

Gestion à long terme des déchets historiques du procédé de conversion

PNGMDR 2013 - 2015 Rapport d'avancement



AREVA – Site de Malvési (11) Décembre 2014

Sommaire

1	Introduction.....	6
2	Origine et inventaire des déchets concernés	7
2.1	Présentation des activités industrielles menées sur le site de Malvési.....	7
2.2	Historique des bassins	8
2.3	Inventaire des déchets concernés	11
2.4	Composition des déchets	12
3	Organisation et méthodologie du projet	13
3.1	Rappel des conclusions du rapport 2011.....	13
3.2	Description des trois concepts étudiés	13
3.2.1	Concept de stockage en surface	13
3.2.2	Concepts de stockage à faible profondeur	14
	3.2.2.1 Stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre	14
	3.2.2.2 Stockage à faible profondeur dans les marnes rouges.....	15
3.3	Approche méthodologique et rôle du Groupe d'Experts Malvési.....	15
4	Avancement des études à fin 2014	17
4.1	Caractérisation des déchets	17
4.1.1	Caractérisation physico-chimique.....	17
4.1.2	Caractérisation radiologique.....	18
4.1.3	Comportement géochimique des déchets	21
	4.1.3.1 Caractérisation minéralogique	21
	4.1.3.2 Caractérisation géochimique.....	22
4.2	Reconnaitances géologiques	23
4.2.1	Géologie structurale régionale.....	24
4.2.2	Structures sédimentaires et tectoniques locales.....	25
4.2.3	Caractérisation des séries sédimentaires	29
4.3	Reconnaitances hydrogéologiques	31
4.3.1	Caractérisation des aquifères.....	32
4.3.2	Communication entre les aquifères	33
4.4	Ingénierie de conception	34
4.4.1	Traitement et conditionnement des déchets	34
4.4.2	Ingénierie préliminaire des 3 concepts	35
	4.4.2.1 Concept 1 : stockage en surface.....	35
	4.4.2.2 Concept 2 : stockage dans l'ancienne mine de soufre.....	36
	4.4.2.3 Concept 3 : stockage à faible profondeur dans les marnes rouges.....	37

4.5	Evaluation des performances	38
4.5.1	Modélisation hydraulique.....	38
4.5.2	Modélisation des phénomènes géochimiques et réactifs	40
4.5.3	Résultats des modélisations.....	41
4.5.4	Modélisation compartimentale.....	44
5	Conclusions et Perspectives.....	45
5.1	Gestion à court et moyen termes.....	45
5.2	Gestion à long terme.....	46
5.2.1	Principaux acquis	46
5.2.2	Perspectives.....	46
	<i>5.2.2.1 Poursuivre les reconnaissances du milieu géologique.....</i>	<i>47</i>
	<i>5.2.2.2 Préciser les conditions d'évolution climatique et géodynamique.....</i>	<i>48</i>
	<i>5.2.2.3 Prétraitement et conditionnement des déchets</i>	<i>48</i>
	<i>5.2.2.4 Conception du stockage</i>	<i>48</i>
	<i>5.2.2.5 Autres.....</i>	<i>48</i>

Liste des tableaux

Tableau 1 : Inventaire des déchets historiques concernés par ce rapport.....	11
Tableau 2 : Synthèse des principaux paramètres physico-chimiques des différentes lithologies	17
Tableau 3 : Exemple des phénomènes géochimiques et réactifs pris en compte dans la modélisation (pour les radionucléides)	40

Liste des figures

Figure 1 : Principales étapes du procédé de conversion.....	7
Figure 2 : Situation du massif de stériles et résidus miniers en 1962.....	9
Figure 3 : Vue actuelle du massif et des bassins de décantation.....	9
Figure 4 : Plan de situation de l'INB ECRIN et du massif.....	10
Figure 5 : Modèle conceptuel du stockage en surface (Concept 1).....	14
Figure 6 : Modèle conceptuel de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre (Concept 2).....	14
Figure 7 : Modèle conceptuel du stockage à faible profondeur dans les marnes Oligocène (Concept 3)	15
Figure 8 : Approche méthodologique adoptée pour l'évaluation des performances des différents concepts étudiés	16

Figure 9 : Synthèse des activités moyennes de l'U-238 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques	18
Figure 10 : Synthèse des activités moyennes de l'U-235 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques	19
Figure 11 : Synthèse des activités moyennes du Th232 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques	20
Figure 12 : Minéraux d'uranium identifiés au microscope électronique à balayage (en haut) et micro-cartographie élémentaire par diffraction des rayons X (en bas)	22
Figure 13 : Essais en colonnes avec détermination expérimentale de la courbe de désorption	23
Figure 14 : Localisation du site de Malvési sur la carte géologique à 1/250 000 (feuille n°38 – Montpellier), avec position des principales structures géologiques connues régionalement.	24
Figure 15 : Coupe géologique depuis les Corbières orientales jusqu'au massif de la Cape (d'après Gorini et al., 1991)	25
Figure 16 : Localisation des profils sismiques (pointillés rouges) et forages profonds (points bleus)	26
Figure 17 : Interprétation du profil sismique SHR1 (Nord-Sud)	27
Figure 18 : Interprétation du profil sismique SHR2 (Ouest-Est)	27
Figure 19 : Coupe interprétative des données sismiques et de forage	28
Figure 20 : Aspect des échantillons de l'Oligocène rouge (23,20 à 26,30 m)	29
Figure 21 : Aspect général des échantillons prélevés dans l'Oligocène gris montrant les variations de teintes et les niveaux plissés	30
Figure 22 : Carte géologique présentant les aires d'affleurement des calcaires jurassiques à l'Ouest du site (zones de recharge probable de l'aquifère karstique)	32
Figure 23 : Report des analyses des eaux sur un diagramme de Piper	33
Figure 24 : Résultats de quelques essais de formulation en vue d'une solidification / stabilisation du déchet	34
Figure 25 : Coupe du concept de stockage en surface	35
Figure 26 : Coupe schématique de la couverture	35
Figure 27 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre	36
Figure 28 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans les marnes rouges	37
Figure 29 : Représentation des flux du Concept 1 et conditions aux limites du modèle	38
Figure 30 : Représentation des flux du Concept 2 et conditions aux limites du modèle	39
Figure 31 : Représentation des flux du Concept 3 et conditions aux limites du modèle	39
Figure 32 : Concept 3 - Représentation des lignes de courant et des concentrations à 5 000 ans pour un traceur parfait	40
Figure 33 : Evolution des concentrations en ²³⁰ Th (à gauche) et ²²⁶ Ra (à droite) dans les déchets sur les 50 000 ans de la modélisation	41
Figure 34 : Concept 3 - Courbes d'évolution de la concentration en Uranium (en haut, à gauche), Thorium (en haut, à droite), Molybdène (en bas, à droite) et Azote total (en bas, à droite) sur les deux points de contrôle situés en surface (alluvions quaternaires) et en profondeur (oligocène rouge)	42
Figure 35 : Comparaison des trois concepts - Concentrations maximales atteintes (mol/l ou mg/l) aux différents points de surveillance	43

Figure 36 : Calendrier des études et investigations	47
Figure 37 : Famille RTCU (extrait de l'Inventaire national 2012).....	50
Figure 38 : Synthèse des principaux évènements géodynamiques connus à l'échelle du bassin du Sud-Est de la France, reportés le long de l'échelle stratigraphique (d'après Coueffé et al., 2011).	51
Figure 39 : Coupe géologique conceptuelle.....	52

Glossaire

GEM	Groupe d'Experts de Malvési (groupe de cinq experts internationaux sollicités par AREVA pour leur expertise reconnue)
ICPE	Installation Classée pour Protection de l'Environnement
INB	Installation Nucléaire de Base
Jurassique	Période géologique (-200 à -145 millions d'années - Ere secondaire)
Karst	Morphologie résultant de l'érosion des roches calcaires et conduisant à des cavités et des rivières souterraines
Lithologie	Nature des roches
NGF	Niveau Général de la France
Oligocène	Période géologique (-34 à -23 millions d'années - Ere tertiaire)
PNGMDR	Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs
Quaternaire	Période géologique actuelle (-2,6 millions d'années à aujourd'hui)
REX	Retour d'EXpérience
TDN	Traitement Des solutions Nitratées
URT	Uranium de Retraitement

1 Introduction

Le présent document a pour objectif de répondre à l'article 7 - II – 3° du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs pour la période 2013-2015, qui demande :

« Art. 7 - II. - Concernant l'établissement Comurhex¹ de Malvési, l'inventaire des déchets historiques est limité aux seuls déchets déjà produits et entreposés sur le site de Malvési. L'exploitant remet aux ministres chargés de l'énergie, de l'environnement et de la sûreté nucléaire :

3° Pour le 31 décembre 2014, un rapport sur l'état d'avancement à cette date des études de faisabilité des options de stockage des déchets déjà produits.

L'ASN est saisie pour avis sur ce rapport. »

Il fait suite à celui² présenté en décembre 2011 en application des prescriptions du PNGMDR 2010-2012 et qui demandait :

« Une étude proposant des filières sûres de gestion à long terme des déchets actuellement entreposés dans les bassins de décantation du site de Malvési, ainsi que des modalités de gestion des nouveaux déchets produits par le fonctionnement des installations de ce site. »

Le présent rapport effectue la synthèse des études et investigations menées par AREVA depuis 2010 pour évaluer la préfaisabilité d'une solution adéquate de gestion des déchets historiques du procédé de conversion de l'uranium naturel.

Le plan retenu pour ce rapport est le suivant :

- Origine et inventaire des déchets concernés,
- Organisation du projet et rappel des trois concepts de stockage étudiés,
- Avancement des études et investigations,
- Conclusions, calendrier et perspectives.

¹ La société COMURHEX a fusionné au 1^{er} janvier 2014 avec sa maison mère AREVA NC : dans la suite du texte l'établissement de Malvési est désigné comme le site AREVA de Malvési

² Gestion à long terme des déchets issus des bassins du site COMURHEX de Malvési – Rapport d'étude PNGMDR - référencé CXM-11-010845 de décembre 2011

2 Origine et inventaire des déchets concernés

2.1 Présentation des activités industrielles menées sur le site de Malvés

La société AREVA NC exploite, sur le territoire de la commune de Narbonne, au lieu-dit « Malvézy », un établissement industriel situé route de Moussan.

Au sein de cet établissement, la société réceptionne de l'uranium sous forme de concentrés provenant des mines et met en œuvre la première étape de conversion de ces concentrés uranifères en procédant à leur purification et à leur transformation en tétrafluorure d'uranium (UF_4). A ce titre, l'établissement de Malvés constitue l'unique point d'entrée de l'uranium naturel en France et opère la première étape nécessaire au cycle du combustible nucléaire.

Le tétrafluorure d'uranium issu de l'exploitation des installations industrielles de Malvés est ensuite acheminé vers l'usine AREVA Tricastin à Pierrelatte pour y être transformé en hexafluorure d'uranium (UF_6).

La figure ci-après illustre les diverses étapes de la conversion, réalisées dans les établissements industriels de Malvés et du Tricastin.

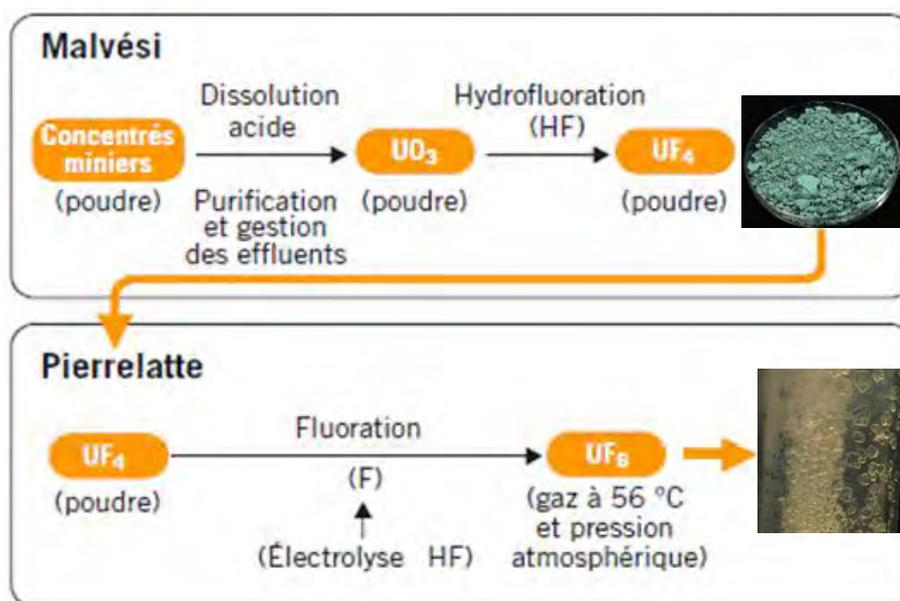


Figure 1 : Principales étapes du procédé de conversion

Les principales étapes du procédé mis en œuvre sont les suivantes :

- dissolution des concentrés miniers (uranates ou oxydes) en milieu nitrique, qui permet l'obtention de nitrate d'uranyle ($UO_2(NO_3)_2$) impur,
- purification de l'uranium (séparation des impuretés chimiques et radiologiques) par extraction liquide-liquide du nitrate d'uranyle en phase solvant, par un extractant sélectif,
- concentration puis dénitrification thermique, de façon à obtenir du trioxyde d'uranium (UO_3),
- réduction du trioxyde en dioxyde (UO_2), puis hydrofluoration afin de former l' UF_4 .

Ces diverses étapes du procédé sont à l'origine d'effluents liquides :

- effluents provenant des pieds de colonne d'extraction liquide-liquide. Il s'agit d'effluents nitratés qui présentent un caractère acide et qui renferment les impuretés présentes dans les concentrés miniers, notamment les produits de filiation de l'uranium,
- effluents provenant de l'unité d'hydrofluoration. Ces effluents renferment du fluor (sous forme notamment de fluorure d'ammonium), ainsi que de l'uranium,
- effluents provenant de l'unité de récupération.

L'unité de récupération est un atelier, annexe à la production, chargé de récupérer l'uranium contenu dans les effluents et rebuts de procédé, afin de le recycler.

Les effluents finaux, ne contenant plus qu'une très faible partie (moins de 0,5 %) de l'uranium initialement présent dans les concentrés miniers, contiennent des produits de filiation des isotopes de l'uranium, des métaux, du nitrate d'ammonium, des alcalins (Na) et alcalino-terreux (Mg, Ca), des traces de matières organiques, ainsi que des fluorures sous forme de fluorures (CaF₂).

Ces effluents, après neutralisation à la chaux, sont dirigés vers les bassins de décantation où s'effectue la séparation solide-liquide. Les bassins de décantation se remplissent donc au fur et à mesure de la fraction solide des effluents (boues de fluorine et d'hydroxydes métalliques) constituant les déchets solides du procédé de conversion.

La fraction liquide des effluents, clarifiée par la décantation, rejoint les bassins d'évaporation où elle est concentrée par évaporation naturelle. Ces bassins d'évaporation reçoivent également les concentrats provenant des installations de traitement des eaux pluviales de la plateforme industrielle et du secteur des bassins.

2.2 Historique des bassins

L'établissement de Malvési a été ouvert en 1959 sur les terrains d'une ancienne mine de soufre. Jusqu'en 1964, l'activité principale de l'établissement a porté sur la transformation de concentrés miniers uranifères en uranium métal. À partir de cette date, l'établissement a produit en parallèle du tétrafluorure d'uranium (UF₄) pour les besoins des usines d'enrichissement de l'uranium. La production d'uranium métal s'est arrêtée définitivement en 1991.

Entre 1960 et 1983, l'établissement a également transformé, par campagnes, de l'uranium issu du traitement des combustibles usés (URT), d'où la présence de traces de radionucléides artificiels dans les déchets solides entreposés dans les bassins B1/B2.

Les bassins de décantation utilisés par les installations industrielles de Malvési sont situés sur un massif constitué essentiellement des stériles et des résidus miniers issus de l'ancienne mine de soufre, qui a cessé ses activités en 1953. Cette mine de soufre, exploitée à ciel ouvert par la Société Languedocienne de Recherches et d'Exploitation Minières (SLREM), était située à l'emplacement de l'actuel bassin de régulation.



Figure 2 : Situation du massif de stériles et résidus miniers en 1962

Ce massif (d'un volume d'environ 1 300 000 m³) sur lequel sont implantés les bassins de décantation B1 à B6, occupe une surface au sol d'environ 20 hectares au sud-ouest de l'établissement. La hauteur des digues est de l'ordre de 10 à 15 mètres par rapport au terrain naturel de la plaine alluviale de la Livière sur lequel repose le massif.

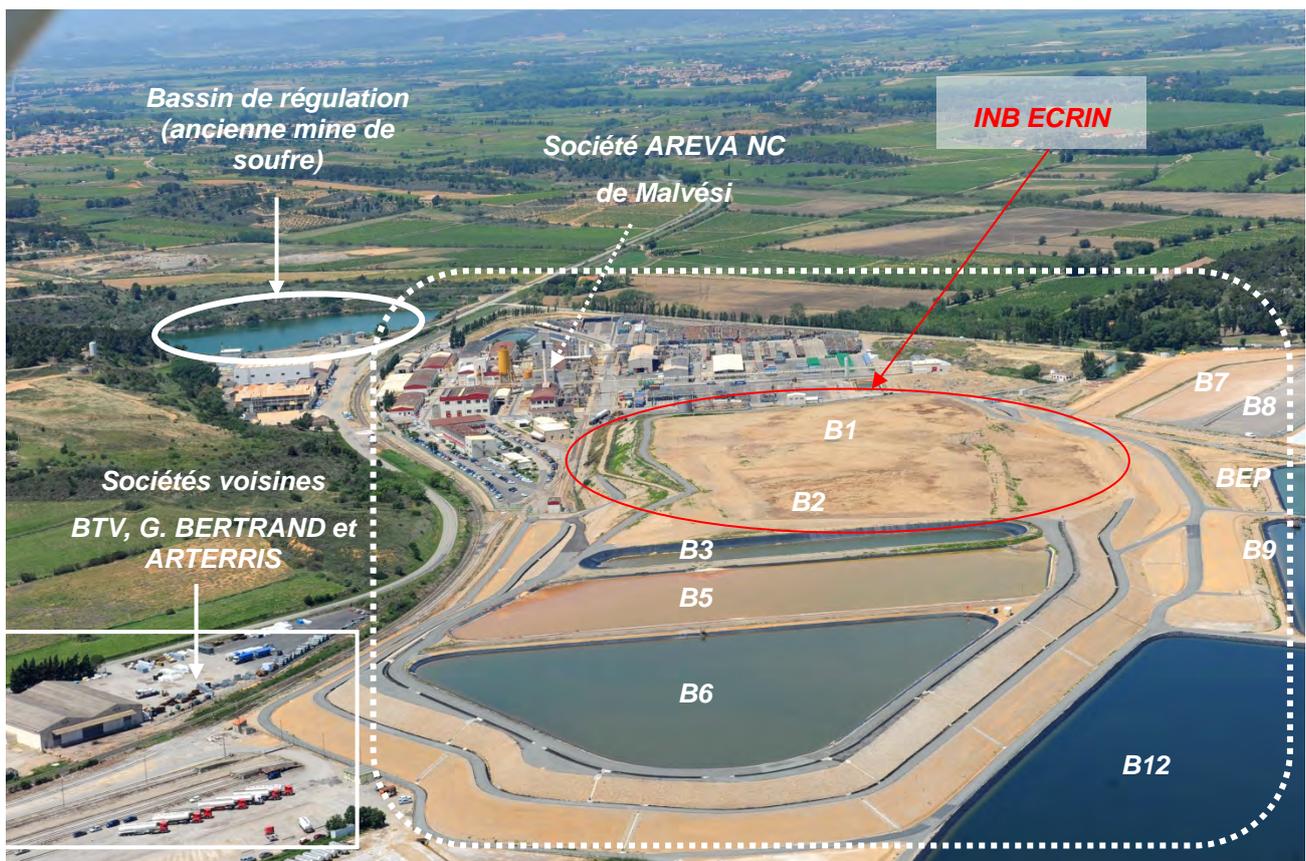


Figure 3 : Vue actuelle du massif et des bassins de décantation

La surface occupée par les boues entreposées dans les bassins B1/B2 représente environ 6 hectares, soit le tiers de la surface totale du massif. Ces anciens bassins de décantation B1/B2 sont aujourd'hui soumis à la réglementation des installations nucléaires de base (INB), avec une demande d'autorisation de création de l'INB ECRIN³ qui est en fin d'instruction.

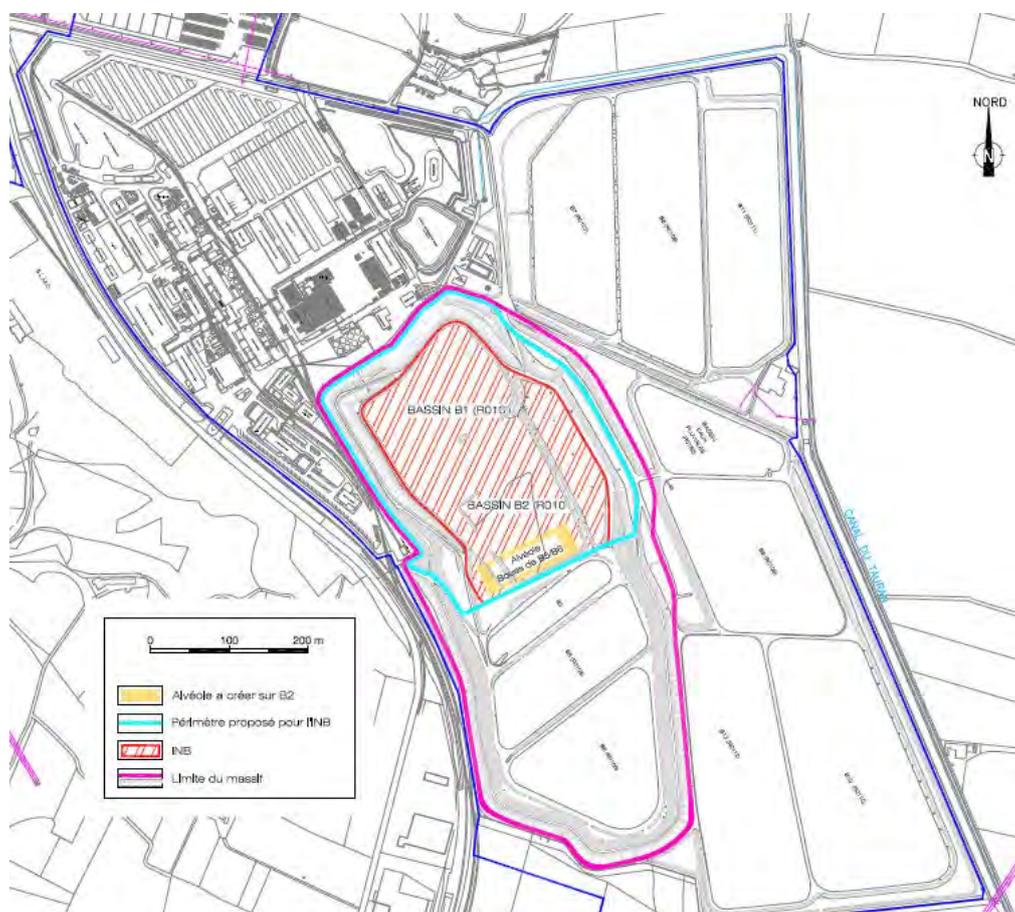


Figure 4 : Plan de situation de l'INB ECRIN et du massif

L'ancienne mine à ciel ouvert de soufre a été utilisée entre 1959 et 2007 comme bassin tampon de régulation des rejets aqueux des installations industrielles d'AREVA Malvési et de la société SLMC avant rejet vers le milieu naturel. Ce bassin ne reçoit plus d'eaux d'origine industrielle depuis le 1^{er} janvier 2007 et est depuis cette date en surveillance.

³ ECRIN : « Entreposage Confiné de Résidus issus de la Conversion »

2.3 Inventaire des déchets concernés

A la suite de l'Avis n°2012-AV-0166 de l'ASN repris par le PNGMDR 2013-2015, le présent rapport est établi sur la base de l'inventaire des déchets historiques, soit :

- les déchets solides de procédé (boues) entreposés dans les anciens bassins de décantation B1/B2,
- les boues de décantation actuellement contenues dans les bassins de décantation B5 et B6, en attente de reprise au sein d'une alvéole de 27 000 m³ à créer dans le périmètre de l'INB ECRIN,
- des terres et matériaux de carrière mélangés à ces déchets, ainsi que les matériaux de carrière utilisés pour réaliser en 2006-2007 une couverture sur les déchets.

L'inventaire des déchets concernés, constituant aujourd'hui l'installation nucléaire de base ECRIN, est résumé sur le tableau suivant :

Matières contenues dans B1/B2	Volume (m ³)	Masse volumique (kg/m ³)	Activité (Bq/g)	Activité totale (TBq)
Matériaux qui seront utilisés en phase d'aménagement de B1/B2	22 000	1 780	3,2	0,1
Matériaux de couverture	43 000	1 780	76,7	5,9
Mélange sols + boues	101 000	1 865	141,7	27
Boues de B1/B2	77 000	1 485	492	56
Mélange sols + boues + résidus et stériles miniers (est de B2)	61 000	1 780	61,5	6,7
Boues déshydratées issues de la vidange de B5/B6 *	27 000	1 350 *	274 *	10

* les caractéristiques des boues déshydratées qui seront entreposées dans l'alvéole de B2 sont données à titre informatif

Tableau 1 : Inventaire des déchets historiques concernés par ce rapport

A cet inventaire des déchets contenus dans l'INB ECRIN, il faut ajouter la fraction des stériles et résidus miniers⁴ présents sous les bassins B1 et B2 potentiellement affectée par l'exploitation passée de ceux-ci⁵.

⁴ Les stériles et résidus de l'ancienne mine de soufre représentent un volume approximatif de 1,3 million de m³. Les investigations menées en 2009-2010 indiquent qu'une fraction qui pourrait atteindre 200 000 à 300 000 m³ serait à considérer comme des déchets radioactifs (dont une grande partie de catégorie TFA).

⁵ Conformément à la demande du PNGMDR, cette évaluation sera complétée par des investigations concernant les stériles miniers situés sous les bassins B3, B5 et B6, à la prochaine vidange de ceux-ci.

Par ailleurs, compte tenu de leurs caractéristiques, les déchets solides qui proviendront du traitement des liquides nitrates actuellement présents dans les bassins d'évaporation devraient être orientés vers la filière nationale TFA existante et leur devenir ne sera pas décrit dans le présent rapport.

Quant aux déchets « à produire » par le fonctionnement à venir des installations de conversion, ils font l'objet d'un rapport séparé, conformément à l'article 16-II du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions du PNGMDR pour la période 2013-2015.

2.4 Composition des déchets

Les caractéristiques radiologiques des différentes familles ayant été détaillées dans le rapport 2011, seule la composition de la famille présentant la plus forte activité massique (de l'ordre de 500 Bq/g), les boues de B1/B2, est ici rappelée :

Emetteurs alpha : les isotopes de l'uranium et le Thorium-230 sont les principaux émetteurs alpha contribuant à l'activité alpha totale (respectivement 29 % et 50 %). Les radionucléides artificiels ne représentent 1,5 % de l'activité alpha totale. Les émetteurs alpha de la chaîne du Thorium-232 ne contribuent qu'à la marge (0,5 %) à l'activité alpha totale, les 19,5 % restant de l'activité alpha proviennent du reste des émetteurs alpha des chaînes de désintégration de l'U-238 et de l'U-235, en proportion sensiblement équivalente.

Emetteurs bêta : le Th-234, le Pa-234m, le Pb-210 et le Bi-210 sont les principaux émetteurs bêta contribuant à l'activité bêta totale (respectivement 28,5 %, 28,5 %, 10 % et 10 %). Les radionucléides artificiels ne représentent que 0,3 % de l'activité bêta totale. Les émetteurs bêta de la chaîne du Th-232 ne contribuent qu'à la marge (0,8 %) à l'activité bêta totale, les 23 % restant de l'activité bêta proviennent du reste des émetteurs bêta des chaînes de désintégration de l'U-238 et de l'U-235.

Les déchets solides du procédé de conversion sont ainsi d'origine et de caractéristiques essentiellement « minières » :

- activités massiques allant jusqu'à 500 Bq/g environ,
- une teneur en uranium résiduel qui se monte encore à 0,2 %,
- une activité massique qui est due quasi-exclusivement aux radionucléides naturels (U-238, U-235 et Th-232),
- les artificiels ne représentent que 1,5% de l'activité alpha.

Les spécificités de ces déchets (des volumes importants, contenant des radionucléides naturels des chaînes de l'uranium et du thorium) expliquent qu'ils ne s'intègrent pas dans les filières existantes ou en projet et soient inscrits à l'Inventaire National⁶ dans la famille RTCU « Résidus du traitement de Conversion d'Uranium » (voir figure 37 en Annexe).

⁶ Inventaire National des déchets radioactifs (document ANDRA - édition 2012)

3 Organisation et méthodologie du projet

3.1 Rappel des conclusions du rapport 2011

Compte tenu, d'une part de l'hétérogénéité de ces déchets de procédé, sur le plan minéralogique, chimique et radiologique, et d'autre part des volumes concernés, il n'existe pas de centre de stockage, actuel ou en projet, ni de filière à l'étude, capable de les recevoir.

Ainsi, dans une logique de préservation de la rareté des ressources de stockage, d'optimisation de la chaîne de gestion jusqu'à leur stockage et afin de réduire l'impact environnemental et les risques liés au transport, une gestion locale doit d'abord être privilégiée en accord avec les principes durables du PNGMDR visés à l'article L 542-1-2 du code de l'environnement.

Dans ces conditions, et afin d'examiner la faisabilité de solutions de gestion à long terme, AREVA s'est orienté vers l'évaluation de concepts de stockage sur site.

Conformément à la demande du PNGMDR, AREVA a entamé une réflexion globale sur la gestion à court, moyen et long termes des déchets contenus dans les bassins de décantation. La démarche de sélection du scénario de gestion le plus adapté est organisée en deux parties :

- l'entreposage sûr des déchets à court et moyen termes, avec le maintien de ceux-ci dans un état réversible en vue de leur gestion définitive,
- la recherche d'une filière sûre de gestion à long terme sur site, organisée autour d'un programme d'études et d'investigations.

Cette démarche de sécurisation et d'acquisition de connaissance permettra à terme d'évaluer la faisabilité d'un stockage et les conditions dans lesquelles celui-ci devra être conçu.

3.2 Description des trois concepts étudiés

Compte tenu des différentes typologies de déchets concernés et du volume important de ceux-ci, AREVA a proposé en 2011 de travailler sur trois concepts de gestion à long terme sur site :

- le stockage en surface, en lieu et place de l'actuel entreposage,
- le stockage à faible profondeur dans l'excavation de l'ancienne mine de soufre à ciel ouvert, au nord-ouest du site,
- le stockage à faible profondeur dans une nouvelle excavation à créer, à proximité des bassins actuels, au sud-est du site.

3.2.1 Concept de stockage en surface

Le concept de stockage en surface sur site est une option qui intègre l'évolution de l'entreposage vers un stockage. Ce concept s'apparente à celui communément utilisé pour les stériles et résidus miniers uranifères, ainsi que pour certains déchets de type radioactivité naturelle renforcée (RNR), ou encore les stockages de déchets TFA.

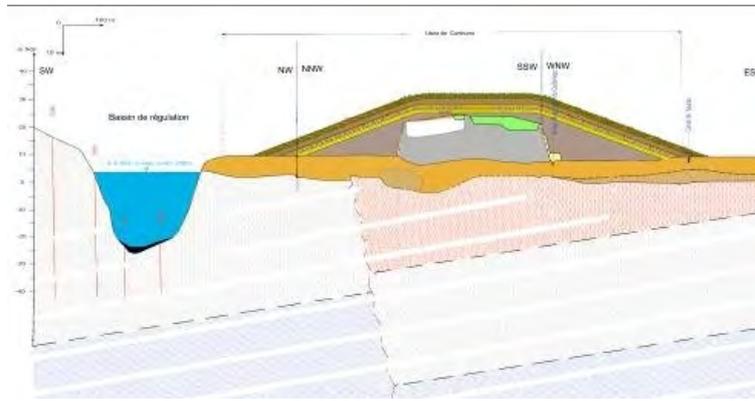


Figure 5 : Modèle conceptuel du stockage en surface (Concept 1)

La performance à long terme de ce concept repose sur la conception d'une couverture multicouche réalisée sur le sommet et les flancs, qui remplit les principales fonctionnalités suivantes : limitation de la percolation verticale à travers les déchets, drainage latéral des eaux météoriques, limitation de l'érosion et stabilité géotechnique. Les matériaux naturels sont combinés aux matériaux synthétiques dans le but de faciliter la mise en œuvre de la couverture et d'améliorer sa performance globale.

3.2.2 Concepts de stockage à faible profondeur

3.2.2.1 Stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre

Ce concept repose un stockage organisé de tous les déchets à faible profondeur, dans l'ancienne mine à ciel ouvert de soufre située au nord-ouest du site (aujourd'hui un bassin).

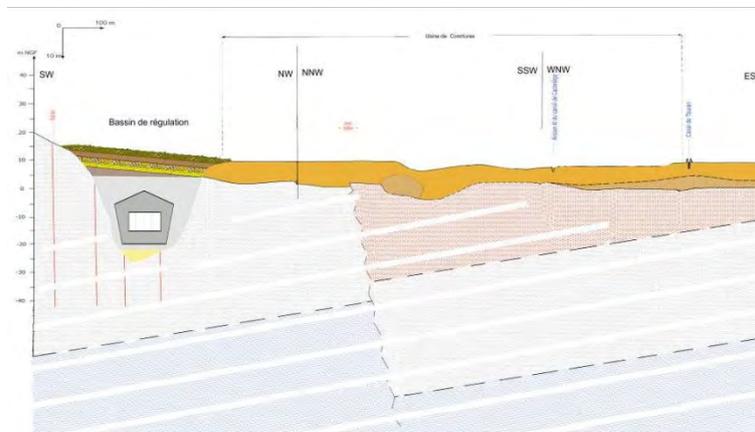


Figure 6 : Modèle conceptuel de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre (Concept 2)

Cette option correspond à une option de stockage de faible profondeur dans un milieu confinant, constitué par les marnes et dolomies grises de l'Oligocène inférieur, qui permettent de maintenir des conditions réductrices liées au milieu géologique et au fait que l'ensemble sera situé en zone saturée par la nappe aquifère de surface.

La performance à long terme repose sur les différentes barrières constituées par les terrains de l'Oligocène et les barrières ouvragées (dont les stériles et résidus miniers), ainsi que sur la réalisation d'une couverture multicouche comparable à celle développée pour le concept 1.

Cette option de stockage est un stockage multi barrières à faible profondeur, profitant d'une excavation déjà existante, dans une formation argilo-dolomitique. Elle s'apparente au concept de stockage sous couverture remanié dans l'Oligocène supérieur développé ci-après.

3.2.2.2 Stockage à faible profondeur dans les marnes rouges

Ce concept correspond à une option de stockage à faible profondeur sous couverture remaniée dans un milieu confinant, constitué par les marnes rouges de l'Oligocène supérieur, situées au sud-est du site.

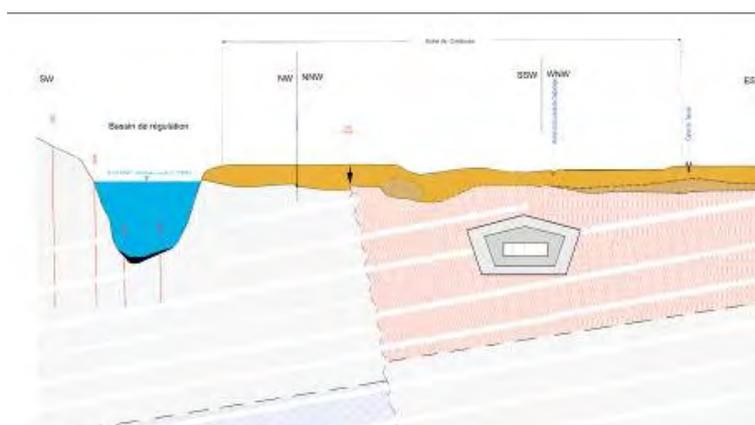


Figure 7 : Modèle conceptuel du stockage à faible profondeur dans les marnes Oligocène (Concept 3)

De même que le concept précédent, la performance du système sur le long terme repose sur les barrières successives constituées par les stériles et résidus miniers, par les terrains de l'Oligocène supérieur, ainsi que par les éventuelles barrières ouvragées. L'environnement du stockage limite les conditions oxydantes, grâce à la faible perméabilité des marnes.

La profondeur du stockage est à définir en vue notamment de limiter les risques liés aux effets climatiques et d'intrusion. La couverture, dite « remaniée », est constituée des marnes rouges excavées qui sont compactées pour augmenter leur imperméabilité.

3.3 Approche méthodologique et rôle du Groupe d'Experts Malvésis

Afin de préciser les concepts de stockage et garantir les performances à long terme de celui-ci, AREVA se base sur une révision itérative des performances des concepts étudiés, au fur et à mesure de l'acquisition de données nouvelles.

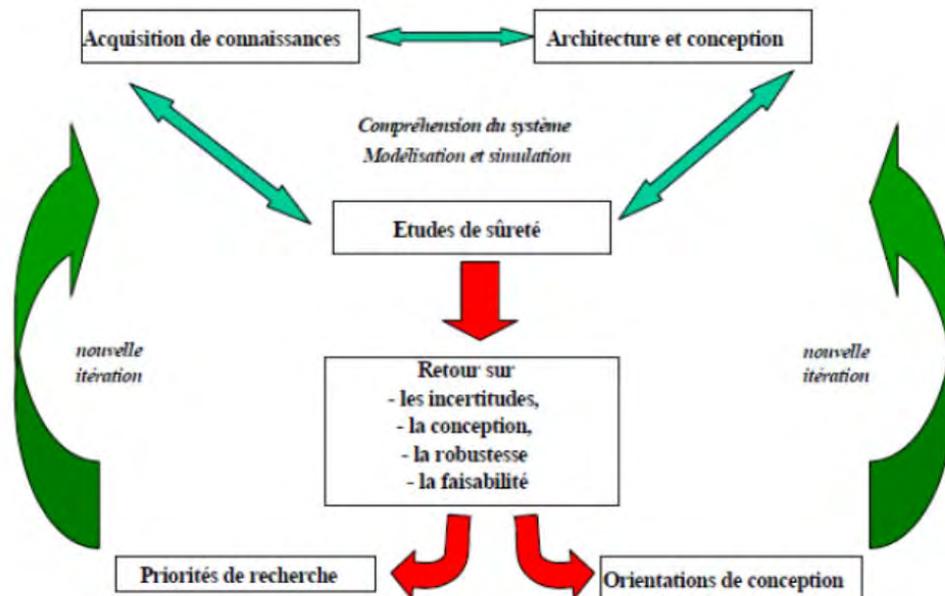


Figure 8 : Approche méthodologique⁷ adoptée pour l'évaluation des performances des différents concepts étudiés

Périodiquement, les résultats obtenus sont synthétisés et soumis à un groupe de cinq experts internationaux, le « Groupe d'Experts de Malvési » (GEM), sollicités pour leur expertise reconnue et la complémentarité de leurs compétences, qui permettent de couvrir les principaux champs scientifiques et techniques de la gestion des déchets radioactifs (géologie, hydrogéologie, géochimie, géotechnique, radioprotection et évaluation des performances).

La mission confiée au GEM est de :

- réaliser une expertise pluraliste des problématiques et enjeux posés par ces déchets,
- assurer la cohérence de l'approche avec les méthodologies nationales et internationales,
- émettre un avis argumenté sur la faisabilité d'un stockage sur site,
- établir une feuille de route pour les études et investigations à mener.

La feuille de route définie par le GEM permet à AREVA de hiérarchiser et orienter le programme d'investigations à mener afin de caractériser plus finement les déchets et l'environnement du site, de façon à apporter des éléments de réponse quant aux avantages et inconvénients de chacun des concepts.

Les résultats acquis sont soumis périodiquement à l'appréciation du GEM et les priorités sont à nouveau révisées par AREVA et le GEM suivant le processus itératif mis en place.

⁷ Source ASN

4 Avancement des études à fin 2014

Suite à la feuille de route émise en 2011 par le GEM, plusieurs études ont été menées entre 2012 et 2014, qui visent à assurer une meilleure compréhension du site et, en conséquence, à une évaluation plus précise de la performance des trois concepts de stockage.

Les études menées prioritairement concernent :

- la caractérisation du terme source et son comportement, notamment géochimique,
- l'acquisition de données sur le milieu géologique, barrière passive du stockage,
- l'ingénierie préliminaire du stockage, et notamment les barrières ouvragées réalisables,
- la compréhension des circulations hydrogéologiques, et donc des voies de transfert potentiel par les eaux souterraines,
- la modélisation des transferts par l'eau, permettant notamment de comparer les performances des trois concepts envisagés.

4.1 Caractérisation des déchets

4.1.1 Caractérisation physico-chimique

Les caractéristiques physico-chimiques des différentes familles lithologiques sont synthétisées sur le tableau ci-après.

Caractéristiques physico-chimiques (en mg/kg)	Boues de B1/B2	Matériaux de couverture	Mélanges sols + boues	Mélanges (est de B2)	Boues issues de B5/B6*
Humidité (%)	45,7	17	23,9	22,2	50
pH	7,78	7,7	7,69	7,64	7,46
Potentiel Redox (mV)	-47,7	-37,7	-37,2	-34,4	-24,6
Nitrates	72 891	16 242	26 823	21 938	80 300
Sulfates (soufre)	18 930	5 330	24 919	52159	10 200
Aluminium	7 725	146 000	25 500	27000	1 880
Fluorures (fluor)	22 231	561	7 516	89	55 300
Arsenic	77	23	57	5	48
Molybdène	512	100	419	< LD	950
Antimoine	30	19	< LD	< LD	< 3
Sélénium	12	< LD	< LD	< LD	< 3
Nickel	210	46	99	15	40
Plomb	278	29	32	10	10

Tableau 2 : Synthèse des principaux paramètres physico-chimiques des différentes lithologies

* Les caractéristiques des boues déshydratées issues de B5 et B6 qui seront entreposées dans l'alvéole de B2 sont données à titre informatif

L'humidité croît avec la proportion de boues présente dans les familles lithologiques étudiées. Elle atteint 60 % pour les boues de B5 avant toute déshydratation (boues fraîches), 46 % pour les boues de B1/B2 (boues « anciennes ») et est de l'ordre de 22 % pour le mélange de matériaux à l'est de B2.

Les déchets présentent un milieu légèrement oxydant (valeurs variant de -24,6 à -37,7 mV), alors que l'encaissant (les stériles miniers) est un milieu réducteur, présentant des conditions géochimiques plutôt favorables à la rétention des éléments sensibles au potentiel Redox comme l'uranium.

L'ensemble des lithologies présente un pH légèrement basique.

Les concentrations en nitrates sont généralement importantes, essentiellement dans les phases boues (B1/B2 et B5). La même tendance est observable pour les chlorures.

Les fluorures sont présents dans toutes les lithologies de façon plus ou moins homogène.

4.1.2 Caractérisation radiologique

Contrairement aux minerais d'uranium, où les radionucléides de chacune des trois chaînes naturelles (U-238, U-235 et Th-232) sont à l'équilibre, il existe dans les déchets du procédé de conversion un déséquilibre radiologique.

Chaîne de l'U-238 :

La Figure 9 présente l'activité moyenne des éléments de la chaîne de l'U-238 pour chaque famille de matériaux, en faisant apparaître les déséquilibres.

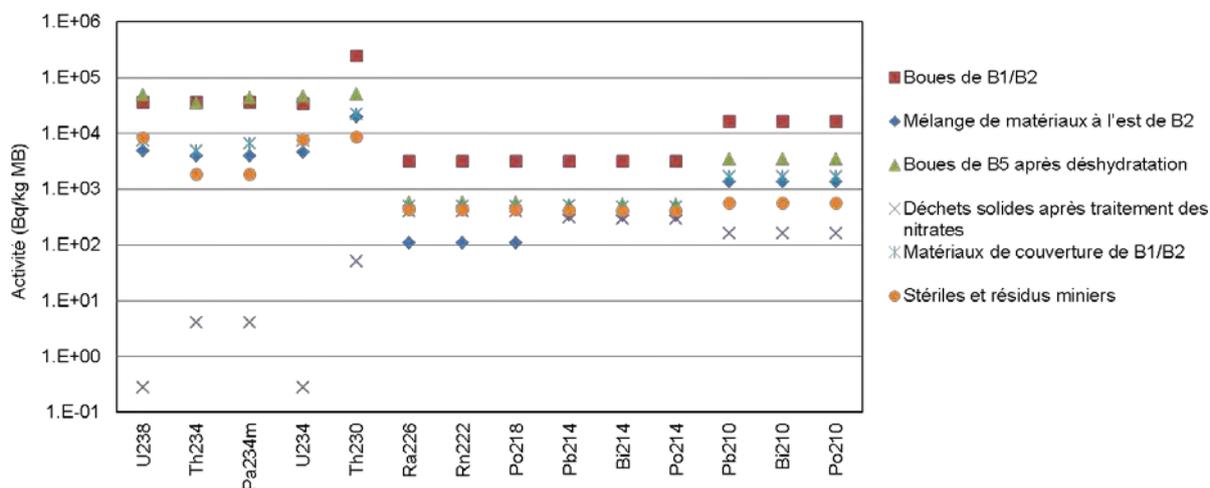


Figure 9 : Synthèse des activités moyennes de l'U-238 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- L'activité du Th-230, principal émetteur alpha, est largement supérieure à celle de l'uranium. Il s'agit de la conséquence directe du procédé de purification de l'uranium de l'usine de Malvési, qui extrait sélectivement la quasi-totalité de l'uranium et ne laisse dans les effluents qu'une faible part

de celui-ci, avec la totalité des autres isotopes des chaînes naturelles correspondantes. Compte tenu de sa demi-vie, le Thorium n'a pu se créer dans les déchets : il s'agit d'une impureté d'origine minière.

- L'activité issue des éléments de la chaîne de l'U-238 des boues de B1/B2 est deux fois plus élevée que celle des boues de B5. Etant donné que les concentrations résiduelles en uranium sont comparables, la différence d'activité entre les boues anciennes de B1/B2 et celles plus récentes de B5 vient essentiellement du Th-230 (243 et 51 kBq/kg pour B1/B2 et B5 respectivement) et plus marginalement du Ra-226. Cette très nette différence ne peut s'expliquer que par l'amélioration au fil du temps, de la qualité du traitement du minerai uranifère à la mine, ce qui conduit aujourd'hui à des concentrés plus purifiés en Thorium, et marginalement en Radium.
- Les deux mêmes ruptures de chaînes sont observées sur l'ensemble des lithologies : entre le Th-230 et le Ra-226 et entre le Po-214 et le Pb-210. Ces ruptures s'expliquent par le fait que le Radium est nettement plus soluble dans l'eau que le Thorium ou le Plomb.
- De même, l'absence de rupture de chaîne entre l'U-234 et le Th-230 dans les stériles et résidus miniers de l'ancienne mine de soufre confirme que l'activité de ces stériles provient de la migration des éléments les plus solubles contenus dans les boues.

Chaîne de l'U-235 :

La Figure 10 présente l'activité moyenne des éléments de la chaîne de l'U-235 pour chaque famille de matériaux, en faisant apparaître les déséquilibres.

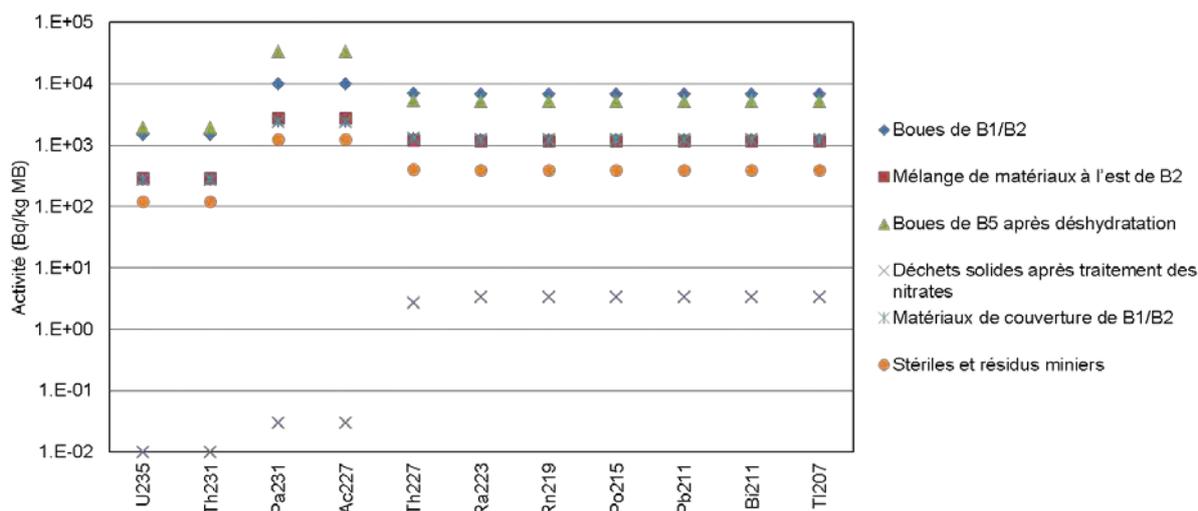


Figure 10 : Synthèse des activités moyennes de l'U-235 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- L'activité de l'U-235 est largement inférieure à celle du Protactinium-231 dans l'ensemble des lithologies. Il s'agit de la conséquence directe du procédé de purification de l'uranium de l'usine de Malvés, qui extrait sélectivement la quasi-totalité de l'uranium et ne laisse dans les effluents qu'une faible part de celui-ci, avec la totalité des autres isotopes des chaînes naturelles correspondantes, dont le Pa-321. Compte tenu de sa demi-vie, le Protactinium n'a pu se créer dans les déchets : il s'agit donc également d'une impureté d'origine minière.
- L'activité issue des éléments de la chaîne de l'U-235 des boues de B1/B2 est inférieure à celle des boues de B5. Etant donné que les concentrations en uranium sont comparables, la différence d'activité entre les boues anciennes de B1/B2 et celles plus récentes de B5 vient du Pa-231 (9 et 33 kBq/kg pour B1/B2 et B5 respectivement). Cette nette différence conduit à penser que,

contrairement au Thorium, l'évolution du traitement du minerai uranifère à la mine conduit aujourd'hui à des concentrés plus riches en Protactinium.

- L'autre rupture de chaîne constatée entre le Pa-231 et le Th-227 sur l'ensemble des lithologies est attribuée au fait que le Th-227, comme le Th-230 de la chaîne de l'U-238, est une impureté d'origine minière.

Chaîne du Th-232 :

La Figure 11 présente l'activité moyenne des éléments de la chaîne du Th-232 pour chaque famille de matériaux, en faisant apparaître les déséquilibres.

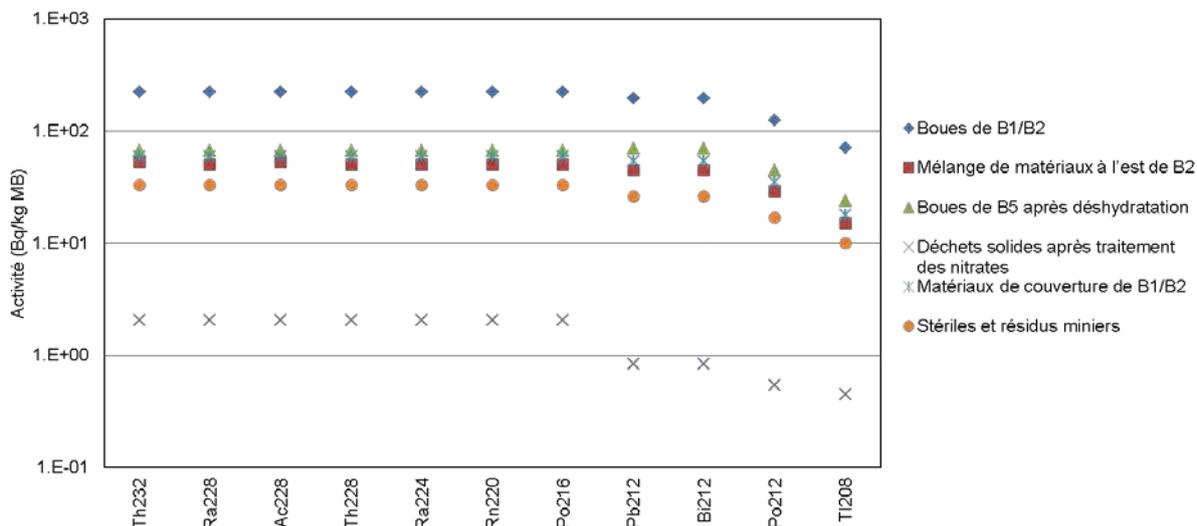


Figure 11 : Synthèse des activités moyennes du Th232 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- L'activité issue des éléments de la chaîne du Th-232 reste très faible, y compris pour les boues de B1/B2 (2,2 kBq/kg).
- L'activité issue de la chaîne du Th-232 des boues de B5 (0,7 kBq/kg) est très inférieure à celle de B1/B2. Cette observation corrobore le constat effectué précédemment sur le fait que les procédés de traitement dans les mines se sont améliorés au fil du temps, éliminant de façon plus significative le Thorium et approvisionnant ainsi le site de Malvési avec des concentrés plus pauvres en impuretés Thorium (Th-232 et Th-228 en l'occurrence).

Enseignements :

Les déséquilibres constatés dans les déchets de procédé de Malvési s'expliquent ainsi par le fait que les différents radionucléides ont des comportements chimiques très différents et que les traitements qui leur sont appliqués, d'abord en mine, puis au cours de la conversion, vont avoir pour effet une ou plusieurs ruptures des chaînes de filiation radioactives.

En effet, le minerai uranifère est généralement traité à la mine par attaque sulfurique, puis purification par solvant, pour obtenir au final, par précipitation chimique, un concentré minier. Celui-ci, arrivé à Malvési, subit une nouvelle phase de purification par solvant. Les effluents de procédé sont ensuite neutralisés à la chaux. L'application de cette succession de procédés chimiques, tout d'abord au minerai, puis aux concentrés miniers, multiplie les environnements chimiques différents qui vont séparer les éléments de filiations en fonction notamment de leur solubilité dans les différents milieux chimiques considérés.

L'uranium naturel parvenant à Malvésí dans les concentrés miniers n'est donc ni en équilibre avec ses descendants, ni parfaitement pur. Il contient des impuretés radiologiques, et notamment du Th-230 et du Pa-231. Ces impuretés sont retirées par le processus de purification d'uranium de l'usine, et se retrouvent réparties, selon leur solubilité, entre les boues de décantation (par exemple pour le Thorium, le Protactinium ou le Plomb) et les bassins d'évaporation (par exemple pour le Radium).

La deuxième observation concerne les déchets solides les plus récents (les boues de décantation de B5). Leur moindre activité en Thorium, indique une séparation plus efficace dans les mines entre l'Uranium et le Thorium. Cela laisse en outre supposer que les futurs déchets « à produire » du procédé de conversion seront d'activité de plus en plus faible.

Par ailleurs, dans les déchets de Malvésí, les radionucléides fils vont se mettre lentement à l'équilibre avec leur père sur une durée plus ou moins longue, proportionnelle à leur demi-vie. La première évolution va concerner une lente mise à l'équilibre avec les radionucléides de début de chaîne les plus concentrés (comme les Thorium-230 et 227), suivie en parallèle d'une lente décroissance vers la mise à l'équilibre avec les Uranium-238 et 235, qui sont les têtes de chaîne.

4.1.3 Comportement géochimique des déchets

Ce travail de thèse, débuté en juin 2010 à l'Université Autonome de Barcelone (UAB, Espagne), a pour objectif de mieux comprendre le comportement de l'uranium et du thorium contenus dans les boues de B1/B2 et leur interaction avec les stériles miniers, dans les conditions actuelles de leur entreposage. Ce travail a fait l'objet d'un ensemble d'expérimentations menées en Espagne et en Allemagne sur des échantillons provenant du site, en vue de bâtir une modélisation couplant les phénomènes géochimiques et de transport.

L'objectif principal de ce travail est de mieux définir les processus et mécanismes contrôlant l'interaction de l'uranium et du thorium avec la phase solide du déchet, ainsi que leur transfert dans un environnement caractérisé par une force ionique importante de la phase liquide. Leur solubilité et leur comportement de transport par l'eau sont en effet directement liés aux conditions géochimiques existantes dans ces différents environnements qui déterminent la spéciation⁸ de ces deux radionucléides.

4.1.3.1 Caractérisation minéralogique

Concernant la caractérisation du terme source, une attention particulière a été apportée à la détermination des formes minéralogiques et chimiques de l'uranium et du thorium dans les familles lithologiques de déchets présents dans B1/B2.

Les résultats des analyses chimiques et par diffraction X confirment la présence des éléments majeurs provenant des concentrés miniers (métaux, U, Th, Fe, Na, Mg, Si et Al), de la roche source des résidus miniers (tels que S et Ca) et des processus chimiques mis en œuvre à Malvésí (N, F, Ca).

La présence de minéraux associant uranium et silice (liaison forte) a été confirmée dans la couche de boue par microscopie électronique à balayage, mais on le trouve également en dépôt sur les phases minérales principales telles que le gypse ou la calcite, ou encore associé à des phases minérales du fer ou de l'aluminium.

⁸ Forme chimique sous laquelle se trouve l'élément chimique considéré.

Les mesures de micro-spectroscopie ont fourni des informations quant à la distribution de l'uranium, indiquant notamment une corrélation de celui-ci avec le fer et le calcium, qui suggère un rôle majeur du fer dans l'adsorption de l'uranium et donc dans sa stabilité. La solubilité de l'uranium dans les eaux porales semble être contrôlée par la Schoepite ($\text{UO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) pour le mélange sol/boue, et par un silicate d'uranium dans la boue elle-même.

La distribution du thorium est corrélée à celle de l'uranium en certains endroits, montrant potentiellement un oxyde mixte U-Th. En d'autres endroits, la distribution du thorium n'est corrélée à aucun autre élément. Les minéraux du thorium n'ont pas été identifiés au microscope ou par spectrométrie. Néanmoins, les calculs d'équilibre thermodynamique indiquent la présence de ThO_2 .

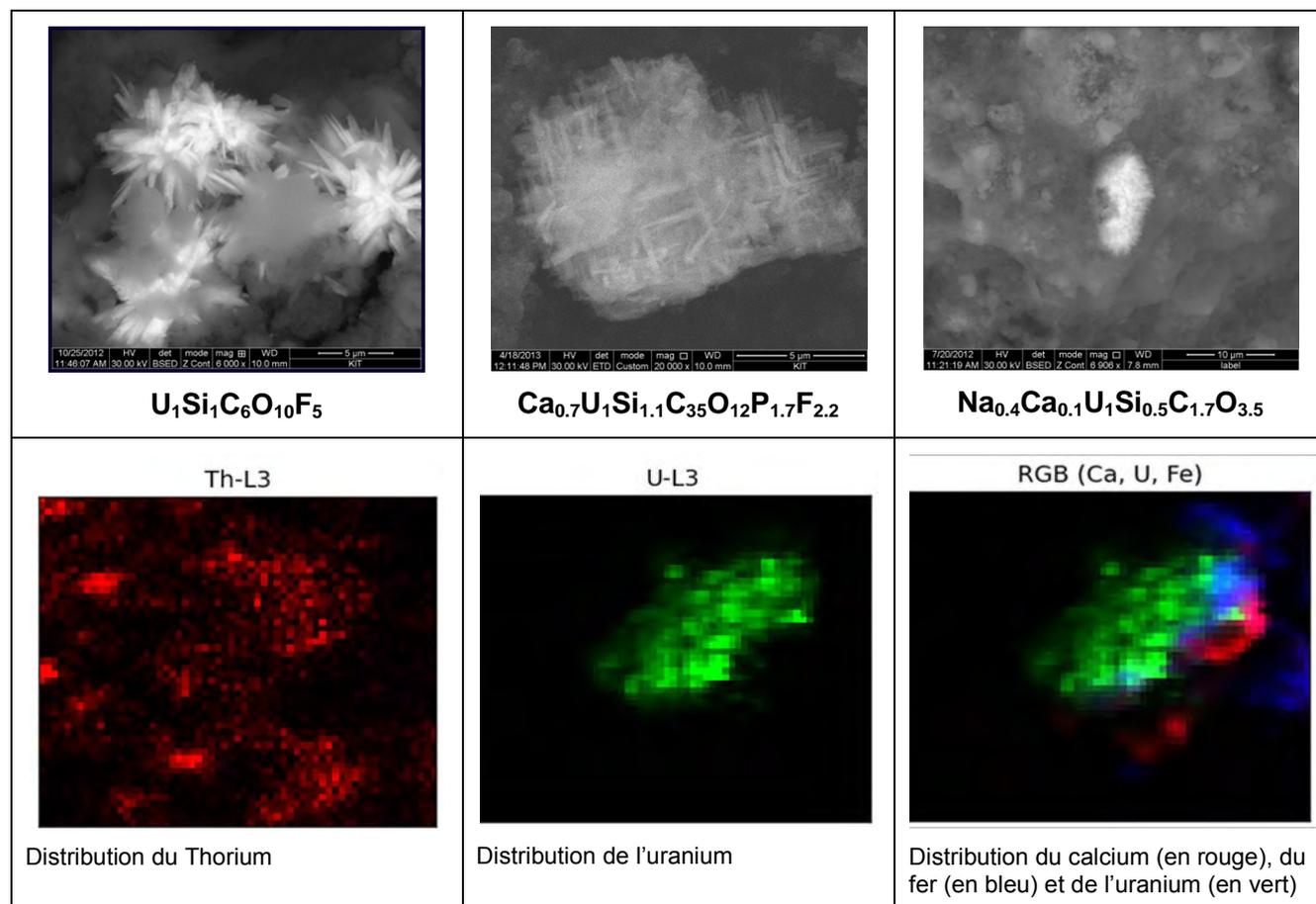


Figure 12 : Minéraux d'uranium identifiés au microscope électronique à balayage (en haut) et micro-cartographie élémentaire par diffraction des rayons X (en bas)

4.1.3.2 Caractérisation géochimique

La deuxième partie du travail expérimental a concerné la caractérisation et la quantification du relâchement de l'uranium et du thorium par les déchets, en conditions statiques et dynamiques, c'est-à-dire à l'aide d'expériences en batch et en colonnes.

Les expériences en colonnes simulent le mécanisme de transport de l'uranium et du thorium dans les conditions du site, avec migration vers le bas, depuis les boues vers les résidus miniers sous-jacents. Elles indiquent que dans un état non perturbé, c'est-à-dire dans l'état actuel réducteur des boues, le thorium est quasi-intégralement retenu dans celles-ci, alors qu'une fraction d'uranium de l'ordre de 5 % est relâché (cette proportion pourrait atteindre 20 % en conditions oxydantes). Un important pouvoir tampon dû à la présence de calcite a été observé dans toutes les expériences.

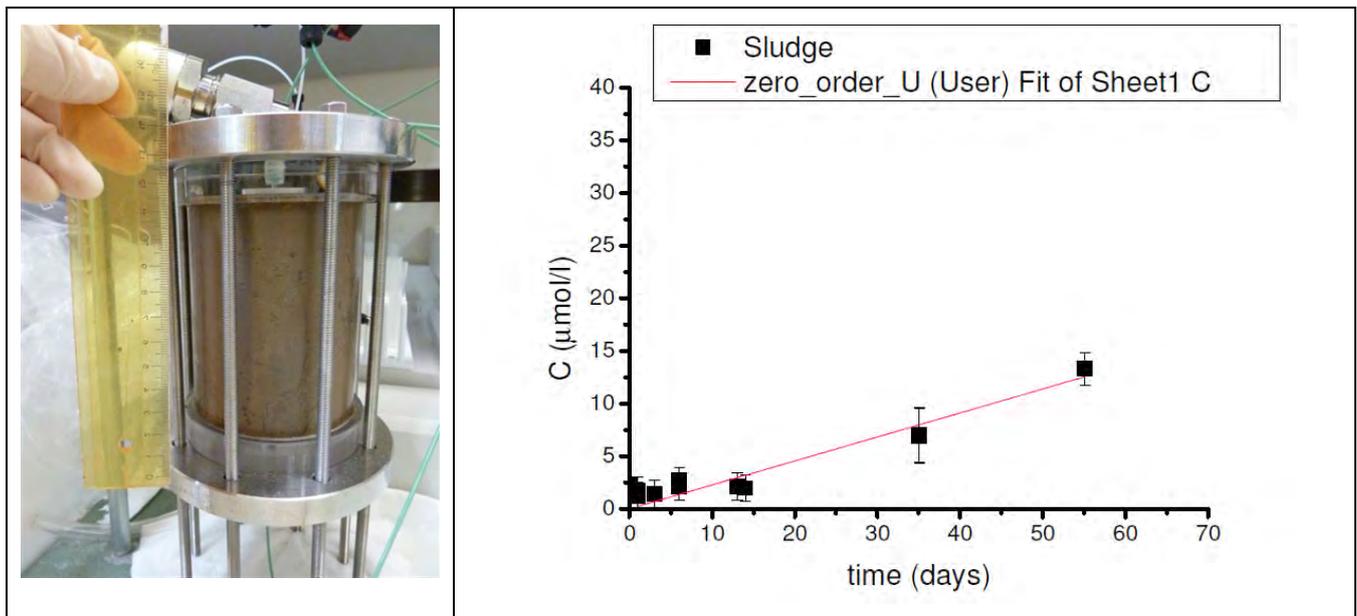


Figure 13 : Essais en colonnes avec détermination expérimentale de la courbe de désorption

Des essais d'adsorption par les résidus miniers indiquent une très forte adsorption de l'uranium solubilisé : après passage de plus de 800 volumes poraux, 85 % de l'uranium injecté était toujours retenu par les résidus miniers présents dans la colonne.

En résumé, la spéciation de l'uranium est principalement contrôlée par les conditions oxydo-réductrices et le pH, alors que celle du thorium dépend essentiellement du pH. La spéciation des deux radionucléides est également contrôlée par la concentration totale en carbonates dissous, même si d'autres substances peuvent intervenir, telles que les fluorures, les phosphates ou, dans certaines conditions, la matière organique.

Les expériences indiquent également un relâchement lent de l'uranium depuis la couche de boues, et sa forte rétention par les résidus miniers. Ceux-ci, qui participent à maintenir un front de réduction et fixent l'uranium percolant depuis les boues, constituent un matériau très intéressant en tant que barrière ouvragée de confinement des déchets.

4.2 Reconnaissances géologiques

Les reconnaissances du milieu géologique pouvant constituer la barrière passive d'un futur stockage sur le site de Malvési ont fait l'objet de plusieurs études préliminaires :

- synthèse géologique et structurale des bassins sédimentaires de l'environnement proche du site,
- réalisation de forages profonds, avec caractérisation minéralogique, physique et texturale d'échantillons de roches,
- reconnaissance hydrogéologique et caractérisation des différentes nappes aquifères.

4.2.1 Géologie structurale régionale

A quelques kilomètres au nord-ouest de Narbonne, le site de Malvési est implanté sur le rebord ouest de la plaine alluviale de l'Aude, au pied de la colline de Montlaurès. Le site de Malvési se trouve situé à proximité immédiate de la limite entre deux domaines géologiques distincts :

- le fossé oligocène de Narbonne-Sigean dont il occupe le rebord Ouest,
- le massif jurassique de Fontfroide-Montredon, unité externe de la Nappe des Corbières, qui forme l'épaulement du fossé de Narbonne-Sigean.

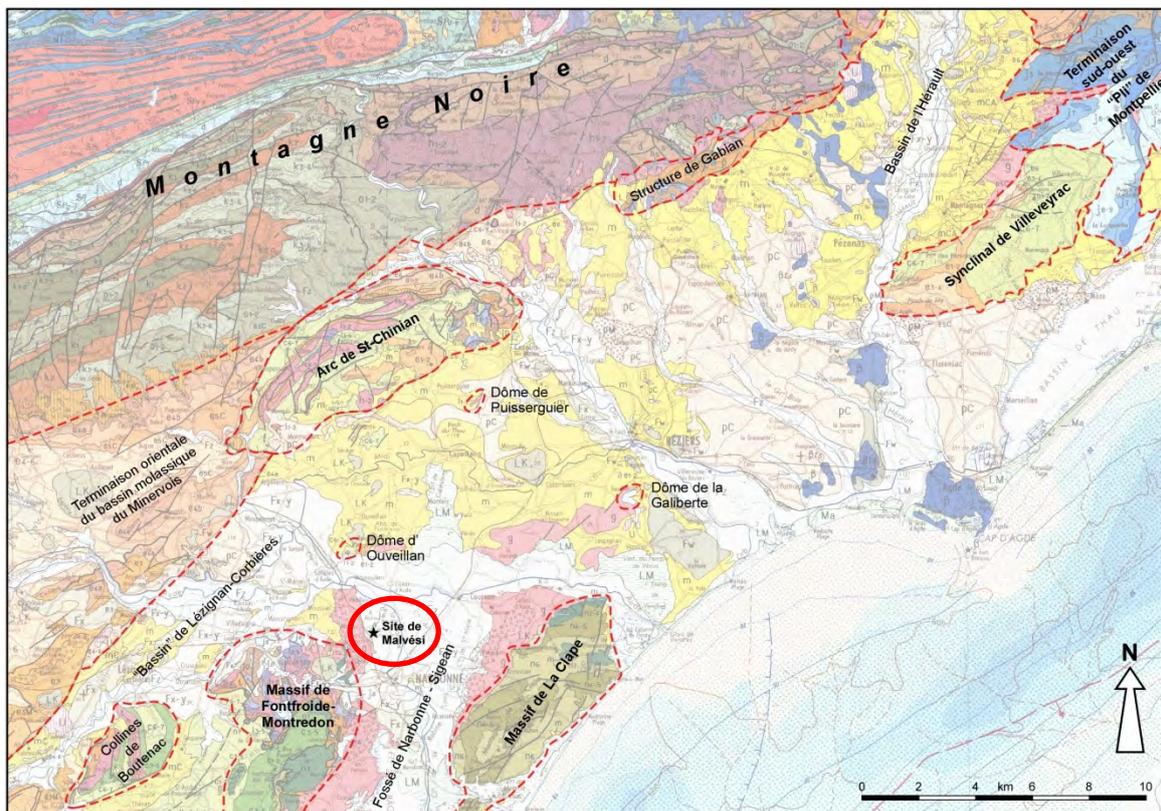


Figure 14 : Localisation du site de Malvési sur la carte géologique à 1/250 000 (feuille n°38 – Montpellier), avec position des principales structures géologiques connues régionalement.

La zone d'étude est localisée dans un domaine où sont superposés des terrains de géométrie relativement simple et des terrains fortement structurés. Cette disposition particulière s'explique par une histoire géologique polyphasée marquée par deux événements géodynamiques d'ampleur régionale, relativement tardifs dans l'histoire géologique régionale (voir figure 38 en Annexe) :

- la plus récente est une phase d'extension d'âge Oligocène, liée à l'ouverture de la Méditerranée occidentale (Golfe du Lion) et s'inscrivant dans l'épisode du rifting ouest-européen. Cette phase est à l'origine de la création de bassins sédimentaires (ou fossés d'effondrement) comme celui de Narbonne-Sigean,
- antérieurement, la formation des Pyrénées (l'orogénèse pyrénéenne, liée à la collision entre la plaque ibérique et la plaque eurasiennne) a conduit à un régime compressif qui est à l'origine de la structuration complexe des terrains en plis, chevauchements et nappes de charriage. Cette complexité structurale est particulièrement bien illustrée par la nappe des Corbières, dont fait partie le massif de Fontfroide-Montredon.

Avant ces deux évènements fortement structurants, l'histoire géologique de la zone d'étude est celle de la bordure occidentale de l'océan téthysien dont témoignent les terrains d'âge Jurassique à dominante calcaire qui affleurent sur les reliefs du massif de Fontfroide-Montredon. A la base de ces terrains calcaires, les termes supérieurs argileux et évaporitiques (gypse et sel gemme) du Trias, sont des faciès très plastiques qui constituent le principal niveau de décollement (ou de glissement) lors des épisodes compressifs pyrénéens, mais aussi le principal niveau d'enracinement des failles normales d'extension liées à l'ouverture du Golfe du Lion.

La situation structurale particulière du site de Malvési (à la limite d'un bassin extensif oligocène et de structures compressives pyrénéennes) est relativement commune dans le cadre régional. Pour analogue, on citera par exemple :

- le secteur de Cazouls-les-Béziers, à la limite du fossé synrift de Thézan et de l'unité chevauchante de Cazedarnes appartenant au complexe de St-Chinian,
- la bordure ouest du bassin synrift de l'Hérault, au contact des panneaux mésozoïques structurés de Gabian ou de Clermont-l'Hérault.

Le bassin de Narbonne-Sigean est ainsi un des bassins formés lors de la phase extensive oligocène qui a affecté l'Europe de l'Ouest depuis la Mer du Nord jusqu'à la Méditerranée occidentale.

En France, cet évènement géodynamique est à l'origine de la création de bassins étroits très profonds définis comme des fossés (fossé rhénan, fossés de Bresse ou de Valence). Ces fossés sont comblés par un épais remplissage sédimentaire détritique d'origine principalement continentale.

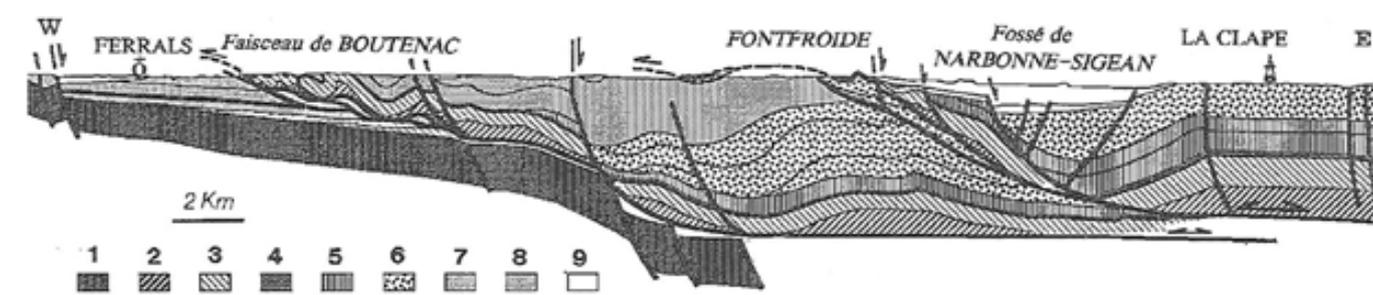


Figure 15 : Coupe géologique depuis les Corbières orientales jusqu'au massif de la Cape (d'après Gorini et al., 1991)

Les failles normales bordant à l'ouest le fossé de Narbonne-Sigean s'enracinent toutes en profondeur aux argiles évaporitiques du Trias, niveau de décollement principal des structures pyrénéennes.

La situation particulière de la zone et l'orientation de cette phase d'extension oligocène a permis ici, à la différence des bassins situés à plus à l'est, de réactiver des plans de failles déjà existants, datant de la phase pyrénéenne, ce qui limite le nombre de fractures tectoniques d'extension.

4.2.2 Structures sédimentaires et tectoniques locales

Le fossé de Narbonne-Sigean, d'orientation NNE-SSW, s'étend depuis l'étang de Sigean au sud jusqu'au nord de Narbonne, en position basse, coincée entre les massifs de Fontfroide-Montredon à l'ouest et de la Clape à l'est, suivant un sillon large de 10 à 15 km et long d'au moins 25 km.

Il est décrit⁹ comme asymétrique, avec des formations oligocènes plus épaisses au nord-ouest du bassin, qu'au sud-est en direction du massif de La Clape. Le centre du bassin serait situé approximativement au droit de Coursan, avec des épaisseurs maximales de sédiments dépassant 1 500 mètres.

Le remplissage sédimentaire du fossé de Narbonne-Sigean est relativement méconnu. Aucun sondage n'a en effet été réalisé au cœur du bassin où les dépôts oligocènes sont recouverts par des alluvions très récentes d'âge quaternaire.

Seules les bordures du bassin fournissent des affleurements révélant la nature des dépôts :

- majoritairement argilo-sableux (silico-clastiques), avec parfois des graviers ou des conglomérats, et localement une cimentation carbonatée,
- plus rarement évaporitiques (avec du gypse).

Et les environnements de dépôt :

- continentaux de type fluviatile (pour l'oligocène supérieur « rouge »),
- lacustre à lagunaire (pour l'oligocène inférieur « gris »).

Compte tenu du peu de connaissances disponibles sur la structure de ce bassin sédimentaire, AREVA a réalisé en 2013 :

- le relevé détaillé de tous les affleurements situés à proximité du site,
- deux profils sismiques à haute résolution,
- deux forages profonds (100 m).

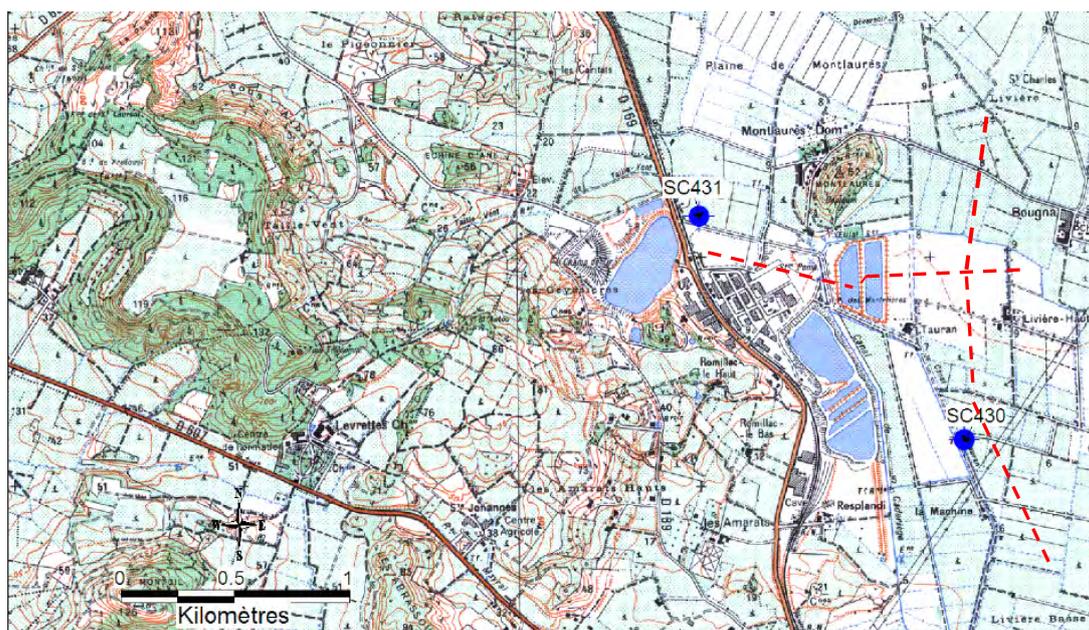


Figure 16 : Localisation des profils sismiques (pointillés rouges) et forages profonds (points bleus)

L'objectif principal était d'acquérir des informations sur la géologie structurale (et notamment le positionnement par rapport au massif jurassique de Montlaurens), l'épaisseur et la composition des séries géologiques d'âge oligocène de façon à pouvoir construire un modèle 3D de la géologie locale.

⁹ (Gorini, 1991 ; Gorini et al., 1991)

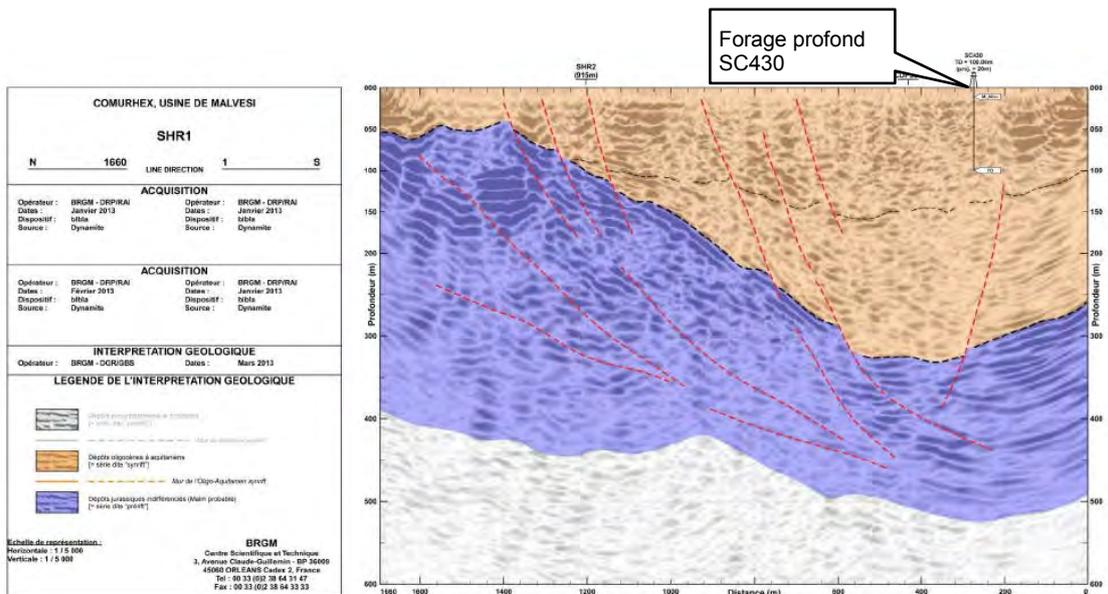


Figure 17 : Interprétation du profil sismique SHR1 (Nord-Sud)

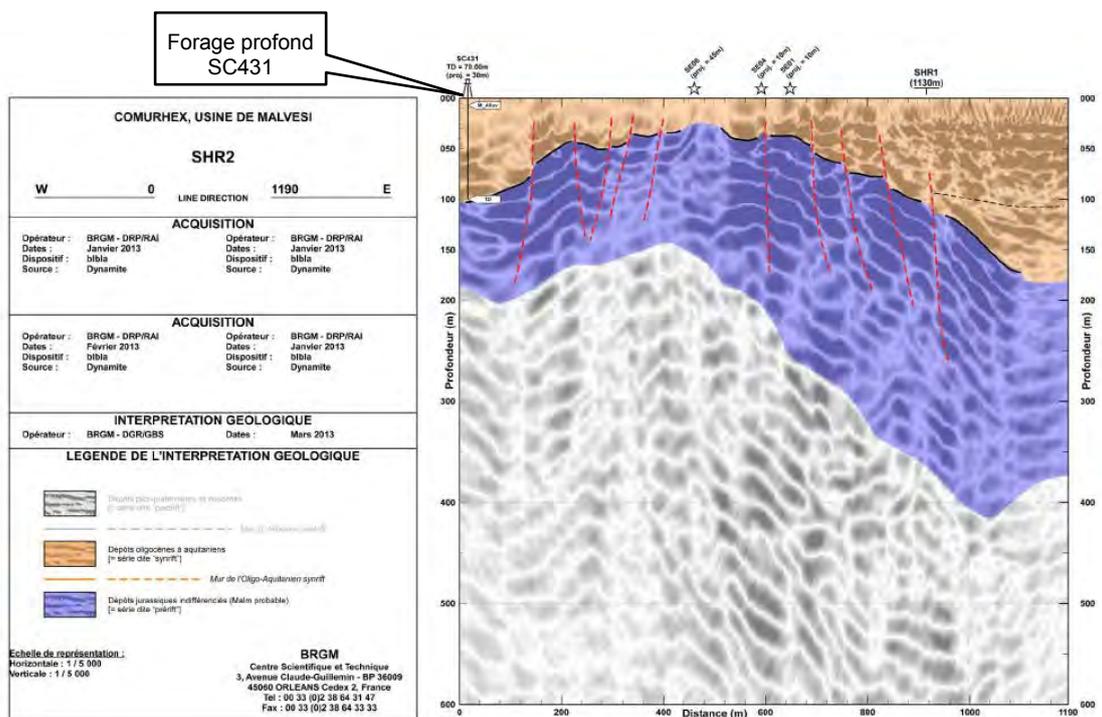


Figure 18 : Interprétation du profil sismique SHR2 (Ouest-Est)

L'interprétation de ces profils sismiques révèle la forte épaisseur des séries sédimentaires de comblement du bassin et l'absence de faille majeure pouvant expliquer le massif de Montlaurès.

Sans que l'on puisse encore conclure de façon définitive, il est ainsi probable que l'hypothèse figurant sur la carte géologique, d'une faille à rejet important située au pied sud de la colline de Montlaurès et

mettant en contact une série grise d'âge oligocène inférieur au NW avec une série rouge d'âge oligocène supérieur au SE, doit être abandonnée au profit d'une succession de fractures d'ampleur faibles, failles normales liées à l'ouverture du bassin de Narbonne-Sigean vers le sud-est.

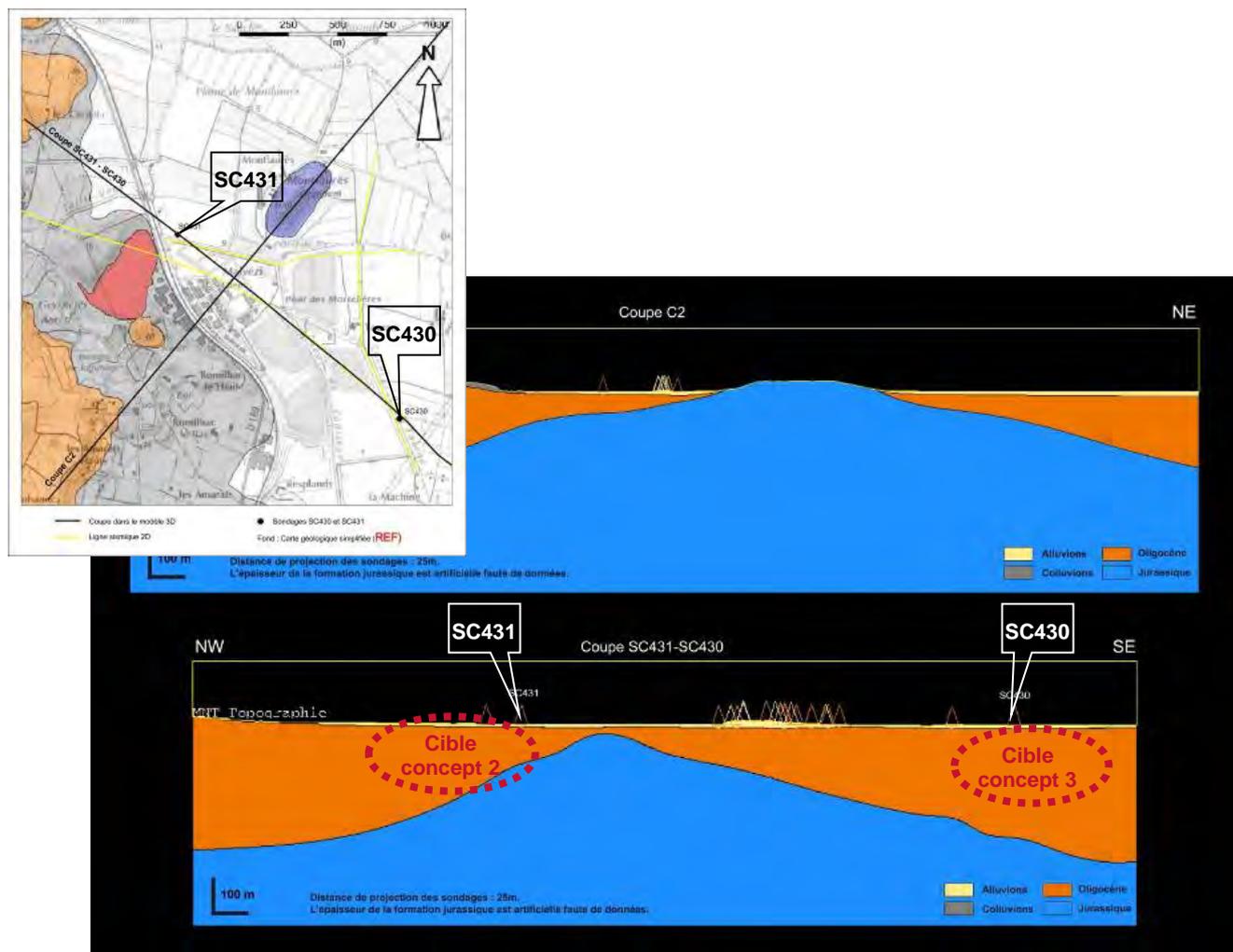


Figure 19 : Coupe interprétative des données sismiques et de forage

Quant à l'épaisseur des séries sédimentaires, il est clairement démontré l'existence :

- D'une épaisseur de l'ordre de 100 m au nord-ouest, où le forage SC431 ne recoupe que la série oligocène « grise »,
- D'une épaisseur dépassant les 300 m au sud-est, où le forage SC430 ne recoupe que la série oligocène « rouge », qui surmonte vraisemblablement la série « grise » située plus en profondeur.

4.2.3 Caractérisation des séries sédimentaires

Les deux forages de 100 m, implantés au nord-ouest et au sud-est du site, afin de reconnaître respectivement les formations oligocènes grises et rouges (cf. Figure ci-avant), ont été réalisés par carottage sur toute leur longueur. Des mesures de perméabilité ont été réalisées au cours de l'avancement des forages, et dans chaque ouvrage, les investigations ont été complétées par des mesures diagraphiques.

Les carottes de forages ont fait l'objet de prélèvements pour analyses pétrographiques¹⁰ et minéralogiques. La minéralogie a été déterminée par microscopie optique, diffraction des rayons X sur poudre désorientée et sur lame orientée, et par fluorescence X.

Des mesures de teneur en eau, des densités humides et sèches, des surfaces spécifiques à l'azote ont été réalisées et la capacité d'échange cationique des échantillons ont été mesurées.

Les données recueillies montrent que les deux formations sont très différentes chimiquement et minéralogiquement.

Pour le forage SC430, localisé au sud-est du site, situé dans la série **Oligocène rouge** :

- les faciès rencontrés sur toute la hauteur sont composés de formation marneuses et argileuses rouges compactes, parfois détritiques (sables et grès, avec des passées de graviers, parfois conglomératiques) caractéristiques d'un milieu de dépôt de type fluvatile,
- les variations de composition chimique sont essentiellement liées à la présence ponctuelle de passages plus sableux (quartz/silice) et à des occurrences de concrétions carbonatées (de type calcrète, à dolomie et/ou calcite),
- la teneur en argile est importante (de l'ordre de 50 %) et relativement homogène. La nature de la phase argileuse (riche en illite/muscovite) est également homogène. Les passées les plus argileuses se situent aux niveaux 31-40 m et 47-57 m, ainsi qu'au-delà de 70 m de profondeur.
- les mesures de perméabilité en forages ont montré des valeurs comprises entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s,
- les diagraphies montrent une porosité assez constante de l'ordre de 25 %.



Figure 20 : Aspect des échantillons de l'Oligocène rouge (23,20 à 26,30 m)

¹⁰ La pétrographie est la science ayant pour objet la description des roches et l'analyse de leurs caractères structuraux, minéralogiques et chimiques.

Pour le forage SC431, localisé au nord-ouest du site et situé dans la série **Oligocène grise** :

- les faciès rencontrés sur toute la hauteur du forage sont plus hétérogènes, avec une série sédimentaire principalement composée d'argilites et dolomies hétérogènes, contenant parfois du gypse, associés à une fraction carbonatée et une fraction détritique quartzreuse. La base de la formation semble plus riche en carbonates, représentés essentiellement par la calcite (jusqu'à 64 %),
- la granulométrie est très fine, avec de très rares passées détritiques de sables très fins (silts). La teinte varie entre le gris clair et le marron sombre/noir avec la présence sur certaines passées décimétriques de lamines claires plissées, suggérant un milieu de dépôt de type lagunaire à lacustre. La teinte marron sombre/noir est en grande partie liée à la présence parfois abondante de matière organique et de pyrite,
- la fracturation post-sédimentaire qui affecte ces roches caractéristiques de milieux de dépôts réducteurs a favorisé localement le développement d'une minéralisation soufrée,
- le pourcentage en fraction argileuse est très variable (entre ~19 et ~80 %). La nature des argiles est également plus hétérogène. Les niveaux sombres des argilites présentent les teneurs maximum en argiles,
- les mesures de perméabilité réalisées dans les forages ont montré des valeurs comprises entre 10^{-4} à 10^{-6} m/s,
- la porosité varie largement avec la fracturation entre 25 et 50 %.

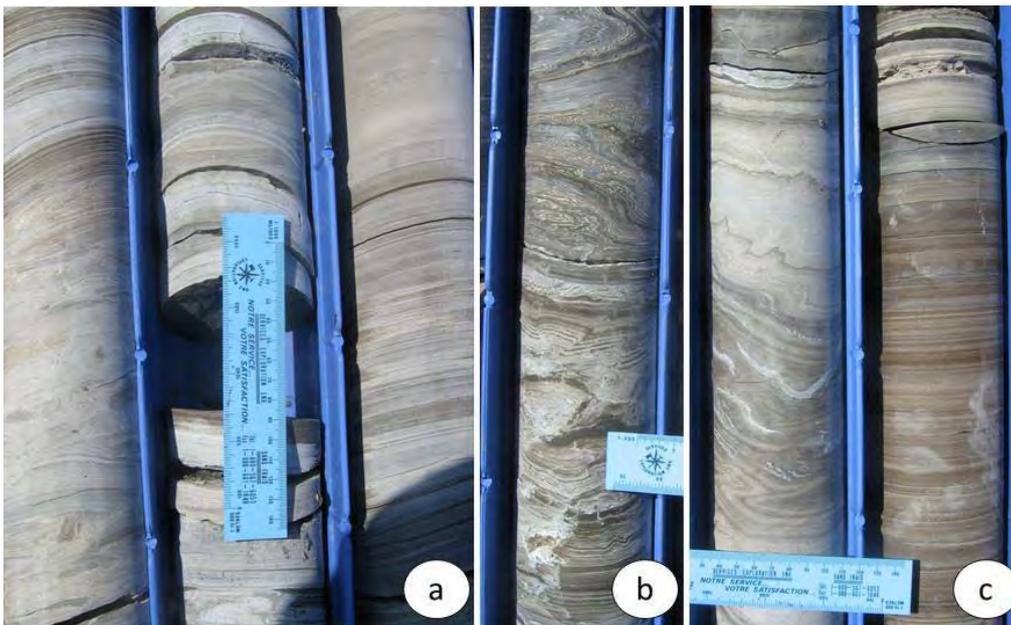


Figure 21 : Aspect général des échantillons prélevés dans l'Oligocène gris montrant les variations de teintes et les niveaux plissés

(a) ; (b) 41-42 m ; (c) 66.20-69.10 m

En complément de l'analyse minéralogique réalisée, des lixiviations et des mesures de capacité d'échanges cationiques ont été effectuées et intégrées dans différents modèles d'équilibre eau/roche/gaz afin d'estimer la composition des eaux porales, ce qui permet notamment de fournir des données d'entrée à la modélisation des transferts réactifs.

4.3 Reconnaissances hydrogéologiques

On distingue dans l'environnement proche du site de Malvési, trois systèmes aquifères de caractéristiques différentes :

- une nappe libre superficielle localisée dans les alluvions récentes du Quaternaire,
- des niveaux phréatiques dans les formations de l'Oligocène, d'extension probablement limitée,
- un aquifère karstique, développé au sein des formations calcaires d'âge Jurassique, et qui émerge au niveau de la source de l'Oeillal.

L'aquifère superficiel présent dans les alluvions est bien connu et apparaît drainé de façon régionale par l'Aude à l'est et au sud-est, et plus localement par le bassin de régulation au niveau du nord du site.

Les formations oligocènes, bien que possédant localement des niveaux potentiellement aquifères mais isolés, sont caractérisées globalement par une faible perméabilité. De même, la recharge directe par les pluies sur les horizons oligocènes affleurant, est limitée aux couches plus perméables conglomératiques, lesquelles sont, d'après les observations de terrain, de faible extension et mal connectés avec le reste de la série oligocène.

Les séries oligocènes ont ainsi, à grande échelle, un faible pouvoir aquifère.

Les calcaires karstifiés du Jurassique supérieur sont présents au nord du site, au niveau de la colline de Montlaurès. Ce dôme calcaire semble isolé, toutefois il est caractérisé à son pied par la présence d'une source karstique, dite de l'Oeillal, qui apparaît comme l'exutoire d'un vaste système aquifère souterrain.

Les débits observés et leur évolution annuelle, à savoir une augmentation des débits sur la période hivernale et des débits d'étiage soutenus en période estivale, militent en faveur d'un vaste aquifère bien connecté, dont la recharge par les précipitations s'effectuerait pour l'essentiel plus vers l'ouest sur le secteur de Névia.

La figure ci-après précise les secteurs probables d'alimentation par les pluies de cet aquifère, qui circule ensuite dans les calcaires karstifiés, sous la couverture oligocène.

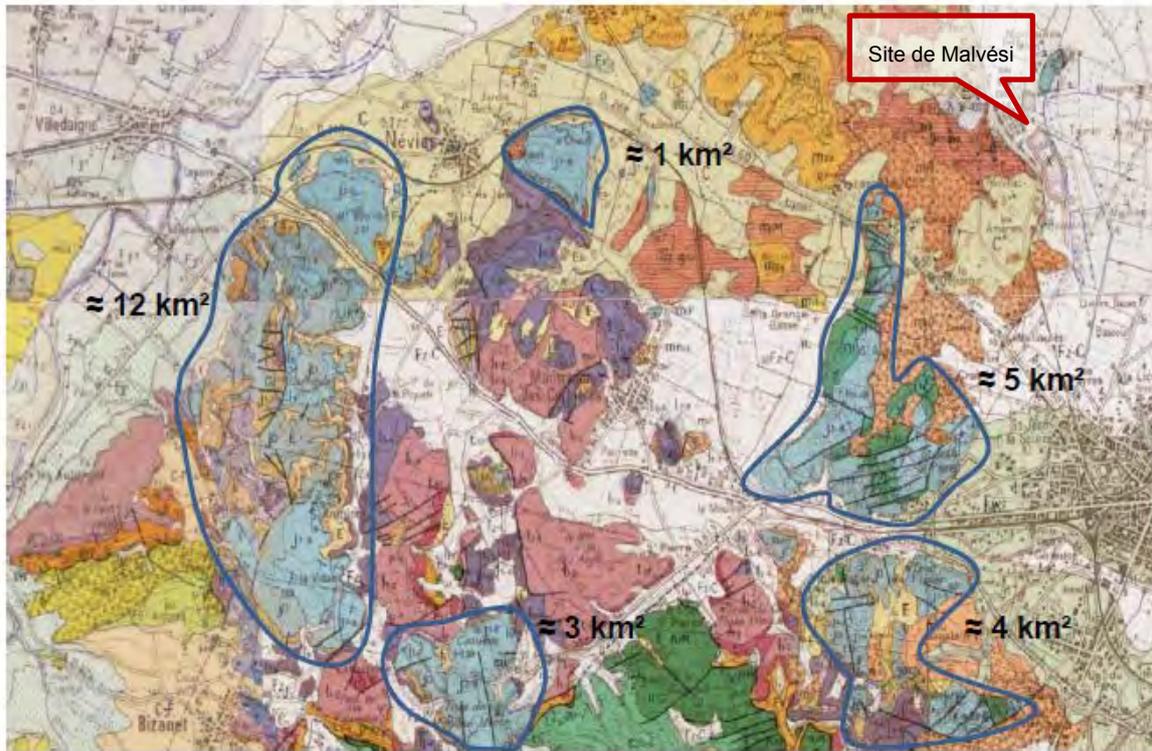


Figure 22 : Carte géologique présentant les aires d'affleurement des calcaires jurassiques à l'Ouest du site (zones de recharge probable de l'aquifère karstique).

4.3.1 Caractérisation des aquifères

La composition chimique des eaux prélevées dans les deux forages profonds dans l'oligocène sont très différentes :

- dominante chlorurée pour l'eau des marnes de l'oligocène rouge,
- dominante sulfatée pour les eaux de l'oligocène gris, avec une composition proche de celle de l'eau du bassin de régulation.

Outre cette caractérisation des eaux de l'Oligocène, AREVA participe aux études menées par l'Université de Nîmes, en soutenant notamment les travaux de thèse et de Master menés sur les karsts régionaux.

Dans le cadre de ce travail, plusieurs campagnes géochimiques ont été réalisées sur les eaux de la source de l'Œillal, de l'aquifère karstique à l'échelle locale et de la nappe superficielle, avec l'objectif de caractériser l'origine de l'eau de la source de l'Œillal, mais aussi de comprendre les écoulements et relations éventuelles au sein de ce système, notamment dans sa partie sous couverture.

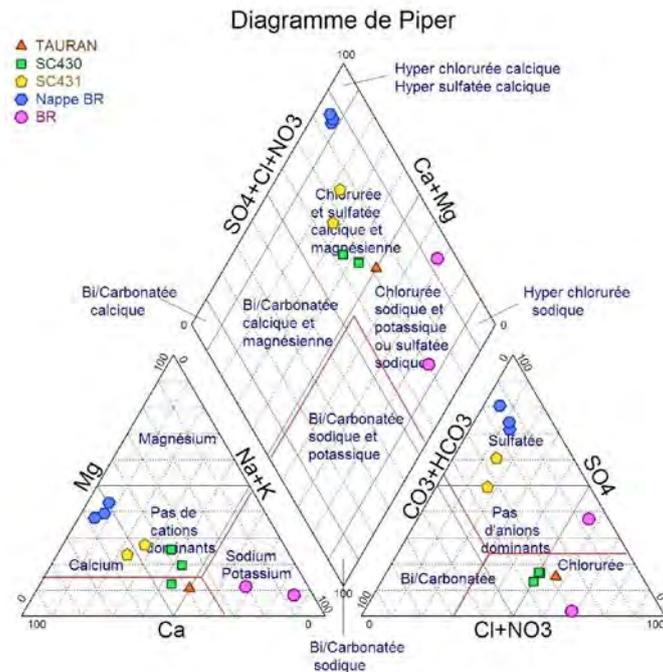


Figure 23 : Report des analyses des eaux sur un diagramme de Piper

Pour ce faire, les ions majeurs (Ca, Mg, Cl, Na, K, SO₄, NO₃, CO₃, HCO₃) ont été analysés ainsi que le Sr, Br, Cs, Rb et enfin les isotopes du Sr (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr), du Cl (³⁶Cl) de l'O (δ¹⁸O) et de l'H (δ²H).

Le chimisme de ces eaux karstiques révèle un contact avec des niveaux évaporitiques salifères, dont l'origine pourrait être les formations profondes datées du Trias.

En outre, les températures de l'eau à l'émergence de la source, comprises entre 18 et 20°C, sont de 2 à 3°C supérieures aux températures régionales indiquant des circulations à des profondeurs de l'ordre de plusieurs centaines de mètres.

4.3.2 Communication entre les aquifères

A l'échelle du site de Malvési, les transferts de la nappe alluviale vers les formations oligocènes sous-jacentes (les grises et les rouges) semblent très limités.

Les analyses des eaux prélevées dans les deux forages de reconnaissances, ainsi que les analyses pétrographiques et minéralogiques des différentes formations laissent supposer une totale indépendance des aquifères et l'absence d'échanges entre les formations jurassiques et oligocènes.

Néanmoins, cette hypothèse devra être totalement écartée par des études complémentaires, de même que les échanges potentiels entre les deux formations de l'Oligocène.

Enfin, au niveau de la source karstique de l'Œillal, les transferts d'eau se font depuis le karst vers la nappe superficielle, et non l'inverse.

4.4 Ingénierie de conception

4.4.1 Traitement et conditionnement des déchets

Cet aspect de l'étude de pré faisabilité a pour l'instant été abordé essentiellement à travers quelques essais de solidification réalisés en laboratoire et l'exploitation des modèles géochimiques dérivant de la caractérisation des déchets.

Quelques essais de cimentation ont été réalisés, dans l'objectif de vérifier la faisabilité d'un traitement de solidification des déchets destiné à augmenter leurs propriétés de résistance mécanique (et de réduire ainsi les tassements potentiels dans le stockage lui-même).



Echantillons	Résistance à la compression	Masse volumique	Matières sèches sur les éluats	Fraction soluble
	En Mpa	En t/m ³	en g/l	en % de MS
Boue Pressée F2	1,45	1,72	3,78	6,12 %
Boue Brute F3.0	2,62	1,77	0,78	1,04 %
Boue Pressée F3	4,46	1,95	1,37	2,15 %
Boue Pressée F7	2,45	1,79	2,58	4,00 %

Figure 24 : Résultats de quelques essais de formulation en vue d'une solidification / stabilisation du déchet

Les résultats indiquent que l'on peut atteindre une résistance à la compression supérieure à 1 Mpa avec une quantité limitée de ciment. Cette solidification réduit en outre notablement la fraction soluble du déchet.

L'exploitation des modèles géochimiques indique que le milieu cimentaire (basique et riche en calcium) apparaît comme un facteur favorable à la stabilisation de la majorité des radionucléides et substances chimiques présents dans les déchets. Par contre, la présence de sels (nitrates en particulier) dans ceux-ci pourrait augmenter leur solubilité et favoriser le transport par l'eau.

Au chapitre des perspectives à travailler figure également la possibilité de réduire le volume des déchets en pratiquant un tri granulométrique (par exemple sur les matériaux mélangés de l'est de B2), ou encore la possibilité d'extraire les nitrates (et éventuellement l'uranium) en pratiquant un repulpage à l'eau (légèrement oxydant au besoin) en cas de déplacement des déchets.

4.4.2 Ingénierie préliminaire des 3 concepts

4.4.2.1 Concept 1 : stockage en surface

Dans ce concept, les déchets et matériaux sont maintenus en place et c'est l'ensemble de leur environnement est adapté pour apporter les meilleures garanties de sûreté dans la durée.

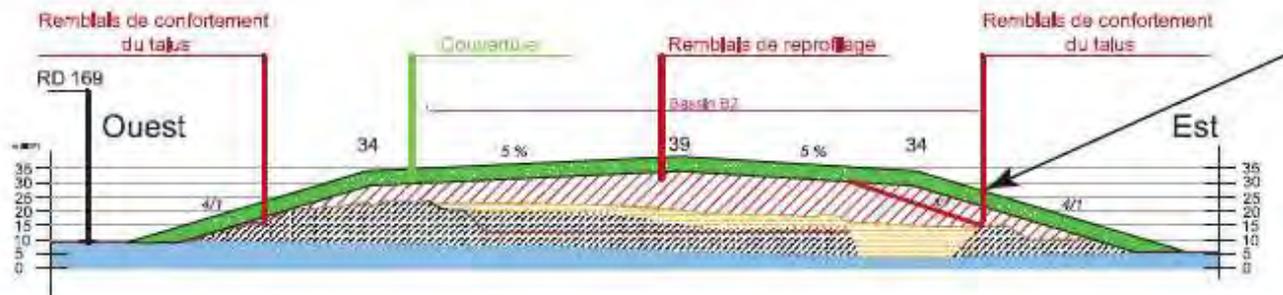


Figure 25 : Coupe du concept de stockage en surface

Principes de conception :

- la morphologie finale du stockage est un dôme obtenu par mise en place de matériaux d'apport de façon à assurer une pente de la couverture de l'ordre de 5 % sur le toit du dôme,
- les flancs du stockage sont remodelés pour obtenir une pente comprise entre 4H/1V et 10H/1V, leur conférant une stabilité géotechnique et une résistance à l'érosion,
- la couverture mise en place, d'une épaisseur de l'ordre de 5 m, est constituée d'une combinaison de couches de matériaux naturels et synthétiques permettant notamment de limiter les infiltrations et de drainer les eaux météoriques.

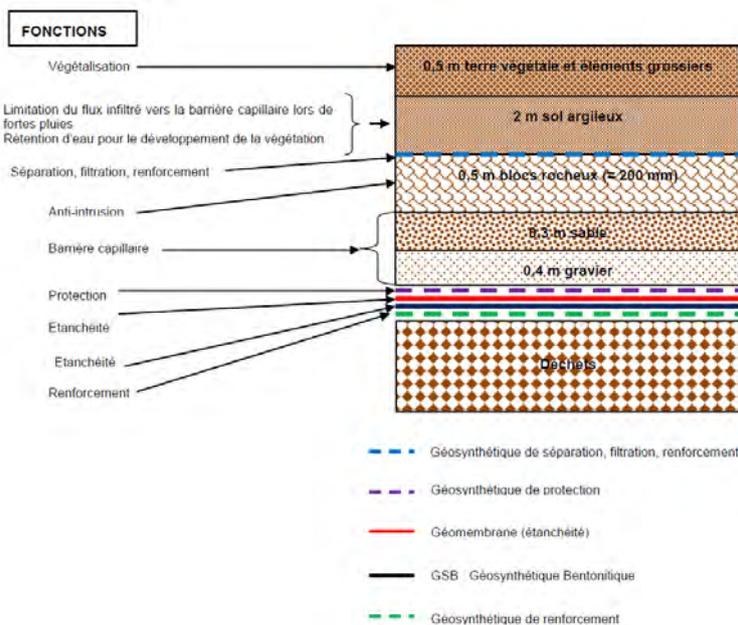


Figure 26 : Coupe schématique de la couverture

4.4.2.2 Concept 2 : stockage dans l'ancienne mine de soufre

Cette option considère le stockage des déchets dans l'ancienne mine de soufre à ciel ouvert (l'actuel bassin de régulation).

Cette fosse, d'une contenance de 2 millions de m³ et d'une profondeur de l'ordre de 40 m, dispose du volume suffisant pour recevoir l'ensemble des déchets, tout en maintenant la possibilité de les surmonter d'une couche de stériles miniers de 10 à 15 m d'épaisseur pour atteindre la côte finale.

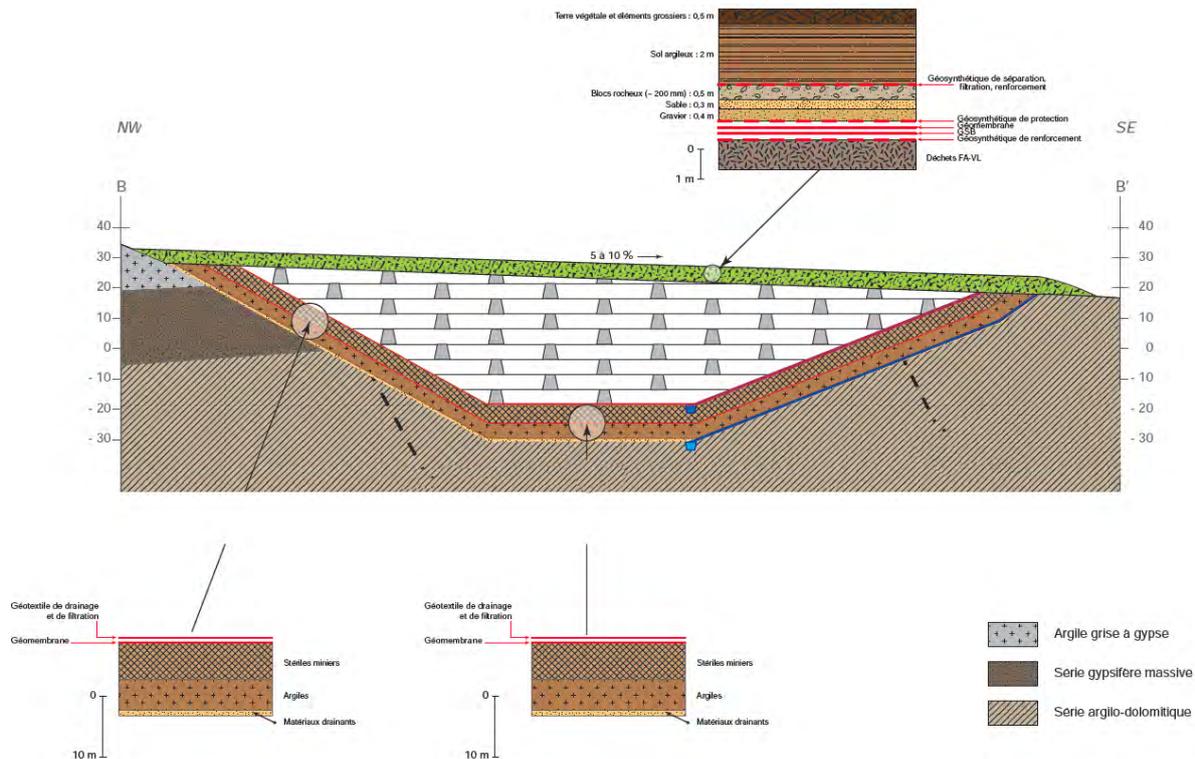


Figure 27 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre

Principes de conception :

- après vidange¹¹ du bassin de régulation, une barrière ouvragée constituée d'argile imperméables et de résidus miniers est mise en place sur le fond et les flancs de la fosse,
- les déchets sont disposés dans des alvéoles ou casiers étanches sur une hauteur de 5 m environ,
- les alvéoles, d'une surface de 2 000 m² environ et de 5 m de haut environ sont étagées et séparées latéralement par des digues,
- la couverture mise en place est très comparable à celle du concept 1. Elle vient épouser le relief pour assurer une meilleure durabilité contre les phénomènes d'érosion.

¹¹ Les données historiques indiquent que l'exploitation de la mine a été réalisée sans difficulté particulière d'exhaure des eaux et donc que l'alimentation provenait majoritairement des eaux de la nappe alluviale et non d'infiltrations profondes.

4.4.2.3 Concept 3 : stockage à faible profondeur dans les marnes rouges

Le troisième concept concerne le stockage géologique dans les marnes rouges de l'Oligocène supérieur, un milieu argileux faiblement perméable dans lequel serait située l'excavation.

Le fond du stockage est situé à une profondeur de l'ordre de 40 m, de sorte qu'il y ait une couche de marnes compactées de 10 à 15 m d'épaisseur entre le sommet des alvéoles de stockage et les terrains alluviaux de surface.

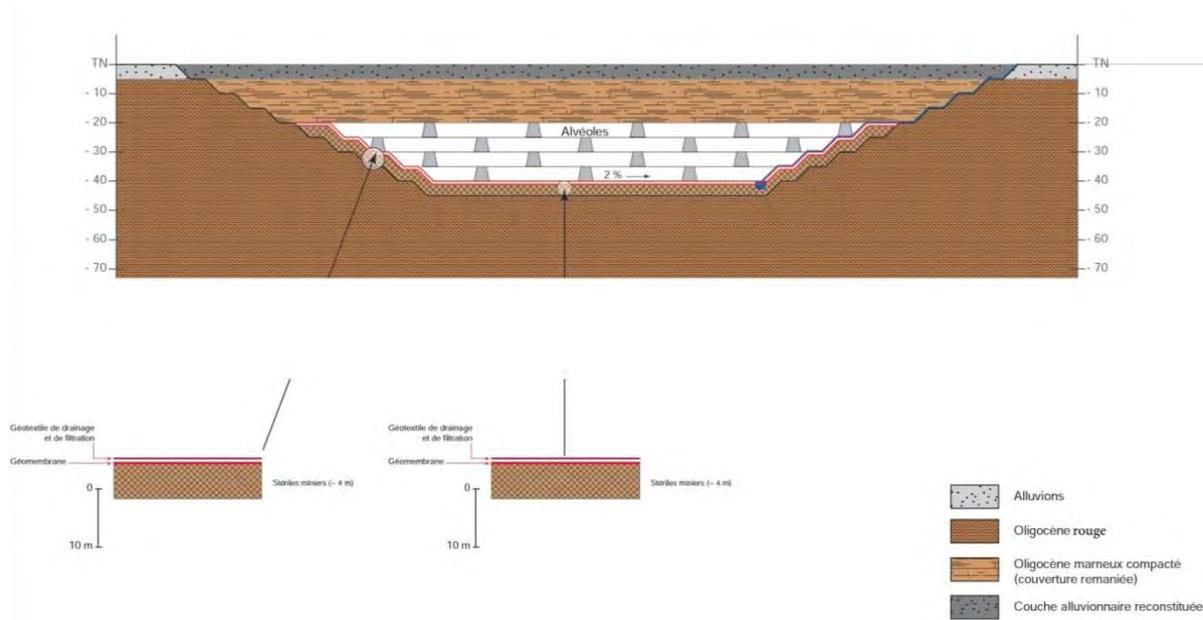


Figure 28 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans les marnes rouges

Principes de conception :

- une barrière ouvragée constituée de résidus miniers est mise en place sur le fond et les flancs de la fosse,
- les déchets, solidifiés, sont disposés dans des alvéoles ou casiers étanches sur une hauteur de 5 m environ. Les alvéoles, d'une surface de 2 000 m² environ et de 5 m de haut environ sont étagées et séparée latéralement par des digues,
- la couverture, constituée d'une couche imperméable de déblais marneux compactés, a une épaisseur comprise entre 10 et 15 m. Elle est surmontée d'un horizon drainant d'une épaisseur de l'ordre de 5 m, de façon à permettre le libre écoulement des eaux de la nappe alluviale.

4.5 Evaluation des performances

Pour évaluer les performances des différents concepts étudiés, AREVA a choisi d'effectuer une modélisation de la migration des substances chimiques et radionucléides dans le milieu géologique situé hors du stockage (transport par les eaux souterraines).

La modélisation retenue est une modélisation des transports réactifs, c'est-à-dire couplant les écoulements hydrauliques avec le transport réactif¹² de ces substances dans un modèle géométrique à deux dimensions présentant les caractéristiques génériques principales du concept de stockage. Cette modélisation combine :

- une modélisation hydrogéologique des flux d'eau,
- une modélisation géochimique intégrant les principaux minéraux impliqués dans la solubilité des substances, pour décrire les équilibres géochimiques dans les eaux porales du déchet et du milieu géologique,
- une modélisation de la capacité d'absorption des minéraux du milieu géologique.

Les résultats de ces calculs permettent une première comparaison des performances des trois concepts.

La construction de ces modèles permet également de les utiliser avec des approches itératives, au fur et à mesure de l'acquisition de données réelles (par exemple : perméabilité des roches, nature des minéraux argileux, capacité d'échanges ioniques, ...) ou de réviser les paramètres de conception du stockage lui-même.

4.5.1 Modélisation hydraulique

La géométrie des trois modèles comparés est représentée sur les figures ci-après.

Les triangles rouges représentent les points fictifs de contrôle (généralement situés à 100 m en aval du stockage) où sont calculées les concentrations en substances chimiques et en radionucléides dans les eaux souterraines de l'environnement extérieur du stockage.

Concept 1 :

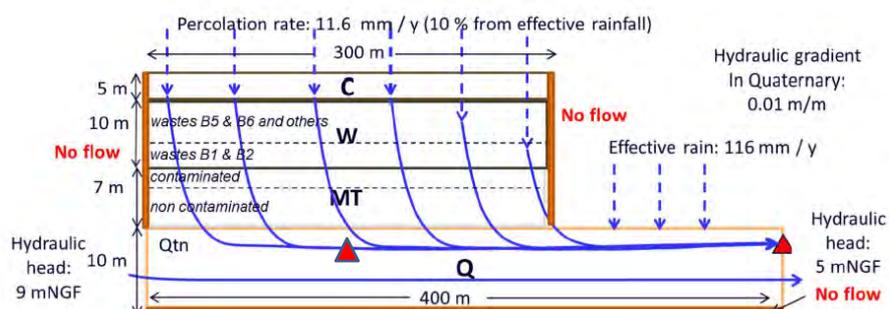


Figure 29 : Représentation des flux du Concept 1 et conditions aux limites du modèle (C: couverture, W: déchets, MT: stériles miniers, Q: alluvions quaternaires).

¹² L'outil numérique développé par le bureau d'études pour ce transport réactif (reactive transport modelling) utilise les codes Comsol Multiphysics (v4.3) et PHREEQC (v2.0).

Pour le concept 1, les déchets reposent sur la couche de stériles miniers et le transfert vers l'environnement extérieur de la fraction des eaux pluviales percolant à travers la couverture s'effectue à travers la nappe alluviale, sans qu'aucune protection de celle-ci ne soit prise en compte.

Concept 2 :

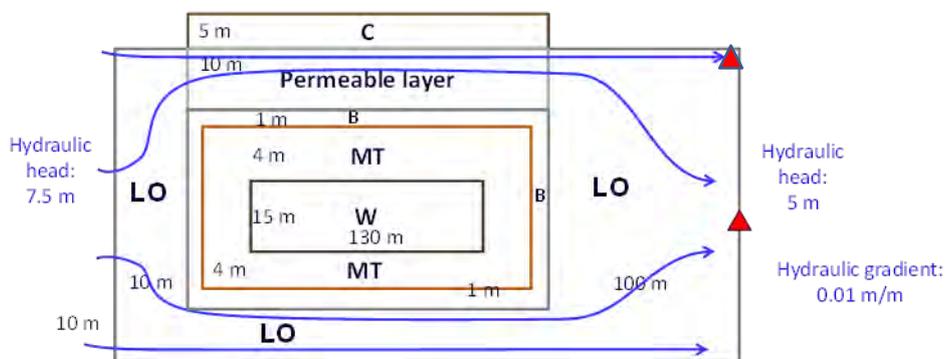


Figure 30 : Représentation des flux du Concept 2 et conditions aux limites du modèle (C: couverture, W: déchets, MT: stériles miniers, LO : Oligocène gris, B : bentonite)

Pour les concepts 2 et 3, les déchets sont placés au centre d'une enveloppe constituée de stériles miniers de la mine de soufre (de 4 m d'épaisseur) et l'étanchéité active du stockage est constituée par une couche de bentonite (argile) d'un mètre d'épaisseur.

Concept 3 :

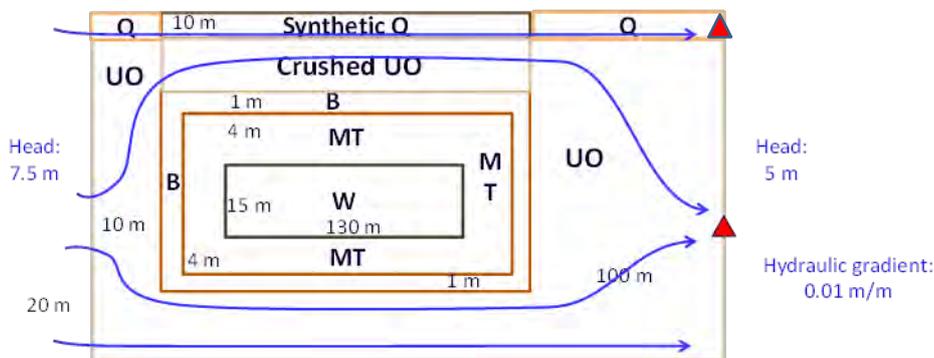


Figure 31 : Représentation des flux du Concept 3 et conditions aux limites du modèle (Q: alluvions quaternaires, W: déchets, MT: stériles miniers, UO : Oligocène rouge, B : bentonite)

Les modèles atteignent rapidement un état d'équilibre vis-à-vis de la saturation en eau : les pores sont totalement saturés en eau dans le cas des concepts 2 et 3, et restent non saturés dans le cas du concept 1.

En complément des calculs d'écoulement, l'entraînement d'un traceur parfait (totalement soluble dans l'eau) remplissant initialement le stockage a été simulé pour les concepts 2 et 3. Les calculs montrent que ce traceur parfait est quasiment entièrement entraîné hors de la zone en 30 000 ans environ, ce qui donne une bonne idée du temps nécessaire au renouvellement complet de l'eau du stockage.

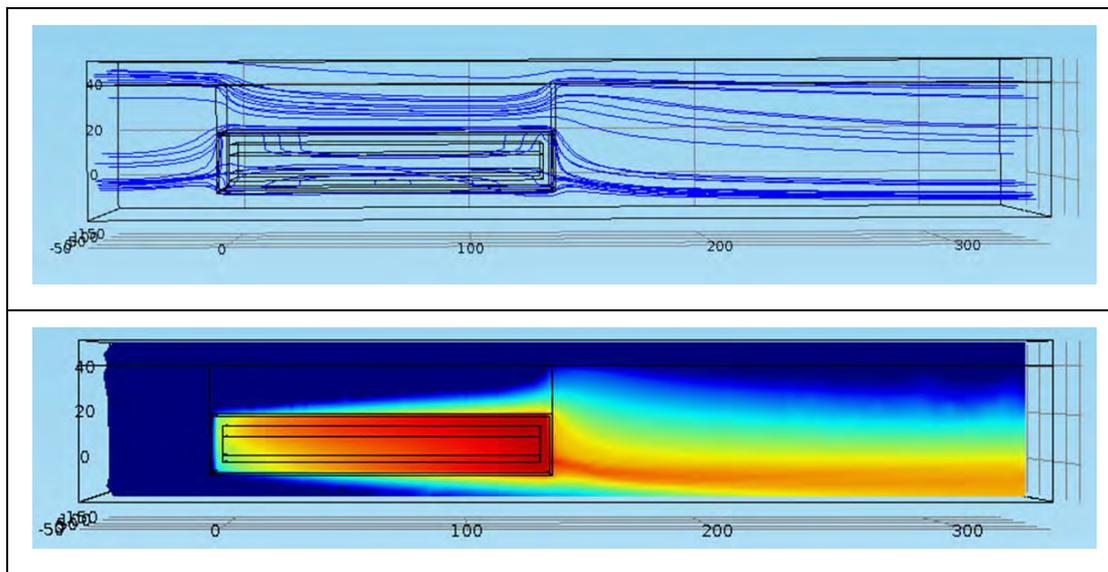


Figure 32 : Concept 3 - Représentation des lignes de courant et des concentrations à 5 000 ans pour un traceur parfait

4.5.2 Modélisation des phénomènes géochimiques et réactifs

La modélisation comprend une partie géochimique décrivant les principaux minéraux impliqués dans la solubilité des substances pour décrire les équilibres géochimiques dans les eaux porales du déchet et dans celles du milieu géologique.

Radionuclide	Solubility Control	Sorption/Ion Exchange Control				
	Minerals allowed to form if oversaturated (in bold and red font are indicated minerals considered initially present in the Waste and Contaminated Tailings compartments)	Mineral sorbing surfaces			Mineral exchangers	
		Illite	Montmorillonite	HFO	Illite	Montmorillonite
U(VI)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranophane • Schoepite 	+	+	+	+	-
U(IV)	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{UO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ 	-	+	-	-	-
Th	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{ThO}_2(\text{aged})$ 	+	+	-	-	-
Pu(IV)	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{PuO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ 	+	+	+	-	-
Pu(III)	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{Pu}(\text{OH})_3(\text{am})$ 	+	+	-	-	-
Tc(VII)	-	-	-	-	-	-
Tc(IV)	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{TcO}_2 \cdot 1.63\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ 	-	+	-	-	-
Ra	<ul style="list-style-type: none"> • $(\text{Ba,Ra})\text{SO}_4$ 	-	-	-	+	-

Tableau 3 : Exemple des phénomènes géochimiques et réactifs pris en compte dans la modélisation (pour les radionucléides)

La modélisation est « réactive » en ce sens qu'elle intègre également la capacité d'absorption et d'échanges ioniques avec les minéraux présents dans la roche extérieure (les argiles en particulier).

Enfin, la décroissance radioactive des radionucléides dans les déchets sur la période considérée est prise en compte comme l'indique la figure ci-après.

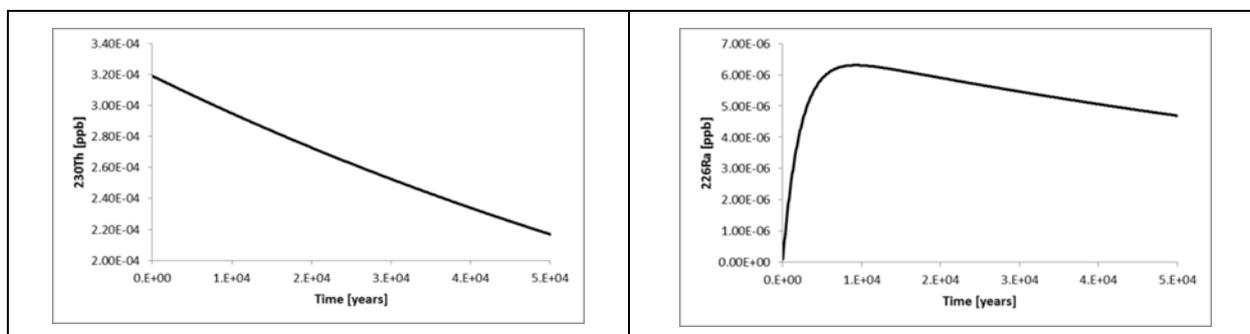


Figure 33 : Evolution des concentrations en ^{230}Th (à gauche) et ^{226}Ra (à droite) dans les déchets sur les 50 000 ans de la modélisation

4.5.3 Résultats des modélisations

Les résultats pour chacun des concepts sont exprimés en concentration de substances et radionucléides solubilisés dans les eaux souterraines, aux points de contrôle situés dans les aquifères superficiels (quaternaire) ou profonds (oligocène) situés à 100 m en aval du stockage.

Quelques exemples en sont donnés ci-après :

- en figure 34 : les courbes de concentration U, Th, Mo et N en fonction du temps pour le concept 3,
- en figure 35 : une comparaison des concentrations maximales atteintes sur la période modélisée pour chacun des trois concepts.

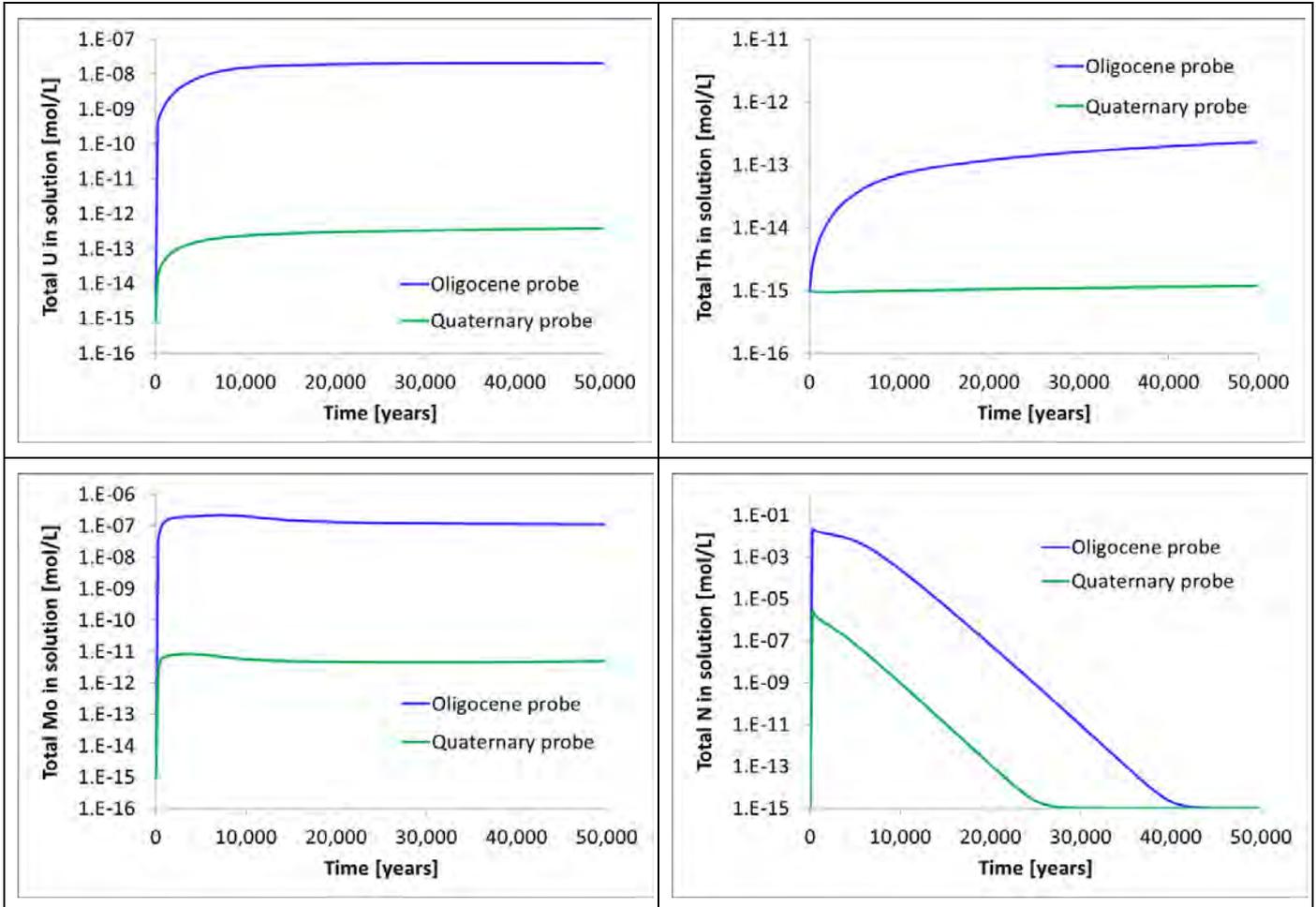


Figure 34 : Concept 3 - Courbes d'évolution de la concentration en Uranium (en haut, à gauche), Thorium (en haut, à droite), Molybdène (en bas, à droite) et Azote total (en bas, à droite) sur les deux points de contrôle situés en surface (alluvions quaternaires) et en profondeur (oligocène rouge)

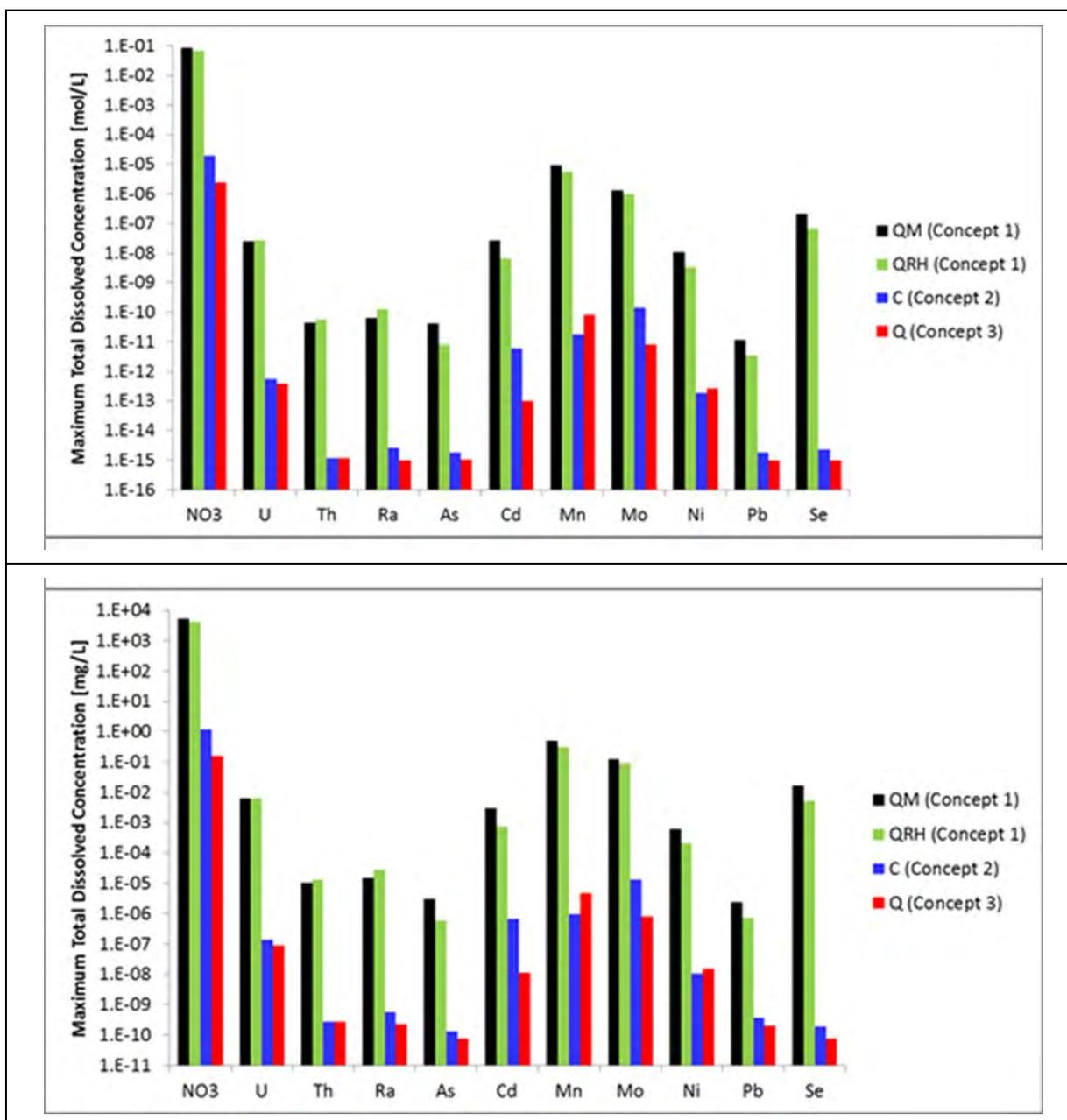


Figure 35 : Comparaison des trois concepts - Concentrations maximales atteintes (mol/l ou mg/l) aux différents points de surveillance

(QM – alluvions quaternaires sous le stockage / QRH – alluvions quaternaires à 100 m en aval /
C – Couverture (concept 2) / Q – alluvions quaternaires à 100 m en aval (concept 3)

Les résultats de cette première modélisation semblent donc indiquer que les concepts 2 et 3 sont assez comparables, et supérieurs en termes de performance au concept 1.

Il ne faut cependant considérer cette première modélisation que comme une étape dans l'analyse itérative, dans la mesure où l'intégration d'autres options de conception (comme des barrières ouvragées différentes ou un conditionnement des déchets) ou d'autres paramètres du milieu géologique (coefficients d'adsorption des argiles par exemple) pourrait en modifier les résultats.

L'importance sur le résultat de la modélisation des valeurs données aux coefficients d'adsorption (ou coefficient de distribution) K_d des matériaux ou du milieu géologique a notamment conduit AREVA à engager des mesures expérimentales de ces coefficients entre les principaux radionucléides et des échantillons réels provenant des carottages effectués dans les séries oligocènes rouges et grises. Ces mesures expérimentales, encore en cours, permettront d'affiner les modélisations à venir.

4.5.4 Modélisation compartimentale

L'application de la modélisation comportementale (*box modelling*) à l'ingénierie du stockage est une autre approche de modélisation mathématique, qui permet de décomposer le système étudié en un certain nombre de compartiments simples tels que les déchets, la barrière ouvragée, la géosphère, la biosphère, ... entre lesquels on modélise ensuite les transferts de matière en reproduisant le mieux possible le système réel.

Cette approche ne vise pas, comme dans le cas du modèle de transport réactif, à décrire précisément les mécanismes, mais permet de réaliser des analyses de sensibilité et donc de mettre en évidence les facteurs sur lesquels un effort particulier doit éventuellement être porté, et les paramètres dont la connaissance précise est essentielle.

Cette modélisation¹³ compartimentale a été appliquée aux concepts 2 et 3, pour lesquels la sensibilité vis-à-vis des paramètres suivants a été étudiée :

- épaisseur de la bentonite (y compris suppression),
- épaisseur des résidus miniers (y compris suppression),
- coefficient de diffusion moléculaire,
- coefficient de distribution K_d .

Les résultats obtenus indiquent que :

- l'épaisseur de la bentonite peut être réduite sans modification significative de l'efficacité de la barrière ouvragée. Cependant, sa suppression totale modifie fortement l'impact,
- les résidus miniers agissent comme une barrière ouvragée qui produit un retard dans le transport des radionucléides,
- les concentrations en uranium et radium notamment sont très sensibles au coefficient de distribution K_d de la bentonite.

¹³ Le modèle utilisé est AMBER 5.5 - Reference Guide. QE-AMBER-1, Version 5.5, December 2011 (Quintessa Limited)

5 Conclusions et Perspectives

Conformément à la demande du PNGMDR, le site AREVA de Malvési a entamé depuis 2010 une réflexion globale sur la gestion à court, moyen et long termes des déchets du procédé de conversion. La démarche de sélection du scénario de gestion le plus adapté est organisée en deux parties :

- l'entreposage sûr des déchets à court et moyen termes, en maintenant les déchets dans un état réversible en vue de leur gestion définitive,
- la recherche d'une filière sûre de gestion à long terme sur site, organisée autour d'un programme d'étude et de recherche en cours de réalisation.

Le plan d'actions développé par AREVA concernant la gestion sûre à court, moyen et long terme des déchets des bassins de décantation du site de Malvési s'organise en trois volets sur la période :

- Sécuriser et surveiller
- Comprendre et caractériser
- Évaluer la performance

Cette démarche de sécurisation et d'acquisition de connaissance permettra à terme d'évaluer la faisabilité d'un stockage et les conditions dans lesquelles celui-ci devra être conçu.

5.1 Gestion à court et moyen termes

Les premiers travaux visant à sécuriser les bassins de décantation dans le cadre de leur gestion à court terme ont été entamés en 2007, avec le renforcement de la stabilité géotechnique de l'ensemble des digues du massif de stériles miniers.

Les travaux de confortement environnemental, consistant en une paroi souterraine associée à un réseau de drainage périphérique, qui ont été réalisés en 2012-2013 permettent de maîtriser les circulations souterraines et de protéger la nappe alluviale. Associés à l'augmentation de capacité des installations de traitement des eaux, par osmose inverse et évaporation, c'est l'ensemble des eaux pluviales et souterraines qui sont aujourd'hui collectées et traitées sur le site de Malvési.

La parution prochaine du décret autorisant la création de l'Installation Nucléaire de Base ECRIN devrait permettre la réalisation d'une couverture bitumineuse sur une surface d'environ 6 hectares couvrant l'entreposage des déchets historiques de procédé. La mise en place de cette couverture sera accompagnée d'un suivi de sa qualité durant toute son exploitation et de moyens spécifiques de récupération et de gestion des eaux pluviales.

L'objectif général des installations de confortement environnemental et de couverture de l'entreposage est de prévenir le transfert à l'environnement d'eaux potentiellement marquées en matières radioactives ou en substances chimiques.

Afin de pérenniser le fonctionnement du site et de sécuriser la gestion des déchets solides de procédé à venir, AREVA prévoit de privilégier à l'avenir la gestion de déchets solides déshydratés en transformant

l'emplacement des actuels bassins de décantation B3, B5 et B6 en casiers d'entreposage pour la fraction des déchets de procédé à venir qui ne disposeraient pas de filière d'élimination à long terme.

En parallèle, AREVA conduit une réflexion sur une modification du procédé de conversion portant sur la séparation des différents flux internes à l'installation, avec l'objectif de privilégier autant que de possible la filière TFA existante.

Ce thème fait l'objet d'un rapport séparé, conformément à l'article 16-II du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions du PNGMDR pour la période 2013-2015.

5.2 Gestion à long terme

5.2.1 Principaux acquis

Sans perdre de vue qu'il ne s'agit ici que d'un rapport d'avancement concernant une phase de préféabilité, les résultats acquis sont encourageants, en terme de sûreté.

L'existence sur le site de deux milieux géologiques d'épaisseur importante et de caractéristiques minéralogiques et géochimiques plutôt favorables à la limitation de la dissémination des substances chimiques et radioactives permet de répondre au besoin de barrière passive à long terme.

La continuité de ces séries géologiques qui apparaissent peu perturbés par des failles, leur faible perméabilité et l'indépendance apparente des niveaux aquifères est également un facteur positif.

La capacité des résidus miniers à réduire fortement les transferts d'uranium les rend aptes à constituer une barrière ouvragée efficace en termes de confinement des déchets.

La stabilité chimique des déchets en milieu réducteur, qui peut en outre être renforcée par un milieu cimentaire alcalin est également un facteur clé.

Enfin, les premières modélisations réalisées, à partir d'une ingénierie préliminaire de conception et des paramètres mesurés dans le milieu géologique, indiquent des degrés de performance intéressants pour les concepts étudiés.

5.2.2 Perspectives

Les résultats acquis sont encourageants, mais ne permettent pas encore la sélection d'une solution pérenne de gestion des déchets et la conception d'un stockage adapté.

Le programme à venir s'inscrit dans la continuité des études et investigations déjà menées et établit un calendrier du processus d'analyse des différentes options et de sélection des performances allouées à chaque concept de stockage selon les thématiques suivantes :

- préciser le contexte géologique, hydrogéologique et géodynamique des sites étudiés,
- analyser les scénarios d'évolutions climatiques majeures et leurs incidences,
- préciser les conditions de traitement et de conditionnement des déchets,
- définir l'architecture du stockage,
- modéliser l'incidence de ces différents paramètres sur les scénarios de stockages étudiés.

A l'issue de cette période, AREVA sera en mesure de définir, parmi les options proposées au PNGMDR, un scénario principal de gestion des déchets historiques et de préparer les études de faisabilité correspondantes.

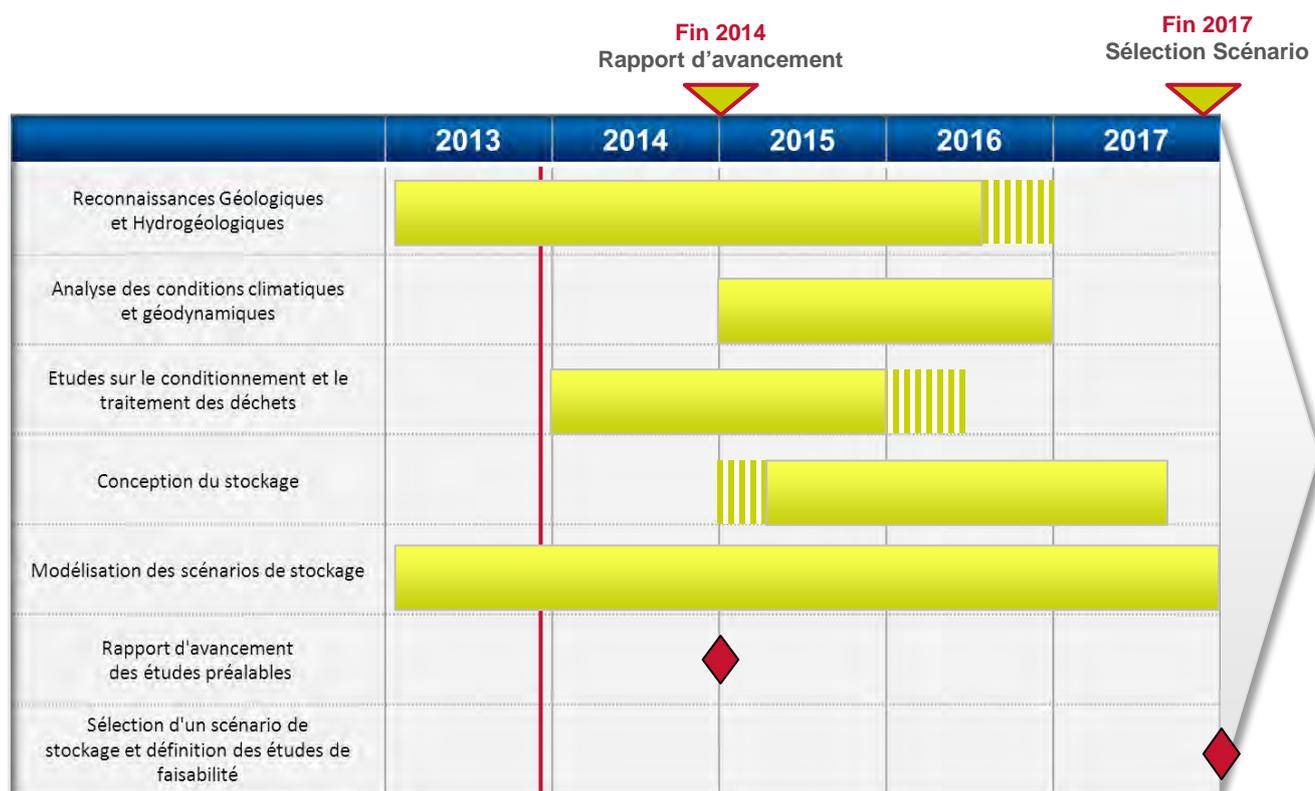


Figure 36 : Calendrier des études et investigations

Ce calendrier pourra évoluer en fonction des réorientations et adaptations issues des choix nationaux (PNGMDR).

5.2.2.1 Poursuivre les reconnaissances du milieu géologique

Les reconnaissances géologiques menées à ce jour ont permis de confirmer, pour les solutions de stockage à faible profondeur, l'existence d'un milieu géologique adapté d'une épaisseur suffisante.

Les reconnaissances complémentaires qui restent à mener devront permettre de :

- améliorer la caractérisation des dépôts sédimentaires d'âge oligocène concernés et d'étendre les connaissances géologiques et hydrogéologiques sur un secteur géographique élargi,
- préciser les incertitudes résiduelles concernant le cadre structural local,
- poursuivre la reconnaissance des aquifères locaux, leur géochimie et leur indépendance,
- confirmer l'absence de circulation majeure dans les terrains oligocènes et contrôler l'extension et de la variabilité latérale des niveaux détritiques les plus grossiers de l'oligocène rouge.

5.2.2.2 Préciser les conditions d'évolution climatique et géodynamique

L'évolution du climat et de la géodynamique locale peut avoir des conséquences globales, dans l'espace et le temps, sur le comportement à long terme des différents concepts de stockage.

Il est ainsi nécessaire de définir les scénarios majeurs potentiels pouvant conduire à des phénomènes d'érosion, ou au contraire de sédimentation, en fonction du contexte climatique et géodynamique à venir. Cette étude est à mener dans un premier temps par l'analyse des climats et marqueurs géodynamiques récents du bassin de l'Aude, de manière à définir dans un second temps des scénarios d'altération et de changement climatique régionaux possibles.

5.2.2.3 Prétraitement et conditionnement des déchets

La sélection d'un scénario de gestion (stockage, valorisation, ...) implique également une réflexion sur le traitement et/ou le conditionnement des déchets. Des études et essais seront à mener de manière à :

- étudier les possibilités et l'intérêt technico-économique de traitements destinés à réduire le volume, et/ou d'éliminer les substances les plus mobiles,
- évaluer l'intérêt d'augmenter les propriétés mécaniques des déchets par une solidification, ou la stabilité des substances contenues par une stabilisation de ceux-ci.

5.2.2.4 Conception du stockage

Les composants ouvragés du stockage assurent l'interface entre les déchets et le milieu géologique ou la biosphère. Ils contribuent à la fois à assurer une barrière d'étanchéité physique et mécanique, mais aussi réactive (adsorption) importante lors de l'évolution du stockage.

Il est ainsi nécessaire de préciser, en amont de la sélection d'un des trois scénarios de stockage, l'organisation de l'ouvrage et sa faisabilité technique en définissant :

- les principes de conception et de géométrie (casiers, alvéoles, ...) et les barrières ouvragées propres à chaque concept de stockage étudié, ainsi que leurs fonctions de sûreté associées,
- l'utilisation potentielle des résidus miniers comme barrière passive, et la disposition des déchets dans le stockage en fonction de leurs caractéristiques,
- les performances hydrauliques et mécaniques adéquates de la couverture, notamment vis-à-vis de l'intrusion et de l'évolution géodynamique, ainsi que la méthodologie de recouvrement,
- la faisabilité technico-économique d'une excavation dans l'oligocène rouge et du dénoyement de l'ancienne mine à ciel ouvert, creusée dans l'oligocène gris.

5.2.2.5 Autres

Cette période sera également mise à profit pour :

- préciser le volume des stériles et résidus miniers contaminés et compléter leur caractérisation,
- engager une information et une concertation avec le public et les parties prenantes.

Annexes

Déchets générés par la conversion de l'uranium naturel

La conversion de l'uranium naturel est un procédé en 3 étapes, dont les 2 premières sont réalisées à Malvési :

- la mise à la pureté nucléaire de l'uranium naturel provenant des mines. Cette opération, la purification, qui consiste à séparer les impuretés encore présentes dans les concentrés miniers (métaux et radionucléides autres que l'uranium) est effectuée par extraction liquide/liquide en milieu acide nitrique,
- la première étape de la conversion proprement dite consiste à transformer l'uranium purifié en UF4,
- la dernière étape de la conversion est réalisée au Tricastin et consiste à passer de la forme UF4 à la forme UF6, qui permet son enrichissement dans la suite du cycle de fabrication des combustibles.

Les effluents liquides du procédé de conversion sont neutralisés à la chaux, envoyés dans des bassins de décantation qui se remplissent au fur et à mesure de la fraction solide des effluents (boues de fluorines) le surnageant (liquides nitrates) est ensuite transféré vers les bassins d'évaporation pour concentration par évaporation naturelle.

Les bassins de décantation contiennent ainsi les déchets solides de procédé, dont l'essentiel des radioéléments initialement présents en impuretés dans les concentrés miniers.

Les bassins d'évaporation contiennent quant à eux les effluents liquides de procédé, composés essentiellement d'une solution aqueuse de nitrates de calcium et ammonium.

COMURHEX travaille actuellement sur deux projets destinés d'une part à réduire le volume des déchets solides à entreposer en casiers étanches, et d'autre part à traiter par un procédé thermique les effluents liquides entreposés dans les bassins d'évaporation.

AREVA a transmis fin 2011, au titre du PNGMDR, une étude sur la gestion à long terme de ces déchets et des terres et stériles miniers contaminés présents sur le site. Cette étude est en cours d'instruction. La présente fiche regroupe l'ensemble des déchets de Malvési qui relèvent de cette étude. Dans l'attente d'une décision sur le mode de gestion à long terme de ces déchets, cette famille est présentée séparément dans les bilans chiffrés des stocks de déchets existants au 31 décembre 2010 et dans les prévisions.

Ces déchets sont répertoriés dans la brochure de "l'inventaire géographique des déchets radioactifs".

Catégorie	En cours
Secteur(s) économique(s)	Électronucléaire
Propriétaire(s) des déchets	AREVA
Déchets	En cours de production

Quelques chiffres

Stock et prévisions

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	fin 2010	2020	2030
Volume total de déchets solides (m³)	276 000	311 000	363 500
Volume total de liquides nitrates (m³)	321 000	321 000*	321 000*
Auxquels pourrait s'ajouter une évaluation de 200 000 m³ à 300 000 m³ de stériles miniers et terres contaminés au-delà de 1 Bq/g			

* Un procédé de traitement thermique permettant de réduire ces volumes est à l'étude

Figure 37 : Famille RTCU (extrait de l'Inventaire national 2012)

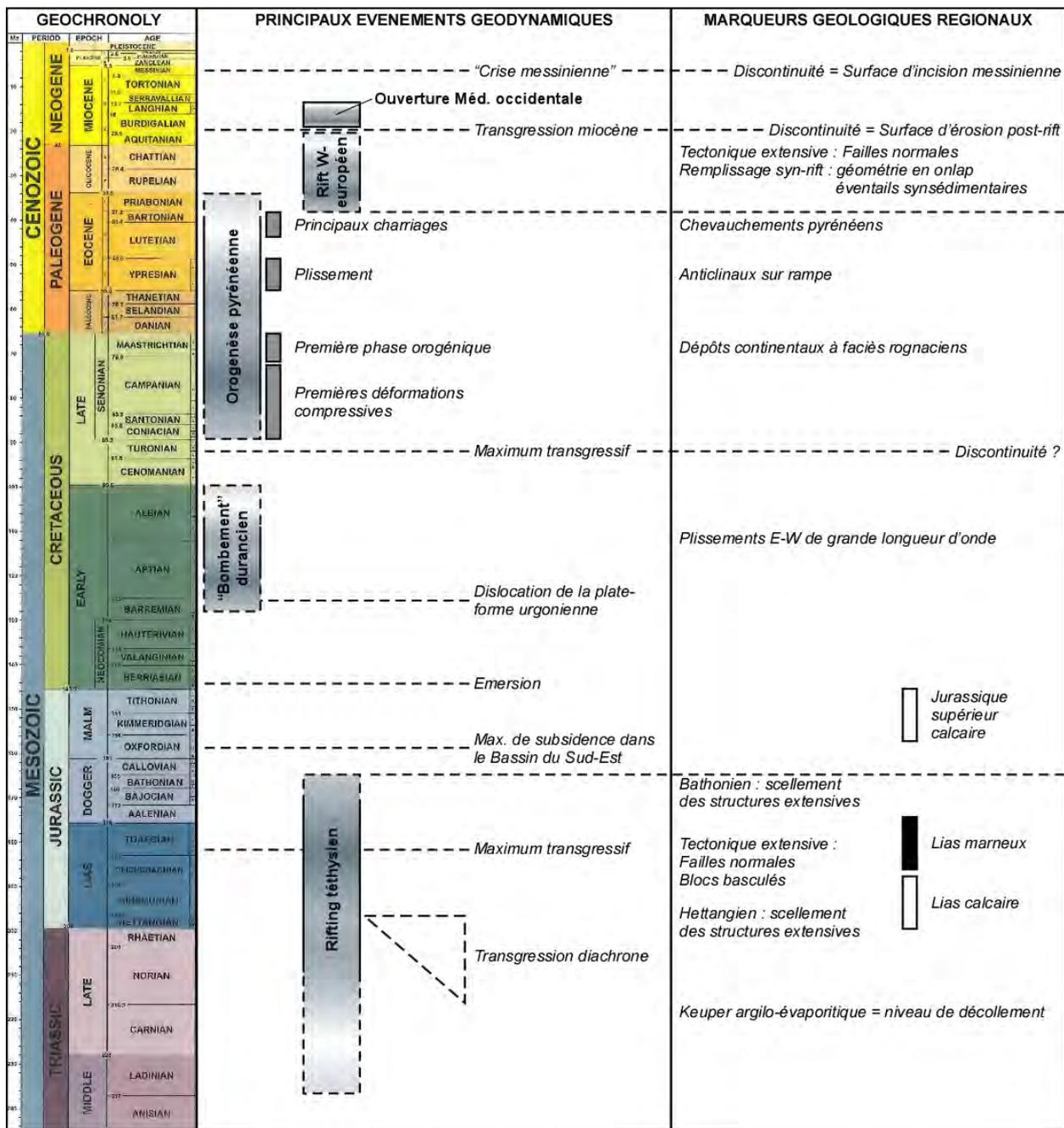


Figure 38 : Synthèse des principaux évènements géodynamiques connus à l'échelle du bassin du Sud-Est de la France, reportés le long de l'échelle stratigraphique (d'après Coueffé et al., 2011).

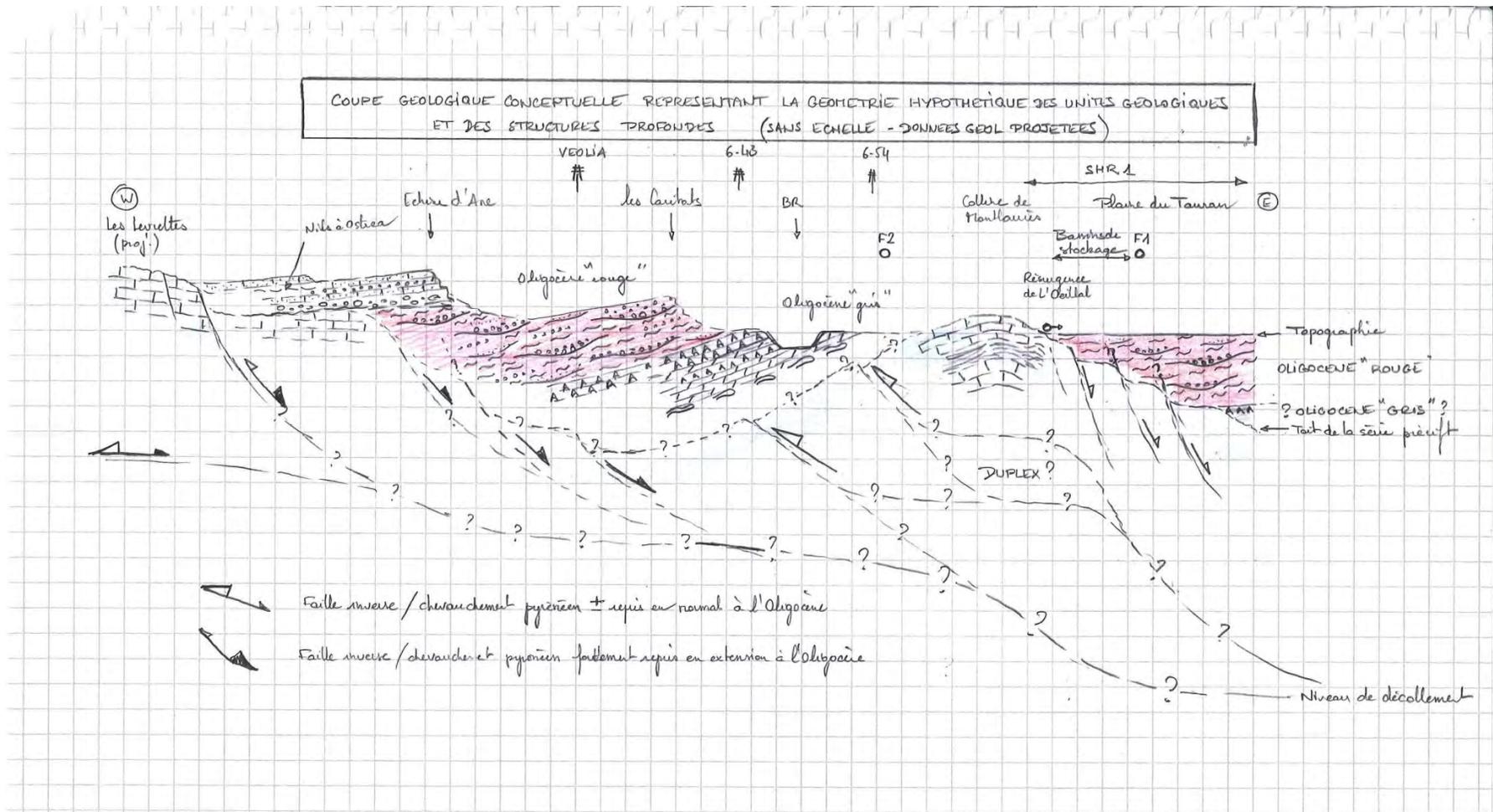


Figure 39 : Coupe géologique conceptuelle