

PROJET CIGEO - EXAMEN DES ETUDES REMISES DEPUIS 2009

RAPPORT IRSN N° 2013-00001

TOME 3 - ANALYSE DE LA SISMIQUE 3D

Réunion du Groupe permanent d'experts pour les « Déchets »
du 5 février 2013

RESUME DU RAPPORT

Le Tome 3 du présent rapport constitue l'avis de l'IRSN relatif aux résultats de la sismique 3D associés au Projet Cigéo, présenté lors la réunion du groupe permanent du 5 février 2013. L'examen par l'IRSN du programme industriel de gestion des déchets (PIGD) est présenté dans le Tome 1 et celui du modèle opérationnel de relâchement des combustibles usés dans le Tome 2.

S'agissant des résultats de la campagne de sismique 3D de 2010 sur la ZIRA, l'IRSN considère que l'acquisition des données sismiques est de bonne qualité et devrait permettre d'améliorer la connaissance de la géométrie et de la variabilité lithologique des couches géologiques, ainsi que d'identifier les éventuelles structures détectables par cette méthode. Les résultats confirment globalement, aux incertitudes près, une épaisseur du Callovo-Oxfordien supérieure à 140 m et une profondeur de son niveau médian inférieure à 600 m sur la quasi-totalité de la ZIRA. La sismique n'a pas révélé de structures de dimensions telles qu'elles seraient rédhibitoires pour l'implantation d'un stockage. Seuls des indices sismiques orientés N120° en-dessous des récifs identifiés dans le Bajocien ainsi que orientés N-S au-dessus des failles identifiées dans le Trias ont été observés. Aussi, le traitement des données sismiques mérite d'être poursuivi en vue de statuer sur l'interprétation de ces indices.

Dans le cas où ces indices sismiques ne correspondraient pas à des artefacts de traitement mais à des structures tectoniques réelles, il apparaît très peu probable, au stade actuel des connaissances sur le potentiel d'amortissement des formations argileuses du Lias et du Callovo-Oxfordien, que la propagation de telles structures soit de nature à induire des perturbations significatives de la formation hôte. Le cas échéant, les perturbations du Callovo-Oxfordien qui auraient pu résulter de réactivation passées de ces structures pourront en tout état de cause être reconnue à l'avancement du creusement du stockage afin d'adapter si nécessaire l'implantation des ouvrages de stockage.

Néanmoins, compte tenu de la complexité inhérente à la technique, des incertitudes subsisteront sur l'interprétation qui peut être faite des données sismiques acquises. A ce titre, l'IRSN considère que l'Andra devrait, par précaution, retenir dans son évaluation de sûreté de l'installation de stockage, un scénario comprenant une ou plusieurs structures tectoniques traversant le Callovo-Oxfordien, notamment à l'aplomb des failles identifiées dans le Trias, afin d'évaluer la robustesse du stockage vis-à-vis d'une telle hypothèse. En outre, il conviendra que l'aléa sismique qui sera retenu dans cette évaluation de sûreté tienne compte des incertitudes résiduelles relatives aux caractéristiques structurales de la zone investiguée.

Enfin, le modèle géologique du site de Meuse/Haute-Marne, qui intègre correctement certains des enseignements tirés de la sismique 3D de 2010, devra être actualisé notamment pour ce qui concerne la géométrie du Callovo-Oxfordien, la répartition spatiale des paramètres de porosité et d'argilosité, ainsi que les caractéristiques structurales qui résulteront des compléments de traitement et d'interprétation des anomalies sismiques identifiées.

En conclusion, l'IRSN retient de son examen que les connaissances acquises par la campagne de sismique 3D de 2010 ne remettent pas en cause le caractère favorable de la ZIRA au regard des critères retenus par l'Andra pour l'implantation d'un stockage géologique dans cette zone, en termes d'épaisseur et de profondeur du Callovo-Oxfordien ainsi que de caractéristiques structurales.

TABLE DES MATIERES

I	INTRODUCTION	4
I.1	OBJET DU PRESENT RAPPORT	4
I.2	CONTEXTE DE LA DEMANDE	4
I.3	PRESENTATION DU DOSSIER DE L'ANDRA	5
II	ANALYSE DE LA SISMIQUE 3D	6
II.1	METHODE DE SISMIQUE REFLEXION 3D	7
II.1.1	La campagne d'acquisition de la sismique 3D	7
II.1.2	Le traitement des données sismiques	9
II.1.2.1	migration et sommation	9
II.1.2.2	Corrections statiques	10
II.1.2.3	Pointé des horizons sismiques	12
II.1.2.4	Conversion temps-profondeur	14
II.1.2.5	Lien avec le traitement des données sismiques 3D acquises en 1999	17
II.1.3	Pouvoir de résolution et limite de détection de la sismique 3D	17
II.1.4	Conclusions sur l'acquisition et le traitement de la sismique 3D de 2010	18
II.2	INTERPRETATION DE LA SISMIQUE 3D EN TERMES DE CARACTERISTIQUES DU CALLOVO- OXFORDIEN ET DE SES ENCAISSANTS	18
II.2.1	Structures identifiées dans les encaissants	18
II.2.1.1	Encaissant calcaire supérieur de l'Oxfordien	19
II.2.1.2	Encaissant calcaire inférieur du Dogger et anomalies sous-jacentes	20
II.2.1.2.1	Anomalies N120° dans le Bajocien	21
II.2.1.2.2	Anomalies N120° sous le Bajocien	23
II.2.1.3	Lias-Trias	24
II.2.2	Géométrie du Callovo-Oxfordien	25
II.2.2.1	Épaisseur et profondeur du Callovo-Oxfordien	25
II.2.2.2	Topographie des horizons du Callovo-Oxfordien	26
II.2.3	Conclusions sur les structures identifiées	29
II.3	INVERSION STRATIGRAPHIQUE DE LA SISMIQUE 3D	31
II.3.1	Objectifs, conversion en impédances et incertitudes associées	31
II.3.2	Estimation de la porosité des encaissants et de l'argilosité du Callovo-Oxfordien	32
II.3.2.1	Porosités	32
II.3.2.2	Argilosité	34
II.3.3	Conclusions : perspectives d'utilisation des résultats de l'inversion stratigraphique	35
II.4	PRISE EN COMPTE DES RESULTATS DE LA SISMIQUE 3D DANS LE MODELE CONCEPTUEL DE SITE	35
III	CONCLUSION	38
	REFERENCES	39

I INTRODUCTION

I.1 OBJET DU PRESENT RAPPORT

Par lettre ASN/CODEP-DRC-2012-045908 du 29 août 2012 (cf. Annexe A1), l'ASN a demandé au président du groupe permanent d'experts pour les déchets (GPD ou « groupe permanent » dans le présent rapport) d'examiner les études remises depuis 2009 par l'Andra concernant le projet de centre industriel de stockage géologique (Cigéo). La lettre CODEP-DRC-2012-045908 précitée précise que cet examen devra notamment permettre de se prononcer sur :

- « la pertinence des données de base (volume et typologie des colis, chroniques de stockage) retenues par l'Andra pour constituer l'inventaire des déchets fourni dans le dossier de PIGD en considérant également les réserves éventuellement retenues dans cet inventaire pour les déchets dont la filière définitive de stockage n'est pas encore arrêtée ;
- les résultats des études sur le comportement des combustibles en formation géologique profonde et leur incidence éventuelle sur la faisabilité de leur stockage au regard des options de conception présentées dans le « Dossier 2005 Argile », examiné par le groupe permanent lors des séances des 12 et 13 décembre 2005 ;
- les résultats de sismique 3D au regard de la confirmation des caractéristiques favorables pour un stockage géologique de la zone reconnue, compte tenu des techniques employées, ainsi que leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site ».

Le Tome 3 du présent rapport constitue l'avis de l'IRSN relatif aux résultats de la sismique 3D associés au Projet Cigéo, présenté lors la réunion du groupe permanent du 5 février 2013. L'examen par l'IRSN du programme industriel de gestion des déchets (PIGD) est présenté dans le Tome 1 et celui du modèle opérationnel de relâchement des combustibles usés dans le Tome 2.

Les conclusions qui font l'objet de propositions de recommandations résultant de l'instruction sont repérées dans le texte en **caractères gras encadrés**.

I.2 CONTEXTE DE LA DEMANDE

La loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs prévoit que l'Andra dépose une demande d'autorisation de création (DAC) d'un centre de stockage de déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) en formation géologique profonde, en vue de son instruction en 2015. Elle prévoit également que le dépôt de la DAC soit précédé d'un débat public « sur la base d'un dossier réalisé par l'Andra ». Elle définit enfin les objectifs du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR).

L'ASN indique, dans la lettre ASN/CODEP-DRC-2012-045908 précitée, qu'elle « souhaite prendre position, en préalable au début du débat public prévu par la loi », sur les résultats de la sismique 3D réalisée en 2010 et leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site. Il est à noter que de précédentes instructions ont déjà traité de sujets équivalents mais à un stade différent d'avancement. En effet, les résultats d'une précédente campagne de sismique 2D ont été examinés dans le cadre de l'avis IRSN 2009-166 sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) [2].

I.3 PRESENTATION DU DOSSIER DE L'ANDRA

L'Andra a transmis à l'ASN les résultats de la sismique 3D réalisée en 2010 et leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site ont été transmis par l'Andra en trois parties : i) le modèle conceptuel du milieu géologique de Meuse/Haute-Marne [3], ii) l'interprétation des structures observées sur les blocs sismiques 3D [4] et iii) la synthèse de l'interprétation de l'étude sismique 3D [5].

II ANALYSE DE LA SISMIQUE 3D

Par lettre CODEP-DRC-2012-045908 du 29 août 2012 (cf. Annexe A1), l'ASN a demandé au président du GPD d'examiner les résultats de la sismique 3D réalisée en 2010 et leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site, transmis par l'Andra en mars 2012. La lettre précitée précise que les résultats de la sismique 3D seront examinés au regard de la confirmation des caractéristiques favorables pour un stockage géologique de la zone reconnue, compte tenu des techniques employées.

Les résultats du programme de reconnaissance mené par l'Andra jusqu'en 2008 sur la zone de transposition (ZT), comprenant notamment des forages géologiques, une acquisition sismique 2D et une cartographie, ont été utilisés par l'Andra en 2009 pour la sélection d'une Zone d'Intérêt pour la Reconnaissance Approfondie (ZIRA). Le programme de reconnaissance complémentaire de l'Andra mené en 2010 sur la ZIRA comprend notamment une campagne d'acquisition géophysique de sismique réflexion 3D.

Dans ce qui suit, une première partie examine les incertitudes liées à la technique d'acquisition de la sismique 3D et au traitement des données acquises. La détermination par l'Andra, à partir des résultats de la sismique 3D, des caractéristiques géométriques et lithologiques des horizons du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants est évaluée dans une seconde partie. Les apports de l'inversion stratigraphique de la sismique 3D en termes d'évaluation de l'argilosité et de la porosité font l'objet d'une troisième partie. La dernière partie porte sur l'intégration de ces nouvelles connaissances dans le modèle conceptuel de site.

En préalable, l'IRSN note que les objectifs retenus par l'Andra pour la campagne de sismique 3D sur la ZIRA sont [5] :

- d'améliorer la connaissance de la géométrie de la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien et des couches encaissantes, notamment les variations de pendage, la profondeur et l'épaisseur des différentes unités lithologiques avec une précision inférieure à la dizaine de mètres,
- de localiser et décrire les éventuelles failles détectables au sein de la ZIRA,
- de quantifier, au sein de chacune de ces unités, la variabilité lithologique horizontale (par inversion stratigraphique).

Ces objectifs n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

Dans le présent rapport, les termes spécifiques à la sismique ou à la géologie sont explicités lors de leur première utilisation dans le texte, et rappelés en Annexe T1.

II.1 METHODE DE SISMIQUE REFLEXION 3D

Dans la présente partie, les paramètres d'acquisition de la sismique réflexion 3D de 2010 sont présentés et commentés, puis les traitements appliqués par l'Andra sont analysés, en particulier les corrections statiques, les modèles de vitesses et la conversion en profondeur. Enfin, les incertitudes associées à l'interprétation de la sismique réflexion 3D et au pointé des horizons sont examinées.

II.1.1 LA CAMPAGNE D'ACQUISITION DE LA SISMIQUE 3D

La « sismique » est une technique non destructive qui consiste à enregistrer en surface les ondes sismiques réfléchies sur les interfaces des couches géologiques. Ce signal sismique est initialement émis en un point de la surface par un dispositif adéquat (camion vibreur, explosif...). Selon le mode de propagation de l'onde étudiée - réfléchi sur l'interface ou réfracté le long de cette interface - on parle de sismique réflexion ou de sismique réfraction (cf. Figure II-1).

La mise en œuvre d'une campagne sismique permet ainsi de déterminer la géométrie des interfaces du sous-sol ; cette « image » du sous-sol est initialement représentée verticalement en « temps double », qui correspond au temps d'aller et retour des ondes sismiques. Il est possible de convertir ces données sismiques de temps double en profondeur au moyen des forages présents sur la zone investiguée et disposant de données sismiques et de profondeurs. Il est également possible d'évaluer les propriétés des couches traversées par les ondes à l'aide de traitements complémentaires.

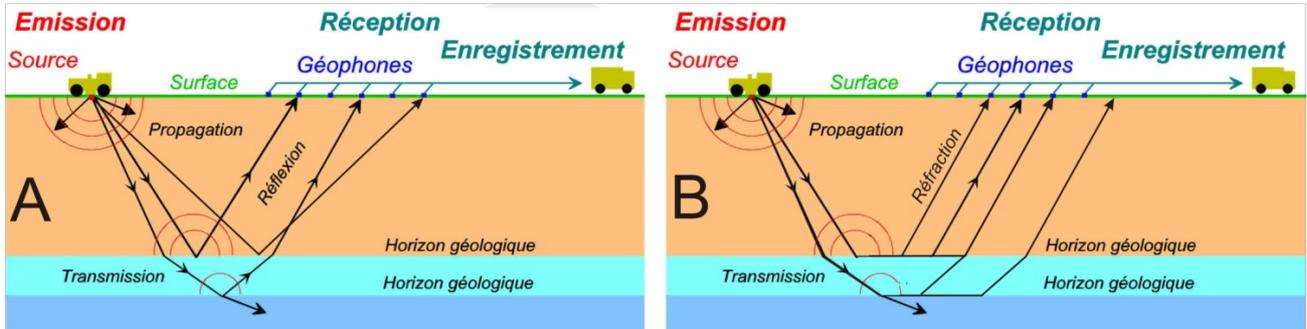


Figure II-1 : A- Principe de la méthode de sismique réflexion. Les émetteurs (source) et les récepteurs (géophones) peuvent être organisés selon un profil rectiligne pour obtenir une coupe verticale du sous-sol (sismique 2D) ou bien selon plusieurs lignes pour obtenir une image géologique en 3 dimensions (sismique 3D). B- Principe de la méthode de sismique réfraction.

L'Andra a mené en juillet 2010 une campagne d'acquisition de sismique réflexion 3D (Tableau II-1) sur une surface de 37 km² environ, soit légèrement plus large que la ZIRA (voir Figure II-2). Dans le dispositif expérimental utilisé par l'Andra pour la sismique réflexion 3D en 2010, la source correspond à une force verticale et les capteurs sont des géophones qui enregistrent la composante verticale du mouvement du sol pour des fréquences supérieures à 10 Hz, comme lors de la campagne menée en 1999. Les traitements réalisés visent à étudier les ondes de pression-décompression (ondes P) réfléchies par les interfaces du sous-sol.

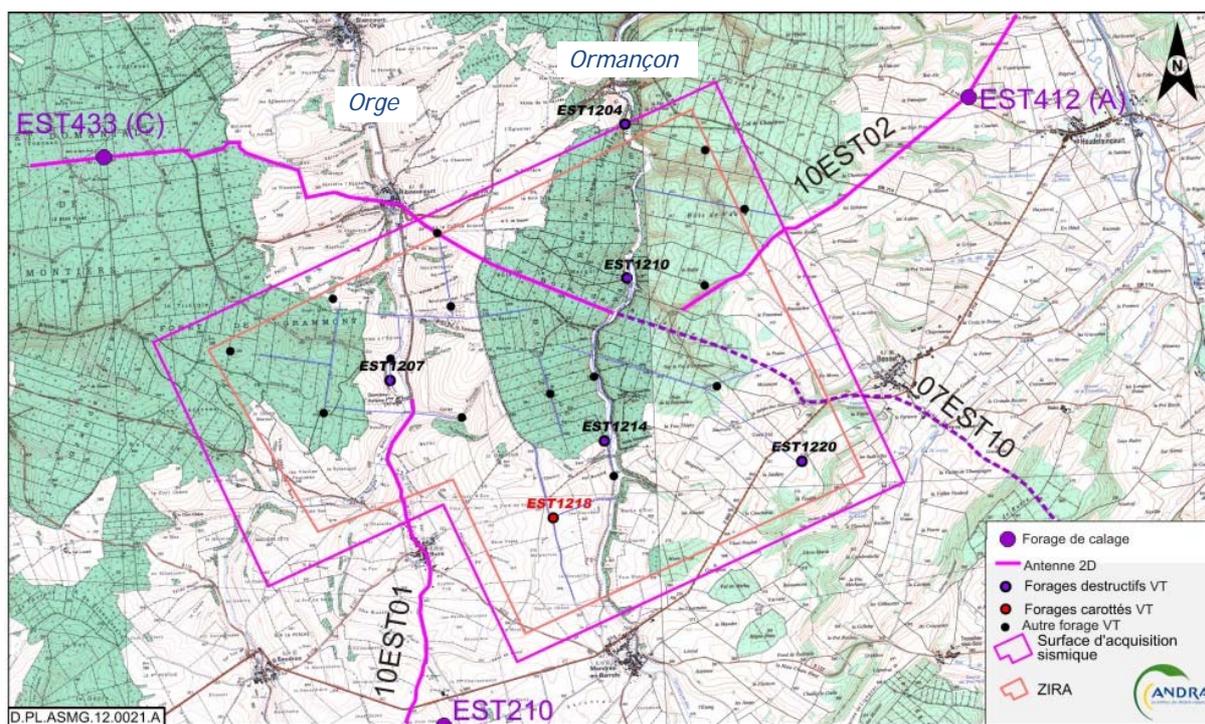


Figure II-2 : Carte des lignes de sismique-réfraction et des forages VT dans la ZIRA réalisée en vue d'établir un modèle de corrections statiques ; les 6 forages VT ayant servi à l'interpolation linéaire pour déterminer la profondeur du « toit des Calcaires Blancs » sont nommés. Les forages de calage (EST210, EST412 et EST433) et les antennes 2D reliant ces forages à la sismique 3D (07EST10, 10EST01 et 10EST02) pour la conversion surface-profondeur (section II.1.2.3) sont également localisés.

Les lignes de sources (ou « tirs ») sont espacées de 120 m et orientées N075° (ENE). La source est un camion vibreur, qui émet un signal contrôlé et répétable sous forme d'un balayage de fréquences variant de 12 à 140 Hz appelé « sweep » d'une durée de 10 s. La distance entre points de tir est de 10 m. Chaque point de tir est composé de deux points de vibration à partir desquels deux sweeps sont émis (émission de quatre sweeps par point de tir). Par la suite, les coupes sismiques orientées parallèlement aux lignes de sources sont intitulées « inlines ».

Les géophones, globalement perpendiculaires aux lignes de sources, sont positionnés sur 12 lignes espacées de 80 m et orientées N165° (NNW). Les géophones sont rassemblés par 12, ce qui compose une « trace ». Les traces sont espacées de 10 m ; chaque ligne est composée de 120 traces. Un tir est donc enregistré par 1440 traces (12 lignes de 120 traces). Les coupes sismiques orientées parallèlement aux lignes de géophones sont intitulées « crosslines ».

Le Tableau II-1 présente les principaux paramètres d'acquisition de cette campagne ainsi que de celle de 1999 et rappelle, à titre de comparaison, certains paramètres de l'acquisition réalisée en 2001 par l'IRSN sur le plateau de Tournemire (Aveyron) à l'aplomb de la Station Expérimentale de l'IRSN, détaillée en annexe T3 du rapport de l'IRSN relatif à l'évaluation du Dossier 2005 « Argile » [1].

Paramètres d'acquisition	1999-Laboratoire souterrain	2010-ZIRA	Tournemire
Bin (espacement entre traces x espacement entre points de tir)	12,5 m x 12,5 m	10 m x 10 m	5 m x 5 m
Box (espacement entre lignes de géophones x espacement entre lignes de sources)	100 m x 100 m	80 m x 120 m	50 m x 50 m
Couverture (« éclairage »)	37	60	192
Densité géophones/km ²	400	417	2000
Densité tirs/km ²	400	625	2000
Surface	4,1 km ²	37,2 km ²	0,6 km ²
Nombre de lignes/séquence d'acquisition	8	12	1 acquisition + ligne de 6 géophones dans les galeries
Nombre de traces/ligne	74	120	95
Source	Vibrateur Mertz 22-601A	Vibrateur Mertz 12-602A	Vibrateur Mertz M22
Sweep	14-140 Hz -log up 20 dB	11-240 Hz Log up 6 dB/oct	14-140 Hz
Nombre d'émissions par point de tir (nb sweeps x nb géophones)	6	4	3
Durée du sweep	14 s	10 s	12 s
Géophones	SM4U 10 Hz	JF-20DX 10 Hz	
Nombre de géophones par trace	24	12	6
Nombre total de géophones	1730	15271	5568

Tableau II-1 : principaux paramètres d'acquisition des campagnes de sismique 3D réalisées par l'Andra en 1999 sur l'emprise du Laboratoire souterrain et en 2010 sur la ZIRA ainsi que de celle réalisée par l'IRSN en 2001 sur le plateau de Tournemire.

Sur la base des connaissances relatives à la sismique pétrolière et compte tenu de son expérience (notamment, campagne de sismique 3D de 2001 sur le site de Tournemire), l'IRSN estime que les paramètres de l'acquisition sismique (géométrie de l'acquisition - bin et box -, type de géophone, sweep...) réalisée par l'Andra en 2010 sur la ZIRA sont globalement bien adaptés aux objectifs de l'Andra précités.

II. 1. 2 LE TRAITEMENT DES DONNEES SISMQUES

Une séquence classique de traitement sismique a été appliquée aux enregistrements réalisés au cours de la campagne de sismique 3D de 2010. Les principales étapes dans un traitement sismique sont explicitées en Annexe T2. Il s'agit essentiellement de la migration, de la sommation des traces (« stack ») incluant notamment les corrections dynamiques, des corrections statiques, du pointé des horizons sismiques et de la conversion en profondeur, examinées ci-après.

II. 1. 2. 1 MIGRATION ET SOMMATION

La migration et la sommation (incluant les corrections dynamiques), détaillées dans l'Annexe T2, correspondent à deux étapes de traitement des enregistrements sismiques visant à corriger des artefacts et améliorer la qualité du signal. L'optimisation de ces corrections passe par la recherche de la vitesse des ondes sismiques dans chaque couche et de leur variabilité latérale (modèle de vitesses).

L'IRSN constate que le dossier examiné ne présente pas les hypothèses retenues et les calculs effectués par l'Andra pour établir les vitesses qui sont utilisées pour la migration et la sommation. Toutefois, l'Andra a précisé

au cours de l'instruction que « *le modèle de vitesses retenu pour la sommation des traces est celui qui autorise le mieux [la neutralisation de] l'effet du déport* » et qu'« *il s'agit d'une méthode couramment utilisée en géophysique pétrolière* ».

S'agissant des corrections dynamiques, l'IRSN estime que leur réalisation est une étape de traitement toujours complexe (en particulier, les réflexions présentant le plus de distorsion en début de trace et proche de la surface doivent être soumises à un traitement particulier ; voir Annexe T2) et perfectible car pouvant un peu dégrader la résolution verticale (cf. section II.1.3).

A cet égard, l'Andra a précisé au cours de la présente instruction qu'une grille de 480 m x 480 m a été utilisée pour déterminer des vitesses initiales pour les corrections dynamiques. Ces vitesses ont par la suite été précisées sur une grille de 240 m x 240 m pour le calcul des vitesses de migration ainsi que celui des vitesses de sommation finalement retenues.

Pour ce qui concerne cette dernière grille d'analyse des vitesses, l'IRSN constate que le bin sismique est de 10 m x 10 m (Tableau II-1) et donc que seul 1 point sur 576 (240 m x 240 m au lieu de 10 m x 10 m) est utilisé pour élaborer les modèles de vitesses pour la migration et la sommation. L'IRSN considère que cela pourrait se traduire par une perte d'information ; ceci est évalué dans la section II.1.3 relative aux incertitudes associées à l'interprétation des données sismiques.

II.1.2.2 CORRECTIONS STATIQUES

Les corrections statiques (cf. Annexe T1 et Annexe T2) corrigent l'effet des fortes variations verticales et latérales de vitesses des ondes dans les terrains de surface. Sur le site de Meuse/Haute-Marne, la topographie de la ZIRA varie d'une centaine de mètres. En raison de la présence des deux vallées encaissées de l'Orge et de l'Ormançon, entourées de plateaux, l'épaisseur des formations superficielles altérées, où les vitesses sismiques sont « dégradées » (plus faibles), peut varier entre quelques mètres et une dizaine de mètres d'épaisseur. Ces deux facteurs conduisent l'Andra à souligner « *l'importance et la minutie à accorder à l'application des corrections statiques au cours du traitement sismique* ».

Afin d'élaborer le modèle de corrections statiques, 19 forages dits « forages VT » (mesure de paramètres géophysiques) ont été réalisés dans la ZIRA en 2010 (voir Figure II-2). 152 profils de sismique réfraction (espacement entre traces 5 m, la source étant constituée par une chute de poids accélérée), de 204 m chacun, relient les forages VT sur la ZIRA (Figure II-2). Certains de ces profils sont adjacents avec un recouvrement de 5 m, formant ainsi 16 profils « longs » constitués de 4 à 25 profils de 204 m (10EST1 à 10EST16), sur la ZIRA. L'Andra indique que des comparaisons réalisées au niveau de forages VT situés à proximité des lignes de sismique réfraction montrent des écarts parfois importants, pour les valeurs des épaisseurs ou des vitesses, entre données sismiques et valeurs extraites des forages VT, et que « *les épaisseurs des terrains peu consolidés [déduites de la sismique réflexion] sont, en général, plus importantes que les estimations réalisées à partir des carottages sismiques [(forages VT)]* ». En raison de ces incohérences, les résultats de la sismique réfraction ne sont que très partiellement intégrés, à ce stade, dans le modèle de corrections statiques finalement retenu. L'Andra ajoute qu'une « *ré-exploitation des profils [de sismique réfraction] acquis est en cours de programmation. Cette ré-exploitation, qui sera menée en cohérence avec les données des forages VT et le modèle déjà élaboré [...] permettra d'affiner notre connaissance de la variabilité des terrains superficiels et des calcaires altérés sur la ZIRA* ».

L'IRSN estime que l'Andra a effectué un travail important de reconnaissance de la zone superficielle altérée sur la ZIRA et convient que la construction d'un modèle de corrections statiques est une étape plus particulièrement importante dans le traitement de la sismique 3D de 2010. L'utilisation de profils de sismique réfraction en complément de forages VT est intéressante car elle combine des données permettant d'évaluer les variations latérales des vitesses avec des données quantitatives fiables mais ponctuelles des vitesses. **L'IRSN estime donc, comme l'Andra, que la prise en compte des résultats de la campagne de sismique réfraction dans l'élaboration du modèle de corrections statiques permettra d'en améliorer la fiabilité.**

La pertinence des corrections statiques appliquées à ce stade est examinée à la section II.2.1.2 relative à la topographie du Callovo-Oxfordien.

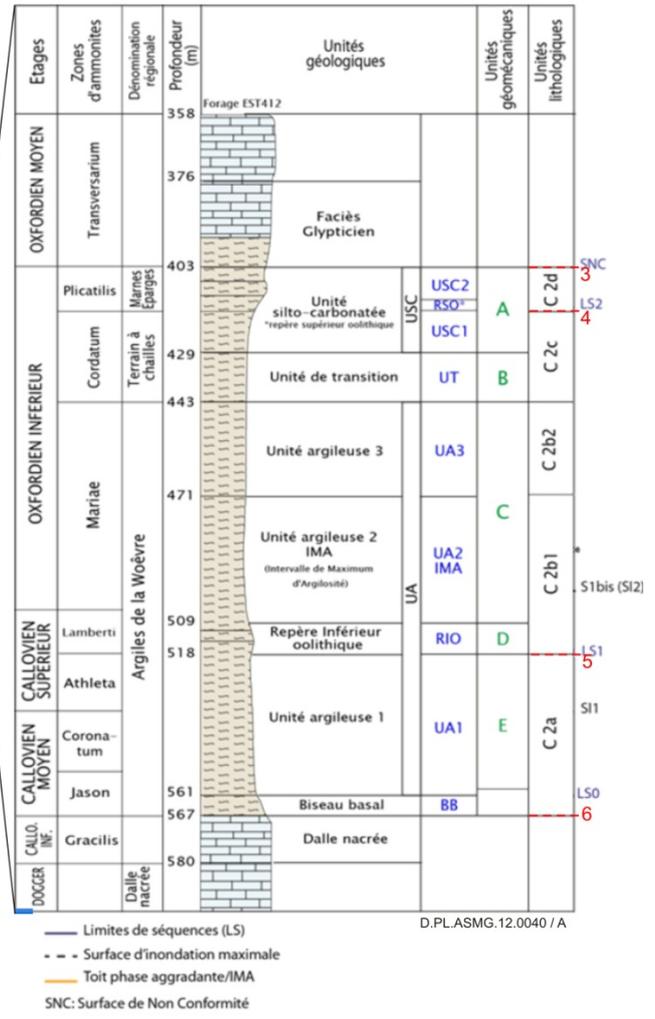
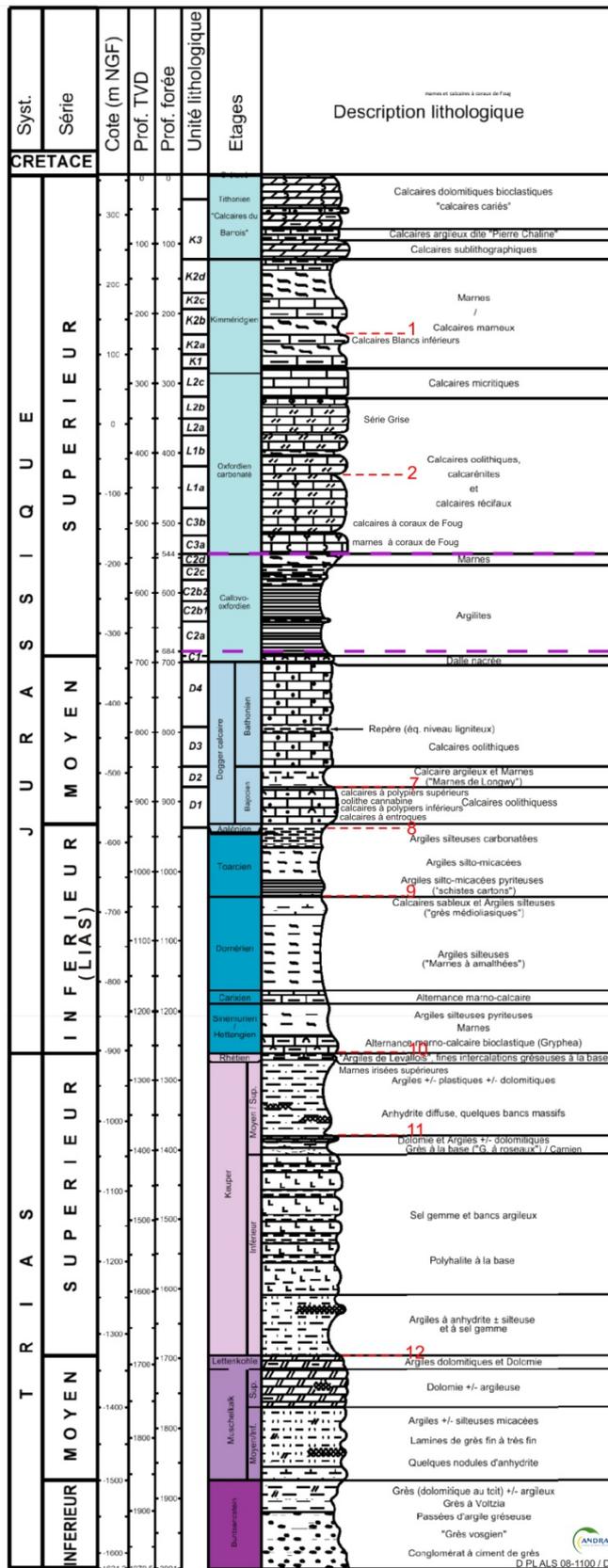


Figure II-3 Gauche : Log synthétique des forages de la plate-forme C (EST431, EST432 et EST433).

Droite : Correspondance des différents découpages du Callovo-Oxfordien.

En rouge : horizons pointés sur la sismique 3D de 2010.

II.1.2.3 POINTE DES HORIZONS SISMQUES

L'Andra a pointé les horizons sismiques suivants, correspondant à des interfaces entre couches sédimentaires (Figure II-4) :

1. Toit des Calcaires Blancs du Kimméridgien supérieur
2. Toit de l'horizon poreux HP4 de l'Oxfordien supérieur
4. Toit de l'Oxfordien inférieur (calcaires argilo-silteux - biocalcarénites) S2
5. Toit du Callovien supérieur (calcaire argileux à microfilaments, dans le RIO) S1
6. Toit du « Dogger calcaire » (toit du Callovien inférieur) LS0
7. Mur de la formation des Marnes de Longwy (Bajocien moyen)
8. Mur du Dogger calcaire (toit du Toarcien)
9. Toit du Domérien
10. Mur du Lias
11. Toit de la dolomie de Beaumont
12. Toit des carbonates de la Lettenkohle/Muschelkalk

Le pointé de l'horizon 3 correspond au toit de la formation hôte « S2b » (cf. ci-après).

L'Andra précise, concernant la méthode de pointé automatique des horizons, que l'interprétation par horizon a été réalisée toutes les huit lignes. Ce pointé a ensuite permis de réaliser les cartes en isochrones, ultérieurement converties en cartes isohypses après conversion des temps doubles en profondeurs.

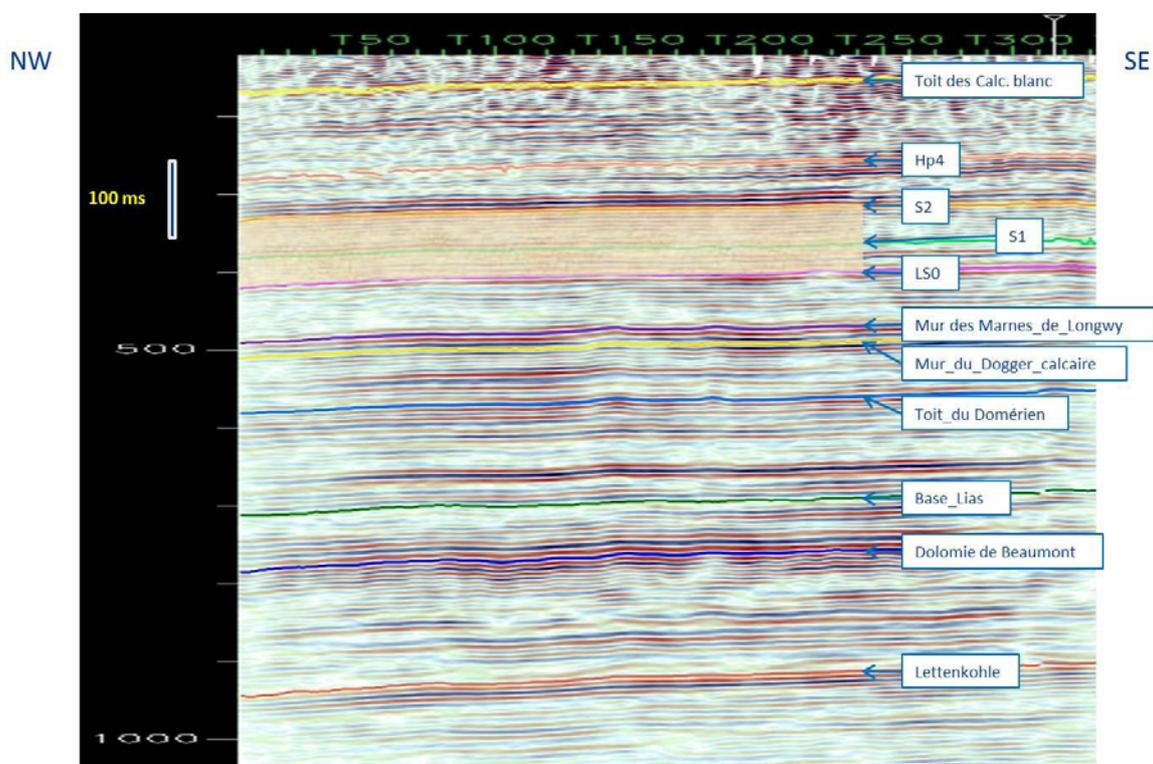


Figure II-4 : Pointé et identification des horizons sismiques sur la sismique 3D en temps double ([5])

L'Andra indique que « les horizons ont été définis horizontalement par une maille carrée de 50 mètres soit vingt-cinq fois plus lâche que la maille du cube sismique [...] de 10 mètres par 10 mètres » et donc qu'« une perte importante de résolution latérale par rapport à l'information sismique a été constatée (1 point pour 25 existants) ».

L'IRSN estime qu'une piste d'amélioration du traitement de la sismique pourrait consister en la densification du pointé des horizons sismiques en cohérence avec le bin sismique, c'est-à-dire en utilisant une maille carrée de 10 mètres, afin de tirer profit de l'ensemble des informations fournies par l'acquisition sismique. Ceci pourra être fait dans le cadre de la finalisation du traitement de la sismique.

Pour ce qui concerne l'identification des horizons du Callovo-Oxfordien par la sismique 3D, l'Andra précise que le mur (base) du Callovo-Oxfordien est déduit directement du pointé de la réflexion sismique de forte amplitude au toit du Dogger calcaire correspondant à la Dalle nacrée (unité C1, Bathonien, voir Figure II-3). Cependant, l'IRSN rappelle que l'intervalle toit du Dogger (C1) - mur du Callovien inférieur (LS0) consiste en un niveau marneux passant latéralement à des faciès carbonatés présents dans le quart Sud-Ouest du secteur ; cet intervalle (« biseau basal », voir Figure II-3) n'est pas identifié par la sismique car il présente une épaisseur estimée entre 3 et 7 m sur la ZIRA, inférieure à la résolution verticale (voir section II.1.3), et une épaisseur nulle à l'aplomb du Laboratoire. En revanche, une autre unité de transition située à la base du Callovo-Oxfordien, reconnue à l'Est au forage EST412 et inexistante au forage EST433, a pu être identifiée par la sismique sur environ 1,5 km de large le long du bord Est de la ZIRA, en raison d'un contraste d'impédance lié à l'augmentation de la teneur en carbonates à son sommet ([5]).

Par ailleurs, l'Andra indique que le toit du Callovo-Oxfordien (SNC ou S2b, Figure II-3) n'est pas souligné par un contraste d'impédance important et que le pointé a donc été construit par une « *translation verticale* » ([5]) de l'horizon S2, qui correspond au contraste lié à la présence de bancs carbonatés situé environ 15 m sous le toit du Callovo-Oxfordien.

Enfin, pour ce qui concerne l'horizon S1 du toit du Callovien supérieur, l'Andra explique que « *l'horizon sismique [S1] est à la limite de la résolution verticale et par conséquent incertain* » et ajoute qu'« *un horizon S1 alternatif a été construit par isopacité* ».

L'IRSN constate donc que le pointé des horizons au mur (LS0), au toit (S2b) et au sein du Callovo-Oxfordien (S1) est associé à des incertitudes spécifiques à ces horizons en raison de leur caractère lithologique peu contrasté. Pour le mur du Callovo-Oxfordien, l'IRSN retient une incertitude globale de ± 2 m. L'incertitude liée à l'hypothèse d'une épaisseur d'environ 15 m de l'intervalle entre l'horizon S2 et le toit de la couche hôte (RS0-SNC, voir Figure II-3) n'est pas quantifiée par l'Andra. L'IRSN constate que l'épaisseur S2-S2b au niveau des forages EST210, EST412 et EST433 (forages de calage, cf. section suivante II.1.2.4) est respectivement de 19,6 m ([10]), 13 m ([9]) et 16 m ([10] et [5]). Pour le toit du Callovo-Oxfordien, l'IRSN retient donc une incertitude allant jusqu'à ± 4 m. Ces incertitudes liées au pointé du mur et du toit du Callovo-Oxfordien sont discutées dans la section II.2.2.1 relative à l'estimation de l'épaisseur et de la profondeur du Callovo-Oxfordien.

II.1.2.4 CONVERSION TEMPS-PROFONDEUR

Les vitesses sismiques mesurées dans trois forages profonds préexistants EST210, EST412 et EST433, dits « de calage », situés à l'extérieur de la ZIRA, ont été utilisées par l'Andra pour convertir les données de sismique 3D, de « temps doubles » en profondeurs (voir Annexe T2). Ces forages sont respectivement reliés à la sismique 3D par l'intermédiaire de trois lignes de sismique réflexion, 10EST01, 10EST02 et 07EST10, appelées « antennes 2D » par l'Andra (Figure II-2). L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que la profondeur du toit des Calcaires Blancs (Kimméridgien, Figure II-3) a été déterminée par interpolation linéaire à partir des 6 forages VT (EST1204, EST1207, EST1210, EST1214, EST1218 et EST1220) qui atteignent le mur des calcaires du Barrois et de ces 3 forages

de calage (voir Figure II-2). La conversion en profondeur des horizons sismiques sous-jacents a ensuite été réalisée à partir de la profondeur ainsi déterminée de la surface du toit des Calcaire Blancs.

L'IRSN observe que les six forages interpolés pour déterminer la profondeur du toit des Calcaires Blancs présentent une répartition inégale : en particulier, un seul forage se situe dans la vallée de l'Orge et aucun ne se trouve sur le plateau à l'ouest de l'Orge. Ceci pourrait contribuer à une imprécision de cette profondeur et par conséquent de celle des horizons sous-jacents. Ce point est repris dans la section II.2.2.2 relative à la topographie des horizons du Callovo-Oxfordien.

L'IRSN constate que la qualité de cette conversion de la sismique 3D de 2010 en profondeurs est tributaire des éventuelles variations de vitesses sismiques au sein des couches entre les forages de calage et la ZIRA (le long des antennes 2D). L'Andra indique que ce calage sera révisé au fur et à mesure des acquisitions de données sur la ZIRA (notamment le creusement des liaisons jour-fond d'un stockage), **ce qui est satisfaisant**. L'IRSN note en outre que seul le forage de calage EST433 atteint des niveaux inférieurs au Bathonien (moitié inférieure du Dogger) et permet de caler les horizons sismiques sous-jacents au Bathonien. **Il s'ensuit que la conversion en profondeur des horizons sismiques sous-jacents au Callovo-Oxfordien, et en particulier de la moitié inférieure du Dogger, est, selon l'IRSN, peu contrainte. L'incertitude résultante, qui pourrait être de quelques dizaines de mètres, reste toutefois acceptable au regard des besoins en connaissance du site pour ces horizons, notamment de la compréhension du comportement hydrogéologique du secteur de Meuse/Haute-Marne.**

La conversion temps-profondeur consiste en l'application d'un modèle de vitesses sur les cartes en isochrones (carte du temps d'arrivée de l'onde réfléchi sur un horizon ou « temps double ») pour obtenir des cartes en isohypses (carte de l'altitude des horizons sismiques, obtenue après conversion des temps doubles en profondeurs). Pour ce qui concerne le choix du modèle de vitesses, dans un premier temps, l'Andra a utilisé l'équation de Dix (voir Annexe T2) pour calculer les « vitesses d'intervalle » (vitesses au sein de chaque horizon) à partir des vitesses issues des analyses réalisées au cours du traitement sismique (vitesses de sommation, cf. section II.1.2.1, Annexes 1 et 2). L'Andra a corrigé ces vitesses d'intervalle à partir de mesures faites dans les forages de calage (logs soniques ou profils sismiques verticaux) et interpolé ces vitesses corrigées sur la zone d'étude. Les valeurs de corrections ainsi calculées, à appliquer aux vitesses d'intervalle, varient entre 0,93 et 0,98. Il est apparu que les vitesses ainsi estimées (cf. Figure II-5) sont trop rapides ou trop lentes selon les couches, en comparaison avec les données géologiques acquises dans les forages de calage. L'Andra considère que *« les erreurs sur le modèle de vitesses sont donc responsables d'une déformation du modèle géologique »*.

Une autre méthode, présentée au cours de l'instruction, a donc été testée par l'Andra. Elle consiste à utiliser un bloc 3D de vitesses filtrées résultant d'une analyse géostatistique des vitesses de sommation *« prenant en compte les vitesses aux forages de calage et les lois de vitesses d'intervalle »*, méthode dite de *« krigeage bayésien »* (méthode stochastique d'interpolation spatiale).

Après avoir testé ces deux méthodes conduisant à des modèles de vitesses différents, le modèle issu de la seconde méthode a été finalement retenu par l'Andra au motif qu'il *« produit des profils géologiques beaucoup plus réalistes »*. L'Andra a en outre réalisé des cartes d'incertitudes de conversion en profondeur liées au choix de l'une ou l'autre des deux méthodes précitées.

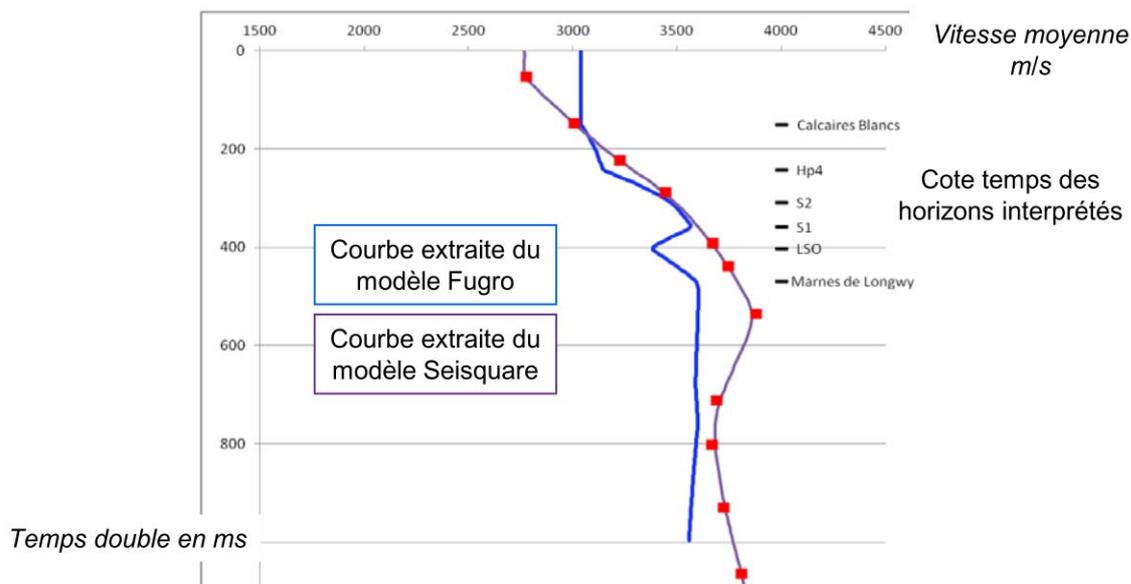


Figure II-5 : Évolution verticale de la vitesse moyenne en un même point sur la sismique (croisement ligne 20-trace 146) pour les deux méthodes de construction de modèles de vitesses de conversion en profondeur. Courbe bleue : première méthode « Fugro » (vitesses d'intervalle à partir des vitesses de sommation et coefficients de correction) ; courbe mauve : seconde méthode « Seisquare » (vitesses filtrées résultant d'une analyse géostatistique par krigeage bayésien des pointés des vitesses de sommation).

Sur les cartes isohypses à sa disposition, l'IRSN constate que les différences de profondeurs obtenues par les deux méthodes précitées atteignent 50 m pour la plupart des horizons et respectivement 30 m et 70 m pour le toit et le mur du Callovo-Oxfordien. L'Andra a précisé lors de la réunion préparatoire que « *le modèle utilisé [dans la première méthode précitée de conversion de la sismique en profondeur] n'était qu'une première approche « dégrossie » : utilisation des vitesses sismiques, corrigées et calées aux puits, pour obtenir une idée de la géométrie des couches. Sa vocation était davantage un contrôle de qualité qu'une restitution fidèle de la profondeur* ». L'Andra a ajouté au cours de la même réunion que cette méthode, classiquement utilisée en sismique pétrolière, est valable pour des profondeurs de plusieurs kilomètres mais n'est pas assez précise pour les faibles profondeurs visées dans les présentes investigations.

L'IRSN convient qu'une méthode plus élaborée que celles classiquement utilisées pour la sismique pétrolière est nécessaire pour une conversion temps-profondeur compatible avec les objectifs visés par l'Andra (notamment, profondeurs avec une précision inférieure à la dizaine de mètres). Cependant, l'IRSN constate sur la base des deux cartes en isohypses dont il dispose et calculées avec le second modèle de vitesses que, en comparaison avec le premier modèle de vitesses, les courbes isohypses sont plus lisses sur ces cartes que sur les précédentes et les variations de profondeur sont moindres pour un même horizon, ce qui pourrait constituer une amélioration.

En tout état de cause, afin de consolider la démonstration de la pertinence du traitement appliqué aux données sismiques, l'Andra devra, au plus tard à l'échéance de la DAC, présenter et justifier la méthode retenue pour la conversion des données sismiques « temps double » en profondeur, ainsi que les cartes en isohypses des interfaces lithologiques qui en découlent.

A la suite de la réunion préparatoire, l'Andra s'est engagée à transmettre ces éléments pour la fin du premier semestre 2013 (cf. E 3.1, Annexe A2).

II.1.2.5 LIEN AVEC LE TRAITEMENT DES DONNEES SISMQUES 3D ACQUISES EN 1999

L'Andra a indiqué, au cours de l'instruction, que le calage en profondeur de la sismique 3D de 1999 a été réalisé en 2004 à partir de deux forages du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, EST104 et EST205 (dans lequel a été réalisé un profil sismique vertical), ainsi qu'à partir du forage HTM102 par l'intermédiaire d'une ligne sismique 2D. L'Andra a précisé que cette sismique 3D de 1999 n'a pas fait l'objet d'un nouveau traitement depuis la campagne de forages de 2004. Or l'IRSN constate que des forages plus récents situés dans l'emprise de la sismique 3D de 1999 (notamment des forages de la campagne « FRF » [10]) ont fait l'objet d'une analyse fine de la profondeur, de la nature lithologique des différents horizons et des structures tectoniques. En outre, les observations effectuées lors du creusement des puits du laboratoire et des ouvrages de ce laboratoire ont permis de préciser les connaissances relatives au Callovo-Oxfordien et aux formations sus-jacentes. L'IRSN estime que ces investigations complémentaires pourraient permettre de consolider l'interprétation de la sismique acquise en 1999 et de tirer un retour d'expérience, constitué sur une zone restreinte reconnue par une combinaison d'investigations, de la mise en œuvre de la méthode de sismique 3D, potentiellement valorisable pour l'interprétation des données acquises en 2010.

L'Andra a précisé au cours de la réunion préparatoire que la sismique 3D de 1999 est de qualité inférieure à celle de la sismique 3D de 2010, cette dernière ayant bénéficié au moins pour partie du retour d'expérience de la première. Les améliorations portent sur les techniques d'acquisition et le paramétrage de l'enregistrement et du traitement de la sismique 3D. En outre, l'Andra a indiqué, à l'issue de cette réunion préparatoire, que « *les enseignements tirés de la confrontation entre les données obtenues en forage et au Laboratoire souterrain et la sismique 3D de 1999 seraient inclus dans le document sur le Retour d'expérience du Laboratoire souterrain, en cours d'achèvement* ». Ceci est satisfaisant.

II.1.3 POUVOIR DE RESOLUTION ET LIMITE DE DETECTION DE LA SISMIQUE 3D

Les incertitudes associées à l'interprétation de la sismique 3D sont évaluées par l'Andra via le pouvoir de résolution vertical et horizontal ainsi que la limite de détection de la sismique et dépendent de la fréquence et de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le milieu géologique.

Les valeurs de limite de détection déduites des fréquences et vitesses retenues sont de 2 à 3 m pour l'Oxfordien calcaire et le Callovo-Oxfordien et de 3 à 4 m pour le Dogger calcaire. Le pouvoir de résolution est de 9 à 10 m pour l'Oxfordien calcaire, 6 à 7 m pour le Callovo-Oxfordien et 13 à 14 m pour le Dogger calcaire. Enfin, la résolution latérale de la sismique est estimée par l'Andra pour le mur des marnes de Longwy à 288 m. La résolution latérale n'est pas quantifiée par l'Andra pour le Callovo-Oxfordien et pour l'Oxfordien calcaire et est estimée par l'IRSN, en utilisant la même méthode, à environ 150 m.

L'IRSN relève que ces estimations ne prennent pas en compte le fait que les horizons sismiques sont moins marqués dans les couches argileuses en raison d'un moindre contraste lithologique entre bancs. Ainsi, l'IRSN estime que les grandeurs de type « pouvoir de résolution » et « limite de détection » ne peuvent pas rendre compte, intrinsèquement, de ce faible contraste lithologique dans les niveaux argileux comme le Callovo-Oxfordien, comme l'illustrent les travaux menés par l'IRSN dans sa station expérimentale de Tournemire, présentés lors de son examen du Dossier 2005 [1].

L'IRSN estime donc que les valeurs de limite de détection et de pouvoir de résolution associées au Callovo-Oxfordien ne peuvent être considérées que comme des ordres de grandeur. L'IRSN considère néanmoins que

ces valeurs, pour les encaissants calcaires comme pour le Callovo-Oxfordien, sont suffisamment faibles pour permettre une interprétation des caractéristiques géologiques de la ZIRA et traduisent globalement que l'acquisition des données de sismique de 2010 sur la ZIRA est de bonne qualité.

Pour ce qui concerne la résolution latérale de la sismique, les modèles de vitesses pour la sommation et la migration étant calculés sur une grille de 240 m x 240 m (cf. section II.1.2.1) et la résolution latérale étant de 288 m pour l'horizon sismique du mur des Marnes de Longwy, l'Andra considère qu'« *un pas d'analyses des vitesses inférieur à 240 m n'apporterait pas d'amélioration de la précision de la sismique pour cet horizon* », ce dont convient l'IRSN. Pour les horizons surmontant les Marnes de Longwy comme le Callovo-Oxfordien et l'Oxfordien calcaire, qui présentent, selon l'IRSN, une résolution latérale d'environ 150 m, l'IRSN a suggéré au cours de l'instruction, au titre d'une piste d'amélioration de la résolution latérale de la sismique, qu'une grille plus dense soit utilisée pour l'élaboration des modèles de vitesses de traitement de la sismique. L'Andra a précisé que des tests mettant en œuvre l'utilisation d'une grille de 120 x 120 m ont été réalisés et n'ont pas apporté d'amélioration significative et comportent « *un risque d'introduire des artéfacts de courte longueur d'onde* ». Ceci n'appelle pas de remarque.

II.1.4 CONCLUSIONS SUR L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DE LA SISMIQUE 3D DE 2010

Les paramètres de l'acquisition sismique réalisée en 2010 sur la ZIRA apparaissent bien adaptés aux objectifs fixés par l'Andra. Les traitements appliqués, présentés par l'Andra au cours de la réunion préparatoire comme correspondant à une première approche dont l'objectif était davantage un contrôle de la qualité de l'acquisition, méritent d'être poursuivis pour réduire les incertitudes liées à l'interprétation de la sismique 3D en l'état actuel du traitement (cf. partie suivante II.2).

II.2 INTERPRETATION DE LA SISMIQUE 3D EN TERMES DE CARACTERISTIQUES DU CALLOVO-OXFORDIEN ET DE SES ENCAISSANTS

L'Andra a déduit, à partir des résultats de la sismique 3D, les caractéristiques structurales des encaissants calcaires de la couche du Callovo-Oxfordien ainsi que les caractéristiques géométriques de cette couche (topographie, profondeur, épaisseur). L'examen par l'IRSN de cette interprétation des résultats est présenté ci-après.

II.2.1 STRUCTURES IDENTIFIEES DANS LES ENCAISSANTS

Dans les encaissants calcaires du Callovo-Oxfordien (Oxfordien et Dogger), aucune structure d'origine tectonique n'est identifiée par l'Andra. Le pouvoir de détection des rejets verticaux étant de quelques mètres dans cette formation pour la sismique 3D de 2010 (section II.1.3), l'IRSN conclut effectivement à l'absence de faille présentant un rejet vertical supérieur à quelques mètres dans l'Oxfordien calcaire et le Dogger supérieur (Bathonien).

L'Andra a toutefois identifié, dans trois horizons différents (voir la colonne stratigraphique en Figure II-3), des structures qui sont, d'après l'Andra, de nature sédimentaire :

- dans l'Oxfordien calcaire, une structure est interprétée comme une barrière récifale avec des lobes et d'autres structures de petite taille comme des biohermes (corps rocheux édifiés par des organismes constructeurs) isolés ;
- dans le Bajocien (Dogger), des linéaments de direction N120° correspondent selon l'Andra à des ensembles récifaux ;
- dans le Lias et le Trias, une zone affaissée accompagnée de petites failles est expliquée par une dissolution locale du sel du Keuper (Trias supérieur).

Ces éléments sont évalués, par niveau géologique, aux sections suivantes.

II.2.1.1 ENCAISSANT CALCAIRE SUPERIEUR DE L'OXFORDIEN

Dans l'Oxfordien calcaire, une structure sismique intitulée Rcf1 (Figure II-6), « en forme d'arc à concavité tournée vers le Nord-Ouest », d'environ 1,5 km de long sur 300 m de large a été identifiée au sein de la formation des marnes et calcaires à coraux de Foug (cf. Figure II-3). L'Andra interprète cet objet comme la signature d'une barrière récifale. Cette structure est placée sur une ligne de partage entre une zone WNW et une zone ESE où un horizon sismique apparaît ; selon l'Andra, cet horizon supplémentaire pourrait correspondre à un corps sédimentaire de type lagon d'arrière-récif et la ligne de partage au front de progradation (avancée progressive d'une sédimentation détritique). Le long de cette ligne, au Sud de ce cordon récifal, des structures sigmoïdes attribuables à des lobes progradants sont également observées. Enfin, d'autres anomalies sismiques localisées dans la partie SE sont interprétées par l'Andra comme des biohermes isolés formés dans la zone lagunaire.

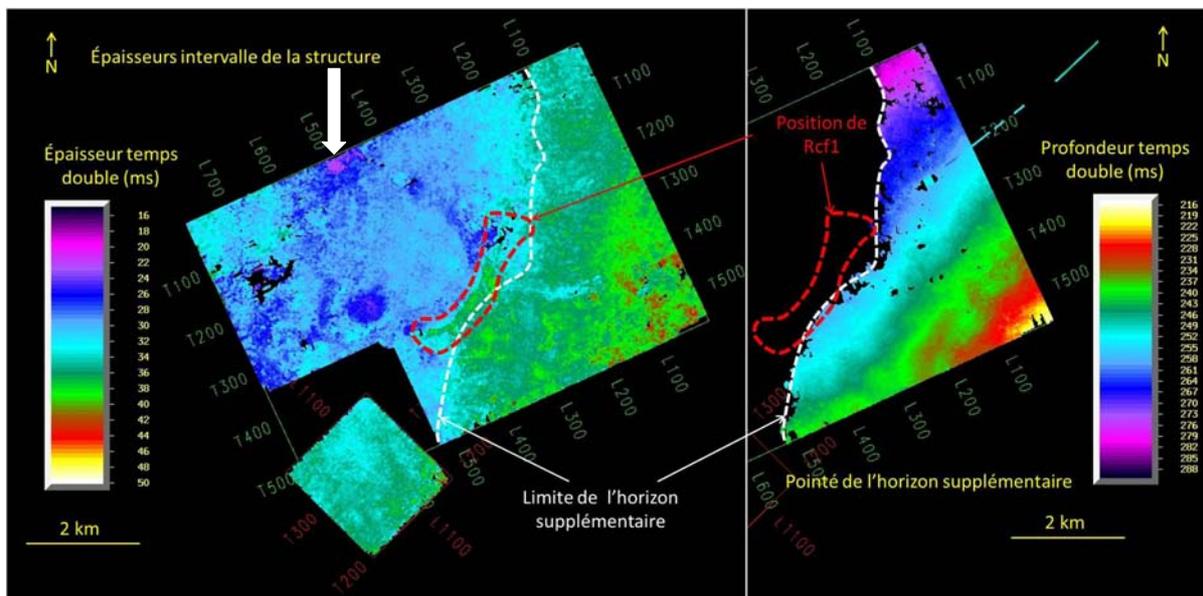


Figure II-6 : Carte de l'épaisseur entre deux horizons sismiques encadrant la structure Rcf1 (gauche) et niveau supplémentaire oriental (droite). Pointé en temps double ([5]).

L'IRSN constate que dans les horizons relatifs à l'Oxfordien calcaire, l'imagerie sismique est nette et permet d'identifier des structures singulières. En outre, lors d'une mission de terrain organisée par l'Andra le 28 août 2012, l'IRSN a pu observer en coupe un corps récifal d'une longueur de l'ordre de la centaine de mètres, affleurant dans l'Oxfordien supérieur à l'Est du secteur de Meuse-Haute-Marne (carrière d'Euville). Compte tenu

de ces éléments, l'IRSN considère que l'interprétation par l'Andra de la structure sismique dans l'Oxfordien calcaire comme une barrière récifale est plausible.

L'IRSN observe qu'une autre anomalie très ténue approximativement N-S est identifiable sur certaines cartes sismiques de l'horizon poreux HP4 de l'Oxfordien supérieur (voir Figure II-6, flèche blanche pointant une zone bleu marine relativement épaisse). Cette anomalie est approximativement située sous le cours de l'Orge (cf. Figure II-2), ainsi qu'à l'aplomb de failles identifiées dans le Trias (cf. section II.2.1.3) et en bordure ouest d'une zone affaissée visible sur les 12 horizons sismiques pointés (cf. section II.2.2.2), allant du Lettenkohle au Kimméridgien. A cet égard, l'IRSN constate que le modèle conceptuel de site présente les résultats d'une analyse statistique effectuée en 2007 (cf. [11]), basée sur la cartographie de la fracturation reconnue en surface, qui montrent que statistiquement, des failles mineures (i.e. de rejet vertical entre 1 et 5 m) devraient être présentes sur la ZIRA avec un espacement kilométrique. Au vu des missions de terrain qu'il a mené (e.g. Rocher et al., 2004), l'IRSN considère cette éventualité comme probable. Aussi, la possibilité que l'anomalie mentionnée ci-avant corresponde à une structure tectonique serait cohérente avec l'analyse statistique présentée par l'Andra. Aussi, l'IRSN considère que cette anomalie N-S dans l'Oxfordien pourrait correspondre soit à un problème lié au calcul des corrections statiques qui pourrait être causé par la présence d'une zone altérée en sub-surface dans la vallée de l'Orge, soit à une structure réelle. L'éventualité d'une structure réelle est reprise dans la section II.2.2.2 relative à la topographie du Callovo-Oxfordien.

II.2.1.2 ENCAISSANT CALCAIRE INFÉRIEUR DU DOGGER ET ANOMALIES SOUS-JACENTES

Dans le Dogger, des linéaments plurikilométriques de direction N110-130° sont identifiés par l'Andra dans la plateforme carbonatée du Bajocien inférieur à moyen, c'est-à-dire dans l'intervalle mur du Dogger calcaire (toit du Toarcien) - mur de la formation des Marnes de Longwy (Bajocien supérieur) (Figure II-7). Ces linéaments sont également présents sous le Dogger, au moins dans le Lias voire jusque dans le Trias.

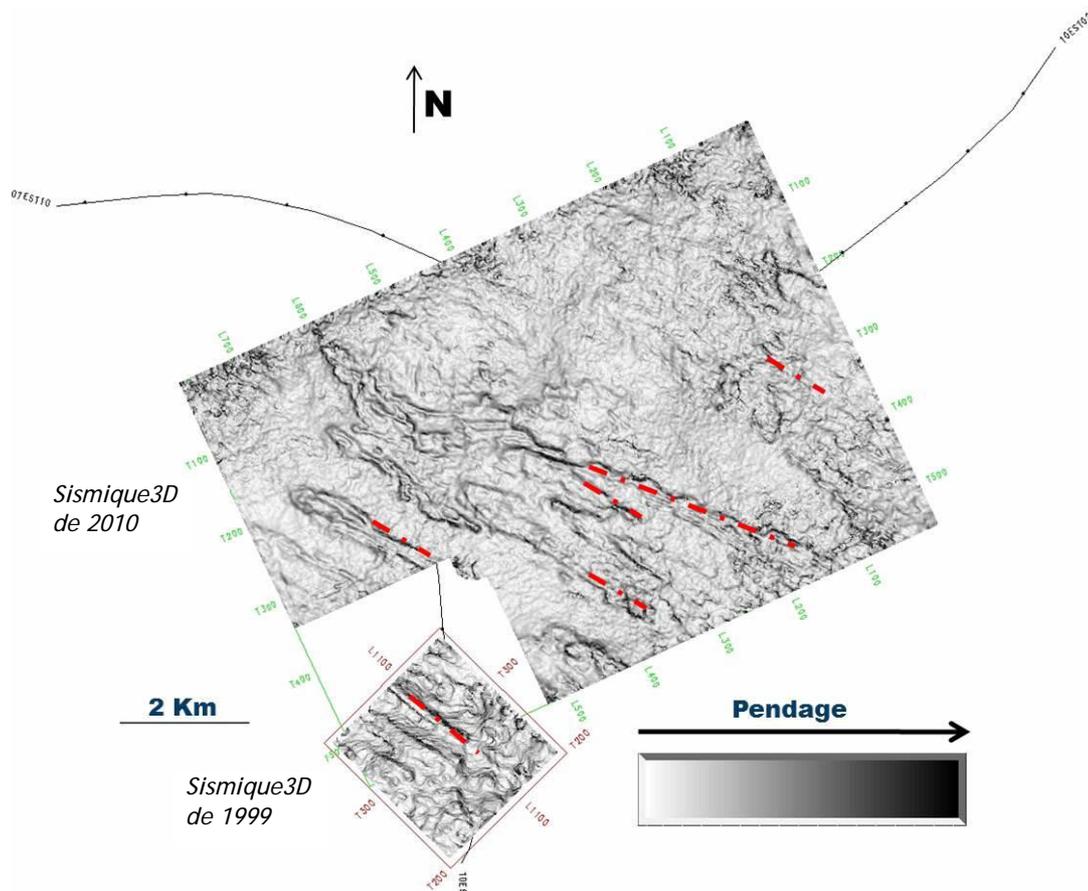


Figure II-7 : Images sismiques (3D de 1999 et 3D de 2010) des structures N120 sur une carte d'attributs de pendage (niveaux de gris croissant avec le pendage) au mur des Marnes de Longwy ([3] et [5])

La sismique 3D réalisée par l'Andra en 1999 dans l'environnement du Laboratoire souterrain a également révélé des structures sismiques orientées N120° espacées de 200-300 m, affectant les formations du Trias (Rhétien) au Dogger moyen (Bathonien inférieur). Les deux structures N120° les plus marquées, appelées F1 et F3, sont situées dans le Nord-Est de l'emprise de la sismique 3D de 1999 (e.g. [8]). Sur la base d'une reconnaissance par le forage oblique EST210 (profil sismique vertical, [10]), l'Andra concluait en 2004 ([12]) que la structure F1 était une formation récifale possiblement initiée au-dessus d'une structure N120° du Lias et s'arrêtant sous le niveau ligniteux du Bathonien. Ainsi, l'Andra considère que ce type de structure N120° sur les cubes sismiques 3D de 1999 et 2010 a été reconnu par le forage oblique EST210 et correspond à des ensembles récifaux. L'Andra ajoute que de tels ensembles récifaux ont été reconnus dans le Bajocien à l'affleurement (Brigaud, 2009).

L'analyse présentée ci-après concerne la nature de ces structures sismiques N120°, leur origine et leur influence possible sur les écoulements, dans le Bajocien puis dans les formations sous-jacentes.

II.2.1.2.1 Anomalies N120° dans le Bajocien

L'IRSN a observé, lors de la mission de terrain organisée par l'Andra le 28 août 2012, des formations récifales dans le Bajocien calcaire dans la région de Neufchâteau au sud-ouest du secteur de Meuse/Haute-Marne (bord de route au nord de Circourt-sur-Mouzon, carrières de Beaufremont, de Jainvilotte et de Rouvres la Chétive). Le niveau des calcaires à polypiers inférieurs présente une grande concentration de récifs, dont la hauteur est décimétrique et la largeur pluridécimétrique. Au-dessus de ces récifs, les couches (l'oolithe cannabine, les calcaires à polypiers supérieurs, Figure II-3) retrouvent rapidement un caractère horizontal. Parfois, une ondulation de grande longueur

d'onde est encore identifiable sous les Marnes de Longwy. Ces observations réalisées par l'IRSN, cohérentes avec celles décrites par Brigaud (2009), permettent de considérer que l'interprétation de ces structures par l'Andra en termes de formations récifales dans le Bajocien est plausible.

L'origine possible de ces formations récifales est examinée ci-après au travers de leur caractère rectilinéaire et leur orientation préférentielle. Certains affleurements observés par l'Andra et l'IRSN (Circourt-sur-Mouzon, Rouvres la Chétive) permettent d'identifier une localisation possible de ces récifs en rupture de pente de talus de progradation dans des calcaires (calcaires à entroques) sous-jacents aux récifs. L'Andra estime que la paléotopographie des calcaires à entroques est possiblement influencée par des mégarides (dépôts sableux de très grande dimension formés par les marées) sous-jacentes de longueur d'onde hectométrique. L'Andra ajoute qu'« *une des interprétations possibles est de considérer que ces mégarides ont leur crête orientée N120°E, perpendiculairement à la direction N30°E de courants de marée ou de jusant, voire de tempêtes* ».

L'IRSN note que l'Andra revient sur son hypothèse de 2004 précitée d'une initiation de ces alignements de corps récifaux sur des structures du Lias. L'IRSN constate effectivement que contrairement aux anomalies montrées par la sismique de 1999, de direction régulière et plutôt N130° que N120° ([1]) et pouvant donc être attribuées à la tectonique en raison de la prédominance des fractures de direction N130-140° dans le secteur de Meuse/Haute-Marne (Rapport IRSN/DSU n°106 [1]; Rocher et al., 2004), les anomalies de la sismique de 2010 présentent des directions plus variables allant de N105° à N125° sur la ZIRA, moins compatibles avec une origine tectonique. Par ailleurs, aucune faille susceptible d'être à l'origine de la localisation des récifs n'a été identifiée sur le terrain lors de la mission du 28 août 2012. Par ailleurs, les ensembles récifaux à l'affleurement sont symétriques et de forme pyramidale, ce qui ne paraît pas compatible avec une initiation sur faille. Il a en outre été constaté par l'IRSN sur le terrain, dans un cas (Jainvilotte), que ces récifs observés à l'affleurement peuvent présenter une forme allongée, de direction approximative N120°. Aussi, l'IRSN considère plausible l'hypothèse de l'Andra selon laquelle la direction N110-130° de ces probables corps récifaux du Dogger n'est pas attribuable à la tectonique mais à une initiation sur des mégarides sédimentaires de même direction. Sur ce point, l'IRSN suggère que des observations de terrain supplémentaires visant à statuer sur l'orientation des mégarides, pourraient le cas échéant permettre d'exclure définitivement une origine structurale à la mise en place de ces corps récifaux. L'enjeu de ce point réside principalement dans l'interprétation des structures sismiques observées sous le Bajocien, qui est examinée à la section II.2.1.2.2.

Pour ce qui concerne l'influence possible de ces structures sur le transport de solutés, l'Andra indique que le Bajocien a été soumis à des phénomènes intenses de diagenèse après la sédimentation mais ne précise pas si les formations récifales ont des caractéristiques singulières en termes de porosité de matrice et de fracturation par rapport au reste du Bajocien inférieur à moyen.

L'IRSN constate que les formations récifales observées sur le terrain sont constituées de calcaires massifs et très cristallisés. Il apparaît que le toit des récifs ainsi que les bords sont parfois le siège d'une fracturation d'origine tectonique (failles) dont la direction est principalement N120°, comme observé dans la carrière de Sommérecourt (Achiedo, 2012). Ceci pourrait s'expliquer par une initiation au point de fragilité qu'est l'interface entre les formations récifales et les roches encaissantes, en raison de la différence de comportement mécanique de ces formations, et/ou une réorientation locale des contraintes. L'Andra a indiqué au cours de la réunion préparatoire qu'elle considère cette fracturation comme résultant d'une compaction différentielle de part et d'autre des récifs. Ainsi, l'existence d'une fracturation mineure localisée au sein et aux abords de ces corps récifaux

n'est pas à exclure et pourrait le cas échéant faire l'objet de circulations préférentielles N120°. L'Andra a indiqué au cours de la réunion préparatoire, qu'en tout état de cause, au vu des données acquises en forages, la perméabilité globale du Bajocien est faible au regard de celle du Bathonien dans lequel ont été identifiés deux niveaux aquifères, ce dont l'IRSN convient. Il reste néanmoins utile, selon l'IRSN, d'intégrer cette possibilité de circulations préférentielles dans le modèle hydrogéologique.

La prise en compte des propriétés globales de transport dans les corps récifaux du Bajocien au regard notamment de possibles chemins d'écoulements préférentiels, ainsi que la représentation de cette formation dans le modèle hydrogéologique utilisé en support à l'évaluation de la sûreté de l'installation de stockage, sont évaluées dans la section II.2.3 relative aux conclusions sur les structures.

II.2.1.2.2 Anomalies N120° sous le Bajocien

L'Andra constate que des linéaments approximativement N120° sont également présents dans les horizons sismiques sous-jacents aux récifs du Bajocien, notamment du mur du Dogger calcaire (toit du Toarcien) jusqu'au mur du Lias, constituant des anomalies verticales bordant des zones surélevées. L'Andra interprète ces anomalies comme des « pull-up » liés à des vitesses sismiques plus importantes au sein des récifs : les ondes ayant traversé les formations récifales arrivent plus tôt que les ondes ayant traversé les zones du Bajocien exemptes de récifs. Au cours de l'instruction, l'Andra a précisé que la vitesse des ondes P est de l'ordre de 5 000 m/s dans le Bajocien inférieur et de 5 550 m/s dans les formations récifales.

L'IRSN a évalué si les vitesses estimées par l'Andra pouvaient expliquer les anomalies observées. En considérant l'hypothèse d'un complexe récifal épais de 20 m (épaisseur maximale estimée par l'Andra), la différence du temps aller-retour d'une onde P traversant les formations récifales avec celui d'une onde P traversant le Bajocien inférieur exempt de récifs serait de 0,8 ms. Or l'IRSN constate que l'épaisseur « temps double » entre le mur du Dogger calcaire et le mur des Marnes de Longwy varie entre 24 ms et 17 ms, soit 7 ms d'écart. Cette valeur est bien supérieure à celle calculée ci-dessus. Ainsi, soit la vitesse sismique estimée par l'Andra dans les corps récifaux est erronée, soit les anomalies observées sous les corps récifaux ne sont pas des artefacts de type « pull-up » mais pourraient être des structures tectoniques.

Néanmoins, ainsi qu'indiqué dans le chapitre précédent, l'IRSN considère plausible l'hypothèse selon laquelle l'initiation selon une direction N120° est attribuable à des mégarides sédimentaires. En outre, compte tenu des nouvelles investigations réalisées par l'Andra et des informations acquises, l'IRSN convient que les anomalies sur la sismique de 2010 ont un caractère vertical cohérent avec l'enregistrement d'un artefact. L'IRSN estime donc que l'interprétation par l'Andra des anomalies N120° sous le Bajocien comme résultant de « pull-up » en raison de vitesses plus importantes au sein des récifs est plausible mais actuellement non démontrée.

Afin de préciser les vitesses sismiques dans les récifs et ainsi étayer cette interprétation, il pourrait être envisagé par exemple d'utiliser d'autres traitements sismiques complémentaires à ceux appliqués jusqu'à présent. L'IRSN estime également qu'il conviendrait de corriger ces anomalies qui perturbent la « lecture » des horizons sous-jacents au Dogger. L'Andra précise en effet que « *les vitesses relativement plus élevées au sein des récifs ont créé une augmentation de la vitesse affectant un certain nombre d'événements sismiques sous-jacents. Cette configuration apparaît aussi dans des niveaux plus profonds [Mur du Dogger calcaire, Toit du Domérien et Mur du Lias], masquant malheureusement les modèles géologiques qui les constitueraient* ».

II.2.1.3 LIAS-TRIAS

Les niveaux du Lias-Trias font apparaître une zone abaissée allongée dans la direction N-S, d'une largeur d'environ 1 500 m au Nord de la ZIRA (Figure II-11; Figure II-12). Au niveau de l'horizon de la Dolomie de Beaumont, l'affaissement est de 15 ms temps double, soit environ 20-30 m pour des vitesses de 3 000-4 000 m/s ([4]). En-dessous, l'horizon correspondant au Lettenkohle apparaît non déformé ; au-dessus, le Lias n'apparaît pas faillé. S'appuyant sur des observations de chutes de niveau marin effectuées par Bourquin & Guillocheau (1996) dans les Marnes irisées supérieures, l'Andra attribue cet affaissement à une dissolution du sel pendant la sédimentation de ces marnes (« *fenêtre à sel dissous* » ; [4]). Cette dissolution « *peut être reliée aux déformations de courtes longueurs d'onde pendant le Trias supérieur (Carnien), car le bassin de Paris est en extension au cours de cette période en raison de l'ouverture de la Téthys ligure.* »

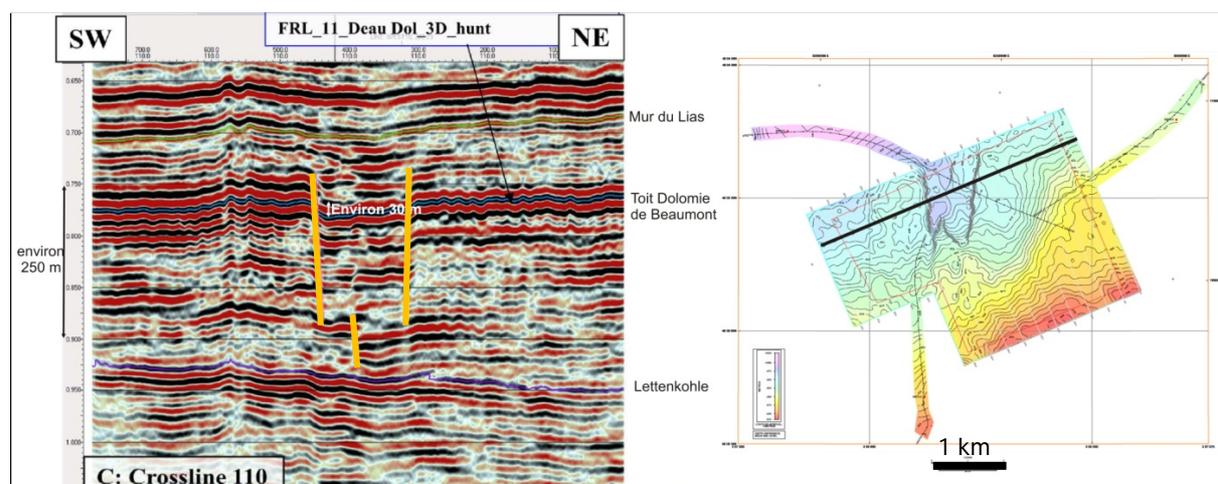


Figure II-8 : Profil sismique 2D (gauche, crossline 110) extrait du bloc 3D (droite) illustrant l'affaissement affectant la Dolomie de Beaumont (Trias)

Les bordures de cette zone affaissée correspondent à des discontinuités orientées N-S à NNW-SSE. L'analyse fine des données suggère que « *ce ne sont pas des failles « enracinées* » dans le socle mais ancrées dans le Trias. Des anomalies ont déjà été identifiées par l'Andra dans la continuité sud de celles-ci sur la sismique 3D de 1999 (cf. ci-dessus), ainsi que dans la continuité nord de celles-ci sur les profils sismiques 07EST03, 07EST04 et 07EST10, effectués en 2007 dans le cadre de la reconnaissance de la zone de transposition pour le choix de la ZIRA ([9]). D'autres structures de même direction sont identifiées dans le Nord-Ouest de la zone de transposition sur les profils sismiques 07EST01, 07EST02, 07EST08 et 07EST09 de cette campagne. L'Andra attribuait en 2008 l'ensemble de ces structures ([9]) « *à des accidents d'accompagnement de la faille de la Marne* ». Certaines de ces structures s'amortissent plus ou moins haut dans le Lias ; en particulier, sur la ligne sismique 07EST02 ([9]), l'un de ces accidents s'amortit dans le Toarcien (cf. Figure II-3). L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *dans le contexte tectonique du bassin de Paris au Trias-Lias, certaines failles héritées de la fin de l'orogénèse hercynienne, ou créées pendant le Trias, sont scellées dès le Domérien, alors que d'autres restent actives plus longtemps. L'origine de cette différence de fonctionnement peut venir de leur orientation par rapport aux directions de contraintes* ».

L'IRSN estime que l'interprétation par l'Andra de cet affaissement N-S en termes de zones de dissolution de largeur kilométrique, bordées par de petites failles d'origine gravitaire ou tectonique s'enracinant dans le Trias, est plausible. A cet égard, la cohérence du rejet maximum avec la longueur et la hauteur possibles de ces

failles mériterait d'être vérifiée pour préciser leur origine et extension possibles, le rejet vertical d'une faille normale étant généralement de l'ordre d'un centième de sa longueur (e.g. Kim & Sanderson, 2005) et d'un dixième de sa hauteur (e.g. Soliva et al., 2005).

Cependant, l'IRSN attire l'attention sur l'éventualité que ces structures aient été réactivées après la dissolution de sel du Trias, par des épisodes tectoniques ultérieurs, en particulier en failles décrochantes. En effet, comme indiqué notamment en 2005 [1], l'IRSN rappelle que dans cette région la présence de failles décrochantes, correspondant à un mouvement relatif essentiellement horizontal des couches (donc difficilement détectables par la sismique), ne peut pas être exclue. L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « *toutes les failles observées en surface, qu'elles soient d'orientation N40°E (fossé de Gondrecourt) ou N140-150°E (failles de la Marnes et failles mineures dans la zone de fracturation diffuse) ont un rejet en décrochement associé à un rejet vertical résultant d'une extension* ». L'IRSN a pourtant observé, à l'affleurement dans la zone de transposition, des failles décrochantes exemptes de décalage vertical (en particulier des failles sénestres dans la direction approximativement N-S ; Rapport DSU n°106 [1], annexe T2). Les failles décrochantes sont susceptibles de jouer un rôle de drain vertical, particulièrement dans les zones de relais (e.g., Savoye et al., 2003). En 2005, l'IRSN indiquait [1] que dans l'éventualité d'une poursuite des études après 2006, il conviendrait d'accorder une attention particulière à l'identification à l'échelle du secteur d'éventuelles structures décrochantes, plus difficiles à détecter en profondeur que les failles normales (i.e., avec rejet vertical).

L'IRSN constate que les directions de ces structures forment un « éventail », allant de NW-SE pour celles les plus à l'ouest en se rapprochant des failles de la Marne, elles-mêmes de cette direction, puis NNW au centre Nord de la zone de transposition, à une direction N-S pour la zone de failles la plus à l'Est (celle identifiée à l'aplomb de la ZIRA) en se rapprochant des failles de Gondrecourt, de direction NNE. Cet agencement pourrait s'expliquer par une origine tectonique commune. En outre, l'IRSN estime que pour l'affaissement N-S identifié dans la ZIRA, une initiation similaire (i.e., synchrone et par le même mécanisme), toutes proportions gardées, au fossé de Gondrecourt ne peut pas être exclue en l'état actuel des connaissances. Par conséquent, et comme indiqué en 2009 dans son avis DSU/2009-166 [2], l'IRSN considère qu'une réactivation en décrochement durant le Cénozoïque (avec notamment les compressions pyrénéennes et alpines) de certaines des failles N-S n'est pas exclue.

L'impact possible de ces structures, éventuellement réactivées en failles décrochantes, sur les couches sus-jacentes au Lias est examiné dans la section II.2.2.2 dédiée à la topographie du Callovo-Oxfordien.

II.2.2 GEOMETRIE DU CALLOVO-OXFORDIEN

II.2.2.1 ÉPAISSEUR ET PROFONDEUR DU CALLOVO-OXFORDIEN

Le choix de la ZIRA par l'Andra en 2009 reposait sur la sélection de caractéristiques considérées comme plus particulièrement propices à l'implantation du futur stockage, notamment une épaisseur de la formation hôte de plus de 140 m et une profondeur du milieu de la couche ne dépassant pas 600 m ([13]).

Afin de déterminer l'incertitude sur l'épaisseur du Callovo-Oxfordien et sur la profondeur de sa base et de son toit, l'Andra a indiqué au cours de l'instruction avoir effectué des calculs probabilistes sur la base d'un « *scénario plausible de conversion en profondeur* ». Ce scénario est basé sur le choix de la séquence stratigraphique (couvrant notamment l'incertitude sur la qualité du pointé sismique discutée à la section II.1.2.3), des forages contrôlant le modèle de conversion et des lois de vitesses d'intervalle de chaque couche. Pour des probabilités

respectivement de 98% et 68% que la profondeur soit comprise dans l'intervalle de confiance autour de la valeur estimée, l'incertitude ainsi calculée sur la profondeur du mur du Callovo-Oxfordien est de ± 18 m et ± 9 m. Pour ces mêmes probabilités, l'incertitude sur l'épaisseur entre les horizons pointés LS0-S2 du Callovo-Oxfordien (Callovo-Oxfordien sans l'intervalle S2-S2b d'environ 15 m au toit de cette formation, cf. Figure II-3) est de ± 12 m et ± 6 m.

L'Andra indique que la sismique 3D de 2010 permet de conclure que, dans la ZIRA, « l'épaisseur de l'intervalle entre [le mur et le toit du Callovo-Oxfordien] est de l'ordre de 155 m, ce qui est légèrement supérieur (environ 5 m) à l'épaisseur estimée de la couche » en 2009. L'Andra ajoute que « l'épaisseur observée au droit du Laboratoire souterrain est de 137 m. Compte tenu de la direction générale d'épaississement du Callovo-Oxfordien vers le Nord-Est, l'épaisseur est supérieure à 140 m sur la ZIRA » ([5]).

L'IRSN constate que, selon les cartes isohypses à sa disposition, la plus faible épaisseur du Callovo-Oxfordien estimée à partir de la sismique 3D sur la ZIRA est de 135 m et se trouve dans la zone située dans l'angle obtus de la ZIRA (proche du Laboratoire). Compte tenu des incertitudes estimées par l'Andra sur cette épaisseur, ce résultat reste compatible avec l'affirmation précitée de l'Andra selon laquelle l'épaisseur du Callovo-Oxfordien est de plus de 140 m sur la ZIRA.

Pour ce qui concerne la profondeur maximale du milieu de la formation évaluée à partir de la sismique 3D, l'Andra précise que celle-ci est de 600 m dans le coin Nord-Ouest de la ZIRA, ce qui, compte tenu de l'incertitude résiduelle possible déterminée par l'Andra (± 18 m) ne conduirait à exclure qu'un quart de cercle d'environ 1 km² de superficie dans ce coin de la ZIRA pour respecter le critère de profondeur maximale.

Comme indiqué dans l'avis DSU/2009-166 [2], en raison de cette profondeur de 600 m qui est plus importante que celle du Laboratoire souterrain, l'IRSN considère que l'endommagement dû au creusement risque de croître avec la profondeur d'implantation des ouvrages, du fait notamment d'une pression lithostatique plus élevée. En 2009, l'IRSN indiquait qu'il sera alors indispensable de s'appuyer sur des modèles numériques validés par rapport aux observations *in situ* pour préciser cet endommagement et déterminer s'il nécessite une adaptation des concepts retenus dans le Dossier 2009. L'IRSN concluait qu'en l'absence de progrès suffisants réalisés d'ici 2015, il conviendrait que l'Andra retienne, dans l'évaluation de sûreté qui sera présentée dans le dossier accompagnant la DAC, l'approche prudente présentée dans le Dossier 2005 qui consiste à considérer une zone endommagée non cicatrisée. Ce point sera réexaminé au regard des nouvelles connaissances apportées par l'Andra dans le Référentiel de site dont l'instruction est actuellement en cours en vue d'une réunion du Groupe Permanent fin 2013.

II.2.2.2 TOPOGRAPHIE DES HORIZONS DU CALLOVO-OXFORDIEN

Les horizons sismiques pointés dans le Callovo-Oxfordien sur la sismique 3D de 2010 présentent un pendage général de 1,1° (1,8%) vers le NW, conforme aux connaissances préexistantes. En outre, l'Andra indique la présence de « variations de pendages avec des gradients orientés approximativement NE-SW » ([5]) non attribuables à des corrections statiques ou au dispositif d'acquisition.

L'IRSN observe, sur les cartes isohypses du mur et du toit du Callovo-Oxfordien, l'existence d'une zone plus basse sur une étendue d'environ 2 km de large et 3-4 km de long. Cet affaissement présente un allongement approximativement N-S. Le dénivelé atteint 20 m sur une grande partie de cet affaissement. L'IRSN constate que cette zone est située à l'aplomb de l'affaissement du Trias attribué à une dissolution de sel du Keuper (section

II.2.1.3), et qu'il est également présent dans les horizons intermédiaires du Dogger (environ 15 m au mur des Marnes de Longwy) et du Lias (cf. Figure II-11), bien qu'il apparaisse moins clairement en raison de la présence des anomalies N120° (Figure II-12). L'anomalie N-S identifiée par l'IRSN au niveau de l'horizon poreux HP4 de l'Oxfordien calcaire (voir section II.2.1.1) est également située dans ce secteur, à l'aplomb de la bordure ouest de cet affaissement.

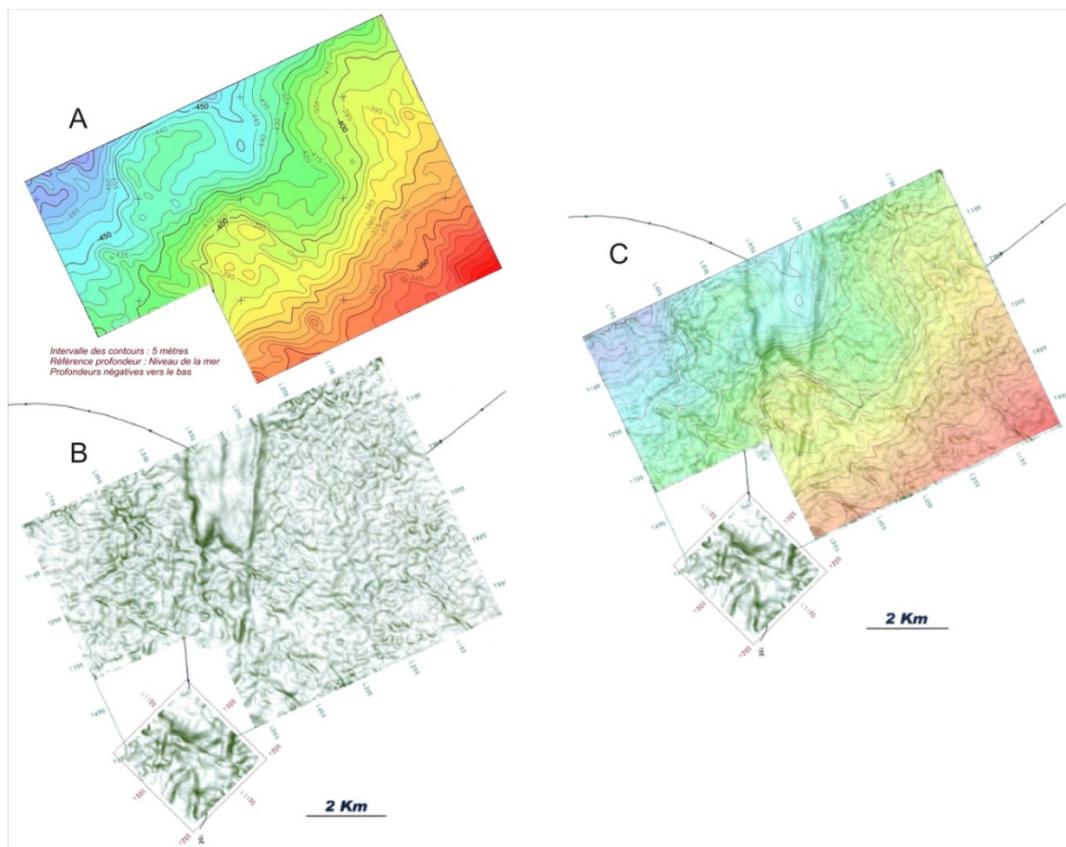


Figure II-9 : A- carte isohypse du mur des Marnes de Longwy ; B- carte en attribut de pendage du toit de la Dolomie de Beaumont ([5]) ; C : superposition des cartes.

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que cet affaissement résulte d'un artéfact, qui a pour origine une variation latérale de vitesses dans la zone altérée en surface (non corrigée) ou plus en profondeur.

L'IRSN convient que même si son ampleur varie, cette anomalie apparaît sur toutes les cartes isochrones, ce qui pourrait effectivement signifier un problème de corrections statiques. Cette incertitude sur l'origine d'un tel affaissement pourrait donc être levée par un test de l'influence du modèle de corrections statiques, en le complétant éventuellement par d'autres acquisitions telles que celles de sismique réfraction (cf. section II.1.2.2). En outre, l'IRSN rappelle qu'il existe une incertitude sur la topographie réelle de l'horizon qui a principalement servi à caler la conversion temps-profondeur de la sismique (toit des Calcaires Blancs, cf. chapitre II.1.2.4).

L'IRSN rappelle également que les cartes isohypses transmises par l'Andra pour la présente instruction sont construites à partir de la première méthode de construction du modèle de vitesse pour la conversion en profondeur et non celle finalement retenue par l'Andra ; les observations faites sur ces cartes pourraient ne pas être directement transposables aux cartes qui seraient produites avec la méthode de « krigeage bayésien ». L'Andra a effectivement précisé, lors de la réunion préparatoire, que « ces nouvelles cartes montrent clairement qu'il s'agit d'un artéfact de conversion [en profondeur] puisque cette dépression n'apparaît pas sur ces cartes ».

L'IRSN rappelle, comme indiqué au chapitre II.1.2.2, que l'Andra s'est engagée à présenter ces nouvelles cartes isohypses avant la fin du premier semestre 2013 (E 3.1, cf. Annexe A2).

A ce stade, l'IRSN retient deux explications possibles pour expliquer cette zone basse : soit l'affaissement résulte d'un artéfact de correction des vitesses (de surface ou non) et le Callovo-Oxfordien ne présente pas de structuration autre qu'un pendage uniforme vers le centre du bassin de Paris, soit le mécanisme à l'origine de l'affaissement observé dans les niveaux du Lias-Trias (cf. section II.2.1.3) a repris après le dépôt des couches mésozoïques et la configuration du Callovo-Oxfordien observée sur la sismique est donc réelle.

Dans le cas éventuel où cette géométrie serait réelle, l'affaissement aurait eu lieu après le dépôt de la couche du Kimméridgien supérieur puisqu'elle est également affectée par ces ondulations. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer cet affaissement, tels qu'une reprise de la dissolution du sel du Trias lors d'un épisode tectonique du Cénozoïque mobilisant des fluides, ou une faible réactivation des failles du Trias avec propagation vers le haut.

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que « l'hypothèse d'une dissolution du sel postérieure aux dépôts des terrains sus-jacents et affectant le Callovo-Oxfordien devrait se traduire mécaniquement par l'apparition d'un cône d'influence s'évasant progressivement en remontant la série, avec concomitamment, une diminution de la hauteur de la dépression ». L'IRSN convient que l'hypothèse d'une reprise de la dissolution du sel du Trias ne peut pas, à elle seule, rendre compte de l'affaissement observé, de même ampleur et de même largeur sur toute la colonne stratigraphique. En revanche, l'existence de failles sub-sismiques (i.e., dont le rejet vertical est inférieur à la limite de détection de la sismique) à dominante décrochante pourrait rendre compte de cette observation, à l'image du fossé de Gondrecourt tel que mentionné dans la section II.2.1.3.

Sur les possibilités émises par l'IRSN de poursuite de l'affaissement dans le futur, l'Andra a précisé au cours de l'instruction qu'« en supposant par convention que la dissolution du sel au Cénozoïque soit effectivement à l'origine de l'ondulation du Callovo-Oxfordien (environ 20m de dénivelé), et en prenant l'hypothèse d'un phénomène apparu depuis la phase de distension oligocène (il y a environ 30 Ma), responsable de l'ouverture des fractures, l'affaissement supplémentaire au niveau du stockage serait au plus d'un demi-mètre dans le prochain million d'années ». L'IRSN observe que cette estimation repose sur l'hypothèse d'un affaissement continu pendant 30 Ma, alors qu'il n'est pas exclu qu'il se soit déroulé au cours d'un épisode tectonique plus court. Il conviendrait donc que cette estimation soit consolidée.

L'Andra a indiqué au cours de l'instruction que l'architecture de l'installation de stockage présentée dans le Dossier 2009 reste compatible avec l'existence actuelle d'un tel affaissement, compte tenu des exigences retenues, notamment de l'épaisseur minimale de garde verticale de 60 mètres de part et d'autre des alvéoles de stockage et de l'objectif d'une pente des alvéoles inférieure ou égale au pendage de la couche du Callovo-Oxfordien, d'environ 1,5 % : « en admettant une pente constante des galeries de stockage, la garde verticale (i.e. la distance du toit des ouvrages à la limite de la formation moins l'incertitude maximale sur l'épaisseur, soit $\pm 12/2 = 6m$) reste cependant toujours au moins égale à 60 mètres, même au droit des ondulations, dont l'amplitude est de l'ordre de 5 m ».

Comme indiqué ci-avant, l'IRSN constate sur les cartes isohypses à sa disposition que l'amplitude maximale de cette ondulation atteint 20 m et non pas 5 m. Si cette amplitude est confirmée sur les nouvelles cartes isohypses que l'Andra s'est engagée à transmettre (E 3.1, cf. Annexe A2), il n'apparaît pas possible de maintenir à la fois une pente régulière des galeries et une garde verticale minimale de 60 m de part et d'autre de ces galeries (Figure II-13) dans la zone concernée. L'IRSN s'interroge en outre sur l'impact que pourrait produire le creusement de

galeries recoupant obliquement des couches lithologiques sur la roche hôte (EDZ). Toutefois, au vu de l'architecture d'ensemble du stockage actuellement retenu par l'Andra, celle-ci devrait pouvoir être adaptée pour tenir compte de cet affaissement si celui-ci est confirmé.

Dans le cas où il ne pourrait pas être certain qu'un artefact soit à l'origine de cette zone affaissée, il conviendra de vérifier la topographie ainsi que le caractère mineur d'un éventuel endommagement tectonique du Callovo-Oxfordien.

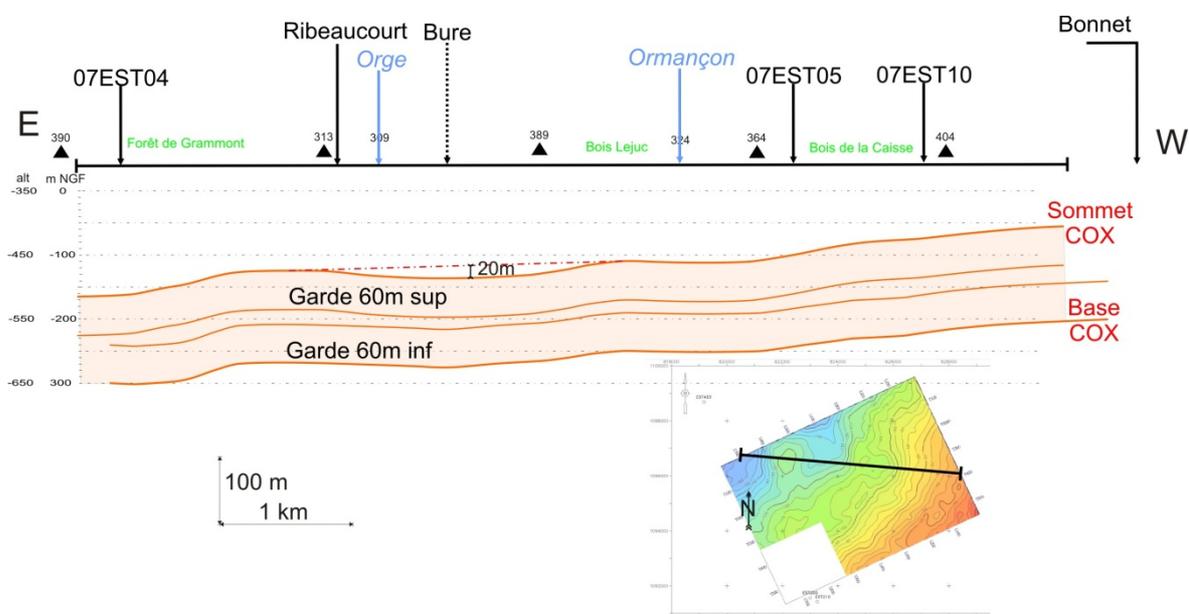


Figure II-10 : Coupe E-W du Callovo-Oxfordien sur la ZIRA déduite des cartes isohypses du mur et du toit du Callovo-Oxfordien (IRSN, d'après [5]). Échelle verticale exagérée 5 fois. Localisation de la coupe sur la carte isohypse de l'horizon S2 du Callovo-Oxfordien.

II.2.3 CONCLUSIONS SUR LES STRUCTURES IDENTIFIEES

L'IRSN considère que la campagne de sismique 3D de 2010, au regard de l'état des connaissances préexistantes, apporte notamment une meilleure connaissance des structures et de leur agencement dans la pile sédimentaire à l'aplomb de la ZIRA. Ces études mettent en évidence deux ensembles principaux d'indices sismiques, l'un orienté N120° et localisé du Bajocien au Lias dans une large partie Sud de la ZIRA, l'autre orienté N-S et traversant l'ensemble des formations investiguées dans la moitié Nord centrale.

S'agissant de la structuration N120°, l'IRSN convient de sa nature récifale dans le Bajocien et note que l'Andra s'est engagée (E 3.3, cf. Annexe A2) à présenter une analyse des propriétés globales de transport de ces corps récifaux du Bajocien et leur éventuel rôle dans le modèle hydrogéologique (cf. partie II.4). L'IRSN considère toutefois qu'il subsiste un doute sur la structuration observée dans les formations sous-jacentes dans l'alignement de ces corps récifaux, qui pourrait correspondre à un artefact de la méthode ou à des failles sub-sismiques.

S'agissant de la structuration N-S, des failles N-S identifiées dans le Trias, en bordure d'une zone de dissolution du sel du Keuper, sont accompagnées d'indices sismiques ayant la forme d'un affaissement au niveau de tous les horizons au-dessus de ces failles, ainsi que d'un linéament N-S identifié sous le cours de l'orge dans l'Oxfordien calcaire. Bien qu'il soit possible que ces indices affectant les couches sus-jacentes au Trias aient pour origine un problème de traitement sismique, l'IRSN considère que l'hypothèse alternative d'une origine tectonique

commune, par exemple une réactivation des failles N-S du Trias, avec une propagation ascendante avec un faible rejet vertical et/ou une reprise de la dissolution du sel du Keuper, ne peut actuellement pas être écartée.

L'absence d'observation de décalage détectable dans la formation du Callovo-Oxfordien et dans ses encaissements, permet d'exclure l'existence de structures de dimensions telles qu'elles seraient rédhibitoires pour l'implantation d'un stockage. Compte tenu de la sensibilité de la méthode, la présence de failles de très faible rejet (sub-sismiques) ne peut pas définitivement être exclue. Ce type de structure est toutefois peu susceptible d'affecter notablement les caractéristiques favorables de confinement du Callovo-Oxfordien et peut en tout état de cause être identifié lors de la reconnaissance à l'avancement du creusement du stockage afin d'adapter si nécessaire l'implantation des ouvrages de stockage.

Si les structurations sismiques identifiées correspondaient à des structures tectoniques, il convient de s'interroger sur la possibilité de leur réactivation et de leur propagation future dans le Callovo-Oxfordien, ainsi que sur leur potentiel sismogène. Sur le premier point, l'IRSN considère que les anomalies N120° n'ont montré aucun indice de propagation ascendante depuis 170 Ma, âge des récifs sus-jacents à ces anomalies. Aussi, il apparaît très peu probable qu'une réactivation puisse affecter le Callovo-Oxfordien. Pour ce qui concerne les structurations N-S, les travaux réalisés par l'IRSN (e.g., Roche, 2011 ; Rocher et al., 2012) sur les propriétés d'amortissement des formations argileuses tendent à montrer à ce stade qu'une réactivation en failles normales des failles identifiées dans le Trias ne serait probablement pas de nature à induire des perturbations significatives de la formation hôte. Ces résultats restent néanmoins au stade de la recherche et sont à consolider, notamment pour ce qui concerne les rejeux en décrochement de structures. A ce titre, l'IRSN considère que l'Andra devrait, par précaution, retenir dans son évaluation de sûreté de l'installation de stockage, un scénario comprenant une ou plusieurs structures tectoniques traversant le Callovo-Oxfordien (scénario de type « *what-if* »), notamment à l'aplomb des failles identifiées dans le Trias, afin d'évaluer la robustesse du stockage vis-à-vis d'une telle hypothèse.

S'agissant du potentiel sismogène des failles, l'Andra s'est engagée, à la suite de la réunion préparatoire, à vérifier le caractère enveloppe du spectre sismique retenu pour la phase de post-fermeture vis-à-vis de séismes physiquement plausibles à l'aplomb de la ZIRA (engagement E 3.2, cf. Annexe A2), ce qui est satisfaisant.

R 5

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, au plus tard dans le dossier accompagnant la DAC :

- présenter une interprétation consolidée des indices sismiques observés sous les corps récifaux du Bajocien et au-dessus des failles identifiées dans le Trias,
- présenter, en cohérence avec les connaissances ainsi actualisées, une stratégie de reconnaissance des caractéristiques structurales du Callovo-Oxfordien, notamment à l'avancement du creusement des ouvrages du stockage, ainsi qu'une stratégie d'implantation des ouvrages de stockage,
- inclure, dans l'évaluation de sûreté qui sera présentée dans le dossier précité, un scénario permettant d'estimer l'impact d'une ou plusieurs structures tectoniques dans le Callovo-Oxfordien notamment à l'aplomb des failles identifiées dans le Trias même si la vraisemblance d'un tel scénario pourrait être considérée comme faible.

L'Andra s'est engagée, à la suite de la réunion préparatoire, sur les deux premiers points ci-avant (engagement E3.3, cf. Annexe A2).

II.3 INVERSION STRATIGRAPHIQUE DE LA SISMIQUE 3D

II.3.1 OBJECTIFS, CONVERSION EN IMPEDANCES ET INCERTITUDES ASSOCIEES

Les objectifs retenus par l'Andra pour l'inversion stratigraphique qu'elle a réalisée sont ([5]) :

- d'obtenir une caractérisation fine des propriétés hydrodynamiques des aquifères encaissants (Bathonien et Oxfordien calcaire), en support aux modélisations hydrogéologiques : définition de la géométrie des corps sédimentaires, caractérisation (extension, propriétés) des horizons poreux ;
- de contribuer à la connaissance de la variabilité des couches intermédiaires entre la couche hôte et ses encaissants inférieur (intervalle LSO entre le toit du Dogger et le mur de la couche) et supérieur (couche C3a-C3b).

Ces objectifs n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.

A partir de l'amplitude des ondes sismiques, il est possible de remonter à l'impédance sismique (produit de la vitesse des ondes sismiques et de la masse volumique) des différentes couches géologiques, par une technique d'inversion (cf. Annexe T2). La première étape du traitement réalisé par l'Andra a consisté à évaluer les impédances des ondes P (ondes de compression) dites « IP » et des ondes S (ondes de cisaillement) dites « IS », au niveau des forages de calage EST210, EST412 et EST433 à partir des diagrames (enregistrement en continu dans les forages) de vitesses des ondes P et S et de densités. Sur cette base, les profils sismiques 2D reliant ces forages à la ZIRA (« antennes 2D », cf. Figure II-2) ont été inversés. Des inversions acoustique (ondes P) et élastique (ondes P et S) de la sismique 3D de 2010 ont ensuite été réalisées en utilisant les impédances sismiques déduites de ces profils sismiques 2D en certains points de la ZIRA.

En complément de ces inversions élastique et acoustique effectuées de manière déterministe, l'Andra a réalisé une inversion acoustique selon une approche stochastique (inversion statistique intégrant des phénomènes aléatoires) afin de contribuer à l'estimation de l'incertitude sur les valeurs d'impédances issues des inversions.

L'Andra a déterminé, au niveau des forages de calage, des relations empiriques entre les impédances sismiques et l'argilosité pour le Callovo-Oxfordien et entre les impédances sismiques et la porosité pour les encaissants calcaires. Les blocs 3D en impédances sismiques ont ainsi été convertis en des « cubes » d'argilosité et de porosité, afin d'apprécier la variabilité spatiale de ces paramètres. Une analyse géostatistique (statistique sur les données géologiques) a également été menée afin d'évaluer les incertitudes associées à ces paramètres.

L'IRSN observe que les inversions sont calées sur des données acquises dans des forages situés à l'extérieur de la ZIRA et sont donc peu contraintes. Les valeurs d'incertitude sur les impédances qui peuvent être déduites de l'inversion « stochastique » ne sont pas exposées mais les illustrations présentées permettent à l'IRSN d'estimer ces incertitudes à 10-30 %. En outre, les incertitudes sur les impédances liées à l'inversion élastique ont été estimées par l'Andra à environ 10 %. Les cartes d'incertitude relative présentées (cf. Figure II-14) informent sur les variations spatiales de ces incertitudes : de manière générale, elles sont plus faibles dans le Dogger que dans l'Oxfordien calcaire, et plus importantes (13%) dans le Callovo-Oxfordien. L'Andra a en outre précisé au cours de l'instruction que les variations relatives d'impédance sont maîtrisées, contrairement aux valeurs absolues des impédances, et que cela permet d'apprécier les variations de porosité, ce dont convient l'IRSN.

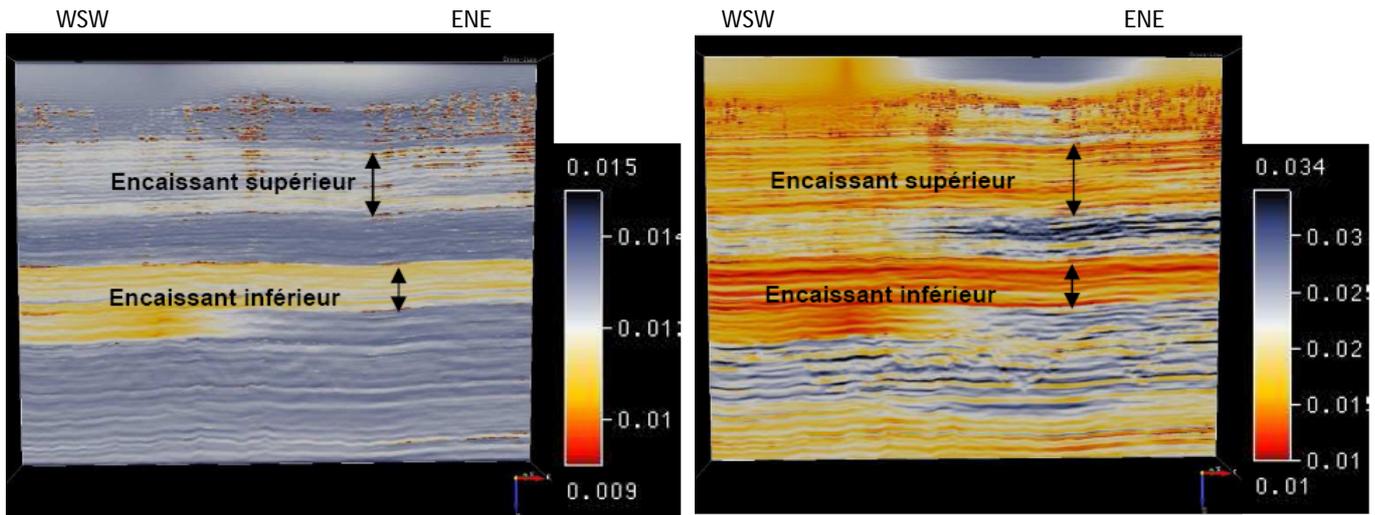


Figure II-11 : Incertitude relative sur IP (à gauche) et sur IS (à droite), le long du profil Crossline 278 de la sismique 3D (en 10^{-3} %).

II.3.2 ESTIMATION DE LA POROSITE DES ENCAISSANTS ET DE L'ARGILOSITE DU CALLOVO-OXFORDIEN

II.3.2.1 POROSITES

L'Andra a réalisé trois études pour estimer les porosités des encaissants du Callovo-Oxfordien, en utilisant des relations différentes entre impédance P et porosité (totale ou effective¹) mesurées dans les forages de calage. Dans la première étude, une relation unique entre IP et porosité totale est établie pour l'ensemble des calcaires « sains » (volume d'argiles < 6%) du Dogger et de l'Oxfordien calcaire. Dans la seconde étude, deux relations différentes entre IP et porosité totale sont établies pour l'Oxfordien calcaire et le Dogger. La troisième étude établit quatre relations différentes entre IP et porosité effective pour chacune des parties supérieure et inférieure du Dogger et de l'Oxfordien calcaire.

La Figure II-12 montre une coupe extraite du cube de porosité effective déduit de la dernière étude, que l'IRSN considère parmi les trois précitées comme la plus aboutie. L'Andra constate en particulier l'existence d'une zone de plus faible porosité à la base de la partie inférieure de l'Oxfordien calcaire et d'un intervalle de forte porosité sous le toit du Dogger. Pour ce dernier, localisé dans le Bathonien supérieur, une carte des amplitudes sismiques permet d'observer la répartition spatiale des zones les plus poreuses : deux bandes de forte porosité, de 1 à 2 km de large et de direction NE-SW, traversent ainsi la ZIRA. L'Andra indique que le niveau poreux inférieur du Bathonien, reconnu dans certains forages de la zone de transposition, n'est pas identifié par la sismique 3D en raison de sa faible épaisseur. L'IRSN note que la sismique n'a pas non plus permis d'identifier les marnes de la Série Grise (Oxfordien supérieur ; Figure II-3) qui séparent les horizons poreux de l'Oxfordien, pour la même raison (épaisseur de 5 m dans le forage EST433 et inférieure dans EST210 et EST205). L'IRSN estime que cette absence d'identification confirme la faible épaisseur attendue de ces couches.

¹ La porosité effective ou efficace (Castany, 1961) est le rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet (égouttage en laboratoire sur échantillon), à son volume total.

De manière générale, l'IRSN estime que le cube de porosité obtenu n'est pas suffisamment exploité par l'Andra. En particulier, l'Andra ne précise pas à quoi correspond cette zone de plus faible porosité au sein de la partie inférieure de l'Oxfordien calcaire et ne replace pas le cube de porosité obtenu dans le contexte des horizons poreux déjà identifiés dans cette formation. Or, l'IRSN considère comme l'Andra que l'inversion est susceptible de fournir des informations importantes sur les variations latérales et verticales de la porosité effective dans les encaissants calcaires du Callovo-Oxfordien. Ce point est repris dans la section II.3.3 relative aux perspectives d'utilisation des résultats de l'inversion stratigraphique.

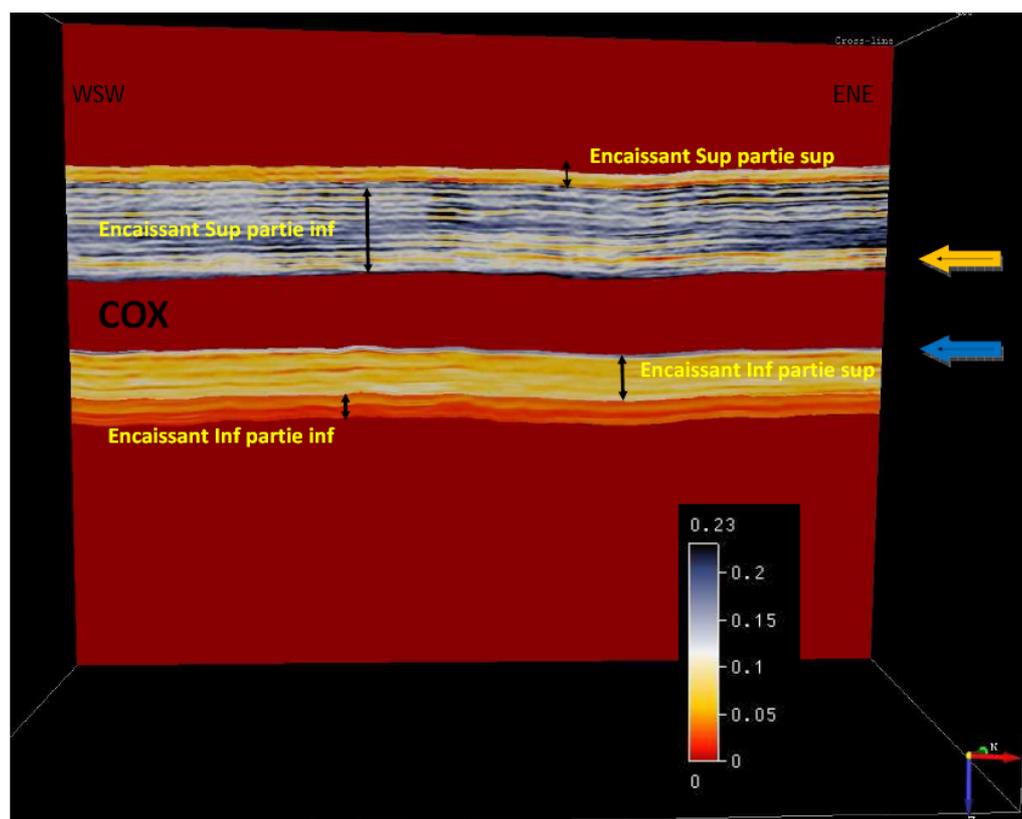


Figure II-12 : Porosité effective dans les encaissants sur le profil Crossline 278 de la sismique 3D en temps double. Flèche orange : zone de plus faible porosité au sein de la partie inférieure de l'Oxfordien calcaire ; flèche bleue : intervalle de forte porosité au sein de la partie supérieure du Dogger.

L'Andra a utilisé plusieurs méthodes pour déterminer l'incertitude sur la porosité effective dans les encaissants supérieurs et inférieurs.

L'IRSN observe que l'ensemble des analyses effectuées (i.e., les régressions linéaires à partir desquelles sont établies les relations entre IP et porosité effective et les méthodes pour déterminer l'incertitude sur la porosité effective) ont été effectuées sur un très petit nombre de données, mais que les incertitudes sur la porosité estimées par les différentes méthodes sont proches. L'IRSN constate que ces incertitudes sont très fortes (jusqu'à 94 % de la valeur) dans la partie supérieure du Dogger, et fortes dans la partie inférieure de l'Oxfordien calcaire alors qu'il s'agit des parties les plus importantes à caractériser pour le stockage car les plus proches de la roche hôte et renfermant presque tous les aquifères des encaissants calcaires.

II.3.2.2 ARGILOSITE

Une étude de conversion de l'impédance en argilosité (teneur en argile) a été réalisée par l'Andra pour le Callovo-Oxfordien. Les relations entre impédance P et S et argilosité sont définies au niveau des forages de calage pour les intervalles entre les horizons S2 et S2b, S1 et S2, LS0 et S1. Les teneurs en argile mesurées par analyse minéralogique sur échantillons sont utilisées pour la calibration du calcul du volume d'argile déduit de la diagraphie Gamma Ray. Sur la base des résultats issus des inversions acoustiques et élastiques, des cubes d'argilosité sont générés pour le Callovo-Oxfordien (cf. coupes en Figure II-13). L'Andra conclut que, sur la ZIRA ([5]) :

- « aucune variation latérale rapide de l'impédance acoustique n'est observée dans les unités ;
- la séquence médiane (unités UA2=IMA [intervalle de maximum d'argilosité], UA3, UT, USC1 [cf. Figure II-3]) présente l'impédance acoustique la plus constante latéralement, les faibles variations observées sont cohérentes avec la répartition des silts dans les unités supérieures de la séquence (au-dessus de l'IMA) ;
- la séquence inférieure montre une légère diminution, régulière, de l'impédance vers le Nord-Est ».

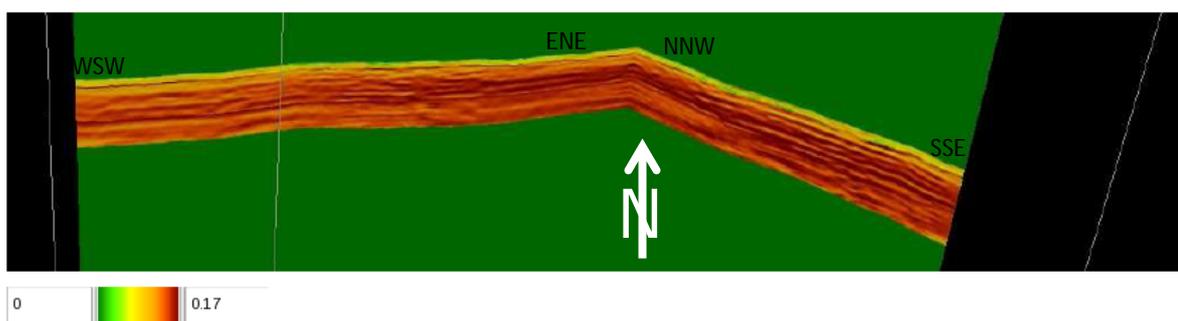


Figure II-13 : Argilosité dans le Callovo-Oxfordien (LS0-S2b) sur les profils inline 200 (WSW-ENE) et crossline 100 (NNW-SSE) de la sismique 3D en temps double.

L'IRSN conclut comme l'Andra que l'impédance acoustique, qui présente une bonne corrélation avec l'argilosité, peut permettre d'accéder à une visualisation 3D des différentes unités du Callovo-Oxfordien et des variations latérales d'argilosité.

L'Andra évalue les incertitudes relatives associées à l'estimation de l'argilosité par une méthode classique (intervalles de confiance à 95 %) à 8-10 % entre S1 et LS0 et 12-30 % entre S1 et S2 (Figure II-14). L'IRSN estime que la quantification de cette argilosité, bâtie sur des relations empiriques entre impédance et argilosité au niveau de quelques forages, doit être considérée avec précaution en raison des incertitudes résiduelles significatives.

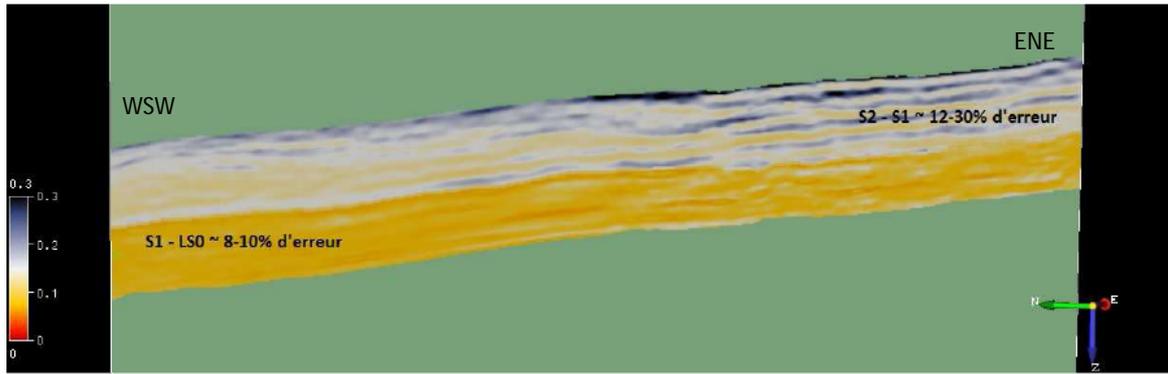


Figure II-14 : Incertitude sur l'argilosité dans le Callovo-Oxfordien.

II.3.3 CONCLUSIONS : PERSPECTIVES D'UTILISATION DES RESULTATS DE L'INVERSION STRATIGRAPHIQUE

Compte tenu de l'ensemble des éléments relatifs à l'inversion stratigraphique présentés ci-avant, l'IRSN considère comme l'Andra que l'inversion stratigraphique permet de mieux apprécier les variations latérales de porosité ou d'argilosité dans chaque unité lithologique sur la ZIRA, ainsi que la géométrie de ces unités. Cette méthode non destructive est donc d'une utilité certaine pour acquérir des connaissances sur les zones situées entre forages. En particulier, la visualisation 3D de la porosité au sein des encaissants du Dogger et de l'Oxfordien apporte des informations sur la position verticale des zones potentiellement aquifères, l'ordre de grandeur des variations de porosité en leur sein et leur répartition horizontale.

Aussi, l'IRSN considère que, bien que la méthode de quantification de la porosité et d'argilosité n'apparaisse pas suffisamment robuste pour que les valeurs absolues qui en sont extraites soient exploitées directement comme données d'entrée à la modélisation du transport de solutés dans le cadre de l'évaluation de la sûreté d'une installation de stockage, l'exploitation des cubes de porosité et d'argilosité mérite selon l'IRSN d'être poursuivie afin d'améliorer la représentation de l'agencement 3D des corps sédimentaires pour l'élaboration du modèle conceptuel de site.

A cet égard, l'Andra a indiqué lors de la réunion préparatoire qu'elle rejoint l'IRSN sur ce point et a précisé qu'elle « n'a pas eu l'intention d'utiliser le modèle 3D habillé en propriétés pétrophysiques tirées de l'inversion stratigraphique comme données d'entrée des modélisations pour l'évaluation de la sûreté de l'installation de stockage ».

II.4 PRISE EN COMPTE DES RESULTATS DE LA SISMIQUE 3D DANS LE MODELE CONCEPTUEL DE SITE

La prise en compte des résultats de la sismique 3D de 2010 dans le modèle conceptuel de site élaboré par l'Andra est examinée ci-après en termes de géométrie du Callovo-Oxfordien (variations de pendage, profondeur et épaisseur), de variabilité lithologique au sein de chaque unité de la roche hôte et de ses encaissants ainsi qu'en termes de localisation des éventuelles failles au sein de la ZIRA.

Pour ce qui concerne le Callovo-Oxfordien, l'IRSN constate que les connaissances acquises par la sismique 3D de 2010 sur l'épaisseur et la profondeur du Callovo-Oxfordien dans la ZIRA ne sont pas intégrées dans le modèle conceptuel de site. En outre, il n'est pas fait mention du caractère potentiellement non uniforme de la topographie des horizons du Callovo-Oxfordien tel que constaté sur la sismique 3D (zone affaissée). En revanche, la confirmation par la sismique 3D du biseautage de l'unité de transition inférieure du Callovo-Oxfordien vers le Sud-Ouest est bien intégrée. Pour le sommet du Callovo-Oxfordien, la transition vers l'Oxfordien inférieur est peu marquée en sismique, ce qui est cohérent avec le fait que cette transition corresponde à un passage graduel de l'Oxfordien inférieur argilo-marneux aux calcaires de l'Oxfordien moyen. Enfin, les résultats de l'inversion stratigraphique en argilosité du Callovo-Oxfordien, en termes de variations latérales dans chacune des unités, ne sont pas intégrés dans le modèle de site.

Pour ce qui concerne l'Oxfordien calcaire, les structures identifiées dans l'Oxfordien moyen sur la sismique 3D, interprétées comme un cordon récifal et des lobes installés en rupture de pente, qui séparent une zone de plateforme avec un horizon supplémentaire, sont mentionnées dans le modèle conceptuel. En revanche, les connaissances acquises par la sismique 3D en termes de porosité dans l'Oxfordien calcaire (variabilité lithologique) ne sont pas intégrées dans ce modèle.

Pour le Dogger, les résultats de l'inversion stratigraphique de la sismique en porosité sont présentés pour le Bathonien supérieur, en termes d'agencement horizontal et vertical du niveau poreux. En outre, les formations récifales alignées N120° identifiées dans le Bajocien sur la sismique 3D de 2010 sont intégrées dans le modèle conceptuel. En revanche, l'IRSN remarque qu'il n'est pas fait mention des anomalies sismiques sous les formations récifales et rappelle (cf. section II.2.1.2.2) qu'en l'absence d'une démonstration étayée de l'effet des formations récifales sur l'imagerie sismique sous-jacente, ces structures ne peuvent pas être considérées comme des artefacts.

Enfin, pour le Lias-Trias, les structures identifiées par sismique 3D dans l'intervalle Dolomie de Beaumont-base du Lias sont intégrées dans le modèle conceptuel, de même que l'interprétation de leur origine, à savoir une infiltration d'eau météoritique jusqu'au toit de la couche de sel au cours du dépôt des marnes irisées supérieures, ayant entraîné une dissolution du sel, comblées par les marnes.

Pour ce qui concerne l'existence de failles au sein de la ZIRA, le modèle conceptuel de site précise qu'aucune faille n'a été détectée par la sismique 3D de 2010 et conclut, sur la base de la résolution de la sismique, que « *le rejet maximal qui n'aurait pas été détecté sur la ZIRA est [...] de l'ordre de 2 m* ». L'IRSN a précédemment indiqué dans la section II.2.1.2 que cette affirmation pourrait être nuancée, notamment pour le Bajocien (Dogger inférieur) et le Lias. En outre, cette conclusion n'est pas valable pour le Trias, dans lequel des failles de rejet d'ordre décimétrique ont été identifiées (section II.2.1.3).

En conclusion, l'IRSN estime que le modèle conceptuel intègre correctement certains des enseignements tirés de la sismique 3D de 2010, en particulier les structures sédimentaires et tectoniques identifiées. Cependant il serait nécessaire de compléter cette intégration par la mise à jour de géométrie du Callovo-Oxfordien n'est pas réalisée. En outre, si les résultats de l'inversion de la sismique en argilosité pour le Callovo-Oxfordien et de porosité pour les encaissants calcaires nécessitent d'être pris avec précaution pour ce qui concerne les valeurs absolues obtenues, la visualisation en 3D de la répartition spatiale de ces paramètres apporte des connaissances qu'il convient d'intégrer dans le modèle conceptuel du site de Meuse/Haute-Marne.

Aussi, l'IRSN considère que l'Andra devra, dans le dossier accompagnant la DAC, présenter une actualisation du modèle conceptuel du milieu géologique du site de Meuse/Haute-Marne qui tiendra compte de l'ensemble des résultats acquis à cette échéance et des incertitudes associées. Cette actualisation devra en particulier tenir compte des remarques formulées dans le présent avis relatives à l'analyse des propriétés globales de transport des corps récifaux du bajocien, à l'interprétation des anomalies sismiques identifiées dans les encaissants du Callovo-Oxfordien.

Ce point a fait l'objet d'un engagement de la part de l'Andra (E 3.3, cf. Annexe A2).

III CONCLUSION

S'agissant des résultats de la campagne de sismique 3D de 2010 sur la ZIRA, l'IRSN considère que l'acquisition des données sismiques est de bonne qualité et devrait permettre d'améliorer la connaissance de la géométrie et de la variabilité lithologique des couches géologiques, ainsi que d'identifier les éventuelles structures détectables par cette méthode. Les résultats confirment globalement, aux incertitudes près, une épaisseur du Callovo-Oxfordien supérieure à 140 m et une profondeur de son niveau médian inférieure à 600 m sur la quasi-totalité de la ZIRA. La sismique n'a pas révélé de structures de dimensions telles qu'elles seraient rédhibitoires pour l'implantation d'un stockage. Seuls des indices sismiques orientés N120° en-dessous des récifs identifiés dans le Bajocien ainsi que orientés N-S au-dessus des failles identifiées dans le Trias ont été observés. Aussi, le traitement des données sismiques mérite d'être poursuivi en vue de statuer sur l'interprétation de ces indices.

Il apparaît très peu probable, si les indices précités correspondaient à des structures tectoniques, que la propagation de ces structures soit de nature à induire des perturbations significatives de la formation hôte. Aussi, les connaissances acquises par la campagne de sismique 3D de 2010 ne remettent pas en cause, selon l'IRSN, le caractère favorable de la ZIRA au regard des critères retenus par l'Andra pour l'implantation d'un stockage géologique dans cette zone, en termes d'épaisseur et de profondeur du Callovo-Oxfordien ainsi que de caractéristiques structurales.

Néanmoins, l'IRSN estime que l'évaluation de sûreté de l'installation de stockage devra tenir compte des incertitudes résiduelles qui subsisteront inévitablement, compte tenu de la complexité du traitement des données sismiques et de l'interprétation qui peut en être faite. A ce titre, l'IRSN considère que l'Andra devrait, par précaution, retenir dans son évaluation de sûreté de l'installation de stockage, un scénario comprenant une ou plusieurs structures tectoniques traversant le Callovo-Oxfordien, notamment à l'aplomb des failles identifiées dans le Trias, afin d'évaluer la robustesse du stockage vis-à-vis d'une telle hypothèse. En outre, il conviendra que l'aléa sismique qui sera retenu dans cette évaluation de sûreté tienne compte des incertitudes résiduelles relatives aux caractéristiques structurales de la zone investiguée.

REFERENCES

- [1] Rapport IRSN/DSU n°106
- [2] Avis IRSN 2009-166 du 22 décembre 2009
- [3] Modèle conceptuel du milieu géologique - site de Meuse/Haute-Marne C.RP.ADSD.09.0005 Indice C
- [4] Rapport Final: Interprétation des structures observées sur les blocs sismiques 3D 1999 et 2010. Andra D.RP.OBEI.11.0003 indice A
- [5] Projet Cigéo - Synthèse de l'interprétation de l'étude sismique 3D sur la ZIRA. Andra D.RP.ASMG.11.0104 indice B
- [6] Inventaire National des matières et déchets radioactifs 2012 - Andra
- [7] Jalon 2009 HA-MAVL - Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. Andra C.NT.ASSN.09.0029.B
- [8] Site de Meuse/Haute-Marne. Sismique 3D après retraitement 2002. Rapport d'interprétation géologique et structural. Andra C.RP.OBEI.03.002.A
- [9] Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 - Centre de Meuse/Haute-Marne. Andra D.RP.ALS.08.1356.B
- [10] Forages de reconnaissance de la formation - Synthèse FRF - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Andra D RP ADPE 04 1245/B -
- [11] Référentiel du site Meuse/Haute-Marne (3 tomes). Andra C.RP.ADS.A09.0007.B
- [12] Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne (Présentation générale, 3 Tomes, Annexe). Andra C.RP.ADS.04.0022.A
- [13] Jalon 2009 HA-MAVL - Stockage réversible profond - Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface. Andra C.RP.ADP.09 0035/A

Références bibliographiques

- Achiedo G., 2012. Étude de la fracturation du Dogger de l'Est du bassin de Paris. Rapport MASTER1-Sciences de la Terre et de l'Univers, Univ. Paris Sud.
- Bourquin S., Guillocheau F., 1996. Keuper stratigraphic cycles in the Paris basin and comparison with cycles in other peritethyan basins (German basin and Bresse-Jura basin). *Sedimentary Geology*, Vol. 105, 3-4, p. 159-182.
- Brigaud B., 2009. Influence du contexte sédimentaire et de la diagenèse sur les propriétés pétrophysiques du Dogger calcaire de l'est du bassin de Paris. Thèse Université de Bourgogne.
- Castany G., 1961. Méthodes d'études des nappes aquifères, AISH/IAHS publication n°56, 55-67.
- Giroux B., 2011. Méthodes sismiques
- Kim Y.-S., Sanderson D. J., 2005. The relationship between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Reviews* 68, p. 317-334.

- Mari J.-L., Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., 1999. Geophysics of reservoir and Civil Engineering Seismic signal and resolution. Institut français du pétrole Publications.
- Mari J.-L., Yven B., 2012. Depth geological model building: application to the 3D high resolution "Andra" seismic block. 5th International meeting on "Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement". Montpellier, October 22-25, 2012. O/08/1.
- Roche V., 2011. Architecture et croissance des failles dans les alternances argilo-calcaires - Exemples dans les alternances du Bassin du Sud-Est (France) et modélisation numérique. Thèse ISRN/IRSN-2011/150, 306 p.
- Rocher M., Cushing M.E., Lemeille F., Lozac'h Y., Angelier J., 2004. Intraplate paleostresses reconstructed with calcite twinning and faulting: improved method and application to the eastern Paris Basin (Lorraine, France). *Tectonophysics* 387 (2004) 1 -21.
- Rocher M., Roche V., Homberg C., 2012. Fault architecture and growth in clay-limestone alternations: insights from field observations in the SE Basin, France. 5th International meeting on "Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement". Montpellier, October 22-25, 2012. P/GL/LS/8.
- Savoie S., J. Cabrera, J.M. Matray, 2003. Propriétés hydrauliques des fractures simples dans un milieu argileux : le cas de la station IRSN de Tournemire (France). International Conference on Groundwater in Fractured Rocks, 15-19 September 2003, Prague.
- Soliva, R., Schultz, R., Benedicto, A., 2005. Three-dimensional displacement-length scaling and maximum dimension of normal faults in layered rocks. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16302, doi:10.1029/2005GL023007.

ANNEXES

ANNEXE A1 - LETTRE ASN CODEP-DRC-2012-045908 DU 29 AOUT 2012



**Direction des déchets,
des installations de recherche et du cycle**

REPUBLIQUE FRANCAISE

Paris, le 29 août 2012

N/Réf. : CODEP-DRC-2012-045908
Affaire suivie par : Marc OLIVIER/ Lydie EVRARD
Tél : 01 43 19 70 15 / 70.01
Fax : 01 43 19 71 66
Mél : marc.olivier@asn.fr / lydie.evrard@asn.fr

Le Directeur de l'Autorité de sûreté nucléaire
à
Monsieur le Président du Groupe Permanent
d'experts pour les déchets

Objet : Projet de stockage Cigéo – Examen des études remises depuis 2009

Réf. :

- 1/ Programme industriel de gestion des déchets (PIGD) et ses évolutions depuis le dossier 2009 ;
- 2/ L'étude remise par l'Andra dans le cadre du PNGMDR, relative aux études sur le comportement à long terme des combustibles usés en conditions de stockage.
- 3/ Résultats de la sismique 3D réalisée en 2010 et leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site, dossier reçu en mars 2012 ;

La loi de programme du 28 juin 2006, codifiée dans le code de l'environnement et relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, prévoit la poursuite des études et recherches sur le stockage réversible en couche géologique profonde « de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015 »

Le même article L.542-10-1 du code de l'environnement prévoit que le dépôt de la demande d'autorisation de création du centre soit précédé d'un débat public sur la base d'un dossier réalisé par l'Andra.

www.asn.fr
6, place du Colonel Bourgoin - 75572 Paris cedex 12
Téléphone 01 40 19 86 00 - Fax 01 40 19 86 69

L'ASN souhaite prendre position, en préalable au début du débat public prévu par la loi, sur les sujets suivants :

- Le programme industriel de gestion des déchets (PIGD) et ses évolutions, document transmis par l'Andra en février 2012 ;
- Le rapport remis par l'Andra en décembre 2011, dans le cadre du plan national de gestion des déchets et matières radioactifs (PNGMDR), relatif aux études sur le comportement à long terme des combustibles usés en conditions de stockage ;
- Les résultats de la sismique 3D réalisée en 2010 et leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site¹, dossier transmis par l'Andra en mars 2012.

J'ai l'honneur de demander l'avis du groupe permanent d'experts que vous présidez sur les dossiers précités en égard en particulier à

- L'examen de la pertinence des données de base (volume et typologie des colis, chroniques de stockage) retenues par l'Andra pour constituer l'inventaire des déchets fourni dans le dossier de PIGD en considérant également les réserves éventuellement retenues dans cet inventaire pour les déchets dont la filière définitive de stockage n'est pas encore arrêtée ;
- L'examen des résultats des études sur le comportement des combustibles en formation géologique profonde et leur incidence éventuelle sur la faisabilité de leur stockage au regard des options de conception présentées dans le « dossier 2005 argile », examiné par le groupe permanent lors des séances des 12 et 13 décembre 2005 ;
- Les résultats de sismique 3D au regard de la confirmation des caractéristiques favorables pour un stockage géologique de la zone reconnue, compte tenu des techniques employées, ainsi que leur prise en compte dans le modèle conceptuel de site.

Je vous prie de bien vouloir convier la division territoriale de Châlons-en-Champagne et la direction des déchets, des installations de recherche et du cycle aux travaux menés par le groupe permanent d'experts que vous présidez

Il serait souhaitable que le groupe permanent d'experts se réunisse au plus tard la première semaine de février 2013.

Le directeur général de l'ASN



Jean-Christophe NIEL

¹ Le modèle conceptuel du milieu géologique du site Meuse/Haute-Marne fournit une représentation des différents composants du milieu géologique, de leur organisation spatiale et de leurs propriétés.

ANNEXE A2 - LETTRE D'ENGAGEMENT ANDRA DC/DIR/13-0020 DU 22 JANVIER 2013



Châtigny-Malabry, le 22 JAN. 2013

Monsieur Pierre-Franck CHEVET
Président de l'Autorité de Sécurité Nucléaire

6, place du Colonel Bourgoin

75572 PARIS CEDEX 12

La directrice générale

Tél. 01 46 11 80 00

Affaire suivie par : Sylvie VOINIS

V/Réf :

N/réf : DC/DIR/13-0020

Objet : Instruction des documents relatifs au PIGD, aux résultats des études sur le comportement des combustibles usés en formation géologique profonde ainsi qu'aux résultats de sismique 3D : Engagements de l'Andra.

Monsieur le président,

Dans le cadre de l'instruction des documents cités en objet, vous trouverez en annexe à la présente les engagements que l'Andra propose de prendre sur les trois thématiques suivantes : PIGD, comportement des combustibles usés en formation géologique profonde, sismique 3D. Ces engagements ont fait l'objet d'échanges avec l'IRSN.

Le CEA a confirmé auprès de l'Andra la mise en cohérence du PIGD avec sa stratégie de gestion des combustibles usés lors de la prochaine révision du PIGD. L'engagement E.1.3 traduit cette confirmation.

Vous en souhaitant bonne réception, je vous prie d'agréer, Monsieur le président, l'expression de mes salutations distinguées.

Marie-Claude DUPUIS

Annexe : Engagements de l'Andra.

www.andra.fr

AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS
Siège social : 1-7, rue Jean-Henri-Léon, 42290 Châtigny-Malabry Cedex - RCS Nanterre 439 896 000

AUT H E N T I F I C A T I O N G R D
(4638886-02SC-4X2B-B514-6808C1E0A645)

ENGAGEMENTS ANDRA

1. Engagements relatifs au PIGD

Le PIGD constitue la donnée d'entrée pour les études de conception industrielle qui précise les déchets à prendre en charge dans Cigéo et leur chroniques de réception. Une première version du PIGD a été établie en collaboration avec les producteurs de déchets pour les études d'esquisse du projet Cigéo. Le PIGD sera mis à jour en 2013 en vue des études d'avant-projet industriel de Cigéo.

E.1.1 Cette nouvelle version justifiera les marges prises afin d'améliorer la lisibilité de l'inventaire du PIGD et de mieux apprécier leur conservatisme.

E.1.2 Cette nouvelle version précisera les hypothèses retenues pour l'évaluation des quantités de déchets graphites comptabilisées en réserve.

E.1.3. L'inventaire du PIGD sera mis en cohérence avec la stratégie de gestion des combustibles usés retenue par le CEA. Ainsi, les déchets ultimes HA et MAVL résultant du traitement/recyclage des combustibles usés du CEA Civil et de la propulsion navale seront intégrés dans l'inventaire avec les incertitudes associées.

Le projet Cigéo doit répondre à l'objectif fixé par la loi du 28 juin 2006 qui précise que "les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde". En conséquence :

E.1.4 La démonstration de sûreté du stockage présentée dans le dossier en support à la demande d'autorisation de création de Cigéo prendra en compte l'ensemble des déchets du PIGD y compris les réserves.

E.1.5 L'Andra poursuivra, conformément aux orientations définies par le PNGMDR, les études sur un scénario de stockage des combustibles usés, afin de vérifier que les concepts de stockage retenus pour Cigéo restent compatibles avec l'hypothèse du stockage direct de combustibles usés si ceux-ci étaient un jour considérés comme des déchets.

2. Engagement relatif au comportement des combustibles usés

E.2.1 L'Andra présentera, dans l'étude faisant l'objet de l'engagement E1.5, une évaluation d'impact du stockage prenant en compte la modification de la valeur d'IRF du ¹³⁷Cs.

3. Engagements relatifs à la sismique 3D

E.3.1 L'Andra remettra avant la fin du premier semestre 2013 un rapport présentant et justifiant la méthode retenue pour la conversion des données sismiques « temps double » en profondeur, ainsi que l'ensemble des cartes en isohypses des interfaces lithologiques interprétées qui en découlent.

E.3.2 Dans le dossier accompagnant la DAC, l'Andra vérifiera le caractère enveloppe du spectre sismique retenu pour la phase après-fermeture vis-à-vis de séismes physiquement plausibles à l'aplomb de la ZIRA dont le foyer se situerait à moins de 10 km de profondeur.

E.3.3 L'Andra présentera, dans le dossier accompagnant la DAC, un modèle conceptuel du milieu géologique du site de Meuse/Haute-Marne, prenant en compte les résultats de traitement et d'analyse de l'acquisition sismique 3D en 2010 sur la ZIRA obtenus entre mars 2012 et la constitution du dossier de la DAC, notamment sur les points suivants :

- analyse des propriétés globales de transport des corps récifaux du Bajocien et rôle dans le modèle hydrogéologique,
- interprétation des anomalies sismiques identifiées :
 - + dans l'Oxfordien calcaire à l'aplomb du cours de l'Orge,
 - + sous les corps récifaux du Bajocien inférieur,
 - + dans le Trias au Nord de la ZIRA,
- identification et quantification des incertitudes résiduelles (existence éventuelle de failles mineures, potentialités de propagation vers le Callovo-Oxfordien).

L'Andra tiendra compte de ces incertitudes pour définir les reconnaissances qui seront réalisées lors du creusement, et pour la stratégie d'implantation de l'installation souterraine de Cigéo. Conformément à sa démarche générale de sûreté, la démonstration de sûreté présentée par l'Andra en appui à la demande d'autorisation de création prendra en compte les incertitudes résiduelles identifiées.

ANNEXE T1 - GLOSSAIRE

Andain : acquisition de données en une seule fois.

Bin : surface élémentaire à laquelle différentes traces sismiques sont regroupées pour une même réflexion en profondeur, correspondant numériquement à l'espacement entre traces multiplié par l'espacement entre points de tir.

Bioherme : masse rocheuse lenticulaire édifiée par des organismes constructeurs (coraux, coquilles...).

Box : espacement entre lignes de géophones multiplié par l'espacement entre lignes de sources.

Carte en isochrones : carte du temps d'arrivée - temps double - de l'onde réfléchie pointée pour un horizon.

Carte en isohypses : carte de l'altitude de l'onde réfléchie pointée pour un horizon, obtenue après conversion du temps double en profondeur.

Couverture : nombre de fois où un même point profondeur est éclairé.

Corrections statiques : corrigent l'effet des variations verticales et latérales de vitesses et de topographie des terrains de surface et ramènent virtuellement les différentes traces à une même altitude, le *datum plane*.

Corrections dynamiques : visent à augmenter le rapport signal/bruit des ondes réfléchies, en appliquant une vitesse de correction pour chaque onde réfléchie, à partir des temps d'arrivée de cette onde réfléchie en profondeur en un même point (d'un réflecteur, pour des distances source-récepteur différentes).

Datum plane : plan horizontal de référence auquel les différentes traces sont ramenées virtuellement à une même altitude.

Déport = offset : distance source-récepteur.

Diagenèse : transformation des sédiments en roches sédimentaires.

Diagraphie : enregistrement en continu dans un sondage de paramètres physiques.

Faille décrochante : faille avec mouvement relatif uniquement horizontal.

Faille sénestre : faille décrochante dont le bord gauche est déplacé vers l'avant

Faille dextre : faille décrochante dont le bord gauche est déplacé vers l'arrière.

Faille normale : faille formée en extension, avec mouvement relatif uniquement vertical.

Géophone : « récepteur » des ondes sismiques, correspondant à un capteur qui enregistre le mouvement du sol.

Impédance sismique : produit de la vitesse des ondes sismiques et de la masse volumique. Elle est généralement mesurée en g/cm³ m/s.

Inversion stratigraphique : voir annexe T7.

Inversion élastique, acoustique ou stochastique : voir annexe T7.

Isopacité : relatif à « isopaque », de même épaisseur.

Linéament : élément linéaire subrectiligne.

Lithologie : nature des roches formant une couche géologique.

Mégaride : forme de dépôt et d'érosion liée aux marées, comme les dunes mais de taille importante (pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres d'extension horizontale). Leur allongement est perpendiculaire au sens du courant.

Migration : positionnement des réflecteurs sismiques dans leur position vraie et suppression des ondes générées par des points « diffractants ».

Ondes P : ondes de pression-décompression.

Ondes S : ondes de cisaillement.

Orogénèse : mécanisme de formation des montagnes.

Pendage : inclinaison des couches géologiques par rapport à l'horizontale.

Progradation : avancée progressive vers le large d'une sédimentation détritique.

Stack : sommation des traces associées aux couples source-récepteur, créant ainsi une trace virtuelle pour laquelle source et récepteur sont localisés au même point.

Stochastique : utilisant les statistiques pour l'étude des phénomènes aléatoires.

Sweep : balayage de fréquences émises par la source sismique.

Trace : généralement constituée d'une somme d'enregistrements de capteurs proches. Cette sommation physique initiale permet d'augmenter le rapport signal/bruit et d'atténuer certaines ondes comme les ondes de surface.

ANNEXE T2 : TRAITEMENT DES DONNEES SISMIQUES

Les principales étapes de la séquence de traitement sismique appliquée aux enregistrements, notamment la sommation des traces (« stack ») incluant les corrections dynamiques et la correction des pendages, la migration, les corrections statiques et la conversion des « temps doubles » à des profondeurs, sont explicitées dans la présente annexe. Par souci de clarté, l'ordre de description de ces étapes ne correspond pas forcément à leur ordre d'application. La succession des étapes précitées peut être modifiée (en particulier entre sommation et migration) et ces étapes peuvent être répétées par des boucles d'optimisation.

La sismique haute résolution s'appuie sur le principe de couverture multiple (figure 1a) : un même point sur un réflecteur dans le sous-sol (CDP, common depth point pour la sismique 2D, surface élémentaire nommée « bin » pour la sismique 3D) est la source de réflexions enregistrées par plusieurs géophones en surface. L'objectif est d'additionner ces enregistrements appelés « traces » (une trace est généralement constituée d'une somme d'enregistrements de capteurs proches) pour amplifier les arrivées réfléchies primaires par rapport à toutes les autres composantes sismiques du signal (arrivées réfractées, battements internes multiples, ondes de surface...), donc pour augmenter le rapport signal/bruit des ondes réfléchies. Cependant, plus les géophones seront situés loin (« offset », distance source-récepteur) de l'aplomb de ce point (CMP, common midpoint), plus le temps de trajet aller-retour de l'onde sera long (figure 1b). La correction dynamique (ou « NMO », normal moveout) compense l'effet de l'obliquité des trajets en appliquant des vitesses de correction. Cette correction dépend à la fois de la distance source-capteur et du temps d'arrivée de l'onde réfléchi, d'où le terme de correction « dynamique ».

Pour réaliser cette correction dynamique, une vitesse de correction est déterminée pour chaque onde réfléchi, à partir des temps d'arrivée de cette onde réfléchi en profondeur en un même point (acquisition 2D) ou même bin (acquisition 3D) d'un réflecteur, pour des distances source-récepteur différentes. Cette vitesse (« vitesse de stack » ou de sommation ou encore V_{NMO} , de type V_{RMS} , vitesse quadratique moyenne pour une succession de couches) est utilisée pour corriger cette obliquité des trajets. Les corrections dynamiques introduisent cependant des distorsions du signal pour les réflexions proches de la surface et les grands déports au début des traces. Le « mute », correspondant à une mise à zéro de ces échantillons d'une trace, est effectué pour éviter de sommer des réflexions présentant de fortes distorsions après correction de courbure.

La correction des pendages (« DMO » dip moveout) supprime la dispersion des points miroirs sur le réflecteur, due à ces variations de pendages. Elle rend les vitesses de sommation indépendantes du pendage, filtre les éventuels bruits organisés induits par les forts pendages et améliore les connaissances du champ de vitesses et la résolution latérale. Cette opération de correction des pendages nécessite de réaliser des corrections dynamiques avant et après (boucle d'optimisation).

Les traces associées à ces couples source-récepteur sont ensuite additionnées, créant ainsi une trace virtuelle pour laquelle source et récepteur sont localisés au même point : c'est la sommation des traces (ou « stack »). Ce processus est réalisé pour les ondes réfléchies à différents temps d'arrivée sur la trace sismique, correspondant à différentes profondeurs. Il permet d'obtenir une section à déport (ou « offset ») nul à partir de la sommation de plusieurs traces. Les temps sont alors ceux que l'on aurait observés avec un capteur confondu avec la source.

L'effet de la sommation est d'augmenter le rapport signal sur bruit et la résolution latérale. On assemble finalement ces traces en un montage de sismogrammes appelé section sismique (figure 1c).

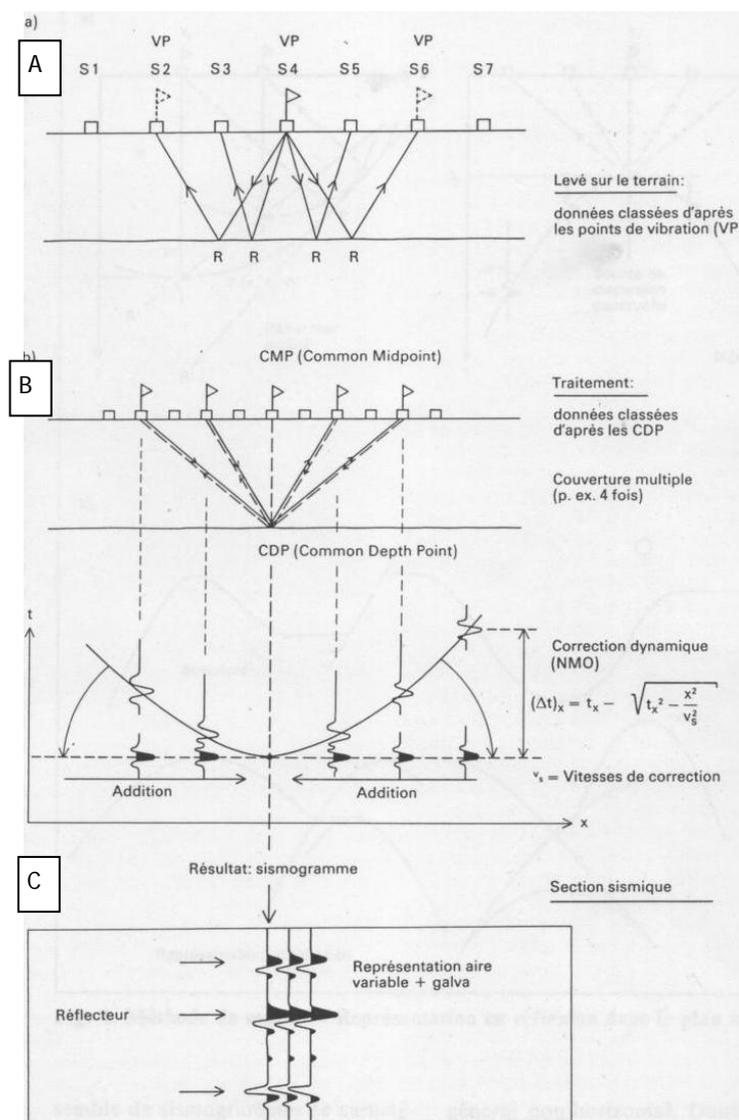


Figure 1 : A : principe de couverture multiple. Les données (S : source) sont classées en points de vibration (VP) ; R : point de réflexion. B : traitement des données. CMP (common midpoints) : Regroupement de VP en un point milieu commun ou « CDP » (common depth point). Les corrections dynamiques (NMO : No move out) correspondent à une réduction de l'obliquité des trajets en appliquant des vitesses de correction. C : sommation des traces pour la construction de la section sismique.

La migration a pour but de positionner les réflecteurs sismiques dans leur position vraie et de supprimer les ondes générées par des points « diffractants » (Figure 2). Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur un modèle de vitesses (« vitesses de migration »), basé également sur l'analyse des données. La migration peut être effectuée dans le domaine du temps ou de la profondeur (donc avant « migration temps »- ou après « migration profondeur »- la conversion de la composante verticale de la sismique de « temps doubles » à des profondeurs).

Lorsque la migration est effectuée avant la sommation des traces, il s'agit d'un traitement « pre-stack ». Lorsque la migration est effectuée après la sommation des traces sismiques, on parle de traitement « post-stack ». Ces deux types de traitement permettent d'obtenir des sections sismiques migrées à déport nul.

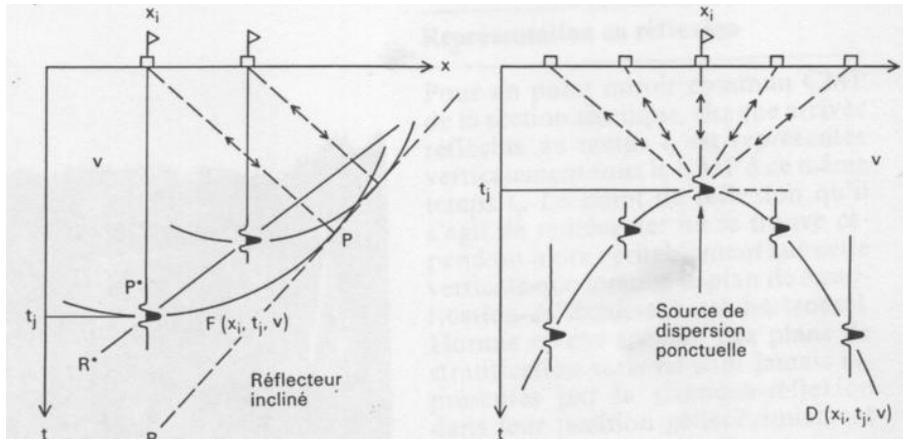


Figure 2 : Principe des corrections de migration.

Les corrections statiques corrigent l'effet des variations verticales et latérales de vitesses et de topographie des terrains de surface. Le terme « statique » s'oppose à celui de « dynamique », parce que ces corrections sont indépendantes du temps de réflexion des ondes. Les corrections statiques ramènent virtuellement les différentes traces à une même altitude (plan horizontal de référence appelé « *datum plane* »), choisie au-dessus du point le plus élevé de la zone couverte par la sismique. Les formations superficielles sont généralement altérées (zone altérée, ou WZ, weathered zone), ce qui entraîne une diminution des vitesses sismiques, et cette altération varie latéralement en intensité et en profondeur selon la nature de la formation à l'affleurement et la topographie (altération différente dans les vallées, sur les versants et sur les plateaux). Ces variations de vitesses sismiques en proche surface sont généralement déterminées par forages de faible profondeur dits « forages VT », dans lesquels la nature du substratum et les vitesses sismiques sont déterminées et permettent de construire un « modèle de corrections statiques ».

Tous ces traitements (à part la migration profondeur) sont réalisés dans le domaine temporel. Chaque onde arrive ainsi à un temps correspondant à un « temps double », composé du temps de propagation de l'onde de la source au réflecteur puis du réflecteur au géophone. Ce temps double peut être converti en profondeur, ce qui suppose encore l'utilisation d'un modèle de vitesse. Celui-ci est généralement construit à partir de données de forages traversant l'ensemble des couches géologiques que l'on souhaite investiguer et dans lesquels ont été mesurées les vitesses sismiques. Une méthode pour estimer ces vitesses est fournie par l'équation de Dix (1952), qui est fondée sur l'hypothèse d'une organisation, sur les traces correspondant à un même point miroir, des réflexions le long d'une hyperbole selon l'équation suivante t_0 :

$$t = \sqrt{\frac{x^2}{V_{RMS}^2} + t_0^2}$$

(t : temps de parcours source-miroir-géophone des ondes ; x : distance source-géophone ; V_{RMS} (root mean square) : vitesse de propagation, dite « vitesse quadratique moyenne »).

Si l'on néglige le terme en Δt^2 , on obtient l'équation suivante, qui permet de calculer la « vitesse apparente » ou « vitesse de stack », plus élevée que la vitesse quadratique moyenne :

$$\Delta t = \frac{x^2}{2t_0 \cdot V_{RMS}^2}$$

La connaissance des VRMS dans un forage (loi de vitesses) permet de calculer les vitesses d'intervalles V_i pour des épaisseurs de terrain données, en appliquant la formule de Dix :

$$V_{i(1, 2)} = \sqrt{\frac{(V_{RMS2}^2 \cdot t_2) - (V_{RMS1}^2 \cdot t_1)}{t_2 - t_1}}$$

Les données de vitesses peuvent notamment être complétées par des acquisitions de sismique réfraction.

Inversion stratigraphique

A partir de l'amplitude des ondes sismiques, il est possible de remonter à l'impédance sismique (produit de la vitesse des ondes sismiques et de la masse volumique) des différentes couches géologiques. En effet, de la même façon qu'en optique, le coefficient de réflexion d'une onde sur une interface dépend des propriétés des couches que cette interface sépare. Étant donné que les impédances sismiques sont déduites des valeurs d'amplitude par un processus d'optimisation numérique, on parle d'inversion. Cette inversion permet de retrouver certaines propriétés des couches géologiques investiguées ; on parle donc d'« inversion stratigraphique ». A partir d'une section sismique « post-stack », il est possible de calculer l'impédance des ondes P (ondes de compression) ou « IP ». Dans ce cas, ce traitement se nomme « inversion acoustique » (après l'étape de sommation). A partir d'une section « pre-stack », en étudiant les ondes réfléchies pour certaines gammes d'angle d'incidence des rayons sismiques sur les interfaces (traces proches, moyennes et lointaines d'un même dispositif), il est possible de calculer l'impédance des ondes P et celle des ondes S (ondes de cisaillement) ou « IS ». Dans ce cas, ce traitement se nomme « inversion élastique » (avant l'étape de sommation).