

## Impact sur le milieu marin des rejets radioactifs consécutifs à l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi

4 avril 2011

*Les mesures effectuées depuis plusieurs jours dans l'eau de mer à proximité de la centrale montrent une forte contamination du milieu marin par divers radionucléides rejetés lors de l'accident survenu dans la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi. D'une manière générale, la pollution radioactive en mer provient pour partie du déversement direct d'eaux contaminées depuis la centrale, pour partie du transfert par les rivières des polluants radioactifs déposés au sol à la suite des rejets atmosphériques, puis lessivés par la pluie, et pour partie enfin des retombées dans l'océan d'une partie des radionucléides du panache atmosphérique, que les courants aériens ont dirigé vers la mer pendant une bonne partie de la séquence accidentelle. Certains de ces radionucléides sont solubles ; ils vont être transportés par les courants marins et se disperser dans les masses d'eau océaniques sur des distances très importantes. D'autres ont tendance à se fixer, plus ou moins facilement, sur les particules solides en suspension dans l'eau, entraînant une contamination sédimentaire après dépôt sur les fonds océaniques. Les éléments radioactifs de courte période radioactive, tels que l'iode 131 ( $^{131}\text{I}$ ), ne seront détectables que pendant quelques mois (la radioactivité de l'iode 131 est divisée par 1000 toutes les dix périodes radioactives<sup>1</sup>, soit tous les 80 jours). D'autres, comme le ruthénium 106 ( $^{106}\text{Ru}$ ) et le césium 134 ( $^{134}\text{Cs}$ ) persisteront dans l'environnement marin pendant plusieurs années. Le césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) a une période radioactive longue (30 ans) : il sera sans doute justifié d'en assurer un suivi attentif de longue durée, dans les zones du littoral japonais où il est susceptible d'être présent dans les sédiments. Il pourrait en être de même du plutonium si celui-ci se trouvait dans les rejets en mer, ce qui n'est pas établi à ce jour.*

*En fonction de la persistance de ces radionucléides et de leurs concentrations plus ou moins importantes, certaines espèces végétales ou animales pourraient être contaminées à des niveaux significatifs, justifiant la mise en place d'un programme de surveillance radiologique des produits de la mer venant des zones du littoral japonais les plus impactées.*

---

### 1. ORIGINES DE LA CONTAMINATION DU MILIEU MARIN

Depuis plusieurs jours, une pollution radioactive est observée dans le milieu marin, à plus ou moins grande distance de la centrale de Fukushima-Daiichi. Les principaux radionucléides régulièrement mesurés dans l'eau de mer sont (T = période radioactive) : l'iode 131 (T = 8 jours), césium 137 (T = 30 ans), césium 134 (T = 2,1 ans), césium 136 (T = 13,1 jours), tellure 132/iode 132 (T = 78 heures). D'autres ont également été décelés occasionnellement, à des concentrations plus faibles : tellure 129m/tellure 129 (T = 33,6 jours), baryum 140/lanthane 140 (T = 12,7 jours), ruthénium 105 (T = 4,4 heures), ruthénium 106 (T = 368 jours), molybdène 99/technétium 99m (T = 65,9 heures), cobalt 58 (T = 70,9 j).

---

<sup>1</sup> La période radioactive est la durée au bout de laquelle la radioactivité d'un radionucléide diminue de moitié.

Cette pollution radioactive a trois origines possibles : les rejets radioactifs liquides venant du site accidenté, les retombées atmosphériques sur la surface de la mer et le transport de pollution radioactive par lessivage des terrains contaminés.

### ***1.1. Rejets liquides directs en mer à proximité des réacteurs accidentés***

Les concentrations élevées mesurées dans l'eau de mer à proximité immédiate de la centrale de Fukushima-Daiichi indiquent qu'il existe une ou plusieurs sources de rejets radioactifs liquides venant de la centrale nucléaire. Il s'agit probablement des eaux utilisées pour refroidir les réacteurs accidentés, dont une partie a pu ruisseler sur des surfaces contaminées par les dépôts radioactifs qui se sont formés lors des rejets atmosphériques. Il est également possible qu'une partie des eaux présentes dans les réacteurs accidentés (notamment le réacteur 2 dont la partie basse a été endommagée) aient pu s'écouler à l'extérieur des enceintes de confinement, avec un écoulement vers la mer. Il n'est actuellement pas possible de quantifier l'importance de ces rejets liquides en mer, ni leur durée. L'impact de ces rejets liquides a été observé à partir du 21 mars à proximité de la centrale (1484 Bq/L en <sup>137</sup>Cs, 5066 Bq/L en <sup>131</sup>I). Les concentrations dans l'eau de mer ont ensuite augmenté entre le 25 et 28 mars (jusqu'à 12 000 Bq/L en <sup>137</sup>Cs, 74 000 Bq/L en <sup>131</sup>I). Une nouvelle augmentation a été mesurée les 29 et 30 mars (jusqu'à 47 000 Bq/L en <sup>137</sup>Cs, 180 000 Bq/L en <sup>131</sup>I). A titre de comparaison, avant l'accident de Fukushima, les niveaux de concentration en césium 137 dans l'eau de mer du littoral japonais étaient de quelques mBq/L (1 à 3 mBq/L) et l'iode 131 n'était pas détecté.

Cette pollution radioactive côtière a progressé vers le sud entre le 25 et le 28 mars, avec une augmentation des concentrations en iode 131 et en césium 137 de l'ordre d'un facteur 10 à Iwasawa (à environ 20 kilomètres au sud de la centrale accidentée) à partir du 28 mars et surtout du 29 mars. Ces concentrations vont sans doute continuer à augmenter à cette station.

Cette dérive de la pollution le long de la côte résulte pour une grande part de la marée qui provoque des courants alternatifs parallèles à la côte. Cette progression se produit sans doute aussi vers le nord de la centrale de Fukushima-Daiichi.

### ***1.2. Retombées atmosphériques à la surface de la mer***

Depuis le 12 mars, des rejets atmosphériques provoqués par les explosions et les dépressurisations des enceintes de confinement des réacteurs de la centrale de Fukushima-Daiichi ont été dispersés au dessus de la mer. Une partie des radionucléides contenus dans le panache a pu retomber à la surface de la mer, entraînant rapidement une pollution diffuse des eaux de surface à des dizaines de kilomètres de l'émissaire. Ces retombées radioactives se poursuivent à l'heure actuelle, mais de manière beaucoup moins importante que dans les premiers jours après l'accident.

Les concentrations mesurées à 30 km vers le large résultent vraisemblablement de ces dépôts. Elles varient de 2 à 27 Bq/L pour le césium 137 et de 3 à 57 Bq/L pour l'iode 131.

Les mesures du 25 mars semblent montrer une diminution de ces concentrations. Elle peut résulter, soit d'un mélange avec les eaux plus profondes (effet de dilution), soit d'un renouvellement des eaux de surface par les courants. La première hypothèse est plus vraisemblable.

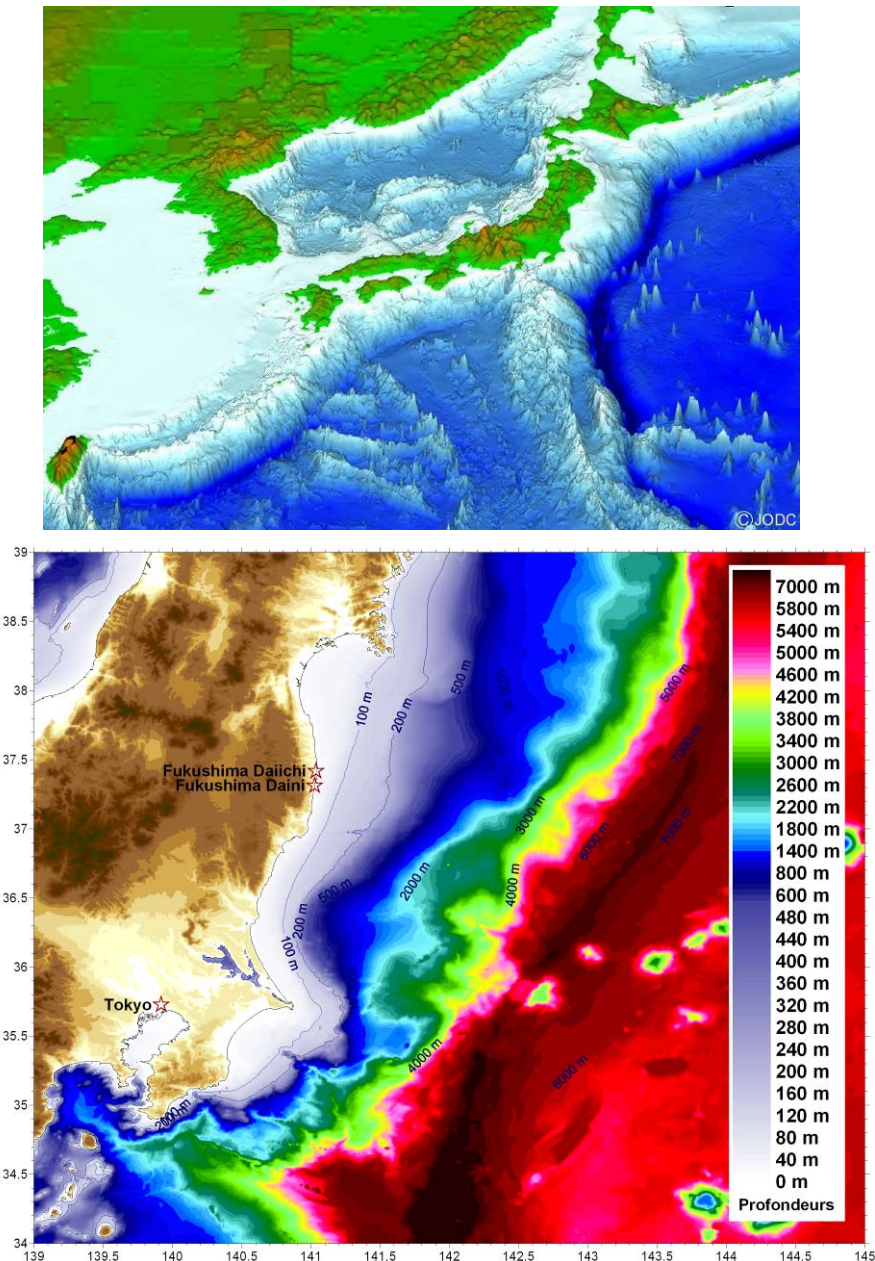
### ***1.3. Transport de pollution radioactive par lessivage des terrains contaminés***

Les dépôts radioactifs formés en milieu terrestre au moment de la dispersion atmosphérique des rejets de la centrale de Fukushima-Daiichi peuvent être partiellement lessivés par les eaux de pluie et ainsi être transportés par ruissèlement directement à la mer ou via les cours d'eau se jetant à la mer. Les surfaces terrestres contaminées ainsi drainées peuvent représenter plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. Les mesures disponibles ne permettent pas de distinguer ces apports diffus de radionucléides des autres sources de pollution radioactive.

## 2. DISPERSION EN MER DES POLLUANTS RADIOACTIFS

### 2.1. Topographie des fonds marins et courants marins au large des côtes japonaises

La centrale de Fukushima est située sur la côte est de l'île de Honshu, à 200 km au nord-est de Tokyo. La côte est orientée nord-sud, face à l'océan Pacifique. Les profondeurs augmentent régulièrement vers le large pour atteindre 200 m à 50 km de la côte ; elles chutent ensuite brutalement à plus de 5000 m au-delà d'une centaine de km (figure 1).



Dans la zone actuellement concernée par la pollution radioactive, les courants sont générés par la marée, le vent et la circulation générale du Pacifique. A court terme, l'effet de la marée est prédominant ; celle-ci déplace les masses d'eau selon un mouvement alternatif le long de la côte



vers le nord et vers le sud, avec des vitesses de l'ordre du mètre par seconde et une périodicité de 12 heures. Le vent influence la circulation des eaux de surface.

La circulation générale à plus grande échelle résulte de l'interaction du courant océanique Kuroshio qui vient du sud en longeant les côtes du Japon et du courant Oyashio, de moindre importance, qui vient du nord (figures 2 et 3). L'intensité et l'étendue du Kuroshio sont comparables à celles du Gulf Stream. Les eaux littorales à proximité de la centrale de Fukushima-Daiichi se trouvent dans la zone d'interaction de ces deux courants, entraînant des courants giratoires faibles et variables. Ce sont ces courants qui vont être déterminants pour la dispersion de la pollution radioactive à moyen terme.

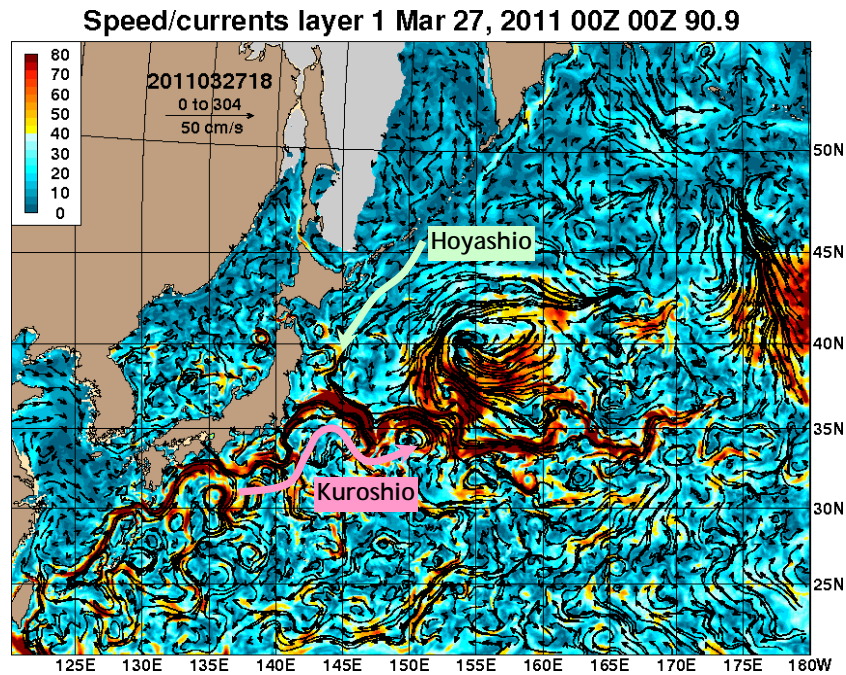


Figure 2 Courants de surface dans le nord-ouest du Pacifique (<http://www.hycom.org/>)

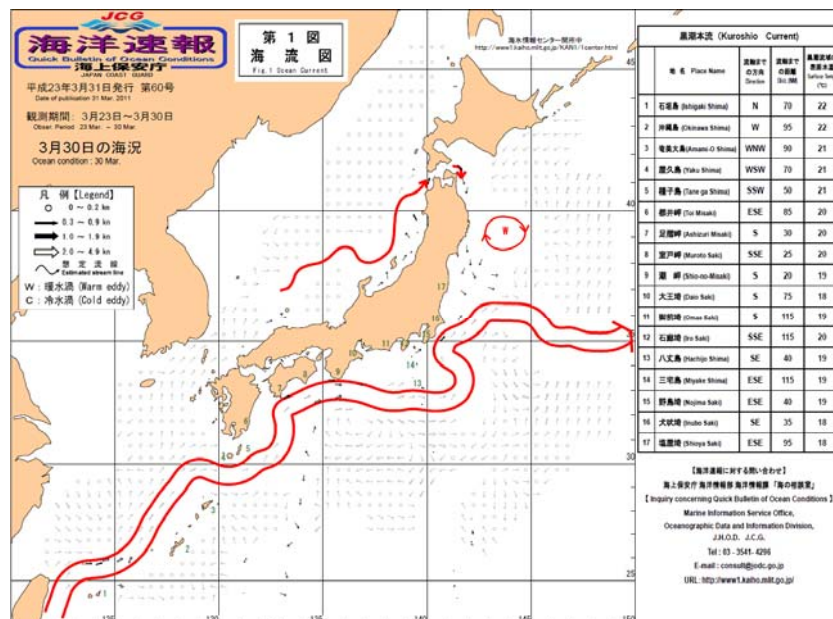


Figure 3 Observations des courants de surface dans le nord-ouest du Pacifique. Le Kuroshio (en rouge) va du sud-ouest vers l'est (<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/2011cal/cu0/qboc2011060cu0.html>)

## 2.2. Dispersion immédiate ou à court terme (quelques jours)

Les concentrations en  $^{131}\text{I}$  et en  $^{137}\text{Cs}$  sont représentatives de celles de l'ensemble des radionucléides mesurés en mer ; les cartes des figures 4 à 13 indiquent les résultats des mesures effectuées dans l'eau de mer pour ces deux radionucléides.

Les profondeurs importantes de la mer au large de la côte et les courants faibles entraînent une stratification des masses d'eaux. Une couche de surface épaisse de 20 à 50 mètres près des côtes va mélanger les radionucléides sur toute son épaisseur. Cette couche peut atteindre 100 mètres d'épaisseur vers le large (source : GIP Mercator). Elle est séparée des couches plus profondes par un gradient de densité qui limite le mélange. La dispersion des radionucléides solubles se fera en priorité dans la couche de surface. Des particules radioactives pourront être exportées vers le fond par sédimentation.

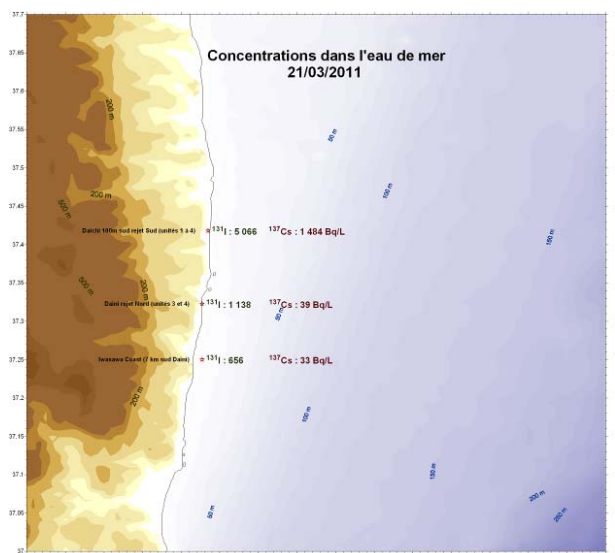


Figure 4 Concentrations mesurées le 21 mars

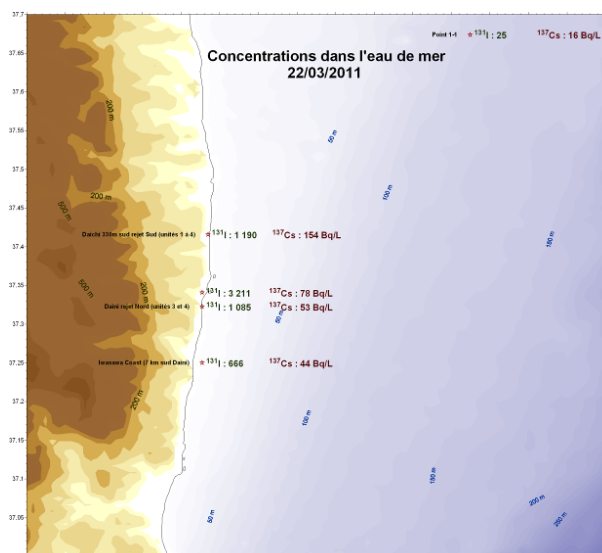


Figure 5 Concentrations mesurées le 22 mars

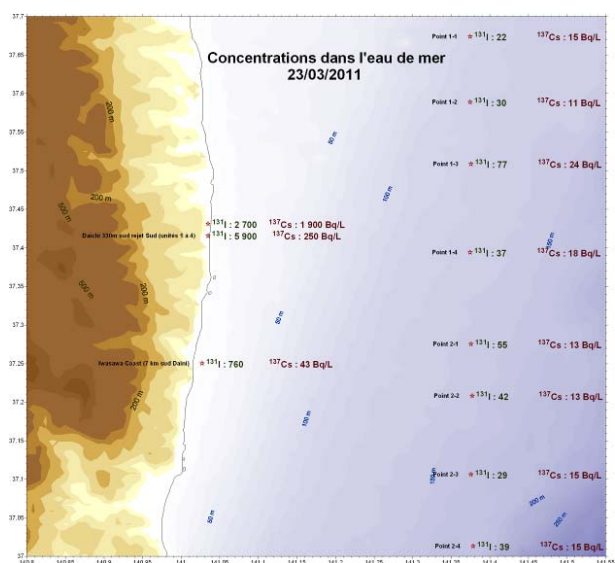


Figure 6 Concentrations mesurées le 23 mars

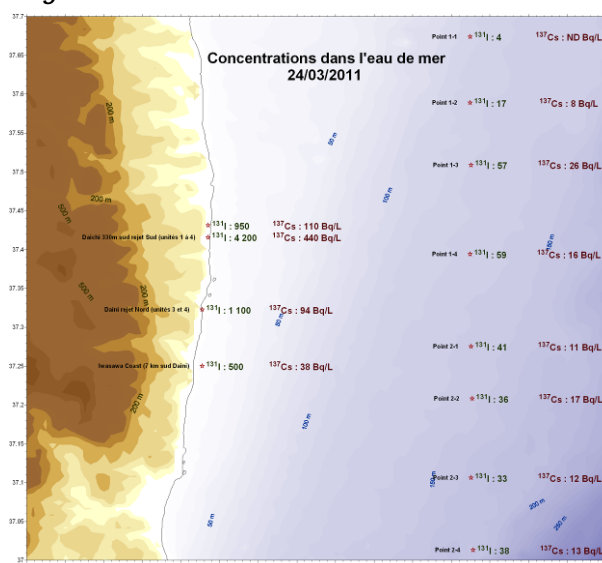


Figure 7 Concentrations mesurées le 24 mars

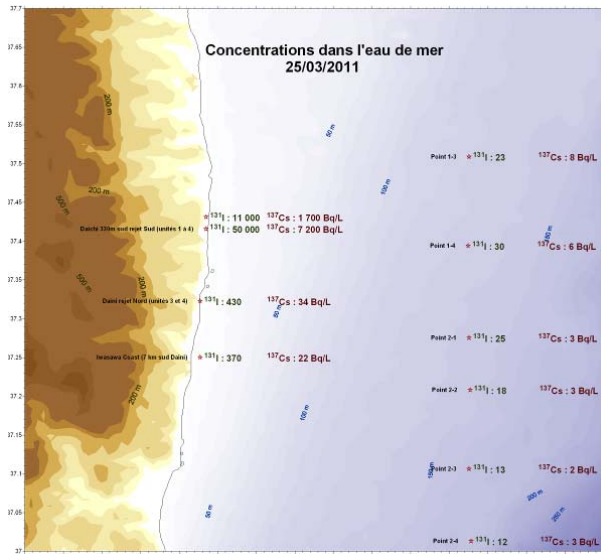


Figure 8 Concentrations mesurées le 25 mars

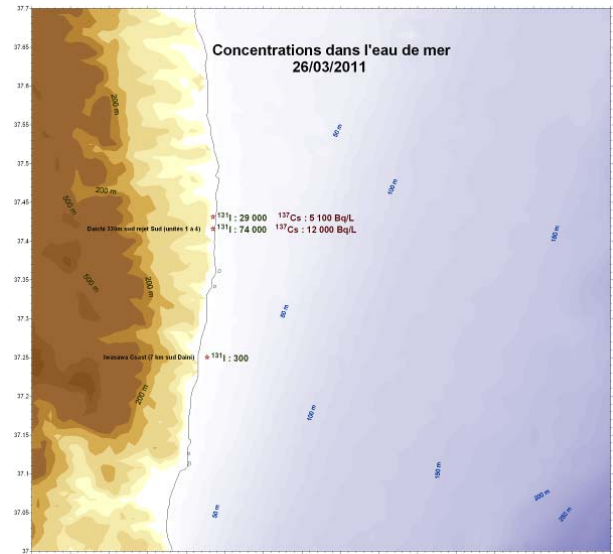


Figure 9 Concentrations mesurées le 26 mars

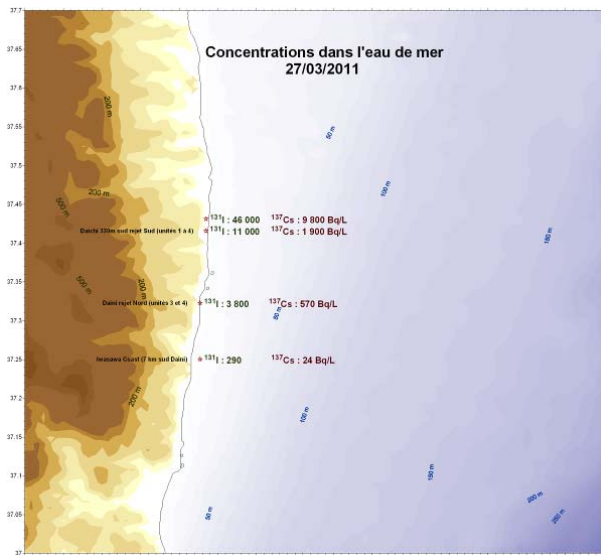


Figure 10 Concentrations mesurées le 27 mars

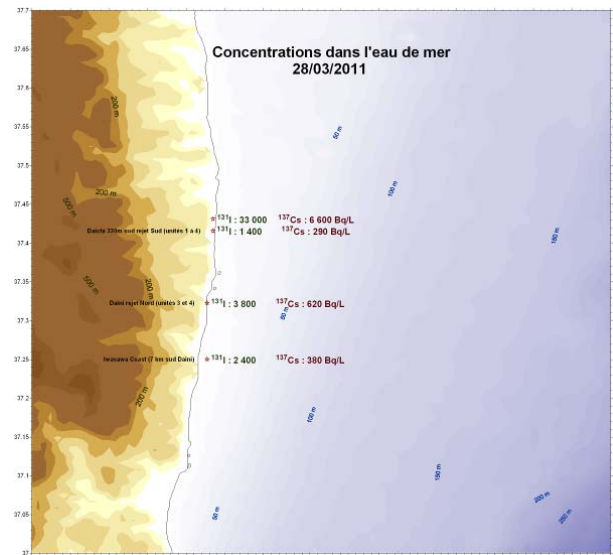


Figure 11 Concentrations mesurées le 28 mars

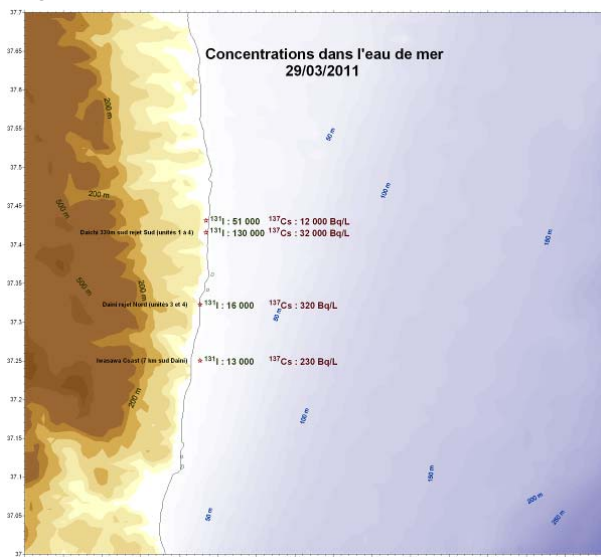


Figure 12 Concentrations mesurées le 29 mars

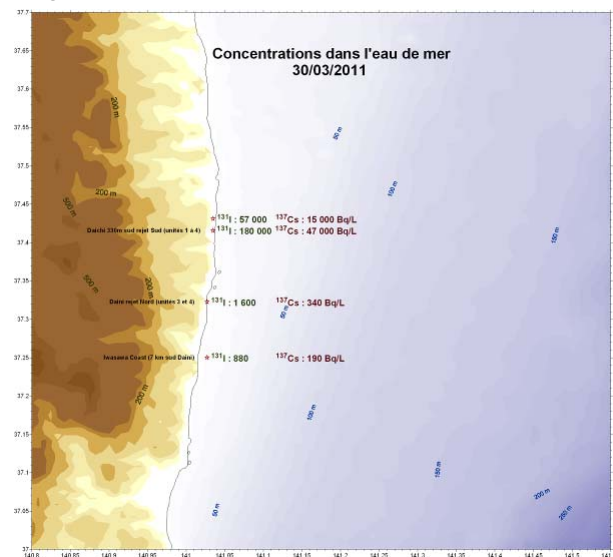


Figure 13 Concentrations mesurées le 30 mars



Des simulations de la dispersion en mer de cette pollution radioactive ont été réalisées pour la période du 14 mars au 5 avril par l'équipe SIROCCO (CNRS et Université de Toulouse - <http://sirocco.omp.obs-mip.fr/outils/Symphonie/Produits/Japan/SymphoniePreviJapan.htm>).

Elles indiquent les zones concernées à court terme par la dispersion des radionucléides. Les concentrations sont données à titre indicatif (figures 14 et 15) car actuellement, il n'existe pas de données exploitables sur la quantité d'effluents rejetés par la centrale de Fukushima-Daiichi ni sur l'importance des retombées radioactives sur la surface de la mer. Ces simulations permettent toutefois d'évaluer l'effet de dilution de la pollution radioactive, au fur et à mesure de sa dispersion.

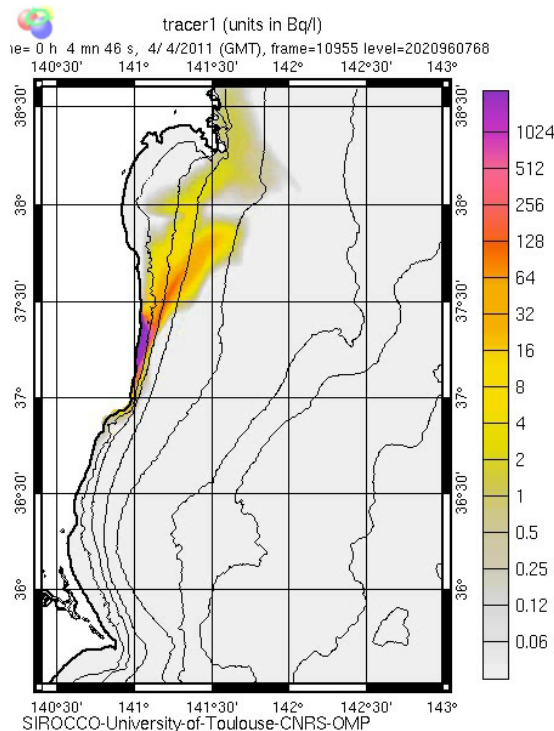


Figure 14 Simulation de la dispersion en mer du rejet liquide à la date du 4 avril

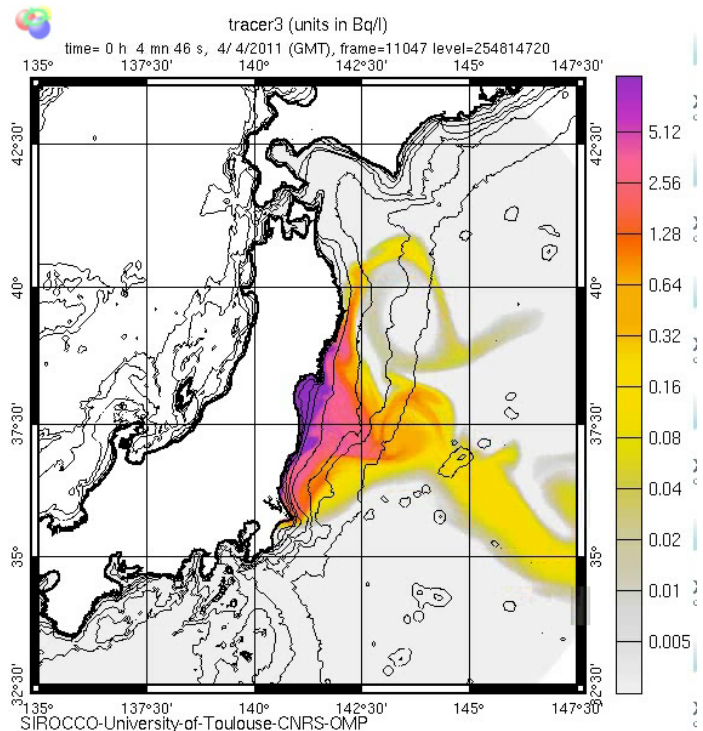


Figure 15 Simulation de la dispersion en mer des retombées atmosphériques à la date du 4 avril

### 2.3. Dispersion à moyen terme (semaines, mois)

Les structures tourbillonnaires présentes à l'Est de Fukushima sont instables. Elles mélangent les eaux de surface entre les latitudes 35°30'N et 38°30'N (figure 15). Il faut s'attendre à ce que tout ou partie des zones côtières situées entre ces latitudes soient impactées par la dispersion de la pollution radioactive. La dérive à long terme des eaux de surface se fera vers le sud sans dépasser la latitude de Tokyo. Le Kuroshio emportera alors le panache vers le centre du Pacifique.

Une simulation de cette dérive de la pollution radioactive a été réalisée par le GIP Mercator (figure 16). Selon cette simulation, les radionucléides dissous dans l'eau de mer à proximité de la centrale de Fukushima-Daiichi (point vert sur la carte de la figure 16) devraient dériver pendant 90 jours selon le tracé en rouge figurant sur cette carte. La simulation montre que les courants côtiers portent les eaux polluées jusqu'au courant Kuroshio (veine blanche épaisse) et se dispersent au nord de ce courant. La diffusion est relativement turbulente mais les radionucléides dissous sont contenus par le courant du Kuroshio.

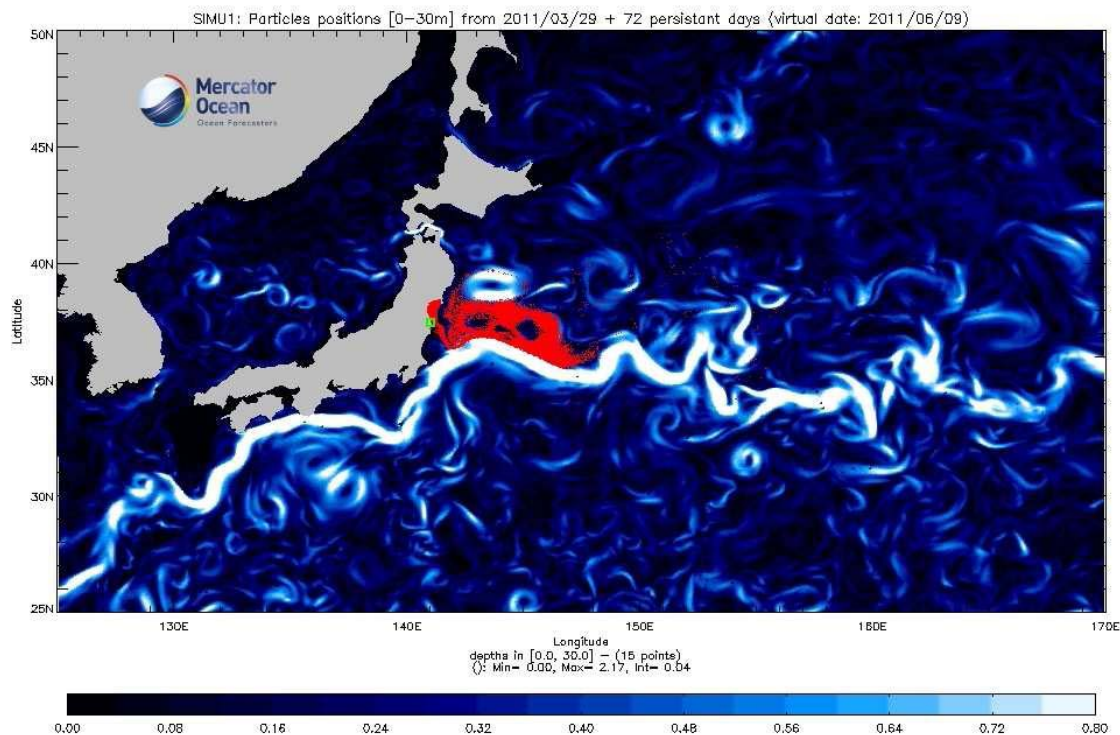


Figure 16 Simulation de la dérive de la pollution radioactive (GIP Mercator)

Lorsque les différentes sources de rejet en mer seront mieux évaluées, les simulations de dispersion marine devraient permettre d'améliorer l'estimation de l'évolution à moyen terme des concentrations en radionucléides.

#### 2.4. Devenir des polluants radioactifs sur le long terme et à grande échelle

- Temps de résidence dans les eaux de surface

Les radionucléides à période radioactives courte (moins de quelques dizaines de jours) ne devraient plus être décelables au bout de quelques mois et ne devraient donc pas avoir d'impact sur le long terme et à grande échelle. D'autres, comme le ruthénium 106 le césium 134 persisteront dans l'environnement marin pendant quelques années et finiront par disparaître par décroissance radioactive. Le temps de résidence du césium 137 dans les eaux de surface de l'Océan Pacifique varie de 11 à 30 ans suivant les régions (10 ans pour les latitudes moyennes et 30 pour la zone équatoriale). En ce qui concerne les isotopes du plutonium, dans l'hypothèse où ceux-ci se trouveraient dans les rejets en mer, ces temps sont de 5 à 17 ans (les temps les plus courts sont également observés aux latitudes moyennes). Ces temps de résidence dépendent de l'affinité respective des radionucléides pour les particules en suspension dans les eaux de surface, qui sont susceptibles de sédimenter et d'entraîner les radionucléides vers le fond océanique.

- Temps de transport.

Le temps de transfert entre le Pacifique nord-ouest et la zone équatoriale est estimé à environ 10-15 ans. Une partie des eaux de l'océan Pacifique Nord passe vers l'océan Indien via les mers indonésiennes et est ensuite transportée vers le sud de l'océan Atlantique. Ces temps de transfert ont été estimés à environ 30-40 ans.



Jusqu'à récemment, les scientifiques considéraient qu'il n'y avait pas d'échange entre le Pacifique nord et le Pacifique sud, à cause de l'importante barrière formée par le système des courants équatoriaux. Des mesures de traces de césium 137 (retombées des essais nucléaires atmosphériques dans l'hémisphère nord) en mer de Tasmanie ont montré que cette barrière n'était pas totalement imperméable et que des échanges pouvaient se produire entre le nord et le sud, dans la partie ouest de l'océan Pacifique.

### **3. IMPACT DE LA POLLUTION RADIOACTIVE SUR LES ESPECES VIVANTES**

A court terme, l'ensemble des maillons des chaînes trophiques marines du domaine côtier proche de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi risque d'être impacté par la pollution radioactive de l'eau de mer. Pour le moment, il est difficile de quantifier l'importance de cet impact, qui peut être très variable en fonction :

- de l'importance et de la poursuite de rejets radioactifs liquides de la centrale nucléaire ;
- des retombées atmosphériques sur la surface de la mer ;
- des apports de radionucléides par le réseau hydrographique drainant les territoires contaminés ;
- du renouvellement des masses d'eaux sur le littoral, etc.

Une attention particulière devra être apportée aux installations aquacoles (algues, mollusques et poissons) situées sur le littoral proche de la centrale nucléaire, même si il est probable que ces installations ont été sévèrement affectées par le tsunami du 11 mars.

L'iode a une forte affinité pour les algues brunes qui font l'objet d'une exploitation importante au Japon. Il existe donc un risque de contamination de ce type d'algues par des iodures radioactifs, notamment l'iode 131. Toutefois, compte tenu de la courte période radioactive de ce radionucléide, ce risque ne sera significatif que pendant quelques mois.

À plus long terme, c'est la zone côtière soumise aux apports de radionucléides par lessivage des bassins versants contaminés qui pourraient être impactée par une pollution radioactive persistante. Des phénomènes de remise en suspension de sédiments contaminés pourraient également contribuer à maintenir des niveaux de concentration significatifs de certains radionucléides dans l'eau et dans certaines espèces vivantes.

Des phénomènes d'accumulation dans les espèces vivantes pourraient conduire à des concentrations supérieures à celles mesurées dans l'eau, d'un facteur 10 à quelques milliers suivant le radionucléide et l'espèce considérés (rapport entre les concentrations massiques dans l'espèce et dans l'eau de mer). La capacité d'accumulation dépend du métabolisme de chaque espèce, A titre d'exemples, pour le césium, les facteurs de concentration varient de 50 pour les mollusques et les algues à 400 pour les poissons. Pour l'iode, les facteurs de concentration varient de 15 pour les poissons à 10 000 pour les algues.

Ces phénomènes d'accumulation sont de nature à justifier la mise en place de programmes de surveillance radiologique, sur des zones géographiques dont l'étendue devrait être précisée par des études cartographiques à caractère prédictif, des espèces végétales et animales entrant directement ou indirectement dans la chaîne alimentaire humaine.