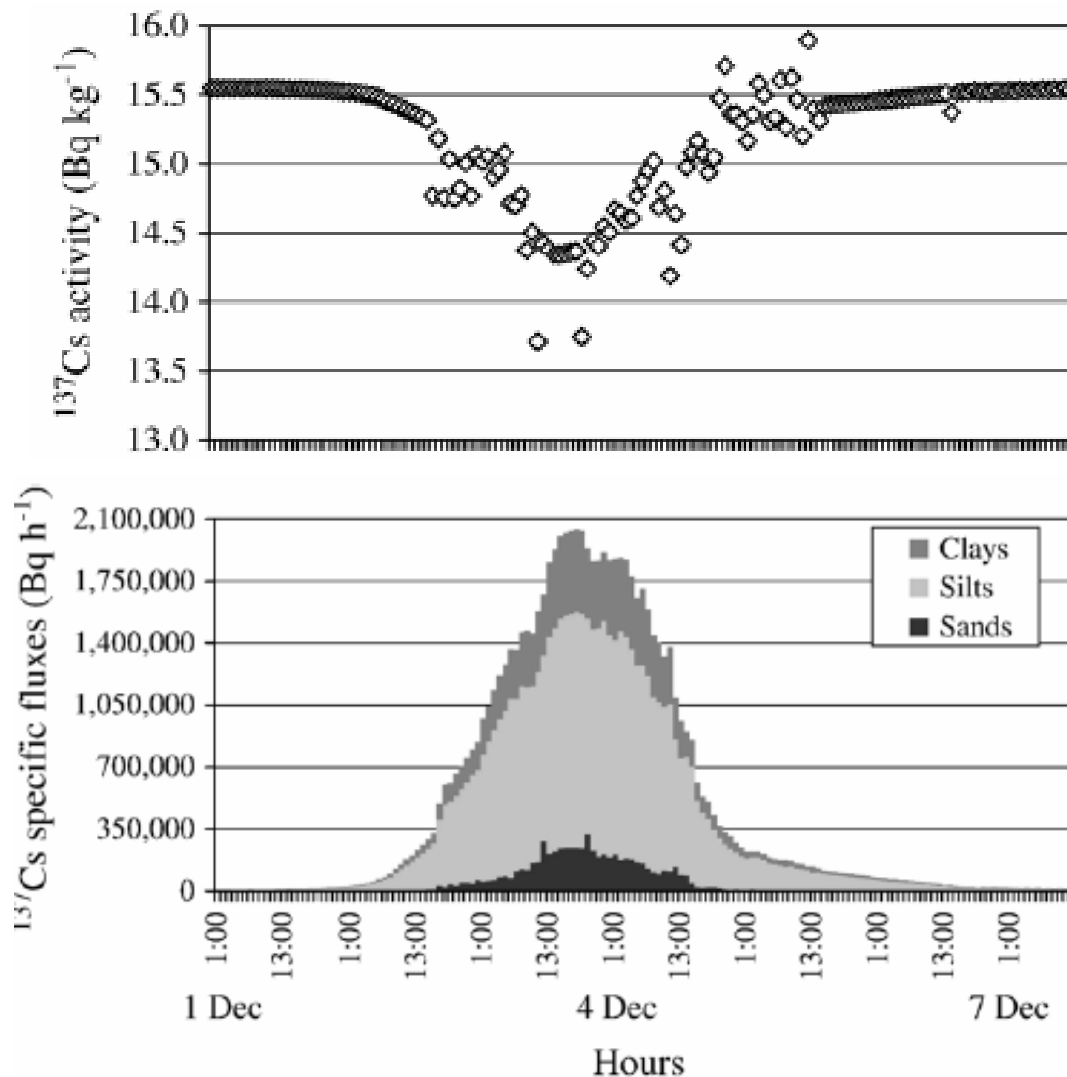
### 5.5.1. Participation des crues aux apports de matières

#### 5.5.1.1. Crue exceptionnelle de décembre 2003

La crue de décembre 2003, marquée par une hausse du débit du Rhône à plus de  $11000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a été un événement exceptionnel à bien des égards puisqu'elle a non seulement changé la physionomie du delta du Rhône en inondant  $500 \text{ km}^2$  de surface aérienne (Eyrolle al., 2006) mais a également modifié la morphologie du prodelta en apportant près de 4 Mt de sédiments entre 0 et 20 m de profondeur (Maillet et al., 2006).

Antonelli et al. (2008) ont évalué la quantité de sédiments transportée à 3.7 Mt de silts, 0.85 Mt de sables et 0.84 Mt d'argiles, soit 5.4 Mt de matières en moins de 6 jours, avec des concentrations en MES variant de 76 à  $3600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Les silts ont été les particules sédimentaires ayant transporté majoritairement le  $^{137}\text{Cs}$  (**Figure 5.46**) puisque responsables de 70 % du flux de ce radioélément.

La totalité des quantités évacuées par le fleuve n'ont pas été retrouvés sur le prodelta. Miralles et al. (2006) font état de dépôts de  $75 \pm 19 \text{ GBq}$  de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et de  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  de  $^{137}\text{Cs}$  sur le prodelta, alors qu'Antonelli et al. (2008) ont calculé des transports nets respectivement de  $99 \pm 22 \text{ GBq}$  et de  $77 \pm 16 \text{ GBq}$  dans l'eau du fleuve. Le prodelta ne capturerait que 35 % des sédiments du fleuve, ce qui correspond à peu près au ratio déterminé par Charmasson (2003) à savoir 40 %.



**Figure 5.46 :** Concentration du  $^{137}\text{Cs}$  dans les MES ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) durant 6 jours de la crue de décembre 2003 et estimation des flux spécifiques de  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq.h}^{-1}$ ) associés aux classes granulométriques en présence (Antonelli et al., 2008).

L'inventaire de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  effectué par Miralles et al. (2006), concernant la crue de décembre 2003, est basé sur l'observation particulière de 4 carottes situées de manière hétérogène sur le prodelta. Ils ont utilisé les radioéléments à demi-vie courte comme le  $^7\text{Be}$  pour conforter les limites de dépôt sédimentaire en profondeur dues à la crue et dresser des stocks de radioéléments (**Figure 5.47**). Les profils de D50 confirment le granoclassement de type crue et des pics de matériaux grossiers attestant de l'énergie dissipée par les conditions hydrodynamiques.

Ils ont pu également attribuer des radioactivités de  $71 \pm 21 \text{ GBq}$  de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et de  $16 \pm 5 \text{ GBq}$  de  $^{137}\text{Cs}$  à un événement de crue bien plus faible produit en janvier 2004 ayant entraîné des dépôts sédimentaires conséquents (**Figure 5.48**).

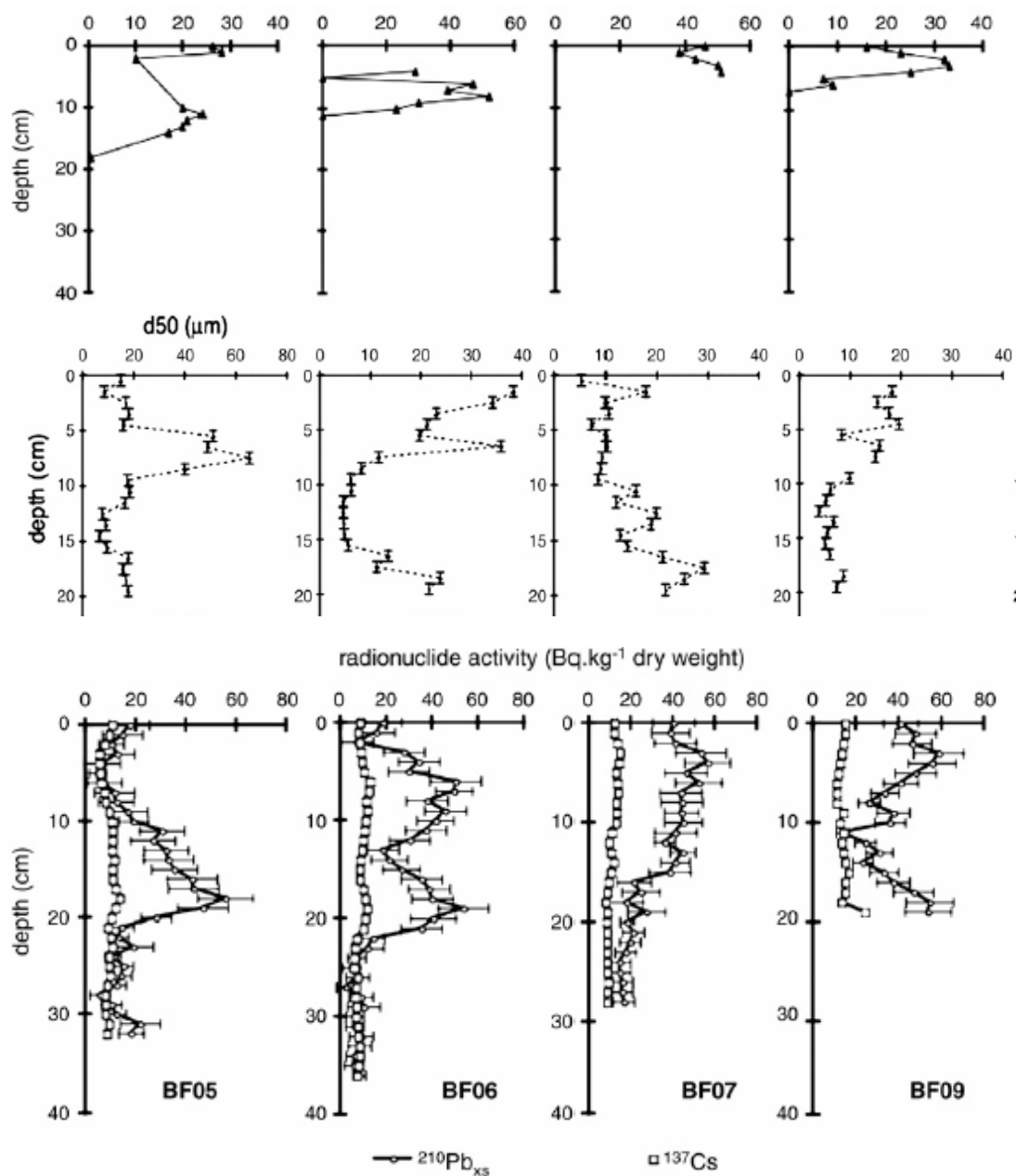


Figure 5.47 : Radioactivité du  $^7\text{Be}$  ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ), diamètre médian ( $\mu\text{m}$ ) et radioactivité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ) en fonction de la profondeur dans 4 carottes sédimentaires échantillonnées en décembre 2003 (Miralles et al., 2006).

Cet exemple montre que les apports de crue ne sont pas proportionnels à leur intensité puisque l'épisode du mois de janvier 2004 a mobilisé presque autant de sédiments que celui du mois précédent. Des événements plus modestes de par l'énergie mise en jeu peuvent provoquer des dépôts importants, selon le nombre d'épisodes, leur fréquence et leur origine.

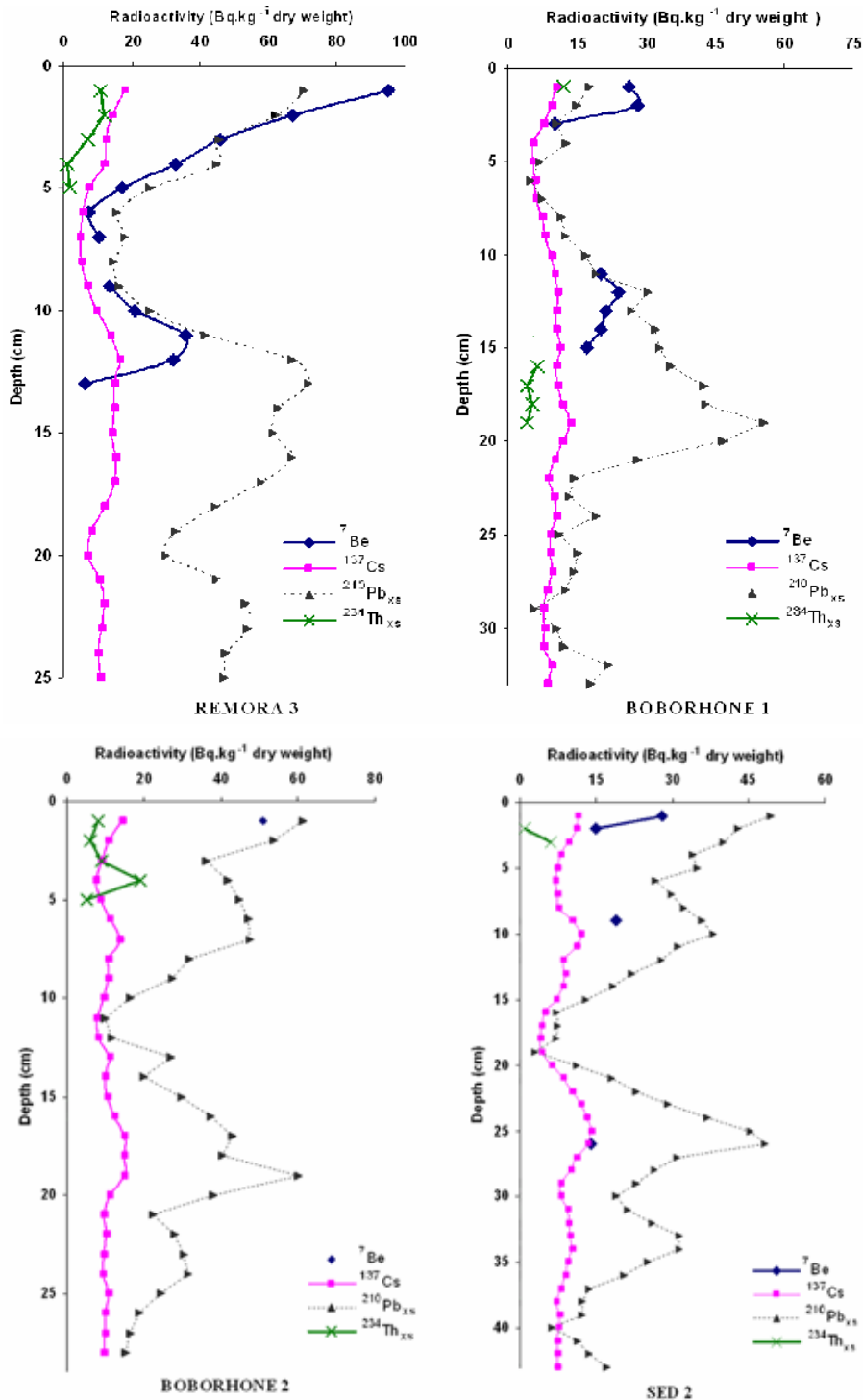


Figure 5.48 : Radioactivité du  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ,  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  et  $^{239+240}\text{Pu}$  dans des carottes sédimentaires collectées à une même station de l'embouchure du Rhône, en octobre 2002, décembre 2003, février 2004 et avril 2004.

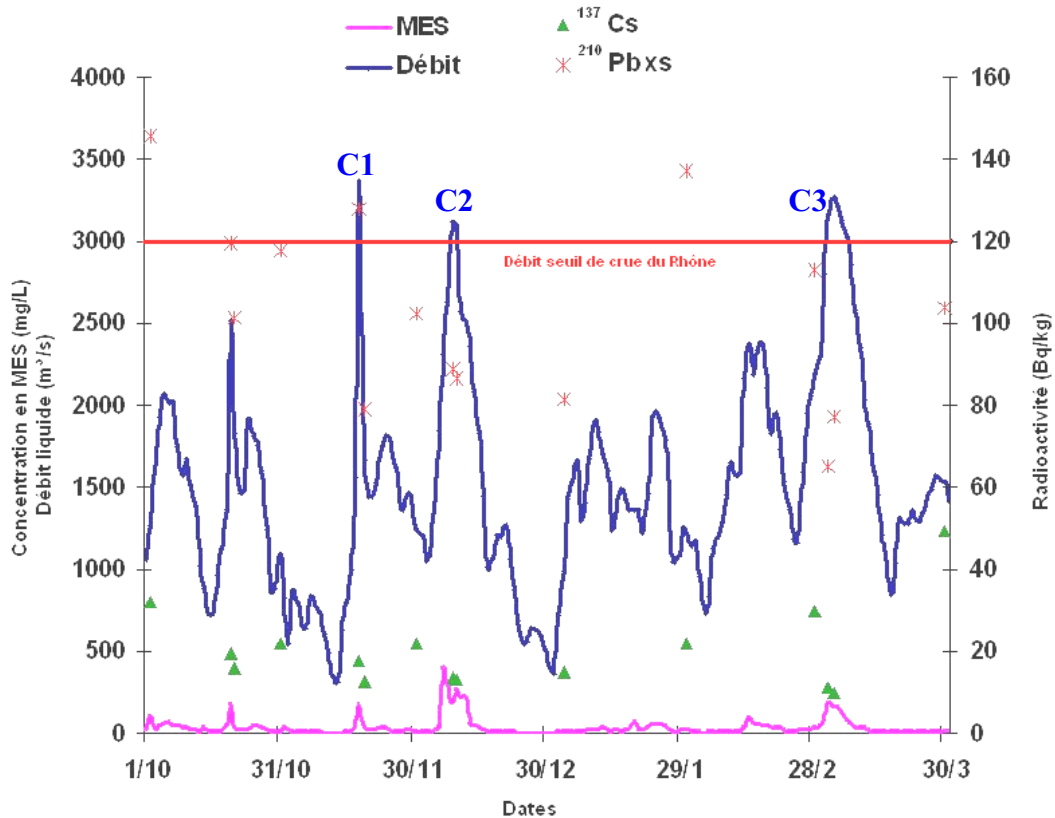
### 5.5.1.2. Les crues de faibles amplitudes de l'hiver 2006-2007

Le Grand Rhône connaît régulièrement des crues hivernales, parfois dramatiques comme en décembre 2003. Certaines sont d'intensité modérée mais peuvent transporter de grandes quantités de sédiments. Les deux événements de crue C1 ( $3450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et C2 ( $3100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) dont les contextes hydrodynamiques ont été détaillés dans le chapitre précédent ont été suivis d'un épisode C3 ( $3250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) tout aussi important et plus durable au mois de mars 2007 (Figure 5.49).

Le fleuve a ainsi drainé 48.879 kT de sédiments durant C1, 109.197 kT durant C2 et 234.293 kT durant C3. Ces valeurs ont été calculées au moyen de l'équation :

$$M = ns.Q.[MES],$$

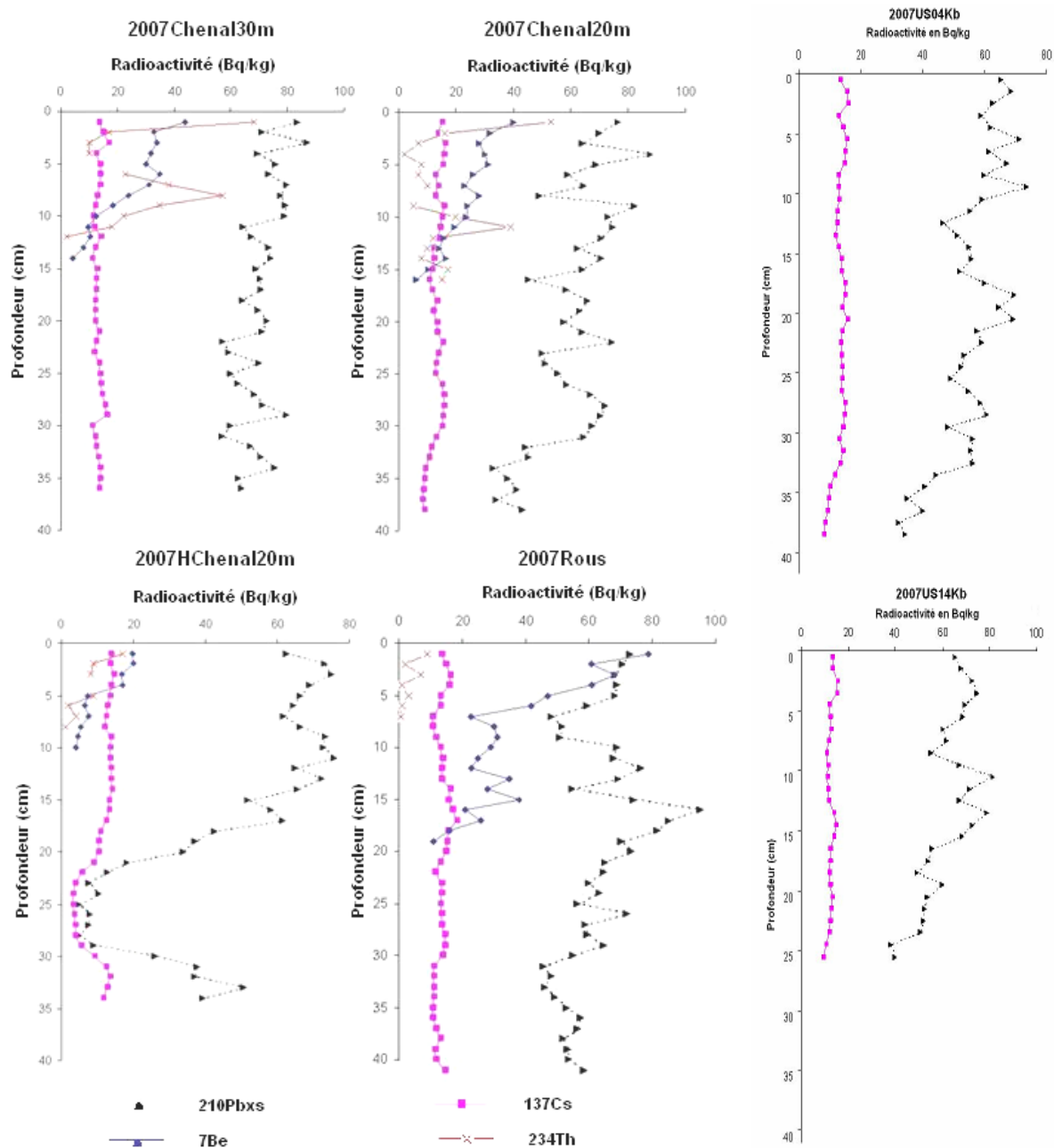
avec M la masse de sédiments transportés (en g), Q le débit liquide du fleuve (en  $m^3.s^{-1}$ ), [MES] la concentration en MES (en  $mg.L^{-1}$ ) et le coefficient  $ns = 86400$  représentant le nombre de secondes dans une journée.



**Figure 5.49 : Représentation du débit du Grand Rhône ( $m^3.s^{-1}$ ), de la concentration en MES ( $mg.L^{-1}$ ) et des radioactivités du  $^{210}Pb_{xs}$  et du  $^{137}Cs$  dans une période de 6 mois précédant la campagne CARMEX (mi-mars 2007).**

Les radioactivités moyennes des MES sèches lors des événements C1, C2 et C3 ont été estimées à partir des prélèvements à la station SORA localisée en Arles. Elles ont été évaluées respectivement à  $17.52 Bq.kg^{-1}$ ,  $13.60 Bq.kg^{-1}$  et  $11.08 Bq.kg^{-1}$  de  $^{137}Cs$ , et  $127.68 Bq.kg^{-1}$ ,  $88.79 Bq.kg^{-1}$  et  $77.18 Bq.kg^{-1}$  de  $^{210}Pb_{xs}$ . Les apports du fleuve pendant les jours de crue ( $Q > Q_{seuil\ de\ crue}$ , soit  $3000 m^3.s^{-1}$ ), calculés à partir du produit entre la masse de sédiments en suspension et leur radioactivité, sont estimés à  $856.85 MBq$  de  $^{137}Cs$  et  $6240.82 MBq$  de  $^{210}Pb_{xs}$  pour C1,  $1485.08 MBq$  de  $^{137}Cs$  et  $9695.60 MBq$  de  $^{210}Pb_{xs}$  pour C2, et  $2596.04 MBq$  de  $^{137}Cs$  et  $18082.62 MBq$  de  $^{210}Pb_{xs}$  pour C3.

Le stock de  $^{137}Cs$  retrouvé sur le prodelta et issu des trois périodes de hauts débits devrait atteindre respectivement  $342.74 MBq$ ,  $594.03 MBq$  et  $1038.42 MBq$ , soit un total de  $1975.19 MBq$  en cumulant les apports des différents événements.



**Figure 5.50 :** Profils de radioactivité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^7\text{Be}$  et  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  dans la colonne sédimentaire, issus de la campagne CARMEX (mars 2007).

Parmi les six carottes de sédiments prélevées à la proche embouchure du Rhône durant la campagne CARMEX en mars 2007, quatre seulement ont été analysées pour la présence de  $^7\text{Be}$  et de  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ . Ces deux radioéléments aux courtes demi-vies permettent de retrouver des épisodes d'apports sédimentaires soudains et récents car ils ne sont plus retrouvés au bout de respectivement 200 et 100 jours (4 à 5 cycles). Néanmoins, les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  marquant également des épisodes de dilution associables aux crues ont été analysés pour les délimiter aux stations 2007US14Kb et 2007US04Kb.

Les carottes des stations 2007Chenal30m, 2007Chenal20m, 2007HChenal20m et 2007Rous situées entre les isobathes 20 et 30 m contiennent du  $^7\text{Be}$  et du  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  jusqu'à une certaine profondeur (**Figure 5.50**). Les profils de concentration montrent deux épisodes pendant lesquels leurs valeurs sont importantes, qui sont attribuables à deux périodes d'apports différentes.

En effet, sur les profils 2007Chenal20m et 2007Chenal30m, le  $^7\text{Be}$  et  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  disparaissent à la même profondeur (16 cm pour le premier et 13 cm pour le second), ce qui signifierait qu'il n'y a pas eu d'apports sédimentaires importants 100 jours auparavant, soit juste avant C1 et C2. Les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  présentent des pics de dilution qui correspondent à des scissions dans les courbes de  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ , ce qui pourrait délimiter les dépôts des crues de novembre/décembre 2006 (C1 et C2) et mars 2007 (C3).

La station HChenal20m présente un intervalle de dilution important du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  de près de 7 cm à 30 cm de profondeur. Il semble correspondre à la crue du Rhône d'avril 2006 qui a duré 20 jours avec un débit au-dessus de  $3000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et atteignant  $4164 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (**Figure 4.1**). La zone aurait donc connu une sédimentation de plus de 35 cm en un an, ce qui conforte l'idée de forts taux d'accumulation sur le prodelta.

Le **Tableau 5.17** représente une description non exhaustive des profils de radionucléides et de granulométrie présentés sur la **Figure 5.50**. Localisés à proximité de l'embouchure dans des milieux de forte accumulation sédimentaire, les profils ont tous enregistré des pics de dilution de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  d'intensités plus ou moins modérées et précédant des dépôts de  $^7\text{Be}$  et  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ . Il n'est pas vraiment possible de différencier les crues C1 et C2 car trop rapprochées dans le temps (moins de 3 semaines) et l'épaisseur de sédiments comptabilisée correspond à la somme des deux événements ainsi que l'intervalle de temps qui les a séparé. Le dépôt moyen attribué à C1/C2 s'élève à 5.3 cm contre 4 cm pour C3. Les valeurs enregistrées par l'altimètre de CARMA (**Figure 4.32**) témoignent de 8 cm de sédiment au total, remobilisés par des épisodes de tempêtes.

Crues	Critères	Chenal30	Chenal20	HChenal20	USRous	US04Kb	US14Kb
C1/C2	Profondeur	7-11 cm	7-16 cm	4-10 cm	12-16 cm	9-13 cm	6-11 cm
	Argiles (%)	14.5	13.7	13.4	14.1	16.5	13.8
	Silts (%)	64.7	71.5	66.2	70.5	73.1	58.8
	Sables (%)	20.8	14.8	20.4	15.4	10.4	27.4
	D50 ( $\mu\text{m}$ )	17.3	16.8	18.6	17.1	13.1	33.2
	$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )	1495	2461	1228	2243	1228	2284
C3	Profondeur	0-4 cm	0-4 cm	0-4 cm	4-9 cm	2-6 cm	0-4 cm
	Argiles (%)	16.4	14.7	15.8	15.7	13.5	13.9
	Silts (%)	64.8	67.1	61.9	64.7	70.3	66.5
	Sables (%)	18.8	18.2	22.2	19.6	16.2	19.6
	D50 ( $\mu\text{m}$ )	18.5	18.5	19.5	18.6	16.3	16.8
	$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )	1398	2781	1352	2364	1395	1373

**Tableau 5.17 : Caractéristiques granulométriques et de concentrations de radioéléments des dépôts présumés des crues hivernales 2006/2007.**

Les crues C1/C2 et C3 semblent avoir apporté le même type de matériel sédimentaire : argiles (15 %), silts (65-70 %) et sables (15-20 %), avec un diamètre médian de 18  $\mu\text{m}$ . Néanmoins, les dépôts paraissent un peu plus grossiers lors de la crue de mars 2007, sauf pour les stations auxquelles n'ont pas été détectés de radionucléides de courte période (**Annexe M1**). La station 2007US14Kb est située la plus à l'ouest et témoigne de particules bien

plus grossières que toutes les autres lors de C1/C2. L'énergie mise en jeu par les crues semble se focaliser davantage sur la partie occidentale du prodelta que sur la partie orientale. Les concentrations surfaciques de  $^{137}\text{Cs}$  semblent aller en ce sens puisque les trois profils les plus occidentaux (**Annexe M2**), que sont US14Kb, USRous et USChenal20m, révèlent plus de  $2200 \text{ Bq.m}^{-2}$  contre la moitié dans les trois stations les plus orientales.

Les crues C1 et C2 ne peuvent pas être réellement différenciées. On considérera les dépôts sédimentaires associés à ces crues comme issus des apports en MES du fleuve entre le début de C1 et la fin de C2. La quantité de matières transportée par le Rhône entre le 18 novembre et le 9 décembre 2006 et totalisée par les données de la station SORA s'élève à 474.9 kT, contre 280.1 kT entre le 3 et le 15 mars 2007. L'estimation du volume de sédiments déposés à l'embouchure du Rhône est réalisée grâce à la règle de Simpson. Les dépôts ne sont pas complets en raison du peu de stations mais présentent une symétrie à leur valeur la plus forte (**Figure 5.51**). Les valeurs pour C1/C2 et C3 sont respectivement  $183076 \text{ m}^3$  et  $163684 \text{ m}^3$ , soit des masses de 256.306 kT et 229.158 kT. Elles représentent respectivement 54 % et 80.2 % des apports de MES du fleuve. Maillet et al. (2006) estime à 90 % la proportion de sédiments issus du Rhône et piégés par le prodelta, particulièrement dans la zone 0-20 m. Les 6 stations sont localisées à la très proche embouchure du prodelta sur une aire de  $1.96 \text{ km}^2$ . L'aire de la zone d'accumulation sous influence rhodanienne, dont le taux de sédimentation est un peu supérieur à celui du reste plateau continental nord méditerranéen à savoir  $0.1 \text{ cm.an}^{-1}$ , est de  $480 \text{ km}^2$  (**Figure 5.41**).

La quantité de  $^{137}\text{Cs}$  déposée sur le prodelta sur une zone de  $2 \text{ km}^2$  lors des événements de crues hivernales a été évaluée à 3079.94 MBq pour C1/C2 et 3330.65 MBq pour C3. Le fleuve a drainé pendant ces périodes des quantités respectives de 7759 MBq de  $^{137}\text{Cs}$  pour 45.20 GBq de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et 8310 MBq de  $^{137}\text{Cs}$  pour 22.47 GBq de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Le rapport entre le  $^{137}\text{Cs}$  associé au MES et celui déposé sur le prodelta représente 39.7 % pour C1/C2 et 40.1 % pour C3. Il correspond à la proportion de  $^{137}\text{Cs}$  rhodanien piégé sur le prodelta déterminée par Miralles et al. (2006) et Charmasson et al. (2003), soit entre 35 et 40 %. Il est possible de revoir nos chiffres légèrement à la hausse car l'étude s'est limitée à 6 carottes, couvrant la majeure partie du prodelta soumis aux apports du fleuve. Les missions suivant les événements de crue n'avaient pas pour objectif d'étudier des stations en bordure de prodelta mais plutôt le champ proche de l'embouchure du Rhône (BOBORHONE 1 et 2, SED2 et CARMEX). Une quantification plus précise des dépôts est donc impossible.

### 5.5.1.3. Apports annuels de matières dus aux crues (2006-2008)

La période d'étude 2006-2008 a connu une dizaine d'épisodes de crues d'intensité modérée avec un débit du Rhône maximal entre  $3000$  et  $4000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Nous les avons découpé en 7 événements car certains étaient trop rapprochés. La quantité annuelle de sédiments transportés est conforme aux chiffres de Pont et al. (2002) puisqu'elle varie entre 2.1 Mt en 2007 et 8.3 Mt en 2008 (**Tableau 5.18**). Ils sont donc comparables aux valeurs de 2 à 20 Mt avancés par Pont et al. (2002). Les résultats présentés dans le **Tableau 5.18** correspondent aux estimations de la station SORA de l'IRSN à  $\pm 5 \%$  en raison des critères de délimitations temporelle des périodes de crues notamment.

L'année 2008 a été bien différente de 2006 et 2007 avec 46 jours de crue, soit 12.6 % de l'année, ayant transporté plus de 92 % des sédiments (dont 49.5 % rien que pour la crue printanière de mai), et près de 80 % du  $^{137}\text{Cs}$  du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Ces chiffres sont en accord avec ceux avancés par Rolland (2006) qui a étudié la crue de décembre 2003.



Les crues sont donc des vecteurs majoritaires du matériel sédimentaire vers la mer ouverte et favorisent l'engraissement du prodelta. Les crues de l'année 2006 étaient assez longues, 23 jours au total, mais pas très puissantes. Elles ont participé au transfert des sédiments et des radioéléments vers le Golfe du Lion à hauteur de 40-45 %.

Année	Période de crues	Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Sédiment (T)	<sup>137</sup> Cs (GBq)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (GBq)
2006	avril	3697	867300	8.00	62.32
	hiver (C1C2)	3373	474900	7.76	45.20
	Total crues	23 jours	1342200	15.76	107.52
	Total annuel	-	2792000	39.09	237.37
	% crues/an	6.30	48.07	40.32	45.30
2007	mars (C3)	3269	280100	8.31	22.47
	hiver	3028	429530	6.76	52.27
	Total crues	12 jours	709630	15.07	74.74
	Total annuel	-	2147000	30.06	182.49
	% crues/an	3.29	33.05	50.13	40.96
2008	avril	3425	491080	3.56	28.50
	mai	4156	4128989	42.04	336.33
	septembre	3012	646240	8.21	65.65
	novembre	4805	707542	6.74 (est.)	53.90 (est.)
	décembre	3863	1754940	17.02 (est.)	136.19 (est.)
	Total crues	28 jours	7728791	77.57	620.57
	Total annuel	-	8331930	95.59	782.72
	% crues/an	7.67	92.76	81.15	79.28

**Tableau 5.18 : Caractéristiques hydrologiques du Rhône à la station d'Arles depuis janvier 2006 jusqu'à décembre 2008 et estimations des quantités syn-crue et post-crue de sédiments et de radioéléments apportées par le fleuve.**

Le bilan de matières particulaires transférées par les crues est plus faible en 2007 (33 %) en raison du nombre de jours de haut débit réduit, mais la quantité de <sup>137</sup>Cs reste la même.

### 5.5.2. Bilans sur le prodelta

La définition du prodelta reste globalement inchangée selon les auteurs mais ses délimitations varient d'une discipline à une autre. Certains estiment qu'il est limité physiquement par l'isobathe 80 m (Radakovitch et al., 2003), d'autres pensent qu'il est caractérisé par des taux d'accumulation plus élevés que le reste du plateau continental (Charmasson, 1998), d'autres encore l'interprètent comme une entité majoritairement constituée de sédiments fins (Aloisi et al., 1986). Cependant, tous ces critères ne constituent pas une limite réelle pour évaluer des bilans de sédiments et de radioéléments. Le bilan sédimentaire peut être effectué en fonction de la bathymétrie à l'embouchure puisque le prodelta est compris entre 20 et 80 m de profondeur. Sa surface au fond pourra être ainsi être déterminée, tout comme le volume de sédiments.

Les radioéléments artificiels n'ont commencé à se déposer qu'à la fin des années 1950. Seules les stations de la proche embouchure ne présentent pas la fin du signal de <sup>137</sup>Cs dans nos prélèvements. Il n'est malheureusement

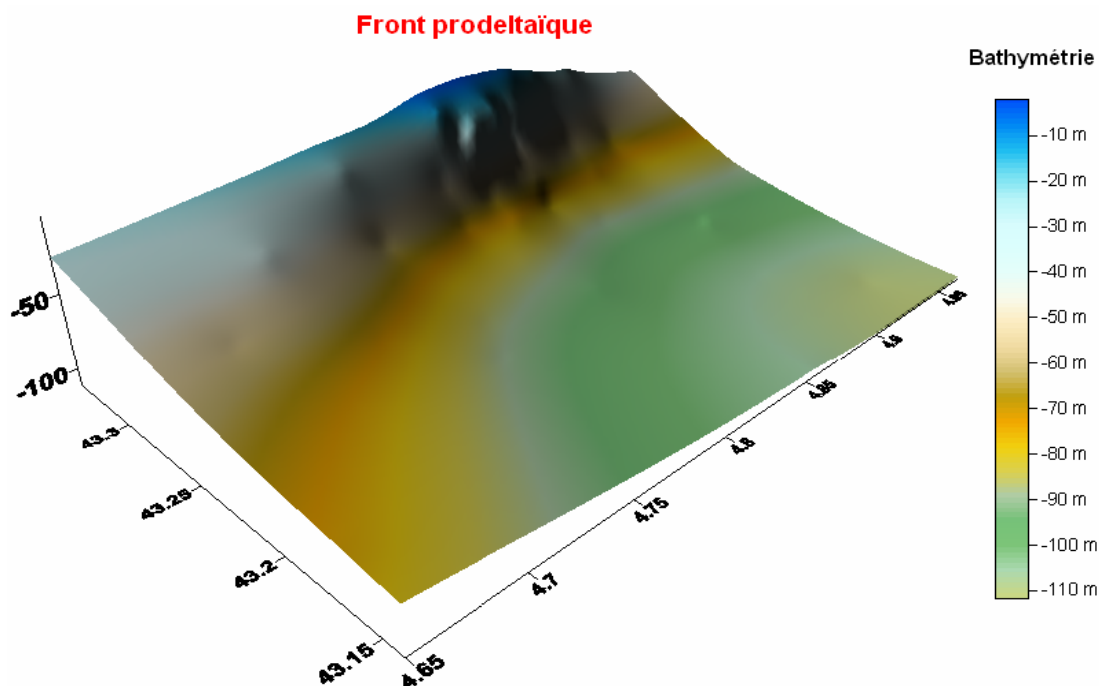
pas possible de déterminer un bilan de  $^{137}\text{Cs}$  en tenant compte du taux de sédimentation et de la décroissance radioactive car les rejets n'ont pas été constants.

Les vagues et courants remobilisent et transportent les sédiments et les radioéléments vers le Golfe du Lion ouvert. Ils sont donc des facteurs délimitant l'étendue du prodelta. Une évaluation de leurs quantités sera menée grâce aux données érodométriques relevées durant la campagne EXTREMA.

### 5.5.2.1. Bilan sédimentaire sur le prodelta

La morphologie du prodelta du Rhône a pu être reconstituée numériquement au moyen des données bathymétriques des stations échantillonnées pendant les campagnes océanographiques déroulées entre 2001 et 2008, de REMORA1 à EXTREMA2 (**Figure 5.51**).

La superficie du prodelta est estimée à 30 km<sup>2</sup> par Noël (1996) et Lansard (2005) a étudié une zone de 500 km<sup>2</sup> à l'embouchure du Rhône. Il est délicat de conclure sur l'étendue du prodelta mais l'interprétation des données bathymétriques, latitudinalement entre l'embouchure et l'isobathe -80 m et longitudinalement lorsque la pente tend à s'aplanir, permet d'estimer la surface de dépôt prodeltaïque à près de 246.63 km<sup>2</sup>. Le volume de sédiments reposant sur cette zone de près de 250 km<sup>2</sup> est évalué à plus de 67.5 millions de mètres cubes. La masse de sédiments prodeltaïques s'avère donc proche de 94.5 Mt si on utilise une masse volumique de 1400 kg.m<sup>-3</sup>, retrouvée dans les dépôts sédimentaires. Ce chiffre sous-estime la réalité car l'effet de compaction et de diagenèse précoce réduit la place tenue par les particules.



**Figure 5.51 : Morphologie du front prodeltaïque rhodanien recrée par les données bathymétriques précises relevées lors des campagnes à l'embouchure du Rhône entre 2001 et 2008 (données REMORA, SED, CARMA et EXTREMA).**

La moitié des dépôts s'opère sur une aire d'un peu moins de 100 km<sup>2</sup> et l'isobathe -50 m, au-dessus de laquelle le taux de sédimentation commence à croître constamment, délimite une surface de 41.9 km<sup>2</sup> sur laquelle se trouvent près de 10 millions de mètres cubes de sédiments (soit 14 Mt environ).

Les crues transportent entre 2 et 20 Mt de sédiments par an alors que le prodelta en équilibre ne comprend que près de 100 Mt, soit 5 à 50 fois les apports événementiels. L'idée que le prodelta est une zone de stockage temporaire des sédiments issus du Rhône vers le Golfe du Lion et les grandes profondeurs se confirme par ces chiffres (Maillet, 2006). En outre, les apports sédimentaires continus et soudains confèrent à la structure prodeltaïque une pente de près de 5°, débutée par une barre sableuse d'embouchure jusqu'à des dépôts qui s'affinent vers le large. De fait, comme la capacité de stockage sédimentaire s'affaiblit au fil du temps, les sédiments sont amenés à occuper l'espace disponible en pied de pente ou vers la mer ouverte lors d'une remobilisation par les vagues et les courants, entraînant la tendance à la progradation du prodelta.

La zone entre 0 et -20 m, considérée par Maillet (2006) comme étant le milieu préférentiel de dépôt sur lequel a sédimenté 90 % des apports de la crue de décembre 2003, s'étend approximativement sur 19.7 km<sup>2</sup> et présente 1355 m<sup>3</sup> de matières soit 1.897 Mt de sédiments. Cette zone est très influencée par les vagues et demeure un milieu de forts dépôts et remises en suspension.

#### 5.5.2.2. Bilan des radioéléments sur le prodelta

Il s'agit de déterminer les bilans de radioéléments sur la profondeur, notamment au moyen des prélèvements effectués durant la campagne REMORA2. Les profils de <sup>137</sup>Cs de la campagne REMORA1 pour lesquels le signal disparaît vont également être utilisés afin d'étoffer les données de la campagne REMORA2 qui restent assez succincts. Le bilan n'est malheureusement pas toujours clos à la proche embouchure.

Charmasson (1998) estime les stocks de <sup>137</sup>Cs à 19.6 TBq sur une aire de 500 km<sup>2</sup> en 1991. La quantité de ce même radioélément retrouvée sur cette zone s'élève à 13.2 TBq en 2001, d'après une estimation de l'inventaire au moyen des carottes prélevées à la benne Fluchat durant la campagne REMORA1 aux mêmes stations qu'en 1991. Un bilan de 3.35 TBq de <sup>137</sup>Cs sur une aire de 19.7 km<sup>2</sup> a été dressé grâce aux sédiments échantillonnés au carottier Küllenberg durant la mission REMORA2 en 2001. Le démantèlement de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule en 1997, actrice majeure du rejet de contaminants dans le fleuve, et la décroissance radioactive des radionucléides déposés sous l'ère des essais nucléaires atmosphériques et de Tchernobyl, vont dans le sens d'une diminution du stock de <sup>137</sup>Cs dans le prodelta. La quantité de <sup>137</sup>Cs a diminué du tiers en 10 ans sur le prodelta.

Le tiers du stock de <sup>137</sup>Cs présent à l'embouchure du Rhône est réparti sur moins d'1/12<sup>ème</sup> du prodelta (**Tableau 5.19**). Le <sup>137</sup>Cs se concentre sur une petite partie du prodelta puisque quelle que soit la radioactivité supérieure à 5000 Bq.m<sup>-2</sup>, la quantité du radioélément est 3 fois plus élevée que la normale selon une distribution uniforme sur le prodelta.

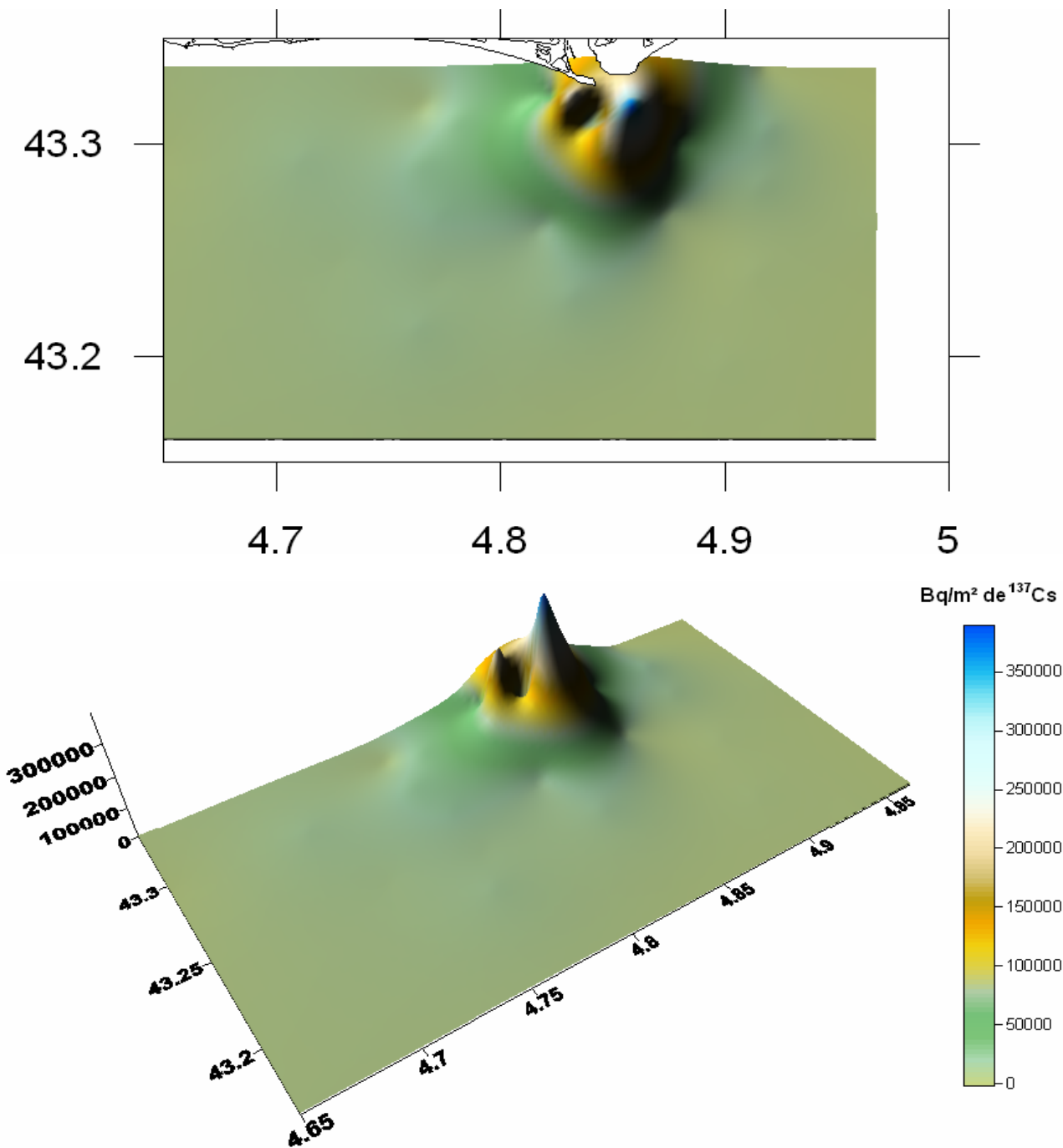


Figure 5.52 : Représentation de l'intégration de la radioactivité de  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) sur l'intégralité de la colonne sédimentaire du prodelta en 2001.

Alors que les quantités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  se trouvent bien supérieures à celles de  $^{137}\text{Cs}$  en surface ou sub-surface, le bilan total sur la colonne sédimentaire s'oriente en la faveur du radioélément d'origine anthropique. Le maximum de radioactivité surfacique atteint  $370000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  pour le  $^{137}\text{Cs}$  et  $330000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (Figures 5.52 et 5.53). Les zones d'accumulation préférentielle des deux radionucléides se trouvent au droit de l'embouchure du Rhône.

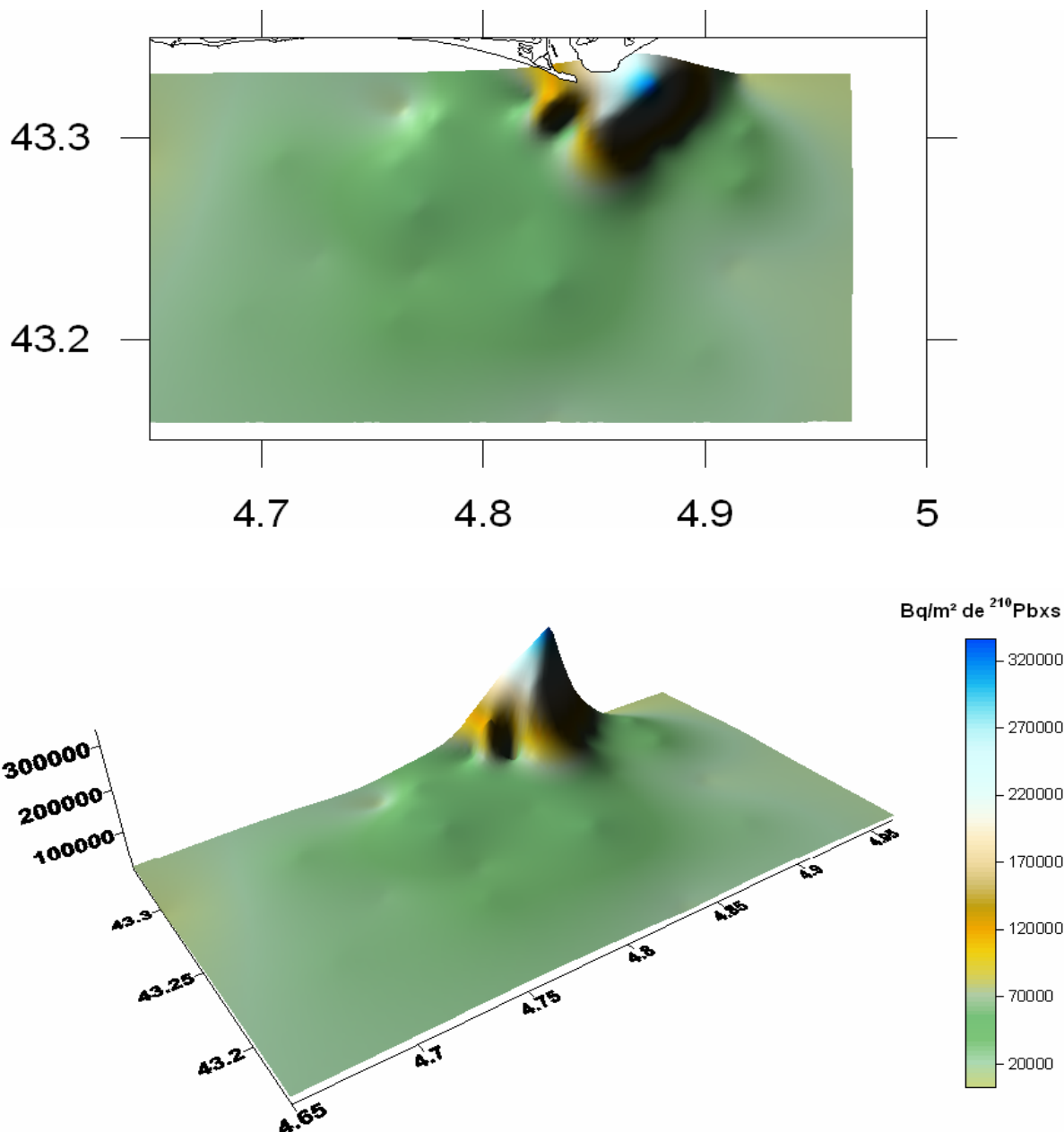


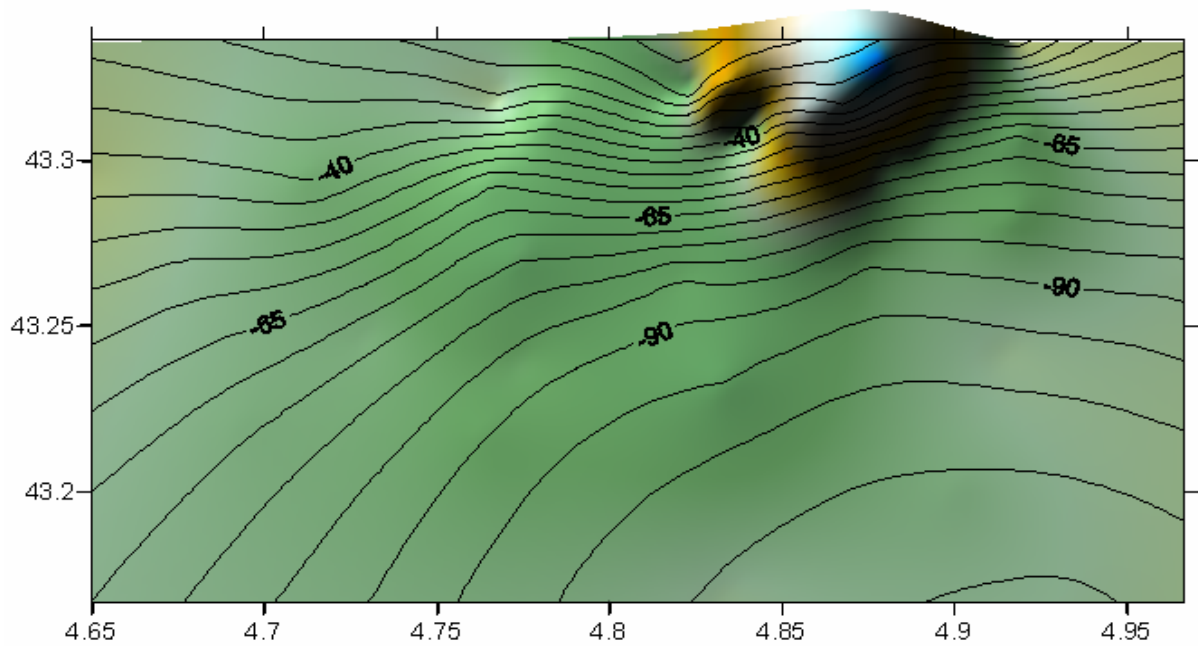
Figure 5.53 : Représentation de l'intégration de la radioactivité de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) sur l'intégralité de la colonne sédimentaire du prodelta en 2001.

Les calculs du bilan de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans cette zone de  $500 \text{ km}^2$  font état de 26.6 TBq. La surconcentration de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est moins flagrante que celle du  $^{137}\text{Cs}$  car le facteur est plutôt de 1.5 et l'évidence diminue avec l'augmentation de la radioactivité surfacique.

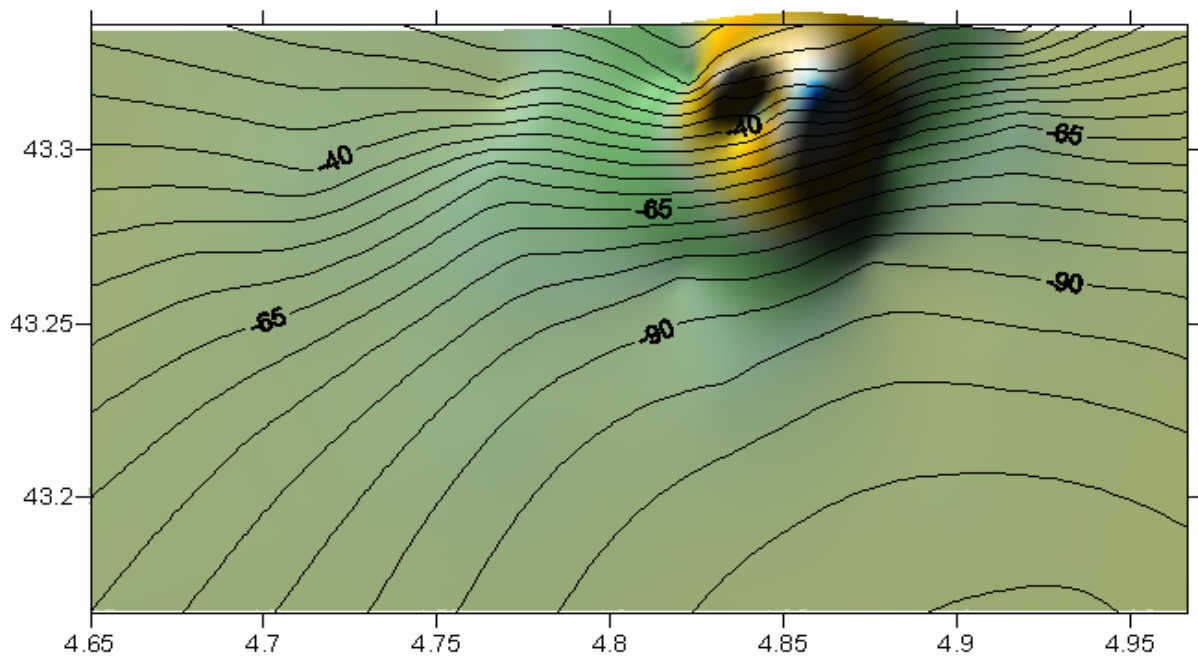
	$^{137}\text{Cs}$		$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	
	Surface en $\text{km}^2$ (% prodelta)	RA en GBq (% prodelta)	Surface en $\text{km}^2$ (% prodelta)	RA en GBq (% prodelta)
RA > 5000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	42.1 (8.8 %)	4212 (31.9 %)	54.817 (11.5 %)	4486.5 (16.9 %)
RA > 15000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	9.8 (2.1 %)	800.5 (6.1 %)	12.616 (2.6 %)	1231 (4.6 %)
RA > 30000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	0.7 (0.0014 %)	32.1 (0.003 %)	0.506 (0.011 %)	9.5 (0.0004 %)

Tableau 5.19 : Répartition des stocks de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur le prodelta du Rhône (RA = RadioActivité).

(a)



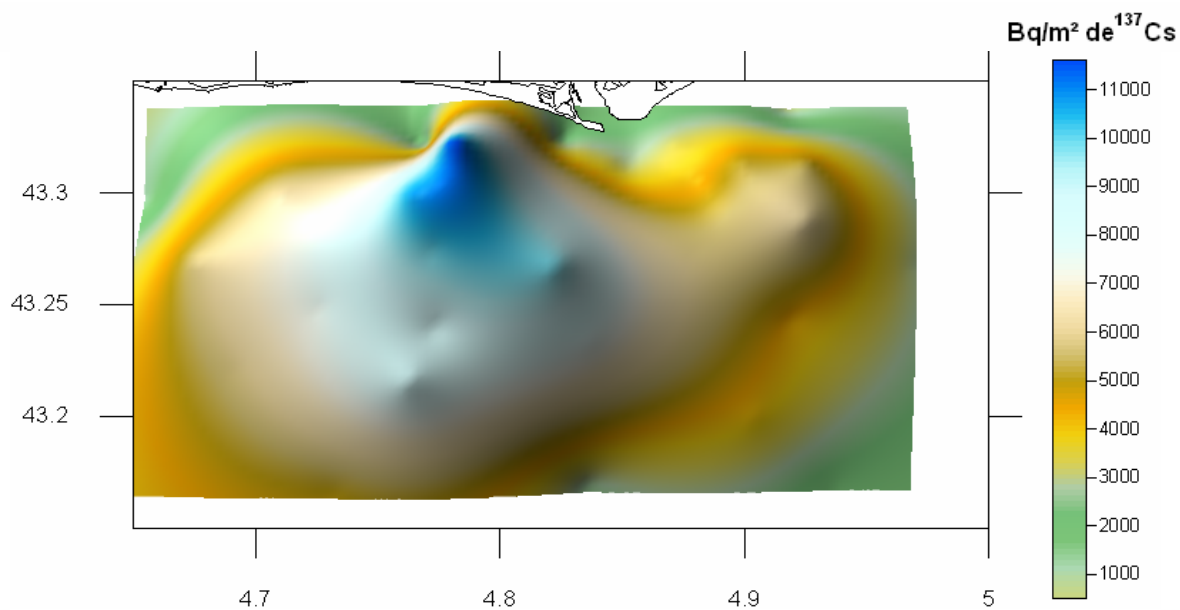
(b)



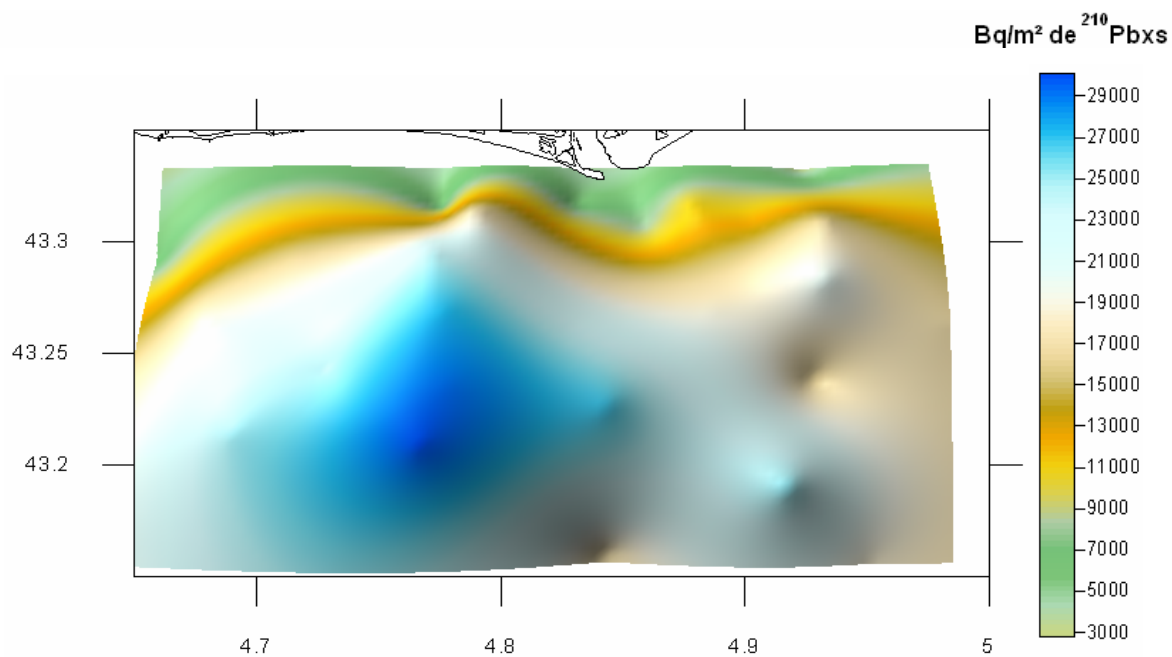
**Figure 5.54 : Superposition de la bathymétrie sur la représentation des zones d'accumulation préférentielle prodeltaïque de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (a) et de  $^{137}\text{Cs}$  (b).**

Les **Figures 5.54.a. et b.** montrent la coïncidence entre les zones de stockage de radioéléments de l'embouchure du Rhône et la bathymétrie. Les isobathes épousent pratiquement le relief formé par les milieux d'accumulation intermédiaires en vert foncé sur les figures. Cela signifie bien que les zones d'accumulation principales se trouvent au niveau du prodelta sédimentaire ou morpho-bathymétrique. Une seconde zone présentant de fortes concentrations superficielles en  $^{137}\text{Cs}$  demeure au sud-ouest de l'embouchure. Cette dernière ne présente pas de taux de sédimentation particulièrement élevé.

(a)



(b)



**Figure 5.55 : Représentations de l'intégration de la radioactivité surfacique de  $^{137}\text{Cs}$  (a) et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (b) sur les 20 premiers centimètres de sédiments du prodelta en 2001.**

En observant seulement les 20 premiers centimètres de sédiment, on retrouve les plus fortes radioactivités superficielles sur une surface de 482 km<sup>2</sup> au sud-ouest de l'embouchure du fleuve. Cette surface, qui s'approche de celle avancée par Lansard (2005) définirait les limites de la zone d'accumulation superficielle des contaminants. Elle est également appuyée par les valeurs de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  qui ont tendance à augmenter encore davantage avec la profondeur (**Figure 5.55**). Elle représente la partie visible du stockage de radioéléments de la zone prodeltaïque. En effet, les sédiments frais ne recouvrent cette surface que finement en raison des faibles taux de sédimentation. La radioactivité surfacique hors de cette zone s'élève à 1000 Bq.m<sup>-2</sup> pour le  $^{137}\text{Cs}$  et 3000 Bq.m<sup>-2</sup>

<sup>2</sup> pour le <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>, alors qu'elle atteint respectivement 11500 Bq.m<sup>-2</sup> et 31000 Bq.m<sup>-2</sup> dans cette zone. Le bilan de <sup>137</sup>Cs y est évalué à 2.535 TBq contre 9.257 TBq de <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>.

L'étendue du prodelta et la présence de radionucléides dans les sédiments loin de l'embouchure du fleuve attestent des rôles mobilisateurs et remobilisateurs des courants et des vagues.

### 5.5.2.3. Remobilisation physique du <sup>137</sup>Cs

Les remises en suspension opérées avec l'érodimètre n'ont pas donné suite à une analyse radiochimique pour des raisons matérielles, mais il est possible de déduire approximativement la concentration de <sup>137</sup>Cs associé aux particules après remobilisation sur le prodelta.

En effet, l'équation déterminant le flux d'érosion E (g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) à partir de la contrainte de cisaillement E<sub>0</sub> permet, en connaissant la granulométrie du matériel, la surface érodée, la radioactivité massique du sédiment et la durée de l'action érosive, d'estimer un bilan de radionucléides remobilisés.

La période temporelle étudiée sera celle du suivi hydrodynamique du prodelta durant l'hiver 2006-2007, car les contraintes de cisaillement au fond ont été suivies pendant près de 4 mois. La station de référence sera Roustan Est où les ADCP et Altus ont été déployés. Les relevés de radioactivité de <sup>137</sup>Cs indiquent des valeurs moyennes de 15 Bq.kg<sup>-1</sup> dans le sédiment superficiel comme à peu près dans toutes les stations de la zone (**Figure 5.50**), et la proportion de vase atteint 60 % (Dufois, 2008). L'analyse granulométrique précise relate 15 % d'argiles, 40 % de silts fins et 30 % de silts grossiers (**Annexe M2**). En outre, la cohésion du sédiment de surface augmente avec la profondeur (80 % à 40 m) mais ce critère n'a pas d'impact si on considère que la zone d'action des vagues s'étend de 0 à -20 m.

L'application de l'équation suivante intégrée sur la période d'étude entre 0.35 Pa et τ<sub>max</sub> permet de calculer le flux d'érosion durant les événements météo-climatiques ayant affecté la zone durant le projet CARMA:

$$E = E_0 \left( \frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right)^\alpha,$$

avec E<sub>0</sub> la constante d'érosion définie par 0.68 g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> dans le chapitre précédent, τ<sub>ce</sub> la contrainte critique d'érosion calculé à 0.35 Pa et α la puissance à l'excès de cisaillement évalué à 1.65.

Les résultats des calculs de flux d'érosion, de quantités surfaciques de sédiments et de <sup>137</sup>Cs affichés dans le **Tableau 5.20** ont été définis par l'équation précédente et les mesures de contraintes de cisaillement présentées sur la **Figure 5.56**. La durée des événements qui ont mis en jeu ces contraintes a été évaluée avec des données quotidiennes de mesure de houle pour le calcul de la vitesse orbitale et des données horaires pour la vitesse de courant.

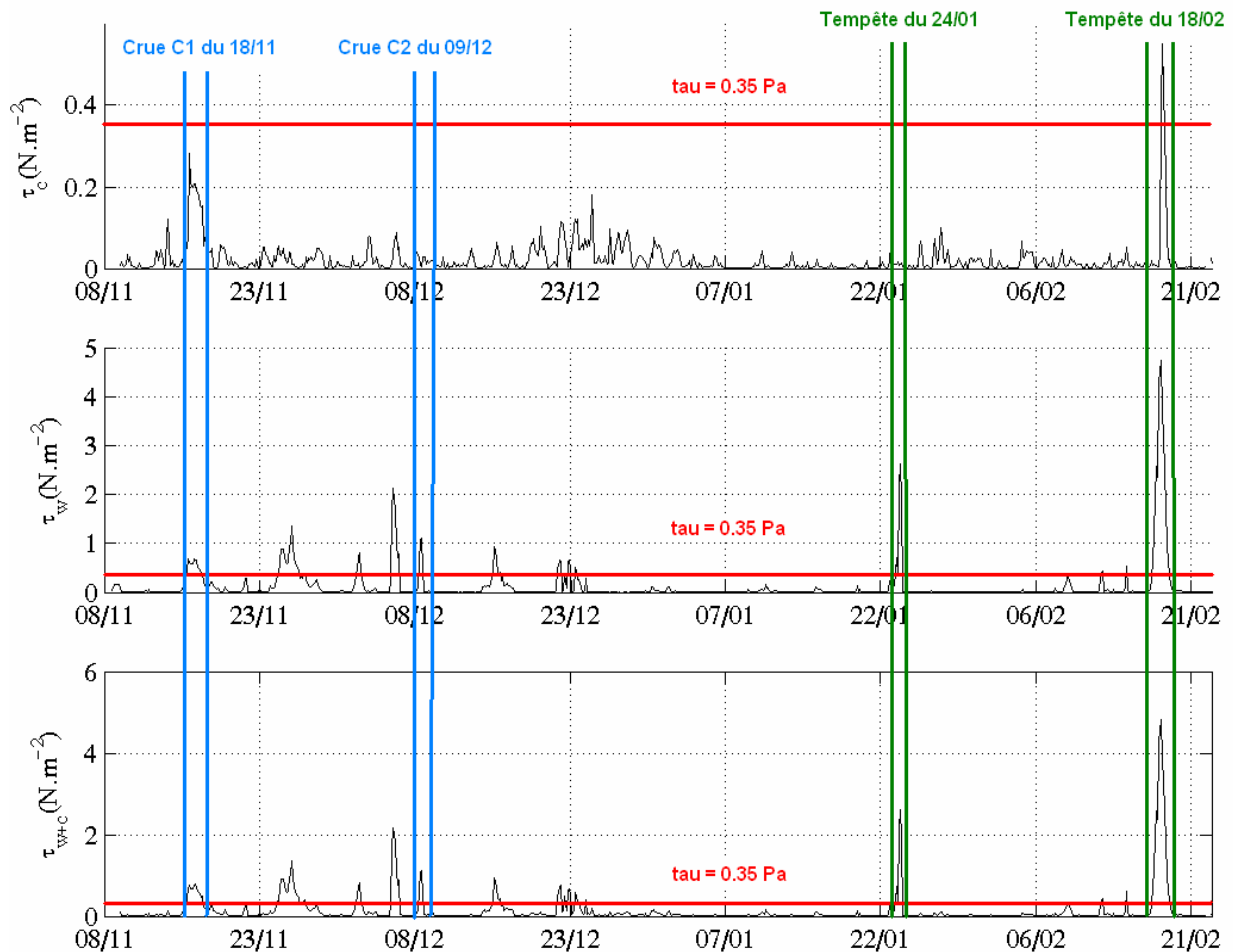
Les quantités surfaciques de sédiments M<sub>s</sub> (g.m<sup>-2</sup>) et radioéléments associés R<sub>s</sub> (Bq.m<sup>-2</sup>) remises en suspension sont calculées telle que :

$$M_s = E.t,$$

$$R_s = M_s.R_m,$$

avec le flux d'érosion E (g.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), le temps t (s) et la radioactivité massique R<sub>m</sub> (Bq.kg<sup>-1</sup>).





**Figure 5.56 : Contraintes de cisaillement au fond générées par les vagues  $\tau_w$  et le courant  $\tau_c$  et localisation des événements météo-climatiques auxquels elles sont liées.**

Il ressort de cette étude que les crues hivernales de 2006-2007 ne sont pas très efficaces en matière d'érosion sédimentaire en comparaison avec les tempêtes de sud-est de la même période. Les contraintes de fond liées aux crues remobilisent entre 50 et 100  $\text{kg.m}^{-2}$  contre 10 à 100 fois plus en période de houle moyenne ( $H_s = 1.5 \text{ m}$ ) à forte ( $H_s = 3 \text{ m}$ ). Le bilan des radioéléments suit la même logique : de 21 à 1.5  $\text{kBq.m}^{-2}$  pendant les crues contre 8 à 14  $\text{kBq.m}^{-2}$  pendant les tempêtes.

	Crue C1	Tempêtes inter-crués	Crue C2	Tempête du 1 (24/01)	Tempête 2 du (18/02)
Flux d'érosion $E$ ( $\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )	0.515	2.42-4.84	1.195	5.785	24.27
$M_s$ estimée de sédiments remobilisés ( $\text{kg.m}^{-2}$ )	100.115	940.895	62	562.3	4718.09
$R_s$ estimée de $^{137}\text{Cs}$ remobilisé ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )	1501.74	14113.44	929.23	8434.53	70771.32

**Tableau 5.20 : Estimation des quantités de sédiments et de  $^{137}\text{Cs}$  remises en suspension pendant les événements météo-climatiques de l'hiver 2006-2007.**

La remobilisation des sédiments est réalisée principalement par les vagues et parfois par de forts courants de fond. La limite d'action des vagues correspond aux profondeurs 0-20 m, voire 0-30 m. Cependant, la surface d'application de cette contrainte de cisaillement ne peut pas correspondre à l'intégralité de la zone entre 0 et 20 m de profondeur c'est-à-dire une aire de 19.7 km<sup>2</sup> car sa constitution granulométrique est fortement sableuse (surtout entre 0 et 10 m), ce qui ne correspond pas aux paramètres sédimentaires de l'expérience conduite avec l'érodimètre. En outre, d'après le modèle hydrosédimentaire utilisé par Dufois (2008), le prodelta aurait évacué 126.35 Mt de sédiments et 1.886 GBq de <sup>137</sup>Cs entre novembre 2006 et février 2007. Ce transfert représente une quantité importante d'autant que le Rhône a approximativement apporté 735 kT de sédiments et 14.7 GBq de <sup>137</sup>Cs sur cette période. Il faut savoir qu'une grande partie des sédiments remobilisés réalimentent le prodelta lui-même, mais les forts courants de fond de près de 50 cm.s<sup>-1</sup> présents pendant les épisodes de crues ont pu transporter les particules vers le sud-ouest de l'embouchure.

Néanmoins, si on admet une remobilisation sédimentaire sur une surface de 19.7 km<sup>2</sup>, les crues C1 et C2 auraient respectivement remis en suspension 1.97 Mt et 1.22 Mt de sédiments et 29.585 GBq et 18.305 GBq de <sup>137</sup>Cs, soit un total de 3.19 Mt de matière et 47.89 GBq de <sup>137</sup>Cs.

Les estimations basées sur les chiffres de la station SORA annoncent 474900 tonnes de sédiments (méthode M3 du § 4.3.5.2 comptabilisant les apports sédimentaires durant l'intervalle entre les deux événements) et 7.76 GBq de <sup>137</sup>Cs exportés vers la Mer Méditerranée (**Tableau 5.18**), soit des valeurs 6 fois plus faibles. En revanche, les dépôts de crues estimés au moyen des profils granulométriques et de concentrations de radionucléides indiquent une radioactivité surfacique de 2243 Bq.m<sup>-2</sup> de <sup>137</sup>Cs et des accumulations de 4 à 8 cm de sédiments (**Tableau 5.17** et résultats de l'altimètre du projet CARMA). Si la sédimentation était uniforme sur la zone entre 0 et 20 m de profondeur, cela représenterait un dépôt de près de 44.19 GBq de <sup>137</sup>Cs et entre 1.1 et 2.2 Gt de sédiments. Les valeurs de dépôts sur le prodelta et de transfert vers la mer ouverte sont malheureusement biaisées par la valeur intégrée de la surface du prodelta et l'extrapolation d'un événement sédimentaire en un point donné à une surface plurikilométrique.

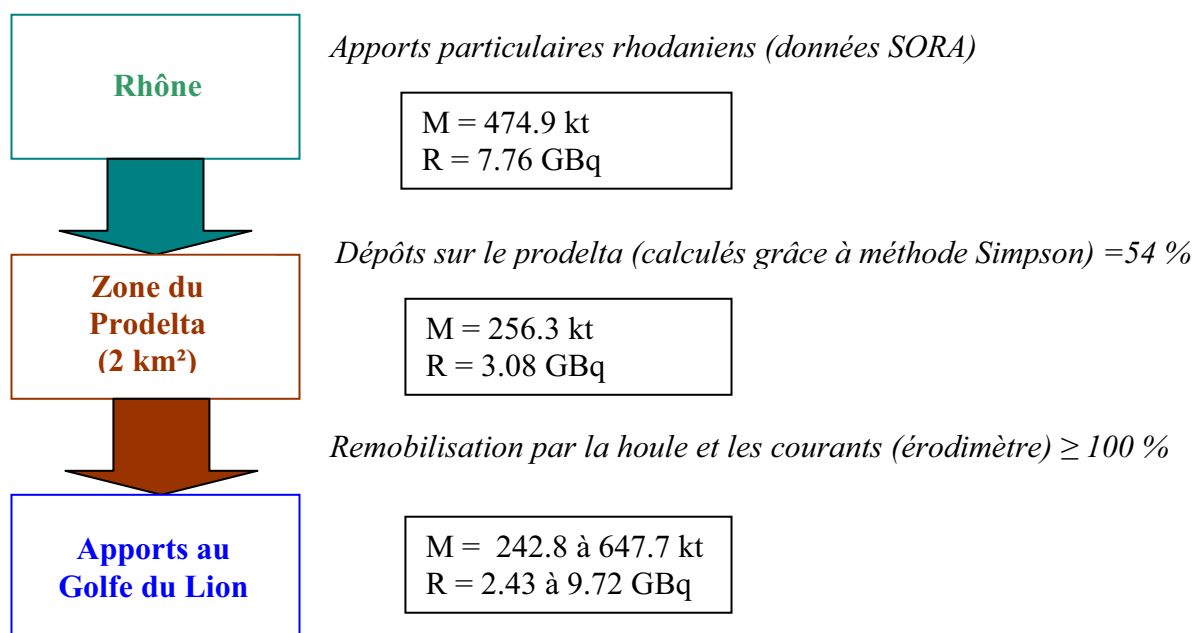


Figure 5.57 : Schéma des estimations numériques apports et dépôts entre les boîtes Rhône/Prodelta/Golfe du Lion durant les crues C1 et C2 de l'hiver 2006-2007 (M = masse de sédiments ; R = radioactivité).

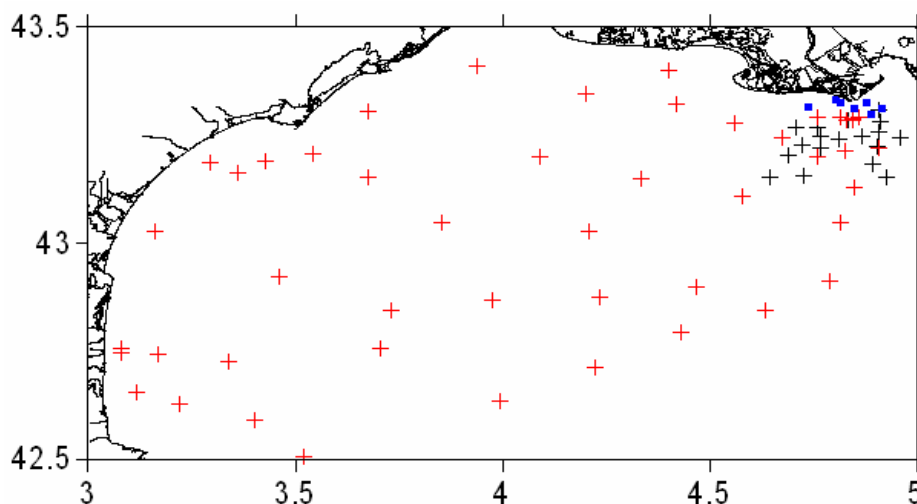
En revanche, si on prend une surface d'application entre 1.5 et 4 km<sup>2</sup> environ (d'après § 4.3.5.2 et § 5.5.1.2) confirmées par des calculs de surface avec le logiciel Surfer, on peut dresser le schéma présenté en **Figure 5.57**, où les résultats de remobilisation sédimentaire ne correspondent pas au transfert vers la mer ouverte. Ces résultats correspondent approximativement à ceux retrouvés par Dufois (2008) au moyen de l'outil de modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire à l'embouchure du Rhône (MARS-3D). Il révèle un dépôt de près de 190 kt et une remise en suspension de 220 kt de sédiments pendant cette période.

Il est impossible de vraiment conclure sur le transfert vers le Golfe du Lion si ce n'est que l'impact des tempêtes sur la dynamique sédimentaire joue énormément sur la redistribution des particules fluviales à l'embouchure du Rhône. L'installation de pièges à sédiments en différents endroits de la périphérie du prodelta permettrait d'évaluer davantage les sédiments remobilisés exportés vers la mer ouverte ou redéposés sur le prodelta.

### 5.5.3. Bilans sur le Golfe du Lion hors prodelta

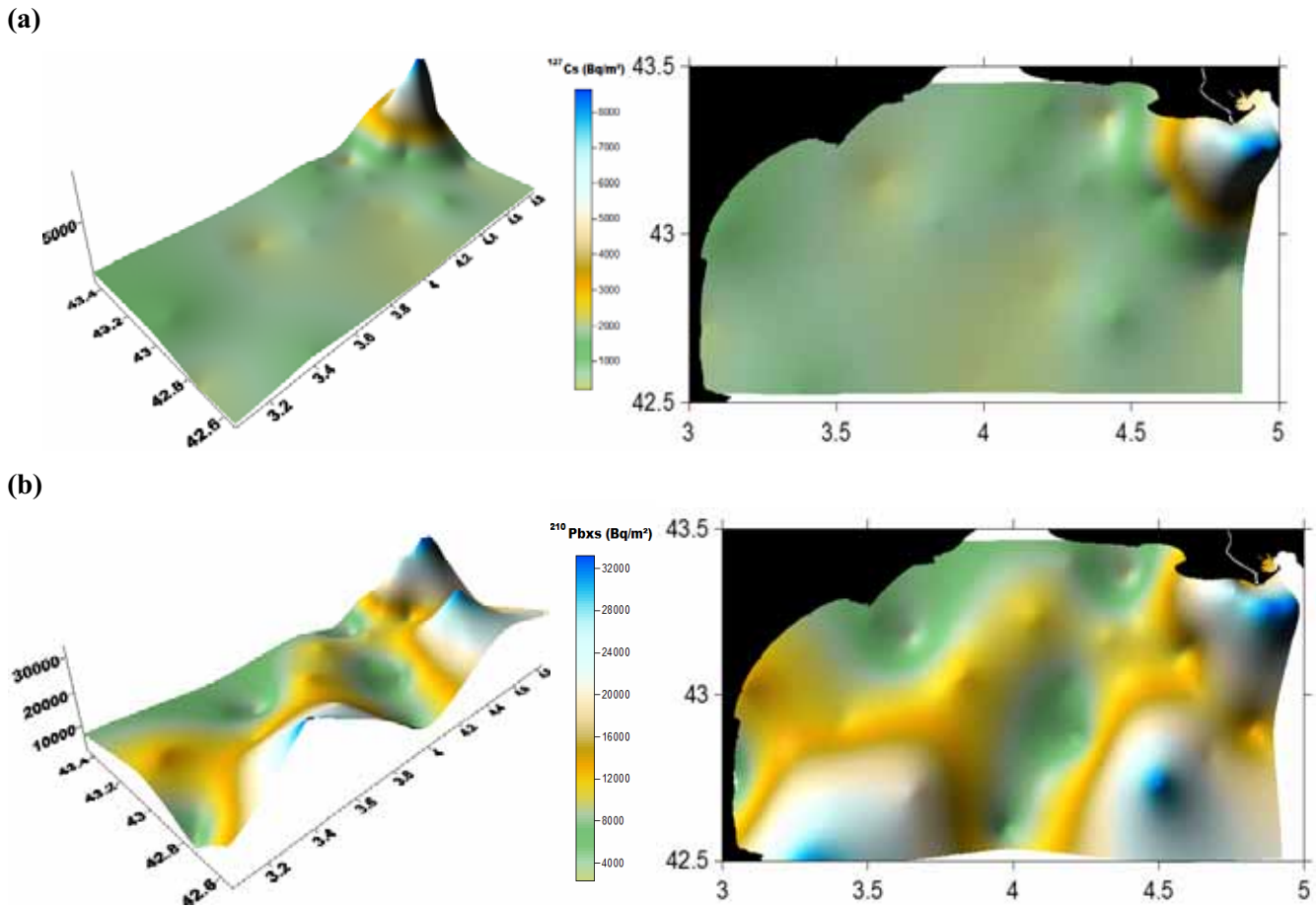
Le Golfe du Lion est alimenté en particules à 90 % par le Rhône. Des particules marquées de la signature radiochimique rhodanienne sont ainsi retrouvées dans toute la Méditerranée Nord-Occidentale (Thomas, 1997). Les profils de <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> réalisées à partir des campagnes REMORA (**Figure 5.58**) vont permettre d'estimer le stock de radioéléments renfermés en profondeur et dans sa couverture sédimentaire entre 2001 et 2002.

Une estimation du bilan global va être effectuée au moyen d'une régression linéaire de certains profils de radioéléments incomplets.



**Figure 5.58 : Positions des stations de prélèvements utilisées pour les calculs de bilan de radioéléments : bennes Fluchat de REMORA1 (en noir), küllenberg de REMORA2 (en bleu) et multi-tubes de REMORA3 (en rouge).**

La zone prodeltaïque est très nettement marquée qualitativement (spatialement) et quantitativement (numériquement) par les valeurs de <sup>137</sup>Cs (**Figure 5.59.a**). Un pic très aigu de radioactivité surfacique à plus de 9 kBq.m<sup>-2</sup> est visible en périphérie du prodelta, soit une valeur 18 fois supérieure au maximum retrouvé dans le reste du Golfe du Lion.



**Figure 5.59 : Répartition surfacique en  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  du  $^{137}\text{Cs}$  (a) et du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (b) sur l'intégralité des sédiments du Golfe du Lion sans tenir compte des stations du prodelta du Rhône.**

Une étude détaillée des profils de concentrations de radioéléments avec la profondeur a montré que le  $^{137}\text{Cs}$  n'était pas très présent dans les sédiments à plus de quelques dizaines de centimètres de profondeur et les résultats présentés ici révèlent que ses valeurs sont faibles dans le Golfe du Lion ( $<500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Le prodelta est également une zone de très forte accumulation de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , comme le montre la **Figure 5.59.b**. Il apparaît sur cette image comme un véritable réservoir de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ . Les valeurs surfaciques maximales retrouvées en périphérie du prodelta sont jusqu'à 9 fois supérieures à celle retrouvées dans le Golfe du Lion, cela malgré le scavenging important du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur les particules en suspension. Il est fort possible que le bilan sur le prodelta soit légèrement sous-estimé, tout comme pour le  $^{137}\text{Cs}$ , car certains signaux de radioactivité ne présentaient pas de fin sur les profils spectrométriques.

#### 5.5.4. Bilan global des radionucléides dans le Golfe du Lion et sur le prodelta

En compilant l'intégralité des données de concentration en  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  apparaît une zone d'accumulation sédimentaire préférentielle représentée par une zone de piégeage de radionucléides. La **Figure 5.60** présente un pic de  $240 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$  de  $^{137}\text{Cs}$  à la très proche embouchure du Rhône, soit une valeur 480 fois supérieure à celle retrouvée dans le Golfe du Lion.

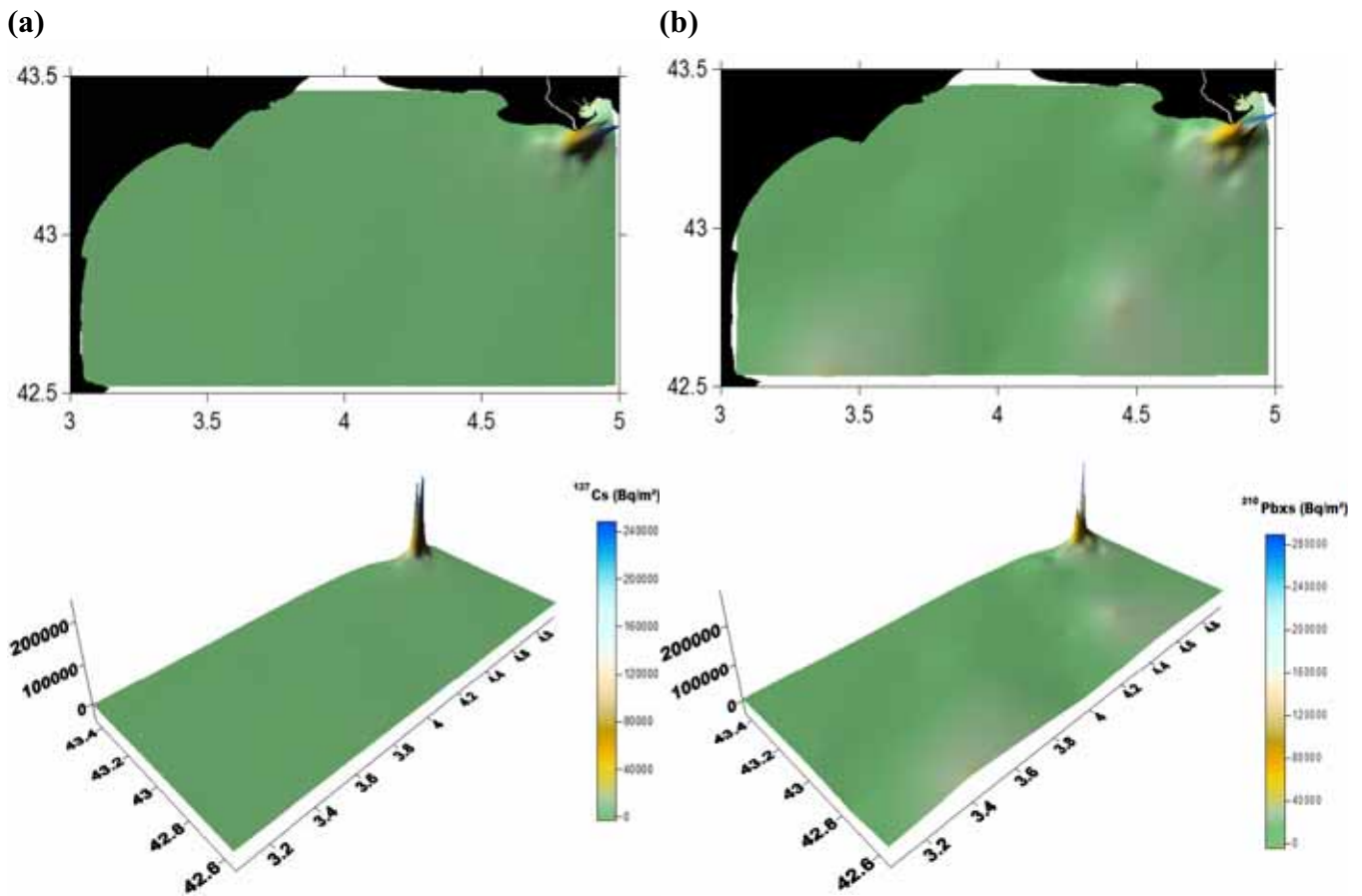


Figure 5.60 : Répartition surfacique du  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (a) et du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (b) dans l'intégralité de la colonne sédimentaire du Golfe du Lion (REMORA 1, 2 et 3).

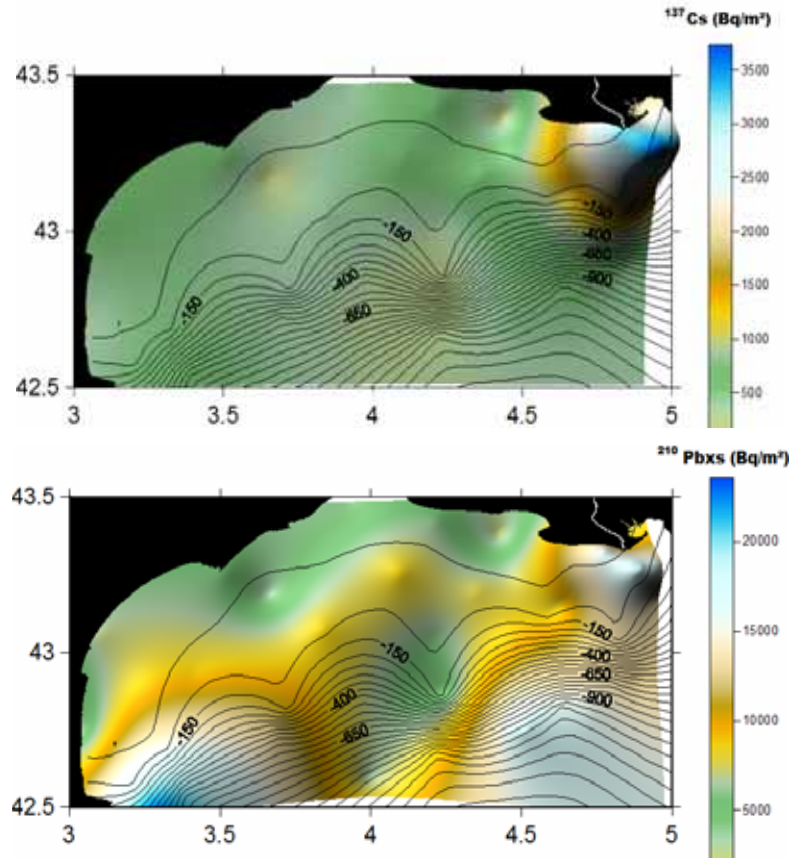
La concentration de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  s'élève à  $280 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$  dans la même zone, soit une valeur 40 fois supérieure à celles rencontrées au-dessus de la limite du plateau continental et 7 fois supérieure à celles rencontrées au-delà de la limite du plateau continental (Figure 5.60).

La Figure 5.61 ci-dessous reprend les résultats précédents de radioactivité de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans les dix premiers centimètres de sédiments du le Golfe du Lion sans tenir compte du prodelta, auxquels sont ajoutées les isobathes relevées pendant les différentes campagnes. Même si cette carte bathymétrique reste sommaire puisqu'elle ne comprend qu'une soixantaine de points, elle demeure grossièrement correcte si on la compare avec celle dressée par IFREMER (Figure 1.2).

La périphérie du prodelta du Rhône est fortement marquée par des fortes concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  jusqu'à la rupture du plateau (entre 100 et 150 m de profondeur) alors que ce sont les interfluves, zones représentées par les pointes des isobathes en V orientées vers le sud, qui comportent les signaux les plus faibles. Cette remarque se vérifie pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  qui présente trois points d'accumulation particuliers : la périphérie du prodelta, une zone profonde proche du prodelta et une zone profonde au large du Cap Creus.

La couronne extérieure du prodelta est alimentée par l'embouchure du Rhône, qui nourrit elle-même des zones profondes à proximité. Les pointes des isobathes en V orientées vers le nord signalent un canyon sous-marin ou tout au moins une zone chenalisée, en relation quasi-directe avec le prodelta. La carte bathymétrique ne peut pas renseigner précisément sur le transfert des radioéléments associés aux sédiments vers cet éventail profond mais elle est suffisante pour repérer une incision subaquatique dans le substratum. Ce second point d'accumulation de

$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  pourrait donc être dû, outre au phénomène de scavenging à travers la colonne d'eau, à des transferts de particules par des canyons sous-marins.



**Figure 5.61 : Répartition des stocks surfaciques ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de  $^{137}\text{Cs}$  (en haut) et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (en bas) dans le Golfe du Lion en fonction des isobathes relevées durant la campagne de prélèvements REMORA3.**

Le troisième point d'accumulation est représenté par une zone profonde au large du Cap Creus. Même s'il a été démontré que des sédiments issus du Rhône étaient retrouvés à la frontière franco-espagnole, le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  présents au niveau du Cap Creus provient essentiellement des nombreux fleuves côtiers méditerranéens comme la Têt, l'Aude, l'Orb, l'Hérault. Le Cap Creus présente deux canyons sous-marins à proximité : le canyon du Cap Creus et celui du Lacaze-Duthiers (Palanques et al., 2006 ; Palanques et al., 2008 ; Durrieu de Madron et al., 1999), qui fonctionnent actuellement. Ils sont des vecteurs efficaces de matières vers les grandes profondeurs et pourraient être liés à l'accumulation de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  observée sur la **Figure 5.61**.

Le **Tableau 5.21** rend compte des stocks de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sur les 15000  $\text{km}^2$  environ du Golfe du Lion et relate la participation du prodelta d'une surface de 500  $\text{km}^2$  dans le stockage de ces radioéléments. Les sédiments superficiels de la zone prodeltaïque (dix premiers centimètres) retiennent à peu près 10 % de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $^{137}\text{Cs}$  du stock superficiel du Golfe du Lion. En revanche, le prodelta stocke près de la moitié de l'intégralité du  $^{137}\text{Cs}$  contenu dans le Golfe du Lion, soit 13.2 TBq sur 26.67 TBq, contre seulement 8.3 % pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (16 TBq sur 206.5 TBq). Rappelons que la surface de 500  $\text{km}^2$  représente 3.3 % du Golfe du Lion.

		GdL sans prodelta		GdL avec prodelta de 500 km <sup>2</sup>		Proportion tenue par le prodelta	
		<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>	<sup>137</sup> Cs	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>	<sup>137</sup> Cs	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub>	<sup>137</sup> Cs
Estimation sur les 10 premiers centimètres de sédiments	Surface totale estimée de distribution (km <sup>2</sup> )	14500		15000		3.3 %	
	Quantité totale de radioéléments (TBq)	130.79	8.13	144.96	9.03	9.77 %	9.97 %
	Surface de répartition de 50 % du stock (km <sup>2</sup> )	13189	14129	12846	12307	$\Delta S \cong S_p$	$\Delta S = 5 S_p$
	Surface de répartition de 10 % du stock (km <sup>2</sup> )	3950	951	3966	402.6	$\Delta S < 0$	$\Delta S = 1.5 S_p$
Estimation sur l'intégralité de la colonne sédimentaire	Surface totale estimée de distribution (km <sup>2</sup> )	14500		15000		3.3 %	
	Quantité totale de radioéléments (TBq)	189.35	13.47	206.49	26.67	8.30 %	49.49 %
	Surface de répartition de 50 % du stock (km <sup>2</sup> )	13169	12437	12708	507	$\Delta S = 0.92 S_p$	$\Delta S = 23.9 S_p$
	Surface de répartition de 10 % du stock (km <sup>2</sup> )	3448	741	3225	15.76	$\Delta S = 0.45 S_p$	$\Delta S = 1.45 S_p$
	Surface S <sub>m</sub> de répartition du pic R <sub>m</sub> de radioéléments (km <sup>2</sup> )	290	27.1	40.7	25.8	$\Delta S$ (en km <sup>2</sup> ) = surface de répartition sans prodelta - surface de répartition avec prodelta. S <sub>p</sub> = surface totale du Golfe du Lion avec prodelta - surface totale du Golfe du Lion sans prodelta	
	Stock R <sub>m</sub> réparti sur la surface S <sub>m</sub> (GBq)	14.11	6.24	1270	4390		
<b>Bilan</b>	Proportion du stock des radionucléides des 10 premiers cm de sédiments sur la colonne sédimentaire	69.74 %	60.36 %	70.20 %	33.86 %		

Tableau 5.21 : Estimation des bilans de radioéléments dans les sédiments superficiels et profonds du Golfe du Lion et de la participation de la zone prodeltaïque du Rhône dans leur stockage.

Les surfaces de répartition des moitié et dixième de stock montrent l'importance du prodelta et de sa capacité d'enfouissement des contaminants radioactifs, puisque 10 % du  $^{137}\text{Cs}$  superficiel est réparti sur 402.6 km<sup>2</sup> contre 15.76 km<sup>2</sup> pour le  $^{137}\text{Cs}$  total. Les différences de surfaces de répartition  $\Delta S$  en fonction de la surface du prodelta  $S_p$  montrent que la zone prodeltaïque représente le plus important stock de  $^{137}\text{Cs}$  du Golfe du Lion mais également que le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est bien présent. Cela prouve que les taux de sédimentation sont extrêmement faibles dans les zones du Golfe du Lion hors prodelta puisque les particules avec lesquelles le scavenging a lieu forment une fine pellicule sédimentaire superficielle. En outre, les valeurs de  $\Delta S$  proches de l'unité tendent à prouver que la distribution du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans la colonne sédimentaire est assez uniforme.

Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  sont stockés entre 60 et 70 % dans les 10 premiers centimètres de sédiments dans le Golfe du Lion, en exceptant le prodelta. En revanche, alors que la participation des 10 premiers centimètres ne varie pas trop pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (70.2 %) en incluant le prodelta, elle diminue fortement pour le  $^{137}\text{Cs}$  (33.9 %), marquant son stockage profond dans le prodelta.

## 5.6. Conclusion sur le bilan de sédiments et des radioéléments

### 5.6.1. Apports de radionucléides par le Rhône

- Dans les fractions dissoutes et particulaires recueillies en Arles durant cette étude, la radioactivité d'origine anthropique ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) s'est révélée plus faible que la radioactivité d'origine naturelle ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ) d'un facteur 2 à 10. La concentration actuelle du  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments du Rhône est bien moins importante qu'à l'époque où l'usine de retraitement du combustible de Marcoule fonctionnait pleinement et où l'accident de Tchernobyl avait fortement impacté la zone.
- La constante de distribution  $K_d$  des radioéléments d'origine anthropique montre une assez faible affinité avec la phase particulaire ( $10^4$ ) alors que cette affinité est bien plus importante pour les radioéléments d'origine naturelle ( $10^5$ ).
- Le panel de données de radioactivité en fonction de la turbidité est dense pour de faibles concentrations en MES (entre 0 et 40 mg.L<sup>-1</sup>) mais il l'est moins pour des fortes valeurs de turbidité (> 40 mg.L<sup>-1</sup>). Cependant, il permet d'observer une diminution de la radioactivité à partir d'un certain seuil de turbidité concernant la phase particulaire (environ 50 mg.L<sup>-1</sup>) par effet de dilution.
- Le Rhône a libéré près de 168.7 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  et 557 GBq de  $^{210}\text{Pb}$  en 2 ans et demi. Il transporte chaque année près de 36.9 GBq et 14.4 GBq de  $^{137}\text{Cs}$ , respectivement sous les formes dissoute et particulaire. Le flux moyen de  $^{137}\text{Cs}$  a diminué d'un facteur 100 à 300 entre la période 1954-1990 et aujourd'hui (2006-2008).



### 5.6.2. Distribution spatiale des radioéléments

- L'affinité des radioéléments avec la fraction sédimentaire fine suggère une étude préliminaire de la granulométrie dans le Golfe du Lion. Les sables reliques d'Aloisi (1986) en bordure du plateau continental du Golfe du Lion ont été confirmés par les cartes de répartition granulométrique réalisées à partir des données sédimentologiques des campagnes océanographiques REMORA entre 2001 et 2002, analysées au granulomètre à diffraction laser. Des sédiments grossiers sont également visibles au niveau des lits de canyons sous-marins alors que la granulométrie alentour et sur les levées reste fine.
- Variant de  $16 \text{ Bq.kg}^{-1}$  sur le prodelta du Rhône à  $849 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans un canyon sous-marin profond, la radioactivité superficielle du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est fortement influencée par le phénomène de scavenging, chargeant les MES en radionucléides au cours de leur chute dans la colonne d'eau.
- Au contraire, le  $^{137}\text{Cs}$  présente une concentration superficielle minimale de  $2 \text{ Bq.kg}^{-1}$  en domaine profond ou sur le plateau continental du Golfe du Lion et maximale de  $22 \text{ Bq.kg}^{-1}$  sur le prodelta. Dans cette zone, la distance à la source rhodanienne régit principalement la répartition du  $^{137}\text{Cs}$  (exceptées les très faibles concentrations dans l'atmosphère provenant des essais nucléaires passés).
- Les deux radionucléides montrent des concentrations très bien corrélées sur le prodelta (86 %) mais ces relations deviennent de moins en moins évidentes avec la distance à l'embouchure du Rhône ; le rapport  $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  diminue continuellement avec la distance par rapport à l'émissaire rhodanien.
- A l'échelle du prodelta, l'effet du scavenging du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est un peu moins visible sous la pression des apports du Rhône. En revanche, une zone de dépôt superficiel de  $^{137}\text{Cs}$  est visible à une dizaine de kilomètres au sud-ouest de l'embouchure sur une aire de  $150 \text{ km}^2$  aux contours distincts. Ce pool est probablement formé par des sédiments qui ont échappé au piégeage durable sur le prodelta ou qui ont été remis en suspension suite à des tempêtes. Ce même pool a été observé par Lansard (2005) pour les isotopes 238, 239, 240 du plutonium.
- Les fractions silteuse et argileuse présentent une indéniable corrélation avec le  $^{137}\text{Cs}$ , contrairement à la fraction sableuse qui oppose une structure cristallographique inappropriée à l'adsorption. Les argiles semblent avoir de grandes affinités avec le  $^{210}\text{Pb}$ . Les sables, ne présentant qu'une surface de contact restreinte, ne montrent pas d'affinité particulière avec les radionucléides, sauf dans des zones exclusivement sableuses ou riches en MO.

### 5.6.3. Distribution temporelle des radioéléments

- La Surface Mixing Layer (SML) est visible sur les profils de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  des stations assez distantes car le taux de sédimentation est faible et uniforme. Concernant les stations les plus proches de l'embouchure, les apports sont tellement intenses et irréguliers que la SML est indécélable et le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ne permet pas de calculer des taux de sédimentation.
- La signature de dilution sur de nombreux profils de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  attestent d'un événement hydrologique, de type crue. Ces signatures sont généralement marquées par des forts taux de matériaux grossiers synchrones sur les profils granulométriques, témoins d'un contexte hydrodynamique très énergétique.

- Le plateau continental du Golfe du Lion est principalement constitué de pélites, sauf aux embouchures des fleuves méditerranéens comme l'Orb, l'Hérault, la Têt ou le Petit Rhône. De la même manière, les concentrations de  $^{137}\text{Cs}$  y sont extrêmement faibles.
- La diminution des rejets du site de Marcoule dans les années 1990 est observée dans les profils de  $^{137}\text{Cs}$  par une inversion de la décroissance radioactive : les sédiments les plus récents sont les moins marqués et un niveau d'inflexion du signal est observé à plusieurs décimètres de profondeur sur les profils des points de prélèvements les plus distaux. Les stations distales témoignent particulièrement d'une époque pendant laquelle la concentration en  $^{137}\text{Cs}$  était bien supérieure à  $100 \text{ Bq.kg}^{-1}$  (calculée après correction de la décroissance radioactive) contre 10 à  $12 \text{ Bq.kg}^{-1}$  actuellement.
- Des prélèvements sédimentaires au moyen de carottiers Küllenberg ont vraisemblablement permis de repérer le signal radioactif de l'accident de Tchernobyl (avril 1986) en diverses stations de l'embouchure du Rhône.

#### 5.6.4. Taux de sédimentation

Les taux de sédimentation calculés à partir de la méthode au  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  révèlent des valeurs variant de  $0.09 \text{ cm.an}^{-1}$  sur le plateau continental à  $1 \text{ cm.an}^{-1}$  sur la majorité du prodelta. La densité des données recueillies a permis de réévaluer les nombreuses estimations déjà effectuées jusqu'à présent. Les taux de sédimentation sont compris entre  $2.5$  et  $10 \text{ cm.an}^{-1}$  aux alentours de l'embouchure avec un maximum au niveau de l'isobathe 20 m où les valeurs dépassent  $25 \text{ cm.an}^{-1}$ .

- Le taux de mélange D est compris entre  $0.22$  et  $89.28 \text{ cm}^2.\text{an}^{-1}$  pour une moyenne de  $12.22 \text{ cm}^2.\text{an}^{-1}$ . Le coefficient de diffusion effective  $D_{\text{eff}}$  varie de  $8.37 \cdot 10^{-10}$  à  $4.07 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ . Le coefficient de diffusion moléculaire  $D_{\text{molec}}$  est évalué à  $4.57 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ . Même si les vagues restent le processus de mélange dominant des radioéléments à la proche embouchure, la bioturbation benthique prédomine à l'échelle du prodelta.
- Trois campagnes océanographiques, espacées chacune de 2 mois et suivant la crue exceptionnelle de décembre 2003 pendant laquelle le débit du Rhône a dépassé  $11000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , ont permis d'observer les conséquences sédimentaires et radioécologiques d'un événement extrême sur une période de temps durable. Les résultats montrent le dépôt de grandes quantités de sédiments mais également le caractère transitoire de ces accumulations, destinées à être libérées dans le Golfe du Lion. Des taux de sédimentation événementiels ont été évalués à plus de  $50 \text{ cm.an}^{-1}$ . Les taux de sédimentation annuels se situent entre  $20$  et  $30 \text{ cm.an}^{-1}$ , fortement influencés par les houles et courants.
- Le **Tableau 5.19** présente globalement les signatures radioactive et sédimentaire en fonction des conditions hydrologiques appliquées. Il n'est pas exhaustif et ne tient pas compte du contexte météorologique induisant houles et courants.

#### 5.6.5. Estimation des bilans des radioéléments associés aux sédiments

- Les crues de décembre 2003 et janvier 2004 ont libéré sur le prodelta, respectivement,  $75 \pm 19 \text{ GBq}$  de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  de  $^{137}\text{Cs}$ , et  $71 \pm 21 \text{ GBq}$  de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  et  $16 \pm 5 \text{ GBq}$  de  $^{137}\text{Cs}$ . Une crue plus faible en intensité qui suit

une crue très forte peut remobiliser de très grande quantité de sédiments. En effet, les particules déjà mises en suspension ont besoin de moins d'énergie pour être transportées.

- Les crues de l'hiver 2006-2007 ont apporté près de 160 kT de sédiments en quelques jours de crues mais les quantités effectives de sédiments transportées par ces événements avoisinent 450 kT, dont 256 kT retrouvés sur le prodelta (56 %). Près de 7.7 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  et 45.2 GBq de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ont été transportés vers l'embouchure durant ces crues. Près de 3.1 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  ont été retrouvés sur le prodelta (39.7 %).
- Le **Tableau 5.18** montre bien que les crues sont donc les vecteurs principaux des sédiments vers la Mer Méditerranée, notamment en 2008 où elles ont pris part à 93 % des apports particuliers et 80 % des radionucléides.
- Le prodelta est une zone de stockage temporaire des sédiments issus du Rhône vers le Golfe du Lion. Il ressort de cette étude que près de 50 % des apports sédimentaires rhodaniens et 40 % du  $^{137}\text{Cs}$  se déposeraient sur une zone d'environ 2 km<sup>2</sup> à la proche embouchure.
- L'émissaire du Rhône est une zone de piégeage de  $^{137}\text{Cs}$ , marquée par deux types de dépôts:
  - l'un superficiel, dont la radioactivité surfacique dépasse 1000 Bq.m<sup>-2</sup> sur une surface de 476 km<sup>2</sup> et totalisant 2.53 TBq de  $^{137}\text{Cs}$  sur 482 km<sup>2</sup> (moyenne de 20 Bq.kg<sup>-1</sup> sur 150 km<sup>2</sup>).
  - l'autre en profondeur, accusant un maximum de concentration de  $^{137}\text{Cs}$  de 370 kBq.m<sup>-2</sup> et totalisant 3.35 TBq sur 19.7 km<sup>2</sup>.
- Les crues amènent bien plus de matériaux qu'elles n'en érodent alors que les tempêtes (de sud-est notamment) induisent des tensions de cisaillement au fond : les crues de novembre et décembre ont remis en suspension entre 62 et 100 kg.m<sup>-2</sup> de sédiments et entre 930 et 1500 Bq.m<sup>-2</sup> de  $^{137}\text{Cs}$ .

La tempête du 18 février 2007, générant une contrainte de cisaillement de fond de 5 N.m<sup>-2</sup>, a remobilisé 4.7 T.m<sup>-2</sup> de sédiments et 70.7 kBq.m<sup>-2</sup> de  $^{137}\text{Cs}$ .

De fait, selon la surface d'action effective des houles avec une granulométrie semblable à celle utilisée pour l'expérience de l'érodimètre, les vagues et courants auraient remobilisé entre 250 et 650 kT de sédiments et 2.5 à 9.7 GBq de  $^{137}\text{Cs}$ , ce qui correspond globalement aux résultats de la simulation réalisée par Dufois (2008).

- Le  $^{137}\text{Cs}$  est stocké majoritairement sur le prodelta (49.5 %) et principalement en profondeur (74 %), alors que le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  est invariablement présent en surface et en profondeur.

La quantité de  $^{137}\text{Cs}$  a été évaluée à 26.67 TBq dans le Golfe du Lion et 13.2 TBq sur une surface de 500 km<sup>2</sup>, soit 3.3 % de la superficie du golfe.

- Les fortes valeurs de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  au niveau des canyons sous-marins, particulièrement à leurs pieds, attesteraient de leurs rôles de vecteurs des particules issues du continent.



# Conclusion générale

Le but principal de cette thèse était d'étudier le devenir des contaminants radioactifs naturels ou issus de l'industrie nucléaire associés à la phase particulaire et soumis aux conditions hydrodynamiques et météorologiques rhodaniennes et méditerranéennes.

Pour la première fois, l'embouchure directe du Rhône a pu être instrumentée et suivie en continu.

Les efforts prodigués pour recueillir un grand nombre de données hydrologiques et physico-chimiques dans la zone étudiée ont été importants car le contexte environnemental s'est imposé comme un obstacle délicat à franchir. En effet, les opérations d'instrumentation à l'embouchure du Rhône ont été rendues difficiles par les épisodes de houle succédant aux vents de sud-est et parfois au mistral, très fréquents à cet endroit. En outre, les taux d'accumulation sédimentaire peu communs de la zone n'ont pas facilité le bon déroulement du déploiement de certains appareils de localisation de surface. Les risques de chalutage d'engins sont omniprésents à l'embouchure du Rhône où la pression anthropique est importante.

Malgré les difficultés rencontrées lors des prélèvements et du recueil d'informations sur le terrain durant deux années et demie, un jeu de données important et de qualité a pu être récupéré et une grande quantité d'échantillons d'archives a pu être traitée.

## Les apports du Rhône

Durant ces trois années d'étude du Rhône et de son embouchure (2006-2008), les apports sédimentaires à la mer ouverte ont été estimés entre 2 et 9 Mt.an<sup>-1</sup> selon l'intensité et la fréquence des crues. Ces dernières aussi extrêmes que soudaines contribuent entre 33 % et 92 % des transferts sédimentaires annuels, alors qu'elles ne représentent que 3 % à 8 % du temps. Elles transportent aussi bien des matériaux grossiers (sables) que des matériaux plus fins (silts et argiles) mais le granoclassement change en fonction des phases de la crue lors du dépôt : la fraction granulométrique augmente avec le débit et diminue ensuite. Les apports péliques suivent généralement les crues. La corrélation visible entre les radioéléments étudiés, à savoir le <sup>137</sup>Cs et le <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>, et les particules fines, précisément les silts fins, explique la plus importante radioactivité relevée dans les sédiments à l'embouchure, notamment après les crues. Les profils de concentrations de radioéléments attestent d'une dilution du signal lorsque la fraction grossière s'élève. Ces résultats témoignent d'une baisse de la concentration des radionucléides pendant les crues, due aux forts débits liquides et à la forte charge en suspension. De fait, ces événements hydrologiques impulsionsnels engraisent le prodelta qui stocke près de 94.5 Mt de sédiments pour 13.2 TBq de <sup>137</sup>Cs et 17.1 TBq de <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> en 2001. L'étude précise de périodes de crue de l'hiver 2006-2007 a permis de suivre la sédimentation à l'embouchure. L'interpolation des données demeure satisfaisante et l'extrapolation aurait nécessité d'autres points d'échantillonnage. Il apparaît néanmoins que la superficie d'impact maximum des apports du Rhône est proche de 2 km<sup>2</sup> environ avant d'être repris par les vagues et les courants, et que près du tiers du stock de <sup>137</sup>Cs de la zone de 500 km<sup>2</sup> à l'embouchure au Grand Rhône se trouve sur moins du vingtième de sa surface, soit 26 km<sup>2</sup>. Cependant, une partie des apports sédimentaires rhodaniens sont remaniés par les tempêtes de sud-est notamment d'après l'étude CARMA, ce qui a également été constaté par Dufois (2008) grâce à la simulation de la période donnée.

En outre, la question de la participation du phytoplancton, de la matière organique et des conditions thermiques aux processus de floculation et agrégation mécanique a été soulevée dans ce travail, sans toutefois avoir été

totale­ment détaillée. Une observation au microscope électronique à balayage de particules filtrées dans les couches d'eau ciblées permettrait d'appuyer ces hypothèses.

## L'érosion sur le prodelta

Une grande partie du prodelta se situe dans la zone d'action des houles entre 0 et 20 m de profondeur. De fait, les fortes houles du large, générées par les vents de sud et de sud-est dont la hauteur significative dépasse 1.5 m, induisent de fortes contraintes de cisaillement à l'interface eau-sédiment, alimentent le néphéloïde de fond et créent des processus de remises en suspension des particules. La contrainte critique d'érosion a été estimée à 0.35 Pa sur un substrat dont la granulométrie moyenne est de l'ordre de 15 µm. Cette valeur varie légèrement avec les profondeurs de prélèvement, l'épaisseur de sédiment, sa granulométrie et sa porosité. L'étude montre que les tempêtes générées par les vents de sud-est ont un impact érosif bien supérieur à celui généré par les courants de fond, mais il n'a malheureusement pas été possible de différencier les dépôts sédimentaires des redépôts après remobilisation par les vagues. Certaines discordances sur les profils granulométriques et sur les logs stratigraphiques permettent de distinguer des surfaces d'érosion mais elles restent très peu fréquentes et délicates à attribuer à un événement précis.

Les processus érosifs entraînent ainsi dans la colonne d'eau ou à proximité du fond les particules arrachées au substrat. Une étude de la fraction dissoute des radionucléides aurait permis d'estimer la désorption liée aux contraintes de cisaillement et à la remise en suspension, cependant les valeurs dans cette phase se situent au niveau des ultra-traces et requièrent des volumes d'eau très importants. Une partie du <sup>137</sup>Cs se désorbe généralement au contact de l'eau de mer en raison de la compétitivité des cations en présence mais la fraction fixée entre les feuillets des minéraux argileux n'est pas remobilisable. Les radionucléides sont donc de bons traceurs des matières en suspension dans la zone sous influence rhodanienne.

## Le transport vers le Golfe du Lion

Le transport des éléments radioactifs associés à la phase particulaire est non seulement déduit de la différence entre les apports du Rhône et les dépôts prodeltaïques mais également observé au moyen de données de courantométrie et de concentration en radionucléides. Les périodes pendant lesquelles l'ADCP a été immergé ont révélé un transport massif vers le sud-ouest (80 % du temps) aussi effectif durant les crues que durant les tempêtes de sud-est, avec des vitesses au fond et dans la colonne d'eau atteignant 50 cm.s<sup>-1</sup>. Les valeurs des quantités de matières exportées hors du prodelta sont assez approximatives et l'installation de pièges à sédiment en des points stratégiques de la zone d'étude les aurait gratifiées de plus de précision. Le problème réside sur l'indétermination du taux de transfert particulaire vers la mer ouverte par rapport aux sédiments remis en suspension.

Outre le volume sédimentaire, la zone prodeltaïque est discernable et identifiable par le biais des bilans de radioéléments. Elle témoigne de milieux de dépôts préférentiels des sédiments et des radioéléments. Les radioéléments de surface sont potentiellement remobilisables dans les 10 premiers centimètres. Les forts taux de sédimentation à la proche embouchure conduisent cependant à un enfouissement de la plus grande partie du stock dans cette zone. Les sédiments érodés et remis en suspension sont principalement dirigés vers le sud-ouest mais

leur dispersion par les courants locaux ne favorise pas de zones de forte accumulation où ils pourraient être stockés sur le long terme.

Le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  sont visibles dans l'intégralité du Golfe du Lion mais leur potentielle origine rhodanienne est difficile à déterminer. En effet, le  $^{137}\text{Cs}$  peut provenir des retombées atmosphériques et non du cycle du combustible de la vallée du Rhône. Le rapport isotopique  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  aurait pu renseigner sur la source du césium mais l'isotope 134 a une demi-vie trop courte au regard des temps de circulation des eaux et de dépôt des particules, et il n'est plus détecté dans les eaux du Rhône depuis l'arrêt des opérations de retraitement de Marcoule. Quant au  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ , son origine atmosphérique et son affinité avec les particules en suspension lui confèrent de fortes capacités au scavenging. Néanmoins, les stocks prodeltaïques de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  représentent respectivement 49.5 % et 8.3 % de la radioactivité du Golfe du Lion, conférant à cette zone le statut de piège à contaminants radioactifs d'origines artificielle.

## Perspectives

La connaissance de la localisation et du volume des grandes zones de stockage des radioéléments issus de l'industrie nucléaire est nécessaire pour l'appréhension de leur devenir et leurs comportements face à des événements qui tendraient à fortement les remobiliser. Il serait intéressant de coupler ces études sédimentologiques aux compartiments biologiques dans la même zone afin de déterminer l'impact de l'absorption de ces radioéléments par la faune pélagique et benthique de ce milieu où l'activité de pêche est la plus importante. La biodisponibilité de certains polluants est étudiée dans de nombreux sites littoraux méditerranéens et il serait judicieux de suivre la proche embouchure du Rhône au vu de l'activité économique marine qu'elle connaît depuis toujours. Etudier les différents compartiments permettrait de mieux connaître les cycles dans l'écosystème en général.

Les transferts vers la mer ouverte ne sont pas encore assez bien quantifiés, hormis au moyen de la modélisation numérique, et il serait bon de disposer des pièges à sédiments en des points définis du pourtour du prodelta pour avoir des idées plus concrètes sur les masses sédimentaires exportées, mais il serait surtout intéressant de multiplier les points de mesure pour avoir une meilleure connaissance du système sur une aire définie et peaufiner les modèles hydrosédimentaires. Des canyons sous-marins actifs incisent la pente continentale à la suite du prodelta où le plateau continental tend à se réduire. Leurs rôles dans l'export de matières issues du Rhône vers le domaine profond est à approfondir, comme il a été fait au niveau des canyons occidentaux du Golfe du Lion (Cap Creus, Lacaze-Duthiers).

Ces travaux comportent une partie concernant l'hydrodynamique sédimentaire d'un milieu aux conditions hydrologiques et météo-climatiques extrêmes. La proximité du Golfe de Fos, de la Flèche de la Gracieuse et des Marais Salants induit une forte fréquentation touristique, économique et industrielle. L'envasement régulier du Golfe oblige des travaux de dragage, remettant en suspension différents types de polluants dans la colonne d'eau. La Flèche de la Gracieuse et les Marais Salants subissent les effets du changement climatique global et des événements extrêmes locaux puisque leur morphologie varie avec des migrations sédimentaires à tendance érosive. Une meilleure gestion du littoral basée sur le suivi des masses de sédiments et des aménagements adéquats permettrait de conserver stable le bilan sédimentaire des côtes camarguaises.



L'installation dans le courant de l'année 2009 d'une bouée fixe BFI instrumentée en continu (IFREMER-CEREGE-CNRS-IRSN) au moyen d'un ADCP et de sondes (turbidimètres, salinomètres et certainement altimètres) au droit de l'embouchure du Rhône va permettre de suivre plus exactement les conditions hydrosédimentaires et de mieux appréhender les événements extrêmes dans cette zone. Le retour d'expérience de ces 3 années d'étude a permis de dimensionner au mieux l'instrumentation associée à cette bouée.



# Références bibliographiques

- Abassi A. (1998). Contribution à l'étude des transferts particuliers sur la marge continentale du Golfe du Lion (Méditerranée Nord Occidentale). Utilisation de deux traceurs radioactifs : le Pb-210 et le Po-210. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan, 153 pp.
- Agrawal Y.C., McCave I.N., and Riley J.B., 1991. Laser diffraction size analysis. Principles, methods and applications of particle size analysis, Cambridge University Press, 119-128.
- Agrawal Y.C. and Pottsmith H.C., 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology*, 168, 89-114.
- Albérola C. et Millot C., 2003. Circulation in the french Mediterranean coastal zone near Marseilles: the influence of wind and the Northern Current. *Continental Shelf Research*, 23, 587-610.
- Albérola C., Millot C., Front J., 1995. On the seasonal and mesoscale variabilities of the Northern Current during the PRIMO-0 experiment in the western Mediterranean Sea. *Atmosphere Ocean*, 18, 163-192.
- Aldridge J.N., Kershaw P., Brown J., McCubbin D., Leonard K.S., Young E.F., 2003. Transport of plutonium ( $^{239/240}\text{Pu}$ ) and caesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) in the Irish Sea: comparison between observations and results from sediments and contaminant transport modelling. *Continental Shelf Research*, 23, 869-899.
- Allison M.A., Sheremet A., Goni M.A., Stone G.W., 2005. Storm layer deposition on the Mississippi-Atchafalaya subaqueous delta generated by Hurricane Lili in 2002. *Cont. Shelf Research* 25, 2213-2232.
- Aloisi J.C., Got H. and Monaco A., 1973. Carte géologique du précontinent languedocien au 1/250000<sup>ième</sup>, International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (I.T.C.)(Eds.), Netherlands.
- Aloisi J.C., Monaco A., 1975. La sédimentation infra-littorale. Les prodeltas nord-méditerranéens. *C. R. Acad. Sci.*, 280 : 2833-2836.
- Aloisi J.C., Auffret G.A., Auffret J.A., Barrusseau J.P., Homeril P., Larsonneur C., Monaco A., 1977. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 19, 183-195.
- Aloisi J.C., Cambon J.P., Carbonne J., Cauwet G., Millot C., Monaco A., 1982. Origine et rôle du néphéloïde profond dans le transfert des particules en milieu marin. Application au Golfe du Lion. *Oceanologica Acta*, 5, 481-491.
- Aloisi J.C., 1986. Sur un modèle de sédimentation deltaïque : contribution à la connaissance des marges passives. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan.
- Ancellin J., Guéguénat P., Germain P., 1979. Radioécologie marine : étude du devenir des radionucléides rejetés en milieu marin et applications à la radioprotection. Editions Eyrolles, Paris, 255 pp.
- Anderson R.F., Schiff S.L., Hesslein R.H., 1987. Determining sediment accumulation and mixing rates using  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and other tracers : problems due to postdepositional mobility or coring artifacts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 44, 231-250.
- Antonelli C., 2002. Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval. Thèse de doctorat à l'Université de Aix-Marseille I.
- Antonelli C., Eyrolle F., Rolland B., Provansal M., Sabatier F., 2008. Suspended sediment and  $^{137}\text{Cs}$  fluxes during the exceptional december 2003 flood in the Rhône River, southeast France. *Geomorphology* 95 (3-4), 350-360.
- Arduin F., Bertotti L., Bidlot J.R., Cavaleri L., Filipetto V., Lefebvre J.M., Whitman P., 2007. Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, 34, 3-4, 526-541.
- Arnaud-Fassetta G., 1998. Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille I, 329 pp.
- Bally G., Mesnage V., Deloffre J., Clarisse O., Lafite R., Dupont J.P., 2004. Chemical characterization of porewaters in an intertidal mudflat of the Seine estuary: relationship to erosion-deposition cycles. *Marine Pollution Bulletin*, 49, 163-173.
- Barnett P.R., Hutton E.W., Connelly D., 1984. A multiple corer for taking undisturbed samples from shelf, bathyal and abyssal sediments. *Oceanologica Acta*, 7 (4), 399-408.
- Baskaran M., Swarzenski P.W., 2007. Seasonal variations on the residence times and partitioning of short-lived radionuclides ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ) and depositional fluxes of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in Tampa Bay, Florida. *Marine Chemistry*, 104, 27-42.
- Beaudouin C., Suc J.P., Cambon G., Touzani A., Giresse P., Pont D., Aloisi J.C., Marsset T., Cochonat P., Duzer D., Ferrier J., 2005. Present-day rhythmic deposition in the Grand Rhône prodelta (NW Mediterranean) according to high resolution pollen analyses. *Journal of Coastal Research*, 21 (2), 292-306.
- Beckman Coulter, 2003. LS 13320 Laser Diffraction Particle Size Analyzer, Instrument Manual.

- Benson B.B. et Krause D. Jr, 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnol. Oceanogr.*, 29 (3), 620-632.
- Bethoux J.P., Prieur L., Nyffeler F., 1982. The water circulation in the North-Western Mediterranean Sea, its relations with wind and atmospheric pressure. In J. Nihoul (Ed.), *Hydrodynamics of semi-enclosed seas*, pp. 129–142. Elsevier oceanography series.
- Bethoux J.P., Durrieu de Madron X., Nyffeler F., Tailliez D., 2002. Deep water in the Western Mediterranean: peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences. *J. Mar. Sys.*, 33–34, 117–131.
- Blanc J., 1977. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral du delta du Rhône, de Fos au Grau du Roi. CNEXO. 70 pp.
- Blumberg A.F. & Mellor G.L., 1987. A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model, three-dimensional coastal ocean models. N.Heaps, Editor. American Geophysical Union, Washington D.C., Vol. 4, 1-16.
- Boldin A., Bortoluzzi G., Frascani F., Guerzoni S., Rabitti S., 1988. Recent deposits and suspended sediments off the Po della Pila (Po River, main mouth), Italy. *Marine Geology*, 79, 159-170.
- Børretzen P., Salbu B., 2000. Estimation of apparent rate coefficients for radionuclides interacting with marine sediments from Novaya Zemlya. *The Science of the Total Environment*, 262, 91-102.
- Boudreau B.P., 1986. Mathematics of tracer mixing in sediments: I. Spatially-dependent, diffusive mixing. *American Journal of Science*, 286, 161-198.
- Bouma A.H., 1962. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation. Elsevier, 168 pp.
- Bourcart J., 1945. Etude des sédiments pliocènes et quaternaires du Roussillon. *Bull. Serv. Carte Geol. France*, 45, 218 : 395-476.
- Bourcart J., Gennesseaux M., Klimek E., 1961. Sur le remplissage des canyons sous-marins de la Méditerranée française. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 252 : 3693-3698.
- Bourrin F., Durrieu de Madron X., 2006. Contribution to the study of coastal rivers and associated prodeltas to sediment supply in the gulf of lions (NW Mediterranean Sea). *Vie & Milieu (Life & Environment)* 56 (4), 307–314.
- Bourrin F., 2007. Variabilités et devenir des apports sédimentaires par les fleuves côtiers : cas du système Têt – littoral roussillonnais dans le Golfe du Lion. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan. 253 pp.
- Bourrin F., Monaco A., Aloisi J.C., Sanchez-Cabeza J.A., Lofi J., Heussner S., Durrieu de Madron X., Jeanty G., Buscaïl R., Saragoni G., 2007. Last millenia sedimentary record on a micro-tidal, low accumulation prodelta (Têt river). *Marine Geology*, 243 (1-4), 77-96.
- Bourrin F., Durrieu de Madron X., Heussner S., Estournel C., 2008. Impact of winter dense water formation on shelf sediment erosion (evidence from the Gulf of Lions, NW Mediterranean Sea). *Continental Shelf Research*, 28, 15, 1984-1999.
- Bravard J.P. et Clémens A., 2008. Le Rhône en 100 questions. Zone Atelier Bassin du Rhône. 295 pp.
- Broche P., Devenon J.L., Forget P., De Maistre J.M., Naudin J.J., Cauwet G., 1998. Experimental study of the Rhone plume. Part I : physics and dynamics. *Oceanologica Acta*, 21, (6), 725-738.
- Broecker W.S. and Peng T.H., 1982. Tracers in the Sea. Eds Eldigio Press. 690 pp.
- Calmet D. et Fernandez J.M., 1990. Caesium distribution in northwest Mediterranean seawater, suspended particles and sediments. *Continental Shelf Research*, 10, 895-913.
- Calmet D., Charmasson S., Fernandez J.M., Gontier G., 1992. Impact des retombées de l'accident de Tchernobyl sur la distribution des radionucléides anthropogènes du bassin méditerranéen nord-occidental. IRSN/DPRI, Rapport CEA-R-5584. 89 pp.
- Canals M., Puig P., Durrieu de Madron X., Heussner S., Palanques A., Fabres J., 2006. *Nature*, 444, 354-357.
- Canals-Artigas M., Monaco A., Chassefière B., Got H., 1984. Dynamique sédimentaire et phénomènes d'instabilité sur les marges continentales: approche géotechnique (Res). XXIXème Congrès C.I.E.S.M., Lucerne : 2 p.
- Carter M.W. et Moghissi A.A., 1977. Three decades of nuclear testing. *Health Physics*, 33, 55-71.
- CEC (Commission of European Community), 1989. The radiological exposure of the population of the European Community from radioactivity in Northern European Marine waters. Project MARINA. Actes d'un congrès tenu à Bruges, 14-16 juin 1989, Luxembourg, report XI/4669/89-EN, 369 p.
- Chamley H., 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. Thèse d'état à l'Université d'Aix-Marseille, 401 pp.
- Chamley H., 1987. Bases de sédimentologie. Géosciences 2<sup>ème</sup> édition. Ed. Dunod. 178 pp.

- Charmasson S., 1998. Cycle du combustible nucléaire et milieu marin. Devenir des effluents rhodaniens en Méditerranée et des déchets immergés en Atlantique Nord-Est. Thèse d'état, Université d'Aix-Marseille II. 365 pp.
- Charmasson S., Bouisset P., Radakovitch O., Pruchon A.S., Arnaud M., 1998. Long-core profiles of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in sediment near the Rhône River (Northwestern Mediterranean Sea). *Estuaries*, 21, 3, 367-378.
- Charmasson S., Barker E., Calmet D., Pruchon A.S., Thébault H., 1999. Long-term variations of man-made radionuclide concentrations in a bio-indicator *Mytilus Galloprovincialis* from the French Mediterranean coast. *The Science of the Total Environment*, 237/238, 93-103.
- Chassefière B., Aloisi J.C., Monaco A., Le Tirant P., Montarges A., 1983. Propriétés mécaniques et stabilité de la couverture sédimentaire du talus continental au large du delta du Rhône. *Rapp. Comm. Int. Mer Méd. XXVIIIème Congrès C.I.E.S.M., Cannes*, 4: 227-228.
- Chu P.C., Qi Y., Chen Y., Shi P., Mao Q., 2004. South China sea wind-wave characteristics. Part I: validation of Wavewatch III using TOPEX/Poseidon data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 1718-1733.
- Ciffroy P., Garnier J.M., Pham M.K., 2001. Kinetics of the adsorption and desorption of radionuclides of Co, Mn, Cs, Fe, Ag and Cd in freshwater systems: experimental and modelling approaches. *Journal of Environmental Radioactivity*, 55, 71-91.
- Cigna A., Delfanti R., Serro L., 1994. The radiological exposure of the population of the European Community to radioactivity in the Mediterranean Sea. Marina-Med project. Actes d'un congrès tenu à Rome, 17-19 mai 1994, Report EUR 15564 EN, 662 p.
- Cochran J.K., 1985. Particle mixing rates in sediments of the eastern equatorial Pacific: evidence from  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  distributions at MANOP sites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 1155-1172.
- Cochran J.K., Mc Kibbin-Vaughan T., Dornblaser M.M., Hirschberg D., Livingston H.D., Buesseler K.O. (1990). Pb-210 scavenging in North Atlantic and North Pacific Oceans. *Earth Planet. Sci. Let.*, 97, 332-352.
- Corbett D.R., McKee B., Duncan D., 2004. An evaluation of mobile mud dynamics in the Mississippi River deltaic region. *Mar. Geol.* 209, 91-112.
- Corbett D.R., Dail M., McKee B., 2007. High-frequency time-series of the dynamic sedimentation processes on the western shelf of the Mississippi River Delta. *Continental Shelf Research*, 27, 1600-1615.
- Crank J., 1956. *The mathematics of diffusion*. 1<sup>st</sup> edition. Oxford University Press.
- Curran K.J., Hill P.S., Milligan T.G., 2002. Fine-grained suspended sediment dynamics in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research*, 22, 2537-2550.
- Curran K.J., Hill P.S., Milligan T.G., 2003. Time variation of flocculation properties in a settling column. *Journal of Sea Research*, 49, 1-9.
- Curran K.J., Hill P.S., Milligan T.G., Mikkelsen O.A., Law B.A., Durrieu de Madron X., Bourrin F., 2007. Settling velocity, effective density and mass compaction of suspended sediment in a coastal bottom boundary layer, Gulf of Lions, France. *Cont. Shelf Res.*, 27 (10-11), 1408-1421.
- DeGeest A.L., Mullenbach B.L., Puig P., Nittrouer C.A., Drexler T.M., Durrieu de Madron X., Orange D.L., 2008. Sediment accumulation in the western Gulf of Lions, France: the role of Cap Creus Canyon in linking shelf and slope sediment dispersal systems. *Continental Shelf Research*, 28(15), 2031-2047.
- Demarcq H. et Wald L., 1984. La dynamique superficielle du panache du Rhône d'après l'imagerie infrarouge satellitaire. *Oceanologica Acta* 7(2), 159-162.
- DeMaster D.J., McKee D.A., Nittrouer C.A., Jiangchu Q., Guodong C., 1985. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in East China Sea. *Contin. Shelf Research*, 4, 143-158.
- Drexler T.M., Nittrouer C.A., 2008. Stratigraphic signatures due to flood deposition near the Rhône River: Gulf of Lions northwest Mediterranean Sea. *Continental Shelf Research*, 28, 1877-1894.
- Droz, 1983. L'éventail sous-marin profond du Rhône (Golfe du Lion). Grands traits morphologiques et structures semi-profonde. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle à l'Université de Paris VI, 195 pp.
- Duffa C., 2001. Répartition du plutonium et de l'américium dans l'environnement terrestre de la basse vallée du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille III, 179 pp.
- Dufois F., 2008. Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion: premières applications au devenir des traceurs radioactifs. Thèse de doctorat à l'Université de Toulon, 380 pp.
- Durrieu de Madron X., Nyffeler F., Godet C.H., 1990. Hydrographic structure and nepheloid spatial distribution in the Gulf of Lions continental margin. *Continental Shelf Research*, 10, (9-11), 915-929.

- Durrieu de Madron X., Radakovitch O., Heussner S., Loye-Pilot M.D., Monaco A., 1999. Role of the climatological and current variability on the shelf-slope exchanges of particulate matter: evidence from the Rhône continental margin (NW Mediterranean). *Deep Sea Research*, 46, 1513-1538.
- Durrieu de Madron X., Abassi A., Heussner S., Monaco A., Aloisi J.C., Radakovitch O., Giresse P., Buscaill R., Kerhervé P., 2000. Particulate matter and organic carbon budgets for the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oceanologica Acta*, 23, 717-723.
- Eddington D.N., 1984. Sediment-water interactions and models for the transport and fate of radionuclides in rivers. *Sediment and pollution in waterways*, IAEA-TECDOC-302, 159-185.
- Eisma D., 1993. *Suspended matter in the aquatic environment*. Springer. Berlin.
- El Ganaoui O., Schaaff E., Boyer P., Amielh M., Anselmet F., Grenz C., 2004. The deposition and erosion of cohesive sediments determined by a multi-class model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 457-475..
- Estournel C., Kondrachoff V., Marsaleix P., Vehil R., 1997. The plume of the Rhône : numerical simulation and remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 17, 899-924.
- Estournel C., Durrieu de Madron X., Marsaleix P., Auclair F., Julliand C., Vehil R., 2003. Observation and modelling of winter coastal oceanic circulation in the Gulf of Lion under wind conditions influenced by the continental orography (FETCH experiment). *J. Geophys. Res.* 108 (C3), 8059.
- Eyre B., 1998. Transport, retention and transformation of material in Australian estuaries. *Estuaries*, 21, 540-551.
- Eyrolle F., Charmasson S., 2001. Distribution of organic carbon, selected stable elements and artificial radionuclides among dissolved, colloidal and particulate phases in the Rhône River (France): Preliminary results. *Journal of Environmental Radioactivity*, 55, 145-155.
- Eyrolle F., Charmasson S., 2004. Importance of colloids in the transport within the dissolved phase (<450 nm) of artificial radionuclides from the Rhône River towards the Gulf of Lions (Mediterranean Sea). *Journal of Envir. Radioactivity*, 72, 273-286.
- Eyrolle F., Duffa C., Antonelli C., Rolland B., Leprieur F., 2006. Radiological consequences of the extreme flooding on the lower course of the Rhone valley (December 2003, South East France). *Science of the Total Environment*, 366, 427-438.
- Fain A.M.V., Ogston A.S., Sternberg R.W., 2007. Sediment transport event analysis on the western Adriatic continental shelf. *Continental Shelf Research*, 27, 431-451.
- Fernandez J.M., 1984. Utilisation de quelques elements métalliques pour la reconstitution des mécanismes sédimentaires en Méditerranée Occidentale : apports du traitement statistique. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Perpignan. 230 pp.
- Fieux M., 1974. Formation d'eau dense sur le plateau continental du Golfe du Lion. La formation des eaux océaniques profondes, Colloque Internationaux du C.N.R.S.
- Fox J.M., Hill P.S., Milligan T.G., Boldrin A., 2004. Flocculation and sedimentation on the Po River delta. *Marine Geology*, 203, 95-107.
- Fox J.M., Hill P.S., Milligan T.G., Ogston A.S., Boldrin A., 2004. Floc fraction in the waters of the Po River prodelta. *Continental Shelf Research*, 24, 1699-1715.
- François R.E., Garrison G.R., 1982. Sound absorption based upon ocean measurement, part ii. *Journal of Acoust. Soc. of Am.*, 72 (6), 1870-1890.
- Frignani M., Courp T., Cochran J. K., Hirschberg D., Vitoria i Codina L., 2002. Scavenging rates and particle characteristics in and near the Lacaze-Duthiers submarine canyon, northwest Mediterranean. *Continental Shelf Research*, Vol. 22, 15, 2175-2190.
- Frignani M., Langone L. Ravaioli M., Sorgente D., Alvisi F., Albertazzi S., 2005. Fine-sediment mass balance in the western Adriatic continental shelf over a century time scale. *Marine Geology*, 222-223, 113-133.
- Fuda J.L., Millot C., Hoog S., Gerber H.W., 2006. Analysis of ADCP data above a bottom observatory. *Annals of Geophysics*, 49, 2/3, 715-728.
- Fuhrmann M., Zhou H., Neiheisel J., Schoonen M.A.A., Dyer R., 1997. Sorption/desorption of radioactive contaminants by sediment from the Kara Sea. *The Science of the Total Environment*, 202, 5-24.
- Galloway W.E., 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. B. Ed., *Deltas*, Houston Geologic Soc., 87-98.
- Garcia-Orellana J., Pates J.M., Masqué P., Bruach J.M., Sanchez-Cabeza J.A., 2009. Distribution of artificial radionuclides in deep sediments of the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 407 (2), 887-898.

- Garnier-Laplace J., Fournier-Bidoz V., Baudin J.P., 1997. Etat des connaissances sur les échanges entre l'eau, les matières en suspension et les sédiments des principaux radionucléides rejetés en eau douce par les centrales nucléaires. *Radioprot.*, 32, 49-71.
- Gascó C., Antón M.P., Delfanti R., Gonzalez A.M., Meral J., Papucci C., 2002. Variation of the activity concentrations and fluxes of natural ( $^{210}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) and anthropogenic ( $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) radionuclides in the Strait of Gibraltar (Spain). *Journ of Envir. Radioact.* 62, 241-262.
- George D.A., Hill P.S., Milligan T.G., 2007. Flocculation heavy metals (Cu, Pb, Zn) and the sand-mud transition on the Adriatic continental shelf, Italy. *Continental Shelf Research*, 27, 475-488.
- Goldberg E.D., 1963. Geochronology with 210-lead radioactive dating. IAEA. Vienna.
- Got H., Aloisi J.C., Monaco A., 1972. Carte géologique du précontinent pyrénéo-languedocien au 1/125000ème. *Rév. Hydrogr. Int.*, 49, 2.
- Got H. et Monaco A., 1972. Carte sédimentologique au 1/100000<sup>ème</sup> d'Argelès sur mer. *Bur. Rech. Géol. Min.Ed.*
- Got H., Leenhardt O., Monaco A., Serra-Raventos J., Theilen F., 1979. Structures sédimentaires sur les marges du Golfe du Lion et de Catalogne. *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 21, 4 :281-293.
- Got H. et Aloisi J.C., 1990. The Holocene sedimentation on the Gulf of Lions margin : a quantitative approach. *Continental Shelf Research* 10 (9-11), 841-855.
- Guary J.C., Guéguéniat P. and Pentreath R.J., 1988. Radionuclides: a tool for oceanography. Elsevier Applied Science. 460 pp. ISBN 1 85166 298 7.
- Guéguéniat P., Baron Y., Auffret J.P., 1976 b. Note sur l'évolution de la radioactivité artificielle dans les sédiments de la Manche pendant les années 1971-1975. *Rapport CEA-R-4739*, 37 p. Saclay : Serv. Doc. Commiss. Energ. Atom.
- Guerra J.V., Ogston A.S., Sternberg R.W., 2006. Winter variability of physical processes and sediment-transport events on the Eel River shelf, northern California. *Continental Shelf Research*, 26, 2050-2072.
- Guillén J., Bourrin F., Palanques A., Durrieu de Madron X., Puig P., Buscail R., 2006. Sediment dynamics during 'wet' and 'dry' storm events on the Têt inner shelf (SW Gulf of Lions). *Mar. Geol.*, 234, (1-4), 452-474.
- Harris C.K. & Wiberg P.L., 2001. A two-dimensional, time dependent model of suspended sediment transport and bed reworking for continental shelves. *Computers and Geosciences*, 27, 675-690.
- Heussner S., Durrieu de Madron X., Calafat A., Canals M., Carbonne J., Delsaut N., Saragoni G., 2006. Spatial and temporal variability of downward particle fluxes on a continental slope: lessons from an 8-yr experiment in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Marine Geology*, 2034(1-4), 63-92.
- Hirleman E.D., 1987. Optimal scaling of the inverse Fraunhofer diffraction particle sizing problem: the linear system produced by quadrature. *Particle characterization*, 4, 128-133.
- IRS, 2000. Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône. Etude du transport solide, 1ère étape, rapport de synthèse. *Rapport techn.*, Institution interdépartementale des bassins Rhône-Saône, Valence, France.
- Ivanovich M. and Harmon R.S., 1992. Uranium series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences. second ed. Clarendon Press, Oxford.
- Jestin H., Bassoullet P., Le-Hir P., L'Havanc J., Degres Y., 1998. Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. In: *Proceedings of Ocean'98-IEEC/OES Conference*, Nice (France), pp. 189-194.
- Kershaw P.J. and Woodhead D.S., 1991. Radionuclides in the Study of Marine Processes. Elsevier Applied Science. 390 pp. ISBN 1 85166 707 5.
- Krishnawami S., Lal D., Martin J.M., Meybeck M., 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planet Sci. Let.*, 11, 407-414.
- Kruit C., 1955. Sediments of the Rhône delta. Grain size and microfauna. *Verhand. Konink. Neder. Geol. Minjnbouw.*, Dell XV BLZ., 359-501.
- Kuelh S.A., Nittrouer C.A., Allison M.A., Faria L.E.C., Dukat D.A., Jaeger J.M., Pacioni T.D., Figueiredo A.G., Underkoffler E.C., 1995. Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment. *Continental Shelf Research*, 16, 5/6, 787-815.
- Lacombe H., 1965. Cours d'océanographie physique. Gauthier-Villars.
- Lansard B., 2005. Distribution et remobilisation du plutonium dans les sédiments du prodelta du Rhône (Méditerranée Nord Occidentale). Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille II. 270 pp.



- Lansard B., Grenz C., Charmasson S., Schaaff E., Pinazo C., 2006. Potential plutonium remobilisation linked to marine sediment resuspension: first estimates based on flume experiments. *Journal of Sea Research*, 55, 74-85.
- Lansard B., Charmasson S., Gasco C., Anton M., Grenz C., Arnaud M., 2007. Spatial and temporal variations of plutonium isotopes ( $^{238}\text{Pu}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$ ) in sediments off the Rhone River mouth (NW Mediterranean). *Sci. of the Total Envir.*, 376 (1-3), 215-227.
- La Violette, P.E., 1995. Overview of the major forcings and water masses of the Western Mediterranean Sea. In *Seasonal and Interannual variability of the Western Mediterranean Sea*, pp. 1–13. American Geophysical Union.
- Law B.A., Hill P.S., Milligan T.G., Curran K.J., Wiberg P.L., Wheatcroft R.A., 2008. Size sorting of the fine-grained sediments during erosion: results from the western Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*, 28 (15), 1935-1946.
- Lee S.H., La Rosa J.J., Levy-Palomo I., Oregioni B., Pham M.K., Povinec P.P., Wyse E., 2003. Recent inputs and budget of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in the northwest Mediterranean Sea. *Deep Sea Research II*, 50, 2817-2834.
- Lefebvre D., 1980. Evolution morphologique et structurale du Golfe du Lion. Essai de traitement statistique des données. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle à l'Université de Paris. 163 pp.
- Lefèvre O., Bouisset P., Germain P., Barker E., Kerlau G., Cagnat X., 2003. Self-absorption correction factor applied to 129I measurement by direct gamma-X spectrometry for *Fucus serratus* samples. *Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A506*, 173-185.
- Ligeró R.A., Barrera M., Casas-Ruiz M., 2005. Levels of  $^{137}\text{Cs}$  in muddy sediments on the seabed in the Bay of Cadiz (Spain). Part II. Model of vertical migration of  $^{137}\text{Cs}$ . *Journ. of Envir. Radioact.*, 80, 87-103.
- Lu N., Mason C.F.V., 2001. Sorption-desorption behavior of strontium-85 onto montmorillonite and silica colloids.
- Mabit L., Benmansour M., Walling D.E., 2008. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1799-1807.
- Mace I., 1993. Etude des caractéristiques granulométriques et des teneurs en radioéléments artificiels du prodelta rhodanien. Mémoire de stage de DESS à l'Université de Toulon et du Var. 50 pp.
- Madsen A.T., Murray A.S., Anderson T.J., Pejrup M., Breuning-Madsen H., 2005. Optically stimulated Luminescence dating of young estuarine sediments: a comparison with  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating. *Marine Geology*, 214, 251-268.
- Maillet G., 2005. Relations sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta en milieu microtidal: exemple de l'embouchure du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille, 331 pp.
- Maillet G.M., Vella C., Berné S., Friend P.L., Amos C.L., Fleury T.J., Normand A., 2006. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France). *Marine Geology*, 234, 159-177.
- Maldonado A., 1975. Sedimentation stratigraphy and development of the Ebro Delta plain. *Deltas, models for exploration*. M.L. Broussard Ed., Houston Geol. Soc., Texas, 31-38.
- Mahler P., 1985. Comportement du  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  en milieux d'embouchure simulés; influence des particules minérales en suspension et des matières organiques dissoutes. IPSN/DERS-Rapport CEA-R-5319.
- Marsaleix P., Estournel C., Kondrachoff V., Vehil R., 1998. A numerical study of the formation of the Rhône River plume. *Journal of Marine Systems*, 14, 99-115.
- Martin J.M. & Thomas A.J., 1990. Origins, concentrations and distributions of artificial radionuclides discharged by the Rhône River to the Mediterranean Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*, 11, 105-139.
- Masake B., Augustinus P.G.E.F., 1998. Morphologic Changes of a Micro-Tidal, Low Wave Energy Beach Face During a Spring-Neap Tide Cycle, Rhône-Delta, France, *J. Coast. Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 632–645.
- Matiscoff G. & Robbins J.A., 1987. A model for biological mixing of sediments. *J. Geolo. Educ.*, 35, 144-149.
- Matsunaga T., Amano H., Ueno T., Yanase N., Kobayashi Y., 1995. The role of suspended particles in the discharge of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  within the Kuji River watershed, Japan. *Journ. Environ. Radioactivity*, 26, 3-17.

- Migniot C., 1977. Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. *La Houille Blanche*, 1, 32D-19, 47 pp.
- Mikkelsen O.A., Hill P.S., Milligan T.G., Chant R.J., 2005. In situ particle size distributions and volume concentrations from a LISST-100 laser particle sizer and a floc camera. *Continental Shelf Research*, 25, 1959-1978.
- Milligan T.G., Hill P.S., Law B.A., 2007. Flocculation and the loss of sediment from the Po River plume. *Continental Shelf Research*, 27, 309-321.
- Millot C., 1985. Evidence of several-day propagation wave. *J. Phys. Oceanogr.* 15(3), 258–272.
- Millot C., 1990. The Gulf of Lions' hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 10 (9-11):885-894.
- Millot C., 1991. Mesoscale and seasonal variabilities of the circulation in the western Mediterranean. *Dynam. Atmosf. Oceans*, 15, 179-214.
- Miralles J., 2004. Etude couplée des radionucléides et des isotopes stables du plomb en Méditerranée Occidentale. Thèse de doctorat à l'Université Paul Cézanne d'Aix-en-Provence. 146 pp.
- Miralles J., Radakovitch O., Cochran J.K., Véron A., Masqué P., 2004. Multitracer study of anthropogenic contamination records in the Camargue, Southern France. *The Science of the Total Environment*, 320, 63-72.
- Miralles J., Radakovitch O., Aloisi J.C., 2005. <sup>210</sup>Pb sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin. *Marine Geology*, 216, 155-167.
- Miralles J., Arnaud M., Radakovitch O., Marion C., Cagnat X., 2006. Radionuclide deposition in the Rhône River prodelta (NW Mediterranean Sea) in response to the December 2003 extreme flood. *Marine Geology*, 234, 179-189.
- Mizugaki S., Nakamura F., Araya T., 2006. Using dendrogeomorphology and <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb radiochronology to estimate recent changes in sedimentation rates in Kushiro Mire, Northern Japan, resulting from land use change and river channelization. *Catena*, 68, 25-40.
- Molero J., Sanchez-Cabeza J.A., Merino J., Pujol L.L., Mitchell P.I., Vidal-Quadras A., 1995. Vertical distribution of radiocaesium, plutonium and americium in the Catalan Sea (NW Mediterranean). *Journal of Environ. Radioactivity*, 26, 205-216.
- Monaco A., 1971. Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du plateau continental du Roussillon (Golfe du Lion). Thèse d'état, Univ. de Montpellier, 295 pp.
- Monaco A., Aloisi J.C., Got H., Mear Y., Bellaiche G., 1983. Sédimentogénèse en Méditerranée nord-occidentale. *Pétrole et Techniques*, 299, 36-44.
- Monaco A., Courp T., Heussner S., Carbonne J., Fowler S.W., Deniaux B., 1990. Seasonability and composition of particulate fluxes during ecomarge I, western Gulf of Lions. *Cont. Shelf Res.*, 10 (9-11): 959-987.
- Moore W.S., DeMaster D.J., Smoak J.M., McKee B.A., Swarzenski P.W., 1995. Radionuclide tracers of sediment-water interactions on the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, 16, 5/6, 645-665.
- Morse J.W., Morin J., 2004. Ammonium interaction with coastal marine sediments: influence of redox conditions on K\*. *Marine Chemistry*, 95, 107-112.
- Naudin J.J., Cauwet G., Leveau M., Lochet F., Pauc H., Romano J.C., Sempere R., 1992. Le néphéloïde benthique au large du Rhône. Transferts particuliers à l'interface continent-océan. *Oceanologica Acta*, Vol. 15 (6), 621-638.
- Naudin J.J. et Cauwet G., 1997. Transfer mechanisms and biogeochemical implications in the bottom nepheloid layer. A case study of the coastal zone off the Rhône river (France). *Deep Sea Res.* 44(3-4), 551–575.
- Naudin J.J., Cauwet G., Chrétiennot-Dinet M.J., Deniaux B., Devenon J.L., Pauc H., 1997. River discharge and wind influence upon particulate transfer at the land-ocean interaction : case study of the Rhône River plume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, 303-316.
- Nelson B.W., 1970. Hydrology, sediment dispersal and recent historical development of the Pô River delta. Deltaic sedimentation, modern and ancient. J.P. Morgan Ed. *Soc. Econ. Paleontolog. Mineralog. Spec. Publ. Tulsa*, 15, 152-184.
- NKE Electronics, 2006a. S-ALTUS Users Guide.
- NKE Electronics, 2006b. STBD Users Guide.
- NKE Electronics, 2006c. STPS Users Guide.
- NKE Electronics, 2006d. WinMemo Users Guide.
- Nittrouer C.A., De Master D.J., 1986. Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present and future research. *Cont. Shelf Research* 6, 5-30.

- Nittrouer C.A., Kuelh S.A., Sternberg R.W., Figueiredo Jr A.G., Faria L.E.C., 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Mar. Geology* 125, 177-192.
- Noël M.H., 1996. Le plutonium comme traceur du transfert et de l'accumulation des apports particuliers du Rhône en Méditerranée Nord Occidentale. Thèse de doctorat à l'Université de Paris XII. 270 pp.
- Orton G.J. and Reading H.G., 1993. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 10, 475-512.
- Palanques A., Durrieu de Madron X., Puig P., Fabres J., Guillén J., Calafat A., Canals M., Heussner S., Bonnín J., 2006. Suspended sediment fluxes and transport processes in the Gulf of Lions submarine canyons. The role of storms and dense water cascading. *Marine Geology*, 234(1-4), 43-61.
- Palanques A., Guillén J., Puig P., Durrieu de Madron X., 2008. Storm-driven shelf-to-canyon suspended sediment transport at the southwestern Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*, 28, 1947-1956.
- Palinkas C.M., Nittrouer C.A., Wheatcroft R.A., Langone L., 2005. The use of  $^7\text{Be}$  to identify event and seasonal sedimentation near the Po River delta, Adriatic Sea. *Mar. Geol.* 222-223, 95-112.
- Palinkas C.M., Nittrouer C.A., 2006. Cliniform sedimentation along the Apennine Shelf, Adriatic Sea. *Marine Geology*, 234, 245-260.
- Palinkas C.M., Nittrouer C.A., 2007. Modern sediment accumulation on the Po shelf, Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, 27, 489-505.
- Pardé M., 1925. Le régime du Rhône. Etude hydrologique. Thèse de doctorat à l'Université de Grenoble, 887 et 440 pp.
- Pauc H., 1970. Contribution à l'étude dynamique et sédimentologique des suspensions solides au large du Grand Rhône (Grau de Roustan). Thèse de doctorat à l'Université de Montpellier-Perpignan. 127 pp.
- Pauc H., 1997. Fluvio-marine interface in a microtidal mediterranean estuarine environment. The nepheloid layer supply problem. *Journ. Rech. Ocean.* 22(3), 83-90.
- Pauc H., 2005. Formation of the Aude, Orb and Herault prodeltas and their characterisation using physicochemical and sedimentological parameters. *Marine Geology* 222-223, 335-343.
- Pennington W., Cambrey R.S., Eakins J., Harkness J., 1976. Radionuclide dating of the recent sediments of Blelham Tarn. *Fresh water Bio.*, 6, 317-331.
- Petrenko A.A., 2003. Variability of circulation features in the Gulf of Lions NW Mediterranean Sea. *Oceanol. Acta* 26(5), 323-338.
- Pont D., 1997. Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure : données récentes (1994-1995). *Revue de Géographie de Lyon* 72(1), 23-43.
- Pont D., Simonnet J.P., Walter V., 2002. Medium-term changes in suspended delivery to the ocean : consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 1-18.
- Radakovitch O. (1995). Etude du transfert et du dépôt du matériel particulaire par le  $^{210}\text{Po}$  et le  $^{210}\text{Pb}$ . Application aux marges continentales du Golfe de Gascogne (NE Atlantique) et du Golfe du Lion (NW Méditerranée). Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan, 187 pp.
- Radakovitch O., Charmasson S., Arnaud M., Bouisset P., 1999.  $^{210}\text{Pb}$  and caesium accumulation in the Rhône delta sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48, 77-99.
- Radakovitch O., Cherry R.D., Heyraud M., Heussner S., 1999b:  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{210}\text{Po}$  : tracers of particle transfer on the Rhone continental margin (NW Mediterranean). *Deep-Sea Research I*, 46, 1539-1563.
- Radakovitch O., Sanchez-Cabeza J. A., Abassi A., Masqué P., Heussner S., 2003. Meso and small-scale variations of  $^{210}\text{Pb}$  fluxes on the Northwestern Mediterranean continental margins. *Continental Shelf Research*, Vol. 23, 7, 693-715.
- RD Instruments, 2006a. Self-contained 1200, 600, or 300 kHz ADCP.
- RD Instruments, 2006b. Self-contained ADCP Applications – WinSC and PlanADCP User's guide. Teledyne (May 2006).
- Renaud P., Pourcelot L., Métivier J.M., Morello M., 2003. Mapping of  $^{137}\text{Cs}$  deposition over eastern France 16 years after the Tchernobyl accident. *The Science of the Total Environment*, 309, 257-264.
- Robbins J.A. & Eddington D.N., 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 39, 285-304.
- Robbins J.A., 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. A biochemistry of lead in the Environment. Nriagu J.O. (Ed.), Elsevier Scientific, Amsterdam, Pays Bas, 285-293.
- Roditis J.C., 1993. Caractérisation de la charge solide en suspension et alluvionnement du Rhône dans le secteur Beaucaire-Arles. Crues et modalités du transport sédimentaire. Mémoire de DEA à l'Université d'Aix-Marseille. 120 pp.

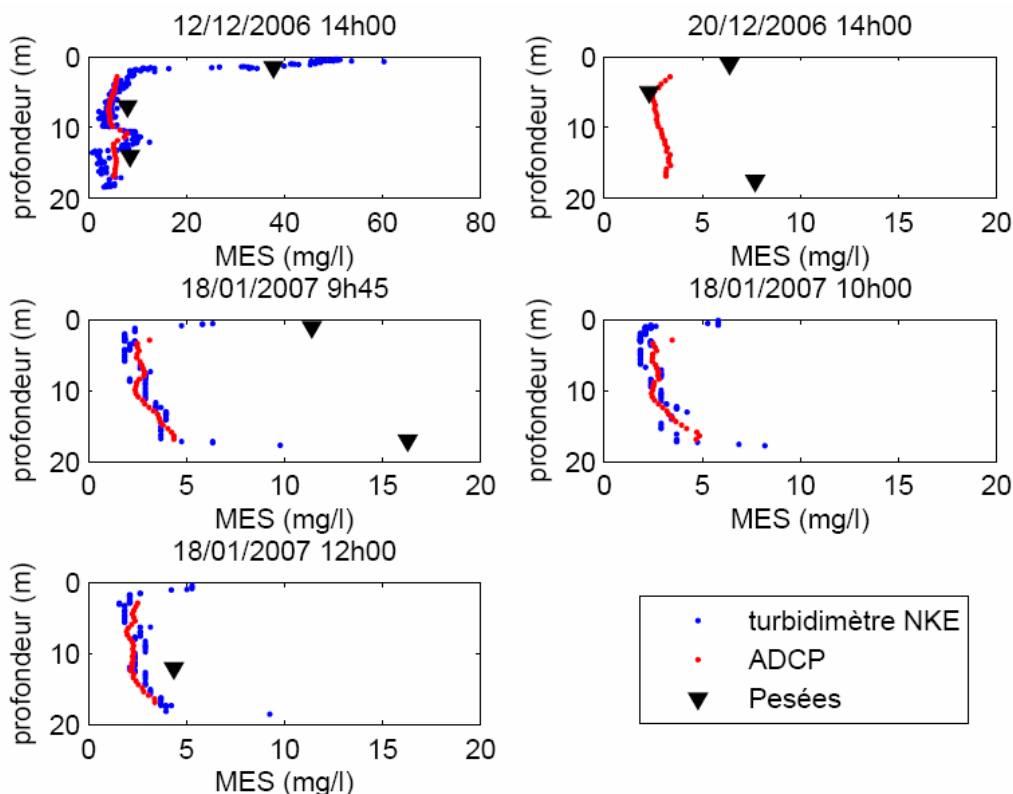
- Roditis J.C. et Pont D., 1993. Dynamiques fluviales et milieux de sédimentation du Rhône à l'amont immédiat de son delta. *Méditerranée* 3, 5–18.
- Rolland B., 2006. Transfert des radionucléides artificiels par voie fluviale : conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la Méditerranée. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 280 pp.
- Roussiez V., 2006. Les éléments métalliques : traceurs de la pression anthropique et du fonctionnement hydro-sédimentaire du Golfe du Lion. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan. 130 pp.
- Roussiez V., Ludwig W., Monaco A., Probst J.L., Bouloubassi I., Buscail R., Saragoni G., 2006. Sources and sinks of sediment-bound contaminants in the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea): a multi-tracer approach. *Marine Geology*, 26, 1843-1857.
- Rumynin V.G., Konosavsky P.K., Hoehn E., 2005. Experimental and modelling study of adsorption-desorption processes with application to a deep-well injection radioactive waste disposal site. *Journal Contaminant Hydrology*, 76, 19-46.
- Sagnol G., 1995. Etude de la dynamique sédimentaire du prodelta du Rhône, utilisant les radionucléides comme traceurs de ces processus. Mémoire de DEA Sciences de l'Environnement Marin à l'Université de Marseille. 60 pp.
- Salbu B., Lind O.C., Skipperud L., 2004. Radionuclide speciation and its relevance in environmental impact assessments. *Journ. of Envir. Radioact.*, 74, 233-242.
- Sanchez-Cabeza J.A., Ani-Rigolta I., Masque P., 2000. Some considerations of the  $^{210}\text{Pb}$  constant rate of supply (CRS) dating model. *Limnol. Oceanol.*, 45, 4, 990-995.
- Sanchez-Cabeza J.A., Ortega M., Merino J., Masqué P., 2002. Long-term box modelling of  $^{137}\text{Cs}$  in the Mediterranean Sea. *Journ. of Mar. Syst.*, 33-34, 457-472.
- Santschi P.H., Li Y.H., Adler D.M., Amdurer M., Bell J., Nyfeller U.P., 1983. The relative mobility of natural (Th, Pb, Po) and fallout (Pu, Cs, Am) radionuclides in the coastal marine environment results from model ecosystem (MERL) and Narragansett Bay studies. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 201-210.
- Santschi P.H., Lenhart J.J., Honeyman B.D., 1997. Heterogeneous processes affecting trace contaminant distribution in estuaries: the role of natural organic matter. *Marine Chemistry*, 58, 99-125.
- Schaaff E., Grenz C., Pinazo C., 2002. Erosion of particulate inorganic and organic matter in the Gulf of Lions. *Comptes Rendus Geosciences* 334 (15), 1071-1077.
- Schaaff E., 2003. Dynamique de la matière particulaire à l'interface eau-sédiment en zone côtière : approches expérimentales et modélisation. Thèse de doctorat.
- Schaaff E., Grenz C., Pinazo C., Lansard B., 2006. Field laboratory measurements of sediment erodibility: a comparison. *Journal of Sea Research*, 55, 30-42.
- Schlosser P., Smethie Jr W.M., Toggweiler J.R., 1998. Introduction to special section: Maurice Ewing Symposium on Applications of Trace Substance Measurements to Oceanographic Problems, *J. Geophys. Res.*, 103 (C8), 15,815.
- Smith J.T. et Comans N.J., 1996. Modelling the diffusive transport and remobilisation of  $^{137}\text{Cs}$  in sediments: the effects of sorption kinetics and reversibility. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 6, 995-1004.
- Solovitch-Vella N., Garnier J.M., 2006. Comparative kinetic desorption of  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  and  $^{134}\text{Cs}$  from a contaminated natural silica sand column: influence of varying physicochemical conditions and dissolved organic matter. *Environmental Pollution*, 141, 98-106.
- Sommerfield C.K., Nittrouer C.A., 1999. Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel shelf: a flood-dominated depositional environment. *Mar. Geol.*, 154, 227-241.
- Soulsby R.L., Hamm L., Klopman G., Myrhaug D., Simons R.R., Thomas G.P., 1993. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21, 41-69.
- Soulsby R.L., 1997. Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publications, London.
- Stanley D.J. et Maldonado A., 1977. Nile cone: Late Quaternary stratigraphy and sediment dispersal. *Nature*, 266, 129-135.
- Sternberg R.W., Cacchione D.A., Paulson B., Kineke G.C., Drake D.E., 1996. Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta. *Cont. Shelf Research* 16, 697-715.
- Suanez S., 1997. Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du delta du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 285 pp.
- Swart D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory Publication, 131.
- Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Corregiari A., Nelson B.W., 2005. Distributary channels and their impact on sediment dispersal. *Mar. Geol.*, 222-223, 75-94.

- Tessier C., 2006. Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud. Thèse de doctorat à l'Université de Bordeaux 1. 385 p.
- Thill A., 1999. Agrégation des particules : structure, dynamique et simulation. Application au cas d'un écoulement stratifié : l'estuaire du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 405 pp.
- Thill A., Moustier S., Garnier J.M., Estournel C., Naudin J.J., Bottero J.Y., 2001. Evolution of particle size and concentration in the Rhône river mixing zone : influence of salt flocculation. *Continental Shelf Research*, 21, 2127–2140.
- Thomas A.J., 1997. Input of artificial radionuclides to the Gulf of Lions and tracing the Rhône influence in marine surficial sediments. *Deep Sea Research II* 44, 577-595.
- Thomsen L.A., McCave I.N., 2000. Aggregation processes in the benthic boundary layer at the Celtic Sea continental margin. *Deep Sea Research I*, 47, 1389-1404.
- Tolman H. L., 2002a. Alleviating the Garden Sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, 4, 3-4, 269-289.
- Tolman H.L., 2002b. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing*, 28, 1, 35-52.
- Topcuoğlu S., Güngör N., Kirbaşoğlu Ç., 2002. Distribution coefficients (K<sub>d</sub>) and desorption rates of <sup>137</sup>Cs and <sup>241</sup>Am in Black Sea sediments. *Chemos.*, 49, 1367-1373.
- Ulses C., 2005. Dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion: crue, tempête et période hivernale. Thèse de doctorat à l'Université de Toulouse III. 249 pp.
- Ulses C., Estournel C., Durrieu de Madron X., Palanques A., 2008. Suspended sediment transport in the Gulf of Lions (NW Mediterranean): impact of extreme storms and floods. *Continental Shelf Research*, 28 (15), 1895-1910.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation), 1982. Ionizing radiation: sources and biological effects. 1982 report to the general assembly, United Nations Publication, sales N°E.82.IX.8 Vienne, 773 pp.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation), 1988. Sources, effects and risks of ionising radiation. 1988 report to the general assembly, United Nations Publication, sales N°E.88.IX.7 Vienne, 647 pp.
- Vanney J.R. et Genesseeux M., 1979. Propositions relatives à la toponymie marine de la Méditerranée Occidentale. *Ann. Inst. Oceanogr.*, Paris, 55, 2:185-194.
- Verney R., 2006. Processus de contrôle de la dynamique des sédiments cohésifs: mesures in-situ, mesures expérimentales et modélisation, application à l'estuaire de Seine. Thèse de doctorat de l'Université de Rouen. 323 pp.
- Verney R., Deloffre J., Brun-Cotta J.C., Lafite R., 2007. The effect of wave-induced turbulences on intertidal mudflats : impacts of boat traffic and wind. *Cont. Shelf Res.* 27, 594-612.
- Vernier E., 1972. Recherches sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Fos. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle d'Océanographie à l'Université d'Aix-Marseille, 68 pp.
- Voulgaris G., Meyers S.T., 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24, 1659-1683.
- Warneke T., Croudace I.W., Warwick P.E., Taylor R.N., 2002. A new ground level fallout record of uranium and plutonium isotopes for northern temperate latitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 1047-1057.
- Wei C.L. et Murray J.W., 1992. Temporal variations of <sup>234</sup>Th activity in the water column of Dabob Bay : particle scavenging. *Limnol. and Oceanogr.*, 37, (2), 296-314.
- Wheatcroft R.A., Drake D.E., 2003. Post-depositionnal alteration and preservation of sedimentary event layers on continental margins, I. The role of episodic sedimentation. *Mar. Geol.*, 199, 123-137.
- Yeager K.M., Santschi P.H., Rowe G.T., 2004. Sediment accumulation and radionuclide inventories (<sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu, <sup>210</sup>Pb and <sup>234</sup>Th) in the northern Gulf of Mexico, as influenced by organic matter and macrofaunal density. *Marine Chemistry* 91, 1-14.
- Zuo Z., Eisma D., Berger W., 1991. Determination of sediment accumulation and mixing rates in the Gulf of Lions, Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta*, 14 (3): 253-262.

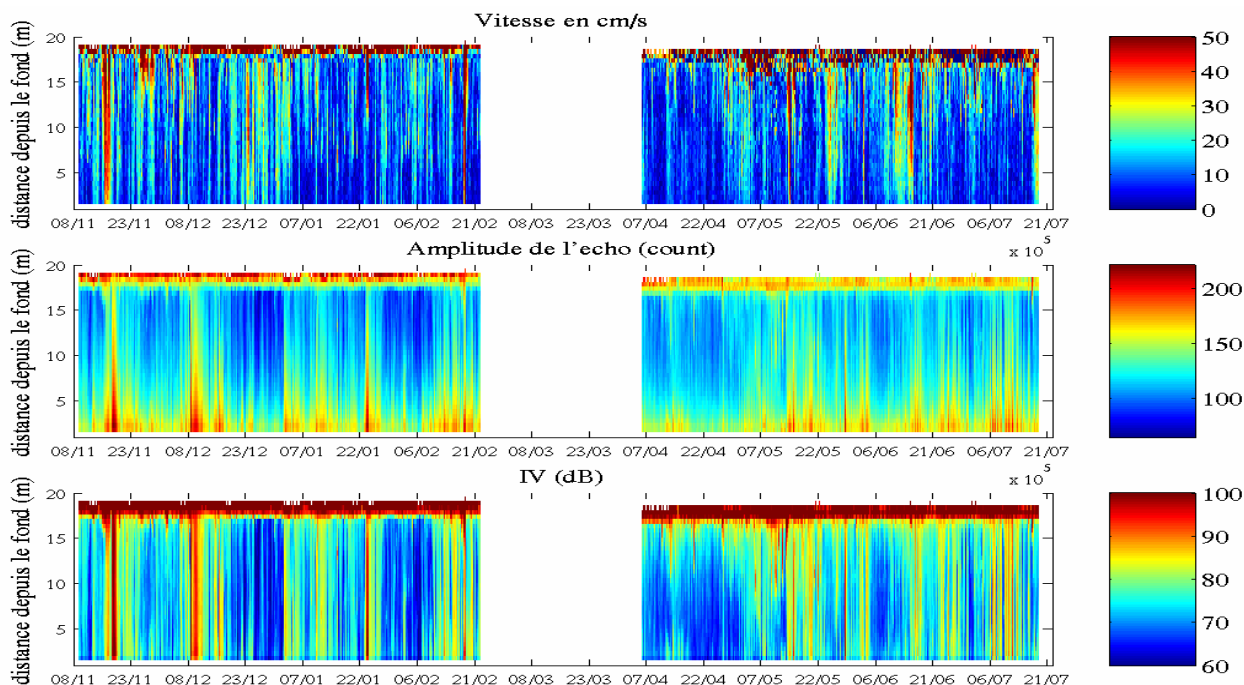


# ANNEXES

# ANNEXE A : Projet CARMA

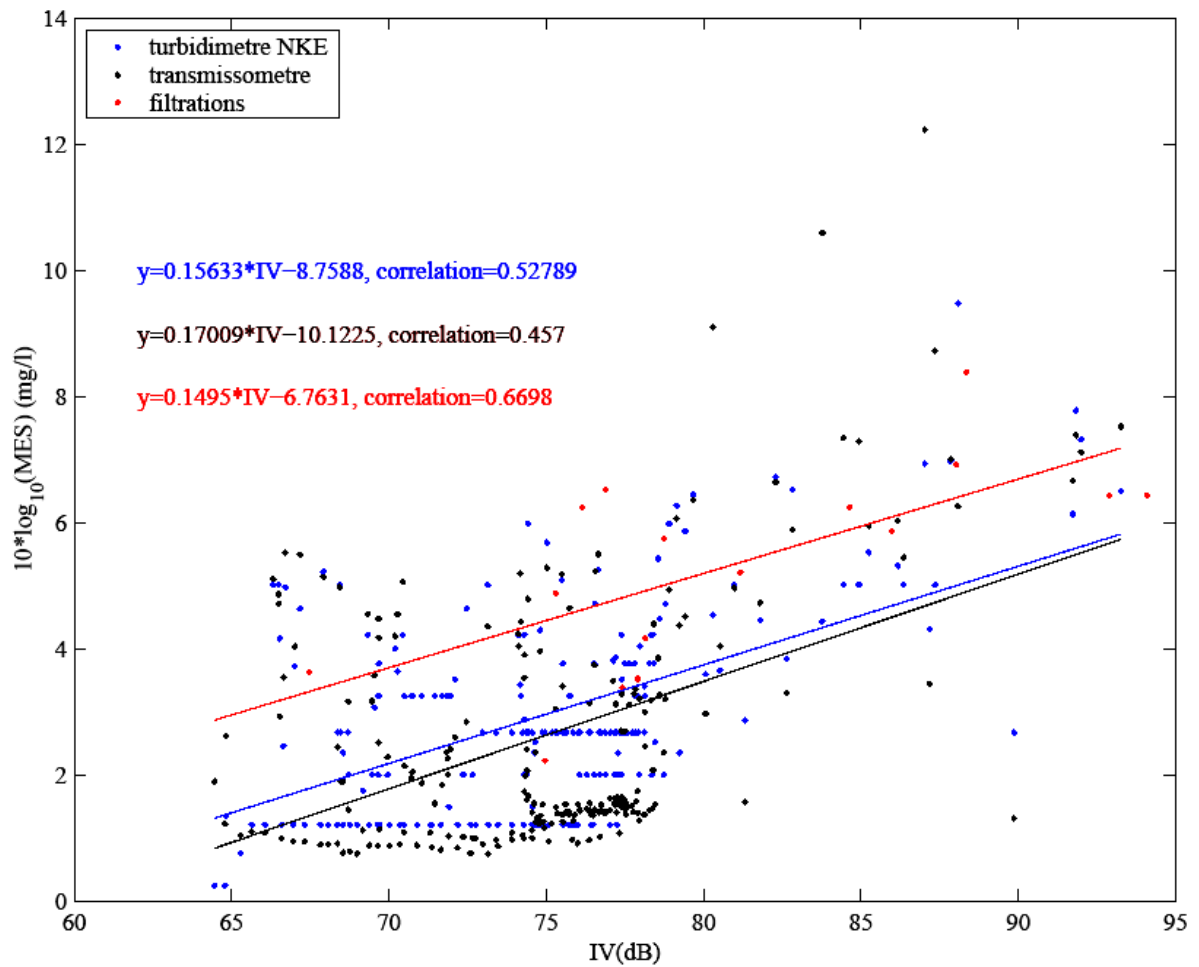


**Annexe A1 : Signal de turbidité mesuré par le turbidimètre NKE, calculé à partir du signal rétrodiffusé de l'ADCP et pesées de matière en suspension pour des profils réalisés au dessus de l'ADCP durant trois journées.**

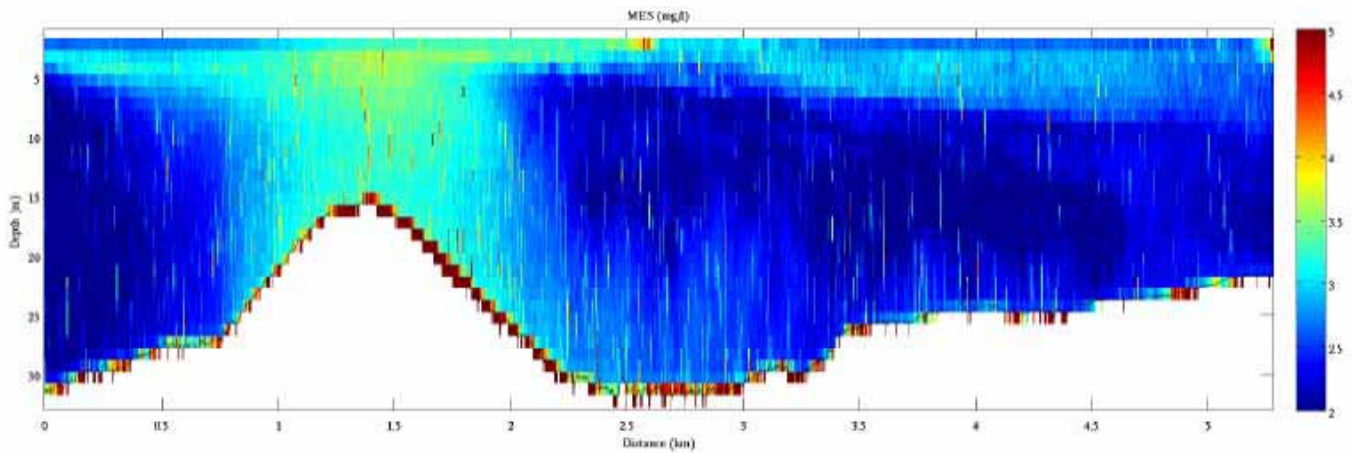


**Annexe A2 : Données de l'ADCP immergé durant le projet CARMA en fonction du temps sur toute la colonne d'eau: vitesse du courant en  $\text{cm.s}^{-1}$ , signal électrique de l'amplitude de l'écho en counts et indice de rétrodiffusion en décibels.**



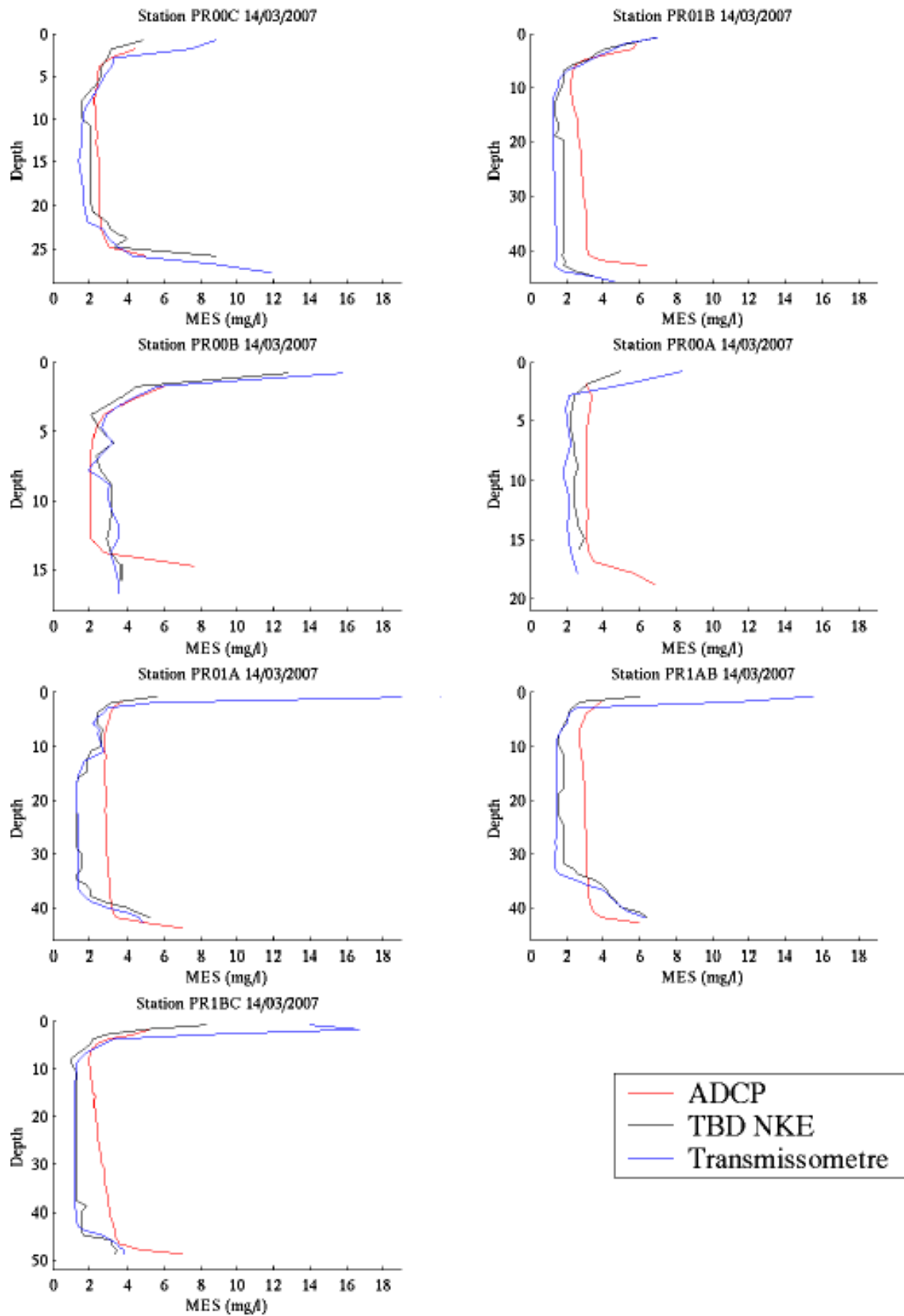


**Annexe A3 : Calibration de l'indice IV de l'ADCP en fonction des pesées, et des profils calibrés des deux turbidimètres.**

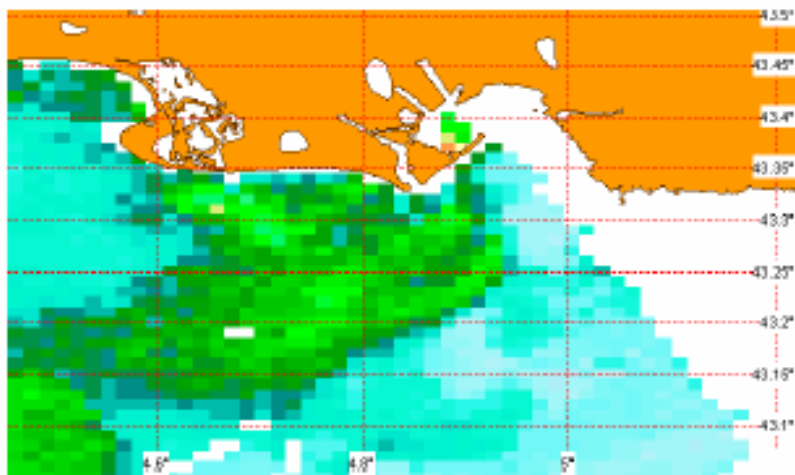


**Annexe A4 : Turbidité en mg/L mesurée par l'ADCP en bottom tracking à l'embouchure du Rhône (tranché rouge sur la Figure 4.4).**

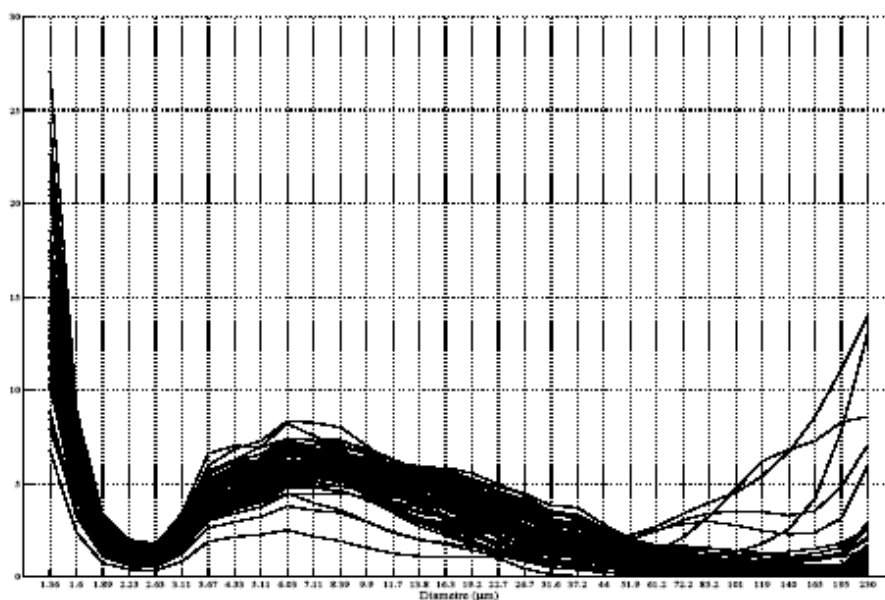
Seules les données de backscatter de l'ADCP tracté ont pu être utilisées car l'un des transducteurs a connu un problème et les vitesses de courant mesurées n'étaient pas cohérentes.



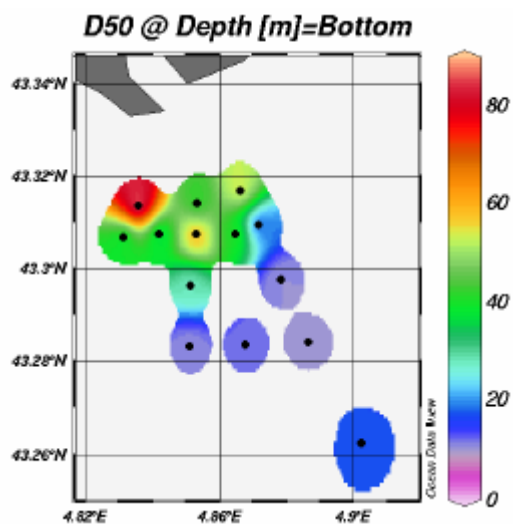
Annexe A5 : Comparaison de la sonde turbidité, du transmissomètre et du backscatter de l'ADCP calibré.



**Annexe A6 : Concentration en chlorophylle observée par le satellite MODIS à l'embouchure du Rhône le 12 mars 2007 à 0h (Dufois, 2008).**



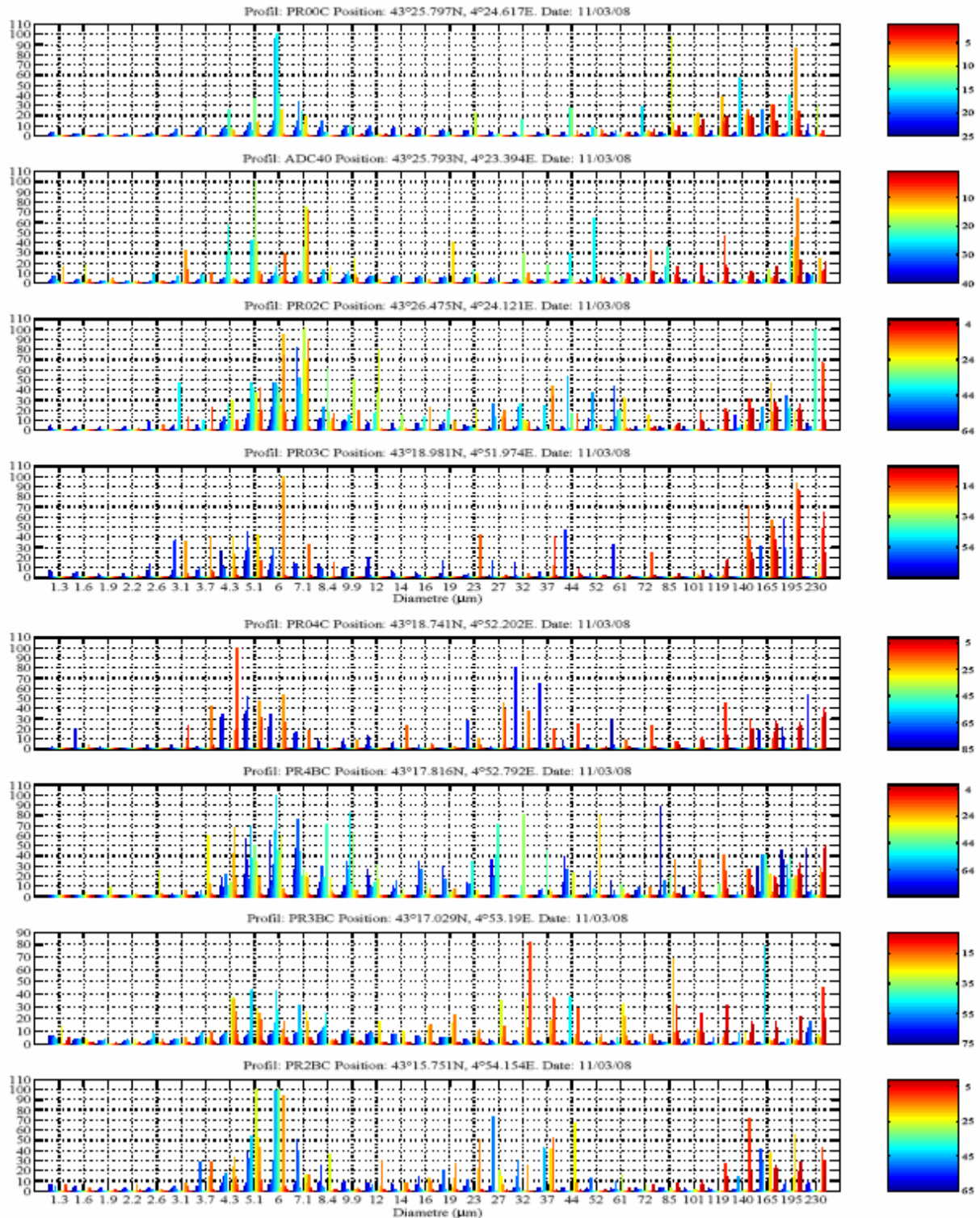
**Annexe A7 : Distribution volumique de taille de particules (%) pour toutes les filtrations réalisées pendant la campagne CARMEX.**



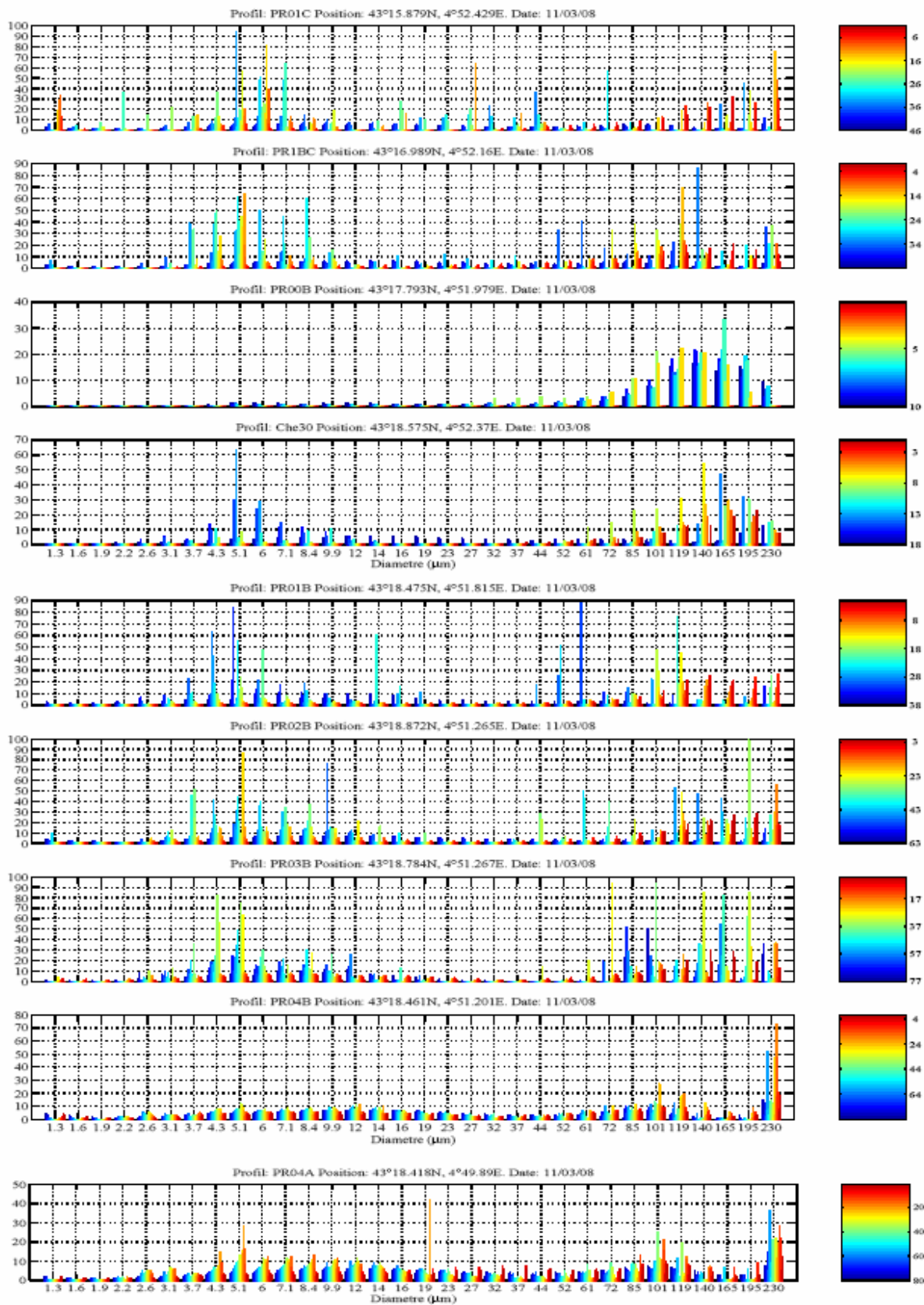
**Annexe A8 : Diamètre médian des grains (µm) moyennés sur 3 m près du fond.**

# ANNEXE B : Campagne EXTREMA1

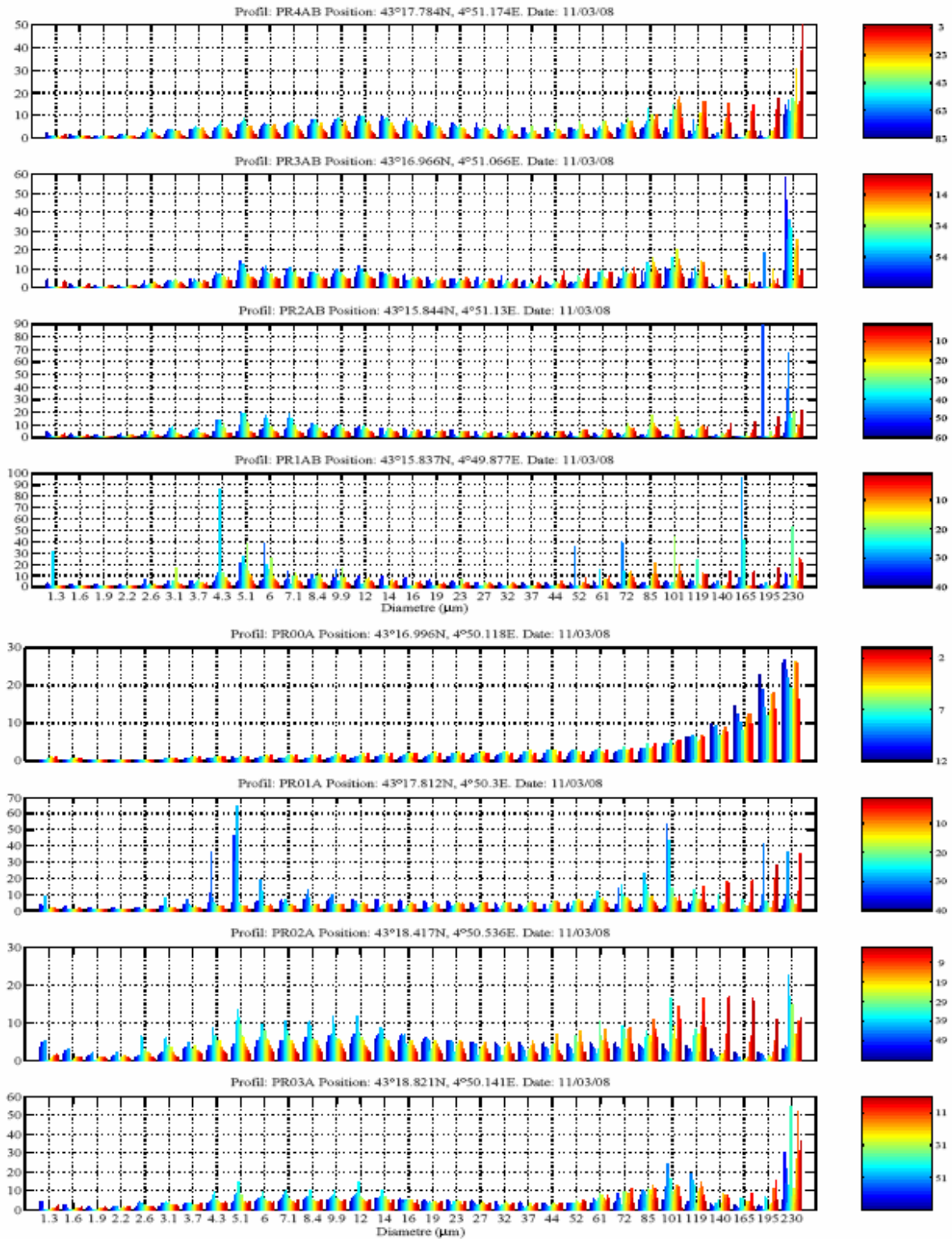
## EXTREMA1 leg1



Annexe B1 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 1).

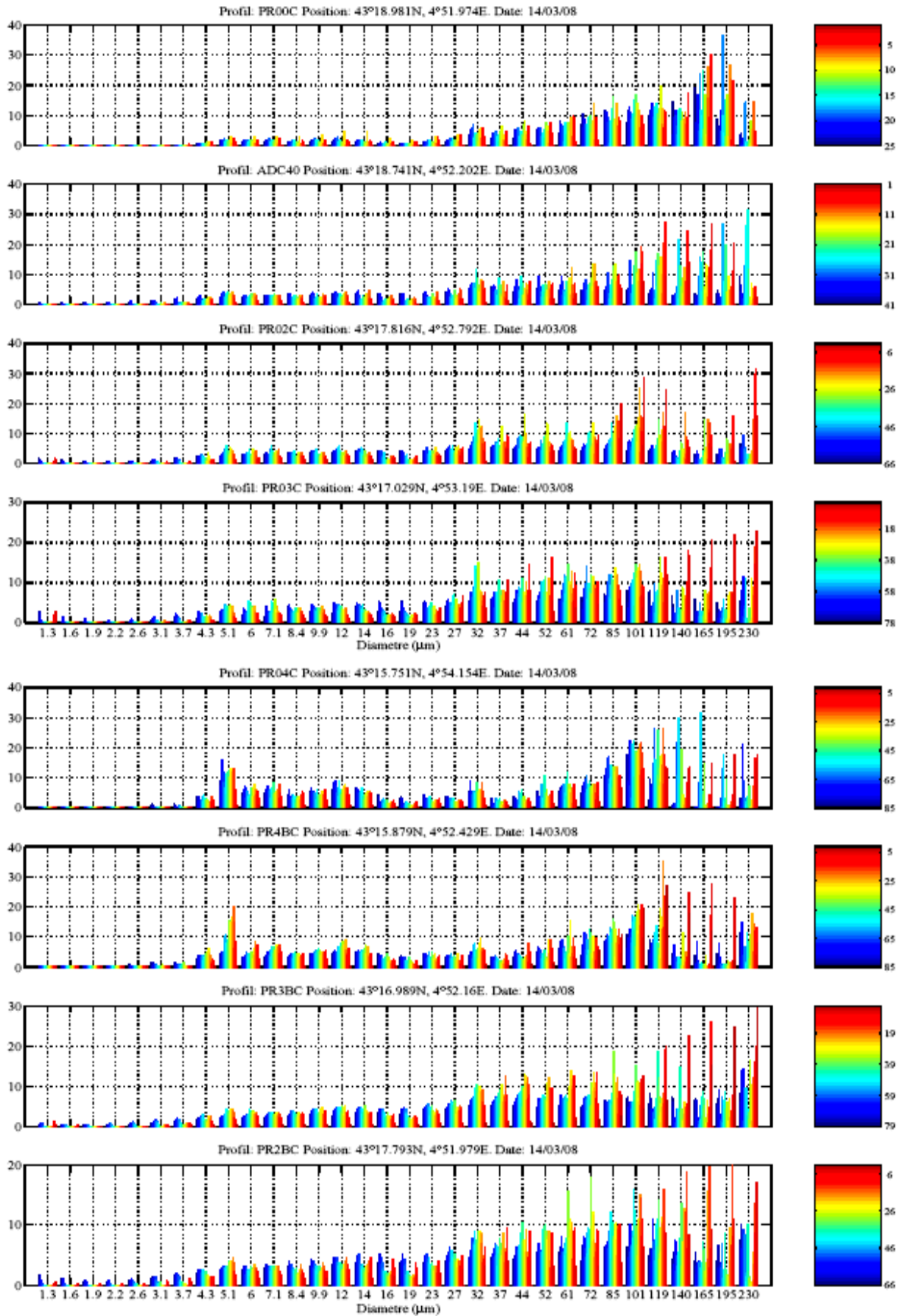


**Annexe B2 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 1).**

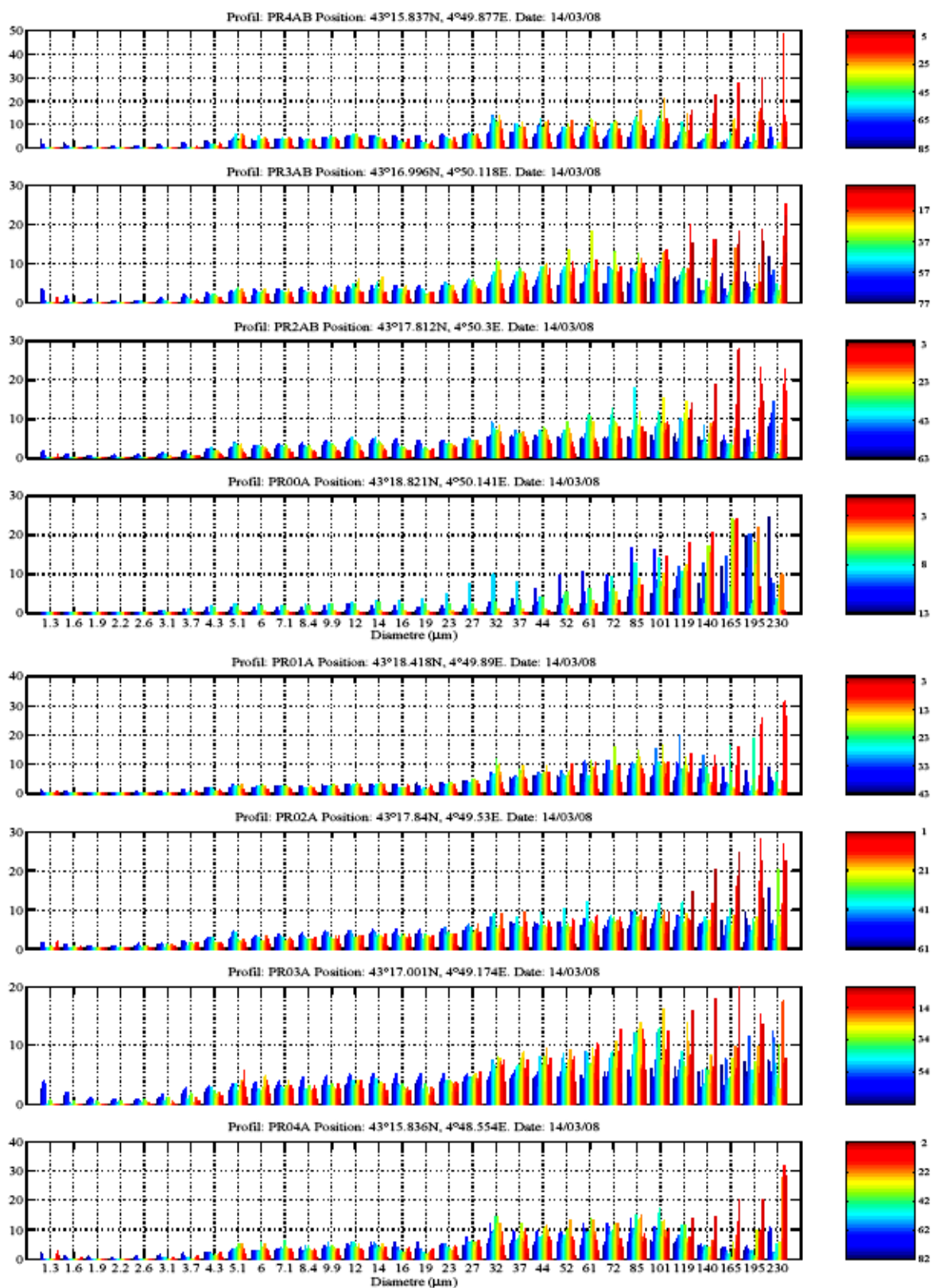


**Annexe B3 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 1).**

# EXTREMA1 leg2

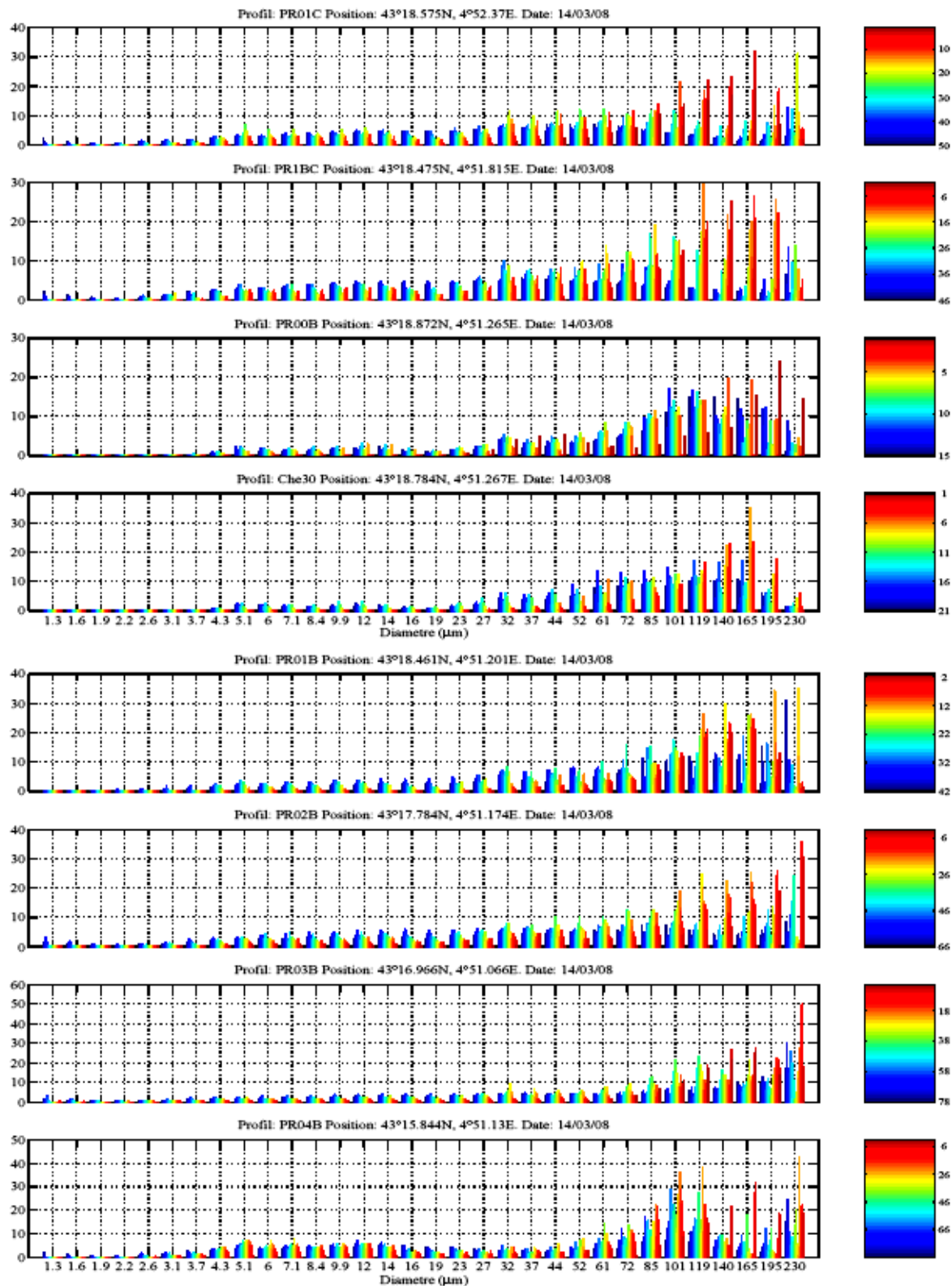


**Annexe B4 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 2).**

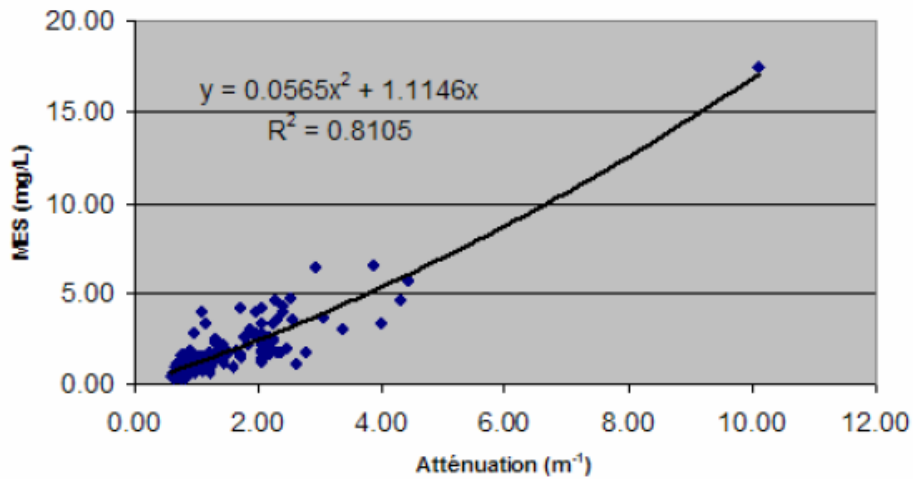


**Annexe B5 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 2).**

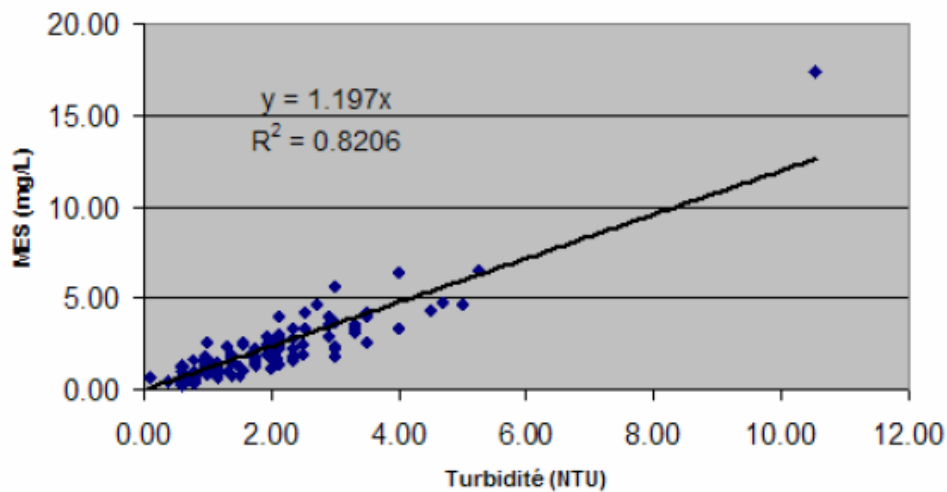




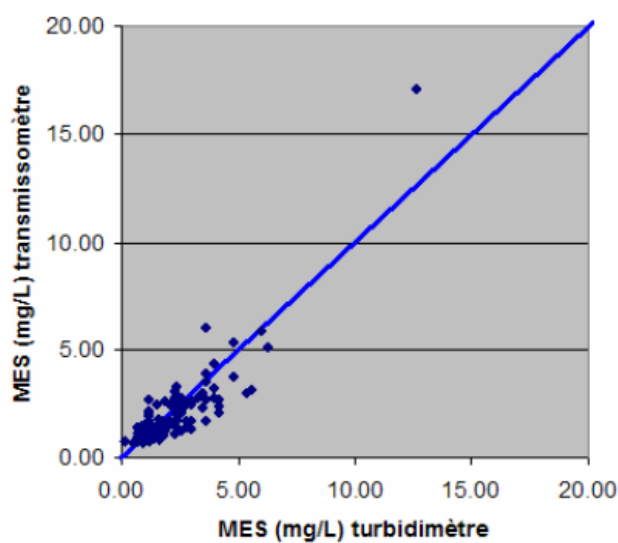
**Annexe B6 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 1 leg 2).**



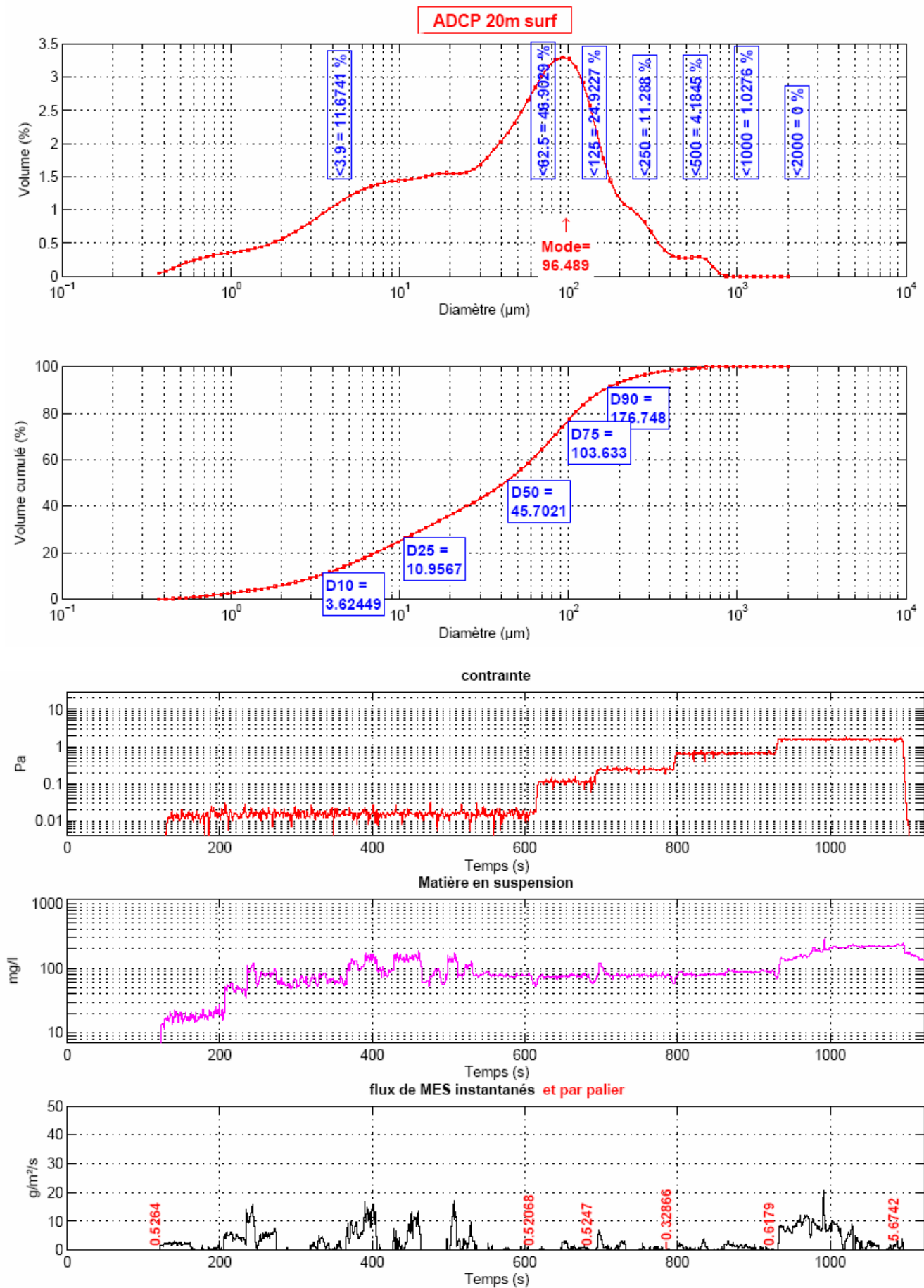
**Annexe B7 : Calibration empirique en concentration massique du transmissomètre à partir de pesées de MES.**



**Annexe B8 : Calibration empirique en concentration massique de la sonde de turbidité optique de la sonde STBD de NKE à partir de pesées de MES.**

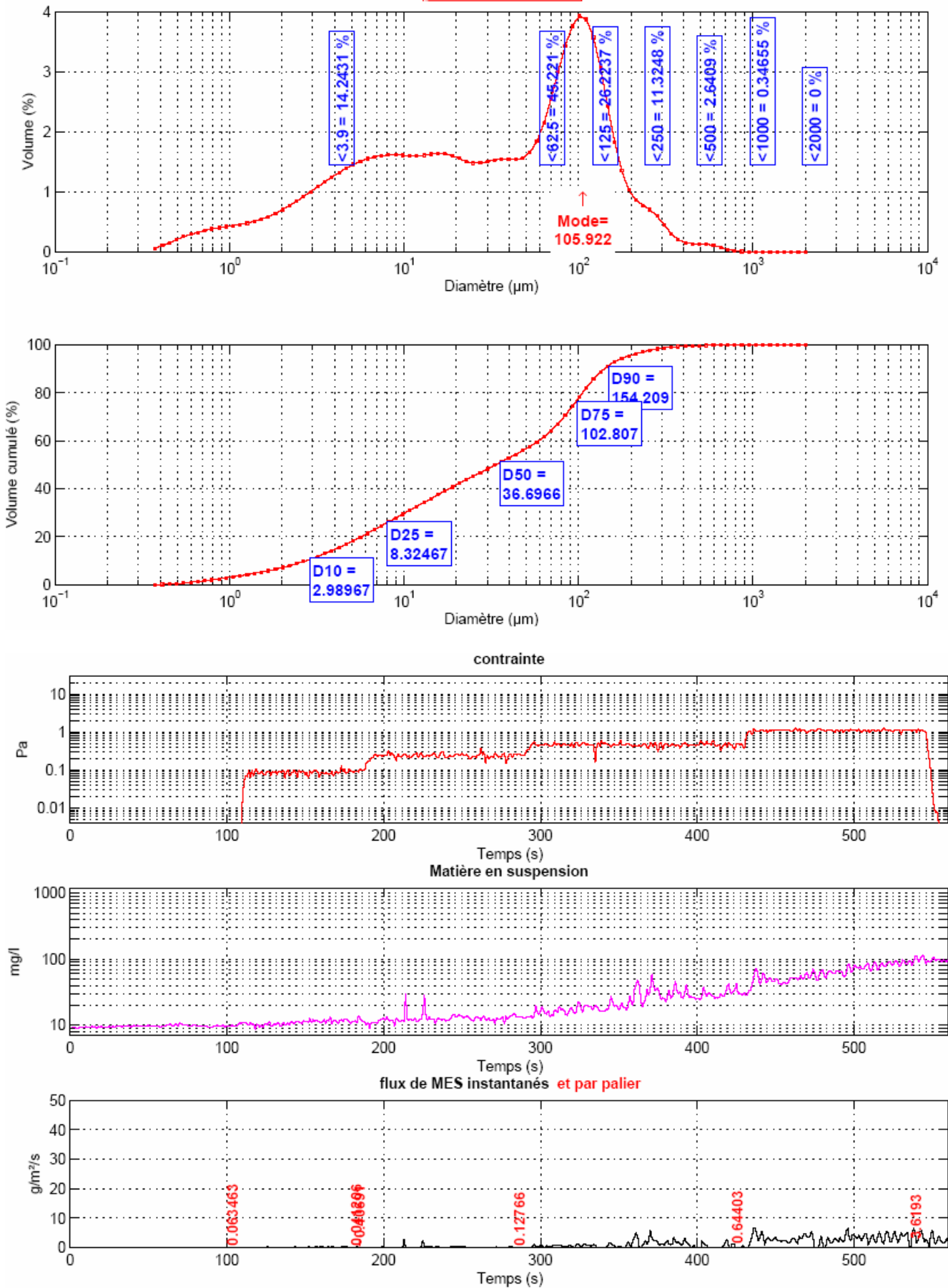


**Annexe B9 : Comparaison des MES calculées par le turbidimètre et le transmissomètre pour les prélèvements effectués.**



**Annexe B10 : Granulométrie du prélèvement superficiel de sédiment de la station ADCP20 ayant servi à l'expérience de l'érodimètre et paramètres temporels mesurés durant l'expérience.**

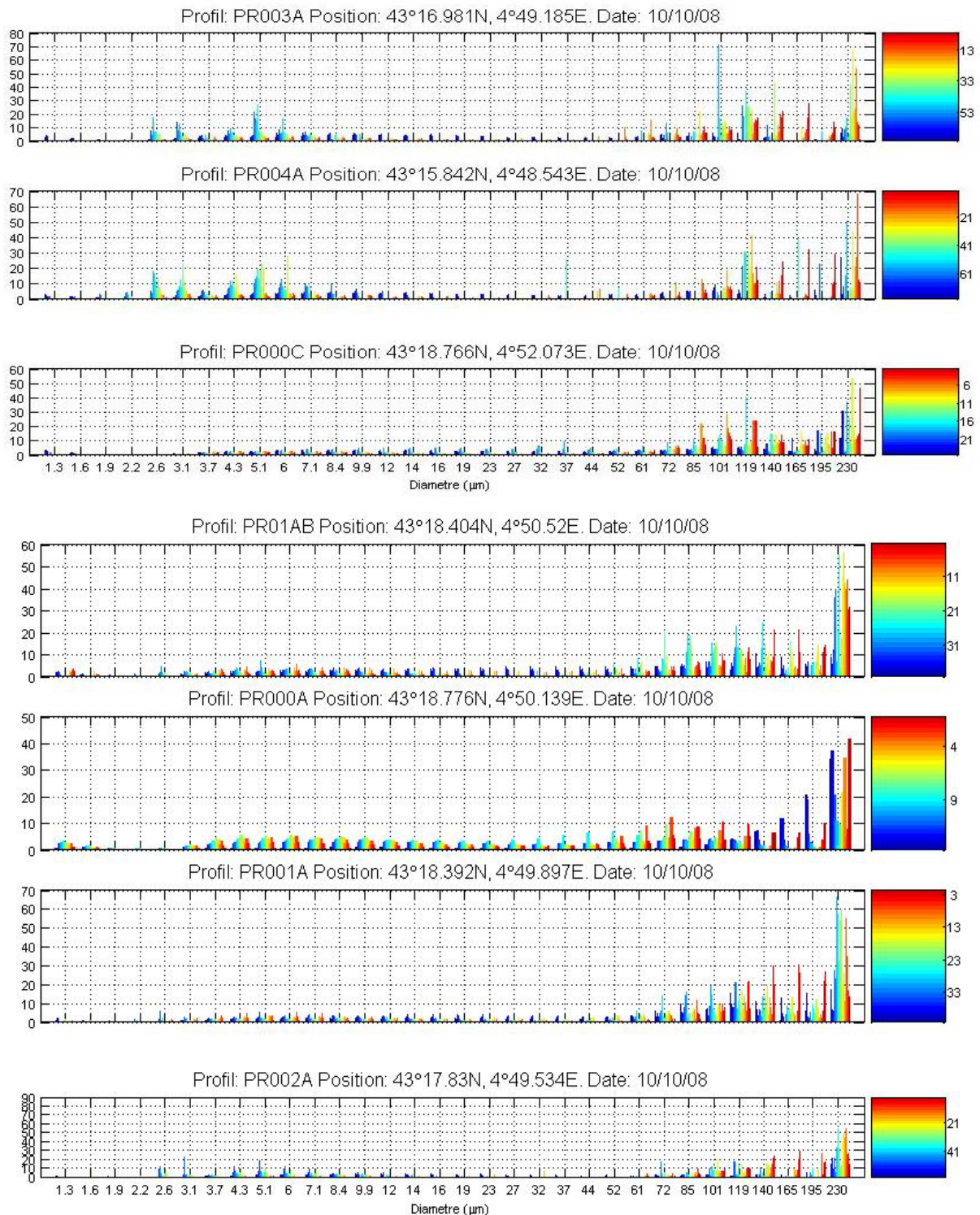
ADCP 20m surf-4



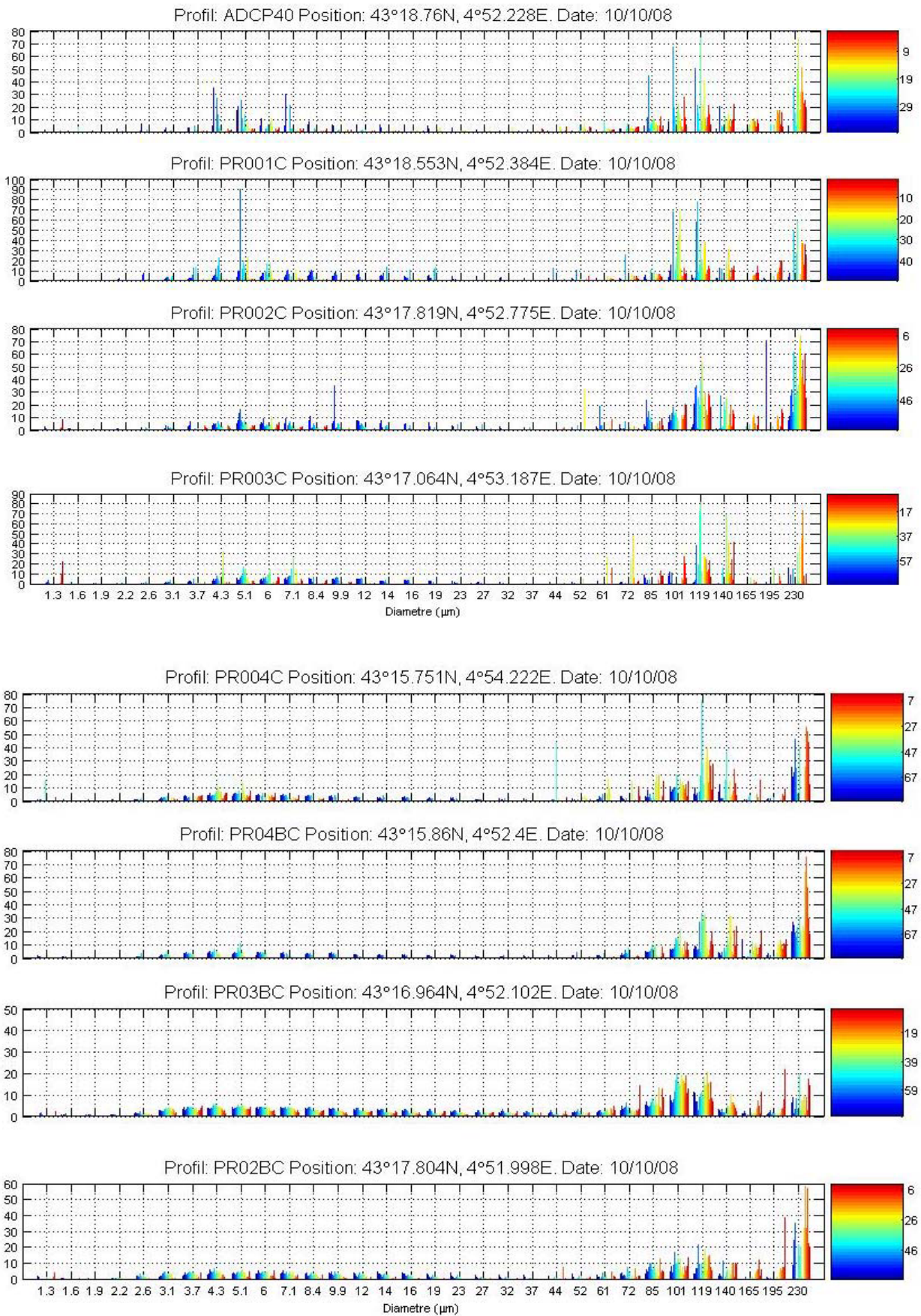
Annexe B11 : Granulométrie du prélèvement de sédiment à la profondeur s-4 de la station ADCP20 ayant servi à l'expérience de l'érodimètre et paramètres temporels mesurés durant l'expérience.

# ANNEXE C : Campagne EXTREMA2

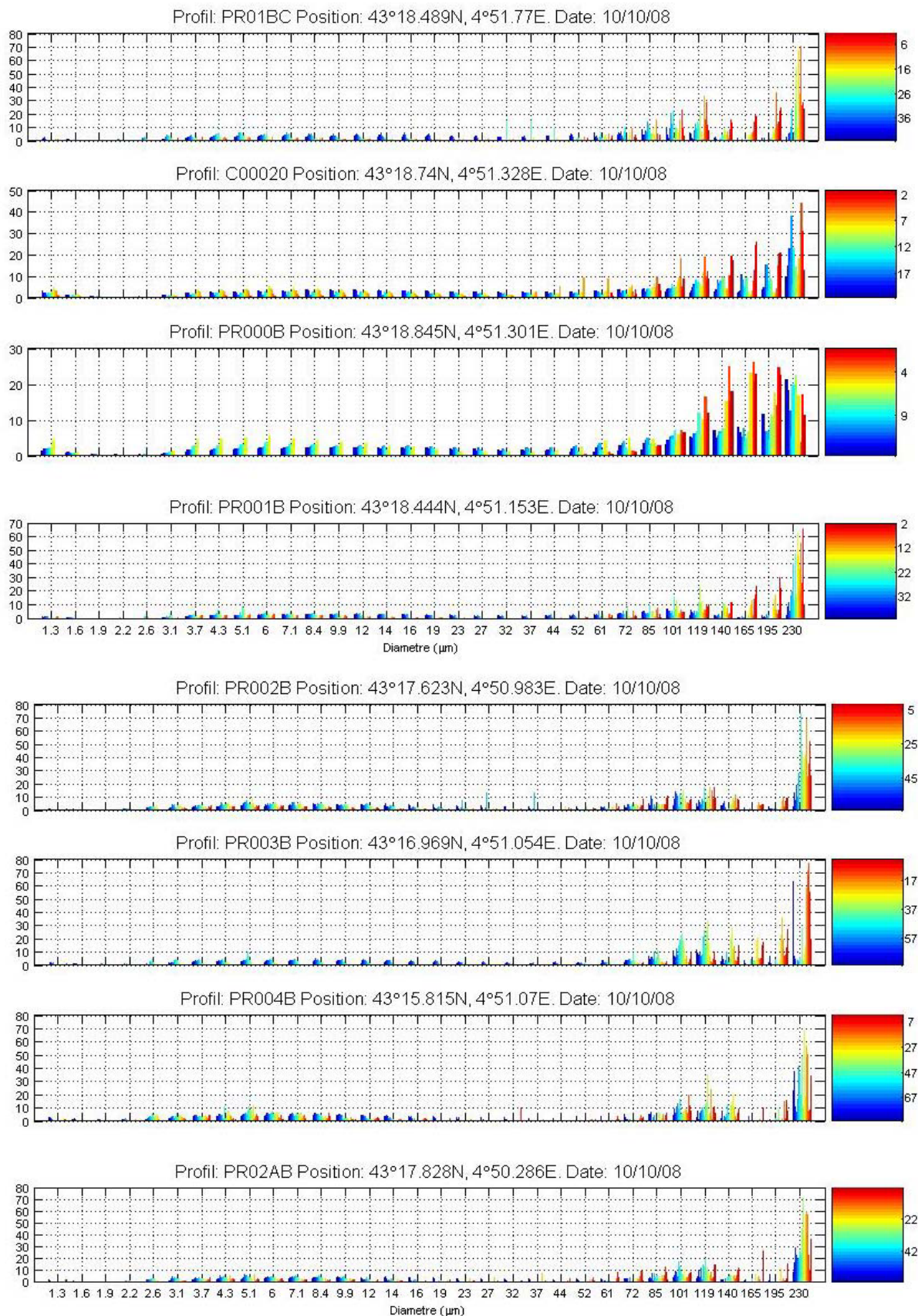
## EXTREMA2 leg1



**Annexe C1 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 1).**

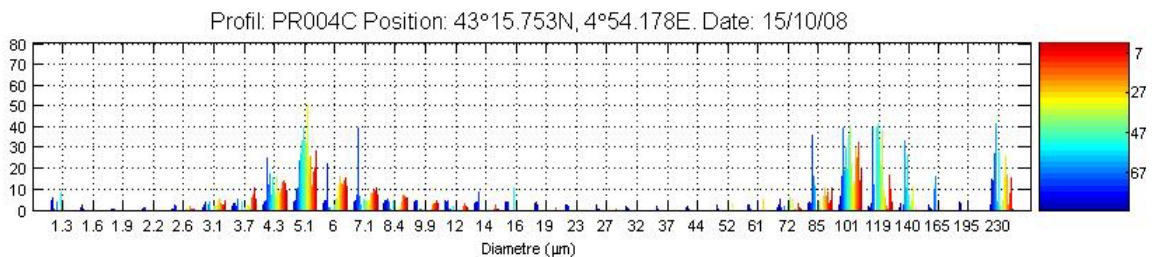
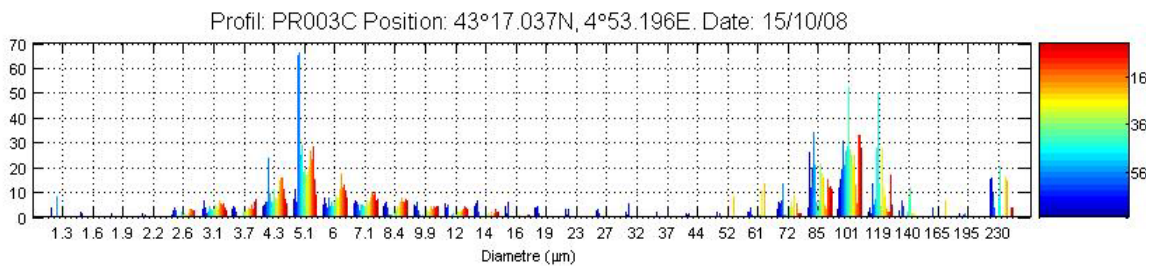
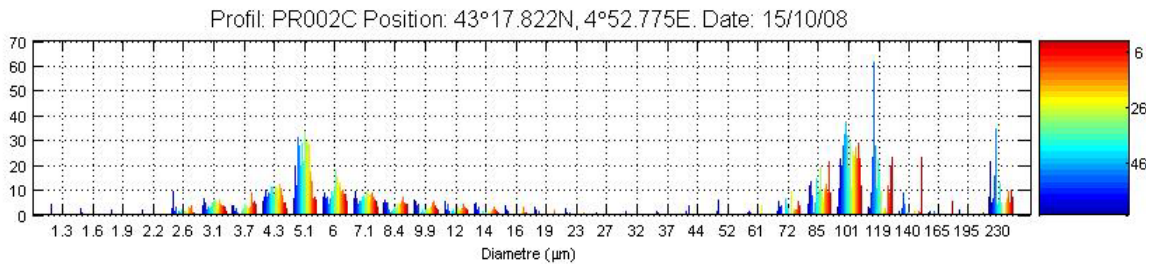
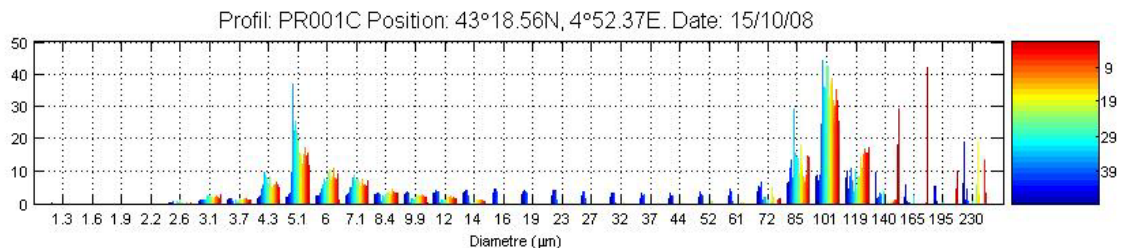
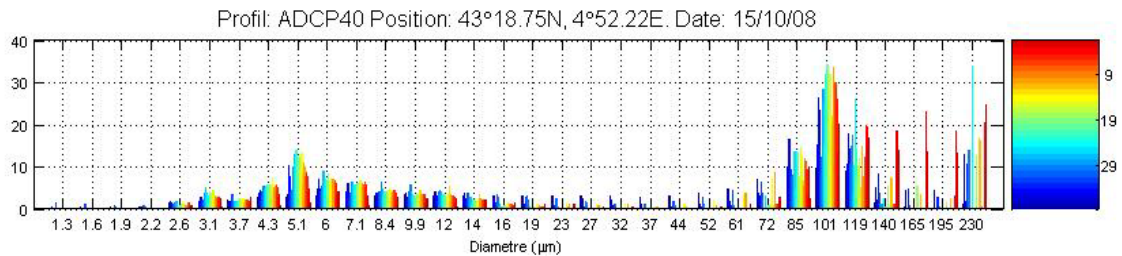
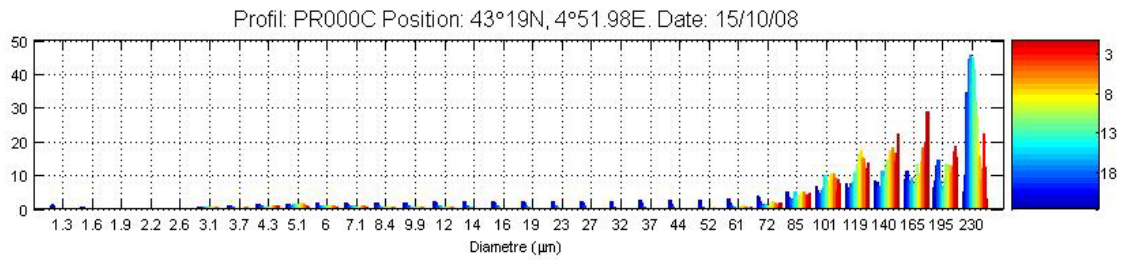


**Annexe C2 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 1).**



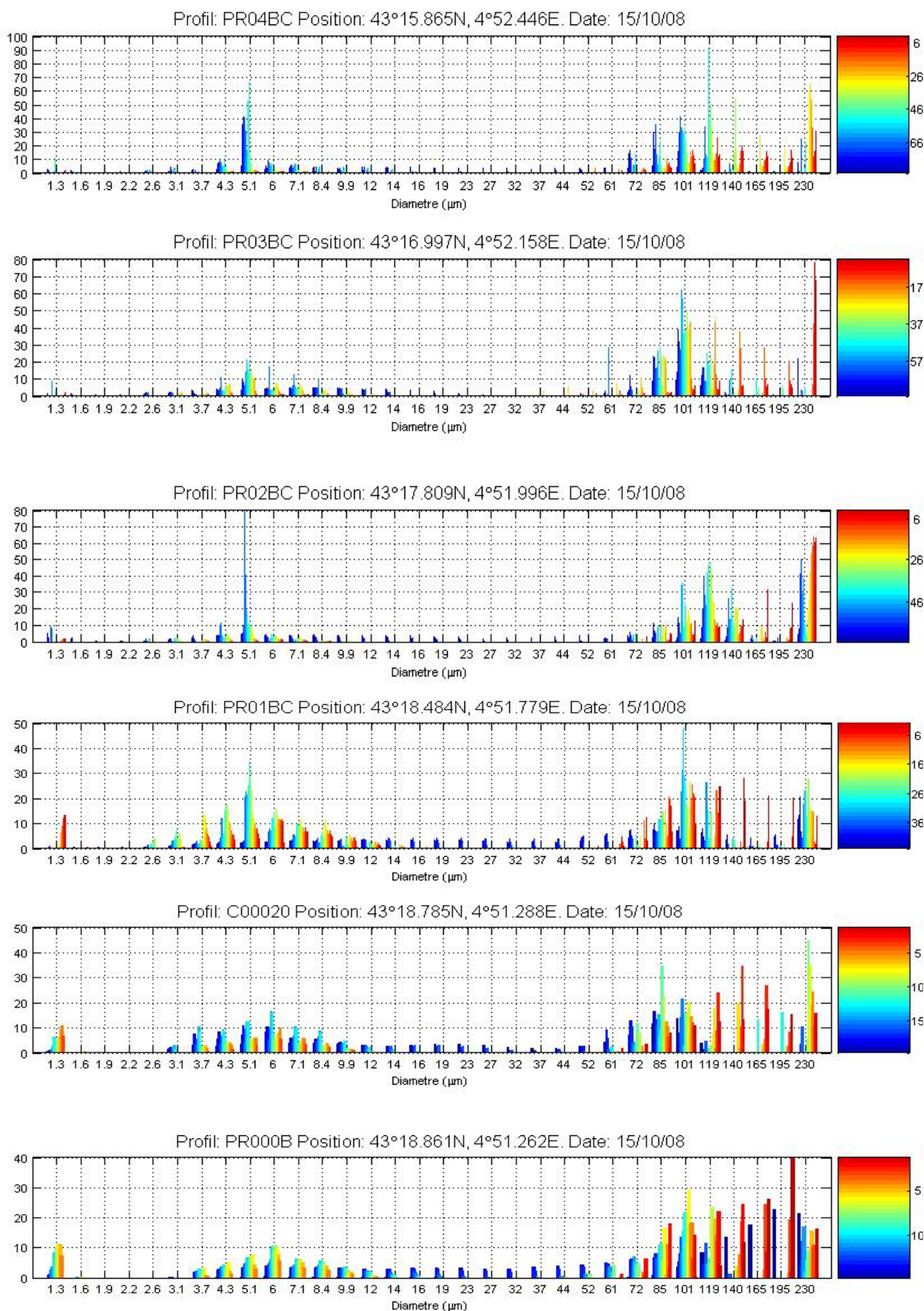
**Annexe C3 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 1).**

## EXTREMA2 leg2

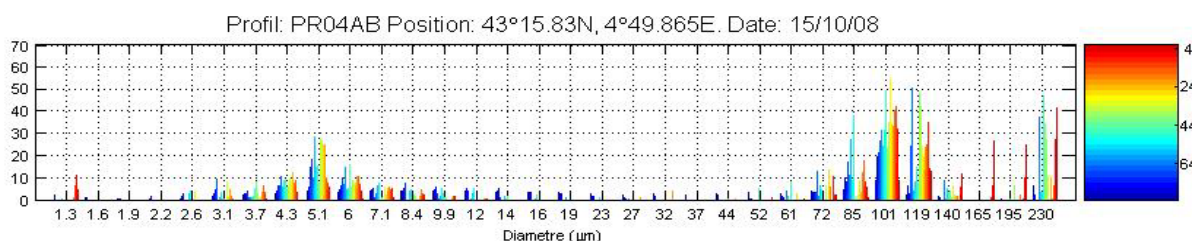
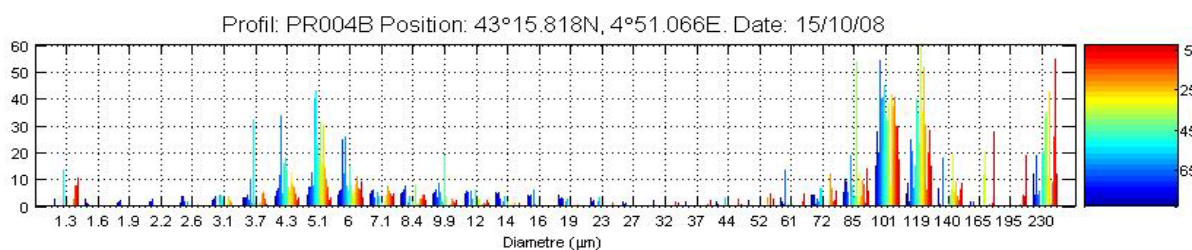
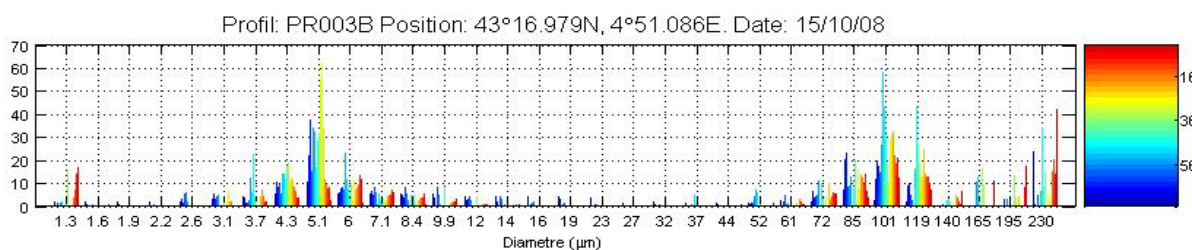
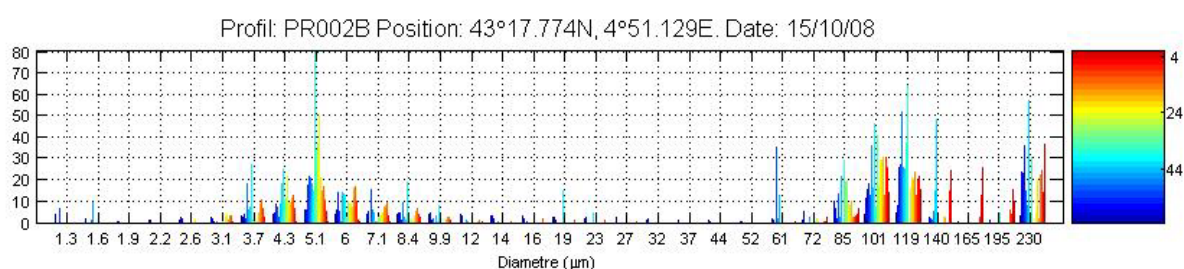
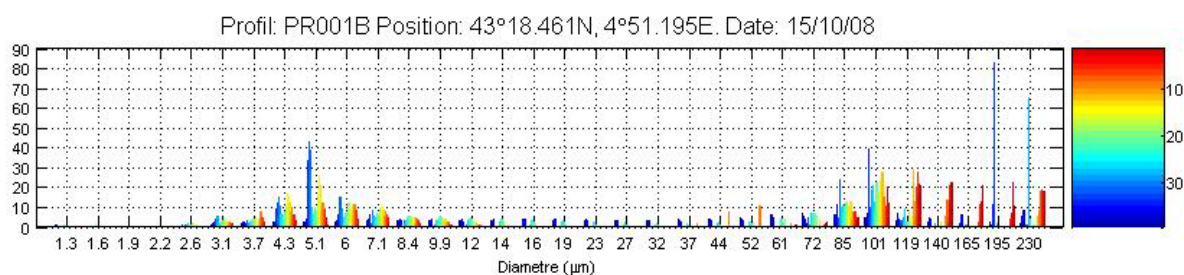
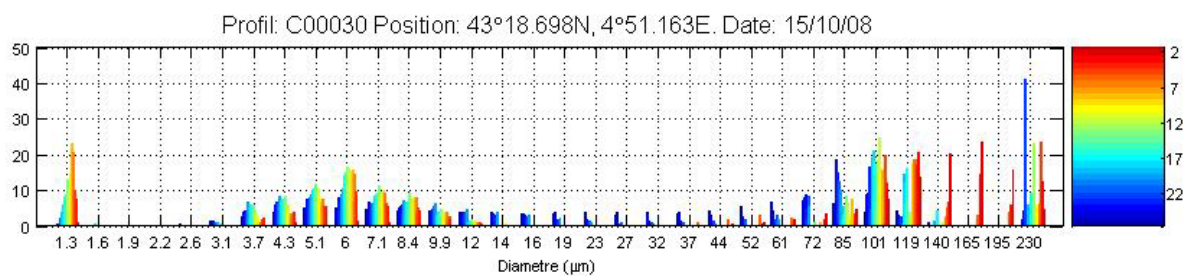


**Annexe C4 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 2).**

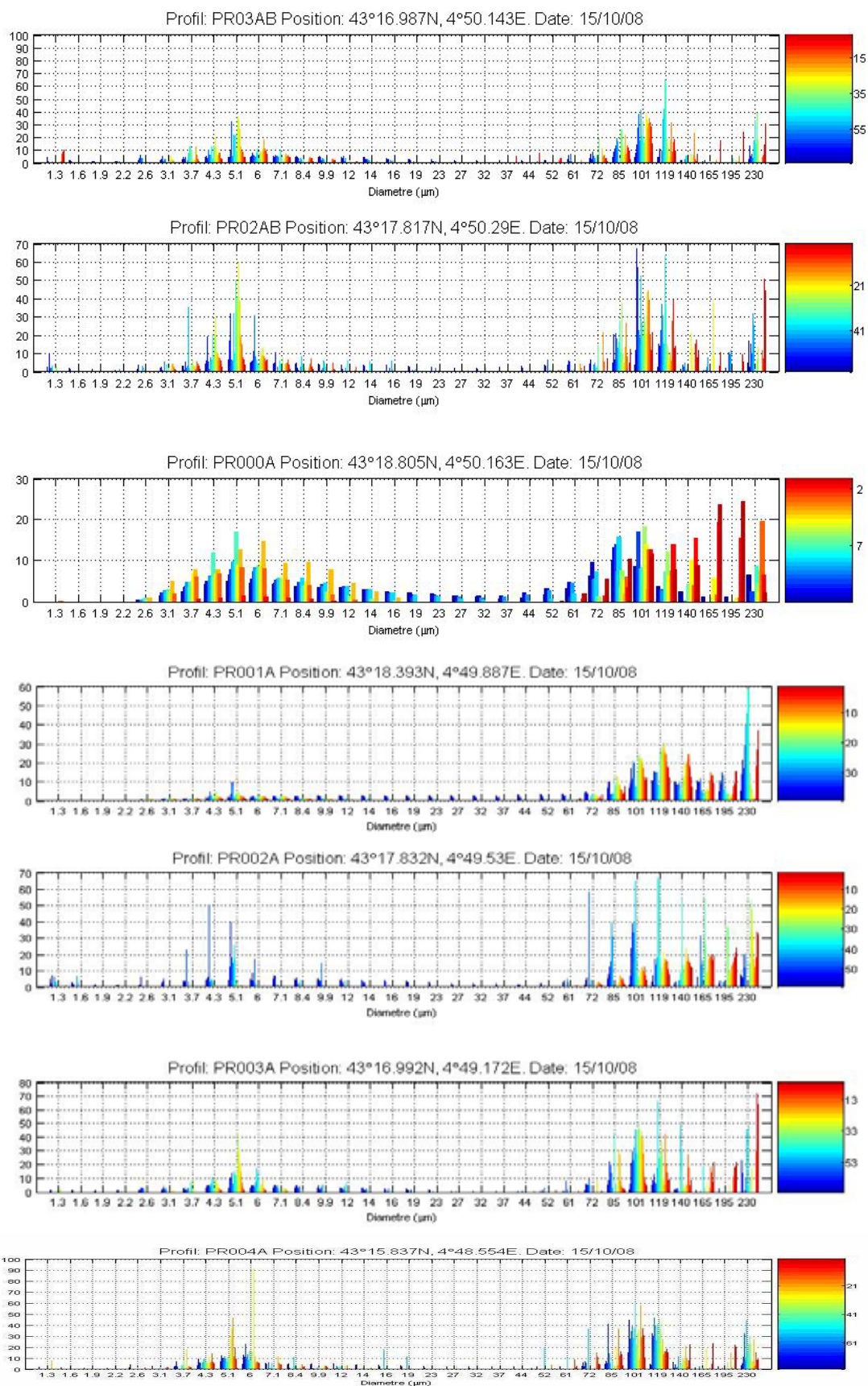




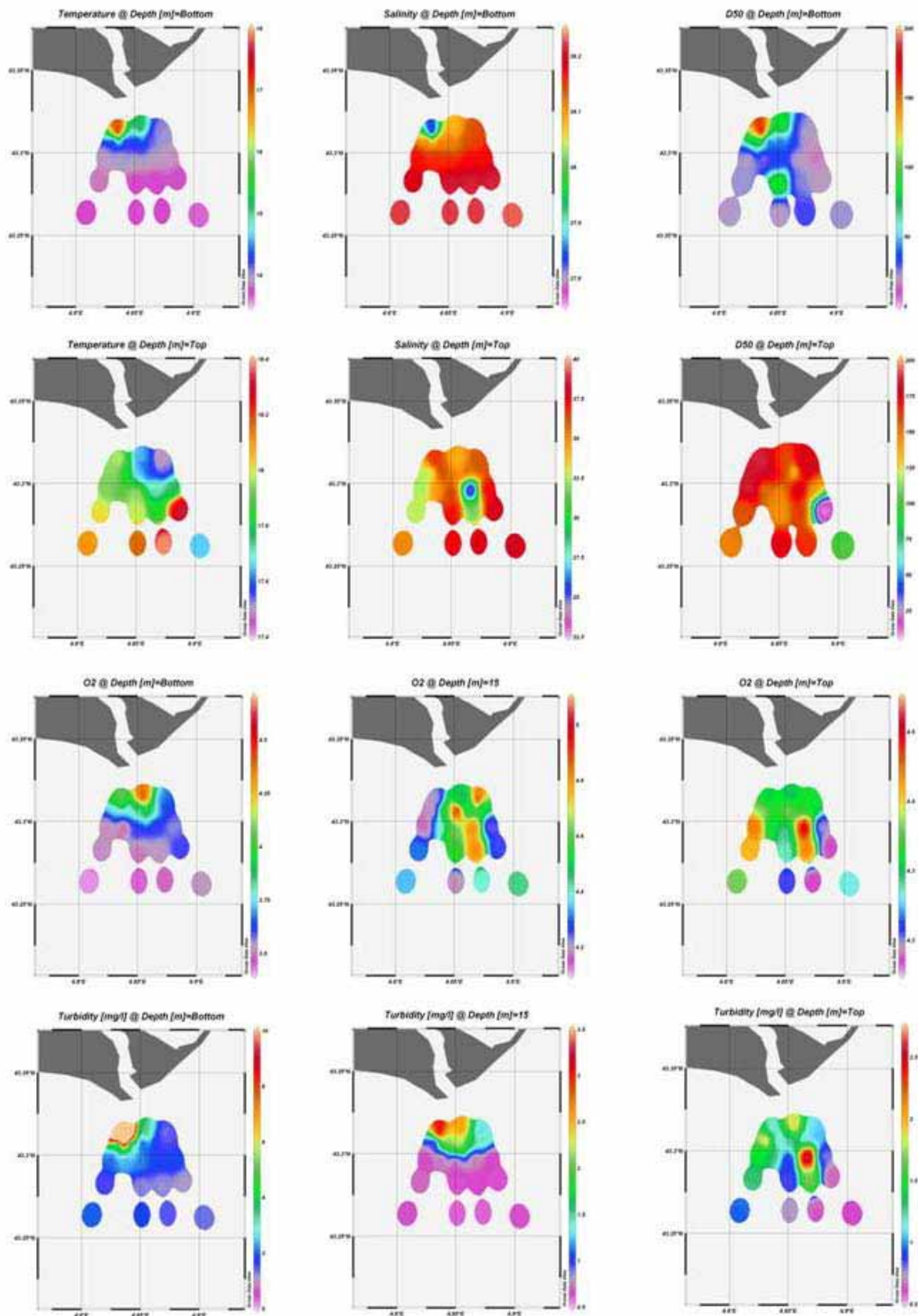
**Annexe C5 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 2).**



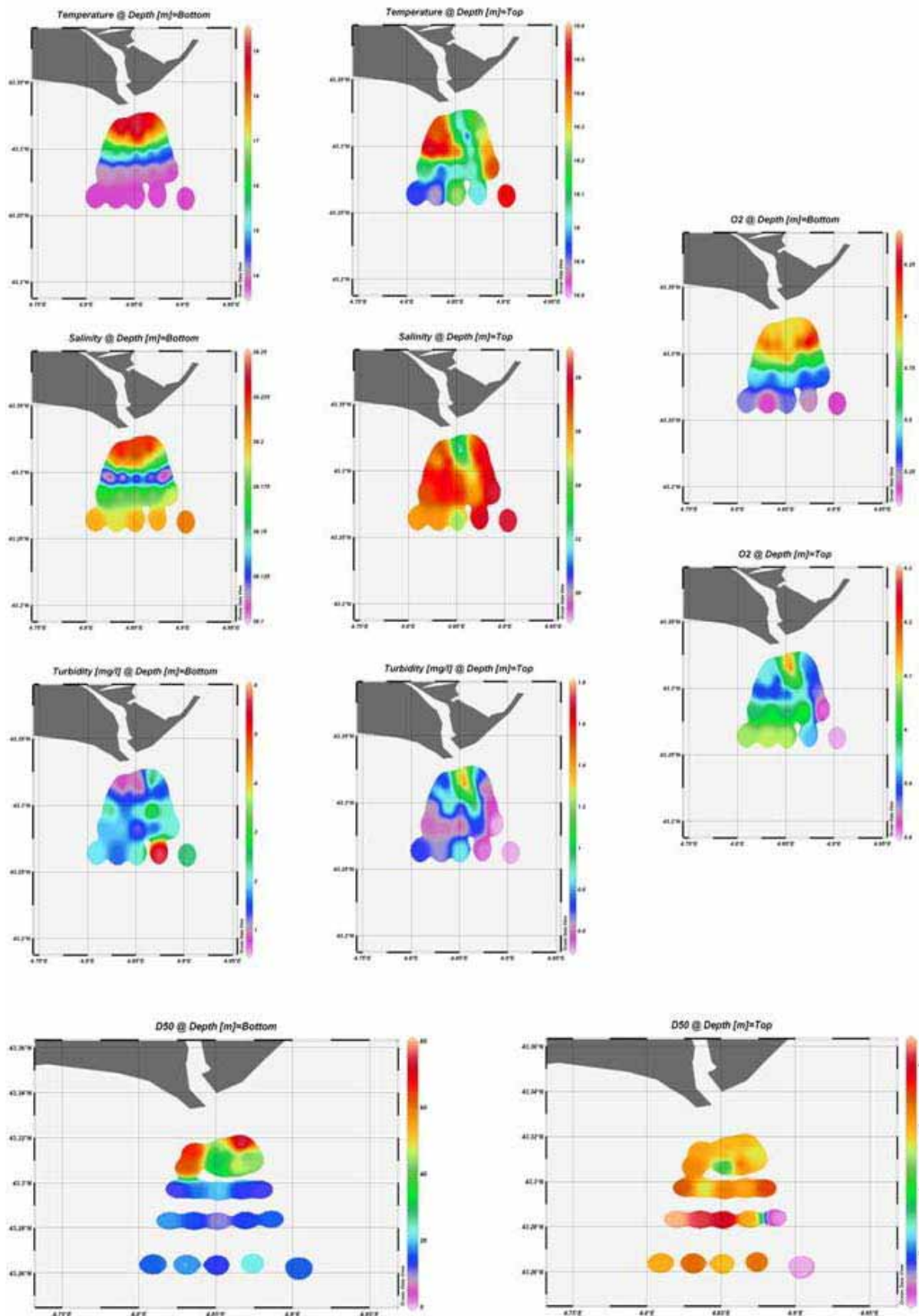
**Annexe C6 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 2).**



**Annexe C7 : Distribution volumique de taille des particules dans la colonne d'eau pour chaque profil. La couleur bleue correspond au fond et la couleur rouge à la surface. Les courbes représentent la fraction granulométrique retrouvée sur les filtres insonifiés à différentes profondeurs (Extrema 2 leg 2).**



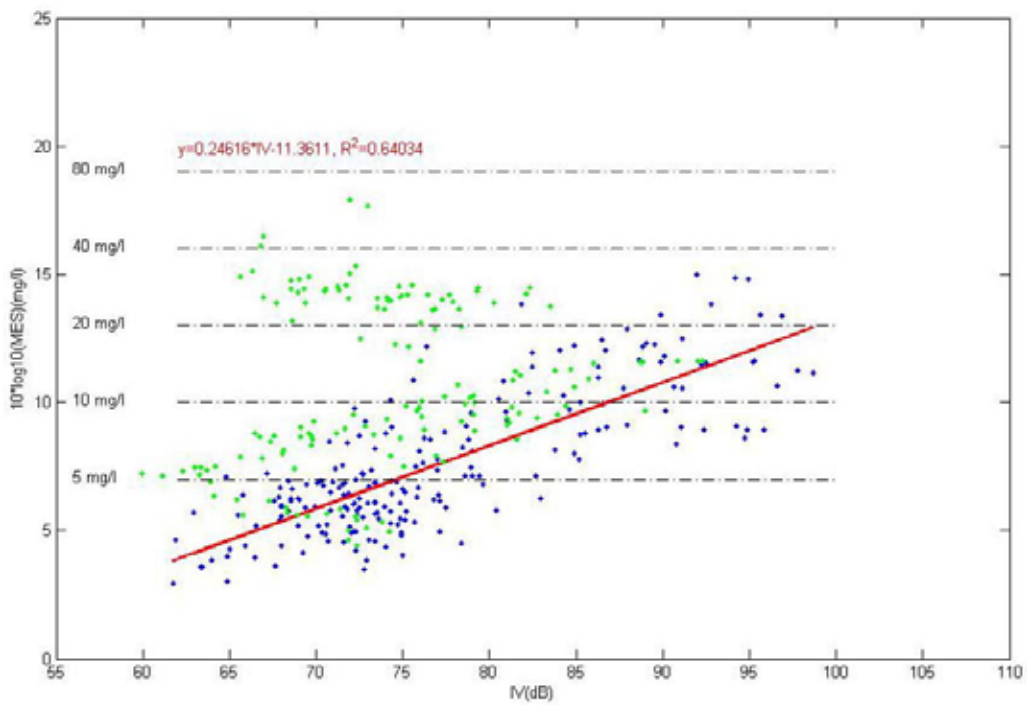
**Annexe C8 :** Distribution des valeurs de turbidité en  $\text{mg.L}^{-1}$ , de dioxygène dissous en  $\text{mL.L}^{-1}$ , de température en  $^{\circ}\text{C}$  et de D50 en  $\mu\text{m}$  dans les eaux de l’embouchure du Rhône à 3 profondeurs (surface, fond et 15 m) durant le premier leg de la campagne EXTREMA2 (octobre 2008).



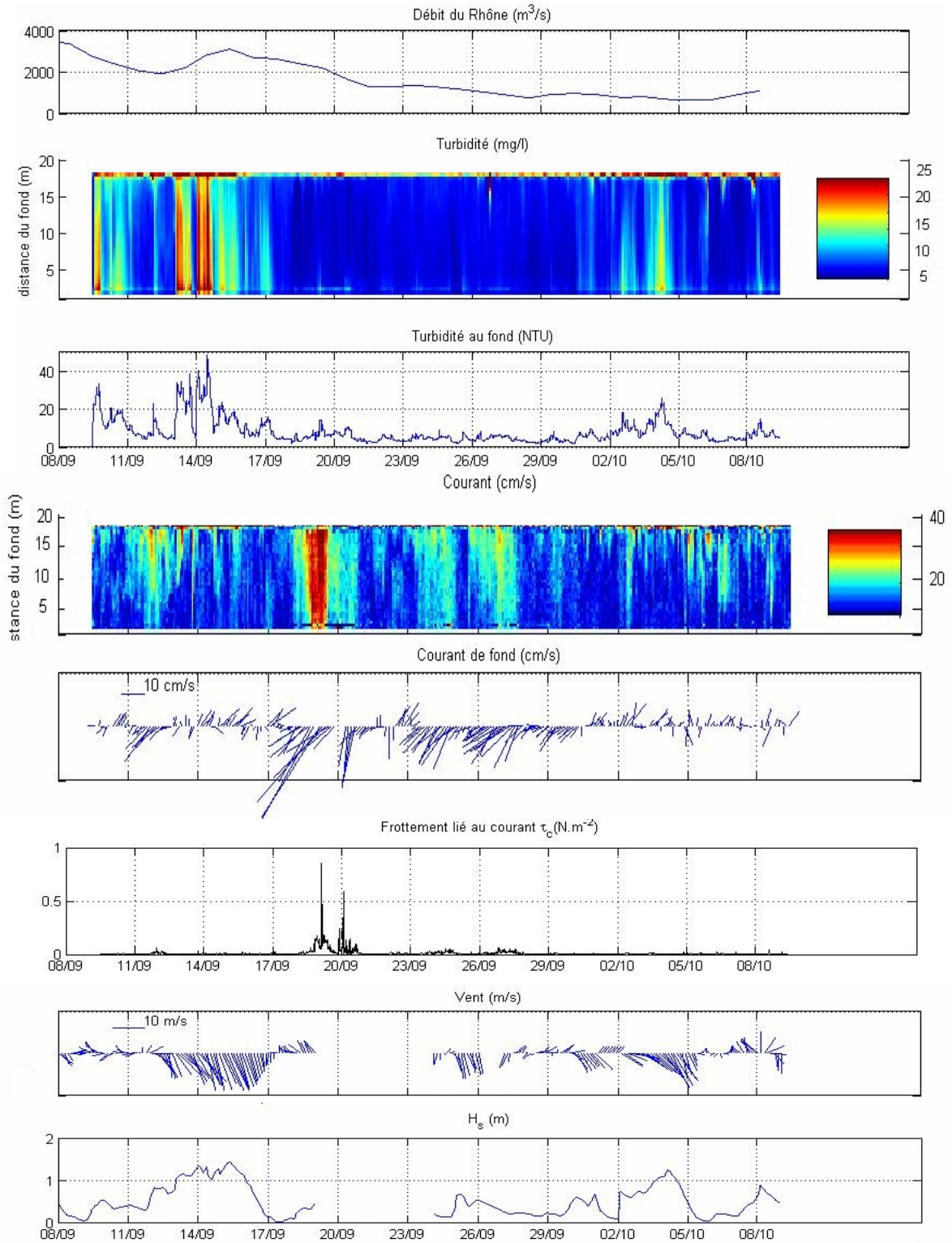
**Annexe C9 : Distribution des valeurs de turbidité en  $\text{mg.L}^{-1}$ , de dioxygène dissous en  $\text{mL.L}^{-1}$ , de température en  $^{\circ}\text{C}$  et de D50 en  $\mu\text{m}$  dans les eaux de l'embouchure du Rhône à 2 profondeurs (surface et fond) durant le second leg de la campagne EXTREMA2 (octobre 2008).**

Stations	MES LEG 1 (en mg.L <sup>-1</sup> )	MES LEG 2 (en mg.L <sup>-1</sup> )	Lon DD	Lat DD
PR0C	1.730	0.838	4.866	43.317
PR0C	2.445	3.622	4.866	43.317
ADCP40	1.635	0.459	4.870	43.312
ADCP40	0.905	1.966	4.870	43.312
PR1C	1.600	1.565	4.874	43.309
PR1C	1.492	1.645	4.874	43.309
PR2C	1.355	1.297	4.879	43.297
PR2C	1.092	0.895	4.879	43.297
PR3C	1.300	0.610	4.887	43.284
PR3C	1.406	1.690	4.887	43.284
PR4C	1.624	0.745	4.903	43.262
PR4C	1.765	1.085	4.903	43.262
PR4BC	1.558	0.215	4.874	43.264
PR4BC	1.251	4.369	4.874	43.264
PR3BC	1.344	0.740	4.869	43.283
PR3BC	1.335	1.015	4.869	43.283
PR2BC	1.670	0.118	4.867	43.297
PR2BC	2.120	1.394	4.867	43.297
PR1BC	4.225	1.445	4.862	43.308
PR1BC	2.190	1.480	4.862	43.308
Chenal20	7.571	0.705	4.853	43.311
Chenal20	8.643	0.720	4.853	43.311
PR0B	2.840	0.748	4.854	43.314
PR0B	3.195	0.420	4.854	43.314
Chenal30	2.830	1.459	4.854	43.313
Chenal30	4.450	0.485	4.854	43.313
PR1B	2.000	1.130	4.853	43.308
PR1B	1.570	2.290	4.853	43.308
PR2B	4.267	1.245	4.853	43.296
PR2B	4.615	1.350	4.853	43.296
PR3B	0.660	0.165	4.851	43.283
PR3B	1.515	0.855	4.851	43.283
PR4B	2.626	1.010	4.851	43.263
PR4B	1.645	0.755	4.851	43.263
PR4AB		0.255	4.830	43.264
PR4AB		1.900	4.830	43.264
PR3AB		1.675	4.835	43.283
PR3AB		2.075	4.835	43.283
PR2AB	0.583	1.298	4.838	43.297
PR2AB	1.220	0.773	4.838	43.297
PR1AB	1.425	0.210	4.843	43.307
PR1AB	3.080	2.215	4.843	43.307
PR0A	3.580	1.578	4.836	43.314
PR0A	2.735	1.244	4.836	43.314
PR1A	2.625	1.233	4.832	43.307
PR1A	2.515	1.687	4.832	43.307
PR2A	1.605	0.545	4.826	43.297
PR2A	1.815	1.570	4.826	43.297
PR3A	1.635	0.400	4.819	43.284
PR3A	1.665	1.572	4.819	43.284
PR4A	1.605	0.585	4.809	43.264
PR4A	2.855	1.750	4.809	43.264

Annexe C10 : Concentrations en MES (mg.L<sup>-1</sup>) des prélèvements d'eau de la campagne EXTREMA2 d'octobre 2008.

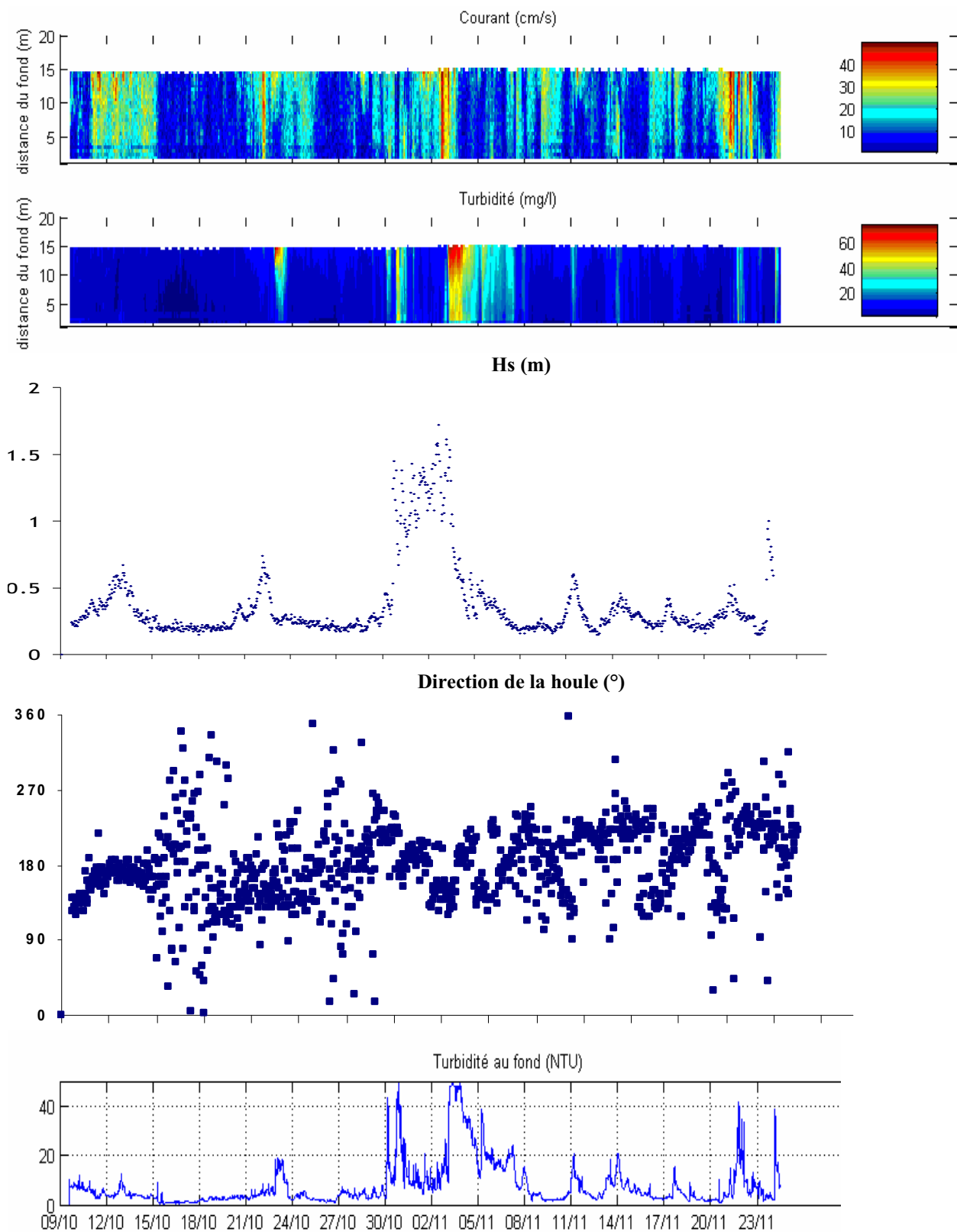


**Annexe C11 : Calibration du signal acoustique de l'ADCP en dB avec des données de MES en mg.L<sup>-1</sup>.**

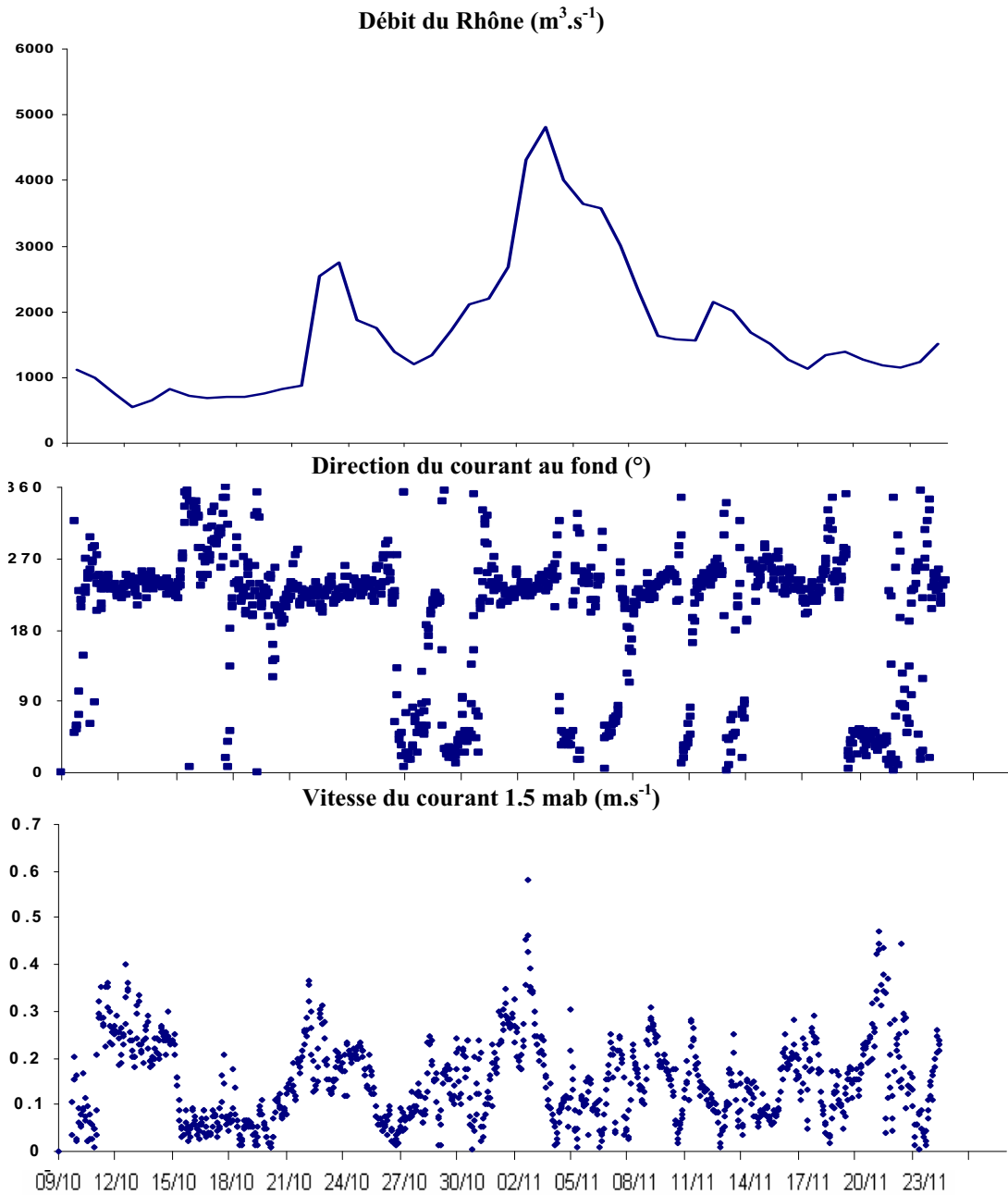


**Annexe C12 : Données de l'ADCP muni de son module de houle et des sondes NKE entre le 8 septembre et le 9 octobre 2008 à l'embouchure du Rhône, associées aux conditions de vents et de débit du fleuve à cette période.**



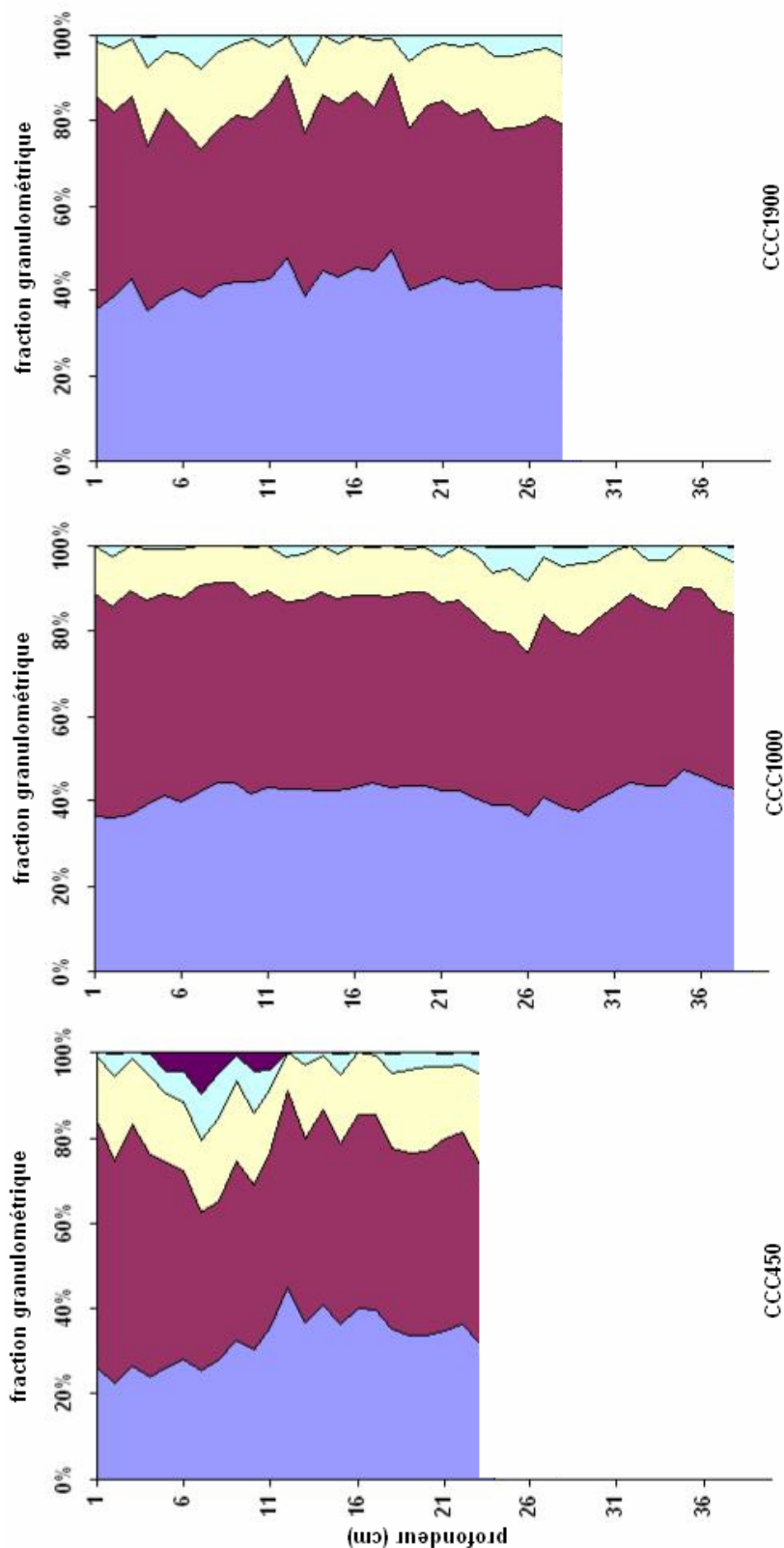


**Annexe C13 : Données de l'ADCP muni de son module de houle et des sondes NKE entre le 9 octobre et le 24 novembre 2008 à l'embouchure du Rhône.**



**Annexe C14 : Vitesse et direction des courants au fond (1.5 mab) révélées par l'ADCP immergé et débit du Rhône en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> entre le 9 octobre et le 24 novembre 2008 à l'embouchure du Rhône.**

## ANNEXE D : Enregistrements sédimentaires profonds de la campagne DEEP1



Annexe D1 : Distribution granulométrique de sédiments prélevés à différentes profondeurs (450 m, 1000 m et 1900 m) au niveau du Cap Creus en 2008.

## ANNEXE E : Les radioéléments dans l'eau du fleuve

Date	[ <sup>137</sup> Cs] (Bq.kg <sup>-1</sup> )	± (Bq.kg <sup>-1</sup> )	Date	[ <sup>137</sup> Cs] (Bq.kg <sup>-1</sup> )	± (Bq.kg <sup>-1</sup> )
03/01/2006	17.724	1.811	04/03/2007	11.080	1.146
01/02/2006	19.952	2.470	05/03/2007	9.974	1.055
02/03/2006	15.283	1.565	05/03/2007	8.722	0.958
10/03/2006	13.587	1.710	05/03/2007	7.813	0.858
11/03/2006	11.961	1.519	30/03/2007	49.080	4.719
11/03/2006	13.050	1.771	02/05/2007	49.779	4.696
11/03/2006	12.577	1.596	31/05/2007	31.483	2.553
11/03/2006	12.085	1.605	29/07/2007	13.856	1.051
30/03/2006	9.076	1.135	02/09/2007	15.069	1.248
30/03/2006	8.495	1.050	01/10/2007	21.206	2.074
01/04/2006	8.778	1.145	03/11/2007	29.993	2.812
03/04/2006	9.225	0.769	23/11/2007	15.744	1.874
11/04/2006	7.044	1.061	24/11/2007	13.338	1.597
11/04/2006	7.225	0.963	24/11/2007	10.303	1.229
12/04/2006	7.325	0.867	24/11/2007	9.518	1.237
12/04/2006	7.353	0.774	25/11/2007	8.709	1.148
12/04/2006	6.843	0.771	03/12/2007	12.730	1.037
02/05/2006	9.183	0.773	03/01/2008	14.724	1.140
01/06/2006	10.920	1.149	12/01/2008	10.473	1.415
03/07/2006	19.671	2.349	13/01/2008	8.919	1.139
01/08/2006	15.788	1.829	13/01/2008	7.441	0.859
06/09/2006	28.008	2.994	13/01/2008	6.217	0.765
02/10/2006	32.042	3.204	14/01/2008	5.298	0.771
20/10/2006	19.487	1.874	31/01/2008	14.504	1.138
20/10/2006	18.781	2.182	01/04/2008	23.374	2.217
21/10/2006	15.626	1.917	12/04/2008	15.177	1.508
21/10/2006	14.469	1.929	12/04/2008	9.757	1.042
21/10/2006	13.637	1.825	13/04/2008	8.716	0.958
31/10/2006	21.986	2.103	21/04/2008	9.900	1.131
18/11/2006	17.529	1.687	22/04/2008	8.915	1.032
18/11/2006	17.055	1.678	22/04/2008	9.689	1.025
18/11/2006	13.617	1.324	22/04/2008	9.540	1.039
19/11/2006	10.291	1.239	23/04/2008	8.598	1.039
19/11/2006	12.376	1.547	30/04/2008	15.271	1.233
01/12/2006	21.898	2.086	28/05/2008	5.890	0.665
09/12/2006	13.278	1.612	28/05/2008	5.400	0.579
09/12/2006	13.602	1.606	29/05/2008	4.787	0.574
10/12/2006	12.869	1.597	29/05/2008	5.590	0.578
10/12/2006	9.460	1.051	29/05/2008	5.850	0.671
10/12/2006	8.889	0.966	30/05/2008	15.820	1.685
03/01/2007	14.933	1.436	30/06/2008	9.516	0.874
31/01/2007	21.909	2.135	14/07/2008	17.479	1.738
01/03/2007	29.684	2.800	04/08/2008	13.724	1.450

Annexe E1 : Concentrations de <sup>137</sup>Cs en Bq.kg<sup>-1</sup> dans les MES du Rhône entre 2006 et 2008 (données de la station SORA en Arles).

Date	[ <sup>238</sup> Pu] (Bq.kg <sup>-1</sup> )	± (Bq.kg <sup>-1</sup> )
02/03/2006	0.056159	0.005524
03/04/2006	0.031229	0.003171
12/04/2006	0.01906	0.002515
02/05/2006	0.024166	0.002997
01/06/2006	0.038314	0.003831
20/10/2006	0.022672	0.002717
31/10/2006	0.059268	0.005736
18/11/2006	0.044734	0.00466
18/11/2006	0.02818	0.003121
01/12/2006	0.039814	0.00474
10/12/2006	0.009173	0.001911
03/01/2007	0.022016	0.002872
30/03/2007	0.028504	0.00302
29/07/2007	0.018251	0.002867
02/09/2007	0.021691	0.002687
03/12/2007	0.047148	0.004715
03/01/2008	0.075045	0.00665
01/04/2008	0.082225	0.008315
30/04/2008	0.038888	0.004742
Date	[ <sup>239+240</sup> Pu] (Bq.kg <sup>-1</sup> )	± (Bq.kg <sup>-1</sup> )
02/03/2006	0.300129	0.015651
03/04/2006	0.165273	0.009609
12/04/2006	0.113197	0.00774
02/05/2006	0.160464	0.009667
01/06/2006	0.202107	0.011494
20/10/2006	0.2998	0.015927
31/10/2006	0.352739	0.018163
18/11/2006	0.343896	0.017707
18/11/2006	0.247754	0.013239
01/12/2006	0.26922	0.015167
10/12/2006	0.117535	0.0086
03/01/2007	0.164641	0.010529
30/03/2007	0.207645	0.010382
29/07/2007	0.187291	0.012422
02/09/2007	0.228429	0.012477
03/12/2007	0.232909	0.013201
03/01/2008	0.268832	0.015199
01/04/2008	0.345528	0.020325
30/04/2008	0.231433	0.015176

**Annexe E2 : Concentrations de <sup>238</sup>Pu et <sup>239+240</sup>Pu en Bq.kg<sup>-1</sup> dans les MES du Rhône entre 2006 et 2008 (données de la station SORA en Arles).**

## ANNEXE F : Conditions hydrologiques rhodaniennes durant la période d'étude

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
01/01/2006	8.98	950	10/02/2006	0.69	484
02/01/2006	16.60	1315	11/02/2006	0.50	535
03/01/2006	37.65	1316	12/02/2006	0.48	428
04/01/2006	32.55	1437	13/02/2006	0.49	488
05/01/2006	46.00	1400	14/02/2006	0.47	588
06/01/2006	20.60	1226	15/02/2006	3.52	580
07/01/2006	12.20	915	16/02/2006	0.70	906
08/01/2006	12.70	745	17/02/2006	4.65	1791
09/01/2006	12.95	652	18/02/2006	7.03	1949
10/01/2006	10.80	652	19/02/2006	6.12	2086
11/01/2006	9.20	692	20/02/2006	10.76	2350
12/01/2006	8.95	620	21/02/2006	26.91	2663
13/01/2006	7.70	637	22/02/2006	22.85	2501
14/01/2006	5.50	470	23/02/2006	68.38	2301
15/01/2006	4.75	464	24/02/2006	99.60	2134
16/01/2006	5.85	658	25/02/2006	87.20	1846
17/01/2006	5.00	617	26/02/2006	34.40	1328
18/01/2006	7.35	647	27/02/2006	18.85	1192
19/01/2006	15.10	1047	28/02/2006	20.02	1225
20/01/2006	17.00	1184	01/03/2006	19.57	1213
21/01/2006	11.60	1072	02/03/2006	15.62	1093
22/01/2006	11.65	806	03/03/2006	15.67	996
23/01/2006	4.95	757	04/03/2006	30.60	1189
24/01/2006	1.02	806	05/03/2006	37.00	1633
25/01/2006	0.87	857	06/03/2006	13.85	1907
26/01/2006	0.85	804	07/03/2006	16.67	2044
27/01/2006	0.91	769	08/03/2006	70.40	2071
28/01/2006	0.99	1180	09/03/2006	53.43	2183
29/01/2006	5.44	1287	10/03/2006	162.20	2674
30/01/2006	3.95	1464	11/03/2006	173.60	2708
31/01/2006	2.22	1196	12/03/2006	125.60	2448
01/02/2006	1.17	980	13/03/2006	100.60	2413
02/02/2006	1.00	911	14/03/2006	70.20	2580
03/02/2006	0.81	918	15/03/2006	63.00	2513
04/02/2006	0.67	769	16/03/2006	64.77	2413
05/02/2006	0.72	586	17/03/2006	62.60	2460
06/02/2006	0.81	490	18/03/2006	49.13	2463
07/02/2006	0.65	540	19/03/2006	45.50	2261
08/02/2006	0.57	624	20/03/2006	33.70	2007
09/02/2006	0.68	595	21/03/2006	33.13	2074

Annexe F1 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 01/01/06 et le 21/03/06 (données de la station SORA).

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
22/03/2006	30.00	2059	02/05/2006	8.70	940
23/03/2006	21.10	1906	03/05/2006	9.20	987
24/03/2006	23.87	1998	04/05/2006	8.30	1114
25/03/2006	34.00	2092	05/05/2006	8.70	1084
26/03/2006	42.47	2302	06/05/2006	7.75	1003
27/03/2006	43.27	2364	07/05/2006	7.85	990
28/03/2006	64.67	2632	08/05/2006	14.10	1451
29/03/2006	99.73	2885	09/05/2006	24.15	1723
30/03/2006	106.80	3028	10/05/2006	36.65	1995
31/03/2006	140.00	3029	11/05/2006	39.00	2118
01/04/2006	186.25	3565	12/05/2006	37.65	2084
02/04/2006	234.67	3697	13/05/2006	23.00	1860
03/04/2006	251.17	3344	14/05/2006	20.40	1490
04/04/2006	152.00	3123	15/05/2006	23.25	1490
05/04/2006	130.33	3027	16/05/2006	17.65	1555
06/04/2006	98.83	2923	17/05/2006	21.00	1629
07/04/2006	65.38	3061	18/05/2006	22.40	1708
08/04/2006	50.80	2787	19/05/2006	29.85	1875
09/04/2006	48.90	2687	20/05/2006	57.20	2290
10/04/2006	47.00	2683	21/05/2006	145.70	2274
11/04/2006	93.20	3318	22/05/2006	137.10	2292
12/04/2006	127.63	3583	23/05/2006	63.67	2040
13/04/2006	107.25	3205	24/05/2006	43.15	1837
14/04/2006	67.00	3016	25/05/2006	32.70	1571
15/04/2006	50.88	2961	26/05/2006	23.10	1298
16/04/2006	41.90	2801	27/05/2006	16.80	1239
17/04/2006	36.10	2715	28/05/2006	11.10	1079
18/04/2006	29.20	2515	29/05/2006	5.60	1147
19/04/2006	25.70	2282	30/05/2006	15.85	1139
20/04/2006	22.50	2096	31/05/2006	9.60	1157
21/04/2006	26.20	1909	01/06/2006	20.85	1330
22/04/2006	17.40	1710	02/06/2006	9.20	1280
23/04/2006	12.70	1402	03/06/2006	16.95	1134
24/04/2006	9.85	1363	04/06/2006	9.50	747
25/04/2006	10.40	1404	05/06/2006	6.70	708
26/04/2006	10.60	1413	06/06/2006	10.47	809
27/04/2006	12.25	1318	07/06/2006	11.34	843
28/04/2006	12.75	1266	08/06/2006	8.67	733
29/04/2006	11.20	1148	09/06/2006	7.25	779
30/04/2006	12.40	842	10/06/2006	2.90	682
01/05/2006	8.60	826	11/06/2006	6.85	567

**Annexe F2 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 22/03/06 et le 11/06/06 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
12/06/2006	3.05	652	23/07/2006	2.50	370
13/06/2006	7.90	699	24/07/2006	5.75	439
14/06/2006	8.55	859	25/07/2006	12.25	593
15/06/2006	10.25	788	26/07/2006	12.15	613
16/06/2006	13.95	924	27/07/2006	13.90	672
17/06/2006	10.00	880	28/07/2006	17.40	743
18/06/2006	8.05	890	29/07/2006	12.70	605
19/06/2006	9.45	918	30/07/2006	9.15	519
20/06/2006	7.80	944	31/07/2006	11.10	594
21/06/2006	6.05	892	01/08/2006	9.00	608
22/06/2006	2.30	934	02/08/2006	9.55	465
23/06/2006	2.85	911	03/08/2006	8.40	552
24/06/2006	8.65	767	04/08/2006	13.15	665
25/06/2006	4.15	755	05/08/2006	14.95	771
26/06/2006	9.90	881	06/08/2006	12.25	920
27/06/2006	10.55	948	07/08/2006	8.65	783
28/06/2006	11.95	1025	08/08/2006	10.60	725
29/06/2006	15.04	1021	09/08/2006	11.00	625
30/06/2006	13.68	976	10/08/2006	8.55	585
01/07/2006	11.50	849	11/08/2006	8.30	421
02/07/2006	8.24	714	12/08/2006	6.30	505
03/07/2006	13.30	779	13/08/2006	3.85	552
04/07/2006	8.10	810	14/08/2006	10.85	917
05/07/2006	10.35	871	15/08/2006	11.20	1009
06/07/2006	11.75	917	16/08/2006	4.95	1068
07/07/2006	5.40	922	17/08/2006	21.20	1431
08/07/2006	8.40	746	18/08/2006	20.85	1623
09/07/2006	9.95	677	19/08/2006	21.10	1567
10/07/2006	5.25	645	20/08/2006	15.10	1265
11/07/2006	10.75	663	21/08/2006	14.30	1077
12/07/2006	10.05	661	22/08/2006	10.35	1127
13/07/2006	8.15	630	23/08/2006	9.05	907
14/07/2006	3.15	634	24/08/2006	8.35	794
15/07/2006	5.55	481	25/08/2006	7.55	844
16/07/2006	4.85	497	26/08/2006	5.95	712
17/07/2006	8.45	578	27/08/2006	5.95	533
18/07/2006	5.85	676	28/08/2006	7.00	628
19/07/2006	8.26	715	29/08/2006	9.50	880
20/07/2006	8.87	642	30/08/2006	18.25	1199
21/07/2006	8.71	635	31/08/2006	14.00	1316
22/07/2006	4.94	543	01/09/2006	11.75	1113

**Annexe F3 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 12/06/06 et le 01/09/06 (données de la station SORA).**



Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
02/09/2006	8.85	959	13/10/2006	15.70	1022
03/09/2006	4.18	595	14/10/2006	38.50	887
04/09/2006	4.48	614	15/10/2006	6.24	716
05/09/2006	6.29	719	16/10/2006	6.47	728
06/09/2006	4.10	622	17/10/2006	11.95	966
07/09/2006	3.00	722	18/10/2006	16.28	1114
08/09/2006	2.00	691	19/10/2006	42.40	1366
09/09/2006	1.55	516	20/10/2006	176.10	2506
10/09/2006	3.45	519	21/10/2006	38.70	1822
11/09/2006	4.30	549	22/10/2006	18.20	1461
12/09/2006	4.65	751	23/10/2006	21.65	1483
13/09/2006	9.70	880	24/10/2006	28.00	1910
14/09/2006	8.85	1134	25/10/2006	46.63	1809
15/09/2006	8.85	1150	26/10/2006	43.50	1752
16/09/2006	7.75	1025	27/10/2006	35.72	1600
17/09/2006	4.95	598	28/10/2006	20.58	1241
18/09/2006	6.60	562	29/10/2006	9.17	855
19/09/2006	81.20	873	30/10/2006	9.71	878
20/09/2006	19.45	1099	31/10/2006	15.66	1094
21/09/2006	17.95	1253	01/11/2006	29.90	820
22/09/2006	17.85	1234	02/11/2006	17.85	550
23/09/2006	13.80	1034	03/11/2006	14.40	860
24/09/2006	8.10	944	04/11/2006	11.50	802
25/09/2006	8.20	966	05/11/2006	9.55	659
26/09/2006	10.55	920	06/11/2006	8.20	641
27/09/2006	10.95	994	07/11/2006	8.60	838
28/09/2006	14.15	1283	08/11/2006	7.51	780
29/09/2006	17.10	1387	09/11/2006	6.76	743
30/09/2006	16.45	1230	10/11/2006	4.31	604
01/10/2006	24.85	1060	11/11/2006	2.78	493
02/10/2006	103.70	1269	12/11/2006	1.30	347
03/10/2006	22.75	1708	13/11/2006	1.03	312
04/10/2006	42.45	1934	14/11/2006	4.73	630
05/10/2006	57.20	2075	15/11/2006	7.66	787
06/10/2006	70.60	2012	16/11/2006	12.80	997
07/10/2006	51.93	2028	17/11/2006	33.95	1563
08/10/2006	46.93	1741	18/11/2006	180.22	3373
09/10/2006	36.00	1564	19/11/2006	38.74	1661
10/10/2006	33.53	1677	20/11/2006	28.68	1446
11/10/2006	28.40	1509	21/11/2006	22.55	1440
12/10/2006	24.47	1379	22/11/2006	27.40	1522

**Annexe F4 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 02/09/06 et le 22/11/06 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
23/11/2006	34.95	1746	03/01/2007	8.05	993
24/11/2006	31.80	1817	04/01/2007	12.65	1433
25/11/2006	23.70	1806	05/01/2007	9.7	1522
26/11/2006	13.50	1631	06/01/2007	13.75	1649
27/11/2006	16.35	1431	07/01/2007	9.5	1308
28/11/2006	15.95	1366	08/01/2007	15.8	1412
29/11/2006	18.75	1467	09/01/2007	21.5	1672
30/11/2006	16.05	1340	10/01/2007	25.35	1890
01/12/2006	15.05	1241	11/01/2007	27.8	1834
02/12/2006	11.15	1204	12/01/2007	29.15	1710
03/12/2006	9.40	1051	13/01/2007	26.05	1602
04/12/2006	10.40	1083	14/01/2007	16.6	1241
05/12/2006	18.65	1470	15/01/2007	18.25	1323
06/12/2006	35.80	1845	16/01/2007	16.75	1490
07/12/2006	395.70	2316	17/01/2007	17.95	1435
08/12/2006	300.50	2624	18/01/2007	21.25	1357
09/12/2006	185.75	3114	19/01/2007	70.95	1365
10/12/2006	266.60	3098	20/01/2007	25.03	1358
11/12/2006	222.90	2575	21/01/2007	20.05	1226
12/12/2006	218.45	2510	22/01/2007	29.59	1467
13/12/2006	60.90	2360	23/01/2007	53.90	1934
14/12/2006	43.00	2076	24/01/2007	56.10	1970
15/12/2006	36.50	1828	25/01/2007	53.24	1923
16/12/2006	21.40	1444	26/01/2007	45.35	1786
17/12/2006	13.70	1017	27/01/2007	26.20	1387
18/12/2006	15.15	1074	28/01/2007	14.38	1052
19/12/2006	13.65	1215	29/01/2007	15.35	1084
20/12/2006	11.80	1198	30/01/2007	21.16	1257
21/12/2006	10.10	1264	31/01/2007	19.83	1220
22/12/2006	7.75	1056	01/02/2007	13.05	1142
23/12/2006	6.35	870	02/02/2007	11.2	1179
24/12/2006	5.75	691	03/02/2007	7.55	952
25/12/2006	4.70	550	04/02/2007	4.7	727
26/12/2006	4.40	561	05/02/2007	6.85	837
27/12/2006	4.10	635	06/02/2007	6.85	1129
28/12/2006	4.35	627	07/02/2007	6.25	1196
29/12/2006	4.35	596	08/02/2007	8.45	1290
30/12/2006	3.90	506	09/02/2007	9.7	1449
31/12/2006	3.25	391	10/02/2007	11.7	1650
01/01/2007	3.55	366	11/02/2007	11.4	1572
02/01/2007	6.15	719	12/02/2007	14.5	1598

**Annexe F5 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 23/11/06 et le 12/02/07 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
13/02/2007	35.95	2167	26/03/2007	6.30	1395
14/02/2007	97.3	2368	27/03/2007	6.95	1483
15/02/2007	57.65	2183	28/03/2007	7.60	1575
16/02/2007	53.1	2339	29/03/2007	8.65	1561
17/02/2007	46.3	2367	30/03/2007	12.30	1531
18/02/2007	43.45	2106	31/03/2007	8.00	1420
19/02/2007	33.85	1830	01/04/2007	27.00	1326
20/02/2007	33.25	1955	02/04/2007	7.30	1416
21/02/2007	30.05	1735	03/04/2007	6.50	1350
22/02/2007	24.75	1539	04/04/2007	9.00	1198
23/02/2007	16.85	1363	05/04/2007	6.95	1241
24/02/2007	11.9	1186	06/04/2007	6.30	1122
25/02/2007	10.8	1166	07/04/2007	5.00	904
26/02/2007	18.5	1596	08/04/2007	4.00	817
27/02/2007	24.7	1954	09/04/2007	4.15	672
28/02/2007	21.15	2057	10/04/2007	4.25	754
01/03/2007	35.7	2186	11/04/2007	4.50	889
02/03/2007	44.75	2297	12/04/2007	4.45	948
03/03/2007	85.7	2806	13/04/2007	5.00	1019
04/03/2007	180.9	3165	14/04/2007	3.95	794
05/03/2007	168.38	3269	15/04/2007	4.05	734
06/03/2007	163.17	3222	16/04/2007	5.25	849
07/03/2007	130.07	3127	17/04/2007	5.20	914
08/03/2007	78.53	3028	18/04/2007	4.90	822
09/03/2007	62.2	2864	19/04/2007	4.55	841
10/03/2007	37.65	2577	20/04/2007	4.10	788
11/03/2007	36.55	2352	21/04/2007	3.85	673
12/03/2007	29.6	2034	22/04/2007	3.45	555
13/03/2007	20.3	1882	23/04/2007	4.95	643
14/03/2007	15.6	1606	24/04/2007	4.05	777
15/03/2007	10.8	1448	25/04/2007	4.70	733
16/03/2007	8.85	1213	26/04/2007	4.40	768
17/03/2007	6.6	1088	27/04/2007	3.15	794
18/03/2007	6.65	849	28/04/2007	4.80	619
19/03/2007	8.45	1031	29/04/2007	3.40	541
20/03/2007	10.25	1316	30/04/2007	3.15	646
21/03/2007	8.40	1283	01/05/2007	4.95	709
22/03/2007	7.55	1284	02/05/2007	20	807
23/03/2007	8.20	1357	03/05/2007	7.9	979
24/03/2007	6.00	1286	04/05/2007	7.7	1140
25/03/2007	5.90	1338	05/05/2007	6.25	983

**Annexe F6 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 13/02/07 et le 05/05/07 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
06/05/2007	7.9	1047	16/06/2007	164.05	2349
07/05/2007	3.75	974	17/06/2007	81.95	2015
08/05/2007	3.05	811	18/06/2007	72.9	1834
09/05/2007	6.2	670	19/06/2007	84.75	2054
10/05/2007	15.2	794	20/06/2007	57.7	2094
11/05/2007	68.1	839	21/06/2007	68.4	2002
12/05/2007	8.05	805	22/06/2007	52.55	2068
13/05/2007	9.36	863	23/06/2007	57.35	1979
14/05/2007	12.66	992	24/06/2007	45.4	1966
15/05/2007	36.75	1331	25/06/2007	204.4	1854
16/05/2007	12.45	1260	26/06/2007	114.9	1824
17/05/2007	10.3	1167	27/06/2007	36.55	1727
18/05/2007	32	1820	28/06/2007	31.05	1663
19/05/2007	47.1	2211	29/06/2007	39.35	1689
20/05/2007	33.45	1891	30/06/2007	24.65	1689
21/05/2007	22.7	1613	01/07/2007	30.35	1500
22/05/2007	18.1	1397	02/07/2007	24.5	1481
23/05/2007	13.5	1334	03/07/2007	35	1659
24/05/2007	14.8	1381	04/07/2007	33.95	1563
25/05/2007	11.35	1427	05/07/2007	32	1910
26/05/2007	11.55	1409	06/07/2007	53.75	2217
27/05/2007	10	1197	07/07/2007	60.15	2178
28/05/2007	15.35	1105	08/07/2007	62.05	1943
29/05/2007	19.05	1325	09/07/2007	83.55	1815
30/05/2007	18.4	1458	10/07/2007	78.35	2233
31/05/2007	18.45	1563	11/07/2007	111.1	2495
01/06/2007	51.10	1887	12/07/2007	116.2	2317
02/06/2007	57.03	1985	13/07/2007	92.2	2118
03/06/2007	46.29	1803	14/07/2007	62.47	1891
04/06/2007	39.51	1676	15/07/2007	38.73	1633
05/06/2007	37.09	1628	16/07/2007	28.65	1513
06/06/2007	34.15	1672	17/07/2007	24.8	1398
07/06/2007	35.92	1604	18/07/2007	23.7	1443
08/06/2007	41.74	1719	19/07/2007	15.85	1243
09/06/2007	61.05	1691	20/07/2007	18.8	1276
10/06/2007	50.6	1607	21/07/2007	14.45	1283
11/06/2007	39.35	1662	22/07/2007	14.6	1199
12/06/2007	48.85	1822	23/07/2007	16.05	1200
13/06/2007	44.25	1862	24/07/2007	15.15	1207
14/06/2007	45.85	1930	25/07/2007	19.15	1330
15/06/2007	70.3	2107	26/07/2007	17.05	1208

**Annexe F7 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 06/05/07 et le 26/07/07 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
27/07/2007	17.3	1182	06/09/2007	9.1	677.266
28/07/2007	16.55	1020	07/09/2007	7.85	713.866
29/07/2007	13.15	835	08/09/2007	6.8	602.325
30/07/2007	12.5	752	09/09/2007	5.75	406.678
31/07/2007	21.15	837	10/09/2007	5.85	517.11
01/08/2007	13.6	1019.68	11/09/2007	5.8	590.451
02/08/2007	10.8	1037.73	12/09/2007	5.8	595.783
03/08/2007	13.7	1102.83	13/09/2007	5.15	643.848
04/08/2007	10.85	944.771	14/09/2007	2.05	629.961
05/08/2007	78.05	815.247	15/09/2007	4.3	575.122
06/08/2007	10.45	841.306	16/09/2007	4.25	510.022
07/08/2007	9.4	1029.581	17/09/2007	6.85	588.424
08/08/2007	10.45	1139.069	18/09/2007	11.55	759.712
09/08/2007	22.25	1267.861	19/09/2007	11.85	945.607
10/08/2007	36.1	1533.825	20/09/2007	9.05	898.88
11/08/2007	46.95	1854.504	21/09/2007	6.15	820.76
12/08/2007	58.55	1953.706	22/09/2007	7.35	657.05
13/08/2007	75.3	1888.157	23/09/2007	4.05	548.356
14/08/2007	73.85	2049.58	24/09/2007	6.7	667.215
15/08/2007	74.95	2004.027	25/09/2007	6.3	544.924
16/08/2007	9.25	1620.6	26/09/2007	6.45	507.774
17/08/2007	9.15	1574.784	27/09/2007	7.35	574.262
18/08/2007	28.5	1413.882	28/09/2007	9.6	864.287
19/08/2007	21.8	1301.653	29/09/2007	8.25	1162.079
20/08/2007	19.15	1176.837	30/09/2007	8.55	1053.497
21/08/2007	19.3	1247.791	01/10/2007	8.5	1043.843
22/08/2007	17.75	1234.052	02/10/2007	6.85	982.791
23/08/2007	12.75	1086.514	03/10/2007	6.6	827.748
24/08/2007	11.1	863.454	04/10/2007	5.55	780.913
25/08/2007	4.95	757.305	05/10/2007	4.75	882.503
26/08/2007	10.85	524.903	06/10/2007	4.7	683.569
27/08/2007	13.25	588.573	07/10/2007	5.8	649.161
28/08/2007	10.05	735.592	08/10/2007	3.65	679.453
29/08/2007	17.95	934.151	09/10/2007	5.15	674.806
30/08/2007	21.6	1165.406	10/10/2007	7.45	777.014
31/08/2007	14.35	1234.676	11/10/2007	5.5	825.563
01/09/2007	55.35	1151.889	12/10/2007	3.6	804.793
02/09/2007	16.1	998.606	13/10/2007	4.85	592.384
03/09/2007	10.35	840.113	14/10/2007	3.56	552.614
04/09/2007	8.7	800.675	15/10/2007	4.40	609.441
05/09/2007	12.7	580.769	16/10/2007	5.38	668.86

**Annexe F8 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 27/07/07 et le 16/10/07 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
17/10/2007	4.58	620.736	27/11/2007	76.60	1932.896
18/10/2007	1.91	414.727	28/11/2007	62.53	1793.431
19/10/2007	2.50	469.962	29/11/2007	43.87	1493.098
20/10/2007	1.18	332.731	30/11/2007	23.00	1126.684
21/10/2007	1.45	365.679	01/12/2007	16.55	929.194
22/10/2007	0.96	301.947	02/12/2007	9.05	665.57
23/10/2007	2.57	475.878	03/12/2007	14.70	762.403
24/10/2007	3.42	542.829	04/12/2007	19.20	1396.956
25/10/2007	4.32	604.427	05/12/2007	24.45	1730.032
26/10/2007	6.41	724.856	06/12/2007	24.40	1833.472
27/10/2007	3.75	566.44	07/12/2007	27.53	1900.977
28/10/2007	2.07	430.565	08/12/2007	31.10	1986.518
29/10/2007	2.65	476.778	09/12/2007	41.40	2213.142
30/10/2007	2.1	428.529	10/12/2007	46.60	2430.383
31/10/2007	2.5	417.346	11/12/2007	91.27	2855.501
01/11/2007	2.4	420.496	12/12/2007	103.20	3005.878
02/11/2007	1.8	361.652	13/12/2007	114.60	2811.15
03/11/2007	1.8	325.554	14/12/2007	85.13	2599.657
04/11/2007	2.85	330.826	15/12/2007	38.33	2517.699
05/11/2007	23.5	319.087	16/12/2007	40.55	2180.489
06/11/2007	6.05	228.959	17/12/2007	31.60	2075.161
07/11/2007	9.7	226.971	18/12/2007	26.87	1942.286
08/11/2007	2.5	269.938	19/12/2007	22.70	1777.522
09/11/2007	3.25	242.797	20/12/2007	16.85	1436.885
10/11/2007	4.05	200	21/12/2007	19.40	1429.593
11/11/2007	4.1	222.037	22/12/2007	10.8	1128.439
12/11/2007	0.52	227.692	23/12/2007	9.6	977.125
13/11/2007	1.65	387.688	24/12/2007	5.5	900.561
14/11/2007	2.76	492.005	25/12/2007	5.2	847.283
15/11/2007	1.91	415.022	26/12/2007	4.05	815.542
16/11/2007	3.76	566.838	27/12/2007	4.2	732.468
17/11/2007	2.32	453.508	28/12/2007	3.75	661.825
18/11/2007	2.69	485.834	29/12/2007	2.6	625.237
19/11/2007	3.2	831.281	30/12/2007	2.55	512.02
20/11/2007	1.90	1172.381	31/12/2007	3.05	514.074
21/11/2007	3.00	1280.237	01/01/2008	3.05	399.569
22/11/2007	31.50	1470.155	02/01/2008	2.5	656.659
23/11/2007	97.60	2849.567	03/01/2008	3.05	1281.924
24/11/2007	167.53	3028.434	04/01/2008	3.9	1515.115
25/11/2007	100.87	2381.471	05/01/2008	11.05	1534.962
26/11/2007	85.20	1910.699	06/01/2008	7.6	1498.051

**Annexe F9 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 17/10/07 et le 06/01/08 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
07/01/2008	13.05	2214.706	17/02/2008	0.20	702.256
08/01/2008	34.7	2608.429	18/02/2008	6.95	759.928
09/01/2008	37.5	2768.128	19/02/2008	5.70	1014.76
10/01/2008	45.35	2562.566	20/02/2008	5.05	938.882
11/01/2008	50.47	2558.009	21/02/2008	0.25	765.16
12/01/2008	99.80	3003.614	22/02/2008	3.65	761.727
13/01/2008	429.60	2970.702	23/02/2008	5.50	631.015
14/01/2008	109.10	2499.503	24/02/2008	8.10	471.256
15/01/2008	99.20	2854.045	25/02/2008	2.85	610.592
16/01/2008	52.33	2894.701	26/02/2008	5.48	792.785
17/01/2008	47.50	2823.112	27/02/2008	3.36	816.08
18/01/2008	35.90	2554.196	28/02/2008	7.80	919.643
19/01/2008	29.80	2231.299	29/02/2008	7.40	897.68
20/01/2008	23.90	1917.274	01/03/2008	6.72	782.712
21/01/2008	27.10	1838.402	02/03/2008	7.32	749.354
22/01/2008	19.20	1764.631	03/03/2008	8.80	857.297
23/01/2008	14.95	1660.979	04/03/2008	14.28	1046.372
24/01/2008	12.50	1608.656	05/03/2008	17.60	838.666
25/01/2008	12.40	1598.011	06/03/2008	8.48	976.09
26/01/2008	8.15	1437.113	07/03/2008	7.76	1133.432
27/01/2008	6.35	1026.575	08/03/2008	4.08	1032.995
28/01/2008	6.90	1104.388	09/03/2008	5.76	898.585
29/01/2008	18.25	1268.267	10/03/2008	4.56	1058.319
30/01/2008	16.65	1213.892	11/03/2008	6.05	1233.351
31/01/2008		1190.707	12/03/2008	6.65	1150.832
01/02/2008	13.00	1261.88	13/03/2008	11.25	1545.556
02/02/2008	10.05	1128.432	14/03/2008	12.90	1617.187
03/02/2008	12.65	1110.499	15/03/2008	13.55	1643.628
04/02/2008	30.10	1541.778	16/03/2008	13.10	1542.516
05/02/2008	22.65	1835.376	17/03/2008	16.50	1624.028
06/02/2008	14.30	1506.332	18/03/2008	22.65	1767.35
07/02/2008	7.55	1373.166	19/03/2008	22.80	1704.075
08/02/2008	7.35	1502.494	20/03/2008	24.15	1633.266
09/02/2008	6.35	1280.417	21/03/2008	20.70	1563.507
10/02/2008	3.60	995.857	22/03/2008	18.10	1716.553
11/02/2008	3.70	1031.085	23/03/2008	19.45	1772.106
12/02/2008	6.10	1110.085	24/03/2008	19.75	1840.424
13/02/2008	0.10	959.142	25/03/2008	20.85	1852.634
14/02/2008	7.50	989.767	26/03/2008	37.15	1920.63
15/02/2008	4.85	973.106	27/03/2008	31.87	1957.094
16/02/2008	5.45	771.209	28/03/2008	32.07	1802.646

**Annexe F10 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 07/01/08 et le 28/03/08 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
29/03/2008	24.87	1654.187	09/05/2008	7.25	1307.101
30/03/2008	21.60	1632.784	10/05/2008	7.75	1293.132
31/03/2008	20.05	1622.534	11/05/2008	5.90	1134.03
01/04/2008	20.90	1761.663	12/05/2008	5.60	1134.211
02/04/2008	21.15	1760.691	13/05/2008	6.25	1155.682
03/04/2008	18.65	1457.587	14/05/2008	7.05	1230.107
04/04/2008	13.85	1527.267	15/05/2008	7.00	1226.491
05/04/2008	6.65	1340.445	16/05/2008	8.55	1268.594
06/04/2008	6.90	1038.77	17/05/2008	10.60	1541.517
07/04/2008	11.50	1139.815	18/05/2008	8.85	1746.048
08/04/2008	8.00	1458.411	19/05/2008	10.95	1534.552
09/04/2008	8.85	1509.366	20/05/2008	8.90	1516.329
10/04/2008	14.80	1666.901	21/05/2008	7.25	1409.517
11/04/2008	106.20	2092.418	22/05/2008	6.30	1336.804
12/04/2008	190.00	3146.576	23/05/2008	14.45	1271.328
13/04/2008		3425.877	24/05/2008		1316.209
14/04/2008	182.80	3043.545	25/05/2008		1266.425
15/04/2008	117.20	2871.44	26/05/2008		1729.391
16/04/2008	66.70	2839.563	27/05/2008	124.00	2669.112
17/04/2008	50.40	2816.304	28/05/2008	776.20	2836.587
18/04/2008	41.80	2618.568	29/05/2008	570.30	3096.67
19/04/2008	38.50	2681.472	30/05/2008	920.00	3821.918
20/04/2008	45.20	2667.431	31/05/2008		4156.09
21/04/2008	70.80	3125.473	01/06/2008		3568.524
22/04/2008	88.07	3244.453	02/06/2008	941.70	3400.517
23/04/2008	50.93	2766.216	03/06/2008	856.60	3658.332
24/04/2008	35.20	2427.107	04/06/2008		3419.519
25/04/2008	27.85	2267.865	05/06/2008	822.40	3010.28
26/04/2008	19.25	2129.446	06/06/2008		2741.972
27/04/2008	16.30	1899.708	07/06/2008		2694.745
28/04/2008	16.20	1801.75	08/06/2008		2885.983
29/04/2008	18.80	1981.108	09/06/2008		2994.644
30/04/2008	16.50	1898.418	10/06/2008	563.70	2866.822
01/05/2008	17.70	1756.894	11/06/2008		2822.147
02/05/2008	13.30	1486.086	12/06/2008		2782.951
03/05/2008	11.55	1470.938	13/06/2008	486.20	2627.945
04/05/2008	8.70	1199.15	14/06/2008	286.80	2362.524
05/05/2008	8.15	1271.15	15/06/2008	153.60	2048.853
06/05/2008	8.75	1531.794	16/06/2008	96.60	2008.466
07/05/2008	8.50	1532.469	17/06/2008	87.30	2108.222
08/05/2008	7.50	1425.778	18/06/2008	72.60	2399.282

**Annexe F11 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 29/03/08 et le 18/06/08 (données de la station SORA).**



Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
19/06/2008	102.40	2230.573	30/07/2008	11.20	789.551
20/06/2008	110.50	1888.471	31/07/2008	8.20	847.749
21/06/2008	75.85	1799.855	01/08/2008	7.65	819.237
22/06/2008	77.40	1609.764	02/08/2008	6.85	791.079
23/06/2008	58.20	1605.449	03/08/2008	8.70	482.539
24/06/2008	41.80	1751.624	04/08/2008	8.85	618.191
25/06/2008	35.05	1687.568	05/08/2008	7.05	737.263
26/06/2008	29.75	1621.644	06/08/2008	5.80	703.861
27/06/2008	26.50	1577.797	07/08/2008	5.00	707.294
28/06/2008	21.60	1493.812	08/08/2008	3.80	738.146
29/06/2008	21.85	1359.083	09/08/2008	6.35	495.295
30/06/2008	20.75	1352.655	10/08/2008		417.855
01/07/2008	14.90	1365.96	11/08/2008		630.451
02/07/2008	40.50	1342.823	12/08/2008	10.65	1080.96
03/07/2008	13.75	1422.717	13/08/2008	15.45	1468.035
04/07/2008	17.60	1582.336	14/08/2008	56.40	1502.025
05/07/2008	69.85	1522.983	15/08/2008	68.95	1465.127
06/07/2008	18.55	1381.786	16/08/2008	25.85	1308.02
07/07/2008	18.35	1479.897	17/08/2008	15.55	1047.928
08/07/2008	17.55	1542.494	18/08/2008	11.30	1023.341
09/07/2008	16.15	1392.105	19/08/2008	17.60	1045.156
10/07/2008	15.70	1209.739	20/08/2008	13.95	1020.332
11/07/2008	11.95	1199.541	21/08/2008	13.75	961.856
12/07/2008	10.40	1389.679	22/08/2008	12.35	932.428
13/07/2008	12.00	1429.468	23/08/2008	10.10	787.77
14/07/2008	39.40	1384.654	24/08/2008	11.10	635.54
15/07/2008	17.65	1312.535	25/08/2008	11.00	770.453
16/07/2008	20.25	1339.867	26/08/2008	10.10	936.623
17/07/2008	15.80	1223.879	27/08/2008	14.05	845.622
18/07/2008	11.45	1079.741	28/08/2008	12.00	816.908
19/07/2008	6.75	1022.104	29/08/2008	10.00	806.59
20/07/2008	10.70	869.859	30/08/2008	9.65	707.582
21/07/2008	10.70	730.646	31/08/2008	8.40	634.446
22/07/2008	7.20	717.208	01/09/2008	15.00	633.733
23/07/2008	7.95	740.355	02/09/2008	14.60	868.924
24/07/2008	7.35	756.487	03/09/2008	19.30	939.974
25/07/2008	4.70	700.688	04/09/2008	111.20	1633.328
26/07/2008	3.85	579.181	05/09/2008	305.20	2249.751
27/07/2008		547.896	06/09/2008	265.70	2431.883
28/07/2008	12.45	729.76	07/09/2008	355.10	3012.368
29/07/2008	8.85	793.146	08/09/2008	285.10	2983.489

**Annexe F12 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 19/06/08 et le 08/09/08 (données de la station SORA).**

Date	[MES] (mg.L <sup>-1</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
09/09/2008	246.90	2458.578
10/09/2008	138.60	2132.628
11/09/2008	83.73	1898.786
12/09/2008	75.93	1729.268
13/09/2008	91.00	1939.085
14/09/2008	174.60	2406.456
15/09/2008	338.90	2669.851
16/09/2008	312.90	2359.095
17/09/2008	217.40	2305.643
18/09/2008	52.07	2134.686
19/09/2008	22.87	2171.16
20/09/2008	70.93	1692.39
21/09/2008	60.85	1294.54
22/09/2008	22.95	1287.54
23/09/2008	59.45	1346.38
24/09/2008	17.59	1266.94
25/09/2008	15.02	1158.49
26/09/2008	12.16	1027.83
27/09/2008	9.60	899.043
28/09/2008	7.04	753.773
29/09/2008	10.10	925.041
30/09/2008	10.82	961.663
01/10/2008	9.56	896.941
02/10/2008	7.25	766.755
03/10/2008	8.03	812.34
04/10/2008	5.94	684.59
05/10/2008	5.55	659.265
06/10/2008	5.88	680.962
07/10/2008	9.61	899.193
08/10/2008	13.59	1094.68
09/10/2008	18.30	1295.31
10/10/2008	15.32	1171.53
11/10/2008	9.13	873.805
12/10/2008	4.88	612.446
13/10/2008	7.53	783.444
14/10/2008	10.71	956.44

**Annexe F13 : Débit du Rhône et concentrations en MES en Arles entre le 09/09/08 et le 14/10/08 (données de la station SORA).**

# ANNEXE G : Granulométrie des sédiments superficiels du Golfe du Lion et du prodelta

Campagne	Station	Long. (DMS)	Lat. (DMD)	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)
CARMEX	US04Kb	4.8665	43.3173	25	13.75	70.93	15.32
CARMEX	US14Kb	4.8354	43.3120	23.5	13.58	66.50	19.92
CARMEX	USCh20m	4.8527	43.3114	23	13.72	71.24	15.04
CARMEX	US19	4.4014	43.4402	9	6.19	30.29	63.52
CARMEX	USHCh20m	4.8512	43.3115	22	14.06	65.76	20.18
CARMEX	US18	4.4197	43.3525	28	15.62	62.54	21.84
CARMEX	USRous	4.8411	43.3103	29	14.18	72.28	13.54
CARMEX	US19bis	4.4011	43.4420	7.3	8.55	38.27	53.18
CARMEX	USCh30m	4.8549	43.3131	49	12.75	60.42	26.82
SED2	2004USCh30m	4.8538	43.3128	30	19.22	71.44	9.33
SED2	2004USCh20m	4.8535	43.3141	22	14.02	66.12	19.86
SED2	2004US01ter	4.6681	43.2667	58	26.80	69.56	3.64
SED2	2004USRous	4.8410	43.3103	32	19.86	68.90	11.24
SED2	2004USCh2	4.8608	43.3155	23	17.92	67.46	16.62
SED2	2004US353	3.1520	42.7119	52	23.47	70.29	6.24
SED2	2004US16Kb	4.8241	43.3207	14	25.12	54.14	20.74
SED2	2004US14Kb	4.8363	43.3131	23	17.58	69.06	13.36
BOBORH2	2004BF06	4.8669	43.3168	27	16.73	72.03	11.24
BOBORH2	2004BF05	4.8533	43.3116	26.5	13.86	75.18	10.95
BOBORH2	2004BF07accu	4.8686	43.3106	43	26.76	66.32	6.92
BOBORH1	2003BF09Ch2	4.3143	43.3143	29	19.68	61.82	18.50
BOBORH1	2003BF07	4.3106	43.3106	45	27.48	64.76	7.76
BOBORH1	2003BF05Ch30	4.3116	43.3116	28	21.96	59.94	18.10
BOBORH1	2003BF06MT04kb	4.3116	43.3116	26.5	12.88	50.86	36.26
BOBORH1	2003-8-Ch1	4.3145	43.3145	27	18.86	57.28	23.86
BOBORH1	2003BF13	4.2951	43.2951	68	32.66	64.00	3.34
REMORA3	2002MT01	4.9142	43.2412	96	23.83	69.19	6.99
REMORA3	2002MT01bis	4.7676	43.3175	26	13.49	60.14	26.37
REMORA3	2002MT01ter	4.6782	43.2670	57	21.75	68.16	10.09
REMORA3	2002MT02	4.8543	43.1395	106	26.18	68.62	5.19
REMORA3	2002MT02bis	4.7646	43.2181	90	19.32	73.59	7.09
REMORA3	2002MT03	4.8216	43.0477	112	19.41	51.71	28.88
REMORA3	2002MT04bis	4.7969	42.9007	781	30.10	61.48	8.42
REMORA3	2002MT05	4.5641	43.3054	41	20.68	68.35	10.97
REMORA3	2002MT06	4.5820	43.1175	83	29.39	67.81	2.79
REMORA3	2002MT08bis	4.6380	42.8225	1064	32.04	61.27	6.69
REMORA3	2002MT09	4.4024	43.4413	9	13.09	54.04	32.87
REMORA3	2002MT09x	4.8324	43.2328	95	27.56	69.80	2.64
REMORA3	2002MT10	4.4206	43.3533	28	19.85	66.11	14.05
REMORA3	2002MT11	4.3335	43.1631	86	28.60	66.15	5.25
REMORA3	2002MT12bis	4.4691	42.8823	625	30.55	69.20	0.24
REMORA3	2002MT13bis	4.4339	42.7670	913	26.16	63.11	10.73
REMORA3	2002MT14	4.2014	43.3808	43	23.60	70.92	5.47
REMORA3	2002MT15	3.9334	43.4522	25	8.77	66.66	24.57
REMORA3	2002MT16	4.0858	43.2179	92	28.41	67.24	4.35
REMORA3	2002MT17	4.2059	43.0264	93	17.51	43.61	38.88
REMORA3	2002MT18bis	4.2331	42.8588	129	16.43	45.34	38.23

**Annexe G1 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion et du prodelta : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IRSN).**

Campagne	Station	Long. (DMS)	Lat. (DMD)	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)
REMORA3	2002MT19	4.2225	42.6757	1133	25.55	62.61	11.84
REMORA3	2002MT20	3.6678	43.3335	29	14.84	66.04	19.12
REMORA3	2002MT21b	3.5339	43.2256	37	16.67	67.50	15.83
REMORA3	2002MT22	3.4174	43.2049	29	15.08	56.42	28.51
REMORA3	2002MT23bis	3.3503	43.1778	31	17.01	63.90	19.09
REMORA3	2002MT24	3.6665	43.1664	81	33.25	60.42	6.33
REMORA3	2002MT25	3.8472	43.0485	100	24.78	63.23	11.98
REMORA3	2002MT26bis	3.9699	42.8507	481	27.10	64.93	7.97
REMORA3	2002MT27bis	3.9894	42.5925	988	38.16	61.32	0.52
REMORA3	2002MT28	3.2802	43.2036	20	9.62	38.74	51.64
REMORA3	2002MT29bis	3.4509	42.9107	93	30.90	68.47	0.63
REMORA3	2002MT31	3.7246	42.8235	124	17.15	47.94	34.91
REMORA3	2002MT31bis	3.6980	42.7271	503	25.99	63.39	10.62
REMORA3	2002MT33	3.1465	43.0262	34	16.54	72.20	11.26
REMORA3	2002MT34bis	3.3256	42.6920	91	19.45	54.60	25.95
REMORA3	2002MT35	3.0648	42.7155	27	11.35	61.02	27.64
REMORA3	2002MT37 bis	3.2062	42.5825	81	21.95	65.87	12.18
REMORA3	2002MT38bis	3.3895	42.5418	603	30.40	64.51	5.09
REMORA3	2002MT39bis	3.5091	42.4483	843	26.40	70.76	2.84
REMORA3	2002MT352	3.0638	42.7278	27	3.68	53.57	42.75
REMORA3	2002MT353	3.1523	42.7119	51	19.96	74.17	5.87
REMORA3	2002Chenal20m	4.8535	43.3142	21	14.94	70.44	14.61
REMORA3	2002hchenal20m	4.8530	43.3140	22	15.48	72.33	12.19
REMORA3	2002MT04kb	4.8678	43.3181	27	22.95	67.31	9.74
REMORA3	2002MT14kb	4.8365	43.3132	27	20.00	63.57	16.43
REMORA3	2002MT16kb	4.8239	43.3203	15	19.12	73.52	7.36
REMORA3	2002MTPlanier1	5.2213	43.0951	561	25.36	69.28	5.35
REMORA3	2002MT36	3.0998	42.6146		7.76	41.55	50.69
REMORA3	2002Chenal30m	4.8538	43.3127	35	19.82	56.83	23.35
REMORA2	2001Kb01	4.8928	43.3339	16.5	14.3	62.9	22.8
REMORA2	2001Kb02	4.8759	43.3332	8.8	23.9	65.3	10.8
REMORA2	2001Kb03	4.8934	43.3252	32.2	21.1	70.8	8.1
REMORA2	2001Kb04bis	4.8686	43.3169	29.3	20.3	67.7	12
REMORA2	2001Kb05	4.8918	43.3088	57	41.3	57.2	1.5
REMORA2	2001Kb06	4.8768	43.3001	62.7	36.4	59.8	3.8
REMORA2	2001Kb07	4.8920	43.2921	71.2	43.1	56.4	0.5
REMORA2	2001Kb08	4.8580	43.2917	75	30.9	64.1	5
REMORA2	2001Kb09	4.8334	43.2834	74.7	24.9	70	5.1
REMORA2	2001Kb10	4.8100	43.2925	69	24.9	70	5.1
REMORA2	2001Kb11	4.8313	43.2995	62	27.1	67.3	5.6
REMORA2	2001Kb12	4.8125	43.3087	47	21.7	71.3	7
REMORA2	2001Kb13	4.7825	43.3113	38.2	28.4	65.7	5.9
REMORA2	2001Kb14bis	4.8330	43.3123	26	22.9	64.9	12.2
REMORA2	2001Kb15	4.8308	43.3164	29.3	18.6	74.1	7.3
REMORA2	2001Kb16	4.8235	43.3202	12.5	18.9	61.1	20
REMORA2	2001Kb17	4.8580	43.2919	69.7	27.9	68.6	3.5
REMORA2	2001KbRous	4.8503	43.3085	45	19.5	68.9	11.6
REMORA1	2001MTROUS	4.8420	43.3103	34	18.24	69.69	12.07

**Annexe G2 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion et du prodelta : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IRSN).**

Campagne	Station	Long. (DMS)	Lat. (DMD)	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)
REMORA1	2001MT01	4.9178	43.3362	22	15.38	50.92	33.70
REMORA1	2001MT02	4.9179	43.3067	66	28.69	66.61	4.70
REMORA1	2001MT03	4.9163	43.2828	81	29.04	70.38	0.58
REMORA1	2001MT04	4.9667	43.2667	87	22.65	67.33	10.03
REMORA1	2001MT05	4.9139	43.2421	97	29.71	66.33	3.95
REMORA1	2001MT06	4.9000	43.2000	106	22.47	70.75	6.77
REMORA1	2001MT07	4.9333	43.1667	111	26.17	70.32	3.51
REMORA1	2001MT09	4.8332	43.2325	95	26.58	70.07	3.36
REMORA1	2001MT10	4.7652	43.2173	90	28.17	70.81	1.02
REMORA1	2001MT11	4.7317	43.1689	90	26.62	67.40	5.98
REMORA1	2001MT12	4.6500	43.1667	75	28.14	68.49	3.37
REMORA1	2001MT13	4.6951	43.2204	74	25.32	71.08	3.60
REMORA1	2001MT14	4.6798	43.2665	57	23.78	72.08	4.14
REMORA1	2001MT16	4.7134	43.2939	40	18.87	67.48	13.65
REMORA1	2001MT17	4.7675	43.3180	26	15.91	62.37	21.73
REMORA1	2001MT18	4.7670	43.2927	60	23.67	74.36	1.97
REMORA1	2001MT19	4.7747	43.2697	75	23.20	70.61	6.19
REMORA1	2001MT20	4.8204	43.2639	85	25.67	69.22	5.11
REMORA1	2001MT21	4.8742	43.2698	89	28.21	67.67	4.12
REMORA1	2001MT22	4.7300	43.2468	73	25.60	73.79	0.61
REMORA1	2001MT23	4.7750	43.2392	87	24.73	71.59	3.69

**Annexe G3 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion et du prodelta : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IRSN).**

Station	Long DD	Lat DD	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	D50 (µm)
LSR101	3.4153	42.6118	104	19.4	57.3	23.3	13.43
LDML349	3.3958	42.5670	356	31.2	44.6	24.2	7.968
LDVL99	3.3615	42.5715	101	13.5	36.8	49.7	61.45
LDVL108	3.3800	42.5645	109	7.78	23.02	69.2	146.1
LDVL248	3.3977	42.5592	199	30.9	60.5	8.6	6.496
LDRL472	3.4178	42.5585	473	30.3	62.9	6.8	7.054
LDRL158	3.4392	42.5797	193	2.63	11.47	85.9	384.7
LDVL100	3.4488	42.5885	102	9.64	25.86	64.5	334.9
LDVR105	3.4627	42.6000	107	11.6	42.7	45.7	48.45
LDCL173	3.4077	42.5973	181	22.1	44.7	33.2	20.52
LDLL192	3.3838	42.5963	208	19.8	49.1	31.1	17.24
LDLL103	3.3760	42.5983	128	11.3	41	47.7	54.81
LDMT597	3.4238	42.5438	544	29.7	48.3	22	8.089
LDRS108	3.4697	42.5460	109	17.9	54.3	27.8	20.93
m200 sur	3.3038	42.4018	203	16.5	54.3	29.2	28.3
m200b	3.3037	42.4008	201	22.4	65	12.6	12.65
m500a	3.3623	42.3733	506	31.6	62.8	5.6	6.972
m500b	3.3622	42.3733	506	33.1	60.2	6.7	6.653
m500c	3.3622	42.3737	503	31.3	63.3	5.4	7.18
m750a	3.4643	42.3447	748	7.14	26.16	66.7	174.7
m750b	3.4633	42.3457	748	6.75	25.25	68	174.4
m750c	3.4628	42.3458	746	4.48	14.72	80.8	347.8
CC1240	3.7078	42.2570	1184	35	62.3	2.7	6.033
CC1670	3.9063	42.1990	1683	19.3	65.2	15.5	11.97
CC1835	4.0833	42.1723	1836	28.7	62.4	8.9	7.6
CTD2150	4.3437	42.2475	2147	29.7	66.1	4.2	7.019
LD1800	4.1962	42.3112	1810	30.6	61.5	7.9	7.32
SM87	4.3158	43.0500	92	28.6	59.3	12.1	7.745
SN85	4.3658	43.0834	91	20.3	71.3	8.4	13.1
SO80	4.5083	43.1257	84	28.3	68.6	3.1	7.291
SP77	4.6505	43.2168	70	26.4	71	2.6	7.885
F31	4.8518	43.3123	26	17.3	72.5	10.2	12.41
RD38	4.8592	43.3140	36	15.3	70.6	14.1	15.55
RD36	4.8613	43.3140	29	17.3	73.1	9.6	12.7
RC35	4.8693	43.3160	35	17	74.1	8.9	12.2
RB41	4.8738	43.3155	42	16.6	76.1	7.3	12.68
RB49	4.8737	43.3125	49	21.2	74.7	4.1	9.29
RC50	4.8693	43.3110	47	18.7	75.7	5.6	11.47
E33	4.8647	43.3135	35	16.5	73.2	10.3	13.26
RD43	4.8592	43.3115	37	16.7	74.6	8.7	12.88
F32	4.8508	43.3098	35	22.8	71.1	6.1	8.565
G20	4.8408	43.3116	23	18.6	71.6	9.8	11.09
G31	4.8393	43.3090	35	16.6	73.1	10.3	12.41
RD65	4.8587	43.3003	63	29.3	66.8	3.9	7.142
RD60	4.8592	43.3040	59	22.5	69.4	8.1	9.778

**Annexe G4 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IFREMER, Universités de Perpignan et de Washington).**

Station	Long DD	Lat DD	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	D50 (µm)
RD53	4.8587	43.3080	48	19.2	72.7	8.1	10.73
RB55	4.8738	43.3092	53	21.4	72.3	6.3	10.32
RB60	4.8738	43.3057	60	18.4	74	7.6	11.92
RB65 a	4.8737	43.3020	65	26.8	68	5.2	7.813
RB69	4.8745	43.2993	68	22.5	70.9	6.6	9.958
RD71	4.8575	43.2957	70	24.7	67.3	8	9.238
SS80	4.7842	43.2643	82	30.5	65.7	3.8	7.06
SQ67	4.6548	43.2403	66	27.2	69.7	3.1	7.761
SO66	4.5087	43.2253	67	20.6	73.2	6.2	11.51
SN76	4.3632	43.2178	78	28.3	70.1	1.6	7.451
SM61	4.3170	43.2748	64	29.3	66.9	3.8	7.642
SL72	4.2005	43.2858	74	36.2	63.7	0.1	5.644
SK63	4.1054	43.3442	65	33.2	62.3	4.5	6.438
SJ78	4.0031	43.3237	79	29.9	69.3	0.8	6.854
SI65	3.8870	43.3438	66	26.2	67.5	6.3	8.459
SG61	3.7093	43.2485	64	24.2	70.9	4.9	9.366
SF75	3.6283	43.1675	77	31.8	64.8	3.4	6.813
SE62	3.5040	43.1262	63	24.7	71.4	3.9	8.324
SD79	3.4698	43.0513	81	22.7	73.1	4.2	9.915
SC63	3.3223	43.0086	64	29	68.2	2.8	7.462
SB77	3.3217	42.9045	79	33.9	62.8	3.3	6.186
SA65	3.2255	42.8277	66	19.1	78	2.9	12.48
LD670	3.4395	42.5245	686	30.7	64.1	5.2	7.018
LD1190	3.6218	42.4027	1170	37.3	59.2	3.5	5.564
T56	3.4500	42.3347	671	26.3	66.8	6.9	8.416
T57	3.4505	42.3417	700	30.2	65.7	4.1	7.037
T59	3.4507	42.3495	711.5	16.6	53.2	30.2	22.35
CS0121	3.31495	42.4116	121	16.90	52.00	31.10	23.63
CS0163	3.311783333	42.40516667	163	20.60	58.60	20.80	17.3
CS0159b	3.302633333	42.39833333	159	6.13	16.07	77.80	217.2
CS0183	3.323866667	42.39943333	183	26.50	69.50	4.00	9.659
CS0149	3.323916667	42.3999	149	25.5	70.60	3.90	10.49
CSD107	3.2868	42.39675	107	15.50	49.00	35.50	28.78
CSD100	3.25865	42.39666667	100	14.00	57.30	28.70	29.17
CSD91	3.239666667	42.39706667	91	14.70	59.30	26.00	27.31
CSD84	3.223133333	42.3964	84	18.60	72.60	8.80	14.7
CSD58	3.197216667	42.3972	58	15.60	75.30	9.10	18.93
CSB66	3.196716667	42.41688333	66	15.30	70.90	13.80	19.64
CSB84	3.215416667	42.41681667	84	15.80	67.20	17.00	21.21
CSB92	3.23265	42.4167	92	15.10	66.80	18.10	23.19
CSB100	3.25825	42.4169	100	11.70	47.10	41.20	47.92
CSB112	3.283533333	42.41635	112	9.17	30.43	60.40	140
CSB123	3.33585	42.41556667	122	13.5	40.8	45.7	49.33
CTU195	3.30635	42.4021	195	13.2	39.7	47.1	55.46
CTU231	3.317466667	42.3973	231	23.4	66.5	10.1	11.48
CTU255	3.31995	42.39563333	244	26.7	67.5	5.8	10.27

**Annexe G5 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IFREMER, Universités de Perpignan et de Washington).**

Station	Long DD	Lat DD	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	D50 (µm)
CTM492	3.366266667	42.37301667	492	22.1	68	9.9	12.15
CTM538	3.386966667	42.36538333	538	20.7	68	11.3	13.29
CTM571	3.38775	42.36048333	571	24.8	68.8	6.4	9.906
CTL643	3.39425	42.35668333	643	22.7	70.2	7.1	10.89
CTL670	3.448616667	42.35293333	670	27.9	69.6	2.5	8.096
CTL760	3.46985	42.3459	760	26.1	65.4	8.5	8.928
CTL780	3.478816667	42.3424	780	24.9	72	3.1	9.201
CFL680	3.436066667	42.33721667	680	22.7	73.7	3.6	10.64
CFL700	3.474833333	42.3489	700	24.7	69.7	5.6	9.568
CFL265	3.463266667	42.36686667	266	19.4	68	12.6	16.28
CFL355	3.463533333	42.36343333	355	23.4	68.8	7.8	10.92
CFL410	3.4638	42.36188333	410	26.3	70.9	2.8	8.774
CFL665b	3.4636	42.3558	665	25.7	70.7	3.6	9.043
KCFL665b	3.463433333	42.35591667	656		0	0	
CFM490	3.394716667	42.36788333	440	19.9	71.9	8.2	13.59
CFM369	3.394716667	42.3713	369	21.9	66.9	11.2	11.54
CFM278	3.399366667	42.3758	278	20.1	69.6	10.3	13.81
CFM138	3.405283333	42.38186667	138	20.1	60.4	19.5	18.32
CFM483	3.3765	42.37096667	483	18.4	67	14.6	16.22
CTU411	3.341783333	42.38255	411	16.9	60.7	22.4	18.43
CFU415	3.34785	42.37151667	415	18.2	68.2	13.6	15.75
CFU207	3.32965	42.39653333	207	27.3	68	4.7	9.024
CFU173	3.328283333	42.36005	173	5.94	23.16	70.9	152
A1_120	3.63255	42.7928	143.9	18.50	59.70	21.80	20.67
A1_285	3.67445	42.76828333	289.5	28.20	66.30	5.50	8.149
CC1_150	3.2997	42.40471667	152.6	20.00	59.50	20.50	18.38
CC1_200	3.306633333	42.4022	204.4	4.89	16.71	78.40	198.4
CC1_290	3.3178	42.39316667	290.2	17.60	50.90	31.50	20.65
CC1_400	3.3388	42.38213333	405	16.50	52.50	31.00	23.51
K30	3.093333333	42.58265	30.2	10.70	64.00	25.30	39.17
K35	3.109633333	42.58325	36.9	15.90	69.60	14.50	22.17
K50	3.143783333	42.58291667	50.2	12.60	69.60	17.80	26.46
K80	3.2053	42.5835	80.2	16.30	77.50	6.20	15.86
LD1_140	3.39535	42.61175	138.9	20.40	58.00	21.60	16.51
LD1_300	3.397083333	42.59775	307.5	23.80	66.70	9.50	11.69
U50	3.188233333	42.4221	53.4	14.00	68.30	17.70	25.34
U85	3.21925	42.42053333	82.7	18.10	69.10	12.80	18.51
K35	3.108766667	42.58286667	34.4	11.30	60.70	28.00	42.06
K50	3.143633333	42.58296667	48.8	19.50	72.90	7.60	13.88
K80	3.205466667	42.58355	79.2	22.00	70.90	7.10	12.49
CC2_150	3.299633333	42.40496667	150	10.30	34.90	54.80	87.23
CC2_200	3.305816667	42.40205	204.4	9.87	28.23	61.90	171.5
CC2_290	3.319033333	42.39338333	296.4	20.20	64.30	15.50	15.98
CC2_400	3.339	42.3825	407.2	20.10	66.60	13.30	13.52
CC2_500	3.367766667	42.37283333	511.6	19.20	69.70	11.10	14.85
CC2_610	3.4081	42.3542	613.6	19.60	67.80	12.60	14.99

**Annexe G6 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IFREMER, Universités de Perpignan et de Washington).**



Station	Long DD	Lat DD	z (m)	Argiles (%)	Silts (%)	Sables (%)	D50 (µm)
LD2_140	3.396083333	42.61181667	136.8	21.00	56.00	23.00	17.31
LD2_300	3.397266667	42.59783333	305.5	13.50	38.50	48.00	53.65
LD2_480	3.406166667	42.56495	486.4	26.00	66.00	8.00	9.253
LD2_680	3.442966667	42.52381667	683.2	22.50	64.40	13.10	11.86
U50	3.18815	42.42223333	51.6	13.60	71.70	14.70	23.52
U85	3.219466667	42.4204	83.6	11.60	51.00	37.40	38.43
U100	3.26845	42.42058333	100	16.8	60.3	22.9	20.15
CC2_F1	3.353933333	42.3584	355.6	23.1	69.5	7.4	11.2
CC2_F2	3.3588	42.36421667	442	22.7	72.5	4.8	11.06
CC2_F3	3.37145	42.37536667	385.6	25.3	70.5	4.2	10.45
CC2_F4	3.376016667	42.37988333	354.8	21.1	71.7	7.2	11.84
XX35	3.099216667	42.78443333	35.6	11.3	41.7	47	56.87
XX50	3.168133333	42.78413333	50	17	74.4	8.6	15.69
XX80	3.264366667	42.78458333	79.6	17.8	77.7	4.5	15.29
CSE55	3.207866667	42.37495	59	16.20	74.70	9.10	17.5
CSE60	3.22055	42.3796	73	20.60	72.80	6.60	12.4
CSE70	3.2369	42.38393333	?	18.60	69.90	11.50	15.8
J01	3.36975	42.32651667	128.7	11.80	32.40	55.80	144
CST135	3.326583333	42.40835	126.3	23.70	63.40	12.90	12.6
CFU207	3.3298	42.39623333	213.4	44.00	56.00	0.00	4.73
CEU250	3.330266667	42.38901667	343.7	27.90	66.10	6.00	8.79
CTM492	3.366666667	42.37306667	501.2	28.00	71.80	0.20	7.97
R55	3.174466667	42.47328333	53	14.40	67.10	18.50	23.75
R87	3.21145	42.47351667	90	16.50	67.80	15.70	19.43
R92	3.266	42.47398333	95	11.60	42.90	45.50	52.28
R107	3.334316667	42.4744	113	11.70	37.70	50.60	64.78
CSF50	3.241933333	42.36345	85	16.40	72.70	10.90	17.07
CSG50	3.261883333	42.3536	92	13.20	64.00	22.80	25.82
CTM571a	3.389733333	42.36425	550	22.20	61.20	16.60	11.73
CFM560	3.38325	42.35603333	565	28.00	67.20	4.80	9.789
CFM500	3.378416667	42.34825	483	21.40	74.30	4.30	11.65
CFM300	3.36865	42.3779	344	21.00	65.70	13.30	13.5
CFM230	3.371	42.3684	216	24.50	64.60	10.90	12.7
CC5_F4	3.378483333	42.39121667	200	12.10	36.30	51.60	80.5
CC5_F5	3.381316667	42.39743333	131	19.30	58.20	22.50	19.1
#3	3.366933333	42.323	126	17.90	65.20	16.90	18.6
#20	3.324466667	42.36466667	124	16.40	63.90	19.70	23
NCC70	3.2971	42.34726667	95	20.1	69.1	10.8	13.11
NCC80	3.3317	42.33658333	103	17.3	66.7	16	16.91

**Annexe G7 : Distribution granulométrique des sédiments du Golfe du Lion : proportion des argiles, silts et sables (campagnes IFREMER, Universités de Perpignan et de Washington).**

## ANNEXE H : Les radioéléments dans les sédiments

Campagne	Station	Long. DD	Lat. DD	z (m)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq.m <sup>-2</sup> )	<sup>137</sup> Cs (Bq.m <sup>-2</sup> )
REMORA3	2002MT01bis	4.76762	43.31752	-26	6610.80	2072.00
REMORA3	2002MT01ter	4.67822	43.26702	-57	16254.00	3231.20
REMORA3	2002MT02	4.85427	43.13945	-106	1269.80	13220.20
REMORA3	2002MT02bis	4.76457	43.21808	-90	18571.00	3781.40
REMORA3	2002MT04bis	4.79692	42.90065	-781	454.44	12675.60
REMORA3	2002MT05	4.56410	43.30538	-41	1502.20	10327.80
REMORA3	2002MT06	4.58199	43.11754	-83	1114.40	8201.20
REMORA3	2002MT08bis	4.63795	42.82248	-1064	524.02	15549.80
REMORA3	2002MT09x	4.83235	43.23277	-95	16184.00	3327.80
REMORA3	2002MT10	4.42057	43.35328	-28	132.30	2083.20
REMORA3	2002MT11	4.33345	43.16310	-86	708.40	7690.20
REMORA3	2002MT13bis	4.43390	42.76698	-913	456.12	17957.80
REMORA3	2002MT14	4.20135	43.38083	-43	635.46	5985.00
REMORA3	2002MT15	3.93337	43.45217	-25	335.16	3708.60
REMORA3	2002MT16	4.08583	43.21787	-92	600.74	8624.00
REMORA3	2002MT17	4.20587	43.02637	-93	303.24	5801.60
REMORA3	2002MT18bis	4.23313	42.85880	-129	195.16	4373.60
REMORA3	2002MT21b	3.53388	43.22558	-37	520.52	5583.20
REMORA3	2002MT24	3.66648	43.16642	-81	174.02	3054.80
REMORA3	2002MT25	3.84717	43.04853	-100	410.06	8653.40
REMORA3	2002MT27bis	3.98942	42.59253	-988	263.06	6321.00
REMORA3	2002MT29bis	3.45093	42.91068	-93	438.34	8939.00
REMORA3	2002MT31bis	3.69795	42.72705	-503	367.36	13015.80
REMORA3	2002MT33	3.14653	43.02615	-34	557.90	6874.00
REMORA3	2002MT35	3.06478	42.71545	-27	4258.80	292.60
REMORA3	2002MT38bis	3.38948	42.54182	-603	614.60	23569.00
REMORA3	2002MT352	3.06380	42.72783	-27	3145.80	228.48
REMORA3	2002Chenal20m	4.85353	43.31420	-21	9674.00	2814.00
REMORA3	2002hchenal20m	4.85302	43.31402	-22	5700.80	1568.98
REMORA3	2002MT04kb	4.86778	43.31805	-27	7456.40	2063.60
REMORA3	2002MT16kb	4.82385	43.32032	-15	7712.60	1705.20
REMORA3	2002Chenal30m	4.85383	43.31267	-35	5327.00	1544.20
REMORA2	2001Kb04bis	4.86858	43.31693	-29.3	10794.00	3304.00
REMORA2	2001Kb05	4.89177	43.30877	-57	12250.00	5082.00
REMORA2	2001Kb06	4.87677	43.30008	-62.7	13510.00	4172.00
REMORA2	2001Kb13	4.78248	43.31127	-38.2	18004.00	11872.00
REMORA2	2001Kb15	4.83075	43.31642	-29.3	7056.00	2982.00
REMORA2	2001Kb16	4.82352	43.32023	-12.5	5726.00	2142.00

**Annexe H1 : Concentration des sédiments superficiels du Golfe du Lion et du prodelta en <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> et <sup>137</sup>Cs en Bq.m<sup>-2</sup> (données des campagnes de l'IRSN).**

Campagne	Station	Long. DD	Lat. DD	z (m)	<sup>210</sup> Pb (Bq.m <sup>-2</sup> )	<sup>137</sup> Cs (Bq.m <sup>-2</sup> )
REMORA2	2001KbRous	4.85033	43.30850	-45	7756.00	2884.00
REMORA1	2001MTROUS	4.84200	43.31033	-34	7905.80	3257.80
REMORA1	2001MT01	4.91783	43.33617	-22	2580.20	461.44
REMORA1	2001MT02	4.91792	43.30671	-66	16937.20	5376.00
REMORA1	2001MT03	4.91630	43.28278	-81	20302.80	6281.80
REMORA1	2001MT04	4.96667	43.26667	-87	16968.00	2783.48
REMORA1	2001MT05	4.91393	43.24211	-97	16182.60	4270.00
REMORA1	2001MT06	4.90000	43.20000	-106	25523.40	4018.00
REMORA1	2001MT07	4.93333	43.16667	-111	18480.00	1847.86
REMORA1	2001MT08	4.83317	43.16886		16850.40	2499.98
REMORA1	2001MT09	4.83317	43.23250	-95	26828.20	7575.40
REMORA1	2001MT10	4.76517	43.21733	-90	30097.20	8589.00
REMORA1	2001MT11	4.73171	43.16886	-90	25442.20	4901.40
REMORA1	2001MT12	4.65000	43.16667	-75	20361.60	3943.10
REMORA1	2001MT13	4.69510	43.22038	-74	25053.00	5769.40
REMORA1	2001MT14	4.67983	43.26650	-57	19164.60	5770.80
REMORA1	2001MT15	4.65000	43.29385		6120.80	1065.96
REMORA1	2001MT16	4.71342	43.29385	-40	15968.40	6216.00
REMORA1	2001MT17	4.76750	43.31800	-26	5845.00	1986.60
REMORA1	2001MT18	4.76695	43.29265	-60	24056.20	10717.00
REMORA1	2001MT19	4.77472	43.26971	-75	27332.20	9954.00
REMORA1	2001MT20	4.82037	43.26388	-85	23055.20	9851.80
REMORA1	2001MT21	4.87418	43.26981	-89	18793.60	5782.00
REMORA1	2001MT22	4.73003	43.24679	-73	24445.40	7442.40
REMORA1	2001MT23	4.77496	43.23924	-87	29311.80	8349.60

**Annexe H2 : Concentration des sédiments superficiels du Golfe du Lion et du prodelta en <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> et <sup>137</sup>Cs en Bq.m<sup>-2</sup> (données des campagnes**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	20.3	41.4	26.3	11.5	0.5	12.1	0.7	42.4	5.4
20	40.3	47.8	10.4	1.49	0.01	11.5	0.7	34.7	5.7
30	21.6	50	24.1	4.28	0.02	13.1	0.8	41.6	6.3
40	22.4	42.9	20.9	9.6	4.2	14.4	0.9	44.7	4.9
50	20.7	47.6	22.3	8.7	0.7	17.9	1.1	48.3	7.1
60	25.8	47.1	18.8	7.6	0.7	15.6	0.9	43.3	6.6
70	23.5	43.3	23.4	9.2	0.6	14.5	0.9	30.7	5.4
80	30.6	42.5	18	7.9	1	18.9	1.1	36	5.6
90	24.1	35.2	22.3	16.6	1.8	29.0	1.6	30.5	4.2
100	19.8	40.9	24.1	11.6	3.6	42.5	2.3	34.1	5.3
110	21.1	39.1	24.3	13.7	1.8	29.9	1.6	24.2	5.4
120	20.4	43.1	26.9	9.3	0.3	33.4	1.8	43.3	5.3
130	21	46.7	25.7	6.59	0.01	20.6	1.2	36.3	5.9
140	21.7	45.9	24.2	8	0.2	26.0	1.4	47.1	6.3
150	19.3	48.1	24.5	7.6	0.5	63	4	64.5	6.9
160	23.6	48.7	20.7	6.5	0.5	91	5	62.1	7.8
170	14.5	46.5	30.3	7.3	1.4	50.9	2.7	41.6	6.1
180	20.3	38.7	25.4	14.2	1.4	143	8	66.3	8.2
190	23	44.6	22.3	9.6	0.5	103	6	47.4	7.4
200	26.1	42.9	22.6	8	0.4	108	6	52.3	6.4
210	21.2	44	25.3	9	0.5	151	8	43	6
220	27.7	50.2	18.3	3.7	0.1	121	7	43.5	6.4
230	20.4	44.1	24.6	9.9	1	105	6	32.4	4.1
240	24.8	45.7	22.9	6.5	0.1	120	7	50.8	6.4
250	19.7	41.5	26.2	11.8	0.8	110	6	45.8	6.3
260	18.2	43.5	27.1	10.5	0.7	58	4	29.9	3.7
270	20.5	42.7	25	10.6	1.2	117	7	36.7	6.2
280	16.5	42.4	26.7	13.4	1	146	8	30.9	6.2
290	19.5	41	27.8	10.7	1	67	4	29.9	5.2

**Annexe H3 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB04 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	41.3	41.9	15.3	1.5	0	13.5	1.0	53.2	6.4
20	29.8	43	17.5	8	1.7	22.8	1.6	34.3	5.5
30	25.4	48.3	20.4	5.8	0.1	47.8	3.3	68.1	8
40	27	45.5	21.9	5.56	0.04	81	6	57	7.2
50	27.6	47.5	20.2	4.6	0.1	27.2	1.9	37	5.4
60	27.9	45.6	21.1	5.3	0.1	71	5	22	3.4
70	33.8	39	21.1	5.9	0.2	17.5	1.2	18.2	4.6
80	28.6	45.9	20.5	4.98	0.02	6.3	0.5	16.4	4.5
90	33.7	43.3	19.4	3.5	0.1	1.56	0.19	7.8	3.5
100	33	44.3	18.3	4.39	0.01	0.37	0.10	7.3	2.7
110	40.9	44.5	13.2	1.3	0.1	0.18	0.09	7.7	2.6
120	39.3	44.2	14.4	2.05	0.05	0.43	0.11	11.5	3.5
130	32.3	44.3	19.1	4.28	0.02	0.24	0.12	9.8	3.5
140	36	44.3	18.8	0.9	0	0.26	0.12	12.1	3.3
150	38.2	43.3	16.8	1.68	0.02	<0,4		13.9	3.6
160	35.9	39.4	19.3	5.3	0.1	<0,4		7.2	3.6
170	42.7	44.8	12	0.5	0	<0,5		6.2	3.5
180	41.1	45.1	13.1	0.697	0.003	0.31	0.12	7.3	3.3
190	40.3	47.1	12.2	0.399	0.001	0.26	0.13	4.9	3.4
200	41.5	47.8	10.696	0.004	0	<0,5		10.4	3.4
210	43.6	43.6	12.78	0.02	0	<0,31		3.7	2.6
220	43.8	44.5	11.1	0.599	0.001	<0,31		5.5	3.5
230	40.8	43.8	13.5	1.86	0.04	<0,4		2.2	3.4
240	32.3	48.6	18.1	1	0	<0,33		9.5	3.1
250	40.5	44.9	13	1.598	0.002	<0,31		4.5	2.5
260	38.6	47.5	13.89	0.01	0	<0,29		3.8	2.6
270	43.8	46	9.6	0.6	0	<0,4			
280	42.8	45.8	11.395	0.005	0	<0,4		2.5	3.5

**Annexe H4 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB05 (REMORA 2)**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	36.4	46.4	13.4	3.7	0.1	12.8	1.0	46	6.1
20	28	46	20.7	5.2	0.1	17.0	1.3	50.5	6.3
30	30.1	46.7	17	6	0.2	31.0	2.1	40.3	6.2
40	27.1	51.6	17.2	4	0.1	77	5	54.1	5.1
50	27.2	46.2	19.8	6.5	0.3	99	7	31.3	5
60	31.7	46.6	18.1	3.597	0.003	46	4	41.3	3.7
70	28.5	49.9	17.5	4.07	0.03	34.4	2.5	33.4	6.1
80	36.2	49.5	13.5	0.7	0.1	57	5	21	1.9
90	33.6	44.9	18.3	3.1	0.1	12.2	0.9	20.9	4.3
100	38.7	46.4	12.8	2	0.1	9.6	0.7	18.3	4.4
110	30.3	49.9	16.3	3.4	0.1	4.6	0.4	12.8	3.8
120	33.3	45.5	17.4	3.7	0.1	1.77	0.21	10.8	3.3
130	32	43.4	19.6	4.9	0.1	1.32	0.19	8.6	3.5
140	33.5	45.5	17	3.9	0.1	0.58	0.13	10.1	2.5
150	40.7	42.8	15.7	0.799	0.001	0.51	0.14	4.2	3.5
160	38.2	48.3	12.5	0.9	0.1	0.27	0.11	11.3	1.1
170	41	46.2	12.5	0.297	0.003	<0,5		7	3.4
180	29.4	50.4	16	3.8	0.4	0.32	0.11	7.9	3.3
190	37.8	49	13.19	0.01	0	<0,5		10.8	1.2
200	40.3	47.2	11.6	0.89	0.01	<0,4		7.6	3.2
210	34.7	47.7	15.2	2.39	0.01	<0,4		6.4	3.6
220	40.6	44.6	13.5	1.298	0.002	<0,5		8.5	3.3
230	45.9	44.8	9.297	0.003	0	<0,4		6	3.5
240	38.4	44.1	16.3	1.2	0	<0,5		7.8	3.3
250	41.7	44.8	12.4	1.09	0.01	0.37	0.13	7.7	2.7

**Annexe H5 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB06 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	29.7	48.1	18.7	3.3	0.2	11.3	0.7	34.3	3.6
20	26.5	48.6	19.7	5	0.2	14.1	0.8	59.9	4.6
30	26.1	44.1	21.3	8.1	0.4	17.7	1.0	53.6	4.7
40	34.2	43.3	17.2	5	0.3	17.9	1.0	40.9	4.6
50	26.2	43.6	21.4	8.5	0.3	29.9	1.6	38.3	4.6
60	24.9	49.7	20.4	4.9	0.1	33.2	1.8	45.1	4.6
70	26.8	46.2	20.4	6.5	0.1	78	4	62.7	4.6
80	21.2	46	24.7	8	0.1	107	6	47.9	4.6
90	21.2	46.6	24.8	7.1	0.3	91	5	36.9	3.4
100	23.2	47.2	22.8	6.7	0.1	73	4	39.3	4.4
110	26.3	44.6	22.9	6	0.2	48.1	2.5	28.4	2.4
120	19.2	47.5	26.5	6.6	0.2	22.3	1.2	29.5	3.5
130	22	49	22.4	6.2	0.4	25.6	1.4	36.8	3.5
140	27.6	48.9	19.8	3.69	0.01	49.8	2.6	32.4	3.5
150	31.8	48.1	16.7	3.38	0.02	80	4	23.6	2.6
160	30.1	45.7	20	4.1	0.1	19.2	1.1	18.1	3.7
170	35.9	45.4	15.8	2.88	0.02	13.5	0.8	15	1.8
180	28.1	49	20.2	2.7	0	5.7	0.4	12.6	1.9
190	35.4	44.2	17.5	2.898	0.002	4.78	0.32	12.9	1.8
200	34.3	43.9	18.4	3.2	0.2	1.57	0.18	6.5	3.6
210	36.9	41.9	18	3.19	0.01	0.59	0.15	9.7	3.7
220	41.1	46.5	10.8	1.59	0.01	<0,7		13.3	3.7
230	40.8	45.6	12.3	1.3	0	0.24	0.09	11.6	1.6
240	34.1	45.5	17.6	2.795	0.005	<0,7		7.4	1.6
250	20.7	39.6	24.9	12.5	2.3	0.19	0.09	4.6	1.4

**Annexe H6 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB11 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	28.4	45.8	19.9	5.8	0.1	16.8	1.3	70.5	6
20	26.4	48.3	19.6	5.6	0.1	68	5	58.1	7.4
30	24.3	48.4	22.1	5.17	0.03	46.1	3.1	42.7	6
40	33.9	47.1	16.4	2.59	0.01	39.7	2.7	21.5	4.3
50	37.2	45.3	13.1	4.1	0.3	2.75	0.27	15.8	4.2
60	33.5	47.3	15.6	3.5	0.1	<0,4		13.2	3.5
70	34.3	44.3	17.2	4.1	0.1	0.47	0.12	11.1	2.3
80	35.2	50.1	13.2	1.48	0.02	<0,4		6.7	3.2
90	36.6	46.5	14.5	2.39	0.01	<0,5		5.1	3.3
100	36.8	44.5	16.6	2.08	0.02	<0,5		5.1	3.5
110	45.7	44	9.8	0.498	0.002	0.26	0.10	8.9	3.1
120	38.5	46.3	15.1	0.1	0	<0,28		7.2	1.3
130	44.4	44.9	10.1	0.58	0.02	<0,4		5.1	2.6
140	40.5	44.6	14.4	0.49	0.01	<0,4		6.8	3.5
150	33.4	45.9	17.7	2.998	0.002	<0,5		7.9	1.2
160	33.9	46.1	17.4	2.599	0.001	<0,4		3.6	3.4
170	29.2	48.9	19.9	1.98	0.02	<0,5		7.6	3.5
180	34.3	45.7	16.6	3.36	0.04	<0,5		6.1	3.3
190	40.8	39.8	17.5	1.89	0.01	<0,5		5.2	3.5
200	42.8	45.2	11.6	0.399	0.001	<0,5		3	3.6
210	36.5	48.5	14.2	0.8	0	<0,5		7.8	2.6
220	41.4	44	14.3	0.3	0	<0,4		1.7	3.5
230	37.1	47	14.4	1.48	0.02	<0,4		1.9	2.4
240	26.9	49.1	21.7	2.297	0.003	<0,4		5.3	3.2
250	35	47.5	16.1	1.36	0.04	<0,33		5.5	3.5
260	32.8	44.9	18.8	3.4	0.1	<0,29		4.1	3.6
270	41.4	41.2	17.3	0.1	0	<0,4		6.2	3.6
280	30.1	41.3	20.7	7.2	0.7	<0,30		4.9	3.5

**Annexe H7 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB13 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	18.6	46.9	27.2	7	0.3	9.6	0.8	23.1	5.3
20	30.3	44.2	17.8	7.2	0.5	11.7	0.9	27.3	4.5
30	22.4	42.7	25.7	8.5	0.7	9.7	0.7	26.8	3.5
40	19.5	43.2	24.5	11.7	1.1	11.1	0.8	34.1	5.4
50	15.5	42.7	27.6	12.5	1.7	8.8	0.7	34	2.9
60	13.9	34.9	30.1	17.5	3.6	10.2	0.8	32.8	5.2
70	24.9	49.8	18.3	6.4	0.6	15.0	1.2	43.4	6.3
80	21.6	50.1	20.1	7.2	1	17.0	1.3	35.1	4.1
90	23.6	46.5	22.4	6.8	0.7	12.3	0.9	25.2	4.4
100	25.1	48.3	20.8	5.5	0.3	16.1	1.2	27.6	5.5
110	35.9	44.2	16	3.88	0.02	20.2	1.4	29.4	5.3
120	18.8	34.2	21.8	24.2	1	26.7	2.0	17.5	4.2
130	21.5	46.1	21.3	10.1	1	26.1	1.8	39.1	6.2
140	16.5	44.6	26.8	10.8	1.3	27.8	1.9	37.5	4.4
150	19.6	44	22.8	11.6	2	35.0	2.6	44.6	5
160	16.5	42.6	25.5	13.1	2.3	60	4	47.4	5.9
170	18	45.1	22.4	11	3.5	71	5	38.5	6.3
180	15.1	37.6	27	17.3	3	125	9	46.4	5.7
190	22.9	48.6	20.6	7.6	0.3	157	11	32	5.4
200	17.2	44.2	27.7	9.5	1.4	241	16	35.6	6.2
210	15.7	37.1	26.1	18.7	2.4	99	7	33.8	4.3
220	22.3	42.3	24.3	10.4	0.7	138	10	48.3	3.9
230	16.5	38.7	26.6	16.7	1.5	62	5	32.9	6.1
240	21.2	48.1	24.3	6.2	0.2	49	4	28.7	4.4
250	19	39.8	25	14.7	1.5	88	6	26.3	4

**Annexe H8 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB15 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	18.9	36.8	24.3	17.2	2.8	8.8	0.6	24.4	3.6
20	15.1	31.6	25.6	25.6	2.1	6.5	0.4	16.5	3.8
30	11.1	25.8	28.7	29.4	5	8.2	0.5	14	3.4
40	19.7	43.8	23.7	11	1.8	19.3	1.2	29.9	4.4
50	14.3	33.5	30.5	19.9	1.8	71	4	32.9	5.1
60	20.4	41.1	24.6	13.1	0.8	75	4	33.8	5.3
70	19.7	46.7	24.7	8.6	0.3	21.5	1.2	28.6	5.2
80	16.5	47.2	26.1	9.5	0.7	19.3	1.1	28.2	5.4
90	16.1	40.4	30.8	12	0.7	18.3	1.0	17.4	2.6
100	18.6	44.6	26.5	9.8	0.5	30.1	1.7	18.7	4.5
110	16.7	36.8	25.8	18.6	2.1	47.8	2.5	16.9	2.7
120	12.9	32.5	34.7	18.6	1.3	38.5	2.0	17.3	3.4
130	31.8	50.6	14	3.5	0.1	11.7	0.7	8.5	3.6
140	18.4	40.5	30.9	9.9	0.3	7.2	0.5	9	2.4
150	26.8	39.9	23.1	9.7	0.5	1.74	0.20	6.9	3.6
160	29.7	47.1	19.8	3.3	0.1	0.23	0.13	9.5	3.6
170	28.8	43.7	21.9	5.4	0.2	<1,1		8.7	3.6

**Annexe H9 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KB16 (REMORA 2).**

Niv. (cm)	Arg. (%)	Silts f. (%)	Silts g. (%)	Sables f. (%)	Sables g. (%)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	± (Bq/kg)	<sup>210</sup> Pb <sub>xs</sub> (Bq/kg)	± (Bq/kg)
10	19.5	41.8	27.1	11.3	0.3	10.7	0.8	27.4	5.2
20	25.6	44.9	22.6	6.8	0.1	9.9	0.8	28	4.5
30	22	47.1	23.8	6.9	0.2	10.9	0.9	41.8	6.1
40	23.3	49.6	21.4	5.5	0.2	16.6	1.2	48.4	6.2
50	15.3	32.5	27.9	16.3	8	15.9	1.1	35.1	4.4
60	21.1	45.6	26.7	6.55	0.05	14.5	1.1	29.7	5.4
70	21.4	39.2	29.9	9.2	0.3	16.6	1.2	25.4	5.5
80	18.8	41.8	26.5	12.2	0.7	16.5	1.4	19.2	4.3
90	15.6	32.8	28.2	14.6	8.8	40.8	2.7	28.4	5.2
100	19.3	39.5	26.7	12.9	1.6	39.1	2.6	30.7	5.2
110	14	30.9	29.5	23.1	2.5	22.2	1.5	30	5.3
120	15.9	32.2	28	21.6	2.3	26.9	1.8	26.4	4.3
130	9.74	27.56	31.9	22.8	8	42.3	2.8	27.8	5.1
140	20.2	35.7	29.5	13.8	0.8	30.3	2.1	28.4	5.4
150	19	38.1	28.8	13.1	1	27.8	2.0	36	6.1
160	21.2	47.6	25.6	5.55	0.05	19.7	1.4	32	5.1
170	27.5	45.7	21.2	5.4	0.2	54	4	61.3	8.3
180	19.6	48.2	25.2	6.8	0.2	42.6	2.9	29.4	5
190	23.9	45.8	23.9	6.2	0.2	81	6	56.7	7.1
200	19.6	41.4	30	8.7	0.3	81	6	46.9	7.3
210	16.6	36.1	29	16.7	1.6	139	10	31	4.7
220	14.8	34.8	30.5	17.6	2.3	131	9	24.7	5.2
230	16.2	39.1	27.3	13.9	3.5	149	10	27.4	4.8
240	25.7	46.8	22.6	4.897	0.003	175	13	44.8	6.1
250	22.2	42	26.6	9.1	0.1	157	10	40.6	6.2
260	24.7	50.3	19.3	5.5	0.2	98	7	32	5.2
270	22.9	45.3	21.2	9.4	1.2	101	7	35.2	5.2
280	27.1	51.7	17.5	3.68	0.02	130	10	48.9	6.9
290	25.9	47.3	21.1	5.6	0.1	108	8	50.3	7.3
300	33.8	53.1	11.2	1.89	0.01	65	5	44.1	5.7
310	16.2	36.9	33.9	12.8	0.2	32.2	2.3	26	5.1
320	31.2	48.2	17	3.57	0.03	98	7	35.1	6.1
330	19.8	42.7	26	9.8	1.7	109	8	26.9	5.1
340	13.8	32	32.1	19.7	2.4	74	5	20.2	5
350	19	38.8	25.9	14.7	1.6	71	5	21.9	4.9
360	17	38	29.3	14.1	1.6	72	6	21.3	4.7
370	14	35.4	30.7	17	2.9	69	5	24.2	5.1
380	15.1	36.2	29.1	17.7	1.9	52	4	20.1	2.9
390	19.9	46	27.2	6.8	0.1	65	5	27.1	4.8
400	19.9	47.2	27.3	5.4	0.2	85	6	38.5	6
410	42.7	46.1	10.2	0.9	0.1	62	5	31.7	5
420	21.1	39.5	30.8	8.2	0.4	65	5	22.7	5.2
430	38.4	52	9.57	0.03	0	74	5	32.9	5.2
440	42.1	44.7	11.5	1.7	0	23.7	1.6	20.5	4.3
450	40.7	45.1	9.9	4.2	0.1	27.7	2.0	16.5	4.1
460	39.9	50.1	8.1	1.8	0.1	25.1	1.7	15.1	4.3
470	20.5	38.5	27.4	12.3	1.3	21.1	1.4	15.5	3.4
480	26.8	45.9	18.5	7.7	1.1	20.8	1.5	15.5	5

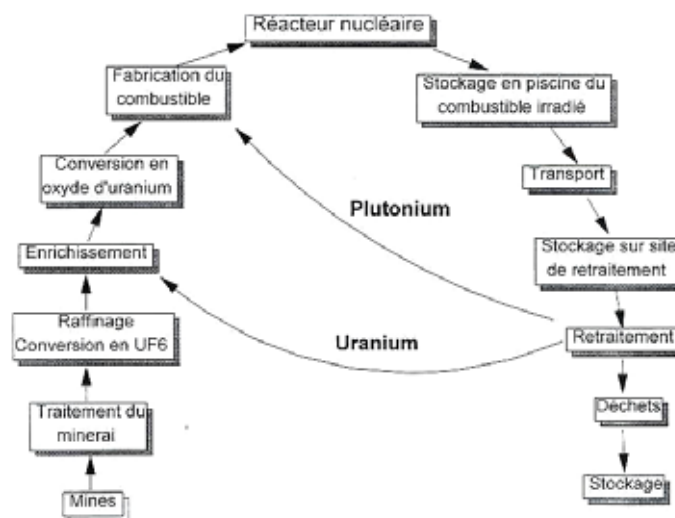
**Annexe H10 : Caractéristiques granulométriques et concentrations en <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> de la carotte sédimentaire de la station KBRous (REMORA 2).**

# ANNEXE I : Le cycle du combustible nucléaire

Le début du cycle (**Figure 2.3**) commence par l'extraction du minerai d'uranium. Il peut aussi bien se rencontrer dans des terrains granitiques que sédimentaires et être présent en surface ou à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Sa teneur étant très faible dans les roches minières, celles-ci sont finement broyées et subissent des traitements chimiques pour concentrer l'uranium en solution, l'extraire et le précipiter sous forme d'uranate de magnésium, de sodium, d'ammonium ou de peroxyde. La matrice fabriquée a finalement l'aspect d'une pâte jaune, appelée « yellow cake », contenant environ 75 % d'uranium.

Viennent ensuite des opérations de raffinage car le « yellow cake » ne peut pas être utilisé dans les réacteurs nucléaires sous sa forme brute. Les impuretés risqueraient de nuire au bon déroulement de la fission et de la réaction en chaîne. Les étapes de purification ont lieu en même temps que la conversion en certains composés chimiques très exploités par les centrales à uranium naturel ou enrichi. Cette conversion combine uranium et fluor par le biais de contact entre l'oxyde d'uranium ( $UO_3$ ) avec de l'acide fluorhydrique, résultant du tétrafluorure d'uranium ( $UF_4$ ). Celui-ci permet la préparation de l'uranium métallique utilisé dans les centrales de la filière à Uranium Naturel-Graphite Gaz (UNGG) ou de l'hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) par réaction avec du fluor, intéressant car passant de l'état solide aux états liquide et gazeux par de faibles changements de température. Les isotopes 235 et 238 de l'uranium ont des propriétés physiques et chimiques très voisines mais leurs propriétés nucléaires le sont bien moins. Seul l' $^{235}U$  subit facilement le processus de fission qui est à la base de la production d'énergie nucléaire, or cet isotope constitue 0.7 % de l'uranium naturel, contre 99.3 % pour l' $^{238}U$ . Les réacteurs filière à eau ordinaire nécessitent une proportion de 3 à 5 % d'uranium 235. Il nécessite donc un enrichissement par l'intermédiaire de divers procédés, notamment la diffusion gazeuse, l'ultracentrifugation et l'enrichissement laser.



Annexe I.1 : Schéma représentatif du Cycle du combustible nucléaire (Charmasson, 1998).

L'uranium enrichi peut être utilisé dans les centrales de la filière à eau ordinaire après conditionnement dans une structure métallique étanche, nommée assemblage combustible faisant partie du cœur du réacteur. Le



UF<sub>6</sub> est alors transformé en oxyde d'uranium, comprimé en pastilles cylindriques de quelques grammes. Elles sont par la suite introduites dans de longs tubes métalliques pour former des crayons, réunis pour former un assemblage.

Les assemblages combustibles forment le cœur du réacteur (72.5 T d'uranium enrichi pour un réacteur de 900 MWe) mais ils s'épuisent au fil du temps (3 à 4 ans) et n'arrivent plus à entretenir la réaction nucléaire. Ils sont récupérés et stockés un an dans une piscine attenante au réacteur pour diminuer la radioactivité et la chaleur, puis ils sont transportés à l'usine de retraitement.

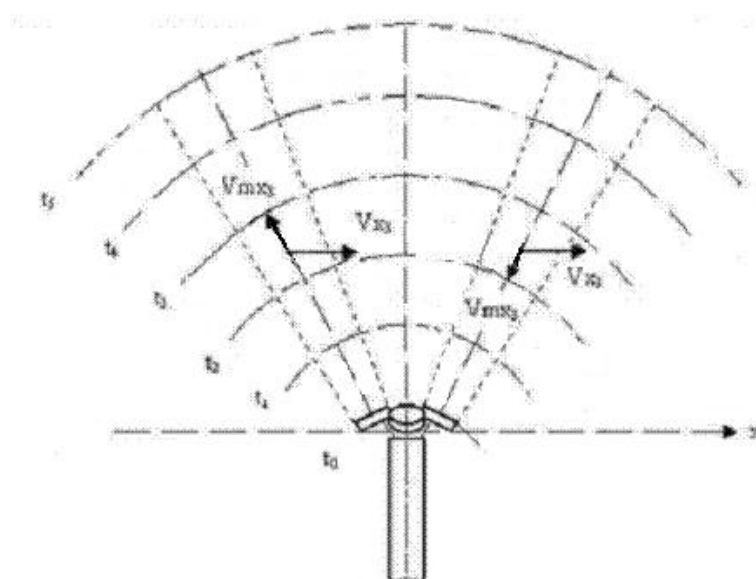
L'étape du retraitement permet de récupérer les matières énergétiques comme de l'uranium et du plutonium dans les combustibles usés et de conditionner les déchets ultimes dans les meilleures conditions de sécurité en vue de leur stockage définitif. Après un stockage de deux ans en piscine, les assemblages combustibles sont coupés en morceaux et dissous dans des solutions d'acide, séparant uranium, plutonium et produits de fission (déchets). L'uranium et le plutonium seront alors recyclés : le premier est réintroduit sous forme de nitrate liquide dans la filière conversion-enrichissement pour la fabrication de combustible classique alors que le second constitue le combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) mélangé avec de l'uranium appauvri. Les déchets sont traités différemment car destinés à être stockés.

Les déchets les plus radioactifs sont vitrifiés par la COGEMA dans son établissement de Marcoule depuis 1978 alors que les gaines et matériaux de structure de combustible sont enrobés dans du béton et conditionnés dans des fûts inoxydables, tout comme les boues issues de l'épuration des effluents liquides. Les déchets de faible à moyenne radioactivité de demie-vie courte à moyenne sont entreposés en surface en attente de solution de gestion à long terme alors que les déchets à très haute radioactivité (débit de dose au contact supérieur à 2 Sievert par heure) sont stockés provisoirement sur leurs lieux de production (Marcoule ou La Hague) avant d'imaginer un entreposage dans les couches géologiques profondes ou un retraitement par transmutation (transformation des éléments de haute radioactivité en éléments moins radioactifs).

# ANNEXE J : Les ADCP

## Fonctionnement des ADCP

Les transducteurs fonctionnent deux par deux et leurs plans d'observation se croisent. Deux vitesses verticales sont mesurées et vérifient la véracité des mesures de vitesses (**Figure 3.2**). Fuda et al. (2006) abordent le problème de la modification de la vitesse et de la direction du courant en un point selon la forme de la structure anti-chalut déployée.



### Annexe J.1 : Représentation du fonctionnement d'un ADCP et de ses mesures de courants dans la colonne d'eau selon les temps aller-retour du signal.

Les senseurs installés initialement dans l'appareil détectent la température de l'eau, la position verticale (haut/bas) de l'engin, son pitch et son orientation, ainsi que la profondeur grâce au capteur de pression. Des colliers en PVC lui permettent de rester vertical quelle que soit la pente au fond. Une inclinaison de quelques degrés pourrait fausser les données et ne pas respecter le nombre de cellules configurées initialement, surtout dans le cas d'une immersion à basses profondeurs.

Hormis la structure qui supporte les ADCP de l'expérience CARMA, la présence d'un module de vagues sur l'ADCP de 40 m le différencie de l'ADCP de 20 m. Il permet d'évaluer l'influence des vagues (hauteur, fréquence, amplitude, période) et tient compte de celles-ci dans le traitement des données. Ce module a été intégré à l'ADCP de l'expérience EXTREMA, situé à 20 m de profondeur où l'impact des vagues est important.

Concernant les caractéristiques intrinsèques de l'appareil, la précision de la vitesse est de l'ordre de 0.3 % de la vitesse relative du courant par rapport à l'ADCP  $\pm 0.3 \text{ cm.s}^{-1}$ . La résolution de la vitesse est de l'ordre de  $0.1 \text{ cm.s}^{-1}$  et le nombre de cellules de profondeur s'étend de 1 à 128 avec un taux d'échantillonnage typique à 2 Hz.

Les *beams* forment un angle de  $20^\circ$  avec l'horizontale et la gamme du profil d'intensité de l'écho émis s'étend sur  $80 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$ .

Chaque capteur possède ses propres caractéristiques : la gamme de température est comprise entre  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $45^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $0.4^{\circ}\text{C}$  et une résolution de  $0.01^{\circ}\text{C}$ , la gamme de l'inclinomètre est de  $\pm 15^{\circ}$  avec une exactitude et une précision de  $0.5^{\circ}$  ainsi qu'une résolution de  $0.01^{\circ}$ , et le compas présente une exactitude de  $2^{\circ}$ , une précision de  $0.5^{\circ}$  et une résolution de  $0.01^{\circ}$  (RD Instruments, 2006a).

## Principe de l'Effet Doppler

L'ADCP émet une onde acoustique de fréquence  $f_{em}$  de 600 kHz et de vitesse  $v_{em}$  d'environ  $1450 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , célérité moyenne du son dans l'eau douce. Cette valeur de célérité se trouve certainement sous-estimée car l'eau de mer est un milieu aqueux dense à forte conductivité.

Les matières en suspension dont la masse est négligée sont entraînées par les courants imprimés d'une vitesse  $v_{rec}$  et répondent à l'ADCP selon une fréquence  $f_{rec}$ .

La mise en équation devient :

$$f_{rec} = \frac{c - v_{rec}}{c - v_{em}} \cdot f_{em} = \frac{1 - (v_{rec}/c)}{1 - (v_{em}/c)} \cdot f_{em}$$

L'ADCP décompose le vecteur vitesse en ses trois composantes  $O_x$ ,  $O_y$  et  $O_z$  (est-ouest, nord-sud et haut-bas).

La vitesse des particules en suspension est donc mesurée par effet Doppler avec la rétrodiffusion d'un signal acoustique de fréquence et d'intensité différentes de celles en émission. Le gain du signal reçu sert également à évaluer la concentration en matière en suspension (MES). L'ADCP reçoit un signal électrique en *counts* (unités électriques numériques) qui peut être transformé en décibels (unité acoustique). Après calibration des données acoustiques de l'appareil avec des prélèvements d'eau chargée en MES, à plusieurs intervalles temporels et spatiaux, il est possible d'obtenir des valeurs de turbidité. En outre, l'installation en continu de turbidimètre (capteur optique en rétrodiffusion) ou transmissomètre (capteur optique en transmission) pré-calibrés avec des prélèvements d'eau permet de minimiser les erreurs sur la transformation des données de *backscatter* (rétrodiffusion) en données de concentrations.

## Transformation du signal électrique en signal acoustique

Le signal d'intensité rétrodiffusée d'un profileur de courant acoustique peut être exploité afin de quantifier les matières en suspension dans toute la colonne d'eau (Tessier, 2006). L'intensité du signal rétrodiffusé NC est un paramètre donné par l'ADCP en nombre de counts (unité arbitraire). Pour déterminer la charge en particule à partir de ce dernier, il est nécessaire d'établir le bilan d'énergie (en dB) qui relie le niveau d'émission de l'onde acoustique (NE) et le niveau reçu (NR) après l'atténuation subie dans la colonne d'eau et la rétrodiffusion exercée par les particules.

$$NR = NE - 2PT + IC$$

- PT (dB) est la perte de transmission lors de la propagation de l'onde dans le milieu.

- IC (dB) est l'indice de cible ou encore le coefficient de rétrodiffusion.

Le niveau d'énergie reçu est relié à l'intensité du signal rétrodiffusé par l'équation :

$$NR = K_c(NC - NC_0) + B_r$$

- les différents paramètres de l'équation peuvent être obtenus lors d'essais de calibration en bassin de l'ADCP. Une valeur nominale moyenne de  $K_c$  (coefficient de conversion des counts en dB) est donnée par le constructeur ( $\sim 0.43$ ).

Les pertes de transmission sont liées à la divergence sphérique (décroissance en  $1/R^2$  de l'intensité acoustique) et à l'amortissement par le milieu dissipatif (décroissance exponentielle de l'amplitude en distance). A une distance  $R$  du transducteur on a ainsi :

$$PT = 20 \log_{10}(\Psi R) + (\alpha_w + \alpha_s).R$$

-  $\alpha_s$  (en dB/m) est le coefficient d'amortissement lié à la présence de particules dans le milieu prenant en compte l'absorption visqueuse due aux particules  $\alpha_v$  et la diffusion des particules  $\alpha_d$ .

-  $\alpha_w$  (en dB/m) est lié à l'amortissement par l'eau pure.

-  $\Psi$  est le facteur de correction du champ proche.

Pour le calcul de  $\alpha_w$ , c'est le modèle de François et Garrison (1982), dépendant de la température et de la salinité, qui est utilisé. Il prend en compte la viscosité de l'eau pure, la relaxation des molécules de sulfate de magnésium autour de 100 kHz et la relaxation des molécules d'acide borique autour de 1 kHz.

Le facteur  $\Psi$  permet de corriger de l'approximation de divergence sphérique à proximité du transducteur, là où le champ de pression est oscillant. La formulation de Downing est utilisée:

$$\Psi = [1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}] / [1.35z + (2.5z)^{3.2}]$$

où  $z = R/R_0$ , avec  $R_0 = a^2/2\lambda$ ,  $a$  étant le rayon du transducteur et  $\lambda$  la longueur d'onde.

L'indice de cible IC dépend de la densité numérique  $N$  des particules dans le volume insonifié  $V$  de la cellule et de la section efficace de rétrodiffusion  $\sigma$ :

$$IC = 10 \log_{10}(\sigma NV) = 10 \log_{10}(V) + IV$$

avec  $IV$  l'indice de cible volumique (c'est-à-dire relatif à  $1 \text{ m}^3$ ).

En faisant apparaître la concentration massique  $M = N\rho_s v_s$  (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), avec  $\rho_s$  la masse volumique des particules et  $v_s$  le volume particulaire moyen, l'indice de cible est déterminé par :

$$IC = 10 \log_{10} \left( \frac{M \cdot \sigma V}{\rho_s \cdot v_s} \right) = 10 \log_{10}(M) + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma}{\rho_s \cdot v_s} \right) + 10 \log_{10}(V)$$

Le volume  $V$  qui correspond au volume insonifié est dépendant de la distance à laquelle est effectuée la mesure par rapport au transducteur. En supposant que le faisceau de l'onde est égal à un cône, on a :

$$V = \pi(\phi/2)^2 R_i^2 L$$

-  $\Phi$  correspond à l'angle d'ouverture du faisceau

- L correspond à l'épaisseur de la cellule qui rétrodiffuse soit la moitié ou le quart de la cellule de l'ADCP (fonction de la configuration de l'appareil).

On obtient finalement, en utilisant les équations 1, 3, 6, 7, une équation valable pour calculer la concentration massique en chaque cellule de l'ADCP positionnée à la distance R du transducteur:

$$10 \log_{10}(M) = \underbrace{NR - NE}_{(1)} + \underbrace{20 \log_{10}(\Psi R) + 2(\alpha_w + \alpha_s)R}_{(2)} - \underbrace{10 \log_{10}(\pi(\phi/2)^2 L)}_{(3)} - \underbrace{10 \log_{10}\left(\frac{\sigma}{v_s \rho_s}\right)}_{(4)}$$

Le terme (1) correspond à la différence entre signal reçu et signal émis, le terme (2) correspond aux pertes de transmission dans le milieu, le terme (3) est un terme correctif lié à la géométrie de la cellule qui rétrodiffuse et le terme (4) est lié aux caractéristiques des particules qui rétrodiffusent.

## Transformation du signal acoustique en concentration

L'indice de rétrodiffusion volumique IV (dB) correspond à l'indice de rétrodiffusion IC pour un volume unitaire de 1 m<sup>3</sup>. Dans le cas d'une calibration empirique, on calcule l'indice de rétrodiffusion volumique relatif IV<sub>r</sub> en faisant abstraction des termes constants ou supposés constants. Les pertes de transmission liées à l'atténuation par les particules ( $\alpha_s$ ) sont négligées puisque les concentrations massiques ne sont pas trop élevées (< 200 mg/l). On obtient alors :

$$IV_r = K_c NC + 20 \log_{10}(\Psi R) + 2\alpha_w R$$

Ainsi, on peut relier la concentration massique M à l'indice IV<sub>r</sub> calculé. Une calibration empirique peut se faire entre le log<sub>10</sub> de la concentration et l'indice IV<sub>r</sub> obtenu par l'ADCP:

$$10 \log_{10}(M) = a.IV_r + b$$

En principe la pente a de l'équation devrait valoir 1, mais du fait de l'inhomogénéité, dans le temps et dans l'espace, des caractéristiques des particules qui rétrodiffusent, il est nécessaire d'ajuster la pente en fonction du jeu de données qui servira à la calibration. Pratiquement, le signal IV<sub>r</sub> calculé doit être calibré à l'aide de profils ou de mesures au point fixe de turbidité (turbidimètre ou transmissomètre) ou avec des pesées de MES afin de déterminer a et b. On peut finalement déterminer la concentration à l'aide de cette dernière relation :

$$M = 10^{(a.IV_r + b)/10}$$

## Configuration des ADCP

Différents logiciels élaborés par *Teledyne RD Instruments* sont utilisés dans le cadre de la configuration des profileurs de courants et de vagues:

- . *PlanADCP* permet de configurer les appareils avant immersion et d'effectuer des simulations d'efficacité au niveau de la batterie, de la carte mémoire et des résultats.
- . *WinSC* est indispensable à la mise en marche de l'ADCP et à la vérification de ses capteurs et émetteurs.
- . *WinADCP* récupère les données brutes de courants, les paramétrise, les met en forme et permet leur transfert sous différents formats (texte ou matrices).
- . *BBTalk* facilite le dialogue avec l'appareil au moyen de lignes de commandes.
- . *WavesMon* sépare les données de houle et de courants selon deux méthodes (paquets et ensembles) choisies par l'opérateur.
- . *WavesView* visualise les données de vagues traitées et permet leur transfert.

Les courantomètres permettent de connaître la vitesse et la direction du courant quel que soit l'endroit dans la colonne d'eau. Cette dernière est divisée en un nombre défini de cellules de taille fixe. La résolution des résultats dépend du nombre et de la taille des cellules. De nombreux paramètres de configuration sont à prendre en compte lors de l'étape de configuration des appareils, comme :

- la profondeur de la station,
- la résolution demandée, c'est-à-dire la taille et le nombre de cellules analysées,
- la durée de mise à l'eau, afin d'estimer le niveau de batterie et de mémoire utilisé,
- la fréquence temporelle d'émission du signal acoustique (*ping*),
- la fréquence temporelle de moyennation du signal acoustique, c'est-à-dire la fréquence à laquelle l'appareil va moyenner les résultats de l'émission,
- la température et la salinité,
- la hauteur de *blank*, c'est-à-dire la hauteur au-dessus de la tête de l'ADCP pour laquelle le signal est vierge,
- le paramétrage du module de houle, fonctionnant à partir d'un signal acoustique pour lequel l'utilisateur établit sa fréquence temporelle.

Pour l'ADCP immergé à 20 m, le seul à avoir restitué des données à l'issue de la campagne CARMA, la profondeur de la station a été établie à 20 m, avec 45 cellules analysées de 50 cm chacune. Le courantomètre a donc balayé 22.5 m d'eau au-dessus de lui, ce qui a permis de distinguer la surface air-eau sur les profils.

La campagne CARMA s'est déroulée en deux parties (novembre 2006-février 2007 et avril 2007-juillet 2007) et la même durée de mise à l'eau a été enregistrée, à savoir 200 jours. La campagne EXTREMA a également été scindée en deux : septembre-octobre 2008 et octobre-novembre 2008 (**voir Annexes C13, C14 et C15**).

L'appareil a été programmé pour émettre un signal acoustique tous les quarts d'heure pendant 18 secondes, faisant sa moyenne sur 50 *pings*. Les mêmes facettes émettrices du signal reçoivent instantanément une fréquence retour.

Les échelles de valeurs de salinité et températures, permettant à l'appareil de recalculer la vitesse de propagation du son dans l'eau environnante, ont été respectivement estimées entre 10 et 35 ‰, et entre 10 et 20°C.

La valeur de hauteur de *blank* intégrée fut 30 cm, ce qui place la première cellule à :

$$H = \textit{blank} + \text{hauteur de l'appareil} + 1.5 * \text{hauteur de cellules} = 30 + 50 + 1.5 * 50 = 155 \text{ cm}$$

La première cellule mesurée est à 1.55 m au dessus du fond, soit en fait 18.5 m de profondeur.

Le module de houle n'a pas été couplé au profileur de courant de 20 m mais à celui de 40 m. Il compilait les valeurs de houle pendant 10 minutes toutes les 2 heures. Malheureusement, il n'a pas pu les restituer car il n'a pas été retrouvé.

# Annexe K : l'altimètre S-ALTUS

## Configuration

L'altimètre est conçu pour mesurer ces grandeurs physiques suivant 6 voies: une voie pour la profondeur, une voie pour l'échomax et 4 voies pour l'altitude. Théoriquement, les 4 voies d'altitude permettent de mesurer la distance entre le transducteur et des surfaces avec des densités différentes, c'est-à-dire pour lesquelles le faisceau aura une pénétration et un signal retour différent (crème de vase, surfaces indurées, surfaces consolidées, etc.).

Dans la pratique, les altimètres ont du être calibrés par des essais en laboratoire pour que leur gain acoustique soit maximum. Les valeurs seuils de chaque voie ont été calculées et testées dans de vastes récipients remplis d'eau et de sédiments de la zone d'étude remis en suspension. Chaque seuil correspond à une sensibilité prise par l'appareil. Plus l'écho est important, plus le substrat est dur. Les altimètres, tout comme les sondes STPS et STBD, sont gérés par le logiciel WinMemo (NKE, 2006d) qui permet de configurer les déploiements, mettre les appareils en marche/arrêt, les calibrer et télécharger les données.

Pour les missions CARMA et EXTREMA, les voies seuils ont été fixées telles que :

durée max du tir = 33 ms ; voie1 = 15 ; voie 2 = 30 ; voie 3 = 50 ; voie 4 = 90.

Il a fallu fixer des seuils plus bas que pour les campagnes menées par IFREMER sur les estrans. Leurs valeurs seuils s'élevaient respectivement à : 20 – 45 – 90 – 190 (Jestin, octobre 2006, communication personnelle). En outre, ils ont détecté la crème de vase et les gradients de densité de sédiment, contrairement aux expériences menées aux embouchures du Rhône et de la Têt.

Lors des missions CARMA et EXTREMA, l'appareil a été programmé pour échantillonner toutes les 15 minutes à 20 m de profondeur et à une altitude initiale de 70 cm environ.

La précision du capteur de pression est estimée à  $\pm 6$  cm et sa résolution à 0.8 cm. Comme l'élévation du transducteur est comprise entre 20 et 70 cm au-dessus du fond, la précision du transducteur acoustique est de  $\pm 2$  mm et sa résolution de 0.41 mm.

Quant à l'échomax, représentant l'amplitude du signal reçu, il varie de 0 à 100 %.

## Traitement des données

Les données de l'ALTUS sont stockées sous forme de fichiers textes convertibles en format Excel ou Matlab. Une série de filtres (sous Excel et Matlab) a permis d'éliminer les aberrations, les données biaisées et de trier les données des différentes voies. La voie 1 a logiquement été plus sollicitée que les autres voies ; c'est elle qui représente la surface la plus indurée. Les autres voies n'ont pas montré de régularité particulière ou ont été quasi-superposables à la voie 1.

Les résultats dont l'échomax figurait inférieur à 5 % ont été évités afin de garder la donnée la plus proche de la réalité.

Les résultats de l'altimètre récupéré ont été transformés de manière à pouvoir établir les phases de dépôt et d'érosion en fonction du paramètre temporel.



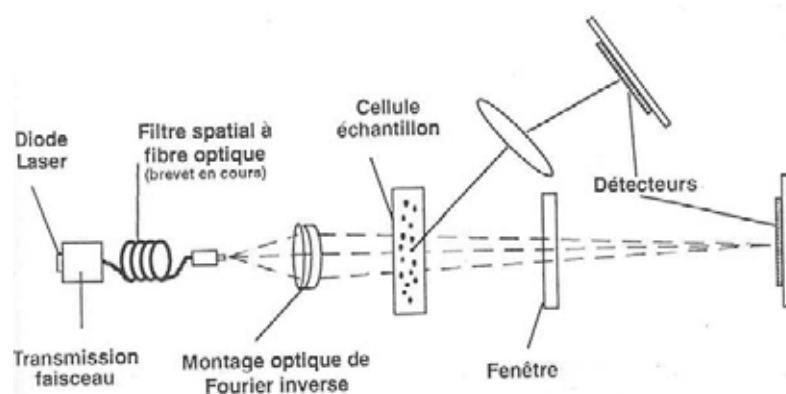
# Annexe L : le granulomètre à diffraction laser

## Granulomètre laser de laboratoire

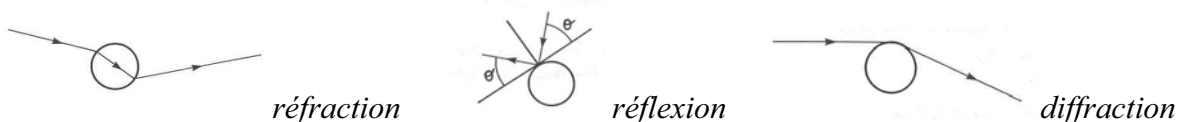
### Principes de fonctionnement

Le granulomètre laser utilisé est destiné à effectuer des mesures sur des produits pulvérulents, en suspension dans un liquide. Une lumière cohérente et monochromatique, issue d'un laser solide à l'arsenure de gallium, traverse un échantillon du produit à analyser.

L'interaction de la lumière laser et des particules provoque des phénomènes de diffusion, notamment réflexion, réfraction et diffraction (Annexes L.1 et L.2).



Annexe L.1 : Schéma de fonctionnement global du granulomètre laser de laboratoire.



Annexe L.2 : Phénomènes optiques touchant des particules soumises à un rayonnement lumineux.

Les phénomènes optiques engendrés dépendent des caractéristiques des particules exposées au rayonnement, comme la rugosité, la taille, la transparence, l'indice de réfraction, etc.

Les particules dont le diamètre est inférieur à  $70 \mu\text{m}$  ( $d < \lambda/10$ ) sont analysées dans le domaine spectral de Rayleigh, alors que les particules plus grosses dont le diamètre est inférieur à  $350 \mu\text{m}$ , le domaine utilisé sera celui de Rayleigh-Gans-Debye.

Les principes mathématiques interprétant la lumière diffusée par l'échantillon sont modélisés pour des sphères (Beckman Coulter, 2003). La théorie de Mie est issue des équations de Maxwell et basée sur l'intensité angulaire d'une particule par rapport à sa taille. Elle représente une avancée importante dans la compréhension des phénomènes de lumière diffusée aux petits et grands angles. La théorie de Fraunhofer est réservée à des particules sphériques et complètement opaques à la lumière et ne nécessite pas la connaissance des indices de réfraction. La théorie de Mie, quant à elle, permet une meilleure identification des particules fines ( $< 0.5 \mu\text{m}$ ).

## Traitement des données

Le prélèvement s'avère crucial dans l'échantillonnage car l'échantillon doit être probabiliste et correct. Gy (1989) a défini qu'il fallait au moins 10000 objets pour faire une bonne analyse, soit environ 1 mg de particules de 20  $\mu\text{m}$ , 1 g de particules de 200  $\mu\text{m}$  ou 1 kg de particules de 2 mm.

Avant chaque analyse, le granulomètre mesure l'intensité du signal émis par le laser (*offset measurement*), vérifie l'alignement des détecteurs (*alignment*) puis opère une évaluation du bruit de fond (*background measurement*) pour faire abstraction des parasites inhérents à l'opération (qualité de l'eau, bulles d'air, etc.). La réalisation d'un *blank* et d'une session de nettoyage est nécessaire après chaque tour de carrousel afin respectivement de vérifier l'efficacité de l'appareil et d'entretenir la cuve et le circuit hydraulique de l'appareil. Des standard (comme des sables de Fontainebleau, microbilles de diamètres connus) sont également passés à ce moment-là pour vérifier la calibration du granulomètre.

Le logiciel délivre les résultats bruts de l'analyse sous la forme de fichiers à convertir en fichiers EXCEL. Si les courbes des aliquotes sont superposables, alors une moyenne est réalisée à partir de ces courbes. Dans le cas contraire, l'analyse est refaite jusqu'à retrouver un résultat positif.

## Le granulomètre laser in situ (LISST)

### Configuration

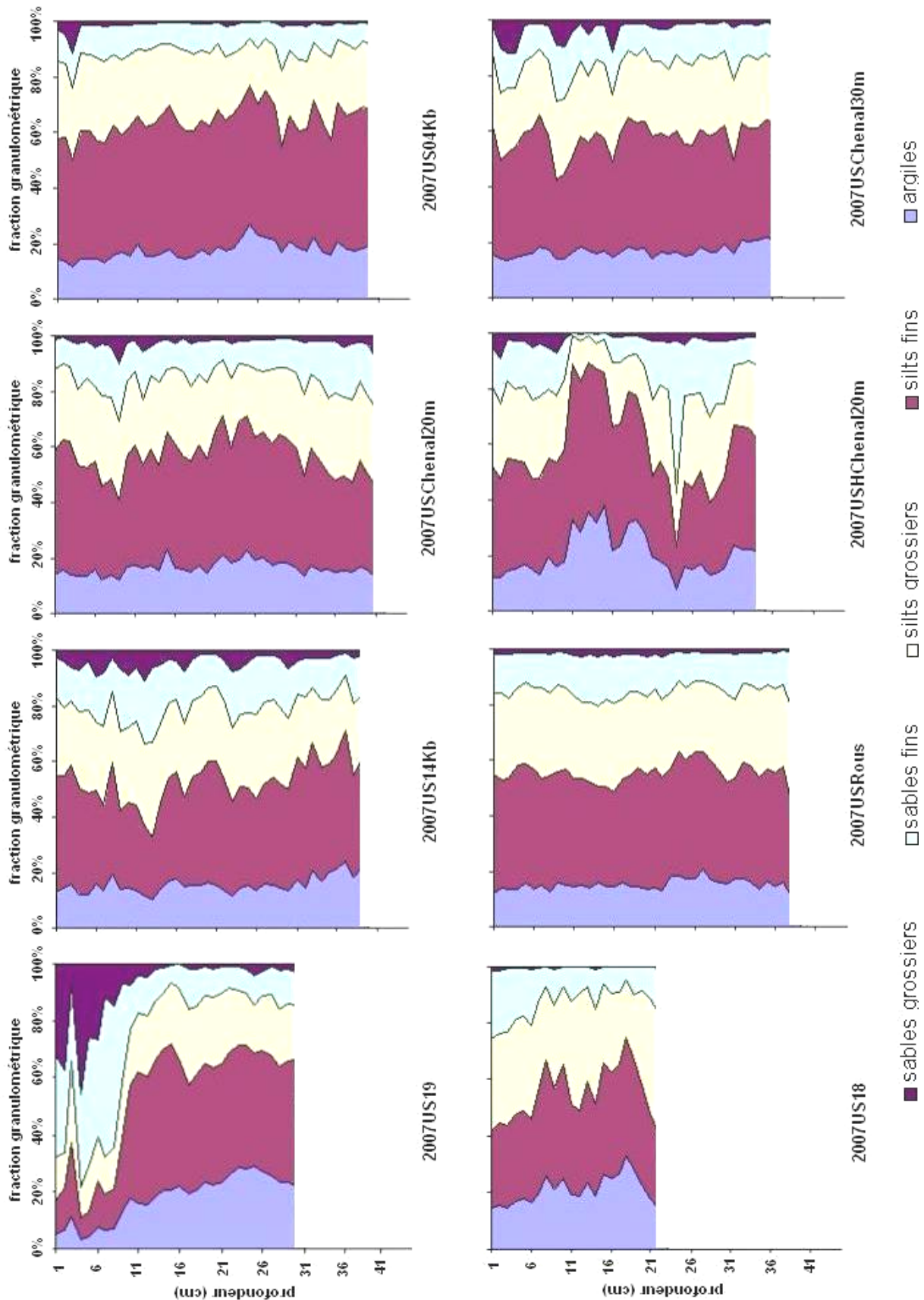
Utilisé in situ, il est monté verticalement dans une structure PVC issue d'une bouteille de prélèvement de 8 L type rosette après avoir déterminé un fichier de *background*.

L'étape de création du *background* permet de connaître l'état de l'intensité du laser et d'alignement des anneaux de silicone. Le fichier *background* retenu doit être le plus fidèle possible à celui de la dernière calibration en usine, sinon le bruit de fond demeure trop intense pour des résultats exploitables. Il est effectué au moyen d'une cuve d'eau distillée placée entre la source du laser et le détecteur, mise en agitation et couverte par un papier aluminium pour éviter les rayonnements parasites.

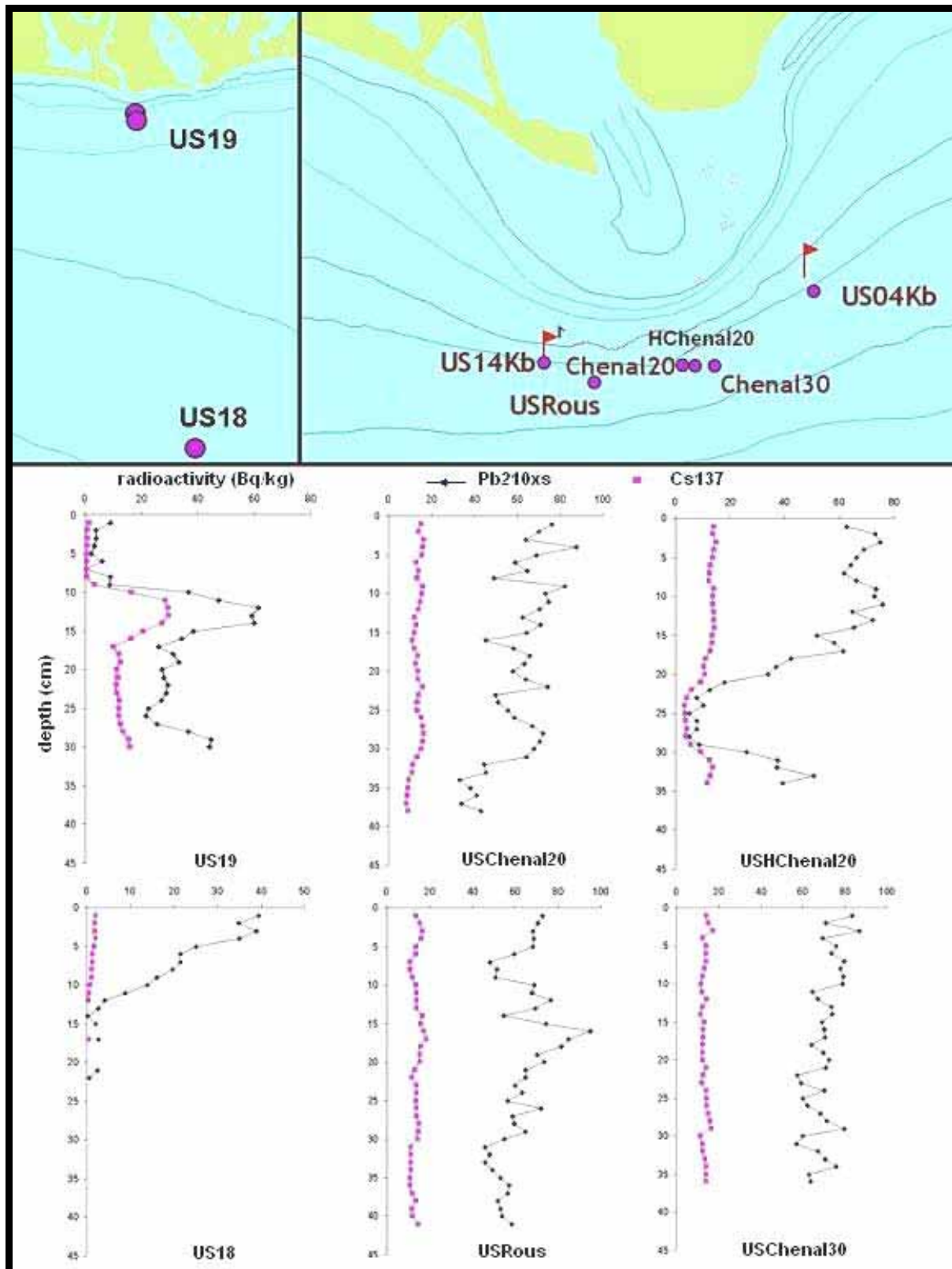
La fréquence d'échantillonnage lors des campagnes CARMEX et EXTREMA (1 et 2) a été fixée à 1 seconde, et le déclenchement et l'arrêt de l'appareil ont été réalisés manuellement, sans intervention du capteur de pression. Son immersion s'est déroulée entre des profondeurs de 10 m et 90 m, avec une proximité au fond d'un mètre à un mètre et demie.

Utilisé en laboratoire, il est programmé en mode temps réel pour analyser in vivo la PSD des matières en suspension dans la cuve. La répétabilité des résultats a été jugée très bonne d'après les nombreux tests effectués sur les particules présentes sur les filtres des campagnes océanographiques passés aux ultra-sons.

**ANNEXE M :**  
**RESULTATS DES ANALYSES**  
**GRANULOMETRIQUES ET**  
**PROFILS DE PROFONDEUR**  
**DE RADIOELEMENTS**



**Annexe M1 : Profils granulométriques des prélèvements issus de la campagne CARMEX (2007) en fonction de la profondeur (cm).**



Annexe M2 : Carte des prélèvements sédimentaires de la campagne CARMEX (2007) et profils de radioactivité de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  poids sec) en fonction de la profondeur de sédiments (cm). Les profils spectrométriques absents sont en cours d'analyses au Laboratoire de Mesures de Radioactivité des Echantillons de l'IRSN à Orsay.



# **ANNEXE N : PUBLICATIONS EDITEES ET SOUMISES**

## Radionuclide deposition in the Rhône River Prodelta (NW Mediterranean sea) in response to the December 2003 extreme flood

J. Miralles<sup>a,\*</sup>, M. Arnaud<sup>a,\*</sup>, O. Radakovitch<sup>b</sup>, C. Marion<sup>a</sup>, X. Cagnat<sup>c</sup>

<sup>a</sup> IRSN, DE/SESURE/LERCM, Base IFREMER Méditerranée, BP 330, F-83507 La Seyne-sur-Mer cedex, France

<sup>b</sup> CEREGE, UMR 6635, CNRS/Université Paul Cézanne, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex, France

<sup>c</sup> IRSN/DEI/STEME/LMRE, Bois des Rames Bât 501, 91400 Orsay, France

Accepted 5 September 2006

### Abstract

The extreme Rhône River flood that peaked in early December 2003 with water discharges as high as  $11,500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , induced major damage in southern France and transferred large amounts of radionuclides that were associated with suspended particulate matter such as  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ . Specific marine locations in the close vicinity of the Rhône River Mouth were sampled three times in December 2003, February 2004 and April 2004 in order to quantify the consequences of flood events in the Rhône River Prodelt and to investigate the sedimentary depositional patterns through time. The  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  profile analyses in sediment revealed the existence of two particulate matter inputs, one that was related to the December extreme flood and the other to a peak flood of  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  of water discharge that occurred in January 2004. The December event net deposition was assessed at  $75 \pm 19 \text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$ . The net deposition in response to the January 2004 flood event, although less damaging, is of the same order of magnitude to the December 2003 deposition, i.e.  $71 \pm 21 \text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $16 \pm 5 \text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$ . The sedimentary records of the December flood exhibited from the cores collected in December 2003, February 2004 and April 2004 are similar arguing for good environmental signal preservation through time but, the standard deviation of flood deposition estimate increases with time after the December flood event indicating a loss of accuracy with time.

© 2006 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** radionuclide deposition; extreme flood; Rhône River Prodelt; Gulf of Lions

### 1. Introduction

The Rhône River is known to be the main river of the Western Mediterranean Sea and induces a large transfer of suspended particulate matter and associated radionuclides to the Gulf of Lions and the Western Mediterranean Sea

when flood events occur. It is characterized by a 7.6 millions  $\text{T yr}^{-1}$  mean solid discharge and a  $1700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  mean water discharge ( $300\text{--}3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; Pont et al., 2002) with a large annual variability in response to snow melting or autumn rains that could induce flood events. Such events play a major role in the annual sediment budgets (Walling et al., 1992; Picouet et al., 2001). Indeed, in the Mediterranean area, sudden and large floods have a major action on both the sedimentary fluxes and the geomorphological evolution of the river bed (Serrat et al., 2001; Pont et al., 2002); for example, October 1993 flood event, which spent 24 days,

\* Corresponding authors. Tel.: +33 6 12 80 46 02; fax: +33 4 94 30 44 16.

E-mail addresses: jmiralles@wanadoo.fr (J. Miralles), mireille.arnaud@ifremer.fr (M. Arnaud).



delivered 10.7 million tons of suspended particulate matter to the Mediterranean Sea, the 5 days flood of January 1994 drove 6.3 millions tons (Pont, 1997) and the large November–December 2002 flood, 7.6 millions tons i.e. a 88% of the annual particulate flux (Rolland et al., 2004a,b). The riverine inputs to the marine systems have been largely studied through marine sediment investigations with some relevant proxy as heavy metals (Ferrand et al., 1999; Bertolotto et al., 2005) or organic matter (Accomero et al., 2003; Miltner et al., 2005). Previous investigations on radionuclides as  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  allowed constraining sedimentary patterns over centennial time scale in agreement with their respective particulate affinity (Zuo et al., 1991, 1997; Miralles et al., 2005). Unfortunately, Rhône River floods occur at very short time-scales, from day to week that can not be efficiently studied by geochemical tracers such as  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  owing to their respective half-lives. Thus,  $^7\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 53$  d) investigations were carried out on prodelta sediments in order to evidence the thickness of sediment deposited during the December extreme flood and the induced  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  inventories.

This work presents a characterization of the consequences of the extreme Rhône River flood event of December 2003; it deals with the  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  riverine fluxes and sediment inventories determined in the Rhône River Prodeltà area and quantifies the retention of radionuclide in prodelta deposits that can act as a secondary source of sediment and contaminants.

## 2. Settings

### 2.1. Rhône river dynamics

The Rhône River drains a 98,000 km<sup>2</sup> wide watershed along its 832 km length in France. South of Arles (50 km from the river mouth), it splits into two main channels, each with a different importance; the eastern arm, Grand Rhône, is 52 km long and encompasses 90% of the total river water flux while the western arm — Petit Rhône — is 62 km long and represents the remaining 10%. The annual average water discharge of the Rhône River is 1700 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> and the annual suspended particulate discharge varies from 1 10<sup>6</sup> T yr<sup>-1</sup> to 26.5 10<sup>6</sup> T yr<sup>-1</sup> (Antonelli, 2002). Taking into account the bottom load transport, 77% to 91% of the total suspended particulate matter load transit under flood conditions (Pont and Bombled, 1995; Rolland et al., 2004a,b).

The Rhône River is also a point source for the transfer of artificial radionuclides released by the Marcoule reprocessing plant and the weathering of the watershed contaminated by global fallout that are discharged in the river. Previous studies on radionuclide

transfers revealed that 86% of the  $^{137}\text{Cs}$  is bounded on less than 450 nm particles (Eyrolle and Charmasson, 2004). In 1991,  $^{137}\text{Cs}$  delivery to the Western Mediterranean Sea was 19.6 Tq which 40% were trapped in the prodelta area (Charmasson, 2003).

### 2.2. Sedimentation conditions at the Rhône River Mouth

The Rhône River discharge is spread over the continental margin by a benthic nepheloid layer system (Aloisi et al., 1982; Monaco et al., 1990) and superficial plume deflected by external conditions (mainly wind forcing) as shown by numerous modeling studies (Estournel et al., 1997; Marsaleix et al., 1998; Estournel et al., 2001; Ulses et al., 2005).

The Rhône prodelta is a 30 km<sup>2</sup> area in the vicinity of the Rhône River Mouth extending off the deltaic plain (Aloisi et al., 1975; Boldin et al., 1988; Durrieu de Madron et al., 2000). It is characterized by high organic carbon content (1–2%), silty mud sedimentation (Durrieu de Madron et al., 2003) and the highest sediment accumulation rates at the margin scale (Miralles et al., 2005).

### 2.3. December 2003 flood episode

In December 2003, an exceptional flooding episode occurred in the Rhône River, with maximum water discharge reaching 11,500 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> on the 3 December at Beaucaire (70 km upstream the river mouth, where the Rhône River is still in one channel) — the highest ever recorded for this river. The recurrence time of such an event is nearly 100 yrs (Consensus Conference, 2005). The water discharge increased from 2400 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> to 11500 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in less than 30 h. The flood was induced by a rainy storm episode across the entire south-eastern region of France caused by the collision between cold air masses and warm humid air masses coming from the Mediterranean Sea. This event was particularly impressive because of its length — it lasted more than 48 h, instead of the more typical 24–36 h. In Marseilles, precipitations reached 150 mm in 24 h at a time when monthly averages are usually in the order of 50–70 mm. The consequences of this catastrophic flood event included over 500 km<sup>2</sup> of flooded land in the Rhône River low-valley and several deaths. The city of Arles was submerged under 16 millions m<sup>3</sup> of floodwater. Here, the water discharge significantly increased from the 1st December to peak at 10,000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> on the 3rd December followed by a steady decrease until the 20th December 2003 (Fig. 1).

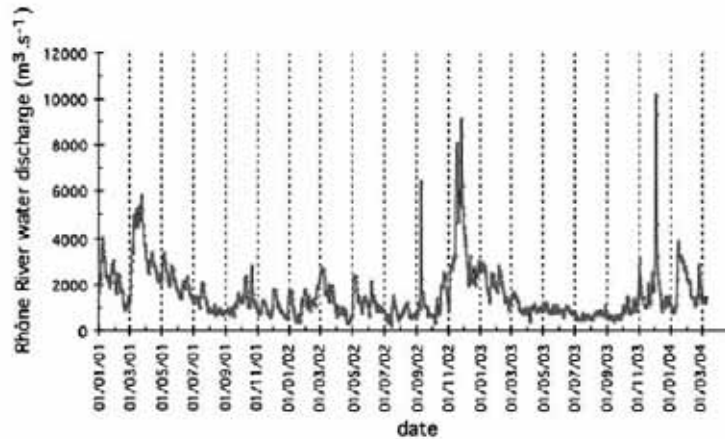


Fig. 1. Rhône River water discharges ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) measured at Arles (50 km upstream the river mouth) during the 01/01/2001–01/03/2004 period.

Throughout this period, the water discharge remained in excess of the mean Rhône River water discharge (Fig. 1). Suspended matter concentration ([SPM] in  $\text{mg l}^{-1}$ ) range between  $76 \text{ mg l}^{-1}$  corresponding to the Rhône River off-flood event period suspended load to more than  $3600 \text{ mg l}^{-1}$  at its maximum (Antonelli et al., in press) (Fig. 2). Indeed, this flood event induced the transfer of  $5.4 \cdot 10^6 \text{ T}$  of suspended particulate matter (SPM) towards the sea during the 1st–7th December period.

Radionuclides associated to the Rhône River solid discharges delivered to the Gulf of Lions reached  $99 \pm 22 \text{ Gbq}$  of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $77 \pm 16 \text{ Gbq}$  of  $^{137}\text{Cs}$  (respectively Rolland et al., 2004a,b; Antonelli et al., in press). Out of any flood period,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity associated to the SPM is constant at  $60 \text{ Bq kg}^{-1}$ . It decreased to  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$  when water discharge peaked out on the 3rd December (Eyrolle et al., 2006a). The  $^{137}\text{Cs}$  content remains constant at  $12 \text{ Bq kg}^{-1}$  all along the year without flood considerations (Antonelli et al., in press).

### 3. Sampling and methods

Six sediment cores (20–40 cm length) were collected during an EUROSTRATAFORM cruise on the 16th December 2003, just after the extreme December 2003 Rhône River flood. Analyses of specific radionuclides ( $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) were performed in order to quantify the particulate flux to Rhône River Prodelta in response to specific flow conditions.  $^7\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 53.2 \text{ d}$ ), a naturally occurring radionuclide resulting from the cosmic ray spallation of nitrogen and carbon in the atmosphere, was analyzed in order to clarify recent particulate deposition (up to 200 d).  $^7\text{Be}$  reaches the Earth's surface bounded on detrital particles and is delivered to marine systems with riverine inputs (Dibb and Rice, 1989; Canuel et al., 1990) depending both on the particulate composition and salinity (Bloom and Crecelius, 1983; Baskaran et al., 1997). Palinkas et al. (2005) showed that the use of  $^7\text{Be}$  to assess flood deposition has to be assessed by sedimentological variable analyses.

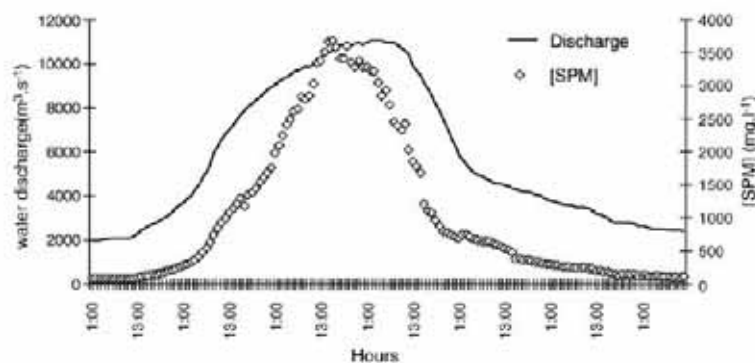


Fig. 2. Rhône River water discharges ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) and associated suspended particulate matter concentration ([SPM] in  $\text{mg l}^{-1}$ ) in Arles (from Antonelli et al., in press).

$^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2}=30.1$  yrs) is an anthropogenically-derived radionuclide. It entered the Environment in response to atmospheric nuclear device tests from 1954 to 1980 that induced a global fallout. Others sources are accidental human releases as Chernobyl accident in April 1986 that have local influences (Anspaugh et al., 1988) and authorized releases from nuclear power plants. In freshwater,  $^{137}\text{Cs}$  has a high affinity for the clay (Rogowski and Tamura, 1970) while in seawater, the ion competition generates its releases in dissolved phase. This mechanisms are also responsible of the post-deposition-

al mobility of  $^{137}\text{Cs}$  in marine sediments (Radakovitch et al., 1999; Frignani et al., 2004). Indeed,  $^{137}\text{Cs}$  analyses are justified by its toxicity to the whole Environment.

$^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2}=22.3$  yrs) is a naturally occurring radionuclide produced in the atmosphere by  $^{222}\text{Rn}$  decay which binds on submicron atmospheric particles (Gillette et al., 1972). It is deposited onto the Earth's surface by wet and dry deposition processes. Owing to its specific half-life,  $^{210}\text{Pb}$  is useful to assess centennial sedimentation rates in marine systems (Miralles et al.,

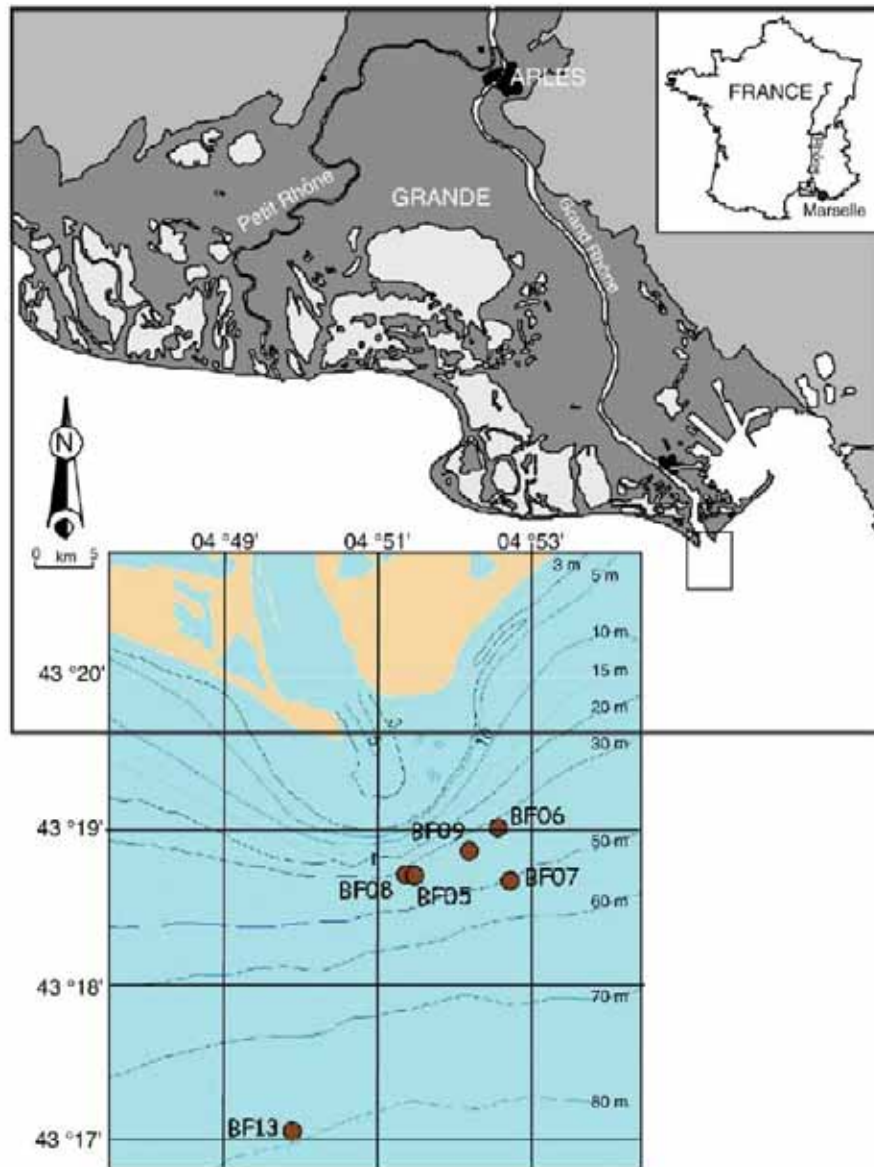


Fig. 3. Sampling sites in the close vicinity of the Rhône River Mouth.

Table 1  
Sampling site locations at the Rhône River Mouth (WGS 84 reference plot)

	Longitude	Latitude	Depth (m)	Core length (cm)
BF 05	04°51'197	43°19'696	28	33
BF 06	04°52'015	43°19'007	27	37
BF 07	04°52'118	43°18'636	45	29
BF 08	04°51'116	43°18'704	26	36
BF 09	04°51'732	43°18'855	29	39
BF 13	04°49'940	43°16'941	79	39

2005). However, in case of river floods the  $^{210}\text{Pb}$  analysis can be used to evidence any particle depositions in sediments.

Sampling sites were chosen around the river mouth between 20 m and about 80 m depth (Fig. 3; Table 1). The cores were sub-sampled in 1 cm thick layers. Each layer was dried, crushed, passed through a 2 mm sieve and conditioned in 200 ml and 20 ml geometries for gamma spectrometry investigations. An aliquot is preserved for grain-size feature characterization at LERCM, La Seyne-sur-mer (IRSN, France) on a Coulter–Beckman LS 13 320 laser grain-sizer. This was not performed on all studied cores but focused on cores we assumed imprinted by flood.

Radionuclides activity are measured part at CER EGE (Centre Européen d'Enseignement et de Recherche des Géosciences de l'Environnement, Université P. Cézanne – CNRS, France) where gamma spectrometry is performed on 20 ml volume geometry samples using a semi-planar intrinsic Germanium detector. The detector is calibrated by counting sediment standards of known activity. The other non-destructive gamma spectrometry are undergone at IRSN Orsay with N-type hyper-purity germanium detectors in 200 ml volume containers and measured with a counting time of 20 or 40 h. Efficiency calibrations from 22.5 keV to 1.8 MeV were carried out using mixed gamma-ray

sources in a solid resin–water equivalent matrix of  $1.15 \text{ g cm}^{-3}$  density. Activity results are corrected for true coincidence summing and self-absorption effects (Lefèvre et al., 2003).  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities are obtained from the 477.7 KeV and 671 KeV photopeaks respectively. Excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ) activities are determined by subtracting the measured  $^{214}\text{Pb}$  activity (352 KeV photopeak) as an indicator of supported  $^{210}\text{Pb}$  to the total  $^{210}\text{Pb}$  peak (46.5 KeV photopeak). The activity uncertainty (at  $k=2$ ) is calculated by standard propagation of calibration source uncertainty, the statistic counting uncertainty (sample and background) and the summing and self-absorption correction uncertainties.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Flood deposition

Several investigations proved  $^7\text{Be}$  to be a good tracer of flood deposition in coastal zones (Sommerfield et al., 1999; Mullenbach et al., 2004). Nevertheless, Palinkas et al. (2005) evidenced an underestimation of the deposited layer using only  $^7\text{Be}$  as proxy related to the grain-size changes. In order to assess the relevance of  $^7\text{Be}$  as flood deposition proxy in this work, we determined grain-size changes in each investigated cores. The grain-size distribution ( $d_{50}$ ) permits to exhibit any changes in deposition conditions and to overview the whole flood consequence for the sediment column.

Among the six prodelta sediment cores,  $^7\text{Be}$  is not detected in BF 08 and it is only found in the superficial sediment layer (1 cm depth) in BF 13. Regarding the other cores,  $^7\text{Be}$  was detected at maximum depths ranging from 5 cm to 18 m indicating a large variability of sedimentary record for this area (Fig. 4; Table 2). The core BF 05 presents a discontinuous  $^7\text{Be}$  profile down core with two peak values at 1 cm and 10 cm depth

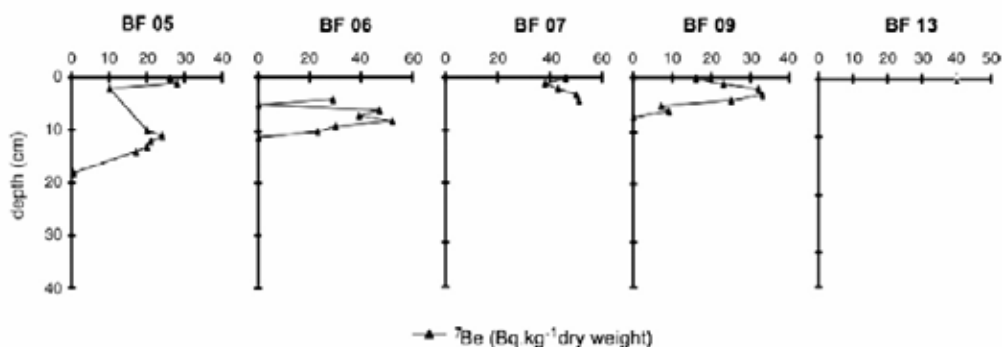


Fig. 4.  $^7\text{Be}$  activity ( $\text{Bq kg}^{-1}$  dry weight) in cores collected in December 2003.

Table 2  
 $^7\text{Be}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$  dry weight) limit depth of detection in sediments

	$^7\text{Be}$ limit of detection depth (cm)	Water depth of collection (m)
BF 05	27	28
BF 06	11	27
BF 07	5	45
BF 08	Not detected	26
BF 09	9	29
BF 13	1	79

while  $^7\text{Be}$  was still detected at 18 cm depth. The profile shape could be attributed to mixing processes affecting older material deposited for more than  $\sim 200$  days and recently deposited material disturbing the  $^7\text{Be}$  signal. Other explanation is that high water discharges caused re-suspension of old material stocks deposited onto the Rhône River bed removed by river floods and deposited in the prodelta area, as suggested by Thomas (1997). Better understanding could be provided by comparison with  $^{234}\text{Th}$  penetration depth. Unfortunately, we did not measure the  $^{234}\text{Th}$  activity down core due to his short half life ( $t_{1/2}=24.1$  d). However, comparisons with grain-size distribution allow to assess deposition condition changes down cores.

Grain-size distributions are assessed by medium diameter ( $d_{50}$ ) distribution down core (Fig. 5). In core BF 05, the  $d_{50}$  baseline is  $14 \pm 4$   $\mu\text{m}$  while it peaks at 65  $\mu\text{m}$  at 7 cm depth. Nevertheless, even if this peak can be associated to high energy deposition, it can not be obviously related to the  $^7\text{Be}$  distribution. The BF 05 grain-size baseline is higher than other baseline that range from 6 to 9  $\mu\text{m}$  (Table 3) that is synonymous of high energy conditions resulting in coarser material deposition. In core BF 06 and BF 07,  $d_{50}$  ranges from about 10  $\mu\text{m}$  to 30–40  $\mu\text{m}$  with respective baselines of  $7 \pm 3$   $\mu\text{m}$  and  $9 \pm 1$   $\mu\text{m}$  (Table 3).

In BF 06, where  $^7\text{Be}$  occurs until 11 cm depth,  $d_{50}$  increases constantly from 18 cm depth to the top with a

Table 3  
 Medium diameter ( $d_{50}$  expressed in  $\mu\text{m}$ ) baselines of the prodelta sediment cores

	$d_{50}$ baseline ( $\mu\text{m}$ )
BF 05	$14 \pm 4$
BF 06	$7 \pm 3$
BF 07	$9 \pm 1$
BF 09	$6 \pm 2$
BF 13	$9 \pm 2$

high  $d_{50}$  value (36  $\mu\text{m}$ ) at 6 cm depth. In BF 07,  $d_{50}$  peaks twice at 1 cm and 17 cm depth while  $^7\text{Be}$  only occurs until 5 cm depth. We can thus assume that the 17 cm depth  $d_{50}$  rise is caused by an old flood. The core BF 09, where  $^7\text{Be}$  occurs until 9 cm depth, exhibits a low  $d_{50}$  variability, from 4  $\mu\text{m}$  to 19  $\mu\text{m}$ . The  $d_{50}$  increases from 12 cm depth to the top with higher  $d_{50}$  in the 0–7 cm depth layer and a 4 cm depth peak at 19  $\mu\text{m}$ . Indeed, this argues for a general deposition energy increase. Nevertheless, the grain-size increase begins at 12 cm depth while  $^7\text{Be}$  occurs until 9 cm depth. Thus, the use of  $^7\text{Be}$  as unique tracer of flood event is doubtful as evidenced in Wheatcroft et al. (2006).

In BF 13 core,  $d_{50}$  distribution does not evidence any drastic energy condition variations with a quite constant shape. This station doesn't seem to be affected by any recent flood events. Recurring investigations on benthic macro fauna at this site showed that Rhône River floods were followed by blooms of opportunistic species taking advantage of recent high organic carbon deposition (Salen-Picard et al., 2003). Nevertheless, this phenomenon was not recorded in December 2003 (C. Salen-Picard, Pers. Comm.), demonstrating the weak influence of the flood event at this location. Indeed, the main wind direction was SSE during the November–December period, according to the ALADIN<sup>®</sup> meteorological modeling studies (C. Estournel, C. Ulses, Pers. Comm.). This experiment shows a general trend of down welling along

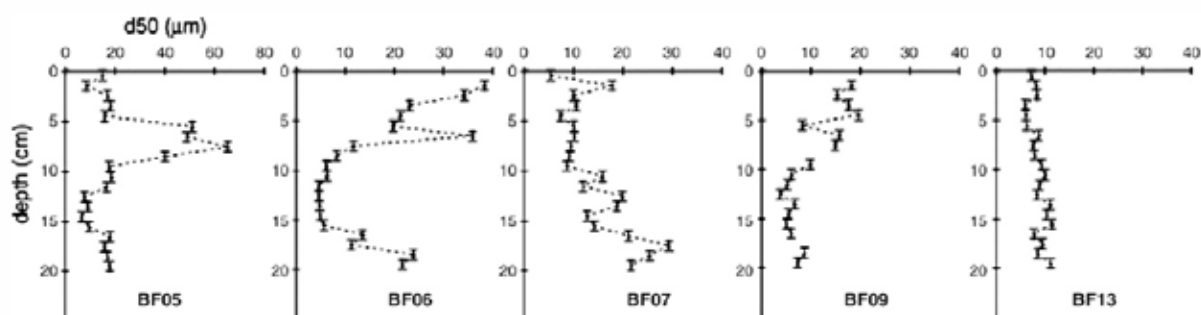


Fig. 5. Medium diameter  $d_{50}$  ( $\mu\text{m}$ ) distribution in cores collected in December 2003.

the coast, caused by elevated surface water levels, and an anticlockwise westward coastal current that pasted the Rhône River plume onto the coast (Marsaleix et al., 1998; Estournel et al., 2001).

Unfortunately, the grain-size distribution assessment does not allow neither evidencing flood layer thickness nor confirming  $^7\text{Be}$  efficiency as flood tracer. Definitively, we will not use the  $^7\text{Be}$  as flood layer proxy but as recent particulate matter deposition.

#### 4.2. $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ and $^{137}\text{Cs}$ vertical distribution and inventories

In cores where  $^7\text{Be}$  were detected, an obvious feature is the distribution of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  through the sediment column, despite various emissions patterns in the environment and biogeochemical behaviors (Fig. 6). While  $^{137}\text{Cs}$  post-depositional mobility has been proven in marine sediments (Radakovitch et al., 1999; Frignani et al., 2004),  $^{210}\text{Pb}$  is not labile once bound to a particle and deposited onto the seafloor. Thus, the extension of the  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profile all over the cores suggests a large particulate flux episode. The  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profiles do not exhibit clear radioactive decay trends preventing any attempt of geochronology assessment.

$^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  have similar geochemical behaviors in sediments but their respective half-lives vary from several orders of magnitude, from day to year. Despite these respective features, both radionuclides are detected at similar depths in sediments. This argues to a sediment signal forcing by grain-size.

The  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity distributions exhibit specific sediment layers characterized by an activity drastic decrease upwards. These decreases are assumed to be dilution

phenomena in response to large particulate matter supply (Dominik et al., 1987; Miralles et al., 2004). We assume that the beginning of the decrease in surface layers is related to the onset of a flood, and that the minimum radionuclide activity value marks the maximum flood solid discharge or the flood peak; indeed, for both cores BF 05 and BF 06 the  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity decreases from  $60 \text{ Bq kg}^{-1}$  (at 18 cm and 6 cm depth respectively) to less than  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$  at 5 cm and 2 cm depth. For cores BF 07 and BF 09, the  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity decreases from  $60 \text{ Bq kg}^{-1}$  (at 5 cm and 2 cm depth respectively) to close to  $40 \text{ Bq kg}^{-1}$  at the surface. Therefore,  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activities measured in cores BF 05 and BF 06 are in agreement with activities associated to suspended particulate matter measured in the Rhône River at Arles (Eyrolle et al., 2006b). Thus, we assume these cores strongly imprinted by flood deposition.

In cores BF 07 and BF 09, the lower  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity values assumed to label the day of maximum water discharges are still higher than  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$ , typical of riverine SPM during high water discharge periods, that relates to a weaker dilution process and may not reflect the flood event with accuracy. However, it is difficult to accurately determine the outcome of a flood on a radionuclide profile and the induced radionuclide inventory; hence, we decided to assess the flood deposition into a large range defined by two assumptions: low or high deposition.

The low deposition assumption considers radionuclide deposition occurs from the flood start to the flood peak — i.e. low activity value, while the “high deposition scenario” assumes a deposition which begins with the flood and ends when  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity reaches the values of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  associated to the SPM transfer in the Rhône River ( $60 \text{ Bq kg}^{-1}$ ). When several layers of dilution phenomena

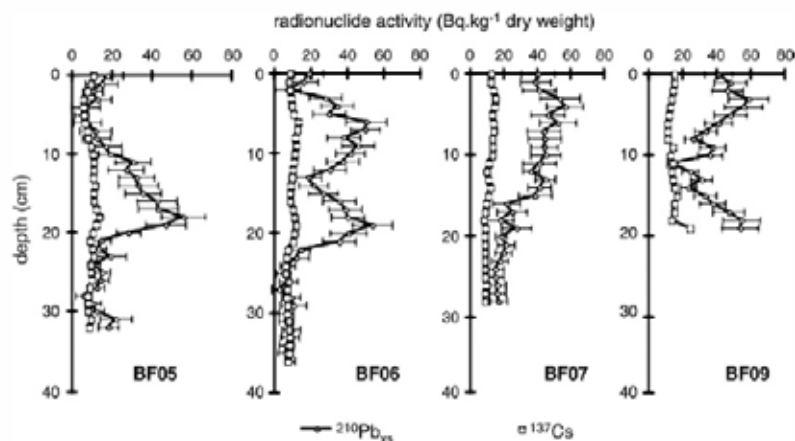


Fig. 6.  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities ( $\text{Bq kg}^{-1}$  dry weight) distribution in sediment cores where  $^7\text{Be}$  analyses exhibited recent particulate deposition. Error bars correspond to  $\pm 2\sigma$ .  $^{137}\text{Cs}$  activity error bars are included in the point.

Table 4  
 $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  inventories deposited by December 2003 flood

	Sediment layer (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	$^{137}\text{Cs}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
BF 05	18 to 5	Low: $3925 \pm 344$	Low: $1372 \pm 35$
	18 to surface	High: $4625 \pm 393$	High: $1890 \pm 40$
BF 06	6 to 2	Low: $1370 \pm 192$	Low: $462 \pm 19$
	6 to surface	High: $1764 \pm 232$	High: $647 \pm 19$
BF 07	4 to surface	$1712 \pm 176$	$494 \pm 19$
BF 09	3 to surface	1668	501

exist in a sediment core, the deeper sequence layer is, the older flood event like in cores BF 06 and BF 09 (Fig. 6; Table 4). Indeed, the deeper dilution features, whose lower  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  values at 13 cm and 12 cm depth respectively, are expected to correspond to the November 2002 flood. The thicknesses of the layers that correlate to dilution processes vary between 18 cm in core BF 05 to 3 cm in the BF 09 core (Fig. 6; Table 4). The corresponding  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  inventories vary between  $1370 \pm 192 \text{ Bq m}^{-2}$  and  $4625 \pm 393 \text{ Bq m}^{-2}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  inventories between  $462 \pm 19 \text{ Bq m}^{-2}$  and  $1890 \pm 40 \text{ Bq m}^{-2}$ . Nevertheless, the core BF 09 shows a  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  shape of decreasing radionuclide activity layer from a depth of 3 cm to the sediment surface, but lacks the expected inflexion point to mark the flood peak. Thus, the flood deposition scenario cannot be determined from this core: consequently, the  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  inventories were partial inventories that were not taken into account in the mean flood deposition inventories estimate in this area. Taking this into account, mean  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  inventories corresponding to the December flood event are

estimated to be  $2518 \pm 628 \text{ Bq m}^{-2}$  and  $893 \pm 62 \text{ Bq m}^{-2}$  respectively. At the prodelta scale ( $30 \text{ km}^2$ ), these inventories correspond to the deposition of  $75 \pm 19 \text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}$  and  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$ , or, respectively, 76% of the total  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  particulate flux and 35% of the total  $^{137}\text{Cs}$  particulate flux measured in the Rhône River (Antonelli et al., in press). This is in agreement with the estimate of the  $^{137}\text{Cs}$  trapped in sediments of the Rhône River Prodelt area determined by Charmasson (2003), i.e. 40% related to the prodelta sediment high clay content (e.g. Durrieu de Madron et al., 2000).

#### 4.3. Temporal variations of sediment deposition rates

In order to assess changes in the sedimentation patterns through time, core samples were collected at site BF 05 three times, in December 2003, February 2004 and April 2004, both  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activities were measured (Fig. 7). The dilution features related to the December 2003 flood are present in each samples at various depths. In the December 2003 core the dilution feature corresponding to the flood is located between 5 and 18 cm depth. The same feature is found between 10 and 18 cm depth in the February 2004 core and between 18 and 25 cm depth in the April 2004 core. From December 2003 to February 2004, the imprint of the December 2003 flood was progressively buried by 5 cm over this two month-period for a  $2.5 \text{ cm month}^{-1}$  sediment accumulation rate. Instead of actual deepening of the dilution feature between December 2003 and February 2004, it is probably more accurate to suggest compaction as a primary mechanism creating this

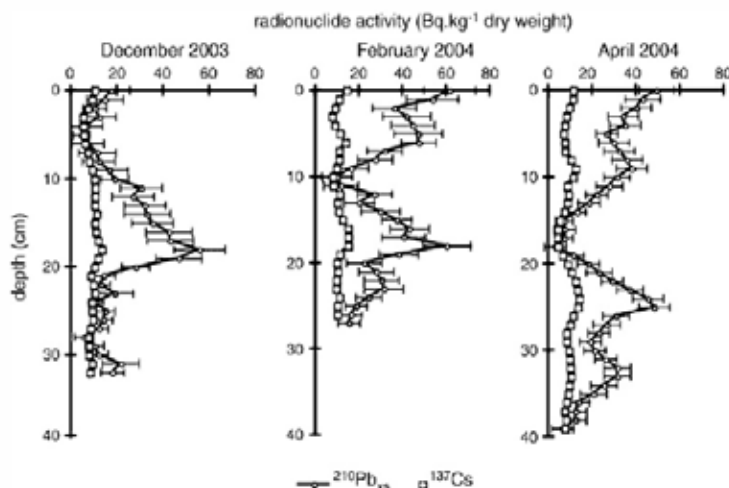


Fig. 7.  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activities ( $\text{Bq kg}^{-1}$  dry weight) at BF 05 sampling site (a) in December 2003, (b) February 2004 and (c) April 2004. Error bars correspond to  $\pm 2\sigma$ .  $^{137}\text{Cs}$  activity error bars are included in the point.

feature, since the decrease of the  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity is 13 cm long in the December 2003 core and 8 cm in the February 2004 core. Furthermore, a new dilution feature appears in the February 2004 core between 2 and 6 cm depth that can be related to the increase of the Rhône River water discharges up to  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in January 2004; this event is also evident in the April 2004  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  shape between 5 cm and 9 cm depth, deepened by 3 cm over a two month-period implying an apparent sediment accumulation rate of  $1.5 \text{ cm month}^{-1}$ , i.e. 2 orders of magnitude higher than the centennial sediment accumulation rates measured by  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  method (Miralles et al., 2005).

#### 4.4. Time evolution of radionuclide inventories

The estimated  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  low and high inventories for the February 2004 and April 2004 cores were determined according to the same assumptions as the December 2003 inventories (Table 5). The estimated mean  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  inventories in sediments are similar in the December 2003, February 2004 and April 2004 cores: they range between  $4275 \pm 495 \text{ Bq m}^{-2}$  in the December 2003 core and  $2897 \pm 1488 \text{ Bq m}^{-2}$  in the April 2004 core. The mean  $^{137}\text{Cs}$  inventories are also similar through time: they range from  $1631 \pm 366 \text{ Bq m}^{-2}$  in the December 2003 core to  $1110 \pm 526 \text{ Bq m}^{-2}$  in the April 2004 core.  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  distribution in these cores revealed a dilution feature in the first centimeters of the February 2004 and April 2004 cores. These are probably related to a water discharge increase that occurred in January 2004, with maximum value reaching  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in Arles (Fig. 7). Induced  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  deposition are estimates at  $2375 \pm 713 \text{ Bq m}^{-2}$  and  $537 \pm 153 \text{ Bq m}^{-2}$  in the February 2004 core, or  $71 \pm 21 \text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $16 \pm 5 \text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$  at the prodelta scale, similar to the extreme December 2003 flood net deposition (Tables 4

Table 5  
Flood deposition in cores collected at site BF 05 in December 2003, February 2004 and April 2004

	December 2003	February 2004	April 2004
$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Low: $3925 \pm 344$	Low: $2721 \pm 264$	Low: $1845 \pm 158$
	High: $4625 \pm 393$	High: $4024 \pm 318$	High: $3949 \pm 233$
	Average $\pm$ SD: $4275 \pm 495$	$3373 \pm 921$	$2897 \pm 1488$
$^{137}\text{Cs}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Low: $1372 \pm 35$	Low: $1041 \pm 31$	Low: $738 \pm 17$
	High: $1890 \pm 40$	High: $1523 \pm 38$	High: $1482 \pm 24$
	Average $\pm$ SD: $1631 \pm 366$	$1282 \pm 341$	$1110 \pm 526$

Table 6  
 $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  deposition at site BF 05 in response to the January 2004 water discharge rise

	February 2004	April 2004
$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Low: $1871 \pm 193$	Low: $1283 \pm 113$
	High: $2880 \pm 245$	High: $3030 \pm 186$
	Average $\pm$ SD: $2375 \pm 713$	$2156 \pm 1235$
$^{137}\text{Cs}$ inventory ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Low: $429 \pm 19$	Low: $335 \pm 10$
	High: $646 \pm 24$	High: $756 \pm 16$
	Average $\pm$ SD: $537 \pm 153$	$545 \pm 298$

and 6). In fact, maximum water discharge value was lower than the December 2003 peak but remained high for a longer time period (one day higher than  $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in December 2003 and about 1 week in January 2004).

## 5. Conclusions

The December 2003 Rhône River flood, which peaked on 3, December, was an extreme event characterized by water discharges that reached  $11,500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in Beaucaire (70 km upstream) and about  $10,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in Arles, where flood damages were substantial. Despite high difficulty to define the flood layer, the assumption of two various deposition scenarios allowed us to determine the range of flood particulate deposition. Radionuclide depositions related to this event are  $75 \pm 19 \text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$ , about 76% and 35% of the annual radionuclide Rhône River budget.

The comparison between sedimentary radionuclide inventories in cores collected at different 2-month lap time (December 2003, February 2004 and April 2004) showed that the flood record ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  inventories) did not change with time. However, the standard deviation increased with time and reduced the accuracy of the radionuclide particulate flux estimates.

These investigations also allowed quantification of particulate flux inputs related to an increase of the Rhône River water discharges in January (up to  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), which induced a net deposition of  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in a same order of magnitude as the extreme December 2003 flood. We emphasize that prodelta sediment can be used as a relevant proxy of the riverine short time-scale events.

Nevertheless, it has to be taken into account that these estimates of Rhône River flood event were based on a too few number of sediment cores to hope accurately defined the sedimentary dynamics in such extreme condition at the whole prodelta scale. Improvements have still to be done on mapping of the flood layer off shore to accurately assess the response of the Continent–Ocean transitional area when Rhône River extreme events occur.



## Acknowledgements

This study was supported by the European project EUROSTRATAFORM (number EVK3-CT-2002-00079) and IRSN research program. The authors thank the crews aboard the *N/O Suroît* (IFREMER), *N/O Antedon II* (INSU), and *N/O Téthys II* (INSU) and Serge Berné for December 2003 cruise organization. The authors thank the CNR (Compagnie Nationale du Rhône) for the Rhône River discharge data. Authors would also thank the reviewers that contributed to improve the quality of this manuscript.

## References

- Accornero, A., Picon, P., Debové, F., Charrière, B., Buscaïl, R., 2003. Organic carbon budget at the sediment–water interface on the Gulf of Lions continental margin. *Cont. Shelf Res.* 23, 79–92.
- Aloisi, J.-C., Monaco, A., Pauc, H., 1975. Mécanismes de la formation des Prodeltas dans le Golfe du Lion. Exemple de l'embouchure de l'Aude (Languedoc). *Bull. Inst. Geol. Bassin Aquitaine* 18, 3–12.
- Aloisi, J.-C., Cambon, J.-P., Carbonne, J., Cauwet, G., Millot, C., Monaco, A., 1982. Origine et rôle du néphéloïde profond dans le transfert des particules au milieu marin. Application au Golfe du Lion. *Oceanol. Acta* 5, 481–491.
- Anspaugh, L.R., Catlin, R.J., Goldman, M., 1988. The global impact of the Chernobyl accident. *Science* 242, 1513–1519.
- Antonelli, C., 2002. Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval. PhD Thesis, Université de Provence, AIX-MARSEILLE, 279 pp.
- Antonelli, C., Eyrolle, F., Rolland, B., Amaud, M., Provansal, M., Sabatier, F., in press. Suspended sediment and artificial radionuclide fluxes during the exceptional floods. Case study: the Rhône River (SE France) in December 2003. *Geomorphology*.
- Baskaran, M., Ravichandran, M., Bianchi, T.S., 1997. Cycling of  $^{7}\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in a high DOC, shallow, turbid estuary of south-east Texas. *Estuar., Coast. Shelf Sci.* 45, 165–176.
- Bertolotto, R.M., Tortarolo, B., Frignani, M., Bellucci, L.G., Albanese, S., Cuneo, C., Alvarado-Aguilar, D., Picca, M.D., Gollo, E., 2005. Heavy metals in surficial coastal sediments of the Ligurian Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 503, 348–356.
- Bloom, W.M., Crecelius, E.A., 1983. Solubility behaviour of atmospheric  $^{7}\text{Be}$  in marine environment. *Mar. Chem.* 12, 323–331.
- Boldin, A., Bortoluzzi, G., Frascani, F., Guerzoni, S., Rabitti, S., 1988. Recent deposits and suspended sediments off the Po della Pila (Po River, main mouth), Italy. *Mar. Geol.* 79, 159–170.
- Canuel, E.A., Martens, C.S., Benninger, L.K., 1990. Seasonal variations in  $^{7}\text{Be}$  activity in the sediments of Cape Lookout Bight, North Carolina. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 237–245.
- Chamasson, S., 2003.  $^{137}\text{Cs}$  inventory in sediment near the Rhône mouth: role played by different sources. *Oceanol. Acta* 26, 435–441.
- Consensus Conference, 2005. Peak discharge of the December 2003 Rhône River flood at Beaucaire. Préfet of the Rhône Mediterranean Watershed. Final Report Ministry for Ecology and Sustainable Development, 14 pp.
- Dibb, J.E., Rice, D.L., 1989. Temporal and spatial distribution of Beryllium-7 in the sediments of Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 28, 395–406.
- Dominik, J., Burrus, D., Vernet, J.P., 1987. Transport of the environmental radionuclides in an Alpine watershed. *Earth Planet. Sci. Lett.* 84, 165–180.
- Durrieu de Madron, X., Abassi, A., Heussner, S., Monaco, A., Aloisi, J.-C., Radakovitch, O., Giresse, P., Buscaïl, R., Kerhervé, P., 2000. Particulate matter and organic carbon budgets for the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oceanol. Acta* 23, 717–723.
- Durrieu de Madron, X., Denis, L., Diaz, F., Garcia, N., Guieu, C., Loÿe-Pilot, M.-D., Ludwig, W., Moutier, T., Raimbault, P., Ridame, C., 2003. Nutrients and carbon budgets for the Gulf of Lions during the MOOGLI cruises. *Oceanol. Acta* 26, 421–433.
- Estournel, C., Kondrachoff, V., Marsaleix, P., Vehil, R., 1997. The plume of the Rhône: numerical simulation and remote sensing. *Cont. Shelf Res.* 17, 899–924.
- Estournel, C., Broche, P., Marsaleix, P., Devenon, J.-L., Auclair, F., Vehil, R., 2001. The Rhône River plume in unsteady conditions: numerical and experimental results. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 53, 25–38.
- Eyrolle, F., Chamasson, S., 2004. Plutonium isotopes in the lower reaches of the River Rhône over the period 1945–2000: fluxes towards the Mediterranean Sea and sedimentary inventories. *J. Environ. Radioact.* 174, 127–138.
- Eyrolle, F., Duffa, C., Antonelli, C., Rolland, B., Leprieur, F., 2006a. Radiological consequences of the extreme flooding on the lower course of the Rhône Valley (December 2003, South East France). *Sci. Total Environ.* 366, 427–438.
- Eyrolle, F., Rolland, B., Antonelli, C., Métivier, J.-M., 2006b. Artificial radioactivity within the Rhône River waters. Consequence of floods on activity levels and fluxes toward the sea. *Environ. Risques Santé* 5, 83–92.
- Ferrand, J.-L., Hamelin, B., Monaco, A., 1999. Isotopic tracing of anthropogenic Pb inventories and sedimentary fluxes in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Cont. Shelf Res.* 19, 23–47.
- Frignani, M., Sorgente, D., Langone, L., Albertazzi, S., Ravaioli, M., 2004. Behaviour of Chernobyl radiocesium in sediments of the Adriatic Sea off the Po River delta and the Emilia–Romagna coast. *J. Environ. Radioact.* 71, 299–312.
- Gillette, D.A., Blifford, I.H., Fenster, C.R., 1972. Measurements of the aerosols size distribution and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion. *J. Appl. Meteorol.* 11, 977–987.
- Lefèvre, O., Bouisset, P., Germain, P., Barker, E., Kerlau, G., Cagnat, X., 2003. Self-absorption correction factor applied to 129I measurement by direct gamma-X spectrometry for *Fucus serratus* samples. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A506* (2003), 173–185.
- Marsaleix, P., Estournel, C., Kondrachoff, V., Vehil, R., 1998. A numerical study of the formation of the Rhône River plume. *J. Mar. Syst.* 14, 99–115.
- Miltner, A., Emeis, K.-C., Struck, U., Leipe, T., Voss, M., 2005. Terrigenous organic matter in Holocene sediments from the Central Baltic Sea, NW Europe. *Chem. Geol.* 216, 313–328.
- Miralles, J., Radakovitch, O., Aloisi, J.-C., 2005.  $^{210}\text{Pb}$  sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin. *Mar. Geol.* 216, 155–167.
- Miralles, J., Radakovitch, O., Cochran, J.K., Véron, A., Masque, P., 2004. Multitracer study of anthropogenic contamination records in the Camargue, Southern France. *Sci. Total Environ.* 320, 63–72.
- Monaco, A., Biscaye, P., Soyer, P., Pocklington, R., Heussner, S., 1990. Particle fluxes and ecosystem response on a continental margin: the 1985–1988 Mediterranean ECOMARGE experiment. *Cont. Shelf Res.* 10, 805–839.
- Mullenbach, B.L., Nittrouer, C.A., Puig, P., Orange, D.L., 2004. Sediment deposition in a modern submarine canyon: Eel Canyon, Northern California. *Mar. Geol.* 211 (1–2), 101–119.

- Palinkas, C.M., Nittrouer, C.A., Wheatcroft, R.A., Langone, L., 2005. The use of  $^7\text{Be}$  to identify event and seasonal sedimentation near the Po River delta, Adriatic Sea. *Mar. Geol.* 222–223, 95–112.
- Picouet, C., Hingray, B., Olivry, J.C., 2001. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger River basin. *J. Hydrol.* 250, 19–39.
- Pont, D., 1997. Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure : données récentes (1994–1995). *Rev. Géogr. Lyon* 72 (1), 23–43.
- Pont, D., Bombled, B., 1995. Les débits solides du Rhône à proximité de son embouchure durant l'année hydrologique 1994–1995. 7eme Rencontre de l'Agence Régionale pour l'Environnement, 24–30 octobre 2004, Digne-les-bains, France, pp. 282–292.
- Pont, D., Simonnet, J.-P., Walter, A.V., 2002. Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 54, 1–18.
- Radakovitch, O., Charmasson, S., Arnaud, M., Bouisset, P., 1999.  $^{210}\text{Pb}$  and caesium accumulation in the Rhône Delta sediments. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 48, 77–92.
- Rogowski, A.S., Tamura, T., 1970. Environmental mobility of Cesium-137. *Radiat. Bot.* 10, 35–45.
- Rolland, B., Antonelli, C., Eyrolle, F., 2004a. Fluxes of suspended material and associated radionuclides to the sea during flood events of the Rhône River. ECORAD 2004, September 2004, 6th–10th, Aix-en-Provence, France. P3, 35.
- Rolland, B., Eyrolle, F., Bourles, D., 2004b. Removal of Sedimentary Stocks and associated radioactivity in the lower Rhône River (South Eastern France). International Conference on Isotopes in Environmental Studies–Aquatic forum, Monte Carlo, Monaco, 25–29 October 2004, pp. 301–302.
- Salen-Picard, C., Arlhac, D., Alliot, E., 2003. Responses of a Mediterranean soft bottom community to short-term (1993–1996) hydrological changes in the Rhône River. *Mar. Environ. Res.* 55, 409–427.
- Serrat, P., Ludwig, W., Navarro, B., Blazi, J.-L., 2001. Variabilité spatio-temporelle des flux de matière en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen: la Têt (France). *C. R. Acad. Sci., Ser. IIA* 389–397.
- Sommerfield, C.K., Nittrouer, C.A., Alexander, C.R., 1999.  $^7\text{Be}$  as a tracer of flood sedimentation on the northern California continental margin. *Cont. Shelf Res.* 19, 335–361.
- Thomas, A.J., 1997. Input of artificial radionuclides to the Gulf of Lions and tracing the Rhône influence in marine surface sediments. *Deep-Sea Res., Part II* 44, 577–595.
- Ulses, C., Grenz, C., Marsaleix, P., Schaaff, E., Estournel, C., Meulé, S., Pinazo, C., 2005. Circulation in a semi-enclosed bay under influence of strong freshwater input. *J. Mar. Syst.* 56, 113–132.
- Walling, D.D., Webb, D.W., Woodward, J.C., 1992. Some sampling considerations in the design of effective strategies for monitoring sediment — associated transport. *IAHS Publ.* 20, 279–288.
- Wheatcroft, R.A., Hunt, L.M., Stevens, A., Lewis, R., 2006. The distribution and internal geometry of the October 2000 Pô River flood deposit: digital x-radiographic evidence. *Cont. Shelf Res.* 26, 499–516.
- Zuo, Z., Eisma, D., Berger, G.W., 1991. Determination of sediment accumulation and mixing rates in the Gulf of Lions, Mediterranean Sea. *Oceanol. Acta* 14, 253–262.
- Zuo, Z., Eisma, D., Gieles, R., Besks, J., 1997. Accumulation rates and sediment deposition in the Northwestern Mediterranean. *Deep-Sea Res., Part II* 44, 597–609.

# **In situ record of sedimentary processes near the Rhône River mouth during winter events (Gulf of Lions, Mediterranean Sea)**

Marion C. <sup>1,2</sup>, Dufois F. <sup>2,3</sup>, Arnaud M. <sup>2</sup>, Vella C. <sup>4</sup>.

<sup>1</sup> University of Perpignan, 52 avenue Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex, France

<sup>2</sup> IRSN, DEI/SESURE Centre Ifremer, BP 330, 83507 La Seyne-sur-Mer, France

<sup>3</sup> IFREMER, Centre de Brest, BP 70, 29280 Plouzané, France

<sup>4</sup> CEREGE, Europôle de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France

E-mail: [cedric.marion83@gmail.com](mailto:cedric.marion83@gmail.com)

Phone number: +33(0)667110893

## **Abstract**

The environment is impacted by natural and anthropogenic disturbances that occur at different spatial and temporal scales, and that lead to major changes and even disequilibria when exceeding the resiliency capacities of the ecosystem. With an annual mean flow of  $1700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , the Rhône River is the largest of the western Mediterranean basin. Its annual solid discharges vary between 2 and 20 Mt, with flood events responsible for more than 70% of these amounts.

In the marine coastal area, close to the mouth, both flocculation and aggregation lead to the formation of fine-grained deposits, i.e. the prodelta. This area is characterized by sediment accumulation rates up to  $20\text{-}50 \text{ cm y}^{-1}$  and high accumulations of particle reactive contaminants such as various man-made radionuclides released into the river by nuclear facilities or arising from prior atmospheric nuclear tests (1945-1980) and the Chernobyl accident (April 1986). This prodelta, however, cannot be considered as a permanent repository for particle reactive pollutants since it is subjected to reworking processes.

Sediment dynamics had to be linked to the influences of hydrodynamic and atmospheric events such as flow rates or storms close to the Rhône River mouth. An experiment was carried out during the winter 2006 based on the deployment of two ADCPs and six altimeters at the Grand Rhône mouth for several months. This type of installation has never been achieved before in this area because of the hard meteorological conditions and the strong fishing activities. Results showed pluricentimetric rises of the sedimentary level just after river flood

events and decreases during storms, generated by southeast winds, and linked to high suspended solid concentrations. Deposits of 11 cm of sediments were estimated and bottom shear stresses up to  $5 \text{ N m}^{-2}$  were calculated during this period. Radiotracers and grain size depth profiles helped to characterise the studied events and to establish inventories of sediments and radionuclides. A cruise (CARMEX) was carried out during this same period to collect water samples, suspended particles and sediment cores. The results enabled us to link both river flow and wind characteristics to events recorded on the sea floor, i.e. resuspension, accumulation, consolidation, etc.

**Keywords:** sediment dynamics, floods, hydrodynamics, radiotracers, Rhône River prodelta.

## 1. Introduction

Sediment dynamics in the Gulf of Lions have been studied in the framework of various projects (Ecomarge, Euromarge, Mater, US-Eurostrataform and EU-Eurostrataform (Monaco et al., 1990; Weaver et al., 2006)). These projects have led to a better understanding of sediment pathways from their sources, i.e. rivers, to their deposits in deltas, shelves, canyons and eventually to deep basins (Heussner et al., 2006; Palanques et al., 2006). The Gulf of Lions is especially interesting in this respect since it is a river-dominated continental shelf fed primarily by the Rhône River and also by several coastal rivers such as the Vidourle, Lez, Hérault, Orb, Aude, Agly, Têt and Tech (Bourrin et al., 2006). For the past several years, monitoring has been implemented on different rivers, in particular the Têt River (Serrat et al., 2001) and the Rhône River in the western and the eastern part of the Gulf, respectively. These monitoring programmes have confirmed that most of the sediment fluxes from rivers occurred during flood events such as those recorded in 1994, 2002 and 2003 (Antonelli et al., 2008; Rolland, 2006; Miralles et al., 2006).

Sedimentary processes near river mouths have been the subject of many studies for the past several decades throughout the world, especially for the most important bodies such as the Mississippi River (Allison et al., 2005; Corbett et al., 2004, 2007), the Amazon (Nittrouer and DeMaster, 1986; Nittrouer et al., 1995; Kuelh et al., 1995; Moore et al., 1995; Sternberg, 1996), the Eel River (Sommerfield et al., 1999; Curran et al., 2002; Wheatcroft and Drake, 2003; Guerra et al., 2006), and the Po (Fox et al.,

2004; Syvitski et al., 2005; Palinkas et al., 2005, 2007; Fain et al., 2007; Milligan et al., 2007). For the Gulf of Lions, these processes have been studied in the framework of the Eurostrataform programme, primarily in the Têt prodelta (Guillén et al., 2006; Law et al., 2008); whereas the Rhône system has not received the same attention until now.

The prodeltas of these rivers (Pauc, 2005) have been shown to be efficient traps for river-borne sediments and associated contaminants (Charmasson, 1998; Radakovitch et al, 1999; Charmasson, 2003; Roussiez et al., 2005). However, these areas can not be considered as final repositories because resuspension, remobilisation and displacement processes of sediments and particle-bound elements are expected, due to the effects of waves and currents (Lansard et al., 2006; Radakovitch et al., 2008). In these shallow waters, it is thus important to quantify the processes of sediment dynamics in relation to physical forcing linked to high energy events such as floods and storms (Bourrin et al., 2007).

A project (CARMA, french acronym for Consequences of Rhône River Inputs to the Associated Coastal Environnement) was thus implemented and this publication presents results obtained during the winter 2006-2007. The aims of this first event-response survey were: i) to characterise storm/discharge events and, ii) evaluate their relationship with sedimentation and erosion records in the Rhône prodelta area by means of different tools like radiotracers, iii) calculate the inventories of sediments and  $^{137}\text{Cs}$  on a part of the prodelta. The goal is also to follow the impact of extreme meteorological events on the prodelta sedimentary bed thanks to the installation of autonomous materials, which has not already been achieved until now at the mouth of the most important northwestern Mediterranean river.

### *1.1. The local setting*

With a catchment area of 95,500 km<sup>2</sup> and a mean flow-rate of 1700 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, the Rhône river is the main source of water and sediments in the western Mediterranean Sea. The river is 814 km long with its source in the Alps. As described by Arnaud-Fassetta et al. (2003), it crosses many different environnements and has varied during time with the different climatic periods. Its mouth opens onto a prodelta that receives annual amounts of particles between 2 and 20 Mt (Sabatier et al., 2006; Eyrolle et al, 2006; Pont et al, 2002).

This subaqueous prodelta is composed of coarse grains comprising sands ( $> 63\mu\text{m}$ ) forming sandy bars, and of fine grains constituted of clays ( $< 4\mu\text{m}$ ) and silts ( $4\mu\text{m}$  to  $63\mu\text{m}$ ) (Aloisi and Monaco, 1975).

The area equipped in the framework of the CARMA project is very close to the Grand Rhône River mouth (Fig. 1), on the prodelta, at the boundary with the Camargues marshes on the west and the oil industry of Fos-sur-mer (Bouches-du-Rhône) on the east.

The estuary is not influenced by Mediterranean Sea tides (microtidal), even if several centimetres high, but primarily by marine currents and swells. In addition, depending on their directions and intensities, superficial and bottom currents play different roles, e.g. suspension transport, erosion, deposition, etc. (Naudin et al., 1997; Maillet et al., 2006). Winds have considerable effects on hydrodynamics and sediment transport.

### *1.2. Flood events*

Because of its size, the Rhône valley is submitted to different kinds of floods: mediterranean, oceanic, cevenol and generalised (Rolland, 2006). On December 4, 2003, an exceptional flood occurred with maximum river discharge reaching  $11500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  in Beaucaire. Because of the rapidity of the water rise (nearly  $8000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  in 30 h, according to Antonelli et al. (2008), dykes burst and the banks broke, leading to large masses of solid suspended matter being carried over.

Flood events are therefore important for the supply of material to the coastal area: it was estimated that the Rhône River releases 80% of the annual amount of sediments in several days of flooding (Rolland, 2006). At the same time, floods discharge tremendous amounts of radionuclides. Antonelli et al. (2008) calculated that  $77 \pm 16\text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$  were released by the Rhône River during the exceptional flood (December 2003), although Rolland (2006) found an amount of  $158\text{ GBq}$  (48.7%) during the entire year 2003. Miralles et al. (2006) estimated that  $75 \pm 21\text{ GBq}$  of  $^{210}\text{Pb}$  in excess of its background ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) and  $27 \pm 2\text{ GBq}$  of  $^{137}\text{Cs}$  were deposited by during the flood of December 2003. Radioactive tracers can be used to follow sedimentary masses and enable to calculate sediment accumulation rates near the Rhône River mouth.

### *1.3. Wind stress*

Two main types of winds affect the studied area. They are either originated from north, called Mistral, or from south-east, called Marin, and can be very strong during several days. The first one is channelized in the Rhône River valley and delivers cold air. The second one comes from offshore and is responsible of high waves generation.

## **2. Material and methods**

The CARMA project started in September 2006 with the immersion of the first instruments in the Grand Rhône River mouth, near the Roustan Sud buoy, and terminated by the CARMEX campaign in March 2007 (Fig. 1).

### *2.1. Seabed and currents monitoring*

The results detailed here are from a S-ALTUS altimeter located near the Roustan Est buoy at a depth of 18 m. It was settled 64 cm above the bottom and recorded its distance to the floor every 15 minutes. The principle relies on the emission/reception of an acoustic beam by a cylindrical sensor during 30 ms with a frequency of 2 MHz (Jestin et al, 1998). The accuracy and resolution of the ALTUS were respectively 0.41 mm and 2 mm.

In addition, a RDI<sup>TM</sup> Workhorse Sentinel Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) was also immersed at depth of 18 m straight right to the river mouth at the Roustan Est buoy. The transducers emitted 600 kHz beams and received an acoustic signal which frequency was different due to Doppler Effect (RD Instruments, 2006).

Since the ADCP was set at 50 cmab, therefore the first available data was located 155 cmab. The ADCP yielded current data every 18 seconds and averaged them every 15 minutes along 40 depth cells 50 cm high, with an accuracy of  $0.51 \text{ cm s}^{-1}$ . Backscattering was measured by an electric signal as counts, transformed into an energy balance in decibels, linking the emission and reception levels of the acoustic

wave. MATLAB was used to correct the attenuation effects of interfering parameters such as the water column (model of François and Garrison, 1982; Tessier, 2006), near field correction factor (Downing formulation), propagation length and the air-water interface. These backscattering values in dB, however, are relative and cannot be compared to other backscattering data from other ADCPs. They qualitatively show backscattering variations, linked to turbidity, during this period. Unfortunately, not enough suspended sediment matter (SSM) concentrations were measured so as to calibrate the ADCP data precisely but a calibration has been estimated thanks to samples from the CARMEX campaign in March 2007 (Dufois, 2008).

## 2.2. Waves and winds modelling

The ALADIN atmospheric meso-scale model of Météo-France shows the wind conditions in the Grand Rhône River mouth area (43.3° N, 4.8° E). Each node of the grid in this area is separated by 3 km. This weather profile covered the entire study period, showing the wind intensity and direction. Wave fields were modelled in the western Mediterranean Sea with a resolution of 0.1° using the third generation WAVEWATCH-III wind-wave model (Tolman, 2002a) forced by Météo-France wind fields. This model, developed at NOAA/NCEP and adapted from the WAM model, has been successfully applied in global- and regional-scale studies in many areas throughout the world's oceans (Tolman, 2002b; Chu et al., 2004), in particular in the western Mediterranean Sea (Ardhuin et al., 2007). The model is based on the two-dimensional wave action balance equation including energy density generation and dissipation terms by wind, white-capping, wave-bottom interaction, and redistribution of wave energy due to wave-wave interactions. The model was validated and compared to other models for two periods in 2002 and 2003 (Ardhuin et al., 2007) and in 2001 (Dufois, 2008).

The current-induced BSS ( $\tau_c$ ) was calculated with the assumption that the velocity profile is logarithmic down to the first layer of the ADCP above the bottom:

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 \text{ with } u_{*c} = \frac{\kappa u(z)}{\ln(z/z_0)} \quad (1)$$



where  $\rho$  is water density,  $\kappa$  the Von Karman constant ( $=0.4$ ),  $z$  the height of the first layer above the bottom,  $u(z)$  the associated velocity and  $z_0$  the bed roughness. Since the sediment is cohesive in this area,  $z_0$  was set at 0.1 mm, a typical value found in the literature (Soulsby, 1997).

For the wave-induced BSS ( $\tau_w$ ) we used the usual formulation, which depends on orbital velocity  $U_b$  just above the bed:

$$\tau_w = 0.5 \rho f_w U_b^2 \quad (2)$$

with (Swart, 1974)  $f_w=0.3$  if  $A/k_s < 1.57$ ,

$$\text{and beyond: } f_w = 0.00251 \exp(5.21(A/k_s)^{-0.19}), \quad (3)$$

where  $A$  is the orbital half-excursion near the bottom ( $A = \frac{U_b T}{2\pi}$ ,  $T$  being the wave period).

The total BSS was calculated by direct addition of wave-induced BSS and the current-induced BSS without taking non-linear wave-current interactions into account.

### 2.3. Radionuclide geochronology and particle size: sampling and analyses

Four of the nine sediment cores sampled during the CARMEX cruise (March 11-17, 2007, RV L'Europe) were analysed for their grain size distribution and/or to estimate sediment accumulation rates in this area. US04Kb was sampled close the instruments location, USCh30 and USCh20 in channel-like structures, while USHCh20 was located nearby but out of this bottom structure. They were sub-sampled twice using circular Plexiglas tubes (18 cm diameter, 50 cm long) in box-cores collected by USNEL, carefully maintaining the sediment-water interface undisturbed. The length of the cores varied from 34 to 40 cm and their sampling depths were 22 to 49 m on the continental shelf. These cores were sliced in 1 cm sections. Each 1 cm thick sediment layer was dried, crushed, passed through a 200  $\mu\text{m}$  sieve and put in 200 mL and 60 mL geometries for gamma spectrometry investigations. These analyses were conducted at the IRSN laboratory in Orsay, near Paris, with N-type hyper-purity germanium detectors in 200 mL volume containers and measured with a counting time of 20 or 40 h. Efficiency calibrations from 22.5 keV to 1.8 keV were carried out using mixed gamma-ray sources in a solid resin-water equivalent matrix with a density of 1.15  $\text{g cm}^{-3}$  (Bouisset et al., 1997). Activity results were corrected for

true coincidence summing and self-absorption effects (Bouisset et al., 1997).  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{234}\text{Th}$  were determined.

$^7\text{Be}$  ( $t_{1/2}=53.2$  d) is a natural radionuclide, resulting from the cosmic ray spallation of nitrogen and carbon in the atmosphere. It was analysed in order to determine particulate deposit up to 200 days and even more.  $^7\text{Be}$  settles on the river-bed, bounds to detritic particles and spreads in marine systems via river discharges (Canuel et al., 1990) depending on both particle composition and salinity (Baskaran et al., 1997). Palinkas (2005) suggested to perform several sedimentological analyses to confirm the short-time-scale sediment accumulation rates found with  $^7\text{Be}$ .

$^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2}=30.1$  y) is an anthropogenic radionuclide present in the environment since the first nuclear weapons tests that led to global fallout. It also originated from nuclear accidents such as Chernobyl in April 1986, from nuclear power plant discharges and mainly by the fuel reprocessing operations in Marcoule ceased in 1997.  $^{137}\text{Cs}$  has a high affinity for clays and fine particles in fresh water and has been found to be a good tracer of the Rhône River inputs to the Gulf of Lions (Charmasson et al., 1998).  $^{137}\text{Cs}$  depth profiles have been extensively use in various environments to assess sediment accumulation rates, notably coupled with  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (Appleby et al., 1979; Nittrouer et al., 1983/1984; He and Walling, 1995; Radakovitch et al., 1999; Frignani et al., 2004).

$^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2}=22.3$  y) is a naturally occurring radionuclide produced in soil, sediment and water by the decay of  $^{226}\text{Ra}$  through its daughter  $^{222}\text{Rn}$ . The cycle ends in lacustrine and marine sediments where two types of  $^{210}\text{Pb}$  can be found: that produced in situ (called supported) and that coming with the accumulated particles (called unsupported or excess). Because of its specific half-life, excess  $^{210}\text{Pb}$  ( $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ), calculated by removing  $^{214}\text{Pb}$  to total  $^{210}\text{Pb}$ , is useful for assessing centennial sediment accumulation rates in marine systems (Miralles et al., 2005). In the case of river floods, however, its analysis can be also used to trace particle deposits in sediments.

$^{234}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=24.1$  d) is a radiogenically produced radionuclide, arising from the decay of  $^{238}\text{U}$  dissolved in seawaters. Due to its high affinity for particles, it is soon delivered to sediments and its short half-life enables particulate dynamics and sedimentation to be assessed during flood events. Also in this case, the dating parameter is in excess ( $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ ) over the fraction produced in situ.

Radionuclides activities were corrected for the decay over the time elapsed between sampling and counting. Furthermore,  $^{137}\text{Cs}$  depth profiles do not show any dating feature because of the size of the sediment cores, the low activities and the absence of the end of the signal. Moreover, none of the classical models for  $^{210}\text{Pb}$  dating can be applied to this very dynamic environment, due to episodic and inconstant delivery. Therefore, the dating assumptions were led thanks to  $^7\text{Be}$  and  $^{234}\text{Th}$  by dividing the depth of the base of the profiles by 5 times the half lives of the radionuclides.

An aliquot of fresh sediment from each layer was kept for grain-size characterisation, using a Beckmann & Coulter LS 13320 laser grain sizer, with multi-wavelength technology called Polarization Intensity Differential Scattering (PIDS) enabling a better accuracy for clay fractions.

Fresh sediments were placed in 5 cL plastic tubes and diluted with water to obtain a concentration close to  $10 \text{ g L}^{-1}$ . Ten mL of these solutions were analysed with the laser grain sizer. Three replicates were analysed for each sample and were averaged to verify the quality of the results. The range of analysis was  $0.4 \mu\text{m}$  to  $2000 \mu\text{m}$  with an accuracy of 3% for median size and 5% for each size of the distribution profile. Five ranges have been used to classify the grain sizes: clays ( $<4 \mu\text{m}$ ), fine silts (4 to  $20 \mu\text{m}$ ), coarse silts (20 to  $63 \mu\text{m}$ ), fine sands (63 to  $200 \mu\text{m}$ ) and coarse sands ( $>200 \mu\text{m}$ ). Values of D10, D50 and D90 were calculated, representing respectively the maximum diameter of 10%, 50% and 90% of the sediment samples.

Inventories were made thanks to ArcGIS® and Surfer® softwares, processing data from the sediment cores sampled during CARMEX with interpolation methods.

### **3. Results**

#### *3.1. Rhône River flow rate*

Fig. 2a and Fig. 2b show water flows of the Rhone River (at the Beaucaire station, just upstream from the separation between the Grand Rhône River and the Petit Rhône River) and of its upstream tributaries (Isère, Gard, Ardèche, Saône, Perrache, Cèze, Ouvèze). Flow values exceeded the flood

threshold ( $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) on November 18, 2006 ( $3775 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) and on December 9, 2006 ( $3520 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). These values are likely to be sufficient to provide sediments to the prodelta and to the Gulf of Lions.

The increased flow rate in Beaucaire and at the Rhône river mouth on November 18, 2006 resulted from an increase in the flow-rates of the Cèze, Gard and Ardèche rivers (Fig. 2b), which are Cevenol rivers, reaching values three times their flood discharge thresholds and with a return period lower than 2 years. The origin of this high Rhône river flow was undoubtedly a Cevenol flash flood (Maréchal, 2006; Antonelli et al., 2008). On the contrary, the flood of December 9 is of oceanic type. In this case, the entire catchment area undergoes an increase of water flow: upstream rivers multiply their mean flows by a factor of 6 and downstream rivers from 3- to 5- fold (Fig. 2a).

### *3.2. Wind conditions*

Mistral was the most frequent and violent wind recorded in the studied area between November 8, 2006 and February 22, 2007, with a velocity up to  $20 \text{ m s}^{-1}$ . Some southeast winds blew in from the sea, creating turbulence on surface waters. They reached  $20 \text{ m.s}^{-1}$  and considerably increased turbidity (Fig. 3b and Fig. 3e), combined with high river flow. These southeast winds create a swell when they are continuously active during a quite long time (Fig. 3e and Fig. 3g) whereas long periods of Mistral winds do not cause considerable swells. In fact, winds from the north (between  $300^\circ\text{N}$  and  $50^\circ\text{N}$ ) cause no or only weak swells, with heights less than one metre. Southerly and easterly winds from the Mediterranean Sea, however, caused an increase in swell formation, especially from mid-November to mid-December 2006 and on February 18, 2007 when a swell peak reached a height of 3 m.

### *3.3. Data recorded in situ*

Fig. 3 (a,b,c) shows current velocities and directions recorded near the Roustan Est buoy and the backscattered signal in the water column from November 8, 2006 to February 22, 2007. Superficial currents were primarily in the southwest direction until December 13. When the wind changed direction (Fig. 3e), i.e. a southeast wind was replaced by a north wind (Mistral); currents then changed direction, toward the southeast. In any case, no clear stratification appeared on profiles, since orientation was

practically unchanged in the entire water column. On the contrary, velocity decreased with depth. The primary reason is that the currents induced were caused by winds, not by density variations.

On November 18, current velocities (Fig. 3b), reached  $50 \text{ cm s}^{-1}$  and remained practically constant with depth ( $30 \text{ cm s}^{-1}$ , 1.5 mab). At the same time, the ADCP recorded a backscattered signal of 90 dB. Higher values of backscattering were recorded (100 dB) on November 20, related to southeast (SE) winds at a velocity of  $8 \text{ m s}^{-1}$ . The period of SE winds was characterised by swell waves, causing bottom shear stress. Swell heights peaked (Fig. 3g) on November 20 (1.8 m) and December 9, 2006 (1.9 m), and on January 24 (2 m) and February 18, 2007 (2.9 m) increasing the backscattering signal (80 to 100 dB).

The second flood period (December 9) occurred while Mistral winds were blowing at a velocity of  $15 \text{ m s}^{-1}$ , despite a short episode of SE winds. In general, northerly winds are more intense than southeast winds but they need to last in time to induce bottom shear stress. High level backscattered signal lasted for 4 days, corresponding to the increased flow-rate. Suspended matter was well concentrated but current velocities were low: 95 dB with 3 and  $30 \text{ cm s}^{-1}$  at 1.5 mab and at the surface, respectively. The intense acceleration of superficial currents between November 23 and 29 shows the role of SE winds that influenced the surficial layer, down to more than 5 m beneath the water surface, for 5 days. They caused an important swelling (Fig. 3g) and resulted in the settling of suspended particles and the resuspension of bottom sediment, as shown in Fig. 3c.

On January 24, 2007, the peak in swell height (2 m) was concomitant with an increase in Rhône River flow (from 1300 to  $2100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in 3 days) leading to an acceleration of the surface currents (nearly  $80 \text{ cm s}^{-1}$ ). Similarly, on February 18, 2007, the series of highest waves of the study was recorded (2.9 m) during strong SE winds ( $20 \text{ m s}^{-1}$ ) together with an increase in flow-rate (from 900 to  $2600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in 10 days) leading to relatively constant southwest current velocity ( $> 60 \text{ cm s}^{-1}$ ) in the water column (Fig. 4).

Fig. 3d. shows the distance between the altimeter transducer and the prodelta bottom during the study period. The net balance in deposition/erosion processes between November 2006 and February 2007 is almost zero. Nevertheless, important changes occurred on a shorter time scale. These changes appear to be linked to changes in environmental conditions recorded in parallel. It is to be stressed that

several ‘blank’ periods in Fig. 3d., were due to very high SSM concentrations or something that temporarily interfered with the transducer beam.

The quantitative understanding of these records requires calculation of Bottom Shear Stress (BSS) occurred during our experiment and link their values to sediment suspension and erosion (Fig. 5).

Series of waves, combined with currents, created a succession of BSS between 1.5 and 2 N m<sup>-2</sup> and, as a consequence, Bottom Backscattering Indices (BBI), related to suspended solid concentrations, were close to 70 to 80 dB. The greatest BBI, approaching 100 dB, occurred during strong water flows (more than mean liquid discharge) but considerable BSS also increased BBI.

Fig. 3d., two periods of accretion appeared on the altimetric profile, exactly during or just after the high Rhône River discharges. The first deposition time D1 occurred on November 18 and increased the bottom level by 5 cm in less than 3 days: the distance between the transducer and the floor (DTF) decreased from 63.5 cm to 58.5 cm. The second deposition time D2 occurred on November 9 and reduced the DTF by 6 cm (62 cm to 56 cm) in 9 days. The D1 event corresponded to a flow increase of nearly 3000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in 36 h and a flood duration of 24 h, while the D2 event corresponded to a flow increase of 2300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> in 6 days and a flood duration of 3 days. Between these two deposition phases, an erosion phase E1 removed at least 4.5 cm of sediment and seemed to be due to a succession of high BSS values (Fig. 5).

On February 18, almost 4 cm of sediment disappeared in only several hours during an erosive event E2. At this time, both 15 m s<sup>-1</sup> SE winds with 3 m high waves and Rhône river flow around 2500 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> induced 60 cm s<sup>-1</sup> bottom currents oriented southeast and a BSS of 5 N m<sup>-2</sup>. The latter was due primarily to waves (90%) and led to peak values reaching 93 dB in BBI (Fig. 5a).

No special event was recorded during the second half of December, a month characterised primarily by compaction processes and early diagenesis.

A thin deposition on January 3, confirmed by BBI of 90 dB, appeared just after an increase in water flow of 1300 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

On January 24, inputs from the Rhône River (flows higher than 2000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) and the strong influence of waves (BSS of 2.6 N m<sup>-2</sup>) caused increases of the backscattered signal in the water column (Fig. 3c) and the bottom layer (Fig. 5a), with no intense accretion or erosion recorded (Fig. 3d). Except for these

two January events, the mid-December to mid-February period characterised by both low river discharges and wave effects, the water-sediment interface remained regular and almost flat.

### *3.4. Sediment characteristics*

Cores sampled during the oceanographic campaign, i.e. almost 17 days after the last data recorded in situ (Fig. 6), showed that sands were recently transported (Fig. 7). The fine fraction (clays and silts) were prevailing in these cores. Core US04Kb, taken from a site close to the position of the instruments (Fig. 1), shows a mean grain diameter of 15.3  $\mu\text{m}$ , i.e. the size of fine silts, when averaging the first 5 cm depth. with 15 % of clays, 70 % of silts and 15 % of sands (Fig. 7).

Coarse sandy deposits (10%) appeared in a 3 cm thick layer at the water-sediment interface in all the cores, although the entire core contained a small sandy fraction (10%) composed of only fine sands (Fig. 7). The 3 cm deep peak was found in USCh30, the second closest station to the location of instruments. This shows of a recent, substantial and sudden input, since the standard coarse sands fraction was close to zero.

Flow data showed a flood event just before the core sampling time (Fig. 6). Altimeter data proved that Rhône river discharges more than  $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , even with wave effects, caused deposit of sediments. The fraction of coarse grains were probably due to this increase of river flow, since absolute bottom depth remained constant from November 8 to February 22. This third flood event reached an average flow peak of  $3667.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and remained above the  $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  threshold for one week. It seems to have been the origin of the deposit of 3 to 5 cm of sandy sediments close to the Rhône river mouth. The fact that three high flow events succeeded each other and that they were shared by successions of high waves, did not enable the sandy layers to deposit for a long time and be covered by fine grain sediments. There is thus no very accurate peak of coarse sands in the different cores but some thin layers appear.

### *3.5. Sediments accumulation*

Apparent sediment accumulation rates were roughly calculated in three cores collected just in front of the Rhône River mouth (USCh20, USCh30 and USHCh20) using radiotracer activity depth distributions (Fig. 8).  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profiles are strongly correlated. However, due to the end of

reprocessing operations in Marcoule,  $^{137}\text{Cs}$  activities are quite low compared to the values observed before 1997 (Charmasson, 1998).  $^{137}\text{Cs}$  values ranged from  $3.1 \text{ Bq kg}^{-1}$  to  $16.5 \text{ Bq kg}^{-1}$  dry weight in the three cores. Their  $^{137}\text{Cs}$  inventories were 157.2 Bq, 134.3 Bq and 149.6 Bq, respectively in USCh30, USHCh20 and USC20.

Total radioactivities of  $^{210}\text{Pb}$  (also for  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) varied according the same change of  $^{137}\text{Cs}$ : signal increases and decreases occurred at the same depth. Concentrations ranged from  $31.2$  to  $118 \text{ Bq kg}^{-1}$  dry weight in the three cores. Their  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  inventories were 1194 Bq, 947.5 Bq and 1083.5 Bq, respectively. USCh20 and USCh30 were sampled in two channel-like locations which apparently accumulated more radionuclides than USHCh20.

Strong dilution signatures, which would have enabled us to date such events, are not really visible on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profiles, in comparison with studies realised by Miralles et al. (2006) and Drexler and Nittrouer (2008) on Rhône River floods. However, in their period studied, the flow rates were more important compared to our case.

$^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profiles do not show exponential decrease with depth preventing us from using them to derive sediment accumulation rates in this highly dynamic area.

Signatures of short-lives radionuclides, like  $^7\text{Be}$  and  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ , enable to locate flood events on sedimentary cores.

The  $^7\text{Be}$  signal ceases at 16, 14 and 10 cm depth in cores USCh20, USCh30 and USHCh20, respectively. The base of the  $^7\text{Be}$  depth profile reflects the beginning of the accumulation of fresh sediment, i.e. almost 200 days. USHCh20 seemed to accumulate less sediment than the other cores. Integrated over the entire year, the calculated maximum sediment accumulation rates are  $29.2 \text{ cm y}^{-1}$ ,  $46.6 \text{ cm y}^{-1}$  and  $53.3 \text{ cm y}^{-1}$  for USHCh20, USCh30 and USCh20, respectively.

$^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  signals disappear between 3 and 3.5 cm in each core but there were abrupt peaks at 5, 8 and 11 cm with intensities of  $51.7$ ,  $152.4$  and  $154.5 \text{ Bq kg}^{-1}$  dry weight, for USHCh20, USCh30 and USCh20, respectively. These results would confirm that apparent sediment accumulation rate at USCh20 is slightly higher than at USCh30 and much higher than at USHCh20. Signals completely disappeared at depths of 5.5, 11.5 and 13 cm, respectively. The first three centimetres were probably deposited



recently, during the last flood. Nevertheless, the peaks should reflect that previous inputs of sediments occurred in December and/or November 2006. In this case, maximum sediment accumulation rates were estimated between 16.5 and 22 cm y<sup>-1</sup> for USHCh20, between 34.5 and 46 cm y<sup>-1</sup> for USCh30 and between 39 and 52 cm y<sup>-1</sup> for USCh20. The sediment accumulation rates calculated using <sup>7</sup>Be and <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub> are thus quite similar.

Moreover, each core presented a superficial layer containing a higher fraction of sands. The transition point between this sandy fraction and the following finer fraction (time of weak hydrodynamics) corresponds exactly to the first inflexion point of the <sup>7</sup>Be curves and also to the first disappearance of <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub>. These points occurred at depths of 3.5, 3 and 3.5 cm, in USHCh20, USCh30 and USCh20, respectively, and are probably the thicknesses of the last deposition flood (from March 3 to 10, 2007). The quantities of sediments deposited during the first two floods (peaks on November 18 and on December 9, 2006) would correspond to the layer with the <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub> peaks, i.e. 5, 8 and 11 cm for USHCh20, USCh30 and USCh20, respectively (Fig. 8).

The decrease of hydrodynamics is evident in USHCh20 at the depth of 11 cm, with a sandy fraction diminishing from more than 20% to less than 3% (along a 5 cm layer), and with D50 and D90 from 6 μm to 20 μm and from 20 μm to 120 μm, respectively (Fig. 7). A decrease in accumulation rate with consequent increase of <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> activity is visible (Fig. 8). USCh20 and USCh30 show this transition at 17 cm, even if it was not as well-defined as USHCh20. Grain size and radiotracers concentrations signals are really concomitant and testify the record of the April 2006 Rhône River flood (4164 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

<sup>7</sup>Be and <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub> do not appear as optimum flood tracers but rather as good proxies of recent particulate matter deposition. Grain-size distribution enabled high energy events to be located in sediment cores but was not efficient for setting their limits. Besides, biological mixing can affect the resulting data.

#### 4. Discussion

The results presented here show a very good correlation between all the parameters studied: currents, waves and wind directions and intensities, backscattered signals, river discharges and sedimentary phases, BSS and BBI. Deposition phases in fact occurred during the two flood events, erosion episodes

occurred while waves effects were greatest and southeast winds were correlated with swell impacts and high BBI.

#### *4.1. Impact of storms*

Bourrin et al. (2007) monitored the Têt prodelta during wet and dry storms, i.e. during strong wave events associated with high and low river flows. Accretion phases were observed during wet storms, while dry storms led to erosion phases. Mean discharges of the Têt and the Rhône rivers are different,  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and  $1700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , but sedimentary mechanisms occurring off the mouths are similar. The critical shear stresses causing erosion evaluated in the laboratory for the Têt and the Rhône coastal areas are different:  $0.12 \text{ N m}^{-2}$  (Guillén et al., 2006; Bourrin et al., 2007) and from 0.068 to  $0.087 \text{ N m}^{-2}$  (Lansard et al., 2006), respectively. These latter data would correspond to the suspension of the fluffy layer. Recent experiments on the Rhône prodelta evaluated critical BSS of  $0.35 \text{ N m}^{-2}$  (Dufois, 2008). BSS exceeded  $1 \text{ N m}^{-2}$  six times in three months of relatively quiet periods on the Rhône prodelta, but only twice on the Têt prodelta during the intense storms that occurred in December 2003 and in January 2004. Bottom currents were directed south and southwest in both river mouths during these events.

Altimetric records show alternately deposition/erosion phases (from days to weeks) and the balance over the studied period is zero. The Bottom Boundary Layer (BBL), responsible for sediment dispersion over the Gulf of Lions (Monaco et al., 1999; Lansard et al., 2006), is fed by sediments resuspension processes, forming the Benthic Nepheloid Layer (BNL).

Law et al. (2008) assert that individual grain size classes of the BNL are being eroded in proportions equal to the seabed and verify the sorting of bottom sediment size distributions across the Têt River mouth. Sandy fractions and mean grain sizes decrease in the seaward direction and with increasing depth. The results are comparable to the Rhône River mouth in USC20 (22 m) and USC30 (49 m): from 19.2% to 1.8% sands and D50 from  $18.7 \mu\text{m}$  to  $13.6 \mu\text{m}$  (Fig. 7).

## 4.2. Hydrodynamics

Lansard (2005) deployed an ADCP near the Rhône River mouth from April 29 to June 5, 2002. The instruments did not record any flood but river flow and waves reached  $2700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (May 5) and 1.8 m high (May 8). During peak flow, the ADCP recorded strong backscattered signals and the direction of bottom currents was southwest during 55% of the study period and 86% of the time velocities were higher than  $15 \text{ cm s}^{-1}$ . These observations are consistent with the conditions of the winter of 2006-2007 since turbidity increased with river flows and since the direction of bottom currents was southwest during 80% of the study period

The highest waves observed by Lansard (2005) were caused by southeast winds ( $90^\circ$  to  $180^\circ$ ) and led to BSS of  $0.4 \text{ N m}^{-2}$ . This value was exceeded by the highest 11 BSS results recorded during CARMA (with 5 events between  $1 \text{ N m}^{-2}$  and  $4.5 \text{ N m}^{-2}$ ). In agreement with the observations by Lansard (2005), each BSS peak was accompanied by high BBI (80 to 100 dB), showing the resuspension of sediments after that critical erosion stress  $\tau_{\text{erosion}}$  was reached (established in a laboratory thanks to flume experiments in a channel). The current-induced BSS exceeded the maximum  $\tau_{\text{erosion}}$  ( $0.35 \text{ N m}^{-2}$ ) by three-fold and reached  $0.55 \text{ N m}^{-2}$  during the storm of January 24.

In addition, two wave series were higher than 1.5 m in May 2002 compared to 8 wave series in the winter of 2006-2007, representing 10% of the study period. Winter periods with high flood events and strong storms (especially due to southeast winds), caused harsher environmental conditions for the Rhône River than in spring.

## 4.3. Apparent sediment accumulation rates (ASR)

Mean accumulation rates are difficult to assess in the absence of dating features of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  depth profiles in 40 cm long cores, but maximum rates of recent accumulation can be calculated using short half-life radionuclides such as  $^7\text{Be}$  and  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ . The results are in agreement with Charmasson et al. (1998), who used  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  activity ratios to estimate sediment accumulation rates in the prodelta that

ranged from 37 to 48 cm y<sup>-1</sup> at the mouth by means of a several years study, and with Calmet and Fernandez (1990) with values of 30-35 cm y<sup>-1</sup>.

Here, <sup>134</sup>Cs is no more detectible preventing us from using <sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs ratio to calculate sedimentation rates (Charmasson et al., 1998; Radakovitch et al., 1999). The range evaluated is broad (from 29.2 to 53.3 cm y<sup>-1</sup> with <sup>7</sup>Be and from 16.5 to 52 cm y<sup>-1</sup> with <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub>) because radionuclide concentrations were coupled to grain-size distributions. Radakovitch et al. (1999) obtained values higher than 20 cm y<sup>-1</sup> in the prodelta and 0.2 cm y<sup>-1</sup> over the shelf using the <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> dating method and <sup>137</sup>Cs/<sup>134</sup>Cs activity ratios, confirmed by Zuo et al. (1996). Miralles et al. (2005) emphasised the difference between deposition in the close vicinity of the Rhône River mouth (30-40 cm y<sup>-1</sup>) and the rest of the prodelta (0.65 cm y<sup>-1</sup>). Sedimentation rates strongly decrease with the distance to the river mouth.

According to published data, river mouths exhibit different ASRs: the Eel River with 0.4 cm y<sup>-1</sup> (Sommerfield et al., 1999) or 0.1 to 1 cm y<sup>-1</sup> (Wheatcroft and Drake, 2003), the Po River with 0.23 cm y<sup>-1</sup> (Palinkas et al., 2007) or 0.77 cm y<sup>-1</sup> (Frignani et al., 2005), the Amazon River with 10 to 60 cm y<sup>-1</sup> (Kuelh et al., 1995; Nittrouer et al., 1995), the Mississippi River with 2 cm y<sup>-1</sup> (Corbett et al., 2004). Sediment accumulation rates are difficult to determine because physical (erosion, compaction, advection) and biogeochemical (bioturbation, early diagenesis, diffusion) processes interfere with radionuclide signals (Wheatcroft and Drake, 2003), and above all because of the high solid discharge variations at the river mouth.

The surface mixed layer (SML), notably due to bioturbation or physical disturbance, contains homogeneous or upward increasing radionuclide concentrations (Radakovitch et al., 1999). The <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> profiles do not exhibit clear radioactive decay trends preventing any attempt to determine geochronology in such a dynamic environment. USHC20 revealed a 17 cm homogeneous layer (13.4 Bq kg<sup>-1</sup> and 99.5 Bq kg<sup>-1</sup> for <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>), followed by a decrease (3.6 Bq kg<sup>-1</sup> and 34.6 Bq kg<sup>-1</sup>) and then an increase (12.6 Bq kg<sup>-1</sup> and 69 Bq kg<sup>-1</sup>) at 29 cm beneath the sediment surface for both <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>. This low radioactivity was probably due to a flood that occurred in the spring of 2006 since concomitant high sandy fractions were revealed by the grain-size distribution at the same depths. Drexler et Nittrouer (2008) normalised the excess <sup>210</sup>Pb with the clay content to remove the effects

related strictly to grain size. They observed a dilution signature in their  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  profiles, accounting for an increase of the high river flow.

$^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  and  $^7\text{Be}$  do not disappear at the same depths: 5.5 cm and 10 cm for USHC20, 11.5 cm and 14 cm for USC30, 13 cm and 16 cm for USC20. The end of the  $^7\text{Be}$  signal corresponds to almost 200 days and to 100 days for  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  (Palinkas et al., 2005). This would mean that the winter events (last 100 days) caused heterogeneous accumulation rates, although during the preceding 100 days, the ASR was constant according to 3 cores (from 3 to 4.5 cm).

#### *4.4. Fate of Rhône River inputs during the winter 2006-2007*

During the two moderate floods periods, suspended sediments were carried southwest and south (Fig. 4) in the entire water column, with velocities decreasing with the depth. The coarsest particles deposited first near the mouth, feeding the sandy bar originated by the actions of the river and the waves. According to Thill (2001), during a low river discharge period ( $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), a saltwedge appears up to 20 km inland and is pushed seaward during a high river period ( $>2500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). When fresh waters mix with salt waters, the former have i) a portion of their fine suspended sediment fraction that flocculates and settles to form larger entities contributing to the BNL (Curran et al., 2007) and ii) the other portion seaward forms the Surface Nepheloid Layer (SNL) (Milligan et al., 2007). Other phenomena participate in flocculation/deflocculation processes, such as organic matter contents, physical contact between particles and suspended sediment concentration.

Just before the first flood, Rhône River flow was between  $501 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and  $560 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  for 2 days, causing the occurrence of a saltwedge and probably the flocculation of suspended particles. The 10 days following the first flood peak directed the SNL plume southwest with velocities reaching  $1 \text{ m s}^{-1}$ , although BSS resulting from waves and currents caused little suspension of BNL sediments ( $1 \text{ N m}^{-2}$ ). One day of weak northeast bottom circulation ( $15 \text{ cm s}^{-1}$ ) occurred during a long period of bottom southwest current velocities ranging from  $20 \text{ cm s}^{-1}$  to  $50 \text{ cm s}^{-1}$ . After this, both a wave-induced BSS of  $1.2 \text{ N m}^{-2}$  and the absence of river inputs enabled the erosion of the interface sediments, visible on the

altimetric profile (November 26). While undergoing suspension, sediments were subjected to  $20 \text{ cm s}^{-1}$  southwest currents.

The second flood was not preceded by a low water period but was accompanied by a strong Mistral wind and the SNL was directed southeast with a mean velocity of  $30 \text{ cm s}^{-1}$  according to the ADCP current profile. Wave-induced BSS of  $2 \text{ N m}^{-2}$  suspended bottom sediments and currents carried them southwest at a velocity of  $10 \text{ cm s}^{-1}$ .

In addition, the regular and slow decrease of the bottom layer height from mid-December to mid-February in the absence of any environmental event was probably the result of early diagenesis. This process creates a compaction of the most superficial sediments and pore-waters are thus released, reducing bottom layer porosity.

November and December 2006 floods brought 475 kT of sediments to the Mediterranean Sea with 256 kT (56%) deposited on a  $2 \text{ km}^2$  area on the prodelta. They led to the discharge of 7.7 GBq of  $^{137}\text{Cs}$  by the Rhône River towards the sea, of which 3.1 GBq (39.7%) were deposited on the studied area. The BSS entailed caused the resuspension of 62 to  $100 \text{ kg m}^{-2}$  of sediments and 930 to  $1500 \text{ Bq m}^{-2}$  of  $^{137}\text{Cs}$ . Episodes of Mistral winds generally do not affect the BNL but have a significant effect on SNL, although southeast winds induced waves suspend sediments. Considerable erosion occurred on February 18, 2007 due to high BSS ( $5 \text{ N m}^{-2}$ ) and was followed by the transport of eroded sediments southwest along the  $70 \text{ cm s}^{-1}$  bottom currents. The February, 18, 2007 storm generated suspension of  $4.7 \text{ T m}^{-2}$  of sediments and  $70.7 \text{ kBq m}^{-2}$  of  $^{137}\text{Cs}$ . Rhône River radionuclides bound to suspended sediments are sometimes found in the northwest part of the Gulf of Lions (Roussiez, 2006).

## 5. Conclusion

During the winter of 2006-2007, the Rhône River catchment area was affected by two moderated flood events, fed by rainfalls originating from the Cevennes Mountains on November 18, 2006 and from the ocean on December 9, 2006. Water flows reached  $3775 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and  $3520 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  in Beaucaire and caused the suspension and transport of substantial amounts of sediment to the Rhône prodelta.

Suspended sediment fluxes, forced by waves, river flow and local currents, were directed southwest. Their deposition, depending on settling velocity, flocculation and the direction of currents in the water column, varied with location on the prodelta.

The coarsest and most of the flocculated grains settle near the river mouth, forming the muddy-sandy bar (4-5 m beneath the water surface). More distally, the BNL, fed by silty-clay sediments that aggregated in the water column by contact with salt water, were present and exhibited a muddy carpet. The SNL (flood plume) moved seawards according to the ADCP data, progressively following currents and settling particles.

The two floods provided a total quantity of sediment 11 cm thick in less than a month but erosion phases caused by southeast waves removed the deposits. BSS of 1 to 2 N m<sup>-2</sup> involved the suspension of bottom particles (mean diameter 15 µm) that were then globally transported southwest.

This study has also enabled us to observe the erosional effects of southeast waves ( $H_s > 1.5$  m), generating BSS up to 5 N m<sup>-2</sup>, and the depositional effects of Rhône river inputs due to high flows ( $Q > 3000$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). While occurring at the same time, high waves and discharges alternate their effects and the BBI increases strongly, resulting in high suspended sediment concentrations. The annual sediment accumulation rate is probably in the range of 20 cm y<sup>-1</sup> to 50 cm y<sup>-1</sup>, but an important part of the sediment inputs are suspended by waves: 40% of the radionuclides and 56% of the sediments supplied by the Rhône River deposit on a 2 km<sup>2</sup> area of the prodelta very close to the river mouth.

On the contrary of <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> concentrations which are not usable because of irregularities of the river inputs, <sup>7</sup>Be and <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub> activity-depth profiles traced recent flood deposition and enabled two events to be distinguished. Sediment layers 3 to 3.5 cm thick and 2 to 9.5 cm thick deposited during the March and the November-December floods. Grain-size distribution seems to be a good proxy to show the impact of recent high energy events like floods.

## **Acknowledgements**

This publication is a part of the CARMA project, including the marine team of the LERCM (Laboratory of Environmental Radioecology in the Continental and Marine areas) at the IRSN and the

geomorphology team of the CEREGE, notably C. Vassas and S. Meulé. The CARMEX campaign would not have been possible without the crew of the vessel “RV L’Europe”, the divers from IFREMER and the instrumentation was assisted by the IN VIVO and ADHOC VISION societies. We also thank S. Charmasson, J. Miralles and F. Bourrin for their advices, A. Jaffrenou for processing some core samples and X. Durrieu de Madron for lending us instruments. We would also like to thank V. Calcagno and L. Guidi for their help.

## References

Allison, M.A., Sheremet, A., Goni, M.A., Stone, G.W., 2005. Storm layer deposition on the Mississippi-Atchafalaya subaqueous delta generated by Hurricane Lili in 2002. *Cont. Shelf Research* 25, 2213-2232.

Aloisi, J.C, Monaco, A., 1975. La sédimentation infra-littorale. Les prodeltas nord-méditerranéens. *C. R. Acad. Sc. D.280*, 2833-2836.

Antonelli, C., Eyrolle, F., Rolland, B., Provansal, M., Sabatier, F., 2008. Suspended sediment and  $^{137}\text{Cs}$  fluxes during the exceptional December 2003 flood in the Rhone River, southeast France. *Geomorphology* 95, 350-360.

Ardhuin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.-R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.-M., Wittmann, P., 2007. Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering* 34 (3-4), 526-541

Arnaud-Fassetta, G., 2003. River channel changes in the Rhône Delta (France) since the end of the Little Ice Age: geomorphological adjustment to hydroclimatic change and natural resource management. *Catena*, 51, 141-172.

Baskaran, M., Ravichandran, M., Bianchi, T.S., 1997. Cycling of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in a high DOC, shallow, turbid estuary of south-east Texas. *Estur., Coast., Shelf Sci.* 45, 165-176.

Bouisset, P., Calmet, D., 1997. Hyper Pure gamma-ray spectrometry applied to low-level environmental sample measurements. *International Workshop on the Status of Measurement Techniques for the Identification of Nuclear Signatures*, Geel, pp. 73-81.



Bourrin, F., Durrieu de Madron, X., Ludwig, W., 2006. Contribution to the study of coastal rivers and associated prodeltas to sediment supply in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Vie et milieu – Life and Environment*, 56 (4), 307-314.

Bourrin, F., Monaco, A., Aloisi, J.C., Sanchez-Cabeza, J.A., Lofi, J., Heussner, S., Durrieu de Madron, X., Jeanty, G., Buscail, R., Saragoni, G., 2007. Last millenia sedimentary record on a micro-tidal, low accumulation prodelta (Têt river). *Marine Geology*, 243 (1-4), 77-96.

Calmet, D., et Fernandez, J.M., 1990. Caesium distribution in the northwest Mediterranean seawater, suspended particles and sediment. *Continental Shelf Research*, 10, 895-913.

Canuel, E.A., Martens, C.S., Benninger, L.K., 1990. Seasonal variations in <sup>7</sup>Be activity in the sediments of Cape Lookout Bight, North Carolina. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 237-245.

Charmasson, S., 1998. Cycle du combustible nucléaire et milieu marin. Devenir des effluents rhodaniens en Méditerranée et des déchets immergés en Atlantique Nord-Est. Rapport CEA-R-5826, 70-74.

Charmasson, S., Bouisset P., Radakovitch O., Pruchon A.S., Arnaud M., 1998. Long-core profiles of <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>60</sup>Co and <sup>210</sup>Pb in sediment near the Rhône River (Northwestern Mediterranean Sea). *Estuaries*, 21, 3, 367-378.

Charmasson, S., 2003. Caesium 137 inventory in sediment near the Rhone mouth : role played by different sources. *Oceanologica Acta* 26, 435-441.

Chu, P.C., Qi, Y., Chen, Y., Shi, P., Mao, Q., 2004. South China sea wind-wave characteristics. Part I: validation of Wavewatch III using TOPEX/Poseidon data. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 21, 1718-1733.

Corbett, D.R., Dail, M., McKee, B., 2007. High-frequency time-series of the dynamic sedimentation processes on the western shelf of the Mississippi River Delta. *Continental Shelf Research*, 27, 1600-1615.

Curran, K.J., Hill, P.S., Milligan, T.G, 2002. Fine-grained suspended sediment dynamics in the Eel River flood plume. *Continental Shelf Research*, 22, 2537-2550.

Curran, K.J., Hill, P.S., Milligan, T.G., Mikkelsen, O.A., Law, B.A., Durrieu de Madron, X., Bourrin, F., 2007. Settling velocity, effective density, and mass composition of suspended sediment in a coastal bottom boundary layer Gulf of Lions, France. *Continental Shelf Research*, 27, 1408-1421.

Drexler, T.M., Nittrouer, C.A., 2008. Stratigraphic signatures due to flood deposition near the Rhône River: Gulf of Lions, northwest Mediterranean Sea. *Continental Shelf Research*, 28, 1877-1894.

Dufois, F., 2008. Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion: premières applications au devenir des traceurs radioactifs. Thèse de doctorat à l'Université de Toulon, 380 pp.

Eyrolle, F., Rolland, B., Antonelli, C., 2006. Artificial radioactivity within the Rhone river waters – Consequences of flood on activity levels and fluxes toward the sea. *Environnement, Risques et Santé* 5, 2, 83-92.

Fain, A.M.V., Ogston, A.S., Sternberg, R.W., 2007. Sediment transport event analysis on the western Adriatic continental shelf. *Continental Shelf Research*, 27, 431-451.

Fox, J.M., Hill, P.S., Milligan, T.G., Boldrin, A., 2004. Flocculation and sedimentation on the Po River delta. *Mar. Geol.*, 203, 95-107.

François, R.E., Garrison, G.R., 1982. Sound absorption based upon ocean measurement, part ii. *J. Acoust. Soc. of Am.*, 72(6), 1870-1890.

Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., Sorgente, D., Alvisi, F., Albertazzi, S., 2005. Fine-sediment mass balance in the western Adriatic continental shelf over a century time scale. *Marine Geology*, 222-223, 113-133.

Frignani, M., Sorgente, D., Langone, L., Albertazzi, S., Ravaioli, M., 2004. Behaviour of Chernobyl radiocaesium in sediments of the Adriatic Sea off the Po River delta and the Emilia-Romagna coast. *J. Environ. Radioact.* 71, 299-312.

Guerra, J.V., Ogston, A.S., Sternberg, R.W., 2006. Winter variability of physical processes and sediment-transport events on the Eel River shelf, northern California. *Continental Shelf Research*, 26, 2050-2072.

Guillén, J., Bourrin, F., Palanques, A., Durrieu de Madron, X., Puig, P., Buscail, R., 2006. Sediment dynamics during 'wet' and 'dry' storm events on the Têt inner shelf (SW Gulf of Lions). *Mar. Geol.*, 234, (1-4), 452-474.

Heussner, S., Durrieu de Madron, X., Calafat, A., Canals, M., Carbonne, J., Delsaut, N., Saragoni, G., 2006. Spatial and temporal variability of downward particle fluxes on a continental slope: lessons from an 8-year experiment in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Mar. Geol.*, 234, (1-4), 63-92.

Jestin, H., Bassoullet, P., Le-Hir, P., L'Havanc, J., Degres, Y., 1998. Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments. In: *Proceedings of Ocean'98-IEEC/OES Conference, Nice (France)*, pp. 189–194.

Kuelh, S.A., Nittrouer, C.A., Allison, M.A., Faria, L.E.C., Dukat, D.A., Jaeger, J.M., Pacioni, T.D., Figueiredo, A.G., Underkoffler, E.C., 1995. Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment. *Continental Shelf Research*, 16, 5/6, 787-815.

Lansard, B., 2005. Distribution et remobilisation du plutonium dans les sédiments du prodelta du Rhône (Méditerranée Nord-Occidentale). Thèse de doctorat, 71-82.

Lansard, B., Grenz, C., Charmasson, S., Schaaff, E., Pinazo, C., 2006. Potential plutonium remobilisation linked to marine sediment resuspension: first estimates based on flume experiments. *Journal of Sea Research*, 55, 74-85.

Law, B.A., Hill, P.S., Milligan, T.G., Curran, K.J., Wiberg, P.L., Wheatcroft, R.A., 2008. Size sorting of the fine-grained sediments during erosion: results from the western Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*, 28 (15), 1935-1946.

Maillet, G., Vella, C., Berné, S., Friend, P., Amos, C., Fleury, T., Normand, A., 2006. Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (Southern France). *Mar. Geology* 234, 159-177.

Maréchal, J.C., Ladouche, B., Dörflinger, N., 2006. Role of karst system in the genesis of flash flood events in the Nîmes city. EGU 2006, Geophysical Research Vol.8, 06173, 2006.

Milligan, T.G., Hill, P.S., Law, B.A., 2007. Flocculation and the loss of sediment from the Po River plume. *Continental Shelf Research*, 27, 309-321.

Miralles, J., Arnaud, M., Radakovitch, O., Marion, C., Cagnat, X., 2006. Radionuclide deposition in the Rhône River Prodelta (NW Mediterranean Sea) in response to the December 2003 extreme flood. *Mar. Geology* 234, 179-189.

Miralles, J., Radakovitch, O., Aloisi, J.C., 2005.  $^{210}\text{Pb}$  sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin. *Mar. Geol.*, 216, 155-167.

Monaco, A., Biscaye, P.E., Pocklington, R., 1990. France-JGOFS, ECOMARGE, Particle fluxes and ecosystem response on a continental margin: the mediterranean experiment. *Continental Shelf Research*, 10, 9-11.

Monaco, A., Durrieu de Madron, X., Radakovitch, O., Heussner, S., Carbone, J., 1999. Origin and variability of downward biogeochemical fluxes on the Rhône continental margin (NW Mediterranean). *Deep Sea Research I* 46, 1483-1511.

Moore, W.S., DeMaster, D.J., Smoak, J.M., McKee, B.A., Swarzenski, P.W., 1995. Radionuclide tracers of sediment-water interactions on the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*, 16, 5/6, 645-665.

Naudin, J.J., Cauwet, G., Chrétiennot-Dinet, M.J., Deniaux, B., Devenon, J.L., Pauc, H., 1997. River discharge and wind influence upon particulate transfer at the land-ocean interaction : case study of the Rhône River plume. *Estuar. Coast. Shelf Science*, 45, 303-316.

Nittrouer, C.A., De Master, D.J., 1986. Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present and future research. *Cont. Shelf Research* 6, 5-30.

Nittrouer, C.A., Kuelh, S.A., Sternberg, R.W., Figueiredo, Jr A.G., Faria, L.E.C., 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Mar. Geology* 125, 177-192.

- Palanques, A., Durrieu de Madron, X., Puig, P., Fabres, J., Guillén, J., Calafat, A., Canals, M., Heussner, S., Bonnín, J., 2006. Suspended sediment fluxes and transport processes in the Gulf of Lions submarine canyons. The role of storms and dense water cascading. *MarineGeology*.
- Palinkas, C.M., Nittrouer, C.A., 2007. Modern sediment accumulation on the Po shelf, Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, 27, 489-505.
- Palinkas, C.M., Nittrouer, C.A., Wheatcroft, R.A., Langone, L., 2005. The use of  $^7\text{Be}$  to identify event and seasonal sedimentation near the Po River delta, Adriatic Sea. *Mar. Geol.* 222-223, 95-112.
- Pauc, H., 2005. Formation of the Aude, Orb and Herault prodeltas and their characterisation using physicochemical and sedimentological parameters. *Mar. Geol.*, 222-223, 335-343.
- Pont, D., Simonnet, J.P., Walter, A.V., 2002. Medium-terms changes in suspended sediment delivery to the ocean: consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône river, France). *Estuarine Coastal Shelf Science* 54, 1-18.
- Radakovitch, O., Charmasson, S., Arnaud, M., Bouisset, P., 1999.  $^{210}\text{Pb}$  and caesium accumulation in the Rhône delta sediments. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 48, 77-92.
- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., Probst, J.L., 2008. Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lions continental shelf. *Estuar. Coast. Shelf Science*, 77 (2), 285-295.
- RD Instruments, 2006. Self-contained ADCP Applications – WinSC and PlanADCP User's guide. Teledyne (May 2006).
- Rolland, B., 2006. Transfert des radionucléides artificiels par voie fluviale : conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la Méditerranée. Thèse de doctorat, 19-24, 71-73.
- Roussiez, V., Aloisi, J.C., Monaco, A., Ludwig, W., 2005. Early muddy deposits along the Gulf of Lions shoreline: a key for a better understanding of the land-to-sea transfer of sediments and associated pollutant fluxes. *Mar. Geol.*, 222-223, 345-358.
- Roussiez, V., 2006. Les éléments métalliques: traceurs de la pression anthropique et du fonctionnement hydro-sédimentaire du Golfe du Lion. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan, 130 pp.

Sabatier, P., Maillet, G., Provansal, M., Fleury, T.J., Suanez, S., Vella, C., 2006. Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19<sup>th</sup> century. *Marine Geology*, 234, 143-157.

Serrat, P., Ludwig, W., Navarro, B., Blazi, J.L., 2001. Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : la Têt (France). *Earth and Planetary Sciences*, 333, 389-397.

Sommerfield, C.K., Nittrouer, C.A., 1999. Modern accumulation rates and a sediment budget for the Eel shelf: a flood-dominated depositional environment. *Mar. Geol.*, 154, 227-241.

Soulsby, R.L., 1997. Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. 249 pp., Thomas Telford, London.

Sternberg, R.W., Cacchione, D.A., Paulson, B., Kineke, G.C., Drake, D.E., 1996. Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta. *Cont. Shelf Research* 16, 697-715.

Swart, D.H., 1974. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory publication 131

Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Corregiari, A., Nelson, B.W., 2005. Distributary channels and their impact on sediment dispersal. *Mar. Geol.*, 222-223, 75-94.

Tessier, C., 2006. Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud. Thèse de doctorat à l'Université de Bordeaux I n°3307. 400p.

Thill, A., Moustier, S., Garnier, J.M., Estournel, C., Naudin, J.J., Bottero, J.Y., 2001. Evolution of particle size and concentration in the Rhône river mixing zone: influence of salt flocculation. *Continental Shelf Research*, 21 (2127-2140).

Tolman, H.L., 2002a. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Tech. report 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Tolman, H.L., 2002b, Validation of WAVEWATCH-III. in version 1.15, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Wheatcroft, R.A., Drake, D.E., 2003. Post-depositionnal alteration and preservation of sedimentary event layers on continental margins, I. The role of episodic sedimentation. *Mar. Geol.*, 199, 123-137.

Weaver, P.P.E., Canals, M., Trincardi, F., 2006. EUROSTRATAFORM: special issue of Marine Geology. *Mar. Geol.*, 234, (1-4), 1-2.

Zuo, Z., Eisma, D., Gieles, R., Beks, J., 1996. Accumulation rates and sediment deposition in the northwestern Mediterranean. *Deep Sea Research*, 44, 3-4, 597-609.

### Figure captions:

Fig. 1: Bathymetric map of the Grand Rhône River mouth. Dots represent the cores sampling stations.

Fig. 2: Water flows of upstream (a) and downstream (b) Rhône tributaries during the floods of Nov. and Dec. 2006. (CNR).

Fig. 3 : ADCP data recovered in the whole water column close to the Roustan Est buoy (current directions in degrees (a); current velocity in  $\text{cm s}^{-1}$  (b); turbidity in dB (c)), sedimentation evolution in cm next to the Roustan Est buoy (d), winds direction and intensity in  $\text{m s}^{-1}$  (e), Rhône River flow in  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  measured in Beaucaire (f), swell direction in degrees (spots) and height in m (curve) at the Rhône River mouth (g).

Fig. 4: Current velocity in  $\text{cm s}^{-1}$  and direction (sticks) in the whole water column from 1.5 mab near the Roustan Est buoy.

Fig. 5: Volumic retrodiffusion index (BBI) in dB 1.5 m above the bottom (a), bottom shear stress in  $\text{N m}^{-2}$  due to: the currents (b), the waves (c), the currents and the waves (d).

Fig. 6: Rhône River flow in  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  between the end of the altimeter record and the core sampling time.

Fig. 7: Mean grain sizes in micrometers (top) and grain-size vertical distribution (bottom) in the USHC20, USC30, USC20 and US04Kb cores sampled during the CARMEX campaign.

Fig. 8: Vertical radionuclides activities ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) in  $\text{Bq kg}^{-1}$  dry weight in the USHC20 (left), USC30 (center) and USC20 (right) cores sampled during the CARMEX campaign.

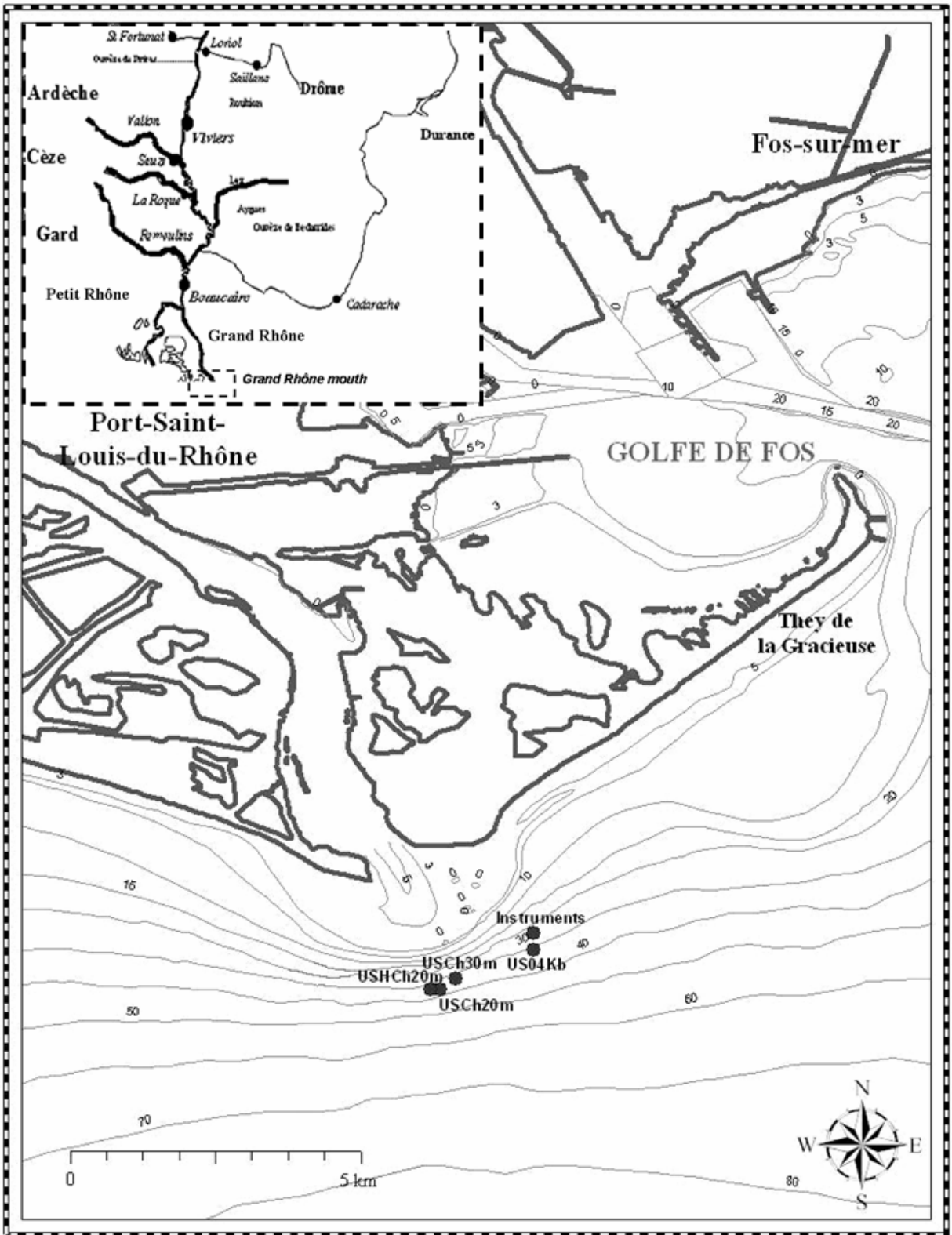
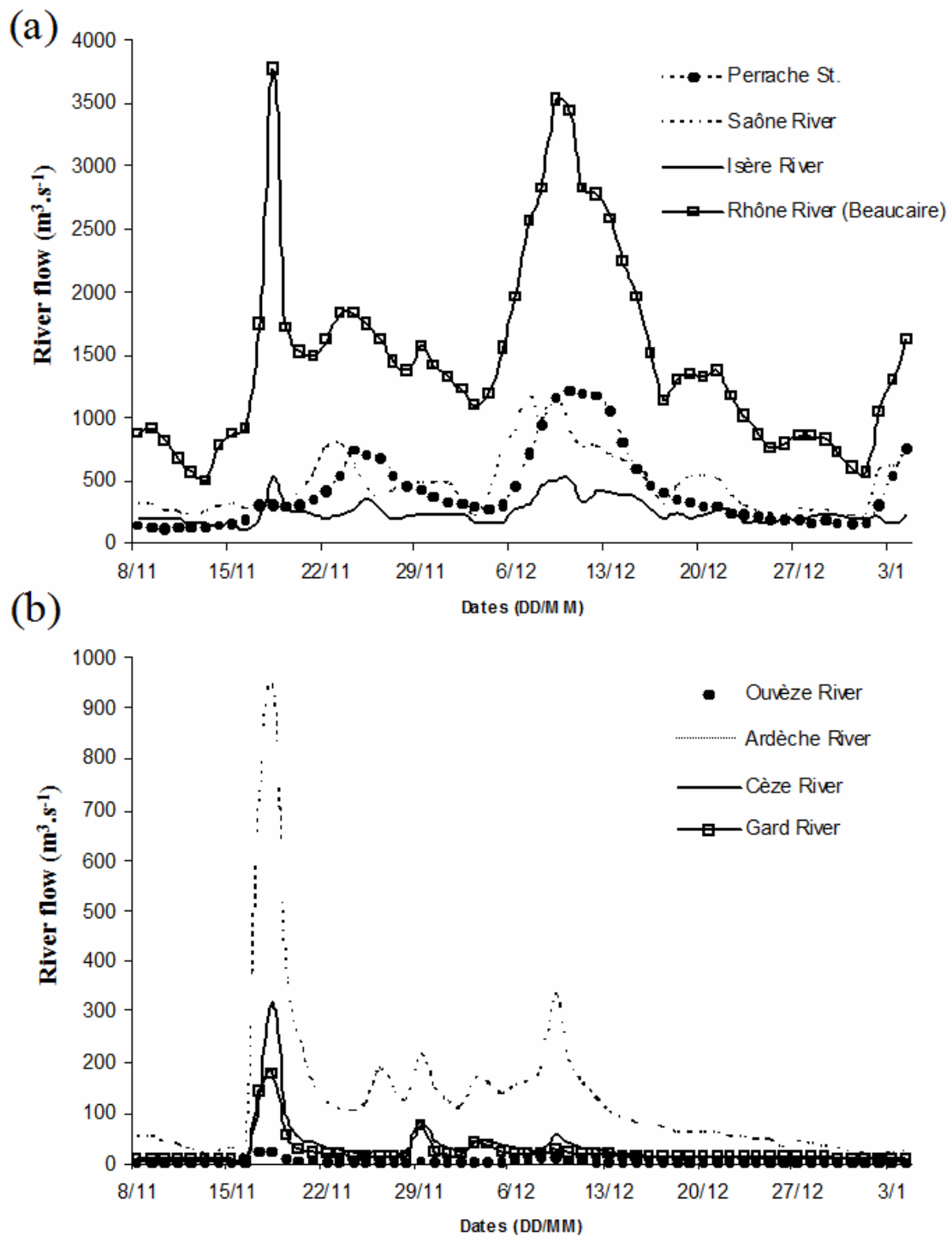


Fig. 1





**Fig. 2**

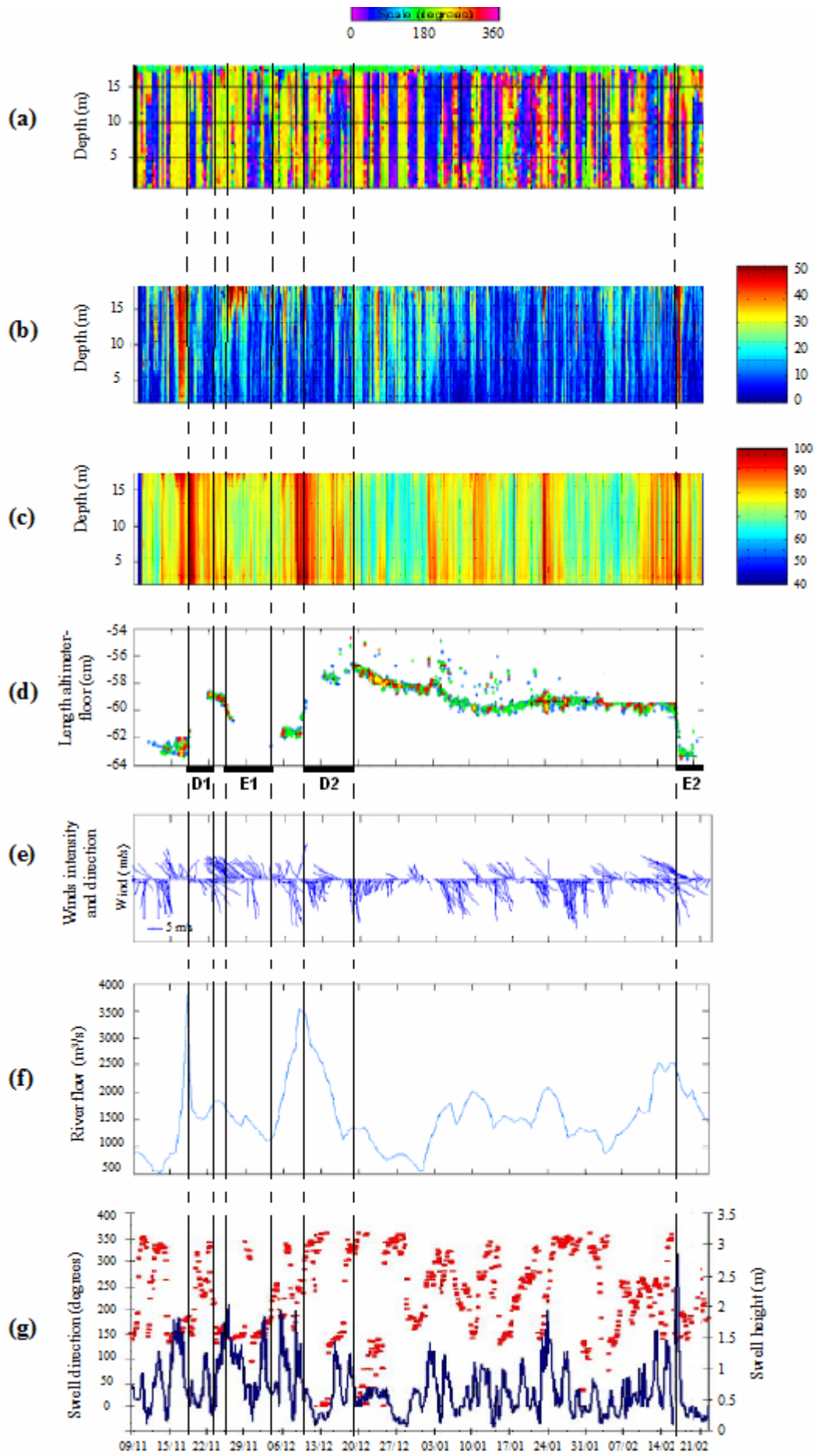


Fig. 3

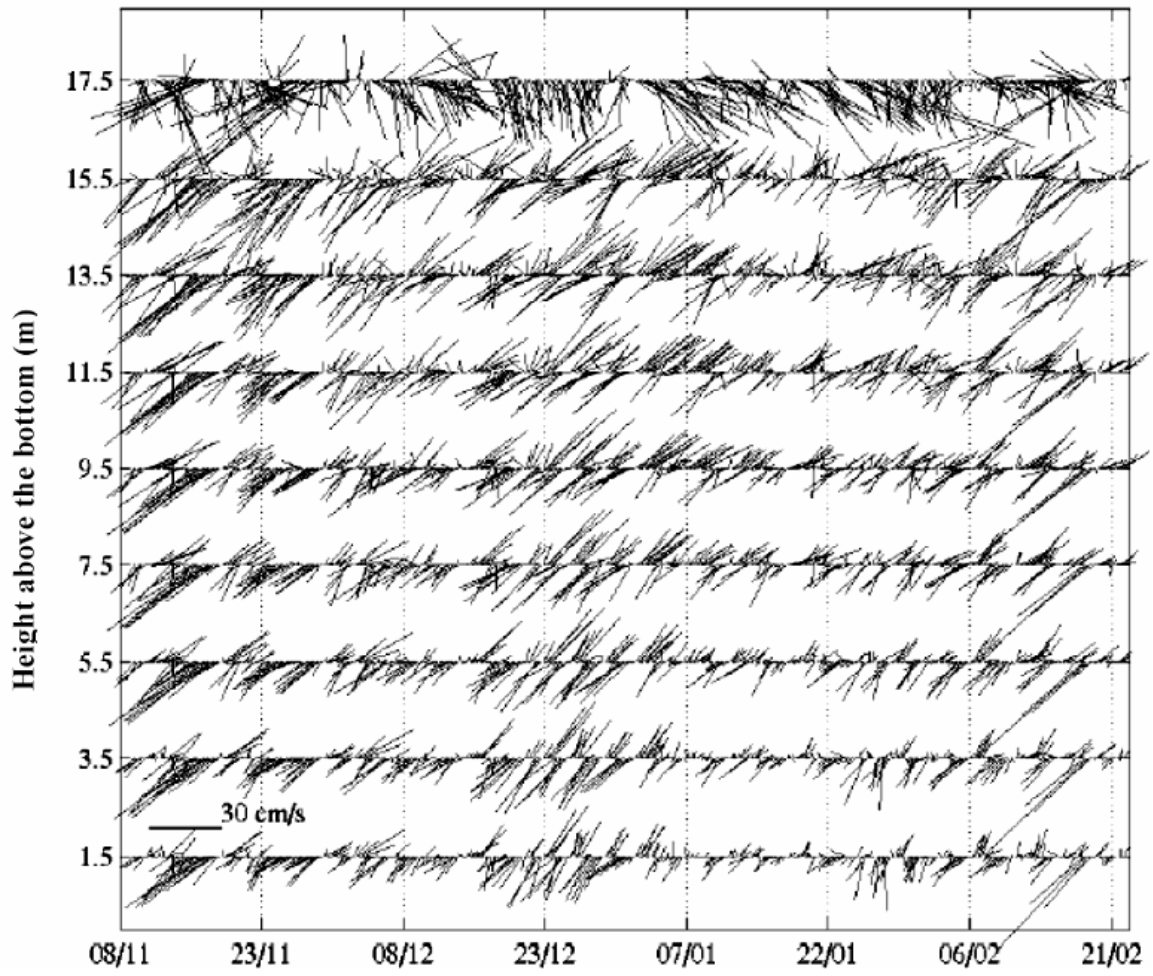


Fig. 4

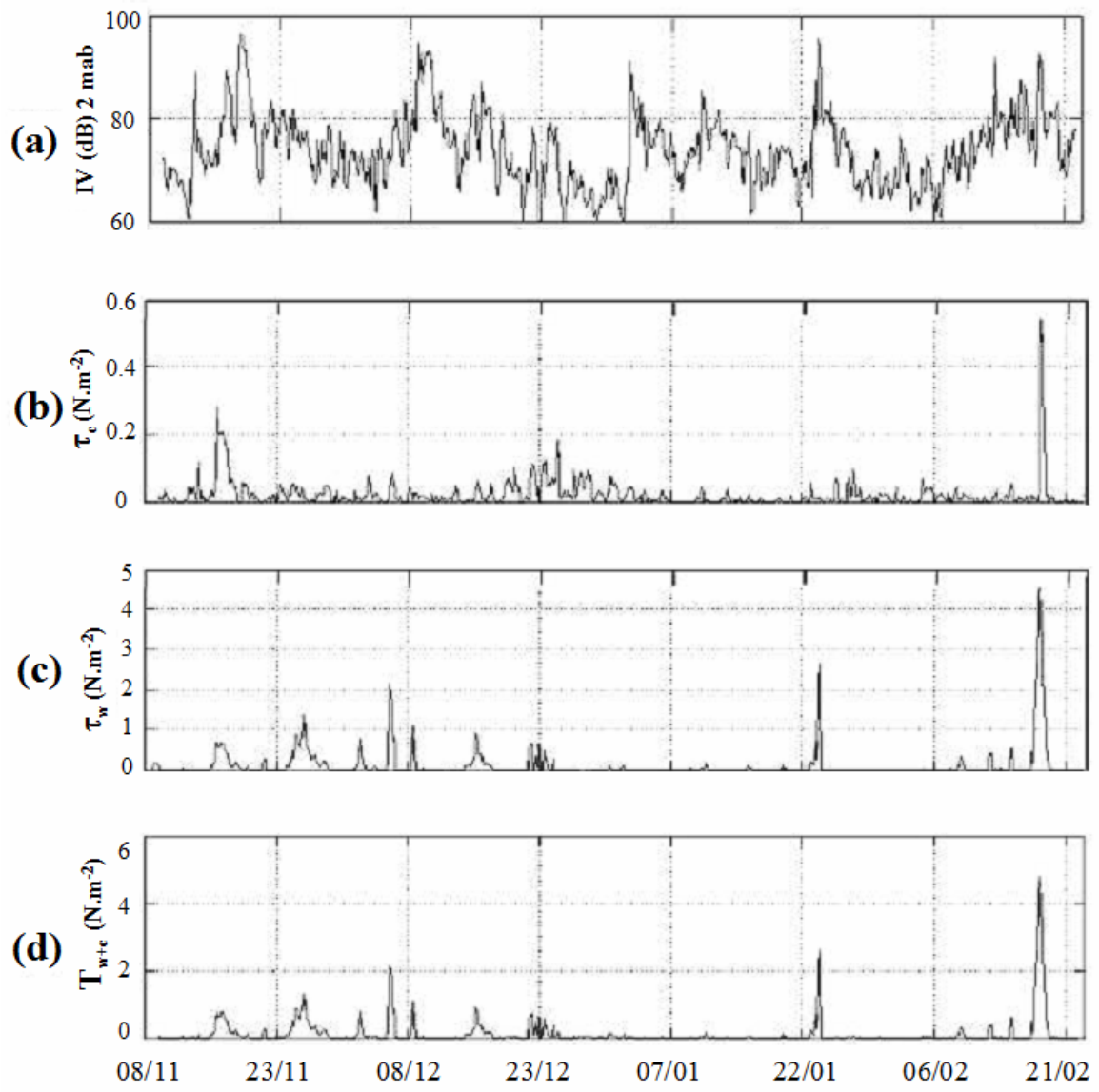


Fig. 5

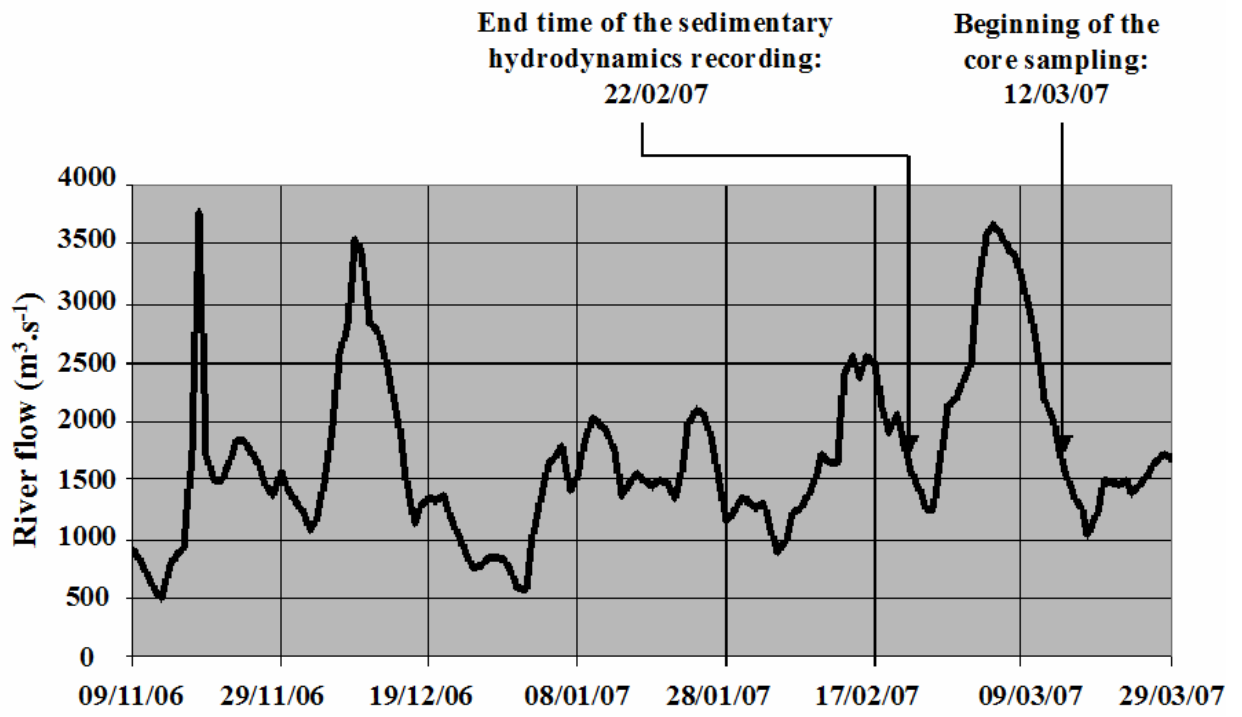


Fig. 6

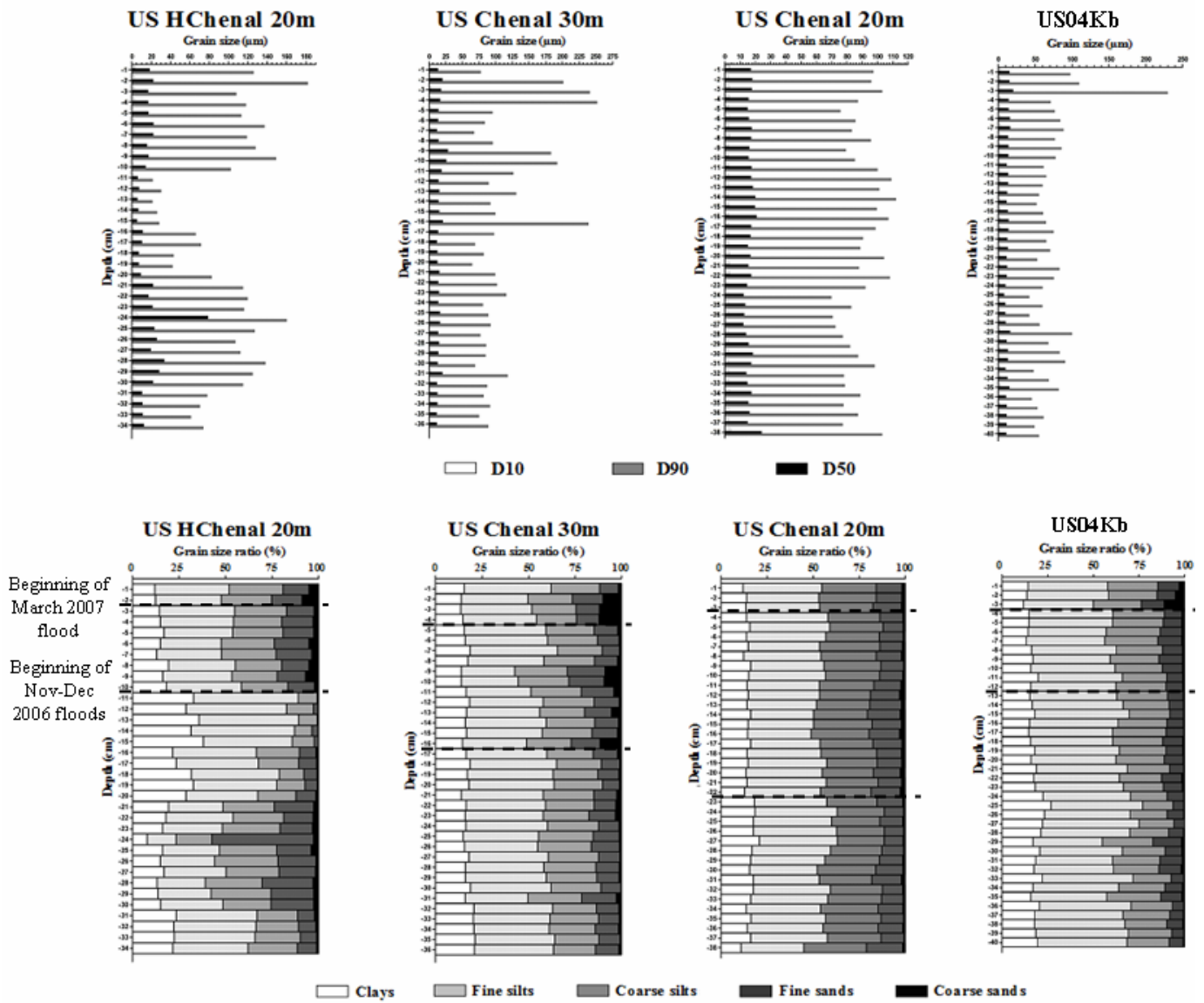


Fig. 7



## QUANTIFICATIONS DES FLUX SOLIDES RHODANIENS A L'EMBOUCHURE : APPORTS DE LA DURANCE PENDANT LA CRUE EXCEPTIONNELLE DE MAI 2008

*Estimations of the Rhône solid fluxes near the river mouth: inputs of the Durance during the extreme flood of May 2008*

**Cédric Marion**

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire  
Base IFREMER, BP 330, 83507 La Seyne/mer cedex, France  
Tél : +33 (0)4 94 30 49 31  
e-mail : [cedric.marion83@gmail.fr](mailto:cedric.marion83@gmail.fr)

**Grégoire Maillet**

Université d'Angers  
2 boulevard Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France  
Tél : +33 (0)2 41 73 52 88  
e-mail : [gregoire.maillet@univ-angers.fr](mailto:gregoire.maillet@univ-angers.fr)

### Résumé :

*Le projet EXTREMA propose d'étudier les processus naturels générateurs de flux événementiels de matière ainsi que leur impact sur la redistribution des polluants au sein des différents compartiments de la géosphère. L'étude présentée ici se focalise sur la zone de transition entre fleuve et littoral microtidal. Elle a pour objectif de déterminer les répercussions de phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes comme les crues et les tempêtes sur la sédimentation en zone prodeltaïque, reconnue comme zone de stockage principale des apports fluviaux.*

*Deux campagnes de prélèvement, menées à l'embouchure du Grand Rhône en mars et en octobre 2008, ont permis de prélever des carottes dans l'interface sédimentaire du lobe prodeltaïque à 6 mois d'intervalle. Cette période a été marquée par trois crues notables aux mois d'avril, mai et septembre, entre  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $4200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , pour un débit moyen annuel d'environ  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ces crues ont transporté de fortes charges solides dans la colonne d'eau, jusqu'à  $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  alors que la concentration moyenne est de  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  environ. Les dépôts de crue sont parfaitement identifiables au travers de l'analyse des spectres granulométriques et des concentrations en  $^{7}\text{Be}$  mesurées dans les carottes prélevées après les crues.*

*L'étude comparative des dépôts entre les deux périodes d'échantillonnage montre que les crues ont entraîné le dépôt de 34 à 43 cm de sédiments entre les isobathes 20 et 30 mètres. Elle permet de proposer un bilan sédimentaire qualitatif et quantitatif des transferts solides en période de crue (charge de fond et MES).*

### Abstract :

*The EXTREMA project aims at studying natural processes which generate very strong matter fluxes and their impact on the pollutants redistribution into the different geosphere compartments. The present study focuses on the transition area between the river and the microtidal coast. Its goal is to determinate the consequences of extreme meteorological and climatic phenomena like floods and storms above the sedimentation processes on a prodeltaic area, known as a main river inputs storage area.*

*Two sediments sampling campaigns, achieved at the Grand Rhône River mouth in March and October 2008, enabled to sample sediment cores in the sedimentary interface of the prodeltaic front with a lap-time of 6 months. This period was marked by three floods in April, May and September, with flow rates comprises between  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  and  $4200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , for a mean annual river discharge of  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . These floods brough high solid discharges in the water column, until  $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ , whereas the mean concentration is about  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Flood deposits are perfectly identified through the analysis of grain size spectra and  $^{7}\text{Be}$  concentration measured in cores sampled after the floods.*

*The comparative study of the deposits between the two sampling periods shows that the floods led to the deposition of at least 34 to 43 cm of sediments around the 20 m and 30 m isobaths. It enables to provide a qualitative and quantitative sedimentary balance of the solid matters transfers during flood periods (bottom and suspended discharge).*



## I INTRODUCTION

Le projet EXTREMA, comprenant les campagnes océanographiques EXTREMA 1 (mars 2008) et EXTREMA 2 (octobre 2008), a pour objectif d'étudier les événements extrêmes au niveau de la basse vallée du Rhône et de la Têt. Cette étude est réalisée en partenariat avec le CEFREM, le CEREGE, l'IFREMER et le Laboratoire d'Aérodynamique du Pôle d'Océanographie Côtière de l'Observatoire Midi-Pyrénées [12, 13], afin de couvrir les différents compartiments de la géosphère : atmosphère, sols, rivières et fleuves, milieu marin côtier et milieu marin profond.

La zone soulignée dans ce travail correspond à la transition fluvio-marine rhodanienne représentée par le prodelta sédimentaire [21]. L'origine de sa formation s'explique par le contact entre les apports continentaux d'eau douce chargée en matières en suspension (MES) et les eaux salées marines de la Mer Méditerranée [1], particulièrement lors des épisodes de crues du bassin versant rhodanien [15]. En effet, la floculation physico-chimique des particules en suspension, associée à des processus mécaniques d'agrégation et optimisée par de fortes concentrations en MES durant les périodes de hauts débits du fleuve, participe à l'augmentation de la taille et de la vitesse de chute des particules [21, 24].

La turbidité des eaux à l'embouchure du Rhône provient du lessivage des différents substrats lessivés par le fleuve depuis sa source durant son parcours [3]. Les confluent du Rhône aval comme le Gard, la Durance et l'Ouvèze (Figure 1) traversent des milieux dont l'efficacité au transport sédimentaire est variable, notamment en raison de leur nature géologique et de la présence de végétation, et contribuent aux apports liquides et solides vers la mer ouverte.

Les fortes crues, généralisées ou localisées, occasionnent des augmentations de débits liquides, l'envoyage et le lessivage des berges et entraînent des surconcentrations de charges solides. Le Rhône transporte près de 80 % de la quantité totale annuelle de sédiments durant les épisodes de crues, soit pendant moins de 10 % du temps [23]. Les particules se retrouvent progressivement au niveau de l'embouchure du fleuve, sont remobilisées sur le prodelta durant les crues et les tempêtes avant d'être exportées ultérieurement vers le Golfe du Lion et la Mer Méditerranée.

En période normale, le débit du Rhône avoisine  $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Il est généralement considéré en crue au-delà du seuil de  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Durant la crue exceptionnelle de décembre 2003, des valeurs de  $11500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ont été atteintes à Beaucaire d'après la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) [5], confirmées par des relevés hydrologiques de la station SORA de l'IRSN située en Arles. Antonelli et al. (2008) ont estimé un transport de sédiments en suspension de près de 3.7 Mt de silts, 0.85 Mt de sables et 0.84 Mt d'argiles vers le milieu marin lors de cet événement [2]. L'affinité des radioéléments issus de l'industrie nucléaire rhodanienne avec les particules fines est marquée dans les sédiments en suspension. La station SORA a ainsi permis d'estimer l'export total particulaire de  $^{137}\text{Cs}$  vers la Mer Méditerranée à  $77 \pm 17 \text{ GBq}$ , dont 70 % par le biais de la fraction silteuse.

Des prélèvements sédimentaires réalisés lors de trois campagnes successives à l'embouchure du Rhône en décembre 2003, février 2004 et avril 2004 ont permis d'isoler les dépôts provenant de la crue centennale de fin d'année et d'évaluer les quantités associées de  $^{137}\text{Cs}$  à  $27 \pm 2 \text{ GBq}$  [19]. Ainsi, un tiers du  $^{137}\text{Cs}$  répertorié en Arles se retrouve sur le prodelta à plus ou moins long terme. Les deux tiers restants se sont : (i) déposés sur les berges du Rhône entre Arles et l'embouchure, de manière momentanée ou durable selon les conditions météo-climatiques, (ii) dispersés sur le plateau continental et dans le Golfe du Lion après un bref transit sur le prodelta.

Les épisodes de crue jouent donc un rôle très important dans l'évolution morpho-bathymétrique de l'embouchure du Rhône et la croissance du prodelta, zone de piégeage des sédiments et des contaminants associés. Leurs origines dépendent des contextes hydrologiques des tributaires du Rhône, notamment l'Ardèche, le Gard, l'Isère et la Durance. Cette dernière est à l'origine de la crue du mois de mai 2008 d'après la DIREN Rhône-Alpes [9].

En raison des aménagements mis en place sur la Durance durant le XX<sup>ème</sup> siècle, les crues faibles à moyennes sont beaucoup moins fréquentes qu'autrefois [20]. Néanmoins, les crues violentes connaissent une recrudescence ces dernières années. Alors que le débit de la Durance varie de  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en été, lors d'étiages sévères, à  $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  au printemps après la fonte nivale, il peut atteindre  $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  lors des crues les plus importantes [4]. Son débit seuil de crue est établi à  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , valeur à partir de laquelle le lit naturel de la rivière est envoyé. Les ouvrages hydroélectriques et infrastructures fluviales empêchent les particules trop

grossières d'être transportées vers la Mer Méditerranée via le Rhône ; seuls les limons et particules fines se retrouvent à l'exutoire [11].

Ce travail repose sur l'étude de carottes sédimentaires prélevées au niveau de trois stations à la proche embouchure du Rhône sur un intervalle de 7 mois, comprenant la crue du mois de mai. Il a pour but: (i) de caractériser et de quantifier les apports sédimentaires sur le prodelta rhodanien en 2008, et (ii) d'estimer les stocks de  $^{137}\text{Cs}$  associés à la sédimentation extrême du mois de mai..

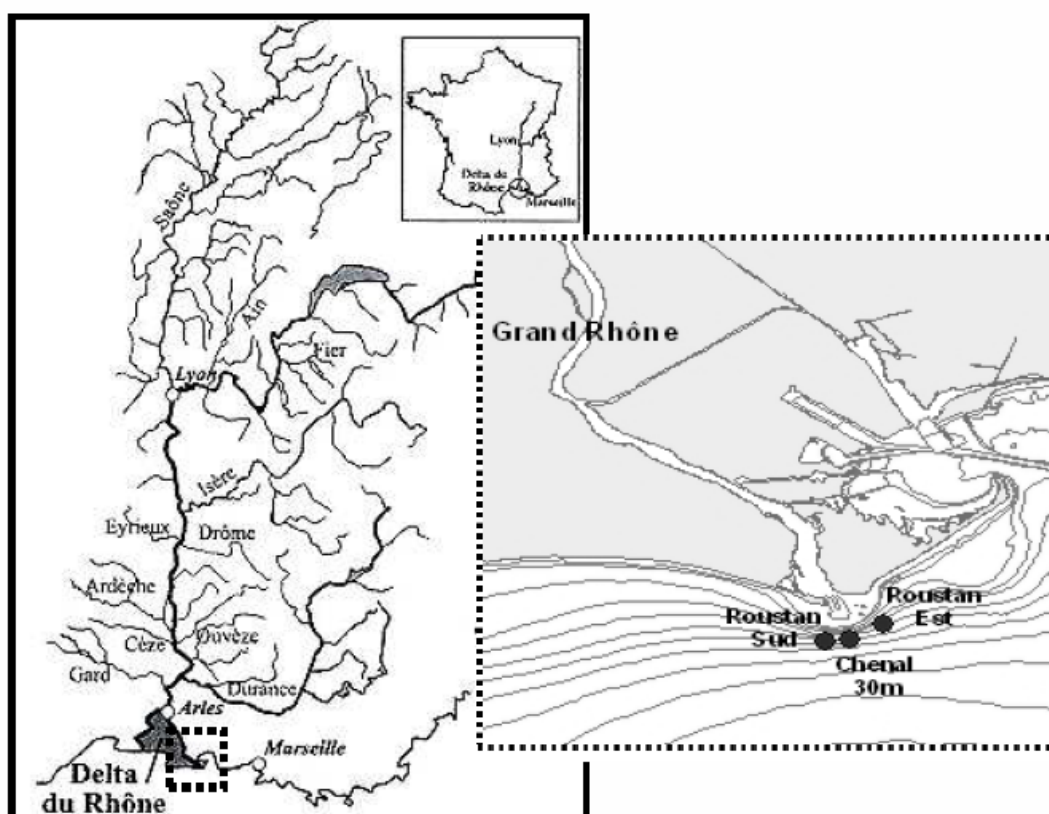


Figure 1 : Carte du réseau hydrographique rhodanien (à gauche) et carte de localisation de stations communes aux campagnes océanographiques EXTREMA 1 et 2 à l'embouchure du Grand Rhône (à droite).

## II MATERIELS ET METHODES

La base de données des débits liquides du Rhône aval, concernant le Gard, l'Ouvèze et la Durance, a été fournie par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) aux stations respectives de Remoulins, Bédarrides et Bonpas. Les données de débit et de quantités de MES du Grand Rhône sont issues des mesures de la station de prélèvement automatique SORA de l'IRSN en Arles.

Deux campagnes océanographiques de deux semaines ont permis un suivi de l'évolution sédimentaire superficielle du prodelta sur un semestre (Figure 2).

Le volet sédimentaire de la mission EXTREMA1, effectué du 15 au 23 mars 2008, présentait une phase de carottages profonds (30 à 40 cm) sur une dizaine de stations entre les embouchures du Petit Rhône et du Grand Rhône au moyen de bennes Usnel, dans lesquelles des sous-échantillonnages ont été réalisés avec des tubes en plexiglas.

Le volet sédimentaire de la mission EXTREMA2, effectué du 8 au 16 octobre 2008, diffère de celui de la mission EXTREMA1 par le nombre de stations échantillonnées, en l'occurrence 3, et par l'outil de

prélèvement, à savoir un carottier Ronanberg plutôt qu'une benne Usnel associée à des tubes en plexiglas. L'épaisseur de sédiment recueilli dépasse ainsi 70 cm contre 30 cm.

Seuls trois points de prélèvements partagent rigoureusement les mêmes positions géographiques: RousSud, RousEst et Chenal30m, situées entre 20 et 30 m de profondeur.

Les méthodes de conservation et de traitement sont identiques entre les campagnes. Les sédiments frais profonds ont été découpés par tranches de 1 cm, pesées, conditionnées dans des barquettes en aluminium, lyophilisées durant 48 h, broyées, tamisées à 200  $\mu\text{m}$  et tassées dans des boîtes en PVC de 200 mL en vue d'analyses de spectrométrie à Orsay (LMRE), notamment le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{210}\text{Pb}$ , le  $^7\text{Be}$  et le  $^{234}\text{Th}$ . Ces analyses ont été réalisées au moyen de détecteurs au germanium hyper-pur de type N sur lesquels ont été placés les géométries [17]. Des calibrations efficaces de 22.5 keV à 1.8 keV ont été menées grâce à l'utilisation de sources mélangées de rayonnements gamma dans une matrice solide alliant résine et eau de densité 1.15  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Les résultats d'activité sont corrigés des effets combinés d'ajout et d'auto-absorption [14].

Le  $^{210}\text{Pb}$  est un radionucléide d'origine naturelle issu de la spallation du  $^{222}\text{Rn}$  par les rayons cosmiques. Il est généralement employé dans les calculs de taux de sédimentation sous sa forme non-supportée (ou en excès) car sa demi-vie ne dépasse pas 22.1 ans.

Le  $^{137}\text{Cs}$  est un pur produit de l'industrie nucléaire qui est retrouvé dans différents compartiments environnementaux touchés par les essais atmosphériques globaux, l'accident de Tchernobyl de 1986 et les rejets d'installations du cycle du combustible [8].

Les  $^7\text{Be}$  et  $^{234}\text{Th}$  sont deux radioéléments d'origine naturelle dont les demi-vies sont courtes, respectivement d'environ 51 et 24 jours. Ils sont ainsi très utiles à la caractérisation d'apports événementiels.

L'analyse granulométrique a été menée avec un granulomètre à diffraction laser LS 13320, étalonné avant chaque expérience. Il a été utilisé pour analyser les sédiments frais selon une gamme de 116 diamètres allant de 0.04  $\mu\text{m}$  à 2 mm. Les sédiments ont pu être classés selon 5 catégories granulométriques : les argiles (<4  $\mu\text{m}$ ), les silts fins (entre 4 et 20  $\mu\text{m}$ ), les silts grossiers (entre 20 et 63  $\mu\text{m}$ ), les sables fins (entre 63 et 200  $\mu\text{m}$ ) et les sables grossiers (> 200  $\mu\text{m}$ ).

### III RESULTATS ET DISCUSSION

#### III.1 Influence du régime hydrologique de la Durance

La période couverte par cette étude, c'est-à-dire de mi-mars à mi-octobre 2008, a connu trois événements hydrologiques importants, qui peuvent être qualifiés de crues (C1, C2 et C3 sur la Figure 2). En effet, le débit du Grand Rhône a respectivement atteint 3244  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 4156  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et 3012  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Parallèlement, les débits de l'Ouvèze, du Gard et de la Durance ont été respectivement évalués à une dizaine de mètres cubes par seconde, excepté pour la crue du mois de mai. Leurs charges liquides dépassent respectivement 96  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 186  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et 1290  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  le 31 mai 2008. L'Ouvèze et le Gard atteignent à peine leurs seuils de crue alors que la Durance le franchit 5 fois environ. En outre, la station d'Arles a mesuré des valeurs de concentrations en MES jusqu'à 1  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (Figure 2), ce qui n'a pas été le cas pour la crue du mois de novembre 2008 qui a pourtant été plus importante avec un débit de 5590  $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et une concentration en MES de 400  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . La Durance n'était pas en contexte de crue à ce moment.

Le tributaire durancien a beaucoup contribué aux apports de la crue du mois de mai puisque son débit a été multiplié par plus de 30 et que sa participation hydrologique au Rhône est passée de 2 % en temps normal à 31 % durant cette période de crue. Les évacuateurs de crue du barrage de Serre-Ponçon ont été mis en service, ce qui n'était pas arrivé depuis 1983 [9]. Sa contribution est tant liquide que solide puisque la turbidité des eaux du Rhône est bien plus importante lorsque la Durance sort de son lit. L'explication est donnée par les infrastructures hydroélectriques et d'endiguement qui ne peuvent contenir les eaux de la rivière au-delà d'un certain débit. En cas de colmatage des retenues par les alluvions ou de remplissage des réservoirs, la Durance envahit les berges et les plaines d'inondation, remettant en suspension les matériaux les plus fins.

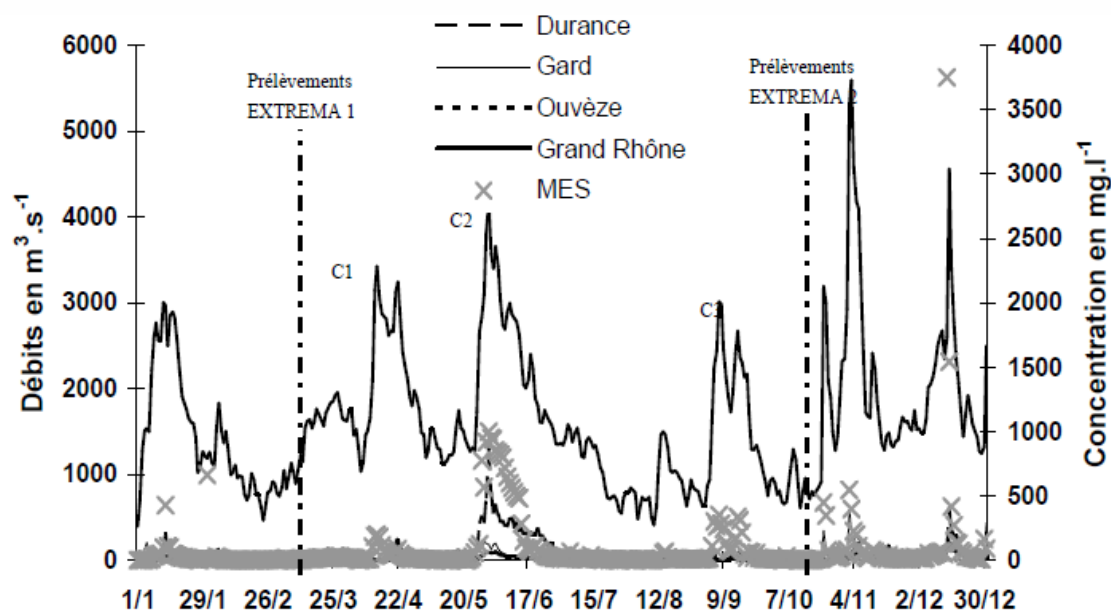


Figure 2 : Débits liquides du Grand Rhône, de la Durance, du Gard et de l'Ouvèze en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  durant le premier semestre 2008 et concentrations en matières en suspension (MES) en  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  en Arles (Grand Rhône).

### III.2 Caractérisation granulométrique des événements hydro-sédimentaires

Les profils granulométriques des trois stations de l'embouchure du Rhône qui ont été échantillonnées durant EXTREMA2 (octobre 2008) avec le carottier Ronanberg présentent chacune une scission nette entre une base de carotte à forte fraction grossière et un toit de carotte à forte fraction fine (Figure 3). La coupure est clairement visible à 34 cm, 41 cm et 43 cm, respectivement au niveau des stations Roustan Sud, Roustan Est et Chenal30m. La fraction sableuse à la base de chaque carotte est comprise entre 20 et 40 % avec un fort ratio de sables grossiers, alors que la fraction sableuse au toit de chaque carotte ne dépasse pas 10-15 % avec une absence quasi-totale de sables grossiers.

Les profils granulométriques des prélèvements sédimentaires de ces mêmes stations, échantillonnés durant la campagne EXTREMA1 sept mois plus tôt (mars 2008), confirment les dépôts de sédiments grossiers révélés sur les profils granulométriques de la campagne EXTREMA2 (Figure 3). La fraction de sables grossiers est omniprésente (10-15 %) et la scission observée sur les profils d'octobre n'apparaît pas : elle est postérieure à mars 2008.

Les crues C1, C2 et C3 sont certainement visibles sur les profils de la Figure 3 puisque les taux de sédimentation dans cette zone sont pluri-décimétriques et les 70 cm des carottes d'EXTREMA2 représenteraient plus d'une année d'archive sédimentaire. En effet, les taux d'accumulation sédimentaire sur le prodelta sont estimés entre 30 et 48  $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$  grâce aux rapports isotopiques  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  [7, 8], entre 20 et 40  $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$  grâce au plomb 210 en excès [18, 22], voire de l'ordre de 60  $\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$  par l'étude des pollens retrouvés dans les sédiments [6]. Il est très probable que l'artefact de scission granulométrique corresponde au début des dépôts de la crue C2 pour laquelle la Durance a très largement participé [9]. Cela signifie que près de 34 à 43 cm de sédiments se sont déposés dans cette zone en 4 mois et demi.

L'aire de dépôt représentée par les trois stations de prélèvement équivaut à 1.91  $\text{km}^2$ . Le volume sédimentaire apporté par le fleuve dans cette zone depuis mai 2008 a été calculé par la méthode de Simpson et s'élève à 792300  $\text{m}^3$ , soit près de 2.812 Mt en intégrant la masse volumique du sédiment sec.

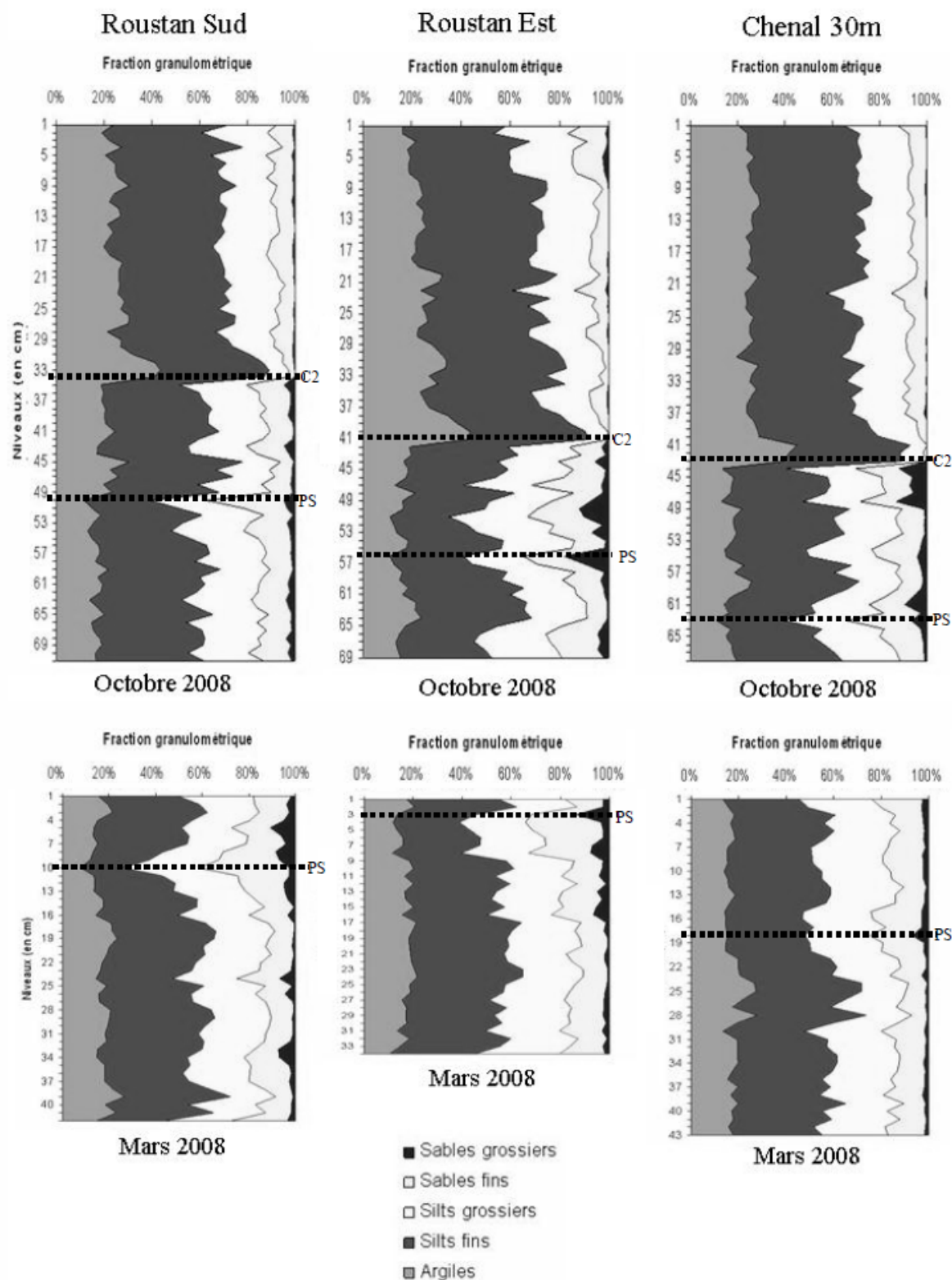


Figure 3 : Profils granulométriques de carottes sédimentaires prélevées aux stations Roustan Sud, Roustan Est et Chenal 30m durant les campagnes EXTREMA1 (mars 2008) et EXTREMA2 (octobre 2008). Les pointillés représentés sur chaque profil de la mission automnale signalent la transition entre une sédimentation assez grossière et une sédimentation fine.

Les mesures de la station SORA en Arles ont permis d'estimer les apports du fleuve à 491 kT en avril lors de C1, 4.129 Mt en mai lors de C2 et 646 kT en septembre lors de C3. La quantité de sédiments déposés sur la zone de 1.91 km<sup>2</sup> depuis mai 2008 correspond à 58.9 % du flux total de sédiments issus du Rhône. Cette surface constitue un milieu préférentiel de dépôt car 40 % des sédiments ne passent pas l'exutoire (situé à 40 km d'Arles) ou se déposent plus loin, voire s'échappent du prodelta. Des travaux concernant la capacité de piégeage des sédiments rhodaniens par le prodelta ont évalué que 54 % des apports solides du Rhône étaient stockés sur une aire de 30 km<sup>2</sup> [25]. La superficie de la zone de stockage est bien moins étendue en cas de crue exceptionnelle délivrant une forte charge particulaire.

Le signal de passage d'une fraction grossière à plus fine n'est visible que sur les profils granulométriques d'EXTREMA2, mais certains un pic sableux (PS) est observable communément sur chacun des profils des deux campagnes. Ils attesteraient probablement d'un même épisode hydrodynamique, antérieur à la campagne EXTREMA1 comme la crue du mois de janvier 2008. Le signal PS se situe respectivement à 50 cm, 56 cm et 63 cm aux stations Roustan Sud, Roustan Est et Chenal30m en octobre 2008, contre respectivement 10 cm, 3 cm et 18 cm pour les mêmes stations en mars 2008. Il en résulte des taux d'accumulation respectifs de 40 cm, 53 cm et 45 cm en prenant le signal PS comme référentiel.

La crue C1 est impossible à vraiment situer sur les prélèvements sédimentaires car aucun signal granulométrique ne peut attester sa présence et les résultats des analyses spectrométriques des niveaux concernés ne sont pas encore disponibles. En revanche, les 30 premiers centimètres de la carotte sédimentaire échantillonnée à la station Roustan Sud (Figure 4) permettent de localiser la crue C3.

### III.3 Caractérisation spectrométrique des événements hydro-sédimentaires

Les profils de concentration en <sup>7</sup>Be, <sup>137</sup>Cs et <sup>210</sup>Pb en excès (Figure 4) présentent globalement la même forme avec un signal de fin de dilution Df1 à 9 cm de profondeur, un signal de début de dilution Dd2 à 3 cm de profondeur et un deuxième signal de fin de dilution Df2 à 3 cm de profondeur [10, 19].

La radioactivité en <sup>137</sup>Cs varie de 7 Bq.kg<sup>-1</sup> à 12 Bq.kg<sup>-1</sup> au niveau de Df1. Les concentrations en <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub> et <sup>7</sup>Be, témoignant des apports particuliers, varient respectivement de 20 Bq.kg<sup>-1</sup> à 40-50 Bq.kg<sup>-1</sup> et de 5 Bq.kg<sup>-1</sup> à 25 Bq.kg<sup>-1</sup>. Même en faible concentration, le <sup>7</sup>Be reste présent à la base du profil, ce qui signifie que les sédiments de la base de la carotte se sont accumulés il y a moins de 200 jours environ. De plus, la concentration en radionucléides de longue demi-vie (<sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>, <sup>137</sup>Cs) est faible sur toute la longueur de la carotte. Un unique événement hydrologique est responsable de cette dilution sur plus de 21 cm. Il s'agit certainement de la crue C2. Elle serait à l'origine de l'accumulation de près de 25 cm de sédiments au niveau de la station Roustan Sud.

La concentration en <sup>234</sup>Th en excès jusqu'à près de 10 cm de profondeur témoigne d'une séquence de dépôts de moins de 100 jours. Les profils des trois radionucléides d'origine naturelle, traceurs des particules sédimentaires, révèlent un cycle entier de dilution/concentration encadré par Dd2 et Df2 (Figure 4).

La dilution s'avère moins importante que pour la crue C2 mais elle est remarquable sur tous les profils, excepté celui du <sup>137</sup>Cs qui reste très chaotique comme toujours à cette distance de l'embouchure [8, 18, 19]. La crue C3 aurait ainsi entraîné le dépôt de 4 cm de sédiments.

Lorsque les résultats des analyses spectrométriques seront disponibles, il sera possible de comparer les profils de radioactivité des différentes stations et de compléter celui de la station Roustan Sud.

### III.4 Bilan de <sup>137</sup>Cs sur le prodelta

Les quantités de <sup>137</sup>Cs transportées par le Rhône en Arles aux mois d'avril, mai et septembre 2008 sont respectivement de 3.56 GBq, 42.03 GBq et 8.21 GBq d'après des calculs basés sur les mesures de la station SORA.

En intégrant la concentration de <sup>137</sup>Cs sur chaque horizon sédimentaire à partir du signal de scission, et en estimant que les profils de <sup>137</sup>Cs de Roustan Est et Chenal30m soient semblables à celui de Roustan Sud, la quantité de <sup>137</sup>Cs piégé dans le prodelta atteint 26.71 GBq depuis mai 2008. Cette valeur correspond à 53.1 % des flux de <sup>137</sup>Cs en Arles et est proche de celle des flux sédimentaires (58.9 %).

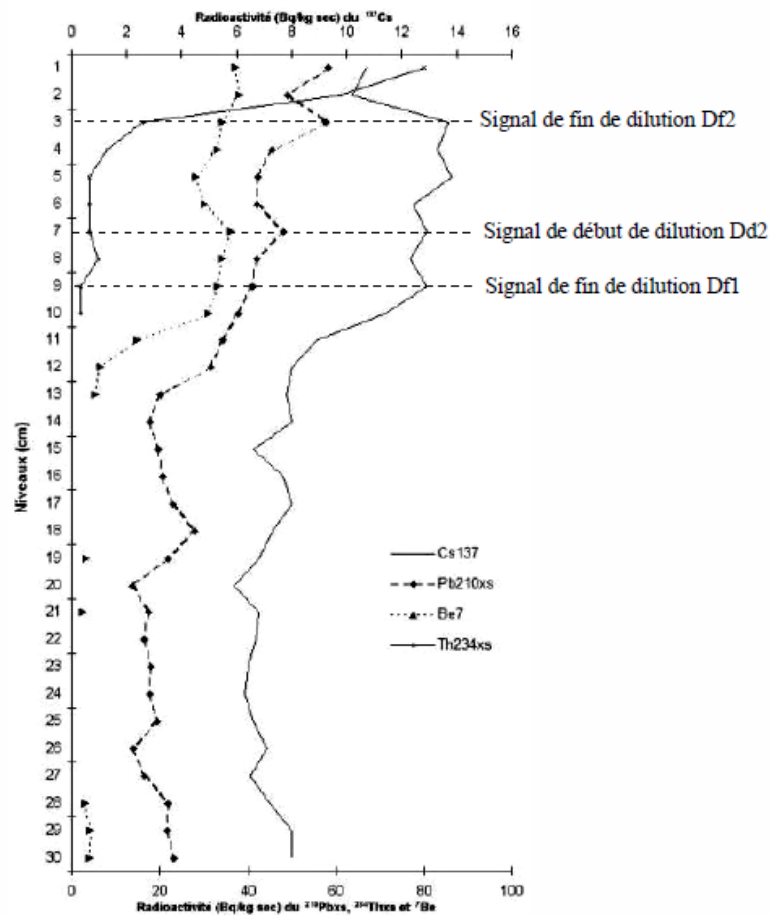


Figure 4 : Profils verticaux de radioactivités en <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb<sub>xs</sub>, <sup>234</sup>Th<sub>xs</sub> et <sup>7</sup>Be en Bq.kg<sup>-1</sup> de poids sec à la station Roustan Sud pendant EXTREMA2 (octobre 2008).

De la même manière, la contribution de la crue C2, à laquelle la Durance a participé majoritairement, aux bilans sédimentaire et radioactif a été évaluée à 2.07 Mt de sédiments et 16.57 GBq de <sup>137</sup>Cs. La crue C3 aurait remobilisé 332 kt de sédiments et 4.31 GBq de <sup>137</sup>Cs. Près de 73 % et 11.8 % des dépôts sédimentaires localisés sur la zone d'étude depuis mai 2008 proviennent respectivement des crues C2 et C3. En revanche, C2 serait à l'origine du piégeage de 62 % de <sup>137</sup>Cs contre 16.1 % pour C3.

Dans le cas de la crue de mai 2008 (C2), 39.4 % du <sup>137</sup>Cs et 50.1 % des sédiments apportés par le fleuve se sont déposés sur une aire de 1.91 km<sup>2</sup> à l'embouchure du Rhône, contre respectivement 52.5 % et 51.4 % dans le cas de la crue de septembre 2008 (C3). Avec des débits assez proches entre 3000 et 4000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, C2 et C3 n'ont pas les mêmes impacts hydro-sédimentaires et radioécologiques. Cela s'expliquerait par des processus d'agrégation/floculation, amplifiés par la turbidité des eaux chargées en MES, qui entraîneraient des phénomènes d'adsorption/désorption [24]. De plus, la Durance n'est pas un cours d'eau nucléarisé contrairement au Rhône amont et les sédiments sont moins enclins à l'adsorption de radioéléments.

La crue C2 du Rhône, influencée majoritairement par celle de la Durance, montre son importance lorsqu'elle est comparée à la crue centennale de décembre 2003 [2, 19]. En effet, avec un débit à peine supérieur au tiers de celui de la crue du 4 décembre, la crue C2 a remobilisé près de 76.6 % des sédiments et 54.6 % du <sup>137</sup>Cs remis en suspension fin 2003.

L'événement durancien du mois de mai a contribué à hauteur de 49.5 % des apports sédimentaires de l'année 2008, et 44 % en matière de <sup>137</sup>Cs [16].

#### IV CONCLUSIONS

Aménagée depuis le XX<sup>ème</sup> siècle avec des barrages et des centrales hydroélectriques, la Durance est une rivière dont les crues faibles à moyennes n'ont plus vraiment d'impact sur les riverains car généralement canalisées. Néanmoins, partiellement en raison du changement climatique, le nombre de fortes crues augmente d'année en année. L'événement du mois de mai 2008 a multiplié le débit seuil de crue de la rivière par plus de 30, transportant 4.129 Mt de sédiments et 42.03 GBq de <sup>137</sup>Cs vers la Mer Méditerranée. Le transport sédimentaire de cette crue représente 76.6 % de celui entraîné par la crue centennale de décembre 2003, dont le débit était près de trois fois plus élevé.

L'analyse granulométrique de carottes sédimentaires à l'embouchure du Rhône avant et après la crue de mai 2008 a permis de qualifier son caractère durancien par le biais de sa fraction en particules fines, issues des limons de débordement du lit. La crue a déposé près de 25 cm de sédiment au niveau d'une des 3 stations de l'embouchure. Le taux d'accumulation sur les 7 mois d'étude varie de 34 cm à 43 cm. Ces chiffres sont légèrement supérieurs à ceux répertoriés dans la littérature mais attestent bien du caractère soudain et peu ordinaire d'une crue de la Durance.

L'analyse spectrométrique de l'une des carottes sédimentaires a permis de situer la fin de la crue de mai 2008 et d'isoler intégralement la crue de septembre 2008, moins importante. Elle a confirmé l'épaisseur importante de sédiments déposés au printemps, au moyen de radionucléides à demi-vies courte et longue. Le bilan sédimentaire imputable à la crue de la Durance s'élève à 2.07 Mt et le bilan de <sup>137</sup>Cs à 16.57 GBq.

#### V REMERCIEMENTS

Un grand merci à Margot Chapuis (CEREGE), qui a contribué à l'enrichissement de la bibliographie sur la Durance, à Myriam Vaucoret (Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance), à Frédérique Eyrolle (IRSN Cadarache), à Nicolas Thévenet (Compagnie Nationale du Rhône), à Rodolfo Gurriaran (IRSN Orsay), à François Dufois (IFREMER), à l'équipage du N/O L'Europe et à l'équipe IRSN de La Seyne/mer.

#### VI REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Aloisi, J.C., (1986). – Sur un modèle de sédimentation deltaïque: contribution à la connaissance des marges passives. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan.
- [2] Antonelli, C., Eyrolle, F., Rolland, B., Provansal, M., Sabatier, F., (2008). - Suspended sediment and <sup>137</sup>Cs fluxes during the exceptional December 2003 flood in the Rhône River, southeast France. *Geomorphology* 95, 350-360.
- [3] Arnaud-Fassetta, G., (1998). – Dynamiques fluviales holocènes dans le delta du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 329 p.
- [4] Balland, P., Huet, P., Lafont, E., Leteutrois, J.P., Pierron, P. (2002). - Rapport sur la Durance : propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance.
- [5] Bravard, J.P. et Clemens, A., (2008). – *Le Rhône en 100 questions*. Zone Atelier Bassin du Rhône. 295 p.
- [6] Beaudoin, C., Suc, J.P., Cambon, G., Touzani, A., Giresse, P., Pont, D., Aloisi, J.C., Marsset, T., Cochonat, P., Duzer, D., Ferrier, J. (2005). - Present day rhythmic deposition in the Grand Rhône prodelta (NW Mediterranean) according to high resolution pollen analyses. *Journal of Coastal Research*, 21(2), 292-306.
- [7] Calmet, D., Fernandez, J.M. (1990). - Caesium distribution in northwest Mediterranean seawater, suspended particles and sediments. *Continental Shelf Research*, 10, 895-913.



- 
- [8] Charmasson, S., (1998). - Cycle du combustible nucléaire et milieu marin. Devenir des effluents rhodaniens en Méditerranée et des déchets immergés en Atlantique Nord-Est. Thèse d'état, Université d'Aix-Marseille. 365 p.
- [9] DIREN Rhône-Alpes, (2008). - Bulletin de situation hydrologique du bassin Rhône-Méditerranée : mai et juin 2008.
- [10] Drexler, T.A., Nittrouer, C.A. (2008). – Stratigraphic signatures due to flood deposition near the Rhône River: Gulf of Lions northwest Mediterranean Sea. *Continental Shelf Research*, **28**, 1877-1894.
- [11] EDF, (2008). - Suivi de la topographie et du colmatage de la Durance en aval de Mallemort. Mars 2008.
- [12] Eyrolle, F., (2008). – Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier. Rapport DEI/SESURE n°2008-37, 32 pp.
- [13] Eyrolle, F., (2009). – Episodes météo-climatiques extrêmes et redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés au sein d'un système côtier. Rapport DEI/SESURE n°2009-15, 41 pp.
- [14] Lefèvre, O., Bouisset, P., Germain, P., Barker E., Kerlau, G., Cagnat, X., (2003). - Self-absorption correction factor applied to  $^{129}\text{I}$  measurement with direct gamma-X spectrometry for *Fucus serratus* samples. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **506**, 173-185.
- [15] Maillat, G., Vella, C., Berné S., Friend, P.L., Amos, C.L., Fleury, T.J., Normand, A., (2006). – Morphological changes and sedimentary processes induced by the December 2003 flood event at the present mouth of the Grand Rhône River (southern France). *Marine Geology*, **234**, 159-177.
- [16] Marion, C., (2009). – Dynamique et bilans des transferts particuliers de radioéléments d'origine anthropique et naturelle dans le Golfe du Lion : cas particulier des apports rhodaniens. Thèse de doctorat à l'Université de Perpignan (soumise).
- [17] Miralles, J., (2004). - Etude couplée des radionucléides et des isotopes stables du plomb en Méditerranée Occidentale. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 146 p.
- [18] Miralles, J., Radakovitch, O., Aloisi, J.C. (2005). -  $^{210}\text{Pb}$  sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin. *Marine Geology*, **216**, 155-167.
- [19] Miralles, J., Arnaud, M., Radakovitch, O., Marion, C., Cagnat, X., (2006). - Radionuclide deposition in the Rhône River prodelta (NW Mediterranean Sea) in response to the December 2003 extreme flood. *Marine Geology* **234**, 179-189.
- [20] Miramont, C., Jorda, M., Pichard, G., (1998). - Evolution historique de la morphogénèse et de la dynamique fluviale d'une rivière méditerranéenne : l'exemple de la Moyenne Durance (France du Sud-Est). *Géographie Physique et Quaternaire*, **52**(3), 1-13.
- [21] Pauc, H., (1997). – Fluvio-marine interface in a microtidal mediterranean estuarine environment. The nepheloid layer supply problem. *Journ. Rech. Ocean.*, **22**(3), 83-90.
- [22] Radakovitch, O., Charmasson, S., Arnaud, M., Bouisset, P. (1999). -  $^{210}\text{Pb}$  and caesium accumulation in the Rhône delta sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **48**, 77-99.
- [23] Rolland, B., (2006). – Transferts des radionucléides artificiels par voie fluviale : conséquences sur les stocks sédimentaires rhodaniens et les exports vers la Méditerranée. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 280 p.

- [24] Thill, A., (1999). – Agrégation des particules: structure, dynamique et simulation. Application au cas d'un écoulement stratifié : l'estuaire du Rhône. Thèse de doctorat à l'Université d'Aix-Marseille. 405 p.
- [25] Noël, M.H., (1996). - Le plutonium comme traceur du transfert et de l'accumulation des apports particuliers du Rhône en Méditerranée Nord-Occidentale. Thèse de doctorat à l'Université de Paris XII. 270 p.



## Résumé:

Ce travail pluridisciplinaire a pour but d'évaluer et de comprendre la dynamique et les bilans des transferts particuliers de radioéléments dans le Golfe du Lion, particulièrement à l'embouchure du Rhône. En raison de sa demi-vie de 30.2 ans et de sa forte affinité avec les silts et les argiles, le  $^{137}\text{Cs}$  a été utilisé comme marqueur des apports du Rhône. Les sédiments du prodelta rhodanien ont enregistré des valeurs d'activité de  $^{137}\text{Cs}$  issues des rejets des installations nucléaires, des retombées des tirs atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl (pic à  $600 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). La diminution des rejets d'effluents radioactifs et le démantèlement de l'usine de retraitement du combustible de Marcoule en 1997 ont entraîné une baisse des flux de  $^{137}\text{Cs}$  vers la Mer Méditerranée. Les concentrations massiques moyennes se situent actuellement autour de  $10 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans les sédiments du prodelta. Les enregistrements sédimentaires de différentes campagnes océanographiques réalisées entre 2001 et 2008 ont permis de cartographier une zone d'accumulation de  $^{137}\text{Cs}$  de près de  $20 \text{ km}^2$  à l'embouchure du Rhône et d'estimer son stock à  $3.35 \text{ TBq}$ , soit près du huitième de celui du Golfe du Lion, dont l'aire approche  $15000 \text{ km}^2$ .

D'autres campagnes réalisées dans le cadre des projets CARMA et EXTREMA (2006-2008) ont permis d'observer le comportement des néphéloïdes de surface et de fond et de les relier à la sédimentation sur le prodelta. Les analyses radiochronologiques couplant les profils de concentration de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}$  ont conduit à estimer des taux d'accumulation pluridécimétriques à la proche embouchure. Des radioéléments à courte période comme le  $^7\text{Be}$  et le  $^{234}\text{Th}$  ont servi à estimer les épaisseurs de dépôts sédimentaires générées par certaines crues du Rhône.

Ces résultats ont pu être confirmés par une expérience basée sur une instrumentation de l'embouchure du Rhône durant l'hiver 2006-2007. Les données obtenues par un altimètre ont révélé l'accrétion totale de 8 cm de sédiment pendant deux crues moyennes suivies par un courantmètre. Elles ont également permis de relier une importante phase d'érosion à un épisode de houle de sud-est dont la contrainte de cisaillement a atteint 5 Pa. Un érodimètre a permis d'évaluer la contrainte seuil d'érosion à 0.35 Pa à la proche embouchure. Les résultats montrent que la remobilisation sédimentaire est importante dans cette zone mais que les particules en suspension connaissent une faible exportation vers le Golfe du Lion, voire réalimentent le prodelta.

## Abstract :

The aim of this study was to evaluate and understand particular transfers dynamics and balances of radionuclides in the Gulf of Lions, particularly at the Rhône River mouth. Due to its 30.2 year half-life and of its great affinity with silts and clays,  $^{137}\text{Cs}$  was used as a Rhône River inputs tracer. Rhône prodelta sediments recorded values of  $^{137}\text{Cs}$  activities originated by nuclear power plants releases, global fallout and Tchernobyl accident (peak at  $600 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). A sharp decrease in liquid radioactive effluents releases and the dismantlement of the Marcoule fuel reprocessing plant in 1997 induced  $^{137}\text{Cs}$  fluxes decrease to the Mediterranean Sea. At present time, mean concentrations are around  $10 \text{ Bq.kg}^{-1}$  in the prodelta sediments. Sedimentary records of different oceanographic campaigns achieved between 2001 and 2008 enabled to map a  $20 \text{ km}^2$   $^{137}\text{Cs}$  accumulation area close to the Rhône River mouth and to estimate a store of  $3.35 \text{ TBq}$ , i.e. the eighth of the Gulf of Lions store, which area is about  $15000 \text{ km}^2$ .

Other campaigns carried out in the framework of the CARMA and EXTREMA projects (2006-2008) allowed to observe surface and bottom nepheloïds behaviours and to link them to the prodelta sedimentation. Radiochronological analyses coupling  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  depth activity profiles allowed to estimate pluridecimetric accumulation rates next to the mouth. Short-live radionuclides like  $^7\text{Be}$  and  $^{234}\text{Th}$  were used to estimate sedimentary deposits thicknesses generated by some Rhône River floods.

These results were confirmed by an experiment which induced an instruments deployment at the Rhône River mouth during the winter 2006-2007. Altimeter data showed 8 cm thick sediment total accretion during two mean floods recorded by a current profiler. They also showed an important erosion phase linked to a south-east swell episode with a bottom shear stress reaching 5 Pa. An erodimeter enabled to evaluate the erosion shear stress threshold to 0.35 Pa next to the mouth. Results showed that the sediment remobilization was very important in this area but that the exports of suspended solid matters towards the Gulf of Lions were weak, or even deposited in fine on the prodelta.