

Installation nucléaire de base ECRIN

Dossier de demande d'autorisation de
Mise en service



Pièce 5

Mise à jour du plan de démantèlement



AREVA NC - Site de Malvési (11)

Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Présentation et justification de la stratégie de démantèlement retenue.....	5
3	Généralités sur le démantèlement	9
3.1	Phases dans la vie d'une installation nucléaire de base	9
3.2	Stratégie de démantèlement	9
3.3	Principes d'ordre méthodologique relatifs au démantèlement, à la remise en état du site et à sa surveillance ultérieure.....	10
4	Dispositions spécifiques à l'installation	12
4.1	Prescriptions du décret d'autorisation de création	12
4.2	Dispositions prises à la conception de l'installation pour en faciliter le démantèlement	12
4.3	Dispositions prises par l'exploitant afin de garantir la conservation de l'historique de l'installation et l'accessibilité aux données associées.....	13
4.4	Dispositions prises par l'exploitant afin de garantir le maintien des compétences et la connaissance de l'installation (management des connaissances)	15
4.5	Modalités de gestion des déchets issus du démantèlement	15
4.5.1	Zonage Déchets.....	15
4.5.2	Gestion des déchets conventionnels	16
4.5.3	Gestion des déchets radioactifs.....	16
4.5.4	Modalités du processus de gestion des déchets	18
5	Déroulement du démantèlement et de sa phase préparatoire de reprise des déchets radioactifs...	19
5.1	Echéancier envisagé et durée des opérations	20
5.2	Description des travaux et des équipements nécessaires au démantèlement	22
5.2.1	Lot 1 : conception et construction des unités de traitement et des fonctions supports associées	22
5.2.2	Lot 2 : reprise des déchets radioactifs	22
5.2.3	Lot 3 : assainissement des sols de l'INB 175.....	23
5.2.4	Lot 4 : arrêt et réhabilitation des installations du lot 1	23
5.3	Identification des objectifs vis-à-vis des intérêts protégés.....	24
5.3.1	Objectifs liés à l'environnement.....	24
5.3.2	Objectifs de sûreté	24
5.3.3	Objectifs de sécurité au travail et radioprotection	25
6	ETAT FINAL ENVISAGE	26
6.1	Présentation et justification de l'état final retenu.....	26
6.2	Evaluation de l'impact du site après atteinte de l'état final visé, modalités de surveillance envisagées	26

7	Mise à jour du plan de démantèlement	27
	Annexe 1 : Inventaire national 2015 des déchets radioactifs - ANDRA.....	28
	Annexe 2 : Rapport d'avancement des études de faisabilité, remis le 19 décembre 2014 en application du PNGMDR 2013 - 2015	30

Liste des tableaux

Tableau 1 : Etapes réglementaires encadrant les phases de vie d'une installation nucléaire de base	9
Tableau 2 : Classification des déchets radioactifs et filières de gestion en France	16

1 Introduction

Selon l'article L 593-11 du code de l'environnement, l'Autorité de sûreté nucléaire autorise la mise en service de l'installation.

Le présent document « Mise à jour du Plan de démantèlement » est une pièce du dossier accompagnant la demande d'autorisation de mise en service d'une installation nucléaire de base requise au titre du 5° de l'article 20 du décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 modifié, relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives. Il correspond au 10° de l'article 8-I du décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 modifié, *relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives.*

L'objectif du plan de démantèlement est de présenter les modalités envisagées pour le démantèlement de l'installation nucléaire de base considérée, ainsi que pour la remise en état et la surveillance du site sur lequel elle est implantée. Il vise à mentionner et justifier la stratégie de démantèlement retenue par l'exploitant et par conséquent préciser le délai envisagé entre l'arrêt définitif de fonctionnement et le début des opérations de démantèlement, ainsi qu'à justifier l'état choisi pour l'installation après son démantèlement (état final). Enfin, le plan de démantèlement décrit les dispositions prises par l'exploitant afin de garantir la conservation de l'historique de l'installation, notamment les éléments pertinents en vue du démantèlement (incidents, radionucléides mis en œuvre, cartographies radiologiques, etc.). Les dispositions permettant de garantir l'accessibilité à ces informations sont également décrites.

Le document répond en outre aux modifications de la procédure d'arrêt définitif, de démantèlement et de déclassement des INB prescrites par la loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

2 Présentation et justification de la stratégie de démantèlement retenue

Les déchets radioactifs du procédé de conversion entreposés dans l'Installation nucléaire de base (INB) ECRIN (Entreposage Confiné de Résidus issus de la Conversion), correspondant aux bassins d'entreposage B1 et B2, ne disposent pas, à l'heure actuelle, de filière de gestion à long terme.

La stratégie retenue pour l'installation repose donc sur une mise en sécurité des déchets pour une durée de plusieurs dizaines d'années (notion d'entreposage) permettant l'attente de la définition d'une solution sûre de gestion à long terme acceptée dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR).

En l'absence d'une telle filière pour les déchets entreposés, la stratégie de démantèlement repose notamment sur la garantie de la faisabilité de la reprise de ceux-ci.

Ces déchets sont pris en compte dans l'inventaire national des déchets et matières radioactifs (voir annexe 1) tenu à jour par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), dans la famille RTCU (Résidus de Traitement de Conversion de l'Uranium), et leur devenir à long terme est examiné dans le cadre du PNGMDR (voir annexe 2).

Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs

Le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) a été institué par l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement issu de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs et tel que modifié par l'ordonnance n°2016-128 du 10 février 2016 portant diverses dispositions en matière nucléaire.

Le décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015. L'article 3 de ce décret précise les orientations du PNGMDR :

« Les producteurs et les détenteurs de déchets radioactifs ont la responsabilité d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion selon les orientations énoncées à l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement.

A cette fin :

- *la cohérence du dispositif de gestion des déchets radioactifs doit être recherchée, de même que son optimisation technique et économique,*
- *les centres de stockage de déchets radioactifs, peu nombreux et aux capacités limitées, doivent être utilisés au mieux par les différents acteurs,*
- *les filières de gestion des déchets radioactifs prennent en compte les volumes de déchets transportés et les distances à parcourir. »*

Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR)

(suite)

Ainsi, les principaux objectifs du PNGMDR sont les suivants :

- s'assurer que des solutions de gestion existent ou sont recherchées pour chaque catégorie de déchets ;
- prendre en compte les déchets anciens ;
- prendre en compte les préoccupations du public ;
- optimiser la gestion des déchets chez les exploitants nucléaires ;
- contribuer à une meilleure maîtrise des déchets issus des autres secteurs générateurs de déchets radioactifs : industries plus classiques, activités utilisatrices de sources radioactives, secteur médical, sites anciens pollués.

Le PNGMDR doit permettre de trouver des solutions qui garantissent une gestion claire, rigoureuse et sûre sur le long terme de l'ensemble des déchets radioactifs en France, quelle que soit leur provenance.

Élaboré dans le cadre d'un Groupe de travail pluraliste composé des parties prenantes concernées (notamment les administrations, les exploitants, des associations, des participants étrangers), le PNGMDR doit être mis à jour tous les trois ans. La première version du PNGMDR (2007-2009) est parue en 2008.

Les éléments du projet de gestion des déchets des bassins d'entreposage B1/B2 du site de Malvési, ont été présentés le 23 mai 2008, puis le 4 juin 2010 au Groupe de travail chargé d'élaborer le PNGMDR.

Une étude proposant des filières sûres de gestion à long terme des déchets contenus dans les bassins B1 et B2 de Malvési, demandée au titre du PNGMDR 2010-2012, a été remise aux ministres le 22 décembre 2011, et présentée le 12 avril 2012 au groupe de travail du PNGMDR

Le programme 2013-2015 du PNGMDR, défini par le décret n°2013-2015 du 27 décembre 2013, prend en compte dans son article 7 au titre des situations temporaires ou historiques, les déchets contenus dans les bassins de COMURHEX (devenu AREVA NC) Malvési.

Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013 - 2015

II. – Concernant l'établissement Comurhex 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 :

1° Une étude de caractérisation des résidus issus de l'ancienne mine de soufre présents sous les bassins de décantation B3 à B6, dans un délai d'un an après la fin des travaux de vidange de ces bassins.

L'ASN est saisie pour avis sur cette étude :

2° Avant le 31 décembre 2013, le calendrier des études et investigations à engager afin d'évaluer la faisabilité des options de stockage :

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.

AREVA a remis cette étude aux ministres le 19 décembre 2014, et l'a présentée le 2 février 2015 au groupe de travail du PNGMDR :

Après avoir présenté l'inventaire des déchets entreposés sur site, l'exploitant précise que les volumes de déchets sont très importants et leur activité radiologique très variée. Les anciens bassins de décantation B1 et B2, correspondant aujourd'hui à l'INB d'entreposage ECRIN, contiennent environ 320 000 m³ de déchets solides (boues de procédé mélangées à différents matériaux). La radioactivité de ces déchets provient essentiellement de la chaîne de l'uranium naturel (²³⁸U, ²³⁵U, dont pour moitié du ²³⁰Th).

Il précise qu'il n'existe pas de filières existantes (ou en projet) adaptées et qu'AREVA, au vu de la rareté des ressources de stockage, du volume des déchets présents sur le site, de l'origine radiologique atypique de ceux-ci (déchets à consonance minière pour l'essentiel) et de l'optimisation nécessaire de la chaîne de gestion, a donc choisi d'examiner la faisabilité d'un stockage sur site pour assurer la gestion à long terme de ces déchets.

Les études et investigations dont les résultats sont présentés concernent la préfaisabilité de trois options de stockage sur site :

- un stockage en surface sous couverture ouvragée (couverture multicouche) ;
- un stockage à faible profondeur dans la mine à ciel ouvert voisine (dans la formation argilo-dolomitique présentant des conditions réductrices) ;
- un stockage à faible profondeur dans les marnes de l'Oligocène, sous couverture remaniée.

La démarche d'évaluation de ces trois options est itérative :

- définition de l'architecture du stockage en tenant compte des connaissances du milieu,
- réalisation d'études de sûreté,
- revue des éléments de conception,
- définition des axes de recherche à approfondir.

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

- L'existence, à proximité immédiate du 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 perturbées 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.

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

En conclusion, l'exploitant rappelle la démarche en deux temps mise en place par Areva.

À court et moyen termes, entreposage sûr des déchets dans un état réversible en vue de leur gestion définitive. Les travaux associés ont été réalisés en 2012-2013 avec la protection de la nappe alluviale. Ils seront suivis par la couverture de l'INB ECRIN et le regroupement des déchets dans cette installation.

Cet entreposage permet la recherche d'une solution pour le long terme et AREVA considère que les résultats acquis à ce jour sont encourageants, mais qu'ils ne sont pas suffisamment conclusifs pour permettre de concevoir un stockage ou même de faire un choix entre les différents concepts.

Ainsi, les travaux de caractérisation de l'environnement vont se poursuivre jusqu'en 2017 en ayant pour priorités de préciser le contexte hydrogéologique et géodynamique, les évolutions climatiques potentielles mais également les coûts relatifs aux conditions de traitement, de conditionnement et l'architecture du stockage. Ces éléments sont importants pour l'évaluation comparative des différents scénarios.

Le rapport d'avancement remis au PNGMDR figure en Annexe 2 et le compte rendu de sa présentation à la séance du Groupe de Travail du 2 février 2015 est consultable sur le site www.asn.fr

3 Généralités sur le démantèlement

3.1 Phases dans la vie d'une installation nucléaire de base

Il convient de distinguer deux grandes phases dans la vie d'une installation nucléaire de base :

- la phase de fonctionnement concerne l'ensemble des opérations et activités industrielles de l'installation. Cette phase comprend le fonctionnement industriel de l'installation et se termine par la réalisation des opérations techniques préparatoires à la mise à l'arrêt définitif ;
- la phase de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement comprend l'ensemble des opérations destinées à interrompre de façon progressive et irréversible le fonctionnement d'une INB en vue de son déclassé ultérieur.

La distinction de ces deux phases permet de rééquilibrer l'importance donnée à la phase de démantèlement à la fois d'un point de vue technique et d'un point de vue administratif par rapport à celle donnée à la phase d'exploitation. Un nouveau référentiel correspondant aux risques de la phase de démantèlement doit être défini.

L'enchaînement des différentes étapes et leur couplage réglementaire est schématisé dans le tableau suivant.

Décret d'Autorisation de Création	Fonctionnement de l'installation
	Déclaration d'arrêt définitif
	Opérations préalables au démantèlement
Décret de Démantèlement	Démantèlement
	Assainissement
Décision homologuée de Déclassé	Surveillance (si nécessaire)
	Déclassé

Tableau 1 : Etapes réglementaires encadrant les phases de vie d'une installation nucléaire de base

3.2 Stratégie de démantèlement

Dans ses différents documents et notamment dans les prescriptions AIEA No. WS-R-5 « Déclassé des installations mettant en œuvre des substances radioactives », l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) définit trois principales stratégies de démantèlement :

- **Le démantèlement immédiat**

Le démantèlement de l'ensemble de l'installation est engagé dès la fin de l'exploitation, sans période d'attente, même si les opérations de démantèlement en elles-mêmes, du fait de leur complexité, peuvent s'étendre sur une longue durée.

■ Le démantèlement différé

Une fois les matières et déchets évacués ou conservés en toute sécurité, l'installation est maintenue dans un état de confinement sûr pendant une période pouvant atteindre plusieurs décennies, au terme de laquelle, elle est démantelée.

■ Le confinement sûr

L'installation est placée sous structure de confinement renforcé sur le site et maintenue isolée jusqu'à ce que la décroissance des radionucléides ait atteint des niveaux qui permettent une libération du site.

En application de l'article L 593-25 du code de l'environnement :

« Lorsque le fonctionnement d'une installation nucléaire de base ou d'une partie d'une telle installation est arrêté définitivement, son exploitant procède à son démantèlement dans un délai aussi court que possible, dans des conditions économiquement acceptables et dans le respect des principes énoncés à l'article L. 1333-2 du code de la santé publique et au II de l'article L. 110-1 du présent code. »

Afin de bénéficier le moment venu de la connaissance et des compétences des personnels d'exploitation indispensables aux premières opérations de démantèlement, de limiter les coûts de surveillance et de maintenance en cas de démantèlement différé et, enfin, de ne pas laisser le poids des charges du démantèlement de l'INB aux générations futures, AREVA Malvési réalisera les opérations de démantèlement de l'INB 175 dès l'obtention du décret de démantèlement.

3.3 Principes d'ordre méthodologique relatifs au démantèlement, à la remise en état du site et à sa surveillance ultérieure

Sur les projets de démantèlement, AREVA applique les principes suivants :

- au plus tôt après l'arrêt du fonctionnement de l'installation, les substances radioactives et chimiques sont évacués au maximum. Ces opérations, réalisées dans le cadre de la préparation à l'arrêt définitif, permettent de réduire notablement les opérations de maintenance et de surveillance des installations, en limitant le nombre de systèmes restant en fonctionnement et en minimisant les quantités d'effluents et de déchets restant à produire ;
- dans la mesure du possible, la quantité de déchets non susceptibles de stockage en surface est limitée. La production de déchets de très faible activité (TFA) et de faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC) est déterminée en conséquence ;
- les ateliers supports du site (traitement et conditionnement des déchets solides et effluents) sont utilisés en priorité et les déchets sont évacués en ligne autant que faire se peut, afin de limiter l'entreposage sur site ;
- les filières de valorisation de matières issues du démantèlement sont étudiées préférentiellement sur la base de la comparaison de l'ensemble des impacts ;
- les opérations d'assainissement et la surveillance sont optimisées par des réductions et adaptations du nombre de systèmes restant en fonctionnement.

Ainsi, l'objectif d'un démantèlement est de déclasser l'installation nucléaire de base, c'est-à-dire la rayer de la liste des INB.

Dans l'hypothèse d'une reprise des déchets, la réalisation du projet choisi aura pour priorité la sécurité des personnes et le respect de l'environnement. Elle se déclinera selon les enjeux suivants :

- **La sûreté nucléaire et la radioprotection** : la limitation de l'exposition des travailleurs, des personnes du public, de l'environnement et, de façon générale, des intérêts protégés aux rayonnements ionisants et aux substances chimiques, à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, restera un objectif majeur qui sera décliné dans le cadre des études du démantèlement.
- **La sécurité des personnes**, au sens des risques non nucléaires, et **les conditions de travail** : les activités de démantèlement pourraient présenter des risques conventionnels principalement liés aux opérations de manutention et à la coactivité. Ces risques seront pris en compte dans les scénarios et, naturellement, par le respect des règles de sécurité sur le terrain lors des travaux. De même, les aspects « pénibilité du travail », les conditions d'intervention des opérateurs et, plus globalement, les facteurs organisationnels et humains seront pris en compte dans les scénarios puis déclinés lors des opérations.
- **La protection de l'environnement**. L'objectif de protection de l'environnement portera notamment sur :
 - la limitation des rejets conventionnels (fumées d'engins, poussières) et radioactifs,
 - le maintien des dispositions de surveillance de la nappe phréatique,
 - le contrôle de la contamination radioactive et chimique des matériaux manipulés,
 - les aspects nuisances sonores et visuelles.
- **La gestion des déchets** : la production, le conditionnement, l'entreposage et l'évacuation des déchets seront réalisés avec l'objectif global de minimiser le volume des déchets à évacuer en intégrant dans cette problématique les transports et les capacités de stockage des Centres agréés. Les objectifs retenus par le projet déclinent les prescriptions du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) ainsi que ceux du code de l'environnement, afin de traiter les déchets dans les filières les mieux adaptées.
- **La transparence et l'information du public.**
- **L'intégration dans le contexte économique et social.**
- **La qualité de l'exploitation.**
- **La qualité de conception et de réalisation.**
- **Les coûts et délais.**
- **Le retour d'expérience.**

4 Dispositions spécifiques à l'installation

4.1 Prescriptions du décret d'autorisation de création

Les prescriptions concernant la reprise des déchets et le démantèlement de l'installation d'entreposage figurant dans le décret du 20 juillet 2015 autorisant AREVA NC à créer et exploiter une installation nucléaire de base dénommée ECRIN sur la commune de Narbonne (11) sont les suivantes :

Art. 3. – La présente autorisation est accordée pour une durée de trente ans. Au plus tard cinq ans avant cette échéance, l'exploitant remet un dossier de demande d'autorisation de mise à l'arrêt définitif et de démantèlement de son installation.

Art. 4. – La reprise des déchets radioactifs mentionnée au c du 2° du I de l'article 2 est soumise à l'accord préalable de l'Autorité de sûreté nucléaire. A cette fin, au moins trois ans avant le début des opérations de reprise, l'exploitant dépose un dossier décrivant ces opérations et justifiant que les risques et inconvénients qu'elles représentent sont suffisamment limités et prévenus.

Art. 7. – L'exploitant mène des études et investigations afin d'évaluer la faisabilité des options de stockage envisagées pour permettre la mise en œuvre de solutions de gestion définitive pour les déchets radioactifs mentionnés au I de l'article 1^{er} à l'issue de leur entreposage. Il établit tous les cinq ans et jusqu'à la mise à l'arrêt définitif de l'installation un bilan des résultats obtenus et transmet ce bilan à l'Autorité de sûreté nucléaire. Ce bilan inclut l'ensemble des opérations nécessaires pour la reprise, le conditionnement, le cas échéant après traitement, et l'évacuation des déchets radioactifs entreposés dans l'installation.

Lorsqu'une solution de gestion définitive est disponible pour les déchets radioactifs mentionnés au précédent alinéa, l'exploitant prend toute disposition pour procéder à leur évacuation dans les meilleurs délais en tenant compte des contraintes de radioprotection, de transport et des conditions techniques et économiques.

4.2 Dispositions prises à la conception de l'installation pour en faciliter le démantèlement

Les dispositions prises par l'exploitant à la conception de l'installation d'entreposage pour en faciliter le démantèlement concernent essentiellement la possibilité de reprise des déchets.

Les critères à satisfaire pour rendre possible cette reprise des déchets sont les suivants :

- accès direct au lieu d'entreposage,
- tenue mécanique des zones excavées,
- disponibilité d'équipements nécessaires à la manutention des déchets,
- maintien de la mémoire de l'établissement et de son contenu.

Dans le cas de l'installation :

- les déchets resteront facilement accessibles (après la dépose de la couverture bitumineuse),
- les travaux menés suite à l'effacement de la digue est du bassin B2 en 2004 ont montré que les déchets en place sont facilement manipulables par des engins de chantier,
- les déchets issus de la vidange des bassins B5 et B6 sont également manipulables,
- l'inventaire radiologique des bassins est inscrit à l'inventaire ANDRA (présentée en Annexe 1) et est réactualisé régulièrement (<http://www.inventaire.andra.fr/site/malvesi-bassins>).

4.3 Dispositions prises par l'exploitant afin de garantir la conservation de l'historique de l'installation et l'accessibilité aux données associées

Les dispositions retenues par l'exploitant pour garantir la conservation de l'historique de l'installation et l'accessibilité des données sont en cohérence avec les exigences de l'arrêté modifié du 7 février 2012, qui traite notamment de l'aspect documentaire relatif aux activités importantes pour la protection des intérêts visés à l'article L 593-1 du code de l'environnement.

L'exploitant de l'installation dispose d'un système de gestion de l'ensemble des documents (élaboration, émission, diffusion, mise à jour et conservation).

L'entité d'AREVA émettrice d'un document a la responsabilité du document sur tout son cycle de vie.

Pour les documents reçus des fournisseurs, la conservation est de la responsabilité de l'entité ayant contractualisé.

Les documents reçus de l'ASN, des différents services de l'Etat et autres parties prenantes sont conservés a minima par le directeur du site.

Différents documents, d'intérêt administratif, juridique, technique, historique ou économique, seront ainsi établis au cours de l'exploitation de l'installation.

Parmi ceux-ci, le document d'inventaire regroupant l'historique et l'inventaire des déchets et des matériaux en place dans l'installation est identifié comme principal pour le maintien de la mémoire de l'installation.

Il a pour objectifs de :

- collecter et réunir les données de base disponibles sur les caractéristiques géotechniques et géométriques de l'installation ;
- fiabiliser l'inventaire radiologique des déchets solides contenus, par une reconnaissance détaillée (physico-chimique, radiologique et géotechnique) des déchets actuellement en place sur les bassins B1/B2 ;
- caractériser les résidus miniers de la mine de soufre sur le plan physico-chimique et, ponctuellement, sur le plan radiologique et géotechnique ;
- étudier l'interface résidus miniers/boues fluorées ;
- fiabiliser les estimations annoncées en matière de volume des déchets entreposés.

Cet inventaire intégrera la création d'une alvéole, sur le bassin B2, dédiée à l'entreposage des déchets issues de la vidange des boues des bassins de décantation B5 et B6 et, sera tenu à jour, autant que de besoin, en fonction de l'évolution des paramètres surveillés, notamment ceux liés à la mise en place de la couverture bitumineuse sur l'installation ECRIN.

Il sera mis à jour autant que de besoin pour tenir compte des évolutions éventuelles des connaissances ou de l'installation.

Conformément aux articles L542-13-1 et R 542-67 du code de l'environnement, l'exploitant de l'installation transmet chaque année à l'ANDRA un inventaire des matières et déchets radioactifs présents sur le site, arrêté au 31 décembre de l'année écoulée. Cet inventaire radiologique est inscrit à l'inventaire national des déchets radioactifs de l'ANDRA. La fiche concernant le site de Malvési est

reproduite en Annexe 1 du présent document et l'intégralité de l'inventaire national est consultable sur le site internet de l'ANDRA.

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA)



Créée en 1991, l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs) est un établissement public à caractère industriel et commercial (Epic).

L'ANDRA est chargée de la gestion à long terme des déchets radioactifs produits en France. Dans le cadre de cette mission, l'Agence met son expertise et son savoir-faire au service de l'État pour trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français afin de protéger les générations présentes et futures du risque que ces déchets présentent.

Les missions de l'ANDRA sont définies dans l'article L. 542-12 du code de l'environnement. Elles consistent notamment à :

- 1° D'établir, de mettre à jour tous les trois ans et de publier l'inventaire des matières et déchets radioactifs présents en France ou destinés à y être stockés ainsi que leur localisation sur le territoire national, les déchets visés à l'article L. 542-2-1 étant listés par pays ;
- 2° De réaliser ou faire réaliser, conformément au plan national prévu à l'article L. 542-1-2, des recherches et études sur l'entreposage et le stockage en couche géologique profonde et d'assurer leur coordination ;
- 3° De contribuer, dans les conditions définies à l'avant-dernier alinéa du présent article, à l'évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue, selon leur nature ;
- 4° De prévoir, dans le respect des règles de sûreté nucléaire, les spécifications pour le stockage des déchets radioactifs et de donner aux autorités administratives compétentes un avis sur les spécifications pour le conditionnement des déchets ;
- 5° De concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion de centres d'entreposage ou des centres de stockage de déchets radioactifs compte tenu des perspectives à long terme de production et de gestion de ces déchets ainsi que d'effectuer à ces fins toutes les études nécessaires ;
- 6° D'assurer la collecte, le transport et la prise en charge de déchets radioactifs, d'assurer la remise en état et, le cas échéant la gestion, de sites pollués par des substances radioactives, sur demande et aux frais de leurs responsables ;
- 7° De mettre à la disposition du public des informations relatives à la gestion des déchets radioactifs et de participer à la diffusion de la culture scientifique et technologique dans ce domaine ;
- 8° De diffuser à l'étranger son savoir-faire.
-

4.4 Dispositions prises par l'exploitant afin de garantir le maintien des compétences et la connaissance de l'installation (management des connaissances)

Les dispositions retenues par l'exploitant nucléaire pour garantir le maintien des compétences et la connaissance de l'installation sont en cohérence avec l'arrêté du 7 février 2012 modifié, qui traite des moyens humains, techniques et organisationnels pour l'accomplissement d'une activité concernée par la qualité.

A ce titre, l'exploitant met en place une organisation permettant de garantir la connaissance de l'installation et les connaissances utiles à son exploitation puis à son démantèlement, au travers des exigences requises en matière de formation initiale et continue du personnel d'exploitation.

Les grands principes de cette organisation sont présentés dans les **Règles Générales d'Exploitation (RGE)**, Pièce 2 du présent dossier de demande de mise en service, que l'exploitant transmet à l'ASN en vue de la mise en service de l'installation, conformément à l'article 20 du décret n° 2007-1557 du 2 novembre 2007 modifié.

Par ailleurs, AREVA NC peut s'appuyer sur les retours d'expérience des démantèlements, reprise et conditionnement de déchets déjà effectués par le groupe AREVA.

4.5 Modalités de gestion des déchets issus du démantèlement

4.5.1 Zonage Déchets

La gestion des déchets s'effectue en accord avec les dispositions de l'Arrêté du 1er juillet 2015 portant homologation de la décision n° 2015-DC-0508 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 21 avril 2015 relative à l'étude sur la gestion des déchets et au bilan des déchets produits dans les installations nucléaires de base.

La gestion des déchets générés repose sur le zonage déchets, établi en fonction des risques de contamination de ces déchets. Ce zonage permet de différencier les déchets dits « conventionnels » des déchets dits « nucléaires » ou radioactifs.

Le Zonage Déchets est élaboré en s'appuyant sur plusieurs lignes de défense indépendantes et successives. Celles-ci permettent de garantir un niveau de confiance élevé quant à la discrimination entre les déchets devant suivre une filière conventionnelle et ceux devant suivre une filière nucléaire.

Ainsi, le Zonage Déchets de l'installation permet de distinguer :

- les zones à déchets conventionnels, à l'intérieur desquelles les déchets ne sont pas susceptibles d'être contaminés ou activés ; les déchets issus de ces zones sont évacués vers les filières à déchets conventionnels comprenant le cas échéant des solutions de valorisation ;
- les zones à production possible de déchets nucléaires ou radioactifs, à l'intérieur desquelles les déchets produits sont contaminés, activés ou susceptibles de l'être ; les déchets issus de ces zones sont évacués vers des filières agréées.

Les modalités de gestion de ces déchets sont présentées ci-après.

Il est à noter que le Zonage Déchets, dont la version actuelle (voir l'étude déchets qui constitue la Pièce 3 du présent dossier) est établie pour l'exploitation de l'installation, sera mis à jour préalablement au démantèlement, en tenant compte des opérations prévues et du retour d'expérience.

4.5.2 Gestion des déchets conventionnels

La gestion des déchets conventionnels suit les principes définis dans le code de l'environnement, articles L. 541-1 et suivants.

Le principe de base retenu pour ces déchets est le traitement et la revalorisation ou l'élimination dans les filières conventionnelles existantes.

Ainsi, les déchets conventionnels produits lors du démantèlement seront éliminés par les filières agréées adaptées à leur nature physico-chimique :

- les déchets industriels spéciaux : élimination dans les centres de stockage de classe 1,
- les déchets industriels banals : valorisation ou élimination dans des centres de stockage de classe 2,
- les déchets inertes : valorisation ou élimination dans les centres de stockage de classe 3.

4.5.3 Gestion des déchets radioactifs

La gestion des déchets radioactifs issus du démantèlement suit les principes définis dans le Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) qui définit notamment le classement des déchets radioactifs et les filières d'élimination associées selon le tableau suivant :

		PÉRIODE		
		Vie très courte (Période < 100 jours)	Vie courte (Période ≤ 31 ans)	Vie longue (Période > 31 ans)
ACTIVITÉ	Très faible activité (TFA)	<i>Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis évacuation dans les filières conventionnelles</i>	Stockage de surface <i>(Centre de stockage des déchets de très faible activité de l'Aube)</i>	
	Faible activité (FA)		Stockage de surface <i>(Centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité de l'Aube)</i>	Stockage à faible profondeur <i>(à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>
	Moyenne activité (MA)			
	Haute activité (HA)		Stockage réversible profond <i>(à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)</i>	

Tableau 2 : Classification des déchets radioactifs et filières de gestion en France

Période et activités des déchets

➤➤	VTC	<i>Vie Très Courte</i>	<i>La période de ces déchets est < 100 jours</i>
➤➤	VC	<i>Vie Courte</i>	<i>La période de ces déchets est ≤ 31 ans</i>
➤➤	VL	<i>Vie Longue</i>	<i>La période de ces déchets est > 31 ans</i>
➤➤	TFA	<i>Très Faible Activité</i>	<i>Le niveau d'activité de ces déchets est en général inférieur à 100 Bq/g</i>
➤➤	FA	<i>Faible Activité</i>	
	FAVC	<i>Faible Activité - Vie Courte</i>	<i>Le niveau d'activité de ces déchets se situe entre quelques centaines de Becquerel (Bq) par gramme à un million de Bq par gramme</i>
	FAVL	<i>Faible Activité - Vie Longue</i>	<i>Le niveau d'activité de ces déchets est de quelques dizaines de Bq par gramme et quelques milliers de Bq par gramme</i>
➤➤	MA	<i>Moyenne Activité</i>	
	MAVL	<i>Moyenne Activité - Vie Longue</i>	<i>Le niveau d'activité de ces déchets est de l'ordre d'un million à un milliard de Bq par gramme</i>
➤➤	HA	<i>Haute activité</i>	<i>Le niveau d'activité de ces déchets est de l'ordre de plusieurs milliards de Bq par gramme</i>

4.5.4 Modalités du processus de gestion des déchets

Le processus de gestion des déchets a pour objectif de permettre une gestion appropriée à chaque type de déchets.

A partir du Zonage Déchets (cf. paragraphe 4.5.1), la mise en œuvre de ce processus s'articule en plusieurs phases :

- **Inventaire physique** : cette phase du processus de gestion des déchets consiste à estimer les quantités de déchets qui seront produits lors des opérations de démantèlement. A partir des données historiques, du retour d'expérience et des mesures des relevés en exploitation, un inventaire des matériaux à démanteler et à assainir est réalisé.
- **Caractérisation radiologique** : cette phase est associée à l'inventaire physique ; elle permet de déterminer les types de conditionnement et la filière adéquate pour l'évacuation des déchets ainsi que de justifier le respect des critères d'acceptation prescrits par les centres de traitement et de stockage des déchets (impuretés, produits interdits...). Les informations recherchées lors de l'étape de caractérisation radiologique sont notamment les débits de doses et les activités par radioélément (spectres). Ces deux étapes permettent d'évaluer le tonnage de déchets à produire pour chaque filière d'élimination (TFA, FMA vie courte, FMA vie longue).
- **Tri et conditionnement** : cette phase est réalisée pendant les opérations de démantèlement des matériels ou d'assainissement des structures ; elle consiste à trier les déchets produits suivant leur nature physique et radiologique et à disposer les déchets dans les emballages prescrits conformément aux critères d'acceptation de la filière d'élimination considérée. Les déchets disposés dans leur emballage sont appelés des colis. Les colis ainsi conditionnés garantissent le confinement des déchets et sont entreposés en attente d'évacuation.
- **Transit (ou entreposage temporaire)** : le transit sur site peut s'avérer nécessaire pour des questions de gestion opérationnelle de flux de déchets entre, d'une part, le flux de production, d'autre part, le flux d'évacuation qui dépend notamment des contraintes des centres de stockage qui reçoivent des déchets de différents producteurs.
- **Evacuation** : pour le producteur, la dernière étape du processus de gestion des déchets consiste à évacuer le colis vers les filières d'élimination déterminées. Les expéditions vers les différentes filières d'élimination sont de la responsabilité du producteur jusqu'à la déclaration conforme des colis par les centres de traitement d'entreposage ou de stockage.

A ce jour, et au vu de son retour d'expérience, l'exploitant estime que les déchets technologiques générés par le démantèlement de l'installation ECRIN seront intégralement gérés en filière TFA.

5 Déroulement du démantèlement et de sa phase préparatoire de reprise des déchets radioactifs

L'article 2.c du décret d'autorisation de création de l'INB ECRIN du 20 juillet 2015 prescrit la reprise des déchets radioactifs. Dans le cadre du décret d'autorisation de création, cette opération de reprise des déchets radioactifs est soumise à autorisation préalable de l'ASN. Cette opération de reprise des déchets radioactifs figurera en outre dans la déclaration d'arrêt définitif de l'INB faite par l'exploitant (article L 593-26 du code de l'environnement) comme une opération qu'il envisage de mener, compte tenu de cet arrêt et dans l'attente de l'engagement du démantèlement, pour réduire les risques ou inconvénients pour les intérêts protégés mentionnés à l'article L. 593-1.

Le décret d'autorisation de création permet, en outre, de poursuivre cette opération de reprise des déchets radioactifs (opération préparatoire au démantèlement) lors de la phase de démantèlement de l'INB.

Par conséquent, cette opération de reprise et les opérations de démantèlement s'enchaîneront et sont prises en compte dans le présent de démantèlement.

Leur déroulement dépendra de la solution de gestion définitive retenue dans le cadre des prescriptions du PNGMDR. Cependant, un certain nombre d'étapes peuvent déjà être identifiées. Elles seront réalisées en assurant la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du Code de l'environnement.

Ces étapes nécessitent l'exécution des lots suivants:

- **Lot 1** : conception et construction
 - d'un atelier de traitement et de conditionnement des déchets repris ;
 - des fonctions supports associées (dont la zone d'entreposage) ;
- **Lot 2** : reprise, traitement, conditionnement et entreposage des déchets radioactifs de l'INB 175 ;
- **Lot 3** : assainissement des sols de l'INB 175;
- **Lot 4** : arrêt ou réhabilitation des installations mises en place lors du lot 1.

La composition des étapes et leur enchaînement sont présentés ci-après.

En parallèle aux différents lots, les déchets (membrane bitumineuse, événements, sous-produits de traitement...) feront l'objet d'un conditionnement. Ils seront évacués vers des filières adaptées, éventuellement après un entreposage provisoire, de transit, sur le site d'AREVA Malvési.

5.1 Echancier envisagé et durée des opérations

La figure ci-après présente l'enclenchement des différentes opérations de démantèlement d'une INB.

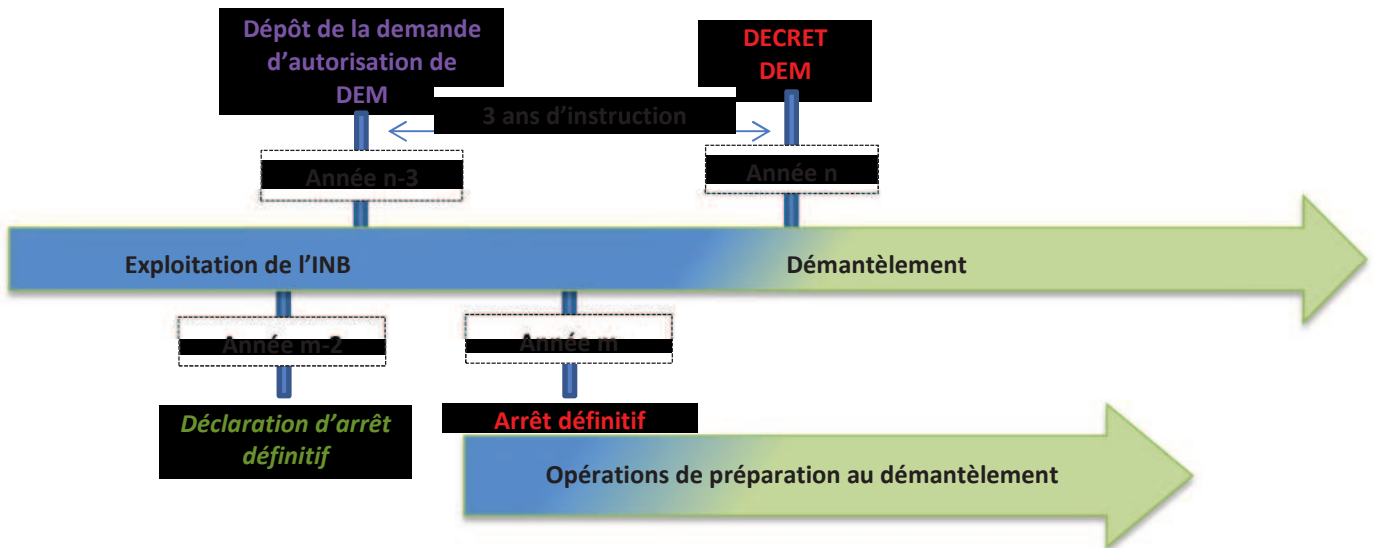


Figure 1 : échéances réglementaires dans le cas général

La figure ci-après présente l'enclenchement des différentes opérations de démantèlement de l'INB 175.

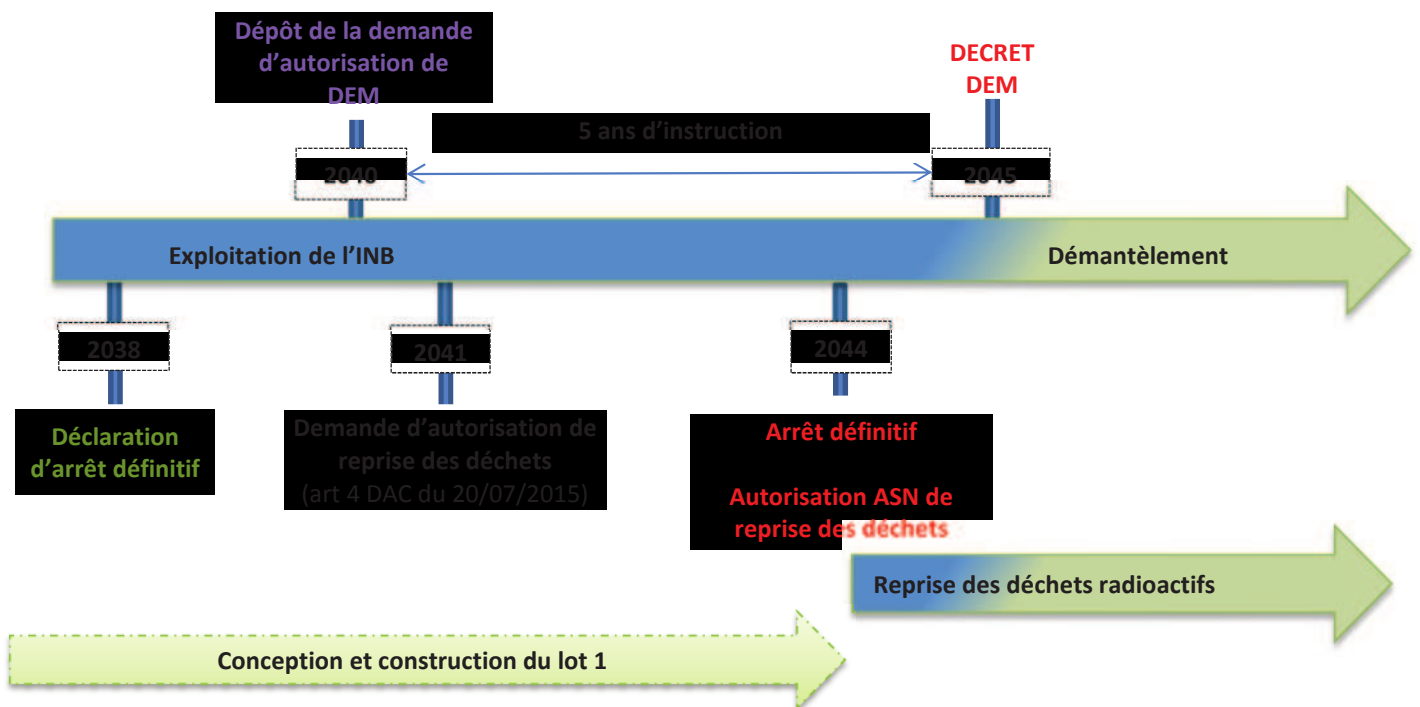


Figure 2 : échéances réglementaires appliquées au cas de l'INB 175

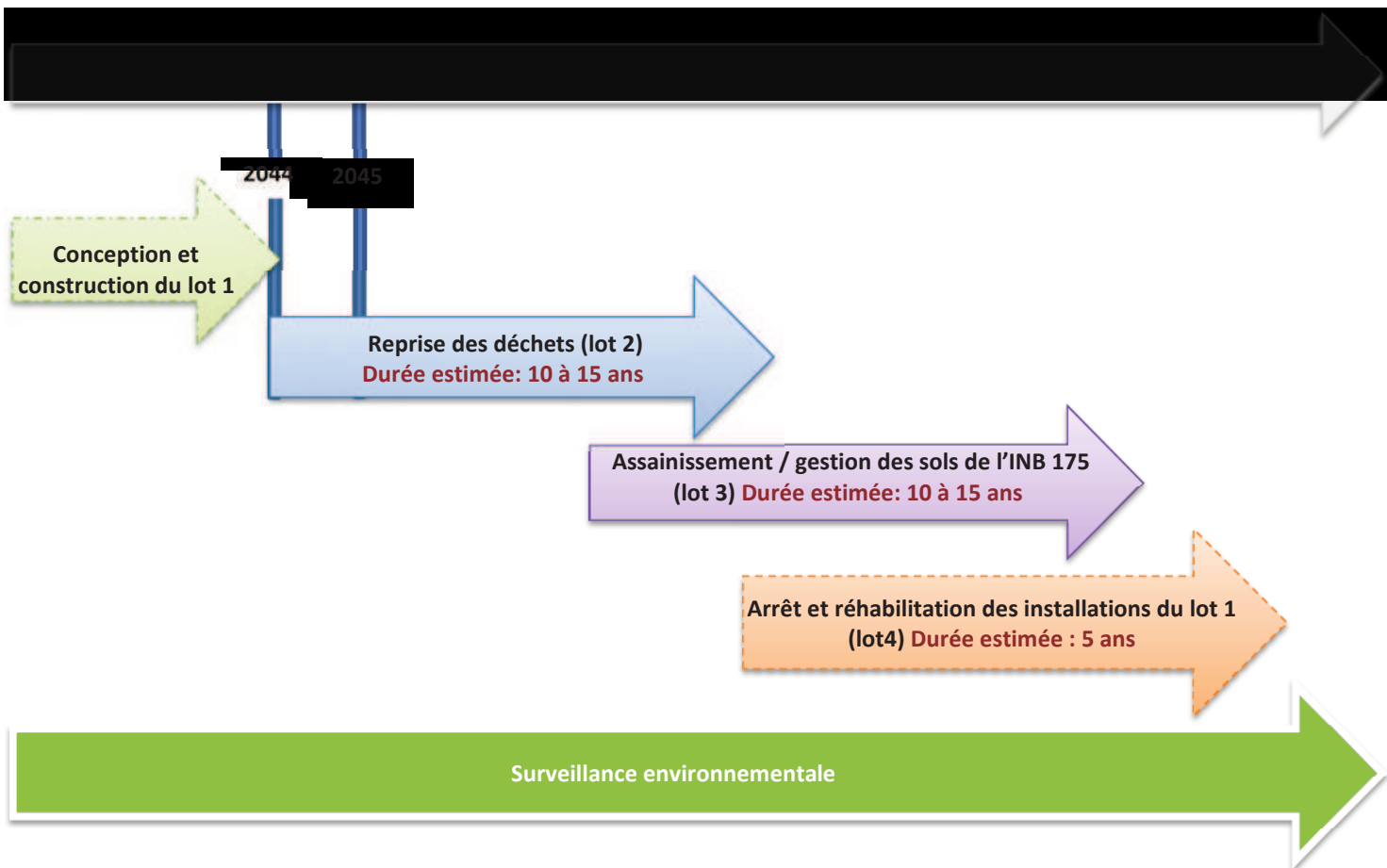


Figure 3 : planning prévisionnel de la phase préparatoire et du démantèlement

Les durées et l'enclenchement des opérations pourront éventuellement être modifiés au fur et à mesure de la définition de la solution de stockage finale (études réalisées dans le cadre du PNGMDR) et pendant les opérations de reprise et de traitement des déchets, en fonction de contraintes réglementaires, techniques et/ou organisationnelles.

Les durées se justifient par la complexité des opérations de reprise, traitement et conditionnement des déchets compte tenu de leur nature et des volumes mis en jeu. Par ailleurs, les opérations du lot 2 impliquent la disponibilité de la zone de stockage des déchets RTCU.

5.2 Description des travaux et des équipements nécessaires au démantèlement

Les différents lots sont présentés ci-après dans leur globalité. Leur description sera détaillée au vue des études menées dans le cadre du PNGMDR.

5.2.1 Lot 1 : conception et construction des unités de traitement et des fonctions supports associées

Les études détaillées nécessiteront une mise à jour des documents du référentiel d'exploitation.

En application de l'objectif de réduction de volume des déchets radioactifs, au regard de l'article L. 542-1-2 du Code de l'environnement, les déchets entreposés dans ECRIN subiront un traitement dans des unités spécifiques construites à cet effet.

Aujourd'hui il est considéré que ces unités seront implantées dans le périmètre du site d'AREVA NC Malvési afin de :

- limiter au maximum la manutention et le transport des déchets
- limiter l'impact à l'environnement en situation incidentelle lors des transferts ;
- conditionner les déchets au plus près de leur lieu d'entreposage actuel.

Les nouvelles unités mises en œuvre seront conçues et réalisées dans le but de faciliter leur propre démantèlement ultérieur (création d'accès dédiés pour l'entrée et la sortie du matériel, facilité de démontage et de dépose des nouvelles structures). Le dimensionnement des différentes unités sera réalisé sur la base d'une analyse multicritères en tenant compte des Meilleures Techniques Disponibles (MTD).

Le lot 1 intègrera les phases d'essais des nouveaux équipements et outils mis en place.

5.2.2 Lot 2 : reprise des déchets radioactifs

La reprise des déchets sera décrite dans un dossier technique support à la demande d'autorisation remis à l'ASN au moins trois ans avant le début de l'opération, conformément à l'article 4 du décret d'autorisation du 20/07/2015.

Les déchets seront repris dans le respect des Règles Générales d'Exploitation de l'INB ECRIN mises à jour dans le cadre de la procédure d'autorisation par l'ASN de l'opération.

La reprise des déchets sera réalisée en cohérence avec les spécifications de la filière et de l'exutoire reconnu, en conformité avec la réglementation en vigueur.

Des procédés spécifiques pourront être utilisés, en fonction des travaux à réaliser. De façon générale, les outillages utilisés sont choisis en optimisant les critères suivants :

- la sûreté (dispersion éventuelle de substances, incendie, etc.) ;
- la faisabilité technique ;
- la sécurité et la radioprotection des travailleurs intervenants ;
- la durée d'intervention ;
- les coûts d'intervention en rapport avec les résultats attendus ;
- la minimisation des déchets secondaires.

5.2.3 Lot 3 : assainissement des sols de l'INB 175

L'assainissement et la gestion des sols de l'INB 175 sera réalisé conformément à un plan de gestion, qui sera soumis à l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Ce plan de gestion sera la déclinaison de la stratégie d'assainissement envisagé des sols ainsi que les prévisions d'utilisation ultérieure du site figurant dans la demande d'autorisation de démantèlement. L'objectif sera d'atteindre à minima l'état final décrit au paragraphe 6.1, en accord avec l'article 8.3.2 de l'arrêté du 7 février 2012 modifié. Il concernera à minima la zone d'entreposage actuelle des déchets radioactifs.

Le plan de gestion s'appuiera sur les résultats complets d'investigation des sols. Le plan présentera les options techniques envisageables pour l'assainissement des sols (y compris le scénario de référence ASN, *i.e.* « l'assainissement complet ») et effectuera un bilan des coûts associés, des avantages et des inconvénients liés à chacune des solutions, selon une analyse technico-économique multicritères.

La stratégie d'assainissement retenue par l'exploitant nucléaire pour la gestion des sols de l'INB 175 sera argumentée et justifiée au travers de l'analyse figurant au plan de gestion. Elle s'appuiera sur les meilleures méthodes et techniques d'assainissement disponibles dans des conditions économiques acceptables, et permettra d'atteindre un état final compatible avec les prévisions de réutilisation du site et la prévention des risques ou inconvénients au regard des intérêts protégés, conformément à l'article 8.3.2 de l'arrêté INB.

5.2.4 Lot 4 : arrêt et réhabilitation des installations du lot 1

Le devenir des installations de reprise des déchets sera défini ultérieurement. Les opérations d'arrêt et de démantèlement de ces installations seront réalisées conformément avec la réglementation. Elles débiteront à la fin des opérations concernées par le lot 2.

5.3 Identification des objectifs vis-à-vis des intérêts protégés

5.3.1 Objectifs liés à l'environnement

Les objectifs liés à l'environnement visent à ce que pendant et à l'issue des opérations de démantèlement, l'installation ne soit pas susceptible de porter atteinte aux intérêts protégés mentionnés à l'article L. 593-1 du Code de l'environnement.

L'atteinte de ces objectifs repose principalement sur la réduction des volumes et de la dangerosité des déchets et des effluents pendant la phase de démantèlement, et à l'atteinte d'un état final de l'INB 175 compatible avec les prévisions de réutilisation du site et la prévention des risques ou inconvénients au regard des intérêts protégés, conformément à l'article 8.3.2 de l'arrêté INB.

Ces objectifs, ainsi que les moyens mis en œuvre pour les atteindre, font l'objet d'études dans le cadre du PNGMDR ainsi que d'un programme d'amélioration continue.

5.3.2 Objectifs de sûreté

Les risques analysés pour les opérations de démantèlement sont de même nature que ceux rencontrés en phase d'exploitation:

- les risques nucléaires (dispersion de substances radioactives, exposition interne et externe)
- les risques non nucléaires d'origine interne ou externe (risques liés à la composition chimique des déchets, risques liés à la manutention, incendie, explosion, risques d'inondation, liés au séisme, etc.).

Pendant les opérations de reprise des déchets, le risque de dissémination de substances radioactive est maîtrisé par le maintien des Eléments Importants pour la Protection (digues, couverture bitumineuse¹, confortement environnemental) au niveau de performance redéfini dans le référentiel de sûreté de l'installation applicable.

A l'issue de cette opération, certains risques (comme la dispersion de substances radioactives et chimiques, exposition interne et externe) sont réduits compte tenu de l'élimination de la plus grande partie du terme source radiologique et chimique.

A contrario, certains risques tels que ceux associés à la manutention et au transport, ceux engendrés par la co-activité des chantiers ou ceux liés à l'entreposage des déchets sont intégrés sur la base de nouveaux scénarii pouvant être plus contraignants du fait des opérations de démantèlement. Par ailleurs, l'analyse de l'ensemble de ces risques sous l'aspect des facteurs organisationnels et humains est systématiquement menée.

Cette analyse est retranscrite dans le référentiel de sûreté qui est révisé préalablement à la réalisation des étapes de reprise des déchets et de démantèlement. Si nécessaire des caractérisations complémentaires sont réalisées pour conforter les hypothèses prises dans le cadre de la démonstration de sûreté mentionnée à l'article L 593-7 du code de l'environnement.

¹ La couverture bitumineuse sera retirée progressivement et continuera donc d'assurer un confinement partiel. Des mesures compensatoires seront mises en place pour les zones découvertes au fur et à mesure de la reprise des déchets, en fonction des conclusions de l'analyse réalisée lors de la révision du référentiel de sûreté qui interviendra dans le cadre de la demande d'autorisation de reprise des déchets.

5.3.3 Objectifs de sécurité au travail et radioprotection

Le risque d'exposition aux rayonnements ionisants provient de la présence de substances radioactives résiduelles dans l'installation ECRIN et des opérations d'évacuation des matières et des déchets générés par les opérations de reprise des déchets et du démantèlement.

Les dispositions définies sur l'installation ECRIN relatives à la santé et à la sécurité au travail, notamment celles qui concernent la radioprotection, sont applicables à l'ensemble du personnel qui participe aux opérations de reprise des déchets et de démantèlement, qu'il soit salarié d'AREVA ou d'entreprise extérieure. A ce titre, la sélection des procédés de démantèlement et des scénarios envisagés est réalisée en recherchant à réduire l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs au niveau le plus faible qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre, en tenant compte des facteurs sociaux et économiques (**principe ALARA**). Pour chaque opération sous rayonnements ionisants, des objectifs d'optimisation de doses sont fixés.



Principe ALARA

ALARA en anglais : "*As Low As Reasonably Achievable*" signifie « aussi bas que raisonnablement possible ». ALARA est un principe d'optimisation de la protection, qui consiste à définir la meilleure façon d'utiliser les ressources pour réduire les risques associés aux rayonnements.

6 ETAT FINAL ENVISAGE

6.1 Présentation et justification de l'état final retenu

L'état final répondra aux caractéristiques suivantes :

- l'usage futur envisagé est un terrain compatible avec un usage industriel, qui pourra être soumis , le cas échéant à des servitudes d'utilité publique,
- l'état final résiduel du périmètre de l'INB ECRIN déclassée ne doit pas conduire à soumettre le personnel ou le public à une dose additionnelle annuelle supérieure à l'exposition admise pour le public de 1 mSv/an, ni à un risque sanitaire chimique supérieur aux valeurs de référence en vigueur pour le public ;
- l'état final de l'installation déclassée est compatible avec les prévisions de réutilisation du site, et n'est pas susceptible de porter atteinte aux intérêts protégés mentionnés dans l'article L. 593-1 du Code de l'environnement.

De plus, il tiendra compte de la solution retenue dans le cadre du PNGMDR.

6.2 Evaluation de l'impact du site après atteinte de l'état final visé, modalités de surveillance envisagées

A la fin des opérations de démantèlement et une fois l'objectif visé atteint, les opérations de surveillance et d'entretien envisagées concernent principalement la surveillance des eaux souterraines et la conservation de la documentation d'exploitation et de démantèlement.

Il est à noter que la surveillance de l'environnement en général et de la nappe en particulier, déjà mise en œuvre sur l'établissement, sera maintenue compte-tenu des autres activités de l'établissement. Le cas échéant, les modalités de cette surveillance pourront être adaptées et/ou revues après la cessation de toute activité d'exploitation.

7 Mise à jour du plan de démantèlement

Le plan de démantèlement est mis à jour, si nécessaire, lors :

- de la mise en service de l'installation,
- de toute modification du décret d'autorisation de création,
- des modifications de l'installation ne nécessitant pas une modification du décret d'autorisation de création, visées par l'article 26 du décret n°2007-1557 du 2 novembre 2007 modifié,
- en tout état de cause, lorsque les modalités de gestion à long terme des déchets entreposés dans l'installation auront été définies dans le cadre du PNGMDR,
- des réexamens de sûreté de l'installation (y compris lors de la phase de démantèlement).

En fin de vie de l'installation, le plan de démantèlement revêt une importance particulière. A ce titre, il est obligatoirement mis à jour dans le cadre de la déclaration d'arrêt définitif de l'installation et lors du dépôt de la demande d'autorisation de démantèlement.

Annexe 1 : Inventaire national 2015 des déchets radioactifs - ANDRA

1 page

MALVÉSI (BASSINS)

EXPLOITANT : AREVA

RÉGION : Languedoc-Roussillon

DÉPARTEMENT : Aude (11)

COMMUNE : Narbonne

SECTEUR ÉCONOMIQUE :
Électronucléaire**Description brève :**

Les déchets désignés sur cette fiche sont les résidus contaminés par l'uranium naturel et produits par l'usine de conversion. L'usine produit environ 4,5 m³ d'effluents liquides par tonne d'uranium traité.

Les effluents liquides, contenant les résidus, sont envoyés dans des bassins couvrant environ 30 hectares pour décantation et évaporation. Les eaux pluviales et les eaux de refroidissement du procédé étaient, jusqu'à fin 2007, collectées dans un bassin de régulation avant d'être contrôlées puis rejetées dans le milieu naturel. Depuis fin 2007, le bassin n'est plus en relation avec la plateforme industrielle et est suivi. Un plan d'action de réhabilitation de ce bassin de régulation a été transmis aux autorités début 2013.

DÉCHETS		FAMILLES ET VOLUMES	
NATURE DES DÉCHETS :	ACTIVITÉ RADIOLOGIQUE	RADIONUCLÉIDE(S)	CODE FAMILLE
SITUATION AU : 31/12/2013			
1. Des bassins pour l'entreposage des rejets solides (B1 à B6)			
Bassins B1 et B2 (présence de traces de radioéléments artificiels : ⁹⁹ Tc (3,1 Bq/g ; ²³⁸ Pu à 242 : 22 Bq/g ; ²⁴¹ Am : 1,8 Bq/g ; ²³⁷ Np : 1 Bq/g. Bassins utilisés en 2006 et 2007 pour remonter les boues répandues suite à la rupture d'une digue) (238 585 m ³ - 410 366 t)	89,11 TBq	²³² Th, U	RTCU
Déchets divers mélangés à de la terre inerte (Uranium contenu inférieur à 1 tonne) (22 890 m ³)	75 GBq	²²⁶ Ra, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U	RTCU
Bassin B5 (23 066 m ³ - 28 602 t)	6,3 TBq	²²⁶ Ra, ²³⁰ Th, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U	RTCU
Bassin B6 (33 626 m ³ - 42 032 t)	6,17 TBq	²²⁶ Ra, ²³⁰ Th, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U	RTCU
Stériles en partie contaminés par les infiltrations des bassins non revêtus de membrane à l'origine		U	RTCU
Déchets de couverture des bassins B1 et B2 (43 000 m ³ - 76 540 t)	5,82 TBq	²³² Th, U	RTCU
2. Des bassins d'évaporation des solutions nitrées (B7, B8, B9, B10, B11, B12)			
Solutions nitrées (35 4174 m ³ - 549 959 t)	1,12 TBq	⁹⁹ Tc, ²²⁶ Ra, ²³² Th, ²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁷ Th	RTCU
3. Un bassin de régulation isolé			
Boues sédimentées en fond de bassin contenant : 119 t Cd ; 126 t Cu ; 2 t Hg ; 8,9 t U et 4 t Se. (60 000 m ³)	0,41 TBq	U	RTCU
Zone G : une partie des berges de l'ancien bassin de régulation constituées de terres et gravats est à caractériser. (15 000 m ³ - 9 300 t)	14,2 GBq	U	RTCU
RÉGIME ADMINISTRATIF : INB pour les bassins B1-B2. ICPE 1735 pour les bassins de décantation B3, B5 et B6. ICPE 1735 pour les bassins d'évaporation B7 à B12. ICPE 2750 pour le bassin de régulation.			
MESURES DE SURVEILLANCE : Les bassins B1 à B6 font l'objet d'un suivi de la solidité des digues (plots, inclinomètres, piézométrie). Les bassins B3 à B12 font l'objet du suivi de leur niveau de garde ainsi que leur étanchéité. Une surveillance environnementale est assurée en champ proche et en champ éloigné des bassins.			

Annexe 2 : Rapport d'avancement des études de faisabilité, remis le 19 décembre 2014 en application du PNGMDR 2013 - 2015

52 pages



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 Malvési

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 Malvési 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 Malvési 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 Malvési et du Tricastin.

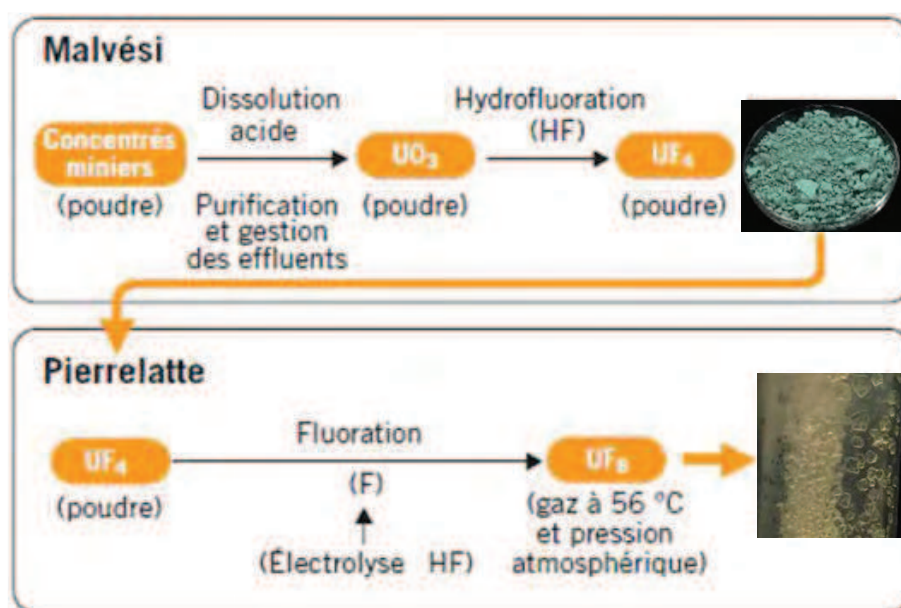


Figure 1 : Principales étapes du procédé de conversion

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 nitrates 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 fluorure 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.

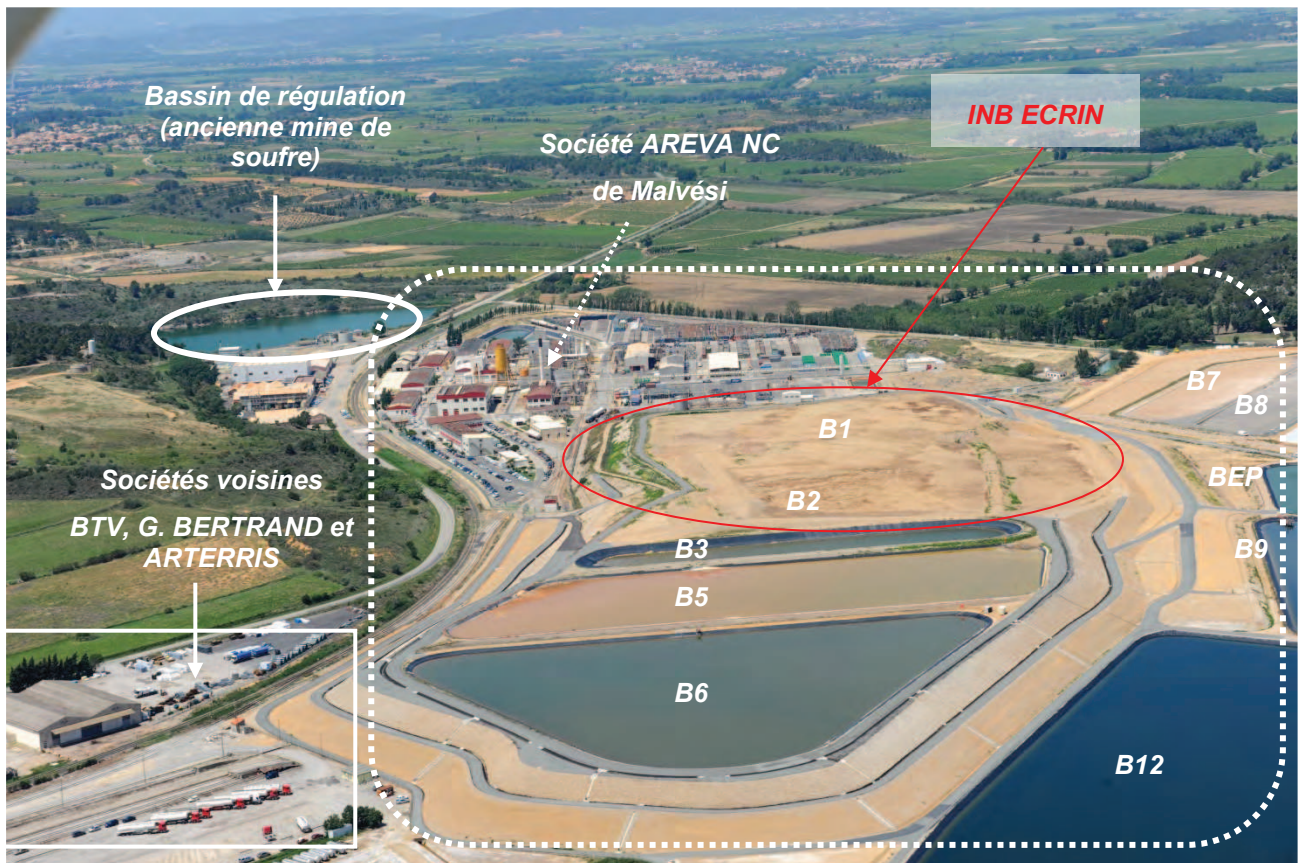


Figure 3 : Vue actuelle du massif et des bassins de décantation

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.

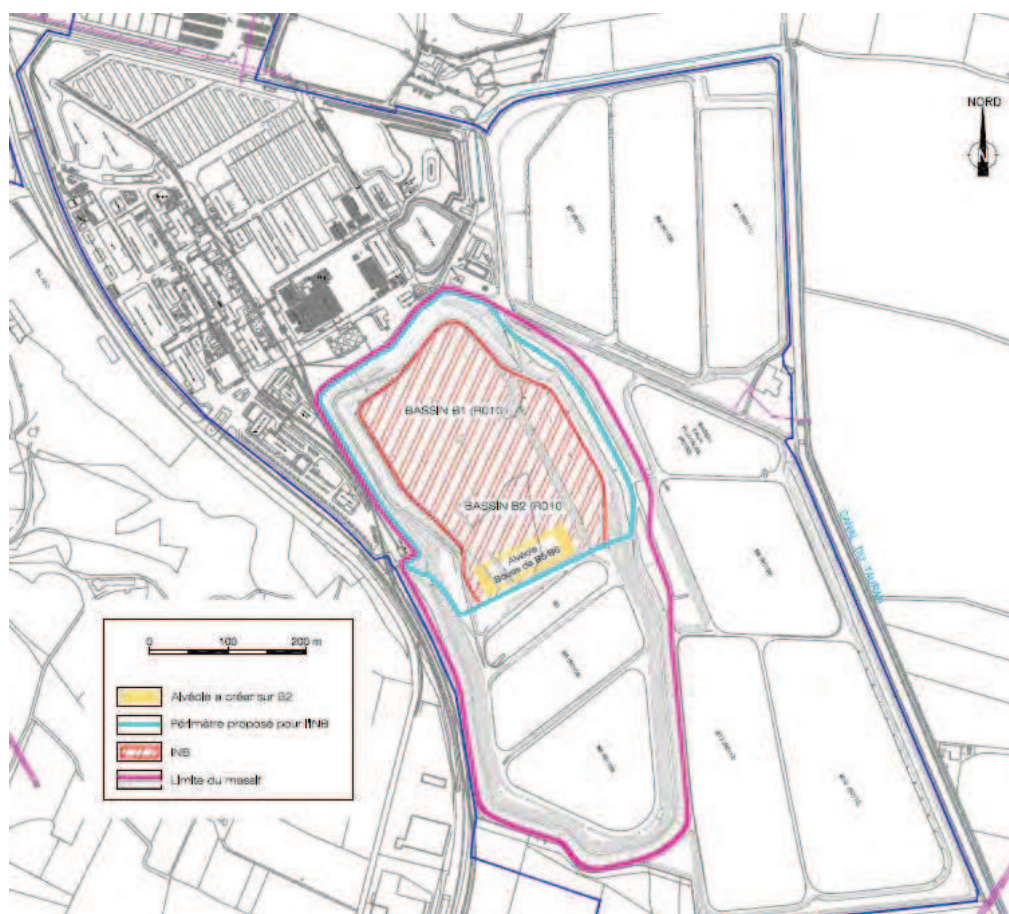


Figure 4 : Plan de situation de l'INB ECRIN et du massif

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.

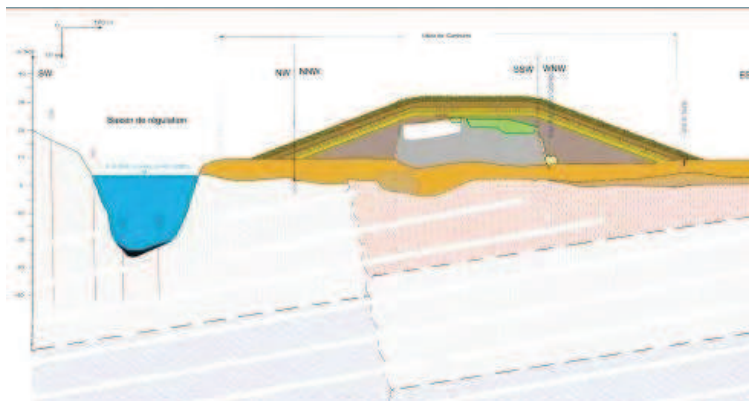


Figure 5 : Modèle conceptuel du stockage en surface (Concept 1)

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).

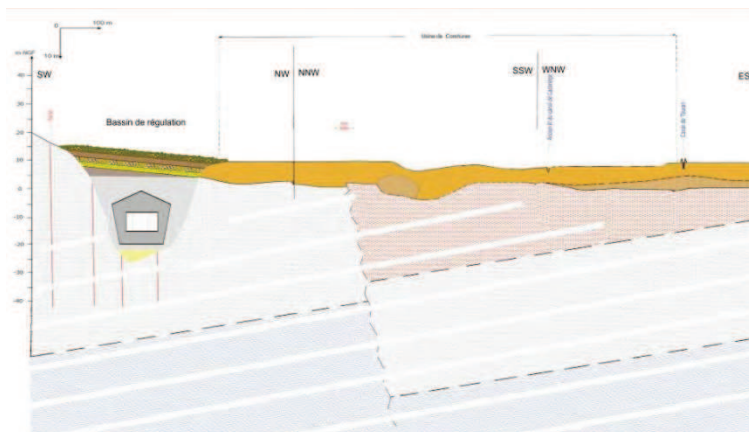


Figure 6 : Modèle conceptuel de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre (Concept 2)

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.

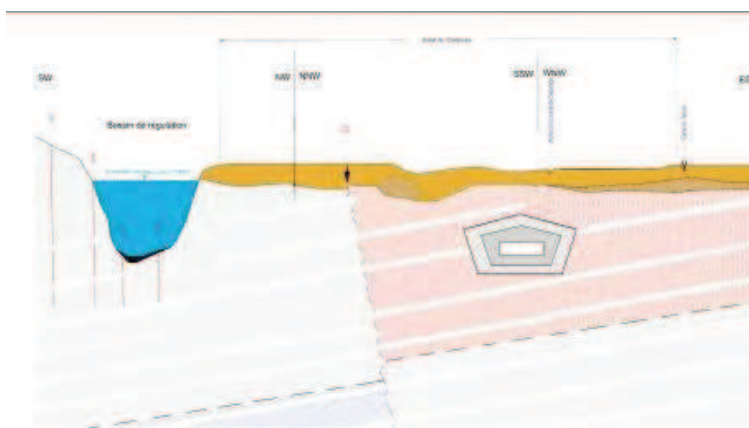


Figure 7 : Modèle conceptuel du stockage à faible profondeur dans les marnes Oligocène (Concept 3)

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.

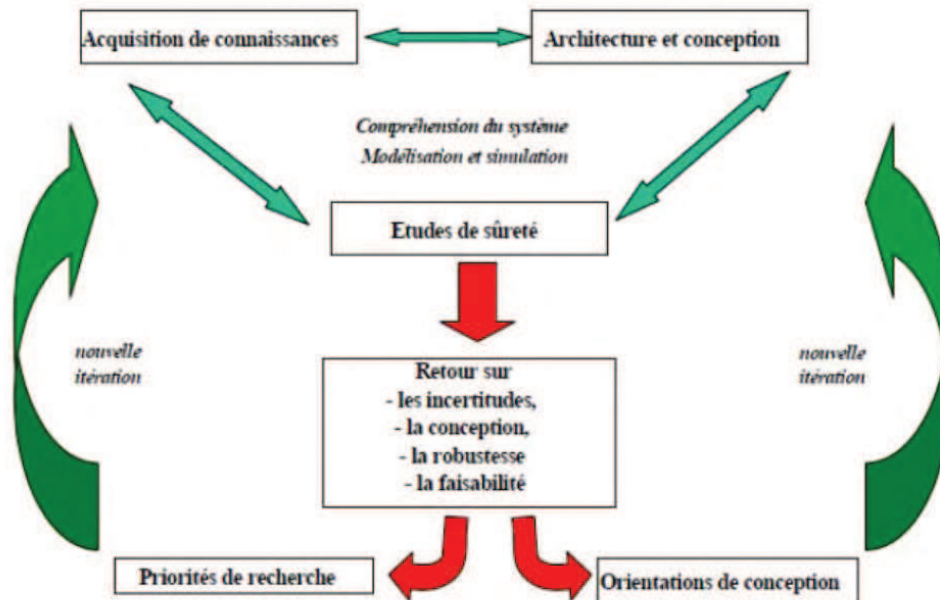


Figure 8 : Approche méthodologique⁷ adoptée pour l'évaluation des performances des différents concepts étudiés

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.

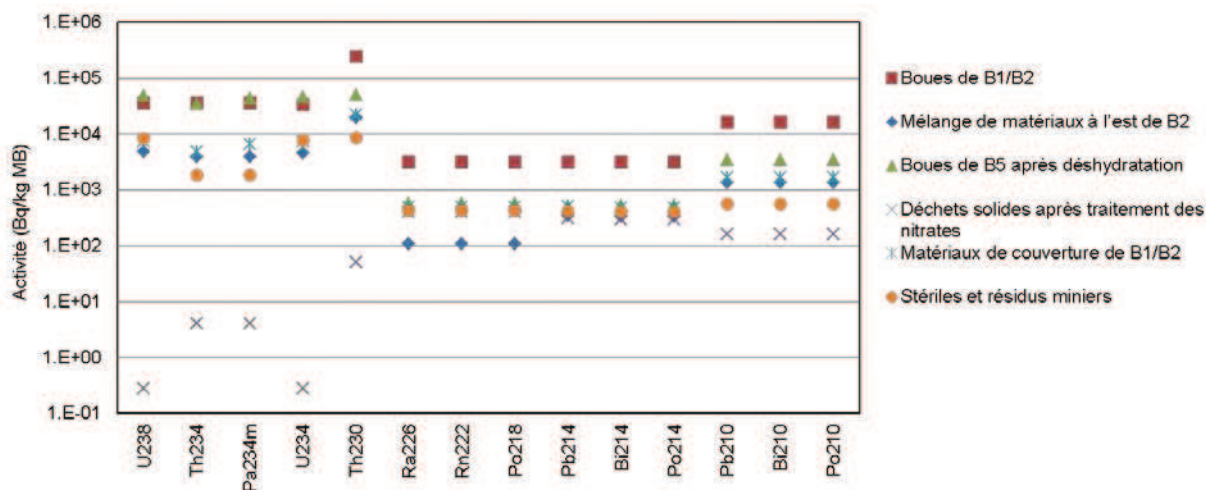


Figure 9 : Synthèse des activités moyennes de l'U-238 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- 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.

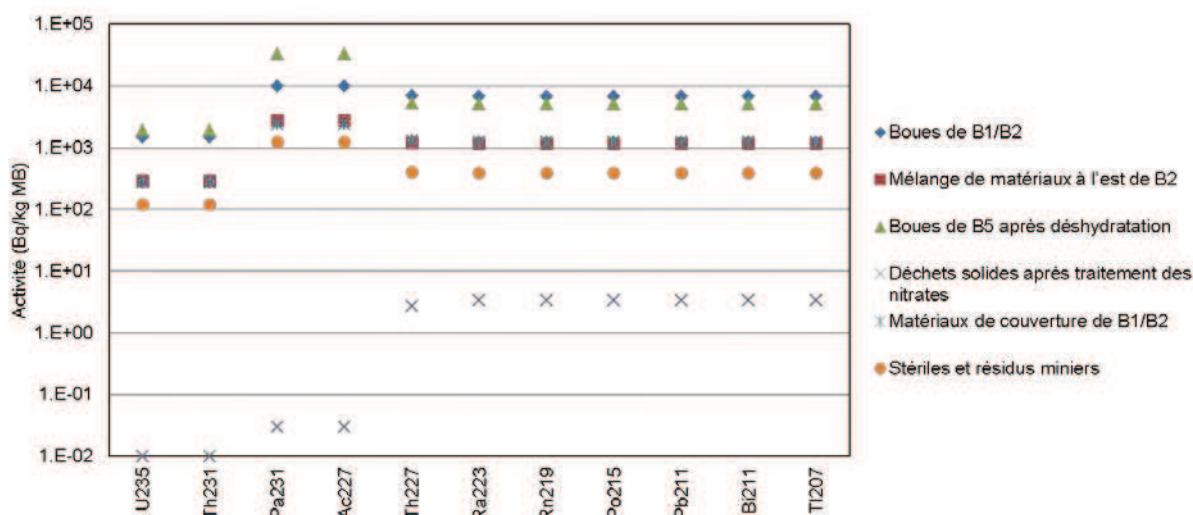


Figure 10 : Synthèse des activités moyennes de l'U-235 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- 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.

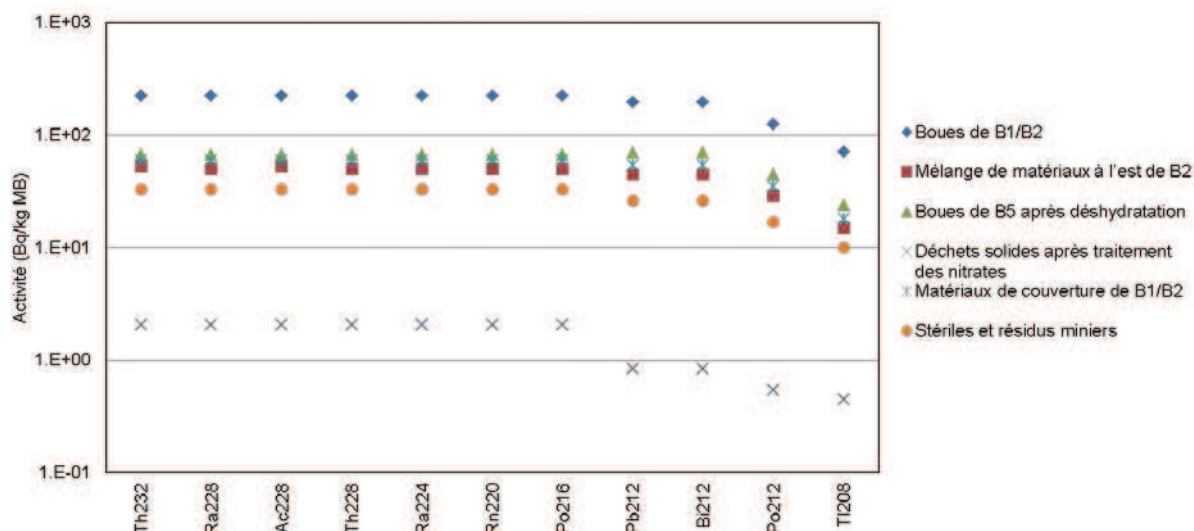


Figure 11 : Synthèse des activités moyennes du Th232 et ses descendants dans les différentes familles lithologiques

- 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 pauvre 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 leurs 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 .

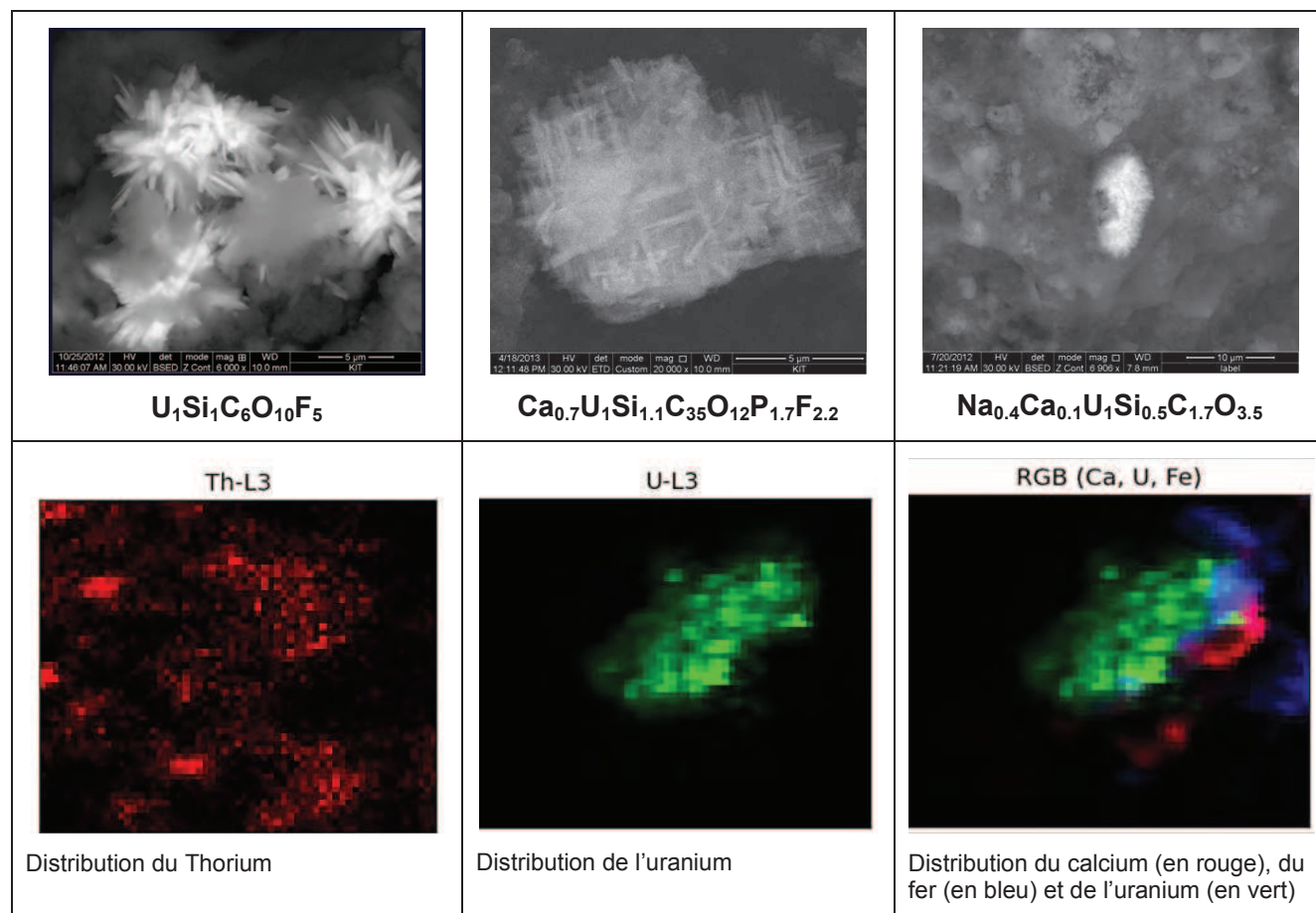


Figure 12 : Minéraux d'uranium identifiés au microscope électronique à balayage (en haut) et micro-cartographie élémentaire par diffraction des rayons X (en bas)

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.

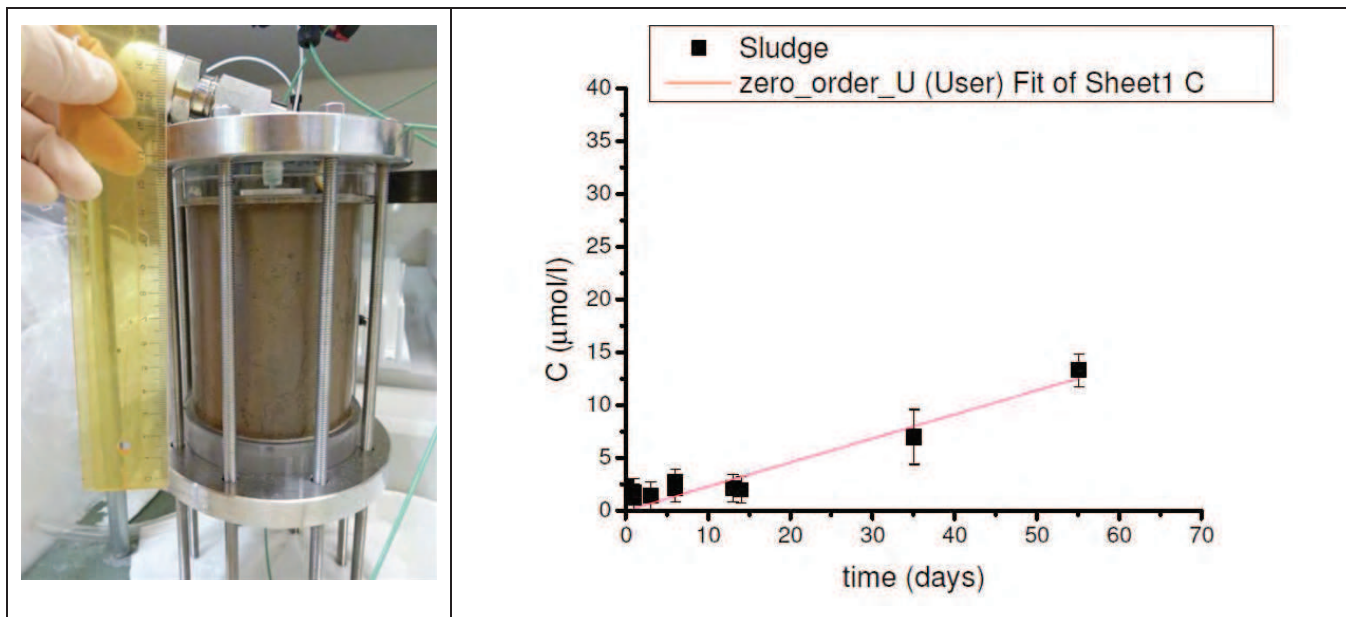


Figure 13 : Essais en colonnes avec détermination expérimentale de la courbe de désorption

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.

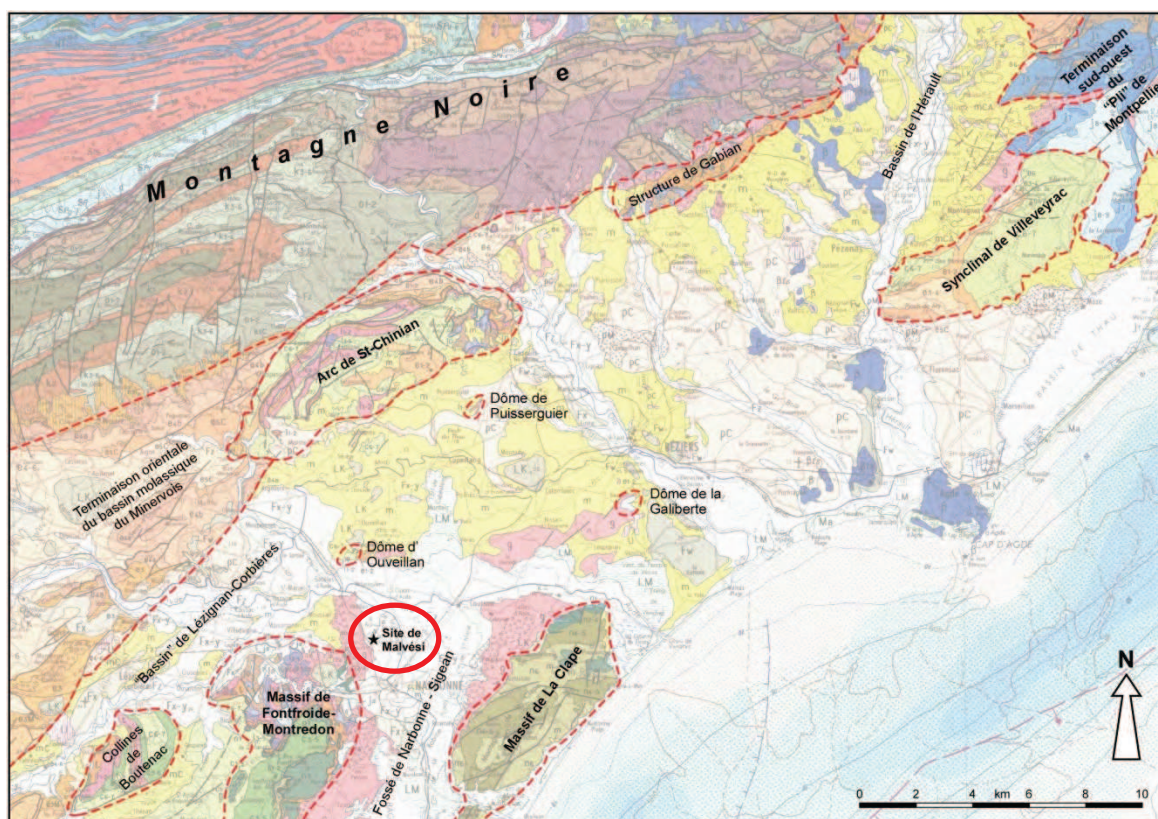


Figure 14 : Localisation du site de Malvési sur la carte géologique à 1/250 000 (feuille n°38 – Montpellier), avec position des principales structures géologiques connues régionalement.

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.

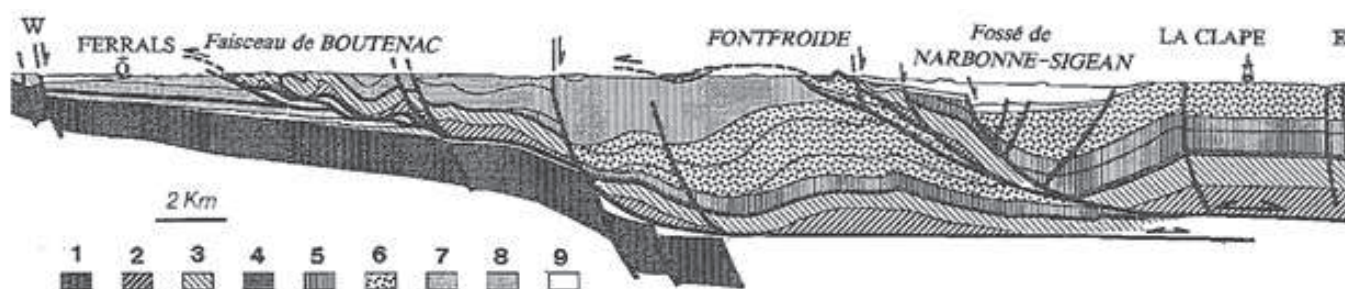


Figure 15 : Coupe géologique depuis les Corbières orientales jusqu'au massif de la Cape (d'après Gorini et al., 1991)

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).

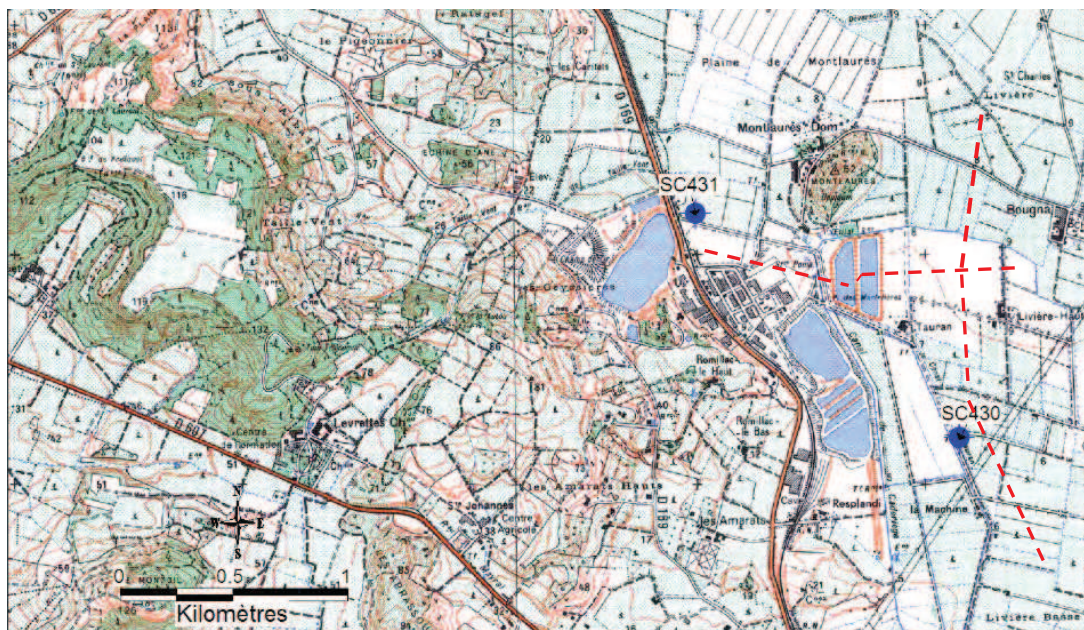


Figure 16 : Localisation des profils sismiques (pointillés rouges) et forages profonds (points bleus)

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)

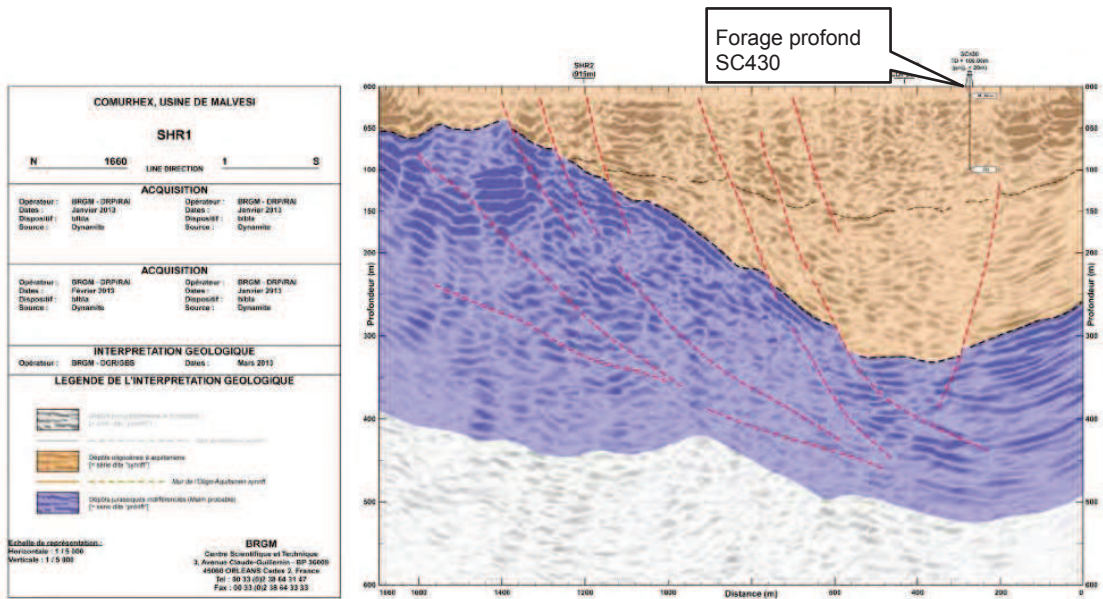


Figure 17 : Interprétation du profil sismique SHR1 (Nord-Sud)

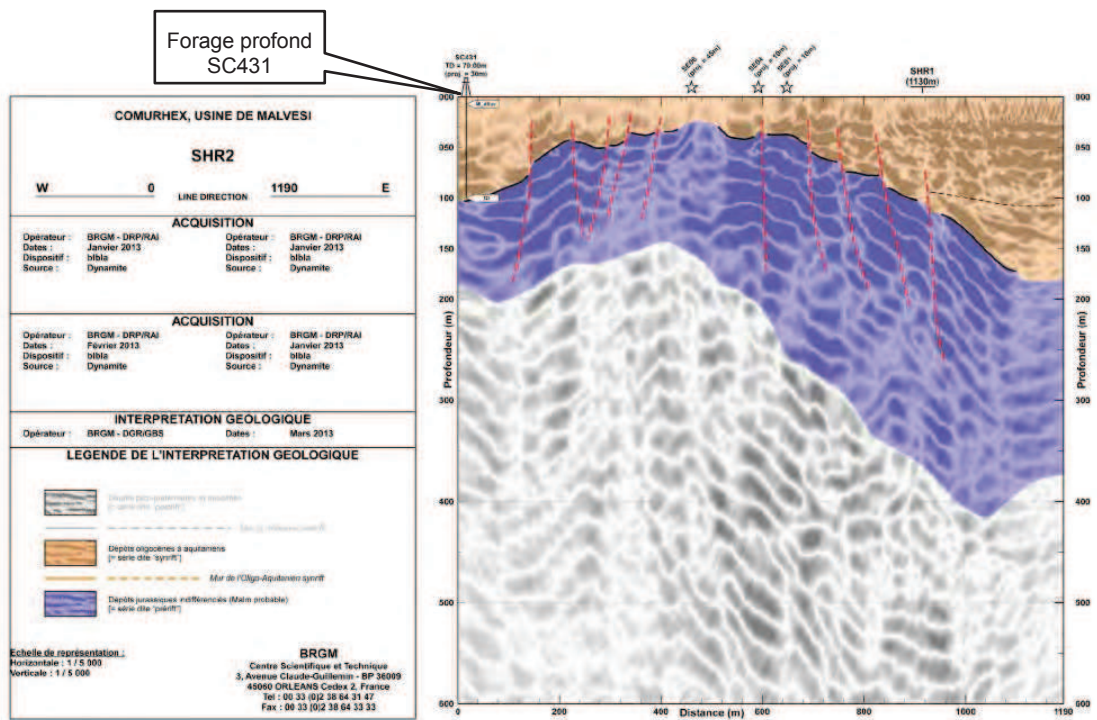


Figure 18 : Interprétation du profil sismique SHR2 (Ouest-Est)

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.

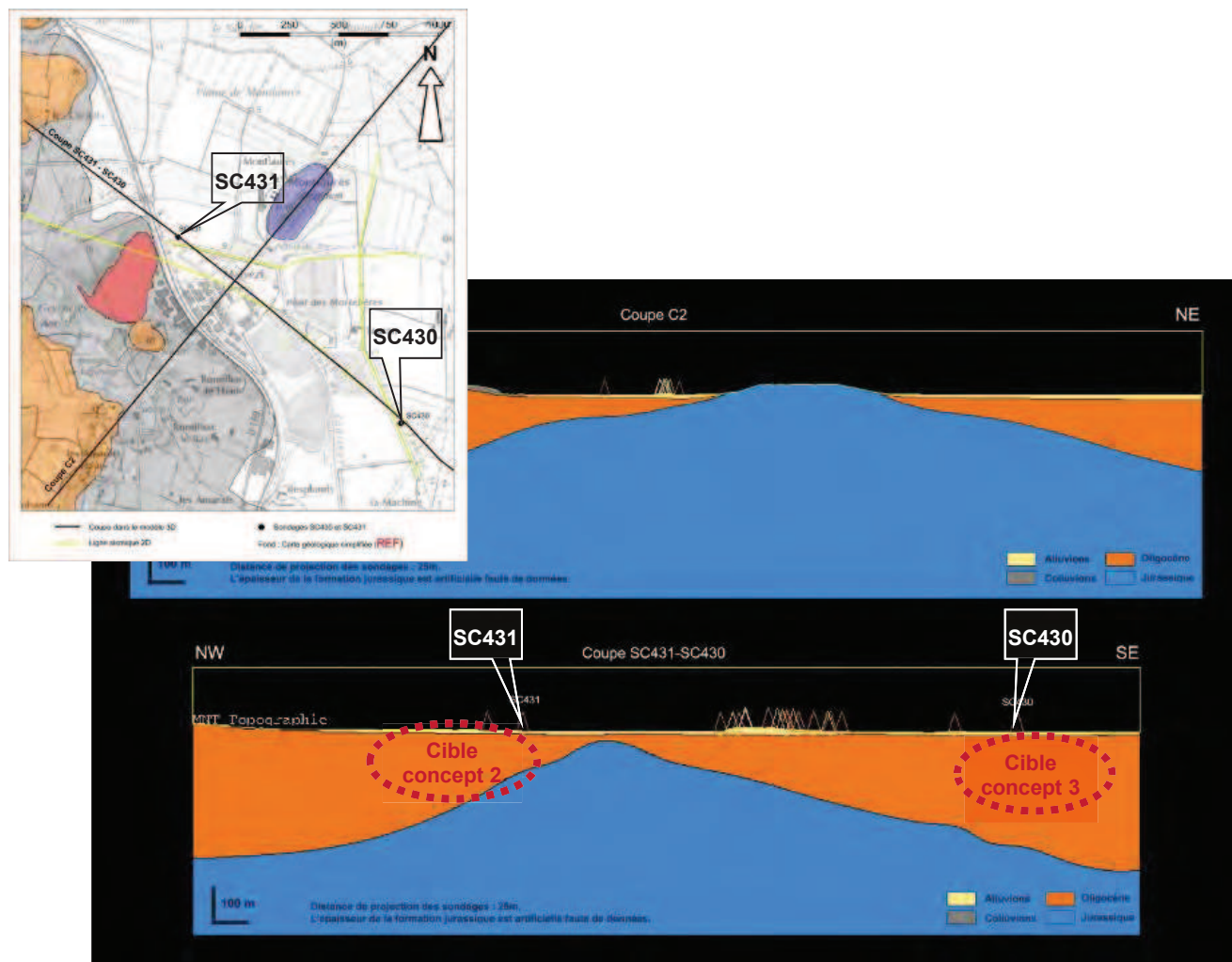


Figure 19 : Coupe interprétative des données sismiques et de forage

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 fluviatile,
- 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'argillites 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 argillites 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 %.

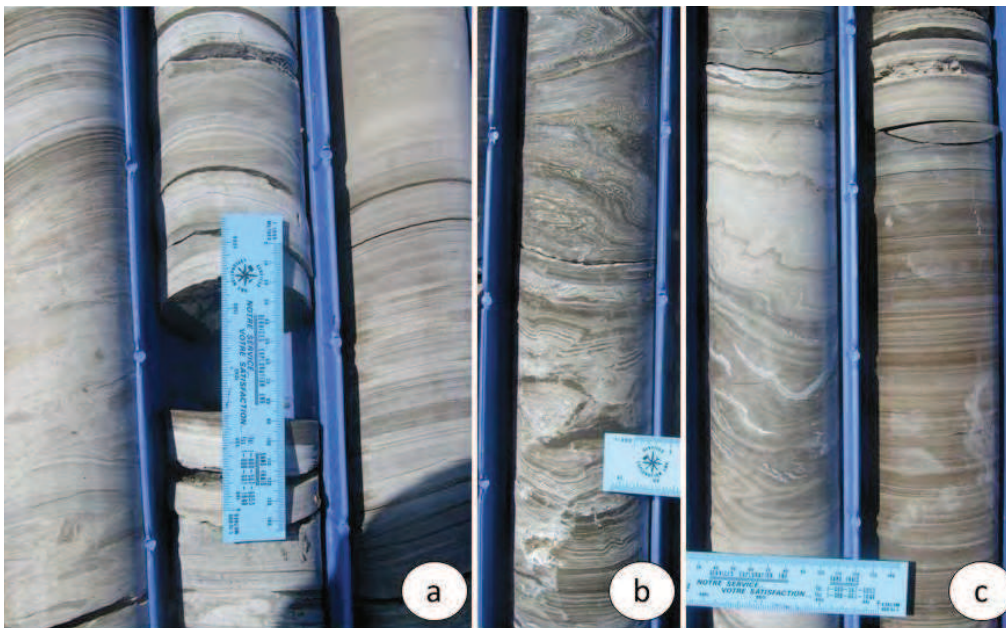


Figure 21 : Aspect général des échantillons prélevés dans l'Oligocène gris montrant les variations de teintes et les niveaux plissés

(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 Néviau.

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.

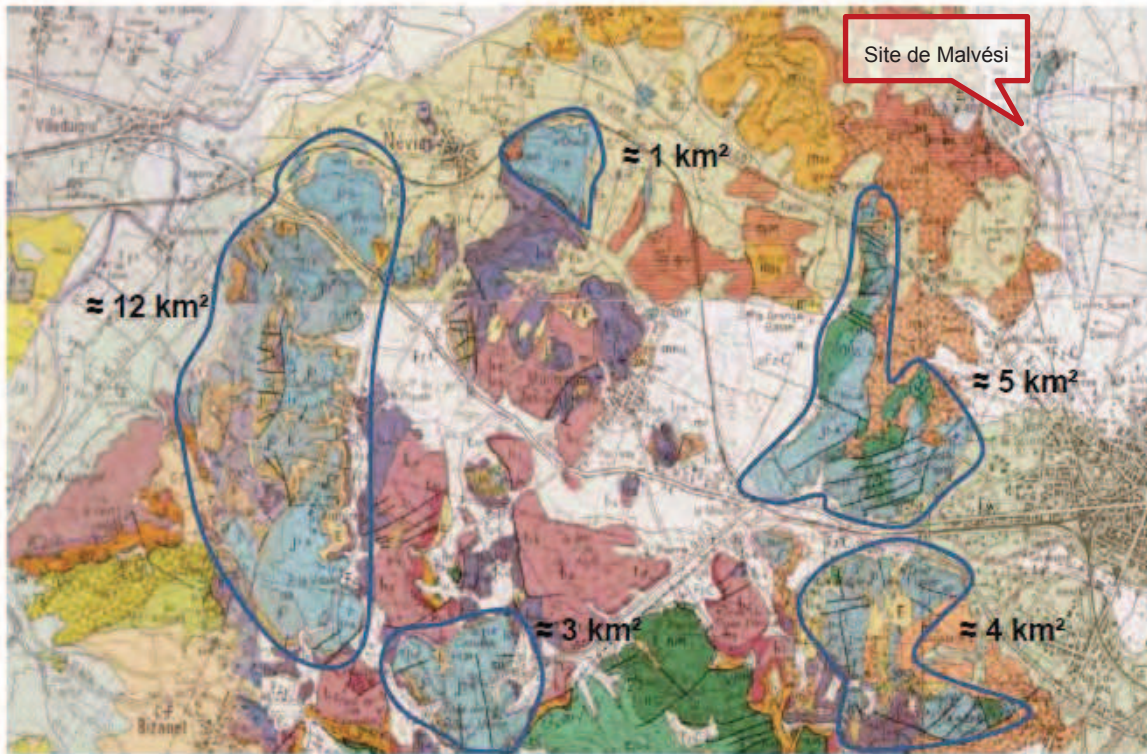


Figure 22 : Carte géologique présentant les aires d'affleurement des calcaires jurassiques à l'Ouest du site (zones de recharge probable de l'aquifère karstique).

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.

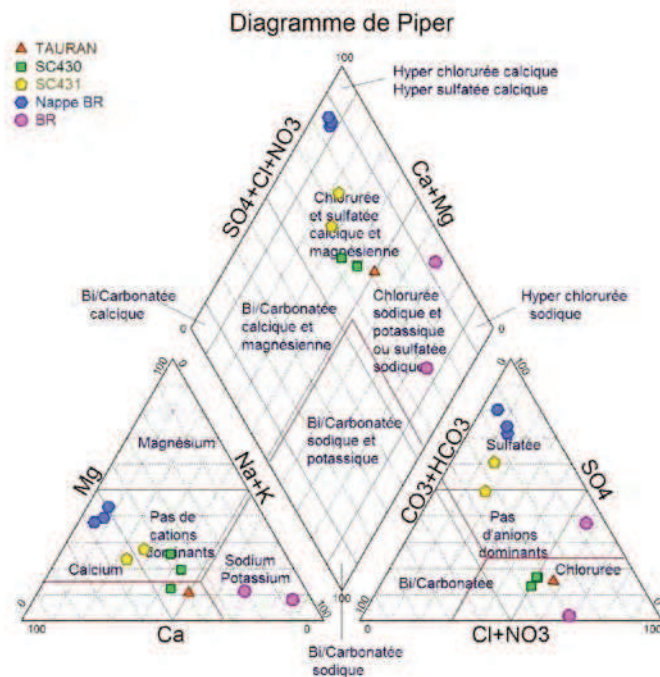


Figure 23 : Report des analyses des eaux sur un diagramme de Piper

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.

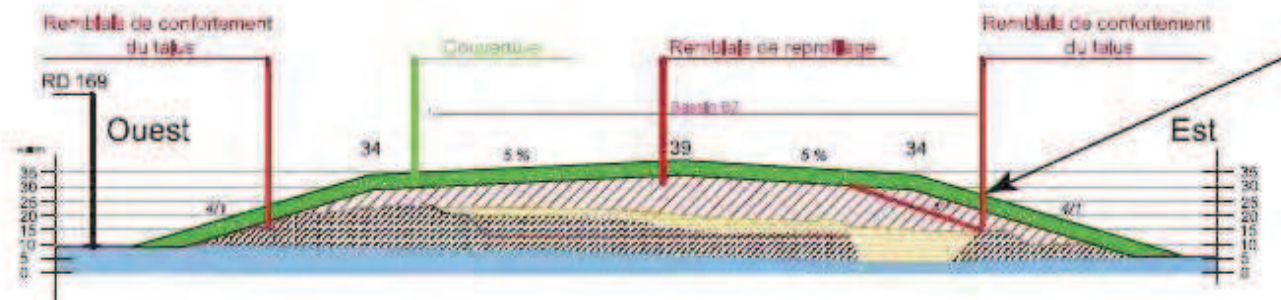


Figure 25 : Coupe du concept de stockage en surface

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.

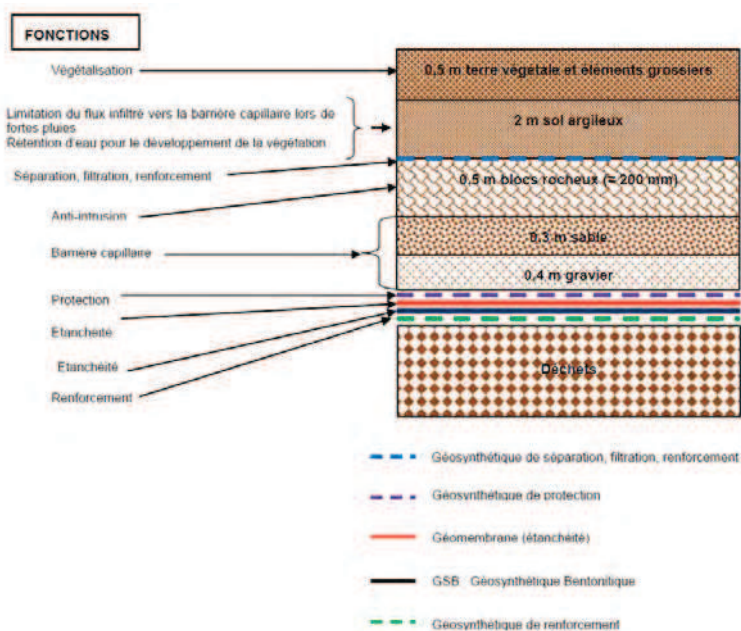


Figure 26 : Coupe schématique de la couverture

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.

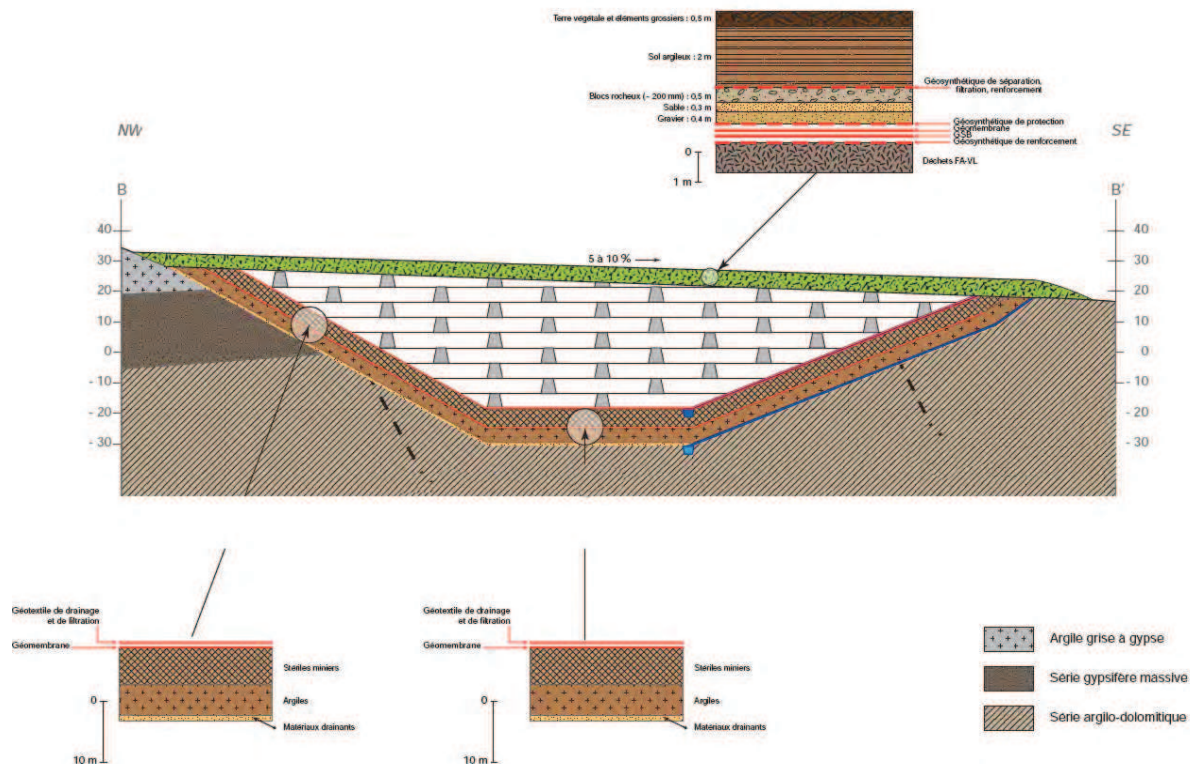


Figure 27 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans l'ancienne mine de soufre

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 séparée 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.

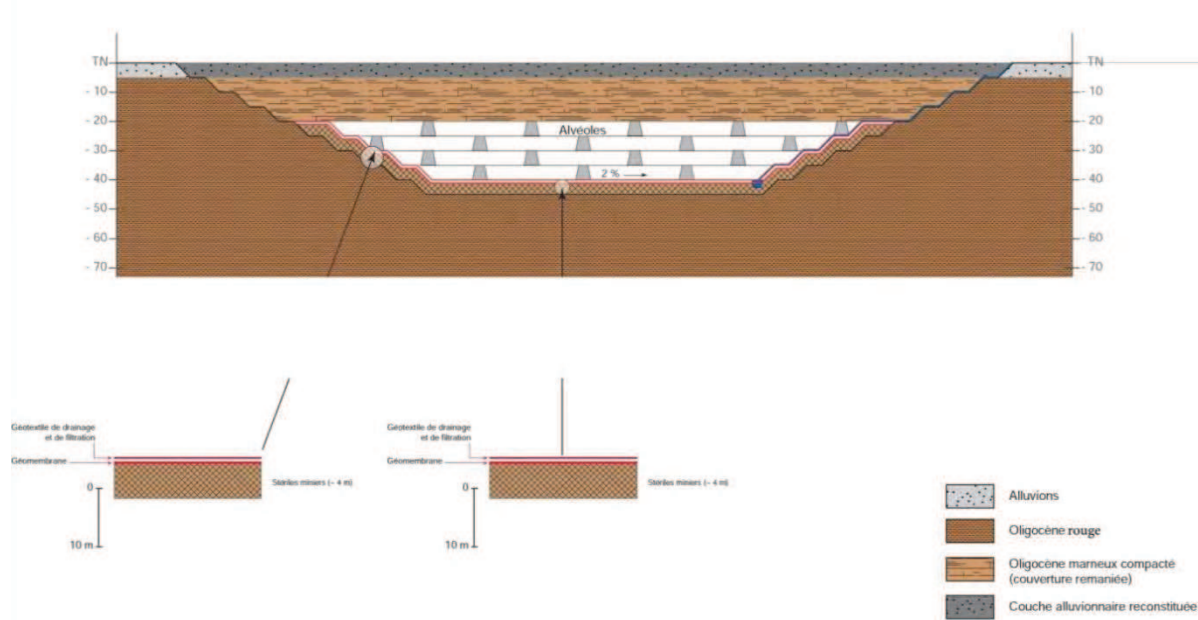


Figure 28 : Coupe du concept de stockage à faible profondeur dans les marnes rouges

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 séparées 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 :

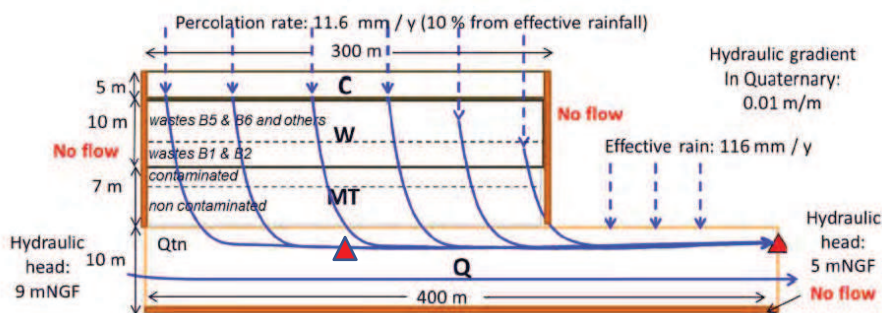


Figure 29 : Représentation des flux du Concept 1 et conditions aux limites du modèle (C: couverture, W: déchets, MT: stériles miniers, Q: alluvions quaternaires).

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 :

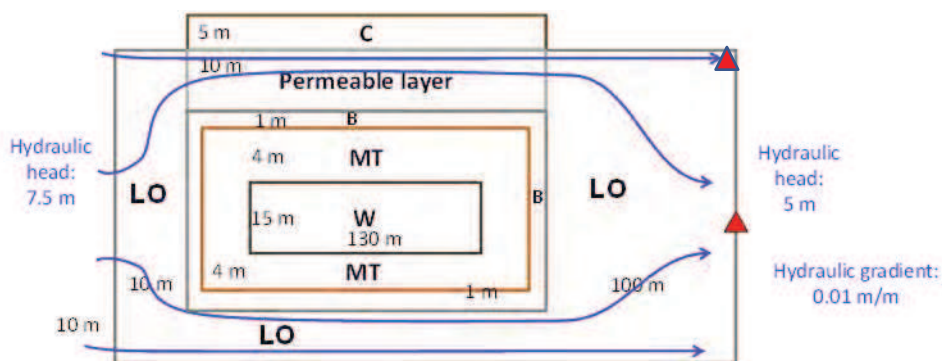


Figure 30 : Représentation des flux du Concept 2 et conditions aux limites du modèle
 (C: couverture, W: déchets, MT: stériles miniers, LO : Oligocène gris, B : bentonite)

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 :

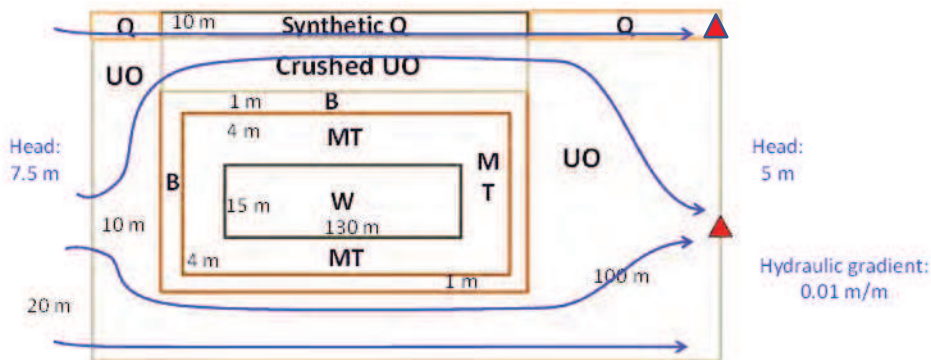


Figure 31 : Représentation des flux du Concept 3 et conditions aux limites du modèle
 (Q: alluvions quaternaires, W: déchets, MT: stériles miniers, UO : Oligocène rouge, B : bentonite)

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.

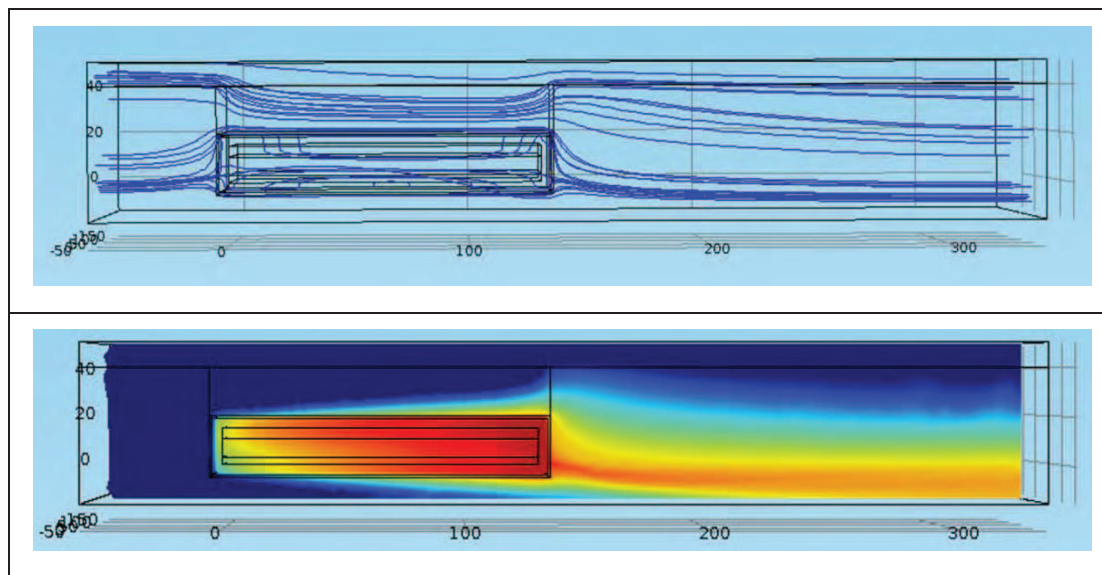


Figure 32 : Concept 3 - Représentation des lignes de courant et des concentrations à 5 000 ans pour un traceur parfait

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 <i>(in bold and red font are indicated minerals considered initially present in the Waste and Contaminated Tailings compartments)</i>	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.

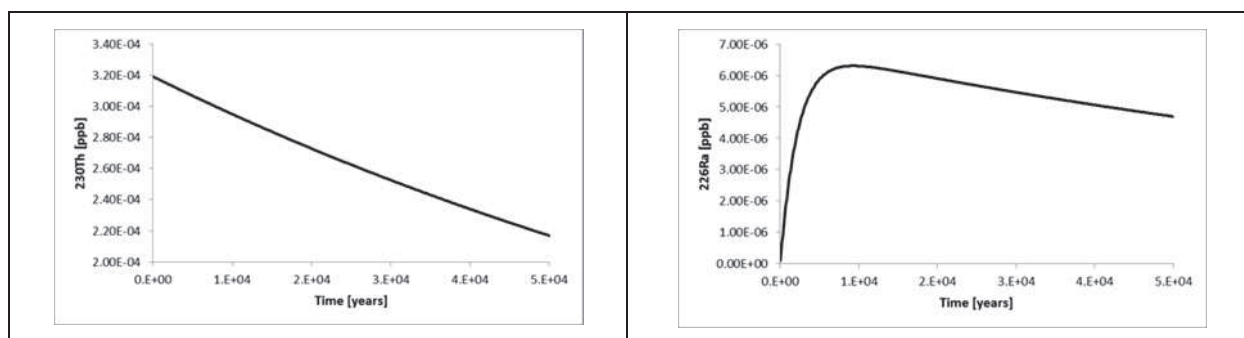


Figure 33 : Evolution des concentrations en ^{230}Th (à gauche) et ^{226}Ra (à droite) dans les déchets sur les 50 000 ans de la modélisation

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.

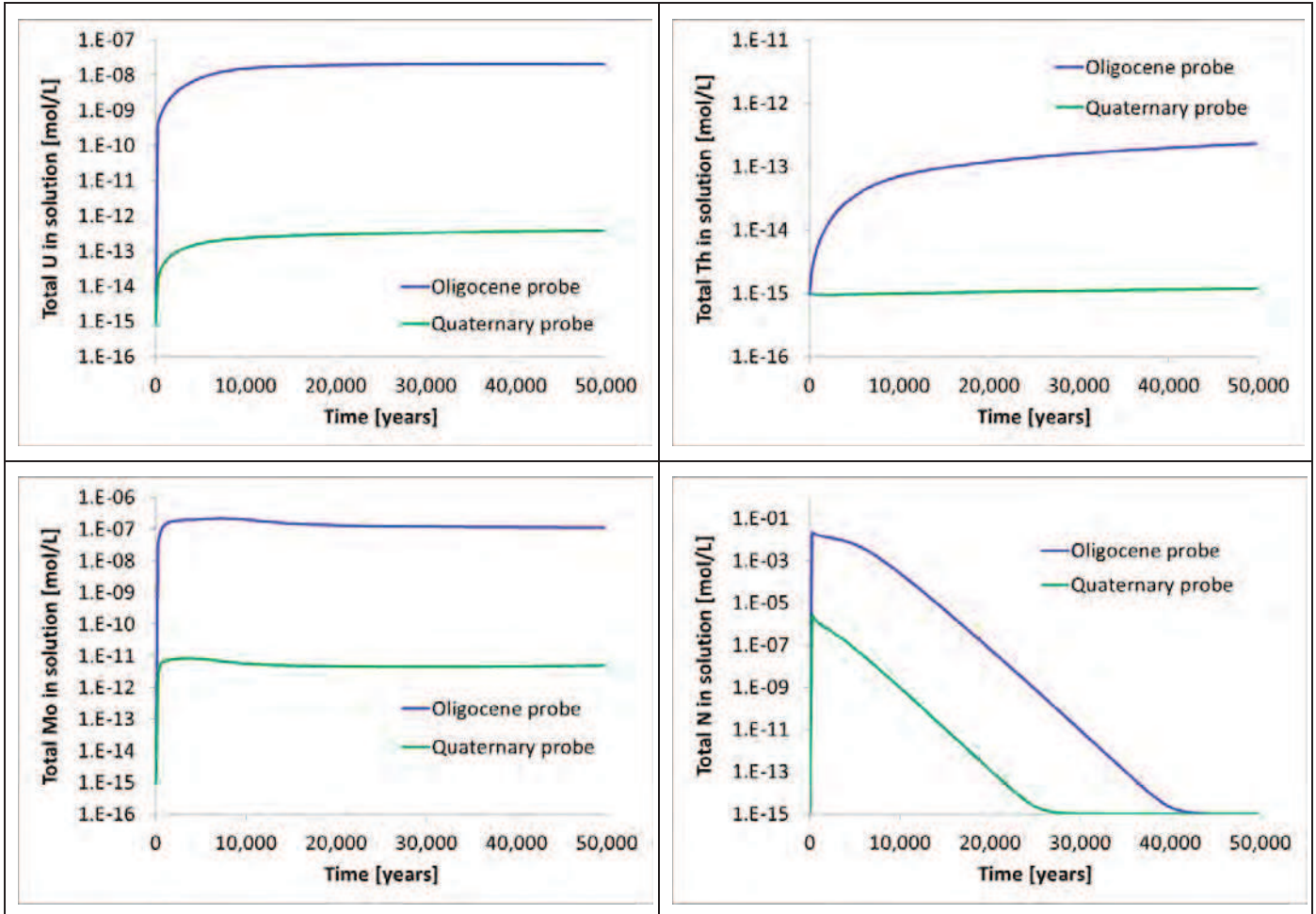


Figure 34 : Concept 3 - Courbes d'évolution de la concentration en Uranium (en haut, à gauche), Thorium (en haut, à droite), Molybdène (en bas, à droite) et Azote total (en bas, à droite) sur les deux points de contrôle situés en surface (alluvions quaternaires) et en profondeur (oligocène rouge)

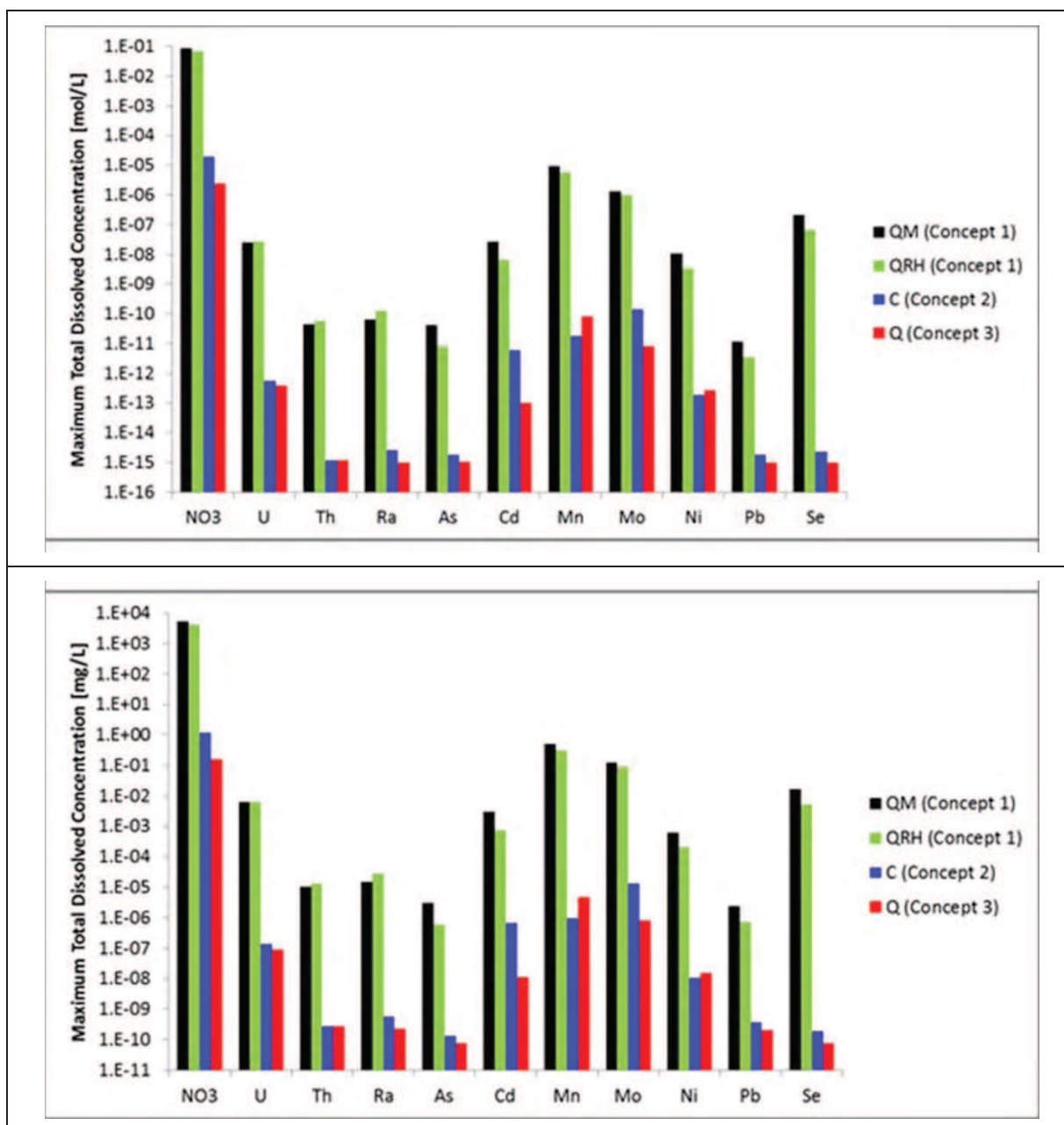


Figure 35 : Comparaison des trois concepts - Concentrations maximales atteintes (mol/l ou mg/l) aux différents points de surveillance

(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.

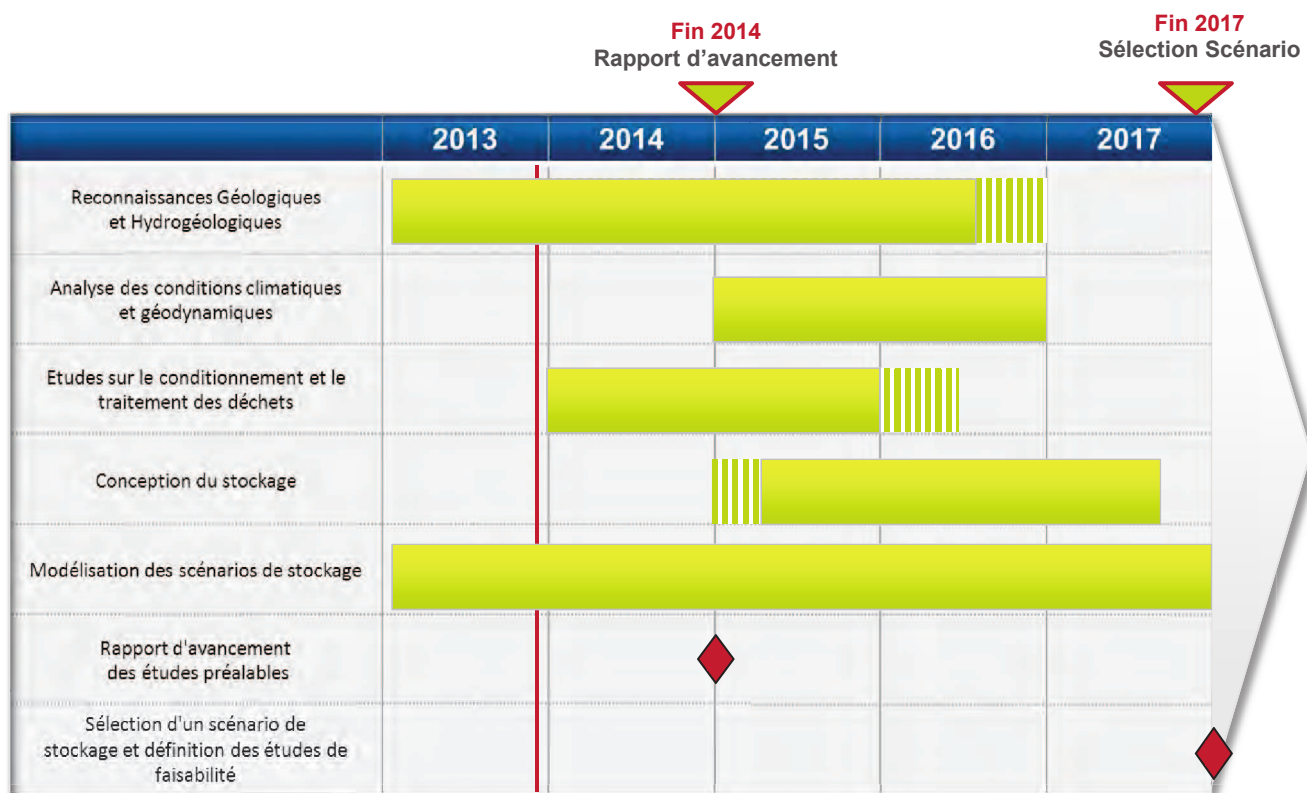


Figure 36 : Calendrier des études et investigations

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



Stock et prévisions

Date	Stock	Prévisions (cumul)	
	fin 2010	2020	2030
Volume total de déchets solides (m ³)	276 000	311 000	363 500
Volume total de liquides nitrates (m ³)	321 000	321 000*	321 000*
Auxquels pourrait s'ajouter une évaluation de 200 000 m ³ à 300 000 m ³ 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)

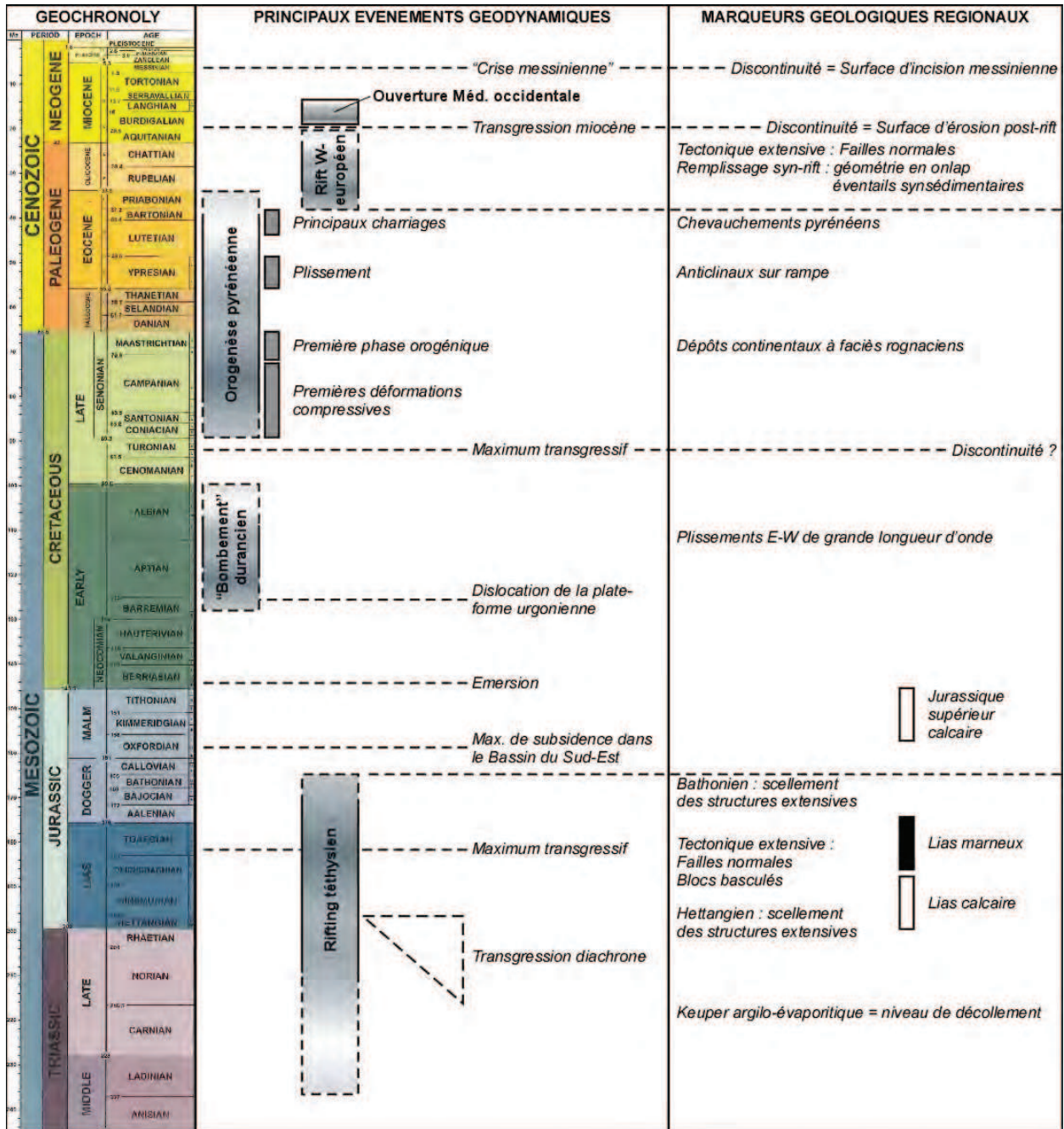


Figure 38 : Synthèse des principaux évènements géodynamiques connus à l'échelle du bassin du Sud-Est de la France, reportés le long de l'échelle stratigraphique (d'après Coueffé et al., 2011).

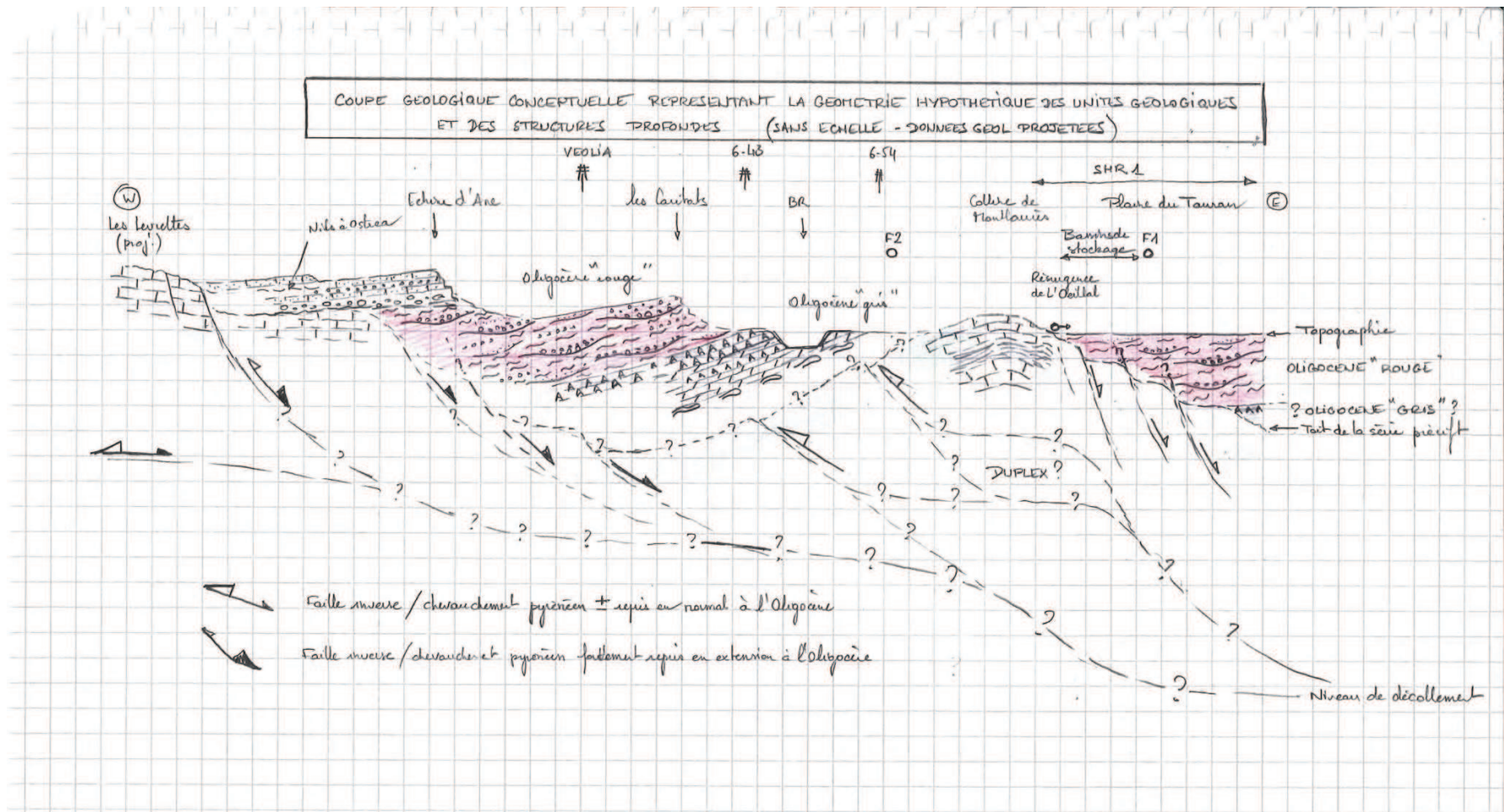


Figure 39 : Coupe géologique conceptuelle