

PNGMDR 2016-2018

STOCKAGE DES DÉCHETS FA-VL : Enjeux et exigences préliminaires de sûreté

Identification
FNTASPF180004

Mai 2019

Page : 1/83

Sommaire

1.	Contexte et objet	5
2.	Construire une démarche de sûreté appropriée : quelle protection peut apporter un site à faible profondeur pour la gestion de déchets de type FA-VL ?	7
2.1	<i>La faible profondeur, une exigence de proportionnalité exprimée par le PNGMDR entre dangerosité des déchets et mode de stockage</i>	7
2.2	<i>Un stockage à faible profondeur est un concept intermédiaire entre les concepts existants, qui nécessite la mise en place d'une démarche de sûreté spécifique</i>	9
2.3	<i>Cerner les enjeux de protection intrinsèques aux différentes catégories de déchets FA-VL, pour déterminer le service que peut rendre un stockage à faible profondeur en matière de protection</i>	12
2.4	<i>La déclinaison des enjeux de sûreté spécifiques à la faible profondeur comme aux déchets FA-VL en fonctions et exigences de sûreté</i>	16
2.5	<i>Quels niveaux de protection attendus sur les grandes échelles de temps ?</i>	21
3.	Comment réaliser un stockage à faible profondeur ?	23
3.1	<i>Techniques de réalisation des alvéoles de stockage à ciel ouvert avec couverture remaniée</i>	24
3.2	<i>Techniques de réalisation des alvéoles de stockage en travaux souterrains</i>	26
3.3	<i>Accès direct aux ouvrages de stockage</i>	26
3.4	<i>Une architecture flexible pour articuler besoins en confinement des différents déchets, techniques constructives et configuration du site</i>	28
4.	Quel rôle pour le site investigué dans l'Aube ? Quels compléments prévoir pour un dispositif complet ?	29
4.1	<i>Des besoins de gestion étalés dans le temps</i>	29
4.2	<i>Le site de la CC de Vendevre-Soulaines : une pièce du dispositif à construire</i>	29
4.3	<i>Quelles modalités pour rechercher un ou d'autres sites ?</i>	42
4.4	<i>Les questions à instruire pour proposer un dispositif d'ensemble cohérent</i>	46
5.	Références	49
6.	Annexe 1 : Périmètre des déchets FA-VL	50
6.1	<i>Les déchets radifères</i>	50
6.2	<i>Les empilements et les chemises en graphite (EDF, CEA)</i>	52
6.3	<i>Les déchets dits UNGG de La Hague (Orano)</i>	53
6.4	<i>Les fûts d'enrobé bitumineux de Marcoule (CEA)</i>	53
6.5	<i>Déchets technologiques de la Hague (colis CBF-C'2 FA-VL, Orano)</i>	54
6.6	<i>Sources scellées usagées et objets au radium, thorium ou uranium</i>	55
6.7	<i>Les résidus de conversion de l'uranium (Orano, Malvési)</i>	55

7.	Annexe 2 : Retour d'expérience d'ouvrages de génie civil réalisés à faible profondeur dans des formations argileuses	56
7.1	<i>Grands terrassements à ciel ouvert et couverture remaniée</i>	56
7.2	<i>Ouvrages réalisés en souterrain</i>	71
8.	Annexe 3 : Demandes et recommandations du courrier de l'ASN réf. CODEP-DRC-2016-013550 du 19 Juillet 2016 auxquelles le présent rapport apporte des réponses.	83

1. Contexte et objet

Le principe de la gestion des déchets FA-VL dans un stockage à faible profondeur est exprimé dès la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs et la première version du PNGMDR qui s'en est suivie. La définition de ce principe s'est appuyée à l'époque sur les travaux antérieurs menés par l'Andra depuis les années 1990, envisageant le stockage des déchets radifères puis de graphite dans une installation en sub-surface.

Les études qui ont mis en œuvre la loi du 28 juin 2006 jusqu'en 2015 se sont orientées selon deux axes principaux. D'une part, le périmètre des déchets considérés pour un stockage à faible profondeur s'est progressivement complété en ajoutant aux graphites et radifères certains enrobés bitumineux et déchets technologiques, et la caractérisation des principaux déchets a progressé significativement. D'autre part, une démarche approfondie de recherche de site a été entreprise. Ainsi, l'Andra a été mandatée en 2008 par le gouvernement pour lancer un appel à candidatures au plan national en vue d'investiguer des sites (le processus qui a alors été mis en œuvre est détaillé plus loin à la section 4.3.1). L'Andra s'est alors appuyé sur les orientations générales définies par l'ASN en 2008 pour cibler les territoires susceptibles d'accueillir des formations géologiques favorables. Néanmoins, cette démarche extensive n'a pas été concluante, car si plusieurs candidatures ont émergé dans un premier temps, les territoires retenus se sont *in fine* retirés en 2009. Pour autant, devant la nécessité d'appuyer les études de concept de stockage à ce stade génériques sur des données de sites pour en démontrer la faisabilité, une nouvelle démarche a été mise en place à partir de 2012 en suivant les recommandations du HCTISN : elle a ainsi été ciblée sur les communes ayant exprimé leur intérêt en 2008 et à proximité de sites INB. Cette démarche a permis, d'obtenir l'accord de la Communauté de communes de Vendevre-Soulaines (Aube, 10) pour le lancement d'investigations géologiques à partir de 2013. Ces investigations se sont accompagnées de la mise en place d'une structure de concertation pour le développement du territoire sous l'égide du préfet de département associant les élus, l'Andra et les producteurs des déchets.

Ainsi, le rapport d'étape remis en 2015 a esquissé les contours d'un possible projet de centre de stockage à faible profondeur sur le site investigué, fondé sur l'inventaire de déchets considéré à l'époque. Il s'agissait de rendre compte dans le cadre du PNGMDR de la première étude de conception conduite sur un site réel, basée sur une reconnaissance précise des caractéristiques géologiques, et appuyée sur des progrès importants en matière de caractérisation de déchets. L'avis N° 2016-AV-264 de l'ASN remis le 29 mars 2016 en amont de l'édition 2016-2018 du PNGMDR a conclu notamment qu'un projet développé sur le site investigué dans l'Aube ne pourrait accueillir qu'une part de l'inventaire envisagé, cette part restant à préciser, et que corolairement des solutions complémentaires devraient être proposées pour les déchets non pris en compte. Par ailleurs, les orientations prises au titre du PNGMDR 2016-2018 soulignent la nécessité d'élargir le spectre des déchets devant être considérés comme relevant de la catégorie FA-VL, en y incluant en particulier une part des déchets issus du site de Malvési. Le périmètre actuel des déchets FA-VL est détaillé en annexe 1.

Le PNGMDR 2016-2018 demande ainsi à l'Andra sur la période 2016-2018, dans le cadre de la poursuite des études sur les déchets FA-VL et en complément aux travaux conduits par les producteurs sur la caractérisation et le traitement potentiel des déchets, d'avancer dans la conception d'un stockage à faible profondeur pour les déchets FA-VL sur le site déjà investigué (PNGMDR 2016-2018 § 4.1.5, recommandation N°1), d'explorer les modalités de recherche d'un deuxième site (recommandation N°6), puis, dans un deuxième temps, de construire un schéma industriel d'ensemble pour la gestion des déchets FA-VL (recommandation N°5). Afin de stabiliser les bases sur lesquelles un tel stockage pourrait être conçu, l'article 35 de l'arrêté du 23 février 2017 pris en application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017, lui-même pris pour application de l'article L.542-1-2 du Code de l'environnement et établissant les prescriptions du PNGMDR, demande à l'Andra « *un rapport intermédiaire définissant, en lien avec les études de conception, les exigences de sûreté applicables au stockage* ». En effet, les débats qui ont eu lieu autour du rapport 2015 ont mis en avant la nécessité de clarifier, à une phase suffisamment amont du processus, les attendus en matière de sûreté et de radioprotection d'un concept de stockage à faible profondeur pour la gestion des déchets FA-VL, et les modalités de leur déclinaison opérationnelle.

Le présent document constitue le rapport demandé à l'article 35 de l'arrêté du 23 février 2017, et propose aussi une réponse à la recommandation N°6 du PNGMDR 2016-2018. Il s'attache par ailleurs à prendre en compte une partie des demandes exprimées par l'ASN dans son courrier réf. CODEP-DRC-2016-013550 du 19 juillet 2016 (Cf. annexe 3). Les analyses proposées s'appuient sur le retour d'expérience de l'ensemble des études antérieures menées par l'Andra, ainsi que sur de nouveaux travaux conduits depuis 2015.

Afin de cerner les exigences de sûreté pour un stockage FA-VL, il est nécessaire de revenir aux déterminants ayant amené à orienter la gestion des déchets FA-VL vers un concept de stockage à faible profondeur, pour en explorer les différentes dimensions et les conséquences sur le domaine de faisabilité d'un tel objet.

En effet, le principe du stockage à faible profondeur introduit par les versions successives du PNGMDR traduit de fait une exigence de proportionnalité dans la gestion de ces déchets, adaptée à leur niveau de dangerosité, intermédiaire entre celle des déchets destinés au stockage profond et celle des déchets admis dans un stockage de surface. Pour répondre à cette exigence de proportionnalité, il convient de prendre en compte des enjeux spécifiques, et donc une démarche de sûreté appropriée. La première partie du présent document s'attache à développer ce point, en proposant des principes sur lesquels pourrait se construire un telle démarche ainsi que les modalités de leur déclinaison, et en identifiant les éventuels points bloquants ou paradoxes à lever. Elle cherche ainsi à définir ce que peut apporter un stockage à faible profondeur en matière de protection de l'homme et de l'environnement vis-à-vis de déchets de type FA-VL.

Afin de confronter ces principes et objectifs à leur mise en œuvre concrète, il s'agit ensuite d'explorer la faisabilité technologique d'un stockage à faible profondeur. Partant des constats que la qualification de « faible » n'a pas été clairement définie et que le débat sur le bon niveau de profondeur s'est historiquement cristallisé sur deux options de construction, dite « stockage sous couverture intacte » et « stockage sous couverture remaniée », l'Andra s'est appuyée sur une expertise externe pour identifier les meilleures technologies disponibles en matière de construction en sub-surface. Sur la base d'un large retour d'expérience, l'objectif est de définir le domaine d'emploi en termes de gamme de profondeurs de chaque technologie. La deuxième partie de ce document restitue l'analyse qui en découle et propose une définition opérationnelle du qualificatif « faible » comme le domaine de profondeur dans lequel des techniques constructives significativement plus simples que pour le stockage géologique profond peuvent être mises en œuvre.

Dans un troisième temps, les principes de sûreté comme les concepts technologiques doivent être repositionnés dans une logique de site(s) et de scénarios de gestion afin d'identifier les déterminants qui permettront de construire un dispositif de gestion globale cohérent pour les déchets de type FA-VL. C'est l'objet de la dernière partie de ce document. Celle-ci revient sur les caractéristiques du site de l'Aube du point de vue des compléments d'investigations géologiques et environnementales réalisées sur la période 2016-2018, comme de sa capacité à accueillir un déploiement industriel qui soit compatible avec les stratégies de démantèlement des producteurs telles que connues à date et qui puisse aussi être aménagé en fonction de leurs évolutions. Elle met en avant les questions à instruire avant de s'engager dans la recherche d'un site complémentaire, et propose une approche par scénarios de gestion doublée d'une évaluation environnementale pour mieux cerner le positionnement du site investigué dans le dispositif et sa valeur ajoutée potentielle en matière de protection vis-à-vis des déchets de type FA-VL.

Il est à noter que d'autres substances que les déchets aujourd'hui considérés comme FA-VL présentent aussi une dangerosité faible qui perdure aux grandes échelles de temps. Certaines de ces substances présentent des volumes potentiellement plus importants que ceux des déchets FA-VL : des résidus miniers, des déchets historiques de l'usine de Malvési (Cf. annexe 1), les matières uranifères et thorifères. Le stockage des matières si à l'avenir elles étaient qualifiées de déchets, fait actuellement l'objet d'études spécifiques par l'Andra dans le cadre du PNGMDR, en lien avec leurs détenteurs.

2. Construire une démarche de sûreté appropriée : quelle protection peut apporter un site à faible profondeur pour la gestion de déchets de type FA-VL ?

2.1 La faible profondeur, une exigence de proportionnalité exprimée par le PNGMDR entre dangerosité des déchets et mode de stockage

2.1.1 Les orientations actuelles de la politique de gestion des déchets radioactifs assimilent stockage en faible profondeur et proportionnalité aux enjeux

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 définit le cadre de la gestion des matières et déchets radioactifs. En particulier elle stipule dans son article 4 la mise en place d'un programme de recherche et d'étude en vue de la mise au point de solutions de stockage pour les déchets radifères et graphites.

La classification des déchets radifères et de graphite en « déchets de faible activité à vie longue » (FA-VL) a été introduite par le PNGMDR 2007-2009, sans pour autant donner une définition objective ou une liste précise des déchets FA-VL. Le périmètre de ces déchets est en constante évolution depuis (voir *infra*).

La classification des déchets donnée par le PNGMDR met en regard les déchets FA-VL du principe d'un stockage en faible profondeur étudié en application de l'article 4 de la loi (Cf. tableau 1 ci-après).

Le PNGMDR précise, pour les déchets radifères et graphite, qu'« *ils doivent faire l'objet d'une gestion spécifique, adaptée à leur longue durée de vie, laquelle ne permet pas leur stockage dans des installations de stockage comme celles exploitées par l'Andra dans l'Aube. Leur faible radioactivité ne justifie toutefois pas de les stocker en couche géologique profonde.* ».

Les orientations générales de sûreté de l'ASN stipulent que « *Le stockage de déchets FA VL est [...] une installation « intermédiaire » entre un centre de stockage de surface et un centre de stockage en formation géologique profonde qui est conforme au principe d'optimisation technique et économique du dispositif de gestion des déchets radioactifs.* »

Ces orientations, comme le cadre législatif et de politique publique actuel, traduisent donc la nécessité de mise en œuvre d'une solution considérée comme proportionnée aux caractéristiques des déchets FA-VL par la demande de développement d'un concept de stockage à faible profondeur pour accueillir les déchets concernés. Pour autant, ni ces déchets, ni ce qu'est une faible profondeur, ni les caractéristiques de la proportionnalité recherchée, n'ont fait l'objet jusqu'à présent de critères partagés, ce qui a conduit depuis 20 ans à une difficulté de stabilisation du périmètre du projet dit FA-VL et des solutions de gestion envisagées, révélatrice de certains paradoxes inhérents aux orientations actuelles.

Pour mémoire, l'AIEA définit le « *stockage définitif en surface ou à faible profondeur* » dans ses prescriptions de sûreté particulières sur le stockage définitif des déchets radioactifs (N° SSR-5) comme une « *installation constituée de tranchées artificielles ou de casemates construites à la surface ou jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur. Une telle installation peut être conçue comme une installation de stockage définitif de déchets de faible activité* ».

Tableau 1 : Rappel de la classification française des déchets radioactifs

	Déchets dits à vie très courte contenant des radioéléments de période < 100 jours	Déchets dits à vie courte dont la radioactivité provient principalement de radionucléides de période ≤ 31 ans	Déchets dits à vie longue qui contiennent une quantité importante de radionucléides de période > 31 ans (1)
Très faible activité (TFA)	Gestion par décroissance radioactive	Recyclage ou stockage dédié en surface	
Faible activité (FA)		Stockage de surface sauf certains déchets tritiés et certaines sources scellées	Stockage en faible profondeur Filière en projet dans le cadre de l'article 4 de la loi du 28 juin 2006
Moyenne activité (MA)			Stockage en couche géologique profonde
Haute activité (HA)	Non applicable	Filière en projet dans le cadre de l'article 3 de la loi du 28 juin 2006	

2.1.2 L'historique des différentes solutions de gestion envisagées pour les déchets FA-VL montre la difficulté de concrétiser cette exigence de proportionnalité

Historiquement, en 1993, le ministre de l'environnement et le ministre de l'Industrie donnaient pour mission à l'Andra d'étudier les solutions envisageables pour le traitement et le stockage de déchets radifères. Les études et réflexions préliminaires se sont concrétisées en 1994, par l'élaboration de bases de conception préliminaires liées à la sûreté qui ont été soumises pour avis à la DSIN (devenue DGSNR puis ASN) en octobre 1994. La DSIN donnait le 1^{er} juin 1995 un avis favorable à la poursuite du développement du concept proposé. Il s'agissait d'un concept de stockage à -5 m de profondeur comportant un système de confinement à double barrière : les déchets eux-mêmes (insolubilisés) et le milieu géologique argileux d'accueil du stockage. Par la suite, l'Andra a conduit de 1997 à 1999 une étude de faisabilité du stockage des déchets de graphite en sub-surface. Cette étude posait les premiers principes de conception envisageables et soulignait les difficultés à résoudre (la gestion du ³⁶Cl en particulier).

Sur ces bases l'Andra a proposé en 2000 de coupler le projet graphite et le projet radifère afin de renforcer le projet et de pouvoir créer une installation à dimension industrielle. Dans son dossier d'options de sûreté de 2002, soumis à la DGSNR, l'Andra a proposé un approfondissement du stockage à -15 m pour tenir compte des risques d'intrusion et d'érosion soulevés par la DGSNR dans son courrier du 2 octobre 1998.

Un dossier de conception sommaire sur site générique a été réalisé en 2005 sur la base de ces options. Dans l'impossibilité de lancer une recherche de site, le projet a été mis en veille jusqu'à la parution de la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006.

Comme rappelé *supra*, la loi stipulait la mise en place d'un programme de recherche et d'étude en vue de la mise au point de solutions de stockage pour les déchets radifères et graphites. Elle introduisit aussi le terme de faible profondeur dans son article 6-I qui prévoit : « *Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde.* ».

¹ Ou une concentration en nucléides de période inférieure à 31 ans supérieure aux critères d'acceptation d'un centre de stockage de surface

En 2008 et préalablement au lancement de la recherche d'un site, l'ASN a fixé les orientations générales qui doivent être retenues dès la phase d'investigation d'un site et de conception d'une installation de stockage de déchets FA-VL pour en assurer la sûreté après fermeture. En particulier elle a précisé les fonctions de sûreté d'un tel stockage, les objectifs de protection et les échelles de temps associés. Les recherches de site et les études de conception d'un stockage à faible profondeur de déchets FA-VL menées depuis sont fondées sur ces orientations.

Après l'échec de la recherche de site de 2009, la DGEC a demandé à l'Andra d'explorer d'autres pistes de gestion des déchets FA-VL incluant des possibilités de tri et de traitement, les stockages de surface et dans Cigéo. Le rapport de l'Andra de 2012 [9] conclut à la nécessité de mise en œuvre d'une solution de stockage dédiée pour les déchets radifères en laissant ouverte l'opportunité d'y associer des déchets de graphite et des déchets bitumés selon les résultats de pistes de traitement qui étaient en cours d'exploration par les producteurs de déchets FA-VL.

En parallèle un groupe de travail a été mis en place par la DGEC (associant l'Andra, les producteurs de déchets, l'ASN et l'IRSN) pour mener des analyses sur l'optimisation des filières, sous l'angle de la bonne utilisation des différentes filières de stockage, de la maîtrise des risques liés à chaque type de déchet ainsi que de la cohérence globale du dispositif de gestion et son optimisation technique et économique. Le groupe a conclu [2] qu'un stockage à faible profondeur compléterait le dispositif de gestion à long terme des déchets radioactifs en proposant de nouvelles perspectives pour les déchets non acceptables en surface et qui ne nécessitent pas un stockage géologique profond pour des raisons de sûreté ou de radioprotection. En fonction de sa future capacité d'accueil, il pourrait ainsi apporter un bénéfice majeur dans l'optimisation de la gestion des déchets, déjà produits et à produire.

En 2015 et suite aux investigations géologiques de site lancées dans l'Aube, l'Andra a remis un rapport d'étape de 2015 [10] présentant les conclusions des dernières études et recherches relatives à la gestion des déchets FA-VL et pour lequel l'ASN a été saisie pour avis.

L'ASN s'est prononcée sur l'ensemble des études relatives à la gestion des déchets FA-VL, notamment sur l'inventaire des déchets, sur le rapport d'étape 2015 (sans qu'il ne constitue pour autant un dossier de sûreté d'installation) et sur la mise en œuvre de solutions de gestion complémentaires au stockage sur le site investigué dans l'Aube [11]. L'ASN estime qu'il sera difficile de démontrer la faisabilité, dans la zone investiguée, d'une installation de stockage de l'intégralité des déchets de type FA-VL retenus par l'Andra.

L'IRSN s'est également prononcé sur la gestion des déchets FA-VL. L'IRSN considère notamment que des options complémentaires pourraient être étudiées en examinant la possibilité, d'une part de regrouper les déchets FA-VL radifères avec des déchets uranifères² et, d'autre part, de répartir les déchets FA-VL en provenance des réacteurs et de l'aval du cycle (graphites, bitumes...) dans des centres de surface et le futur centre de stockage en formation géologique profonde.

2.2 Un stockage à faible profondeur est un concept intermédiaire entre les concepts existants, qui nécessite la mise en place d'une démarche de sûreté spécifique

Afin de tirer le retour d'expérience de cette difficulté historique de concrétisation de l'exigence générale d'un développement d'une solution de gestion proportionnée, il est tout d'abord nécessaire de revenir aux caractéristiques intrinsèques d'un concept de stockage à faible profondeur, aux services qu'il peut rendre en matière de protection comme à ses limites.

Dans ce cadre, au vu de l'exigence de proportionnalité et d'optimisation technico-économique associée, il est proposé de définir *a minima* une faible profondeur comme procurant un certain isolement des déchets stockés vis-à-vis des phénomènes de surface mais autorisant une mise en œuvre significativement plus simple et moins coûteuse qu'un stockage en formation géologique profonde.

² L'IRSN relève qu'il existe d'ores et déjà une sensibilisation au risque d'exposition au radon dans des régions où des mines d'uranium ont été exploitées dans le passé et où se trouvent des stockages de résidus miniers,

Par ailleurs, s'inspirant des travaux conduits pour le stockage en formation géologique profonde d'une part, du Cires (TFA) et des installations de stockage de déchets conventionnels dangereux d'autre part, le stockage à faible profondeur n'a été étudié jusqu'ici que dans une couche argileuse présentant par nature des propriétés de confinement.

Du point de vue de l'analyse de sûreté, du fait de son caractère intermédiaire, le stockage à faible profondeur conjugue donc l'ambivalence suivante :

- À l'instar de Cigéo, il exploite les caractéristiques du milieu géologique, en l'occurrence une formation argileuse de faible perméabilité dans les concepts étudiés jusqu'ici : il bénéficie donc des propriétés de confinement que présente l'argile en place ;
- À l'instar des centres de surface, sa faible profondeur le rend sensible aux activités humaines et aux évolutions géodynamiques externes et climatiques dans le temps. Par ailleurs, il peut être proche d'une ressource en eau sus ou sous-jacente.

2.2.1 Une plus grande sensibilité aux incertitudes à long terme que le stockage géologique profond, d'où une garantie de confinement limitée dans le temps

La faible profondeur rend le stockage sensible aux activités humaines et aux évolutions géodynamiques externes et climatiques dans le temps. Si la faible profondeur permet de confiner les déchets plus durablement qu'en surface, le confinement est néanmoins affecté par les processus d'altération, d'érosion et de dépôt qui pilotent l'évolution géomorphologique du site. Ces processus sont eux-mêmes dépendants des grands changements climatiques, moteurs de l'évolution géodynamique externe, avec les incertitudes associées.

Les incertitudes sur les scénarios climatiques croissent entre quelques milliers et quelques dizaines de milliers d'années, limitant de fait la garantie du confinement d'un stockage à faible profondeur dans le temps. Se mettre à l'abri des évolutions géomorphologiques nécessiterait d'envisager des gammes de profondeur difficilement compatibles avec l'acceptation d'une faible profondeur telle que précédemment décrite. En effet, il s'agirait alors de considérer des profondeurs au-delà de 150 à 200 mètres [12] et donc des techniques constructives et concepts de stockage relevant de la grande profondeur. Ce paradoxe explique pourquoi le débat sur les enjeux de sûreté et de protection autour des déchets FA-VL s'est historiquement concentré sur la profondeur du stockage. La notion de profondeur recèle néanmoins plusieurs questions qu'il convient de décorréliser pour en analyser les modalités de prise en compte dans la démarche de sûreté.

2.2.2 Derrière le débat sur la profondeur, des enjeux spécifiques à prendre en compte dans la démarche de conception et d'analyse de sûreté

Compte tenu des ambivalences inhérentes à sa définition, la démarche de conception et d'analyse de sûreté des stockages appliquée à un concept à faible profondeur soulève différentes interrogations qui ont des conséquences sur la méthodologie et le niveau de la démonstration de sûreté après-fermeture. Ces conséquences sont à peser dans le cadre d'une démarche globale de protection des intérêts en gardant à l'esprit que la solution qui sera *in fine* retenue doit être proportionnée aux enjeux de sûreté associés aux déchets FA-VL.

Ces interrogations et la façon dont l'Andra a proposé d'y répondre en déclinant la méthodologie classique d'analyse de sûreté des stockages de déchets radioactifs sont présentées ci-après. Elles influencent la démarche avec laquelle peuvent être précisées et définies les fonctions de sûreté qui guident la conception comme la méthodologie de prise en compte de ces spécificités dans les analyses de sûreté.

2.2.2.1 Les enjeux liés à la faible profondeur : érosion, intrusion, proximité des aquifères

Aléa érosif

L'évolution géodynamique externe en lien avec les évolutions climatiques peut conduire à une érosion des formations superficielles du stockage. L'érosion va progressivement réduire l'épaisseur de couverture du stockage pouvant aller jusqu'à la mise à nu des déchets puis leur dispersion.

Les évaluations réalisées à ce jour considèrent que pour une évolution climatique anthropique, l'érosion des parties hautes pourrait être de quelques mètres à 10 000 ans et de la dizaine de mètres à 50 000 ans, de manière non nécessairement homogène.

A ce titre, il ne peut être exclu, en fonction de cette érosion, la présence à terme en surface d'une activité résiduelle selon la nature des déchets en présence. La démonstration de sûreté vise alors à s'assurer que la présence de déchets en surface ne conduirait pas à des impacts inacceptables. Cela pourrait se traduire par des critères d'acceptation sur les activités massives des déchets et de répartition dans le stockage.

Intrusions humaines

Le fait d'implanter le stockage à faible profondeur le rend sensible aux activités humaines de surface et en particulier aux intrusions humaines banales après perte de mémoire de l'existence du stockage. Le choix du site et celui de la profondeur d'implantation vont permettre de réduire le risque d'intrusion *a minima* sur les premiers siècles. Vis-à-vis du choix de site, il s'agit notamment de s'assurer de l'absence de ressources exceptionnelles au niveau du secteur d'implantation. Toutefois, cela ne permet pas de totalement exclure la possibilité d'une intrusion humaine dans le stockage liée à une perte de la mémoire de son existence (voir *infra*).

Ainsi, l'exclusion de tout type d'intrusion n'est pas considérée comme un objectif de dimensionnement de l'installation. Il pourrait s'agir de vérifier que les conséquences d'une intrusion dans le stockage restent acceptables, sur la base de scénarios conventionnellement reconnus, sans recherche de vraisemblance. Il faudrait néanmoins s'interroger sur la pertinence d'en déduire des critères d'acceptation sur l'activité massive des déchets et de répartition des déchets dans le stockage au regard de la valeur ajoutée que peut représenter un site concentrant une grande partie de déchets FA-VL.

Marquage des aquifères

Le stockage de déchets FA-VL à faible profondeur peut conduire, à plus ou moins long terme, à un marquage des aquifères sus ou sous-jacents de la couche d'argile hôte.

Le choix de l'implantation dans une formation argileuse de faible perméabilité permet de limiter la circulation de l'eau au sein du stockage. Toutefois ce choix expose au risque d'un marquage d'un aquifère situé à proximité du stockage, sus ou sous-jacent, par des radionucléides à période longue qui n'auraient pas suffisamment décru avant d'avoir atteint l'aquifère (^{36}Cl , ^{14}C).

L'analyse de sûreté s'attachera à s'assurer que le niveau de marquage n'est pas de nature à conduire à une stérilisation de la ressource en eau potentielle. *A contrario*, il n'est pas retenu à ce stade d'exclure toute possibilité de marquage des aquifères, ou de le considérer comme un objectif de dimensionnement d'une installation de stockage à faible profondeur.

2.2.3 Une réflexion à engager sur les phases de vie du stockage : aborder la durée de fonctionnement comme un outil pour en appréhender les limites phénoménologiques sur les grandes échelles de temps

Traduite en analyse fonctionnelle, la sensibilité d'un stockage à faible profondeur aux évolutions géomorphologiques peut conduire à définir deux phases de vie pour le stockage. La première phase, jusqu'à quelques dizaines de milliers d'année, se caractérise par une évolution lente et limitée qui n'induit pas de modification majeure dans la configuration du stockage. La deuxième phase, pendant et au-delà du prochain épisode glaciaire, peut se traduire par une évolution plus rapide du site de stockage liée aux évolutions climatiques et à l'aléa érosif, par exemple la formation d'un pergélisol, voire une érosion totale de la couverture argileuse (reconstituée ou naturelle) pouvant conduire à une mise à nu des déchets.

La durée de fonctionnement possible ou phénoménologiquement justifiable d'un stockage à faible profondeur peut ainsi être estimée en fonction de l'évolution climatique et de la profondeur d'implantation, à quelques dizaines de milliers d'années au plus. Cette durée peut se trouver minorée en fonction du choix d'implantation du stockage, des choix de conception effectués et notamment par la profondeur d'implantation retenue.

Les études de sûreté d'un stockage de déchets FA-VL à faible profondeur doivent donc traiter, pour les deux phases de vie du stockage, de la maîtrise de l'impact sur l'homme et l'environnement. Les questions de sûreté que cela soulève sont différentes selon les deux phases de vie :

- Pour la première phase de vie, quelle serait la durée nécessaire et suffisante de maintien des fonctions de sûreté après fermeture en vue de garantir le respect de la protection des intérêts ?
- Pour la seconde phase de vie, quelle serait la nature des évaluations d'impact qui sont à mener aux grandes échelles de temps et en lien, comment le système de stockage peut-il alors être représenté ?

La durée de fonctionnement du stockage peut ainsi être évaluée au regard de la décroissance de la radio-toxicité des déchets stockés et de leur comportement dans le système de stockage, en se fondant sur l'exigence que l'activité encore présente ne doit pas conduire à des impacts inacceptables vis-à-vis de l'homme et de l'environnement.

Au-delà de quelques dizaines de milliers d'années (correspondant à la deuxième phase de vie du stockage), il reste nécessaire de s'assurer que l'impact résiduel est acceptable. Ceci passe par des choix de sûreté pour la représentation du stockage et de son environnement afin d'être à même d'évaluer l'impact sur les intérêts à protéger. Un choix de sûreté pénalisant qui retiendrait une dégradation brutale des propriétés de confinement du système de stockage est cependant à écarter car cela conduirait à afficher artificiellement un relâchement accéléré des radionucléides et les impacts ainsi calculés risqueraient d'être très importants sans pour autant être réalistes. Une notion « d'absence d'effet falaise » adaptée à cette phase difficile à caractériser pendant laquelle les propriétés du système de stockage se dégradent progressivement pourrait être introduite. Le travail sur ce sujet reste à réaliser pour, d'une part, approcher au mieux la connaissance de l'évolution de ces propriétés et d'autre part, définir, de manière conservatrice, la représentation conventionnelle et adaptée du système de stockage support aux évaluations d'impact.

Une fois développées ces considérations intrinsèques à un stockage à faible profondeur, il est nécessaire de se pencher sur leur compatibilité avec les caractéristiques des déchets considérés.

2.3 Cerner les enjeux de protection intrinsèques aux différentes catégories de déchets FA-VL, pour déterminer le service que peut rendre un stockage à faible profondeur en matière de protection

Aux fins de cette analyse, sont considérés dans le périmètre des déchets dit FA-VL dont le stockage à faible profondeur peut être envisagé, les déchets déjà envisagés dans la cadre du rapport d'étape 2015 ainsi que ceux ajoutés dans le périmètre FA-VL dans le PNGMDR 2016-2018. L'annexe 1 en présente une description plus détaillée.

2.3.1 Peut-on corrélérer durée de confinement apportée par le stockage et décroissance de la radioactivité ?

La note d'orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue publiée par l'ASN en 2008 met en avant l'enjeu de confiner les déchets FA-VL efficacement pendant une durée de quelques dizaines de milliers d'années, au terme de laquelle l'activité contenue dans les déchets devrait avoir atteint un niveau résiduel tel que les expositions ne soient pas inacceptables même en cas de perte significative des propriétés de confinement [15]. Pour autant, l'examen de l'ensemble du périmètre des déchets ayant été considérés comme pouvant être éligibles à un stockage à faible profondeur au cours du temps montre que selon leur typologie, leur activité évolue de manière différente, ce qui questionne le niveau et la durée de l'isolement qu'un stockage à faible profondeur peut leur apporter.

En effet, les déchets radifères présentent une décroissance sur une première période de l'ordre de 10 000 ans (liée à la présence du radium 226) puis leur activité reste ensuite stable, les niveaux d'activité résiduels étant liés à la présence de radionucléides à vie très longue (uranium 238 pour les déchets radifères de Framatome - usine de Jarrie - et thorium 232 pour les « résidus solides banalisés » (RSB) de Solvay et les déchets qui seront issus de la valorisation des hydroxydes bruts de thorium (HBTh).

L'activité des déchets uranifères qui seront produits par l'installation de Malvési augmente pour atteindre un pic vers 10 000 ans puis diminuer légèrement avant stabilisation (du fait des produits de filiation de l'uranium 238 notamment le radium 226 et de leur décroissance avant d'atteindre l'équilibre séculaire).

Les déchets de graphite présentent quant à eux une première décroissance sur une période de 1 000 ans marquée pour les chemises (du fait de la présence du nickel 63) puis une deuxième décroissance autour de 50 000 ans plus visible pour les empilements (liée à la présence du carbone 14). La courbe ne présente pas de palier et continue de décroître sur plusieurs centaines de milliers d'années. De même les déchets technologiques FA-VL (CBF-C'2) présentent une décroissance particulièrement marquée dans les premières dizaines de milliers d'années, de trois à quatre ordres de grandeurs,

Enfin, les enrobés bitumineux présentent une première inflexion de la courbe de décroissance autour de 300 ans, du fait des radionucléides à vie courte (césium 237 et strontium 90). Une deuxième inflexion autour de 100 000 ans est due à la décroissance du plutonium 239.

D'autres déchets (comme les NORM) restent stables sur plusieurs centaines de milliers d'années.

De telles différences d'évolution dans le temps interrogent sur la pertinence d'une solution de stockage commune, sur les objectifs de protection à lui attribuer et les échelles de temps associés :

- L'activité des déchets uranifères et thorifères reste quasiment constante sur une très longue durée, ce qui ne permet pas d'exploiter la décroissance radioactive pour définir une solution de gestion. Leur dangerosité étant constante, la question se pose de la cohérence dans le choix du « niveau de protection démontrable » dès les premiers siècles de stockage et à très long terme ;
- L'activité résiduelle des enrobés bitumineux au bout d'un million d'années est du même ordre de grandeur que l'activité initiale de certains déchets radifères (résidus radifères de Solvay [RRA], résidus du CEA entreposés sur le site d'Itteville) ;
- Les déchets de graphite décroissent de manière continue sur la longue durée. Si le niveau de protection recherchée devait être lié à un certain seuil d'activité pouvant être qualifié de « résiduel », ce dernier reste à définir.

Il est à noter que la coupure radiologique entre enrobés bitumineux FA-VL et MA-VL résulte de l'histoire ; il s'agit de déchets aux mêmes caractéristiques, présentant un continuum³ en termes d'activité, celle-ci restant faible au regard des autres déchets MA-VL.

Il est par ailleurs à noter que les matières thorifères, l'uranium appauvri et l'uranium de retraitement présentent un niveau d'activité massique situé entre les déchets uranifères/thorifères et les graphites (quelques milliers à dizaines de milliers de Bq/g), quasiment constant sur la très longue durée.

Ainsi, les différents profils de décroissance présentés par les déchets identifiés dans la catégorie FA-VL montrent que si pour certains il peut être pertinent de chercher à les isoler de la surface sur le temps d'une certaine décroissance, pour d'autres cette approche ne peut être retenue et il convient plutôt de s'interroger sur le service rendu par un stockage à faible profondeur qui permet de retarder pendant un certain temps la remise en surface, mais sans que ce retard puisse être corrélé à une décroissance des déchets. La question devrait alors se poser sous l'angle de l'acceptabilité d'une dangerosité résiduelle à l'échéance considérée.

³ Ce continuum d'activité, que l'on retrouve pour d'autres déchets tels que les déchets technologiques, a été souligné par Orano dans le cadre du PNGMDR dès 2011.

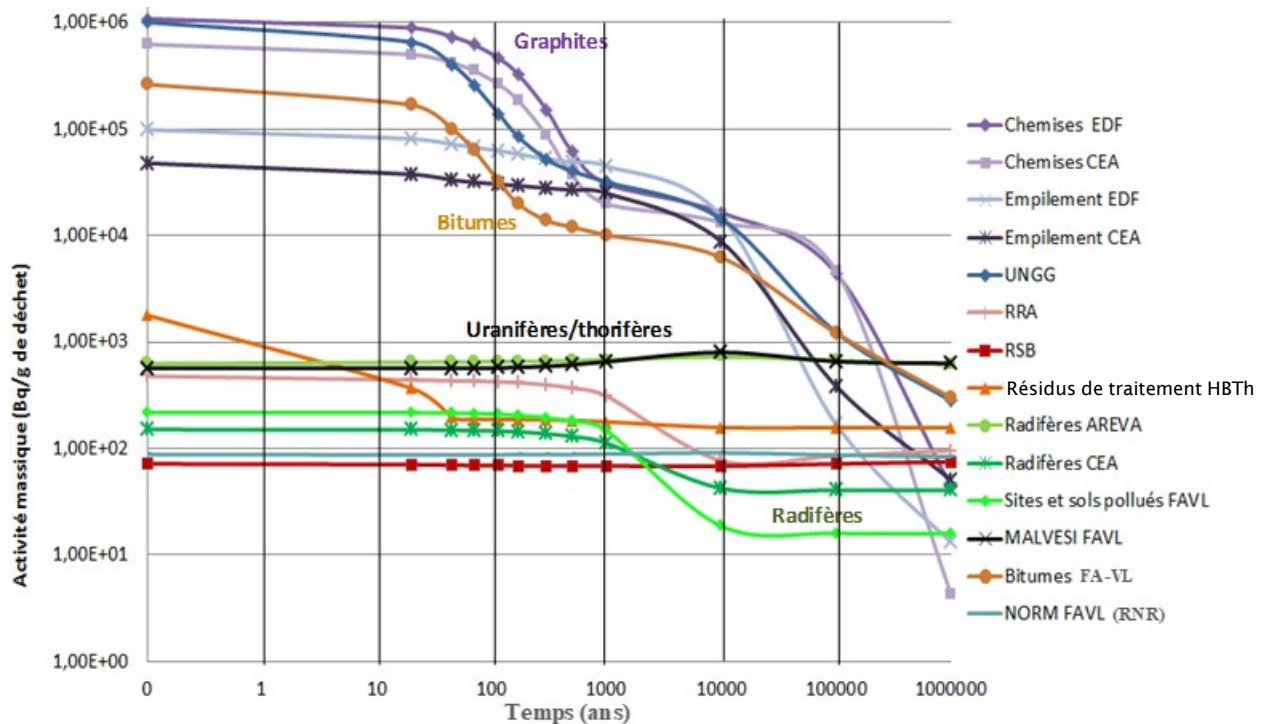


Figure 1 : Courbes de décroissance de l'activité massique de divers déchets FA-VL

2.3.2 En complément de la durée de décroissance, d'autres caractéristiques différentes selon les déchets doivent être prises en compte pour la définition de leur mode de gestion

La nocivité des déchets et les enjeux de sûreté liés à leur stockage ne peuvent pas s'apprécier qu'en rapport à la seule durée de vie, mais doivent aussi considérer les niveaux d'activité comme les caractéristiques physico-chimiques. Ces dernières nécessitent des dispositions particulières selon les différents types de déchets, qui sont précisées ci-dessous pour les déchets qui ont d'ores et déjà été considérés⁴. Les divers radionucléides contenus dans les déchets se distinguent par leur toxicité, radiologique et parfois non radiologique (cas de l'uranium et du thorium notamment), ainsi que par leur mobilité (allant de la mobilité extrêmement faible du thorium à celle élevée du chlore ou de l'iode). Ces différences en matière de toxicité et de mobilité peuvent justifier des besoins spécifiques en isolement et en confinement (voir *infra*), même pour des niveaux d'activité comparables.

2.3.2.1 Déchets radifères

En stockage, les déchets radifères posent les questions des conditions chimiques imposées par le déchet au regard des transferts par l'eau, de la gestion du radon en exploitation et à long terme (vis-à-vis des scénarios d'intrusion humaine involontaire) et par conséquent de celle de ses précurseurs (radium 226, thorium 230 et uranium 238).

Vis-à-vis des transferts par l'eau, l'état de connaissance actuel permet d'avoir une bonne confiance dans la maîtrise des performances du stockage des déchets radifères⁵ à faible profondeur dans le milieu argileux du site investigué dans l'Aube. Néanmoins les espèces chimiques en présence dans les déchets radifères, tels que les nitrates, les sulfates et l'ammonium peuvent modifier le niveau de rétention de l'uranium et du radium en champ proche et dans les argiles.

⁴ D'autres déchets pourraient devoir être examinés à l'avenir, tels que certains déchets faiblement irradiants du CEA.

⁵ Les niveaux de sorption considérés dans les Argiles tégulines pour le radium, l'uranium et le thorium sont issus de mesures de Kd sur échantillons prélevés sur le site. L'uranium présente un retard significatif dans les matériaux cimentaires (état de connaissance conforté par des travaux internationaux). Le terme source de l'uranium des déchets radifères est contrôlé par sa solubilité au sein des matériaux cimentaires.

On notera qu'une action envisageable, si besoin, pour gérer les éventuels effets des nitrates d'ammonium présents dans les RRA est le traitement de ces derniers par lessivage avant leur mise en stockage. Les effets bénéfiques d'un tel traitement sont à mettre au regard du coût généré par celui-ci et de l'impact environnemental global.

2.3.2.2 Déchets de graphite

Pour le stockage des déchets de graphite (hors déchets UNGG de la Hague qui représentent une faible quantité), le premier enjeu est lié au chlore 36 et au carbone 14 organique.

La maîtrise du caractère limité du transfert par voie de l'eau, du carbone 14 organique repose sur la maîtrise de son inventaire, d'un taux de relâchement très faible (de maximum 10^{-5} /an) et d'une capacité de rétention dans les matériaux cimentaires et dans les argiles. Selon les études de R&D en cours, de faibles taux de relâchement ont déjà été mesurés et qualitativement la rétention du carbone 14 organique est jugée comme très probable, même si elle varie suivant la nature des molécules porteuses.

La maîtrise du transfert du chlore 36 repose notamment sur celle de son inventaire et dans une moindre mesure sur celle d'une capacité de rétention même faible dans les matériaux cimentaires. Les connaissances déjà disponibles concernant la capacité de rétention du chlore 36 par les matériaux cimentaires permettent d'asseoir une bonne confiance dans cette propriété. Une consolidation de l'inventaire radiologique est en cours.

2.3.2.3 Enrobés bitumineux

Les fûts d'enrobés bitumineux posent les questions suivantes :

- En exploitation : le risque incendie. La gestion de ce risque dépend de l'option de réalisation retenue pour leur stockage (à ciel ouvert ou en souterrain, voir le chapitre 3) ;
- Après fermeture : le gonflement de l'enrobé (principalement produit par reprise d'eau des sels), les conditions chimiques imposées par le déchet, le transfert du technétium 99 et de l'iode 129 par l'eau, l'impact des émetteurs alpha (plutonium 239, plutonium 240, américium 241) en cas d'intrusion humaine involontaire.

La dégradation des enrobés bitumineux au contact de l'eau liquide après fermeture conduit à un relâchement d'espèces organiques et de sels (nitrates et sulfates) en solution. Ces espèces peuvent influencer les propriétés de rétention des radionucléides et toxiques chimiques dans les matériaux cimentaires et dans les argiles, en particulier ceux sensibles aux conditions redox comme le technétium, le niobium et l'uranium. Le niveau de cette influence est à préciser.

L'arrivée d'eau liquide au contact des sels contenus dans les enrobés bitumineux entraîne un gonflement de l'enrobé par reprise d'eau. Libre dans un premier temps, le gonflement deviendrait éventuellement contraint lorsque les vides dans les fûts puis dans les alvéoles seront comblés conduisant à la génération de contraintes mécaniques dans le stockage susceptible d'engendrer des désordres mécaniques dans la couverture et de dégrader ses propriétés de confinement et son intégrité. Ce phénomène dépend de la quantité de sels solubles contenus dans les déchets bitumés.

Les études actuelles menées dans le cadre du projet Cigéo sur les enrobés bitumineux par les producteurs de déchets en lien avec l'Andra, portent sur la quantification du potentiel de gonflement, de la pression de gonflement maximale, et de la décroissance de la pression de gonflement en fonction du gonflement. La transposition de ces résultats au colis CBFK-B dans lequel les fûts d'enrobés seraient reconditionnés serait à analyser dans le cadre du stockage à faible profondeur, notamment en regard des exigences sur les vides dans le stockage.

Les radionucléides les plus dimensionnant en termes de transfert par l'eau sont l'iode 129 de par son caractère mobile et sa vie longue et le technétium 99 dans les milieux argileux de par la sensibilité de son comportement en solution aux conditions redox.

2.3.2.4 Colis CBF-C'2 FA-VL

Les colis CBF-C'2 sont dimensionnants en exploitation au regard de leur débit de dose élevé et de leur contenu en émetteurs alpha (plutonium 239, plutonium 240, américium 241), justifiant des études spécifiques. Après fermeture, leur impact renverrait essentiellement aux scénarios d'intrusion humaine involontaire de par leur contenu en émetteurs alpha.

2.3.2.5 Déchets non TFA à produire de Malvési

Pour les déchets non TFA à produire de Malvési, l'activité massique moyenne en thorium 230 est neuf fois supérieure à la moyenne de l'ensemble des déchets radifères. L'activité massique moyenne en uranium 238 est supérieure d'un facteur huit par rapport à la moyenne des déchets radifères.

2.4 **La déclinaison des enjeux de sûreté spécifiques à la faible profondeur comme aux déchets FA-VL en fonctions et exigences de sûreté**

Une fois défini ce qui caractérise un concept de stockage à faible profondeur d'une part, et analysé les enjeux particuliers liés aux déchets considérés d'autre part, il est possible de se pencher de manière plus précise sur les fonctions et exigences de sûreté liées à un tel stockage. Ainsi, l'identification des enjeux ci-dessus se décline dans la détermination des fonctions de sûreté attendues d'un stockage. Cette section présente comment ces grandes fonctions peuvent être définies et déclinées de manière opérationnelle pour un concept de stockage à faible profondeur dans une couche d'argile à forte capacité de confinement. Il s'appuie pour cela sur les études réalisées dans le cadre du rapport d'étape 2015, et permet d'identifier les implications de cette déclinaison sur les performances attendues du site considéré et des dispositions de conception qui pourraient être envisagées.

2.4.1 **Les fonctions de sûreté qui guident la conception selon les échelles de temps**

La déclinaison présentée ci-dessous est basée au premier rang sur les orientations générales de sûreté de l'ASN.

L'objectif de protection de l'homme et de l'environnement après fermeture se décline ainsi en (i) confiner les radionucléides et toxiques chimiques (ceux susceptibles de migrer sous forme de solutés et ceux susceptibles d'être exhalés sous forme gazeuse) et (ii) isoler les déchets de l'homme et de la biosphère eu égard aux phénomènes d'érosion climatiques et aux activités humaines banales.

Dans l'approche actuelle, les dispositifs mis en œuvre pour assurer ces fonctions doivent le faire de manière passive, c'est-à-dire sans nécessiter d'action humaine au-delà de la période de surveillance supposée durer quelques siècles au plus après la fermeture du stockage.

Les études de conception déclinent l'analyse fonctionnelle et le rôle de chacun des composants dans la réalisation des différentes fonctions. L'analyse et la démonstration de sûreté permettent par la suite de vérifier le respect des critères de protection et le cas échéant d'identifier les dispositions à mettre en œuvre pour les respecter, en tenant compte des natures diverses des déchets FA-VL.

L'analyse fonctionnelle présentée ci-dessous peut servir de base à la définition d'exigences tant que les évolutions géomorphologiques sont globalement maîtrisées. Néanmoins, celles-ci augmentent avec la durée pour un site à faible profondeur. Aux grandes échelles de temps, la capacité à justifier l'atteinte des fonctions de sûreté diminue avec l'accroissement des incertitudes, ce qui nécessitera de s'interroger sur la nature des exigences à définir dès la conception pour assurer la protection de l'homme et de l'environnement sur le long terme.

2.4.1 Confiner les radionucléides et toxiques chimiques

2.4.1.1 Confiner les radionucléides et toxiques chimiques susceptibles de migrer sous forme de solutés

La fonction « *confiner les radionucléides et toxiques chimiques susceptibles de migrer sous forme de solutés* » est associée aux flux d'eau qui traversent le stockage (régime hydraulique), à la cinétique de relâchement des éléments par les déchets (terme source) et des mécanismes d'interaction qui ralentissent le déplacement des radionucléides (solubilité et capacité de rétention).

L'Andra décline l'objectif de confinement par les fonctions de sûreté suivantes :

- (i) Limiter la circulation de l'eau ;
- (ii) Limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques au plus près des déchets (empêcher leur mise en solution, favoriser leur précipitation et/ou favoriser des formes chimiques peu mobiles des solutés) ;
- (iii) Retarder et atténuer la migration des substances radioactives et toxiques relâchés hors des alvéoles de stockage.

L'implantation du stockage dans une formation argileuse de faible perméabilité avec un gradient hydraulique faible et descendant, l'introduction de matériaux adaptés dans le stockage et la bonne connaissance des déchets et de leur comportement en conditions de stockage favorisent la réalisation de ces fonctions.

Limiter la circulation de l'eau

L'implantation du stockage dans une couche d'argile de faible perméabilité et de faible gradient hydraulique permet de limiter la circulation de l'eau. Cela favorise la mise en place d'équilibres chimiques et contribue à la maîtrise des transports (migration) de solutés. La nature des formations superficielles, la perméabilité de l'argile hôte, le contraste de perméabilité entre l'argile hôte et la couverture (en place ou reconstituée) et l'état de la nappe sous-jacente déterminent l'intensité et le sens des écoulements d'eau verticaux. La topographie influence les écoulements d'eau horizontaux.

Limiter le relâchement des radionucléides et des toxiques chimiques

La limitation du débit d'eau atteignant les déchets induit une mise en équilibre des conditions aqueuses au sein du stockage avec ses composants (déchets et matériaux mis en œuvre pour réaliser le stockage).

Le niveau de stabilité chimique des déchets définit pour sa part la fraction hydrosoluble des éléments radioactifs pouvant migrer sous eau en fonction du temps et des conditions physico-chimiques régnant dans le stockage. Cette fraction correspond au terme source des déchets.

Les matériaux du stockage peuvent également contribuer à limiter le relâchement des éléments radioactifs par des processus d'immobilisation dans le stockage par précipitation et sorption après qu'ils aient été relâchés des déchets. Le comportement des déchets en conditions de stockage est ainsi lié aux caractéristiques des matériaux dans les ouvrages de stockage.

Pour les déchets radifères, les radioéléments contenus restent de manière générale peu solubles. En effet, les différents composés d'insolubilisation (barytine, phosphates...) présentent une grande stabilité chimique sur une large gamme de conditions physico-chimiques. Pour les déchets dans lesquels le radium initial ne ferait pas l'objet d'un traitement d'insolubilisation, l'utilisation de matériaux cimentaires dans le stockage peut contribuer à piéger le radium au plus près des déchets. Le thorium contenu dans les déchets radifères est un élément peu sensible aux conditions d'environnement, tant d'un point de vue acido-basique que redox. Sa mobilité est extrêmement limitée, avec une faible solubilité et une forte sorption tant sur les matériaux argileux que cimentaires.

Pour les déchets de graphite, les principales contraintes identifiées à ce jour sont liées à leurs activités en ^{36}Cl et ^{14}C organique. La limitation du relâchement dépend de la cinétique de relâchement par le graphite et des possibilités de rétention de ces radionucléides par les matériaux cimentaires introduits dans le stockage (colis et alvéoles). Il est à noter qu'au stade actuel des connaissances, l'Andra a considéré dans ses évaluations un terme source du ^{36}Cl sous eau entièrement labile⁶. Par ailleurs, il a été établi que les matériaux cimentaires présentent des capacités de retard du ^{36}Cl . Quant au ^{14}C , le relâchement et les performances associées à la part organique restent à consolider. La spéciation carbone organique/carbone inorganique doit également être consolidée. Le ^{14}C inorganique peut être piégé en grande partie grâce aux mécanismes de rétention au sein des matériaux cimentaires introduits dans le stockage. Concernant le ^{14}C organique, l'état actuel des connaissances a conduit à le considérer, de manière conservatrice, comme mobile.

Pour les déchets bitumés, il est à noter que les conditions de stockage ne permettent pas de s'appuyer pleinement sur le modèle de relâchement de type COLONBO développé par le CEA. Il a donc aussi été considéré, de manière conservatrice, un relâchement de type labile dans les évaluations d'impact à long terme.

Retarder et atténuer la migration des radionucléides et des toxiques chimiques par voie aqueuse

La migration de la fraction de radionucléides relâchés dans l'eau est retardée et atténuée dans la garde d'argile hôte et la couverture par les épaisseurs de couverture et de formation associées à leurs propriétés hydro-dispersives et de rétention chimique.

La période radioactive du ^{14}C , son inventaire et sa cinétique de relâchement par le graphite ainsi que la limitation de la migration de sa forme inorganique par les matériaux cimentaires doivent permettre de bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère. Pour le ^{226}Ra présent dans les déchets radifères, sa période radioactive et la limitation de sa migration par l'argile permettent également de bénéficier de sa décroissance radioactive avant qu'il n'atteigne la biosphère. L'environnement redox peut avoir une forte influence sur la rétention de certains radionucléides (par exemple ^{99}Tc).

La profondeur d'implantation du stockage intervient dans les performances de cette fonction de trois manières différentes :

- L'épaisseur de la garde supérieure a une influence sur les temps de transfert par diffusion jusqu'à la surface. Cette épaisseur est réduite au cours du temps du fait de l'érosion ;
- La profondeur d'implantation conditionne l'épaisseur de la garde inférieure qui a une influence directe sur les niveaux et les temps de transfert par convection des radionucléides ;
- La profondeur d'implantation a une influence sur l'environnement chimique du stockage, la capacité de resaturation, les conditions redox ...

L'ensemble de ces éléments devraient permettre de définir une épaisseur de garde supérieure minimale à maintenir sur la durée de confinement du stockage afin de garantir la satisfaction de cette fonction de sûreté.

Il est à noter que les situations d'intrusion peuvent perturber la garde supérieure du stockage. Pour un site de topographie plane, et en se projetant sur les quelques siècles à venir, des travaux de génie civil de type « chantier routier » pourraient remanier une grande quantité de terrain et de ce fait dégrader les propriétés de la garde supérieure du stockage. Une telle situation serait de nature à remettre en cause le fonctionnement hydraulique du stockage et donc sa capacité à confiner.

⁶ Soit un taux de relâchement de 1 an^{-1}

2.4.1.2 Limiter l'exhalaison de gaz radioactif à la surface du sol

L'objectif de confinement s'applique aussi aux radionucléides susceptibles de migrer sous forme gazeuse, particulièrement le radon exhalé par les déchets radifères.

La limitation de l'exhalaison de gaz radioactif à la surface repose d'une part sur la maîtrise du dégazage par les déchets et d'autre part sur le confinement des gaz par les composants ouvragés et le milieu géologique, permettant de bénéficier de leur décroissance avant l'atteinte de l'environnement. Cela se décline au travers du choix des matériaux et couches géologiques au-dessus du stockage et des caractéristiques qui y sont associées (épaisseur de couche, perméabilité au gaz ...).

Un stockage dans une formation argileuse saturée permet de retarder la diffusion des radionucléides gazeux et ainsi de bénéficier de leur décroissance. Le fait d'avoir une épaisseur de couverture saturée permet également de supprimer l'éventualité d'une voie de transfert par gaz.

La capacité de la couverture (en place ou reconstituée) à confiner les gaz radioactifs se fonde donc notamment sur son épaisseur, sa perméabilité au gaz et son taux d'humidité.

La profondeur d'implantation intervient dans les performances de cette fonction en :

- Assurant une épaisseur de garde supérieure suffisante pour permettre la décroissance des gaz radioactifs avant leur transfert par diffusion jusqu'à la surface ;
- Permettant de favoriser la saturation de la garde supérieure afin d'éviter la création de voie gaz.

Ces éléments devraient ainsi permettre de déterminer une épaisseur de garde supérieure minimale nécessaire à la satisfaction de la fonction « limiter l'exhalaison de gaz radioactif à la surface du sol ». Une intrusion humaine dans le stockage conduisant à une dégradation importante des propriétés de transfert de la garde supérieure pourrait remettre en cause la bonne réalisation de cette fonction.

Dans le cas des déchets radifères, cela concerne la migration du radon (particulièrement le ^{222}Rn de période d'environ 3,8 jours issu du ^{226}Ra). Limiter l'exhalaison de ^{222}Rn est également favorisé par la limitation du transfert de son ascendant direct, le ^{226}Ra .

Pour les déchets de graphite, cette fonction concerne le tritium et la fraction éventuelle du ^{14}C relâché sous forme gazeuse.

2.4.2 Isoler les déchets de l'homme et de la biosphère

Pour « isoler les déchets de l'homme et de la biosphère compte tenu des phénomènes d'érosion et des activités humaines banales », deux facteurs interviennent sur la durée d'isolement : (i) le choix de la zone et du site d'implantation (notamment vis-à-vis de la vérification de l'absence de ressources exceptionnelles) et (ii) la profondeur du stockage selon les possibilités offertes par la géologie du site.

L'isolement sur une profondeur de quelques dizaines de mètres ne pourra être démontré qu'à l'échelle de la dizaine de milliers d'années, jusqu'à quelques dizaines de milliers d'années en restant conscient des incertitudes croissantes avec le temps sur l'évolution des conditions climatiques et les mécanismes d'érosion qui en seraient la conséquence.

Vis-à-vis des activités humaines banales, dans le contexte d'un stockage à faible profondeur dans une couche d'argile affleurante, de topographie relativement plane, l'Andra a considéré différentes activités permettant d'illustrer l'ensemble des situations de ce type présentées dans les orientations générales de l'ASN. En se fondant sur l'hypothèse que la mémoire de l'existence du stockage a été perdue, les scénarios d'intrusions retenus sont : (i) les forages géotechniques et les chantiers routiers qui seraient réalisés au préalable à la construction d'une résidence sur le site de stockage et (ii) l'implantation d'une résidence sur le sol contaminé par les déchets du stockage. Il a été retenu dans les études des forages géotechniques d'une profondeur classique de l'ordre de 30 à 40 mètres, et des chantiers routiers d'une profondeur pouvant varier de quelques mètres à plus de 20 mètres en fonction de la topographie⁷.

⁷ Classiquement, sur un sol à topographie plane, une profondeur de l'ordre de la dizaine de mètres peut être envisagée.

Pour autant, il convient de noter le caractère conventionnel des choix de scénarios effectués, tant dans leur typologie que dans ce qu'ils supposent de permanence au cours du temps des activités humaines.

Cette protection face aux intrusions humaines s'entend toutefois à un instant t, il convient en effet, aussi de considérer les mécanismes d'érosion au cours du temps pour s'assurer que la profondeur d'implantation permet bien de protéger le stockage contre les intrusions tout au long de sa durée de confinement. L'érosion réduirait progressivement l'épaisseur de couverture du stockage pouvant aller jusqu'à la mise à nu des déchets puis disperser ces derniers. Il en résulterait à long terme la présence en surface d'une activité résiduelle en fonction des déchets stockés.

Ainsi, dans un contexte de site donné, le choix d'une profondeur d'implantation supérieure ou égale à la profondeur cible déclinant la fonction « isoler » peut s'avérer difficile. Avec une démarche de recherche du meilleur compromis de profondeur d'implantation (satisfaisant au mieux l'ensemble des fonctions de sûreté), une situation d'intrusion humaine reste envisageable. Il convient alors de s'interroger sur le rôle que ces scénarios d'intrusion doivent jouer dans le dimensionnement au regard de leur caractère conventionnel.

2.4.3 Les limites de l'approche : le débat sur la profondeur ne doit pas obérer l'identification des objectifs de protection à long terme

L'identification des enjeux spécifiques de sûreté liés à un concept de stockage à faible profondeur, et sa déclinaison en fonctions de sûreté jusqu'aux différents composants du stockage montrent le rôle central que joue la profondeur dans la réalisation des dites fonctions de sûreté. Néanmoins, ce paramètre ne peut être considéré dans l'absolu, mais doit être relié aux autres caractéristiques du site et des déchets, comme les propriétés de rétention de la couche géologique considérée et des composants ouvragés du stockage, la nature et l'orientation des gradients hydrauliques, la nature et le fonctionnement des exutoires.

Ce constat amène dans la démarche à deux conséquences.

Il s'agit tout d'abord, comme introduit plus haut, de s'interroger sur la démarche de sûreté à adopter pour considérer la phase temporelle où les évolutions géomorphologiques croissent, et où les fonctions de sûreté précédemment définies du stockage sont plus difficiles à démontrer. En particulier, le caractère par principe « optimisé » d'un stockage à faible profondeur amène à chercher un équilibre entre les différentes fonctions de sûreté. Il est donc auparavant nécessaire d'identifier les sous-jacents de l'approche retenue en matière de hiérarchie entre les différentes fonctions. Ainsi, par similarité avec les approches existantes sur le stockage géologique profond, il a été plutôt considéré que le confinement était à privilégier au maximum, ce qui expose à un relâchement de radionucléides potentiellement plus important à l'issue de la durée de fonctionnement. Ce constat pourrait amener à introduire des exigences en matière de limitation de l'activité radiologique totale introduite dans le stockage, accompagnée le cas échéant de règles de répartition de cette activité dans le volume total de stockage. De telles exigences pourraient emporter un caractère contraignant dès aujourd'hui, dans un objectif de très long terme (la dizaine de milliers d'année), tout en minimisant le service rendu et la protection apportée aux générations qui nous suivent immédiatement. Sous un autre angle, une approche cherchant à identifier un exutoire maîtrisé, comme c'est le cas du CSA, pourrait être explorée, ce qui amènerait à une hiérarchie différente des fonctions de sûreté, et à des conséquences peut-être différentes en matière de concept.

Par conséquent, une formalisation des objectifs de protection à assurer dans le cadre d'un concept de stockage à faible profondeur est un préalable indispensable à la conduite d'études de conception plus détaillées ou à la définition d'une méthodologie de recherche d'un deuxième site.

Dans un deuxième temps, et ce sera l'objet du chapitre 3, il sera nécessaire de confronter ce que l'analyse de sûreté peut dire de la faible profondeur avec une approche des meilleures techniques disponibles en matière de mise en œuvre, pour en affiner la définition.

2.5 Quels niveaux de protection attendus sur les grandes échelles de temps ?

2.5.1 Décliner les objectifs de protection radiologique selon les échelles de temps : formaliser la valeur accordée aux générations futures

L'approche classique en matière de sûreté après-fermeture, vis-à-vis des stockages de déchets radioactifs, consiste à définir un niveau de protection commun à chacune des installations existantes et à venir. Ce niveau de protection est avant tout défini en termes radiologiques, qui est la nuisance que les stockages de déchets radioactifs visent à limiter. Dans un souci de protection des générations futures, ces objectifs de protection sont par ailleurs a priori définis de manière constante pour toute la durée de la phase après fermeture, sans limite de durée. Enfin, ces générations futures sont considérées comme un objet uniforme, sans distinction entre celles qui nous suivent et les plus lointaines⁸.

Néanmoins, l'analyse des présupposés d'un concept de stockage à faible profondeur a montré que celui-ci reposait sur une durée de fonctionnement pendant laquelle les fonctions de sûreté pouvaient être assurées, mais qui était de fait limitée dans le temps par le comportement phénoménologique d'un système à faible profondeur. Ainsi, construire une démarche de sûreté proportionnée aux déchets de type FA-VL et à un tel concept nécessite dans un premier temps de dépasser l'interrogation sur le caractère atteignable de la durée de fonctionnement envisagée pour engager le débat sur son caractère souhaitable : pendant combien de temps est-il souhaitable de protéger les générations futures du caractère radioactif des déchets FA-VL, et, en conséquence, quel degré d'effort faut-il faire porter aux générations actuelles pour protéger les dites générations futures ? En d'autres termes, il s'agit d'associer un objectif de protection avec une durée de protection souhaitée.

Une première approche pour décliner les objectifs de protection radiologique associés en fonction des échelles de temps du stockage pourrait consister à s'appuyer sur la durée de fonctionnement comme durée pivot, comme développé ci-dessous.

Sur la durée de fonctionnement du stockage, l'objectif de protection radiologique serait par homogénéité avec les pratiques actuelles de rester inférieur à 0,25 mSv/an en scénario d'évolution normale et de ne pas dépasser le niveau de la radioactivité naturelle (soit de l'ordre de quelques mSv/an à 10 mSv/an au maximum) dans le cadre d'un scénario d'évolution altérée. Dans le cas spécifique des scénarios d'intrusion humaine les objectifs de protection pourraient se fonder sur les standards de l'AIEA, qui reprennent notamment les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), en particulier la CIPR 103 de 2007, et considérer qu'un impact inférieur à 20 mSv/an est acceptable sous réserve de montrer que tous les efforts raisonnables ont été mis en œuvre pour réduire la probabilité d'occurrence et limiter les conséquences du scénario.

Au-delà de la période de fonctionnement du stockage, soit au-delà de quelques dizaines de milliers d'années au plus, compte tenu des fortes incertitudes pouvant être associées à l'évolution géodynamique du site (notamment l'aléa érosif), des évaluations d'impacts pourraient être réalisées pour apprécier l'ordre de grandeur de l'impact sur les intérêts protégés sur cette période à très long terme. Les résultats quantitatifs associés seraient considérés acceptables si les impacts calculés sont suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes (pour mémoire, les premiers effets déterministes liés à une irradiation sont perçus à partir de la centaine de millisieverts). De telles évaluations pourraient reposer sur une représentation conventionnelle du système de stockage sur ces échelles de temps, en fonction de l'accroissement des incertitudes.

⁸ L'AIEA précise toutefois dans ses prescriptions de sûreté N° SSR-5 (2011) : « Il est admis qu'on ne peut qu'estimer les doses de rayonnements aux personnes à l'avenir et que les incertitudes associées à ces estimations augmentent avec l'éloignement dans le futur. Il faut être prudent quand on utilise ces critères pour des périodes éloignées dans le futur. À de telles échelles de temps, les incertitudes associées aux estimations de doses deviennent si grandes que les critères peuvent ne plus constituer une base raisonnable pour la prise des décisions. »

Considérer la durée de fonctionnement comme un pivot amène donc à une approche binaire des objectifs de protection fixés au stockage à faible profondeur. Un approfondissement pourrait consister en l'identification de couples objectif de protection / durée de protection plus gradués dans le temps, éventuellement déclinés par typologie de déchets, intégrant la croissance des incertitudes sur le comportement à long terme, et permettant de qualifier le niveau de service rendu attendu d'un tel stockage en fonction des échelles de temps, vis-à-vis des générations qui nous suivent immédiatement comme des plus lointaines.

2.5.2 Intégrer la protection de l'environnement dans une logique d'évaluation environnementale

2.5.2.1 Élargir l'approche de la protection de l'environnement au-delà de l'actuel critère prédominant qu'est la radiotoxicité

En matière d'environnement sur le long terme, les objectifs de protection développés à ce stade ont porté exclusivement sur la protection des ressources, en se basant sur les orientations générales de sûreté de l'ASN existantes.

Ces orientations précisent en particulier que « *Du point de vue de la gestion du sous-sol, le site devra être choisi de façon à éviter des zones dont l'intérêt connu ou soupçonné présente un caractère exceptionnel.* » Le caractère exceptionnel de la ressource est évalué à l'aune des ressources de même nature se trouvant disponibles à proximité.

Par ailleurs, les ressources ne seraient pas considérées « stérilisées » si elles demeuraient accessibles par des moyens techniques d'usage courant (accès dévié). De par sa faible profondeur et son emprise limitée, les ressources situées à une profondeur importante ne seront donc pas « stérilisées » du fait de l'implantation du stockage, la « stérilisation » ne pouvant concerner que des ressources situées à faible profondeur et de faible étendue. Vis-à-vis du cas spécifique de la ressource en eau, elle n'est pas considérée stérilisée dès lors que les objectifs de protection sont respectés pour les différents scénarios d'usage envisageables, ce qui signifie que l'absence de marquage d'aquifère n'a jusqu'à présent pas été considéré comme un objectif.

Concernant les risques associés à la présence de toxiques chimiques dans les déchets, une première approche est présentée dans le rapport d'étape 2015. Des critères de protection pour les toxiques chimiques ont été définis par analogie avec la démarche d'évaluation des risques sanitaires associés aux substances chimiques définie pour les études d'impact des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), tout en la projetant sur les échelles de temps de stockage de déchets radioactifs. A titre indicatif, l'approche développée à date met en œuvre les valeurs toxicologiques de référence (VTR), telles que décrites par le guide INERIS. Elle exprime l'impact chimique en termes (i) d'excès de risque individuel (ERI)⁹ pour les éléments à effet sans seuil et (ii) de quotient de danger (QD)¹⁰ pour les éléments à effets à seuil.

Néanmoins, l'identification d'objectifs de protection à long terme sur les toxiques chimiques pour les stockages de déchets radioactifs pose question, car cela amènerait à introduire une dissymétrie avec les stockages de déchets dangereux pour lesquels de tels objectifs de protection sur le très long terme n'existent pas¹¹. Un positionnement de principe préalable des différentes autorités en charge de ces questions semble indispensable, mais devrait être appuyé par une qualification relative de la dangerosité apportée par telle ou telle substance.

⁹ L'excès de risque individuel traduit la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu développe un effet associé à la substance pendant sa vie du fait de l'exposition considérée. L'ERI correspond au produit du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, concentration dans l'air, dose journalière d'exposition dans le cas des transferts à la biosphère) par la valeur toxicologique de référence caractéristique de l'effet considéré et de la voie d'atteinte considérée.

¹⁰ QD : Quotient de Danger. Il correspond au rapport du niveau d'exposition à la substance chimique (concentration dans l'eau, dans l'air ou dose journalière d'exposition dans le cas des transferts dans la biosphère) sur la valeur toxicologique de référence (valeur en dessous de laquelle les effets systémiques ne se manifestent pas). L'INERIS utilise la terminologie IR (Indice de Risque) à la place de la terminologie QD.

¹¹ Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux

2.5.2.2 Etendre le spectre des critères environnementaux considérés dans une approche comparative : usage de l'espace, biens communs et services écosystémiques

Au-delà de l'approche classique du secteur nucléaire qui régit la gestion des déchets radioactifs, l'Autorité environnementale appelle à considérer un ensemble de critères plus large et à appliquer des méthodologies d'évaluation environnementale stratégique. Appliquée à la question des déchets FA-VL et à un concept de stockage à faible profondeur, cette recommandation amène à identifier de nouveaux critères à prendre en compte pour juger de la pertinence d'une solution envisagée.

En première analyse, les trois typologies de critères suivants pourraient être pertinents dans le cadre considéré :

- Des critères liés à l'usage de l'espace au niveau local : biodiversité, cours d'eau, ressources locales, évolution d'usage, artificialisation des sols...
- Des critères liés aux biens communs : pollution de l'air, émission de gaz à effet de serre liées au transport en particulier, pollution de l'eau à grande échelle...
- Des critères liés aux fonctions et services écosystémiques, principalement autour de la biodiversité...

De tels critères, dans une analyse comparative entre différentes solutions, pourraient permettre de positionner la valeur ajoutée d'un concept de stockage à faible profondeur pour la gestion de tout ou partie des déchets FA-VL, en fonction du niveau de protection que l'on souhaite faire porter à un tel concept (cf. *supra*). Dans la perspective de la cohabitation éventuelle de plusieurs sites de stockage de déchets de typologie similaire, qu'il s'agisse d'un stockage FA-VL et de sites historiques, ou d'un éventuel deuxième site FA-VL, une telle analyse multicritère permettra notamment de peser les avantages et les inconvénients de la maximisation de la quantité de déchets pouvant être stockée sur un site donné, avec un impact local potentiel plus élevé dans certains scénarios, au regard de la dispersion des déchets sur plusieurs sites, assurant des niveaux de protection potentiellement différents. Cet aspect est développé *infra* à la section 4.4. Cette analyse pourrait contribuer à juger de la nature et de la pertinence des exigences en matière de limitation de l'activité radiologique totale qu'il pourrait être utile d'introduire sur un site donné.

3. Comment réaliser un stockage à faible profondeur ?

L'adéquation de la protection apportée par un projet de stockage ne s'évalue pas uniquement à l'aune de critères radiologiques et environnementaux, d'autant plus que les incertitudes sur l'appréciation de tels critères augmentent avec les grandes échelles de temps. Elle se fonde aussi sur l'adoption des meilleures techniques disponibles en tenant compte des contraintes techniques et économiques.

De par son caractère intermédiaire introduit *supra* (§ 2.2) le concept de stockage à faible profondeur ne se justifie en pratique que s'il peut être mis en œuvre avec une complexité technique et un coût significativement moindres qu'un stockage profond tel que Cigéo, tout en apportant des performances de confinement complémentaires à celles d'un stockage en surface. Cela suppose de pouvoir faire appel à des techniques constructives et d'exploitation spécifiques. La question se pose alors des profondeurs accessibles par de telles techniques et des performances obtenues en matière de confinement.

Ce chapitre se focalise sur le concept de stockage dans une formation argileuse telle que les Argiles tégulines du site investigué dans l'Aube (le contexte géologique de ce site est détaillé au chapitre 4).

Historiquement deux options de réalisation d'ouvrages de stockage à faible profondeur ont été examinées pour une implantation du stockage en milieu argileux :

- Réalisation intégralement à ciel ouvert avec reconstitution de la couverture au-dessus des déchets ;
- Réalisation en travaux souterrains.

L'Andra a analysé le retour d'expérience de l'industrie pour identifier les meilleures techniques disponibles dans ces deux options qui soient susceptibles de répondre au principe d'optimisation technique et économique. Ce travail a été confié à un groupe d'experts en génie civil. Il permet d'approcher le champ d'application de ces techniques, et ainsi d'éclairer les gammes de profondeurs que recouvrirait le concept de « faible profondeur » en milieu argileux (Figure 2).

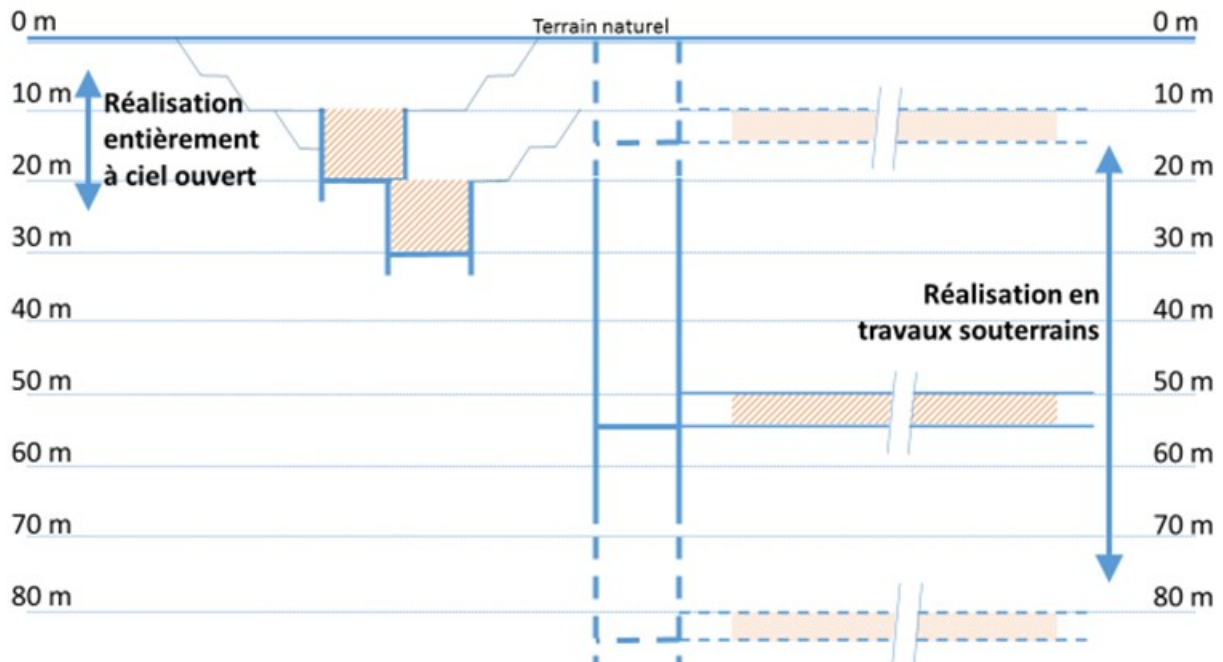


Figure 2 : Gammes de « faibles profondeurs »

3.1 Techniques de réalisation des alvéoles de stockage à ciel ouvert avec couverture remaniée

La première option de réalisation s'inspire de techniques d'ores et déjà mises en œuvre dans les installations de stockage de déchets conventionnels dangereux et au Cires. Compte tenu de la plus grande profondeur envisagée ici, elle consiste d'abord en un terrassement en grande masse de la surface jusqu'au niveau de la plateforme desservant les alvéoles de stockage. Le niveau de cette plateforme correspond au sommet des alvéoles. Les parois de la fouille sont talutées pour en assurer la stabilité mécanique. L'emprise au sol de la fouille augmente avec sa profondeur du fait de la présence des talus.

Dans un second temps les alvéoles sont creusées à partir de la plateforme. Deux variantes de creusement des alvéoles peuvent être distinguées (Figure 3) :

- Terrassement classique : la fouille est alors entièrement talutée depuis le terrain naturel jusqu'à la base des alvéoles ;
- Réalisation préalable de parois moulées puis excavation des alvéoles à l'abri de ces parois.

En évitant de taluter les alvéoles, la réalisation préalable de parois moulées permet d'augmenter le ratio entre le volume de stockage offert par chaque alvéole et l'emprise occupée sur la plateforme. Les fondations des parois moulées (aussi appelées fiches) descendent plusieurs mètres au-dessous de la base des alvéoles pour assurer la stabilité mécanique des parois tant que les alvéoles ne sont pas remplies.

Après exploitation, les alvéoles sont refermés par une couverture reconstituée à partir des argiles excavées, mises en place et compactées par couches successives jusqu'au niveau du terrain naturel.

L'utilisation de parois moulées depuis la surface n'est pas exclue. Elle éviterait complètement la présence de talus, réduirait ainsi l'emprise en surface des travaux et autoriserait une plus grande profondeur. Cependant elle impliquerait la création de discontinuités au sein de la couverture (à l'interface entre l'argile non excavée et l'argile remaniée). De telles discontinuités sont susceptibles d'affecter les performances de la couverture en matière de confinement. Une déconstruction des parois au droit de la partie confinante de la couverture pourrait aussi être étudiée, mais apparaît a priori complexe.

A l'instar du Cires, un bâtiment abri provisoire de protection vis-à-vis des intempéries est envisagé. Ce bâtiment abri a notamment pour fonction d'éviter l'arrivée d'eau pluviale au fond des alvéoles, pendant leur excavation puis leur exploitation. Ce toit provisoire est envisageable au niveau du terrain naturel, ce qui contraint fortement les dimensions horizontales de la fouille et corollairement sa profondeur, ou à défaut au niveau des alvéoles.

Le retour d'expérience montre que les principales limites techniques de l'option de réalisation à ciel ouvert résident dans la réalisation de la fouille. La prise en compte du risque d'inondation impacte directement la conception. Il sera nécessaire de définir la pluie de référence pour dimensionner les dispositifs de stockage et d'exhaure des eaux et statuer sur les conditions d'exploitation, particulièrement le choix entre une protection vis-à-vis des intempéries au niveau de chaque alvéole ou au niveau de la fouille dans son ensemble. Une protection d'ensemble de la fouille limiterait la profondeur de la plateforme entre 10 et 12 m.

Il n'existe pas de limite technique à la réalisation d'une couverture remaniée de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Deux points de vigilance sont à noter : (i) le comportement de la couverture vis-à-vis des tassements notamment différentiels liés à l'évolution du massif de déchets ; (ii) les réalisations partielles de couverture doivent être évitées, les reprises pouvant constituer des chemins préférentiels d'écoulement.

Une analyse multicritère (implantation, adaptabilité aux caractéristiques du site, performances des installations, critère économique, développement durable, robustesse par rapport aux risques et aux aléas) conclut que les techniques intégralement à ciel ouvert peuvent présenter globalement un intérêt jusqu'à -20 m environ.

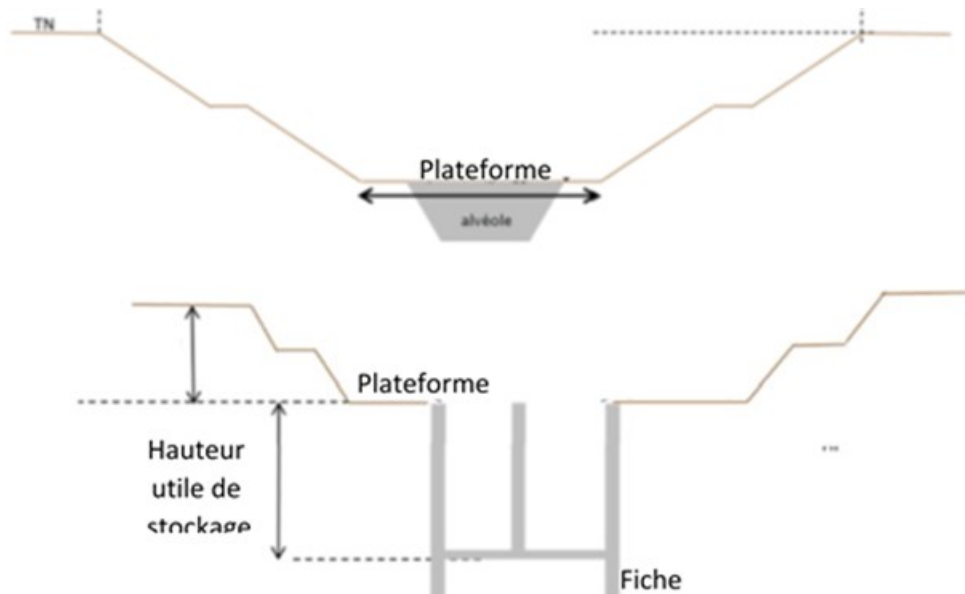


Figure 3 : *Réalisation d'alvéoles à ciel ouvert : en haut avec fouille entièrement talutée, en bas avec parois moulées*

3.2 Techniques de réalisation des alvéoles de stockage en travaux souterrains

Une réalisation en travaux souterrains s'avère de plus en plus pertinente au fur et à mesure que la profondeur augmente. Les techniques de creusement conventionnelles telles que celles envisagées pour Cigéo ne sont pas adaptées au milieu argileux à faible profondeur, notamment au plan des risques pour le personnel et des déformations induites dans la couche argileuse. En revanche des techniques de creusement mécanique en pleine section (tunnelier ou microtunnelier) avec confinement du front évitent ces inconvénients. Les progrès réalisés sur les tunneliers à pression de terre rendent cette technique particulièrement adaptée à des argiles comme les Argiles tégulines du site investigué dans l'Aube. Ce type de technique est souvent mis en œuvre en environnement urbain pour préserver le bâti de perturbations mécaniques induites par le creusement. Il est applicable dès une profondeur d'une dizaine de mètres. En comparaison des techniques souterraines traditionnelles, il présente les avantages suivants :

- Une limitation des tassements et zones plastiques dans le terrain autour de l'excavation grâce au confinement du front,
- Une maîtrise des déformations grâce à la reprise immédiate du poids des terres par le revêtement (voussoirs) à l'arrière de la roue de coupe,
- Des cadences d'avancement d'autant plus élevées et régulières que le milieu d'accueil est homogène, comme c'est le cas des Argiles tégulines de l'Aube, constituant un atout au plan technico-économique,
- Un niveau élevé de sécurité pour le personnel placé totalement à l'abri d'instabilités éventuelles du terrain.

Entre les principes du tunnelier et du microtunnelier, le second ressort comme particulièrement favorable. Il consiste à pousser les anneaux de revêtement et la tête de coupe depuis un point fixe, à l'aide de vérins en butée (Figure 4). La machine à front s'en trouve simplifiée, et la continuité mécanique entre le confinement du front et le revêtement définitif optimisée. La technique du microtunnelier est en constante évolution et les diamètres des ouvrages réalisés actuellement selon cette technique ne cessent de croître. Le retour d'expérience actuel montre qu'il est possible de réaliser des linéaires supérieurs à 1 000 m (grâce à la possibilité de pouvoir insérer des vérins intermédiaires) dans des terrains très variés avec des diamètres intérieurs de 3 à 4 mètres. Des courbes en plan sont aujourd'hui envisageables. De nouveaux progrès en matière de possibilités techniques sont à attendre dans les prochaines années.

Les vides résiduels autour des colis de déchets dans les alvéoles de stockage pourront être remplis afin de limiter les déformations susceptibles d'affecter à terme la garde supérieure avec le vieillissement du revêtement. Des techniques de type injection sont envisageables, leur mise en œuvre étant facilitée par la faible profondeur.

3.3 Accès direct aux ouvrages de stockage

La possibilité d'un accès direct à chaque ouvrage de stockage n'est pas réservée qu'à l'option de réalisation des alvéoles à ciel ouvert. Elle concerne aussi la réalisation des alvéoles par travaux souterrains. A faible profondeur, l'architecture de stockage peut en effet être considérablement simplifiée en évitant ou en limitant descenderies, galeries d'accès et intersections. Ces dernières sont des ouvrages de réalisation complexe notamment pour leur soutènement.

Un accès direct à chaque alvéole réalisé en souterrain peut être assuré par des puits verticaux ou des tranchées excavés à l'abri de parois moulées jusqu'au niveau de stockage. La technique récente de tunnelier vertical offre aussi la possibilité de creuser des puits à faible profondeur sans nécessiter au préalable de parois moulées (Figure 5). Cette technique évite la présence de fiches sous le niveau de stockage. Enfin, si la topographie le permet, une autre forme d'accès simplifié aux alvéoles peut être offerte par un talus ou un flanc de coteau.

La profondeur accessible par les techniques d'accès à ciel ouvert dépendra des caractéristiques géotechniques et topographiques du site. En l'absence de relief marqué comme dans le site investigué dans l'Aube, elle est de plusieurs dizaines de mètres, typiquement jusqu'à une cinquantaine de mètres. Une limite technico-économique autour de 80 mètres pourrait être avancée.

Le lancement de tunneliers ou de microtunneliers puis la mise en place des colis de déchets peuvent s'effectuer directement à partir des accès à ciel ouvert. En général, lorsqu'un tunnelier est lancé à partir d'un puits, une galerie de recul est nécessaire. Les microtunneliers requièrent moins d'espace : une largeur d'accès couramment inférieure à 10 mètres suffit pour insérer le bâti de poussée et introduire les anneaux de poussée. Les tronçons de galeries à proximité immédiate des ouvrages d'accès ne seront pas utilisés pour le stockage. Un bouchon y sera réalisé au terme du remplissage de la galerie ; la longueur et les caractéristiques de ce bouchon sont déterminées pour respecter les objectifs de confinement.

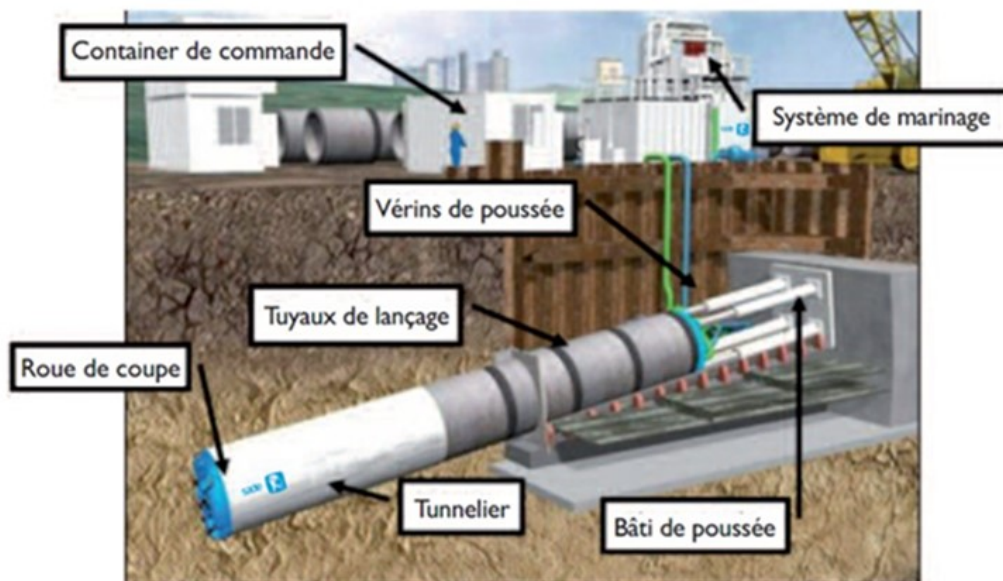


Figure 4 : *Principe de réalisation d'une galerie par microtunnelier*

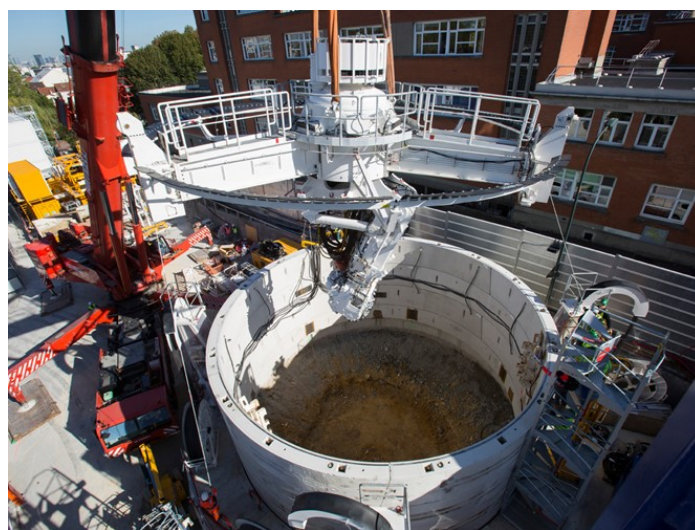


Figure 5 : *Tunnelier vertical pour le creusement d'un puits de profondeur 40 m et de diamètre 11,9 m sur la ligne 15 du Grand Paris*
© Société du Grand Paris / David Delaporte - 3E

3.4 Une architecture flexible pour articuler besoins en confinement des différents déchets, techniques constructives et configuration du site

La conception d'un centre de stockage à faible profondeur doit articuler la configuration du site (surface disponible, volume de la formation d'accueil, contexte hydrogéologique, topographie et sensibilité à l'érosion) avec les possibilités technologiques de façon à ce que l'agencement et les profondeurs d'implantation des divers ouvrages de stockage exploitent au mieux le potentiel en surface et en profondeur du site et optimisent le confinement des déchets.

La profondeur d'implantation d'ouvrages de stockage dans une couche argileuse intervient à divers titres dans la réalisation des fonctions de sûreté (section 2.4) :

- Vis-à-vis du confinement des radionucléides susceptibles de migrer sous forme de solutés, la profondeur d'implantation délimite la garde d'argile inférieure et la garde d'argile supérieure. Selon l'épaisseur totale de la couche au droit des ouvrages de stockage, elle influence donc :
 - ✓ Les temps de transfert par diffusion jusqu'à la surface ;
 - ✓ Les niveaux et les temps de transfert des radionucléides vers les formations aquifères sous-jacentes ;
 - ✓ Les conditions physico-chimiques au sein du stockage (potentiel oxydo-réducteur, composition de l'eau porale...) en lien avec son fonctionnement hydraulique (sa capacité à se resaturer en eau, la mise en place d'équilibres chimiques).
- Vis-à-vis du confinement des radionucléides gazeux, particulièrement le radon, la profondeur d'implantation :
 - ✓ Favorise la saturation hydraulique de la garde supérieure, ce qui réduit sa perméabilité aux gaz ;
 - ✓ Détermine le temps de transfert jusqu'à la surface, ce temps étant à mettre en regard de la décroissance radioactive.
- Vis-à-vis de l'isolement des déchets de l'homme et de la biosphère, la profondeur d'implantation renvoie à la sensibilité du stockage aux évolutions géodynamiques externes, notamment les incidences de l'érosion, et aux activités humaines banales.

Pour une puissance et une profondeur données de la couche d'accueil, un optimum doit ainsi être trouvé entre les objectifs antagonistes qui sont d'une part isoler les déchets de l'homme et de l'environnement au regard de l'érosion et des intrusions humaines involontaires et limiter les remontées des radionucléides vers la surface, ces objectifs militant pour une implantation la plus profonde possible, et d'autre part, limiter les relâchements vers l'aquifère sous-jacent qui milite pour une garde inférieure la plus grande possible.

La recherche d'un tel optimum prend en compte les caractéristiques de chaque famille de déchets et son comportement spécifique en stockage. Le choix peut par exemple être différent entre :

- des déchets présentant une décroissance notable à l'échelle de la dizaine de milliers d'années mais contenant des radionucléides mobiles pour lesquels il conviendrait de maximiser les épaisseurs de garde inférieure ;
- et des déchets contenant au contraire des radionucléides à rétention forte dans le stockage mais décroissant peu, pour lesquels il conviendrait de maximiser les épaisseurs de garde supérieure.

Ainsi un stockage de déchets FA-VL à faible profondeur en milieu argileux devra être conçu sous une forme d'autant plus modulaire et flexible qu'il recevra des déchets aux caractéristiques diverses : à chaque type de déchets pourra correspondre un type de module, caractérisé par un choix de techniques constructives et par une localisation sur le site en regard du contexte topographique, géologique et hydrogéologique. La mise en œuvre industrielle de cette exigence de flexibilité peut s'appuyer sur la possibilité d'un accès direct aux alvéoles de stockage quel que soit leur mode de réalisation : cette possibilité, permise par la faible profondeur, permet en effet de concevoir chaque module quasi indépendamment des autres modules.

4. Quel rôle pour le site investigué dans l'Aube ? Quels compléments prévoir pour un dispositif complet ?

4.1 Des besoins de gestion étalés dans le temps

Le chapitre 2 a montré la diversité des caractéristiques radiologiques et physico-chimiques des déchets FA-VL. Les besoins de stockage exprimés par les producteurs de ces déchets sont également fortement étalés dans le temps.

Une part des déchets FA-VL est constituée de déchets historiques entreposés en attente de stockage. C'est le cas de la plupart des déchets radifères, des déchets bitumés ainsi que des chemises de graphite. Selon les conditions d'entreposage, l'évacuation des déchets pourra avoir lieu progressivement dès la mise à disposition d'un centre de stockage, ou bien être positionné relativement loin dans le temps. Ainsi le CEA ne prévoit pas l'évacuation de ses déchets radifères issus du traitement de minerais d'uranium (CEA, Itteville) avant l'horizon 2060-2070. Pour les chemises de graphite aujourd'hui entreposées à Saint-Laurent, EDF a décidé de construire un nouvel entrepôt, qui devra être opérationnel avant 2030, renvoyant ainsi le besoin d'un stockage à l'horizon 2070-2080.

D'autres déchets FA-VL sont produits régulièrement par l'industrie, c'est le cas des déchets FA-VL produits par les évolutions de procédé de l'usine Orano de Malvési (gypses et boues déshydratées) et des colis de déchets technologiques (CBF-C'2).

Enfin les empilements de graphite ne seront produits que lors du démantèlement des réacteurs UNGG. EDF a proposé en 2016 une évolution de sa stratégie, repoussant le besoin exprimé de mise à disposition de capacités de stockage pour les empilements à l'horizon 2070.

4.2 Le site de la CC de Vendevre-Soulaines : une pièce du dispositif à construire

Comme indiqué plus haut, l'Andra étudie depuis 2013 une zone située sur la Communauté de communes de Vendevre-Soulaines pour y accueillir potentiellement un stockage de déchets FA-VL. Cette zone pourrait de surcroît permettre l'implantation d'un nouveau stockage de déchets TFA : il s'agirait de prendre le relais du Cires lorsque ce dernier aura atteint les limites de ses possibilités d'accueil.

Ce site présente une couche argileuse quasiment affleurante susceptible d'accueillir des ouvrages de stockage en surface pour les déchets TFA et à faible profondeur pour les déchets FA-VL.

Le milieu géologique de cette zone a fait l'objet d'une première campagne de reconnaissance et de caractérisation menée sur la période 2013-2015. Les connaissances acquises ont alimenté les évaluations préliminaires de sûreté d'un stockage de déchets FA-VL dans la formation des Argiles tégulines, présentées dans le rapport d'étape 2015.

Bénéficiant de l'accord du territoire, l'Andra a poursuivi l'étude de ce site et l'analyse des modalités de la mise en œuvre potentielle d'un stockage de déchets FA-VL. En particulier, les caractéristiques de ce site ont été utilisées comme référence pour le travail sur les techniques constructives présenté au chapitre 3.

4.2.1 Le milieu géologique

Sur la base de critères de caractéristiques géologiques *a priori* favorables pour un stockage à faible profondeur des déchets FA-VL considérés (épaisseur moyenne de la couche d'argile d'environ 55 m et gradient hydraulique descendant faible), une zone d'intérêt d'environ 10 km² a été définie, pour la poursuite des études. Cette zone, dite « zone restreinte » (ZR), se situe au nord du secteur d'étude et couvre en partie la commune de Juzanvigny, le nord de celle de Crespy le Neuf et la partie occidentale de celle d'Epothémont (cf. Figure 6.).

A partir des prescriptions du PNGMDR et des recommandations de l'ASN suite à l'instruction du rapport d'étape de 2015, la nouvelle phase de caractérisation mise en œuvre sur la période 2017-2018 a permis de consolider les connaissances et les données sur la ZR. Cette campagne a déployé les moyens complémentaires suivants (cf. Figure 7) :

- 7 forages profonds (< 100 m) réalisés de septembre 2017 à octobre 2018 avec diagraphies (mesures en forage) et prélèvements d'échantillons ;
- Une campagne d'investigation des formations de surface comprenant la réalisation de tranchées de 5 m de profondeur et des sondages pédologiques ;
- Une campagne géophysique de surface associant des méthodes sismiques et électriques adaptées pour les faibles profondeurs.

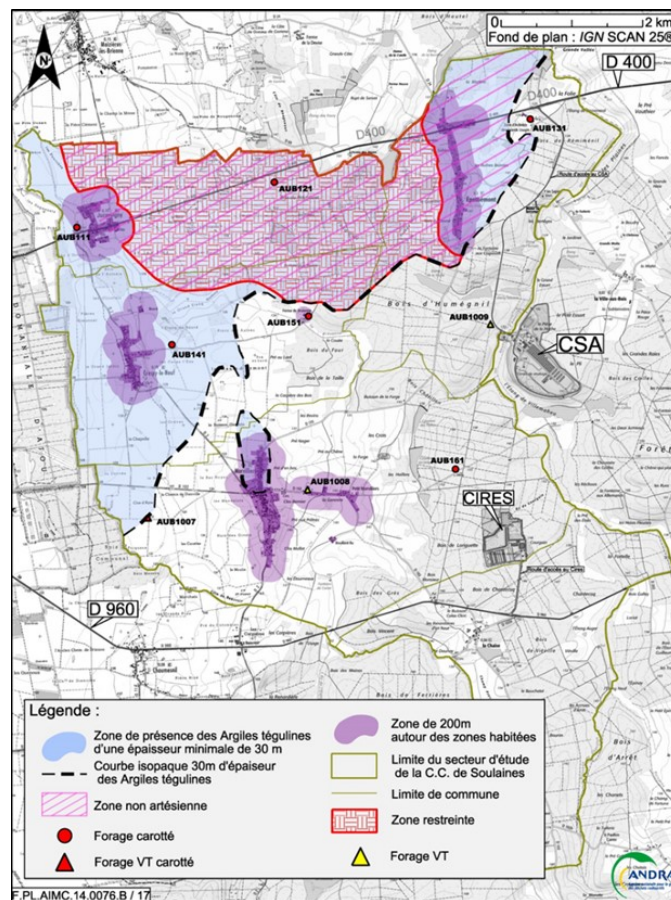


Figure 6 : Périmètre de la ZR

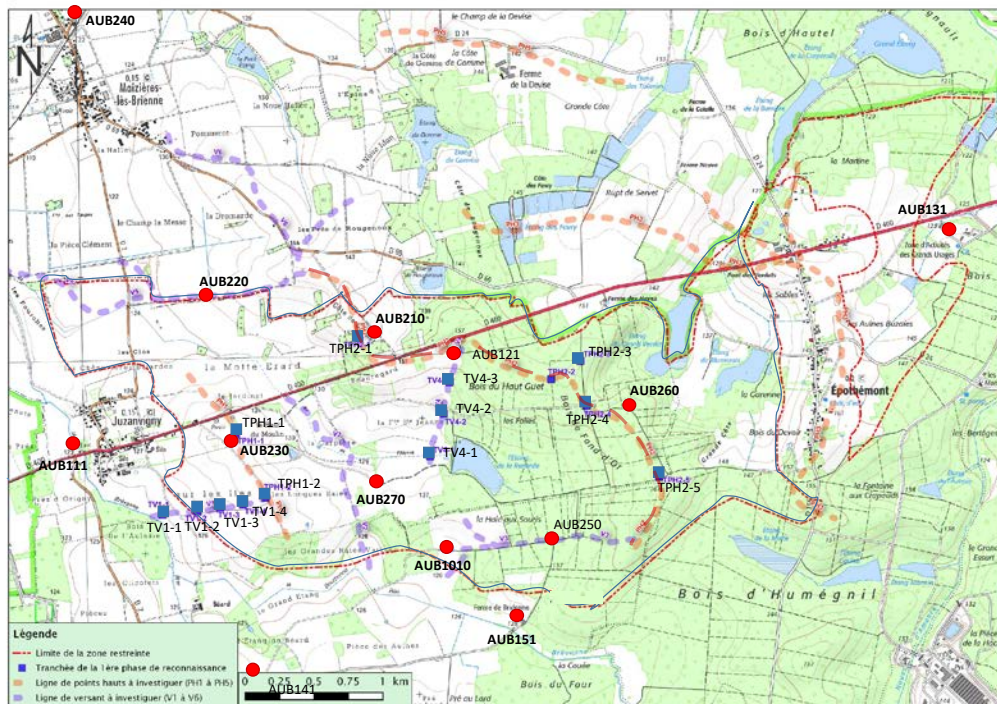


Figure 7 : *Carte géographique de la zone restreinte (10 km²) avec la localisation des différents forages (points rouges) et tranchées réalisées.*

4.2.1.1 La géométrie de la formation des Argiles tégulines

La formation argileuse d'âge Albien (moyen et inférieure) dite des Argiles tégulines est retenue comme potentielle formation hôte. Cette formation est présente à faible profondeur sous couverture quaternaire de 1 à 5 m sur la ZR. Cette formation s'épaissit dans le sens du pendage (de l'ordre de 1°) du sud-est vers le nord-ouest. Elle a une épaisseur d'au moins 30 m et peut atteindre 80 m environ au nord de la ZR. Les Argiles tégulines reposent sur la formation aquifère des Sables de l'Aptien d'épaisseur comprise entre 6 et 10 m. La géométrie de cet ensemble sédimentaire a été confirmée lors de la campagne de caractérisation de 2016 - 2018. L'ensemble des investigations géologiques, incluant des moyens d'auscultation géophysiques de surface, n'a mis en évidence aucun élément structural d'importance, en particulier aucune faille majeure.

4.2.1.2 Les propriétés intrinsèques des Argiles tégulines, les transferts d'eau et de solutés

Les Argiles tégulines sont issues d'une sédimentation marine dans un environnement de dépôt calme. De par son histoire géologique, la formation des Argiles tégulines possède une lithologie et une composition minéralogique peu contrastées. Elles sont définies comme des argiles silteuses peu carbonatées. La base des Argiles tégulines est plus silteuse et son sommet plus carbonatée, marquant respectivement la transition vers les Sables Verts de l'Aptien et les marnes de Brienne. Aucune hétérogénéité (structurale ou sédimentaire) pluri-métrique n'a été détectée. La texture argileuse de la formation lui confère des propriétés intrinsèques limitant les transferts d'eau avec une perméabilité à l'eau moyenne de $2 \cdot 10^{-11}$ m/s, et un coefficient de diffusion effectif moyen de l'eau de $5 \cdot 10^{-10}$ m²/s. Ces propriétés sont globalement peu variables latéralement à l'échelle de la ZR et du secteur d'étude. Le phénomène d'exclusion des anions (*i.e.* diffusion ralentie des anions tels que le chlore) est cependant plus faible que dans des argiles très compactes (argillites).

De par leur caractère affleurant ou sub-affleurant, les Argiles tégulines sont marquées sur quelques mètres depuis la surface par des effets de déconfinement mécanique et d'altération supergène qui ont une influence sur certaines de leurs propriétés (propriétés mécaniques, porosité...). Les propriétés de transfert d'eau et de solutés sont toutefois peu impactées du fait de la faible intensité des transformations minérales induites par les phénomènes supergènes.

De par sa minéralogie à dominante argileuse, les Argiles tégulines présentent des propriétés de rétention favorables ($K_d \gg L.kg^{-1}$) pour de nombreux éléments chimiques. Leurs propriétés de rétention ont été caractérisées et démontrées pour un ensemble d'éléments chimiques d'intérêt en particulier le radium. Les essais conduits lors de la dernière campagne de caractérisation (2017-2018) ont également pu mettre en évidence une capacité de rétention faible mais non nulle vis-à-vis du ^{14}C organique, ce qui augmenterait ses temps de transfert à l'échelle de la formation, permettant de bénéficier ainsi de sa décroissance.

A l'échelle du secteur initialement étudié, les écoulements d'eau dans les Argiles tégulines sont descendant ou ascendant selon la topologie. Sur la ZR, les écoulements d'eau sont majoritairement descendant, cette caractéristique ayant constitué un critère de choix de la ZR. Les transferts d'eau et des solutés sont de nature convective dominante avec des gradients hydrauliques verticaux compris entre 0,1 et 0,3 m.m⁻¹. Les vitesses de transfert estimées sont de l'ordre du mètre par mille ans.

4.2.1.3 **Les caractéristiques hydrauliques de la formation aquifère des Sables verts**

Sous les Argiles tégulines, la formation aquifère des Sables verts est constituée de sables riches en argile et de granulométrie grossière qui lui donnent un caractère peu productif. Son débit hydraulique est faible. Elle est alimentée par la recharge aux affleurements vers l'est. Le gradient hydraulique horizontal est de l'ordre de 1,5 ‰ orienté suivant la tendance générale des écoulements dans le Bassin parisien (du sud-est vers le nord-ouest).

Sur le secteur d'étude et dans son voisinage immédiat, ce sont les ressources en eau les plus faciles à atteindre qui sont exploitées. A ce jour, il s'agit principalement des nappes à l'affleurement (plaine alluviale de l'Aube et les Sables verts, Sables du Barrémien et Hauterivien) ou en sub-surface au sud et sud-est du secteur d'étude, qui se situent en amont hydraulique de la ZR. La grande ville la plus proche en aval hydraulique de la ZR est Troyes : ses ressources en eau ne proviennent pas de la nappe de l'Albien, mais d'aquifères plus importants et faciles à exploiter. Les principales exploitations se font dans la nappe de la Craie cénomaniennne (située au-dessus des Argiles tégulines donc des Sables verts).

Au plan géologique, la formation des Sables verts appartient à l'ensemble Albo-Néocomien¹². Cet ensemble constitue en région parisienne un réservoir d'eau profond, principalement captif, sur une extension de plus de 100 000 km² (cf. Figure 8). La connectivité géométrique de la formation des Sables verts présente sur le secteur d'étude avec les Sables verts de la partie centrale du Bassin parisien a été spécifiquement étudiée au cours de la période 2016-2018. Les travaux menés en partenariat avec le BRGM ont permis de redéfinir la géométrie de l'ensemble Albo-Néocomien à l'échelle du Bassin parisien sur la base des données de forage disponibles à l'échelle du Bassin. Cette étude a permis d'estimer faible la probabilité que la formation des Sables verts présente sur le secteur d'étude soit connectée avec ceux de la partie centrale du Bassin parisien. En tout état de cause, si la situation du secteur d'étude en amont hydraulique du réservoir parisien pourrait contribuer à sa réalimentation, celle-ci ne s'effectuerait que sur une faible proportion compte tenu de la faible extension du secteur en regard des 5 700 km de toute la bordure est et sud du Bassin parisien. Le secteur se situe en outre à environ 200 km, soit des temps de transfert potentiel de l'ordre de quelques dizaines de milliers d'années.

L'écoulement de la nappe de l'Albien s'effectue vers un grand axe de drainage correspondant à la vallée de la Seine à l'aval de Paris avec :

- Une réorientation des écoulements liée à l'exploitation de la nappe en Ile de France;
- Une recharge sur les aires d'affleurement, notamment à l'est et au sud ;
- Des exutoires naturels au niveau de la Manche et les affleurements de la craie du Cénomaniennne (Est et Pays de Bray) ;

¹² Au centre du bassin de Paris, cet ensemble est constitué de 3 formations sableuses (Sables de Frécambault, Sables des Drillons et Sables verts proprement dits) plus ou moins séparées par des formations semi-perméables et pouvant varier de quelques mètres à une centaine de mètres. Seuls les sables verts sont présents dans le secteur d'étude.

- L'exutoire principal est l'alimentation en eau potable de la ville de Paris : des prélèvements par forage dans le bassin Seine Normandie s'effectuent à un débit de 25 millions de mètres cubes par an dont 21 millions de mètres cubes destinés à l'alimentation en eau potable.

Le renouvellement des eaux de cette nappe est très faible¹³ avec un temps de séjour moyen de plusieurs milliers d'années. En effet, les datations au carbone 14 montrent l'accroissement de l'âge apparent de l'eau de l'Albien depuis les affleurements vers le centre du bassin confirmant l'existence d'un écoulement continu au sein de l'aquifère.

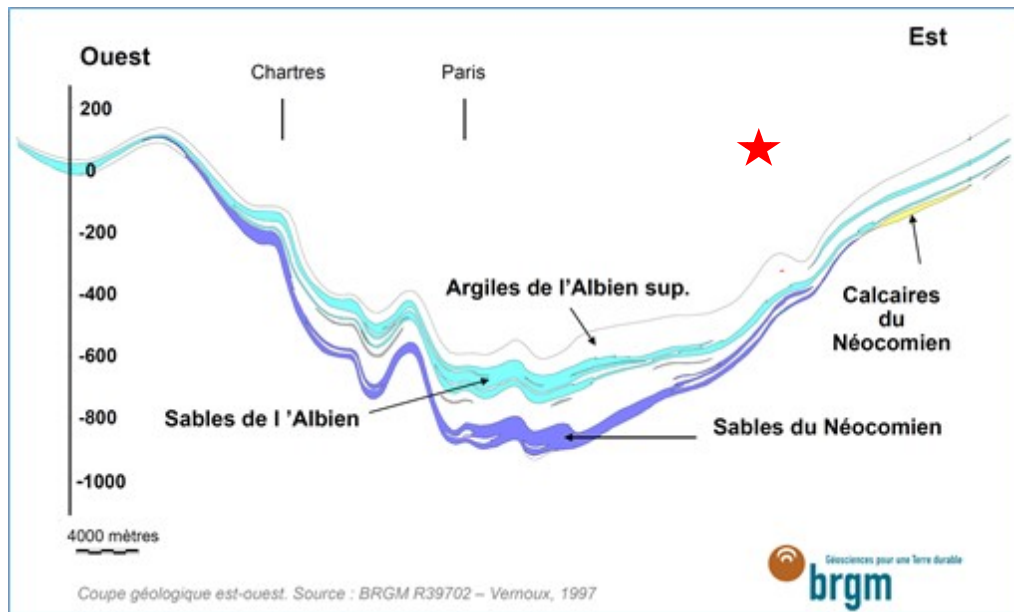


Figure 8 : *Coupe géologique est-ouest précisant l'extension de l'aquifère Albo-Néocomien (le secteur investigué est localisé par l'étoile rouge)*

¹³ Le renouvellement est de l'ordre de 22 106 m³.an⁻¹ dont 45 % issus des 5 700 km d'affleurements, le reste provenant d'autres aquifères.

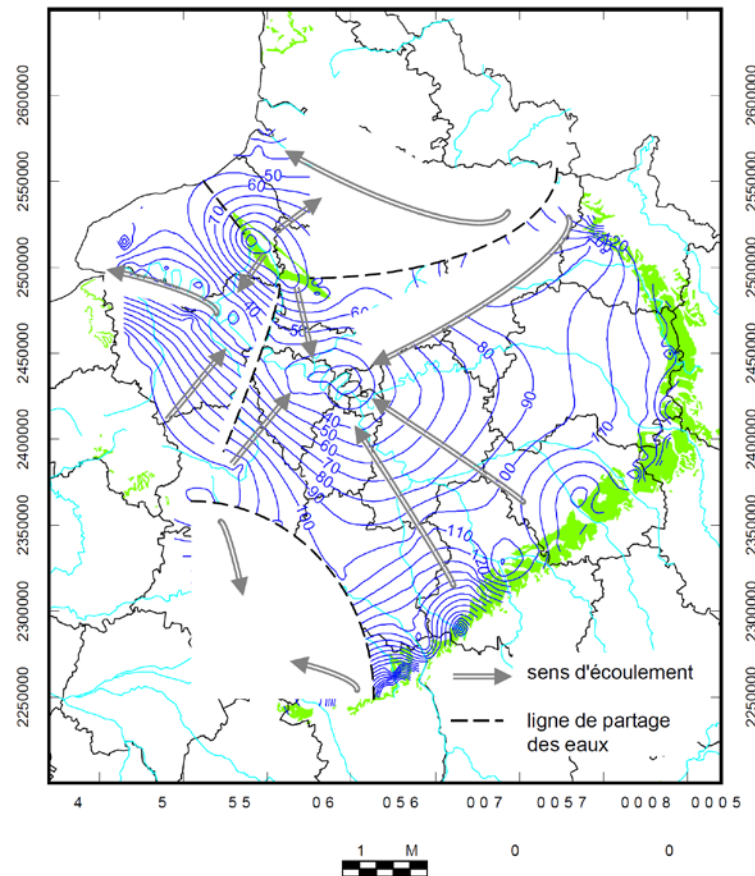


Figure 9 : *Piézométrie de la nappe de l'Albien à l'échelle du Bassin parisien (Source BRGM, 1997), soulignant les directions d'écoulement vers les forages AEP alimentant la région parisienne*

4.2.1.4 Géomorphologie actuelle du site et évolution future

A l'échelle du Bassin parisien, le secteur d'étude appartient à la Champagne humide argileuse, qui forme une vaste dépression topographique entourée et surplombée par des formations calcaires (Calcaires du Barrois à l'est et sud-est et Craie Cénomaniens au nord et à l'ouest) qui arment le relief de côte (Figure 10). Ce contraste de topographie entre le secteur d'étude et ses bordures ne résulte pas d'une situation géodynamique particulière, mais uniquement de la nature du sous-sol et des processus d'érosion différentielle. Plus localement, sur le secteur d'étude, la géomorphologie est très fortement contrôlée par la nature même des formations qui y affleurent, à savoir, des formations silto-argileuses le plus souvent recouvertes de colluvions ou niveaux limoneux. La topographie du site d'étude est peu accentuée, marquée par des collines basses et douces aux altitudes faibles comprises entre 120 m et 170 m, entaillées par un ensemble de vallées évasées, de faibles pentes et aux dénivelés qui ne dépassent guère les 30 m. Le secteur est drainé par cinq cours d'eau qui sont : à l'ouest l'Aube, qui s'écoule sur la large plaine alluviale de Brienne-le-Château, au nord la Voire, qui s'écoule en pied de côte du plateau crayeux, et à l'est ses deux affluents que sont la Laines et les Noues d'Amance. Le secteur est drainé en son centre par le petit cours d'eau de la Brévonne, affluent de l'Aube.

La campagne de caractérisation de 2016-2018 a permis de préciser la nature des formations quaternaires recouvrant les Argiles tégulines. Il s'agit de loess éoliens (~ 5 m) localisés principalement sur les points hauts et de graves calcaires (~ 2 m) sur les points bas. Des écoulements d'eau latéraux ont pu être mis en évidence dans ces formations jusqu'à 3-4 m de profondeur, principalement depuis les points hauts vers les points bas traduisant la dynamique des transferts en surface.

L'évolution géomorphologique apparaît relativement complexe, avec la mise en jeu d'un ensemble de mécanismes interagissant (ruissellement, ravinement, glissement en versant et fluage, altération...), et polyphasée dans le temps.

De cela, et au regard du cadre des connaissances scientifiques actuelles, seule une approche qualitative de l'aléa érosif semble raisonnablement applicable. Les valeurs d'érosion données dans les différentes cartes d'aléa érosion qualitatives sur les prochains 50 000 ans, et applicable pour un scénario climatique perturbé sont de l'ordre de la dizaine de mètres à flanc de colline et de la quinzaine de mètres sur les points hauts. Ces valeurs doivent être considérées comme des valeurs approximatives et enveloppes des situations possibles dans le futur, nonobstant l'occurrence locale et non homogène de l'érosion. En effet, en regard de la grande variabilité spatiale et temporelle de l'action érosive sur une même région, voire sur une même parcelle, il est raisonnable de ne pas exclure, et même de considérer comme plausibles, des variations spatiales significatives de l'érosion pour une même zone, l'incertitude minimale pouvant avoisiner la dizaine de mètres sur une échelle de temps de 50 000 ans, sans qu'elle excède cependant la hauteur du dénivelé maximum local à l'aplomb des points hauts (30 m sur le secteur de la Communauté de communes de Vendeuve-Soulaines).

L'écoulement d'eau au sein de la formation des Argiles tégulines resterait néanmoins vertical descendant au nord du secteur d'étude. Des travaux sont en cours, dans le cadre de la campagne de reconnaissance 2017-2019, pour consolider ces résultats.

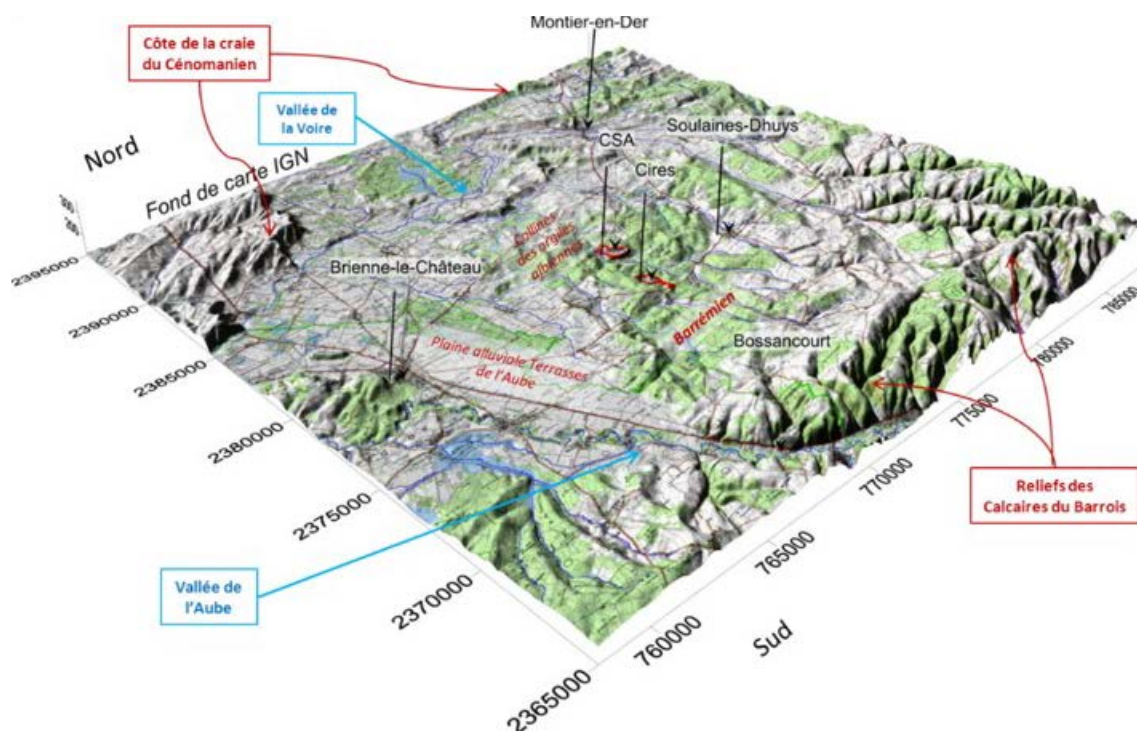


Figure 10 : Contexte topographique et hydrographique du site investigué dans la Communauté de communes de Vendeuve-Soulaines

4.2.2 L'environnement

La ZR se trouve dans la zone des étangs de la Champagne humide. Cette zone de 2 564 kilomètres-carrés s'étend sur les trois départements de l'Aube, de la Marne et de la Haute-Marne. Elle a été classée au titre de la convention de Ramsar¹⁴ en 1991. L'imperméabilité des sols due à l'argile affleurante a été exploitée par l'homme pour créer des étangs dès les XII^{ème} et XIII^{ème} siècles. La ZR comporte ainsi plusieurs plans d'eau artificiels. C'est aussi cette caractéristique qui a permis la construction dans la zone de trois grands lacs-réservoirs dans les années 1960, 1970 et 1990, destinés à réguler le débit de la Seine (lac d'Orient, 1966, 2 300 ha), de la Marne (lac du Der- Chantecoq, 1974, 4 800 ha), de l'Aube (Temple et Amance, 1990, 2 320 ha). Cette zone d'étangs et de lacs favorise la migration et l'hivernage de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau. Les forêts humides, les étangs et mares de la zone constituent

¹⁴ L'objectif de la Convention de Ramsar (ratifiée en 1971 à Ramsar en Iran) est d'enrayer la tendance à la disparition des zones humides de favoriser leur conservation, ainsi que celle de leur flore et de leur faune et de promouvoir et favoriser leur utilisation rationnelle. La France est adhérente à la Convention depuis octobre 1986.

des habitats privilégiés pour les amphibiens, pour certains mammifères et pour des chiroptères. Les zones humides permettent aussi le développement d'une flore particulière dont certaines espèces rares sont protégées à l'échelle nationale ou régionale.

L'Andra a mandaté l'entreprise *Biotope* pour réaliser une étude spécifique sur les zones humides de la ZR sur la période 2017-2018. Le croisement entre les végétations humides spontanées, les végétations non spontanées et les sols humides conduisent à ce jour à retenir provisoirement 283,43 hectares de zones humides¹⁵, soit 27,52 % de la ZR, au sens de l'arrêt du Conseil d'État n° 386325 du 22 février 2017 : « *une zone humide ne peut être caractérisée, lorsque de la végétation y existe, que par la présence simultanée de sols habituellement inondés ou gorgés d'eau et, pendant au moins une partie de l'année, de plantes hygrophiles.* » (Figure 11). La zone forestière centrale de la ZR n'a pas pu être prospectée car elle était trop sèche lors des campagnes 2017-2018. Elle le sera lors d'une prochaine campagne en vue de finaliser la délimitation des zones humides de la ZR.

Une étude pédologique au sens strict du terme a été menée en parallèle de l'étude sur les zones humides. L'excès d'eau temporaire – générant des phénomènes d'oxydo-réduction – touche la majorité des sols de manière plus ou moins intense. Hormis les plans d'eau, il n'a pas été trouvé de zones à engorgement constant ni de zones d'accumulation de matière organique de type tourbière.

Par ailleurs, l'Andra a recensé les zones naturelles protégées dans la ZR (Figure 12). Une petite partie de la ZR recoupe le Bois d'Humégnil au sud de la commune d'Epothémont. Ce Bois fait l'objet d'un classement comme zone Natura 2000 (FR2100310) et comme zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique de type 1 (ZNIEFF N°210000642). Une autre ZNIEFF (N°210020145) se situe au nord-est de la ZR, il s'agit des prairies, bois et étangs du Grand Verdat et de Blumerais à l'ouest d'Epothémont. Le nord des communes de Juzanvigny et Epothémont appartiennent à une vaste zone importante pour la conservation des oiseaux (ZICO) de 35 800 ha autour des lacs d'Orient, du Temple et d'Amance.

L'ensemble de ces éléments seront à prendre en compte dans l'implantation et la conception d'ouvrages de stockage dans la ZR. Des mesures d'évitement, de réduction des impacts ou à défaut de compensation pourront être adoptées si les travaux affectent des habitats particulièrement sensibles.

4.2.3 Des capacités à exploiter de manière optimale

Au regard des résultats des investigations qui y ont été menées, le site investigué dans l'Aube présente des qualités techniques notables qui confirment la possibilité de l'exploiter pour stocker des déchets FA-VL :

- Capacité de confinement des Argiles téglines (propriétés hydro-dispersives et géochimiques) ;
- Homogénéité de la couche à l'échelle de la ZR ;
- Compatibilité des caractéristiques géotechniques avec la réalisation d'ouvrages à faible profondeur sur la base des techniques décrites au chapitre 3.

Le site présente également des contraintes, dont certaines sont consubstantielles au concept même. Ces contraintes ont conduit l'ASN à conclure que seule une part des déchets FA-VL pourra être accueillie (voir section 4.3).

La première contrainte concerne le volume d'argile disponible, délimité en profondeur par le mur de la couche des Argiles téglines et latéralement par le périmètre de la ZR, lui-même limité au nord par le Parc naturel régional de la Forêt d'Orient. Cette contrainte implique un travail d'optimisation de l'utilisation du volume disponible pour favoriser l'acceptabilité des différents déchets au regard des objectifs de sûreté et de protection de l'environnement. Il s'agit particulièrement de déterminer le positionnement des ouvrages de stockage des différents déchets de manière à adapter au mieux les épaisseurs de garde sus et sous-jacentes aux caractéristiques des déchets. Cette optimisation doit aussi tenir compte de la temporalité des besoins de stockage et des opportunités et risques associés : par

¹⁵ 791,44 hectares, soit 76,74 % de la ZR, cumulent des végétations humides et des sols humides, ce qui en fait des zones humides au sens de l'Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du Code de l'environnement, modifié en 2009.

exemple, lors du choix du positionnement des premiers ouvrages, doit-on considérer de la même façon tous les déchets FA-VL susceptibles d'être stockés sur la durée alors que la probabilité d'évolutions de stratégie augmente avec le temps ?

La présence de zones humides en surface est inhérente au type de géologie recherché (argiles très peu perméables affleurantes ou sub-affleurantes). Elle sera à prendre en compte dans la conception du projet.

Enfin, indissociablement du concept de faible profondeur, la robustesse du confinement apporté par les Argiles tégulines diminue aux grandes échelles de temps du fait des incertitudes sur l'évolution géomorphologique.

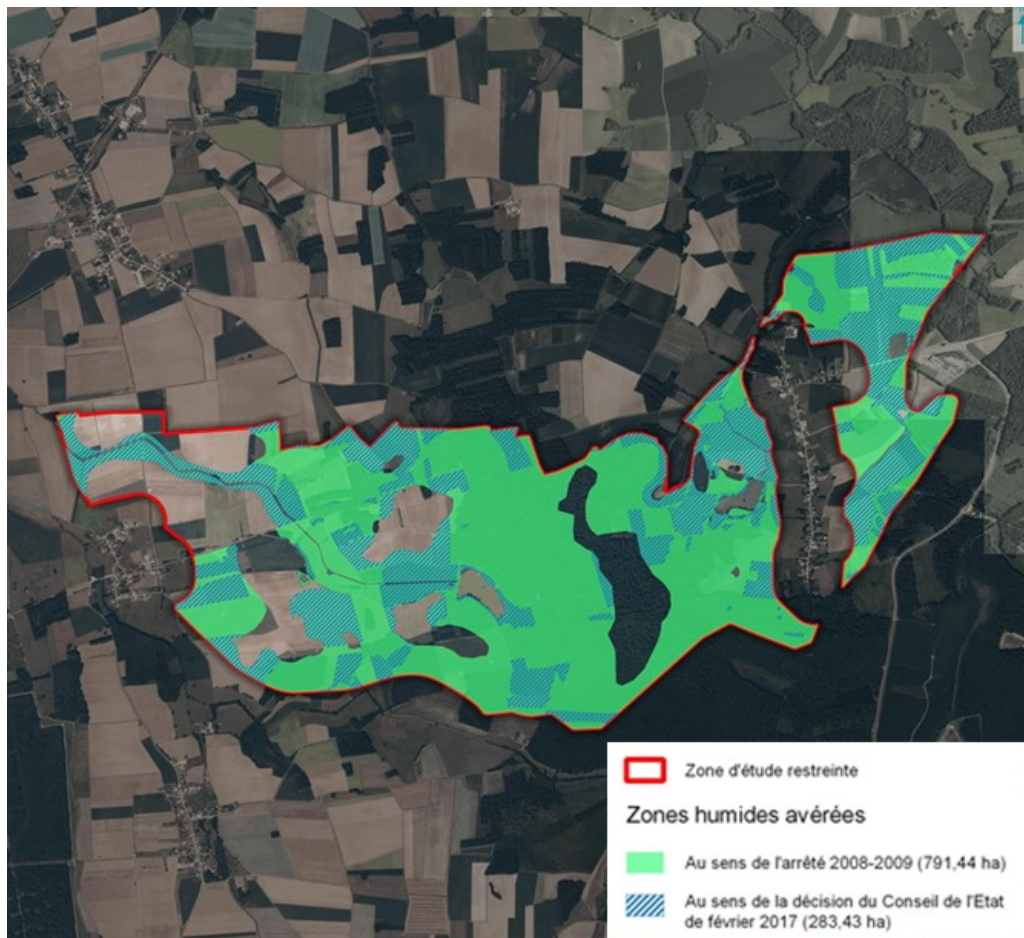


Figure 11 : *Carte provisoire des zones humides avérées*

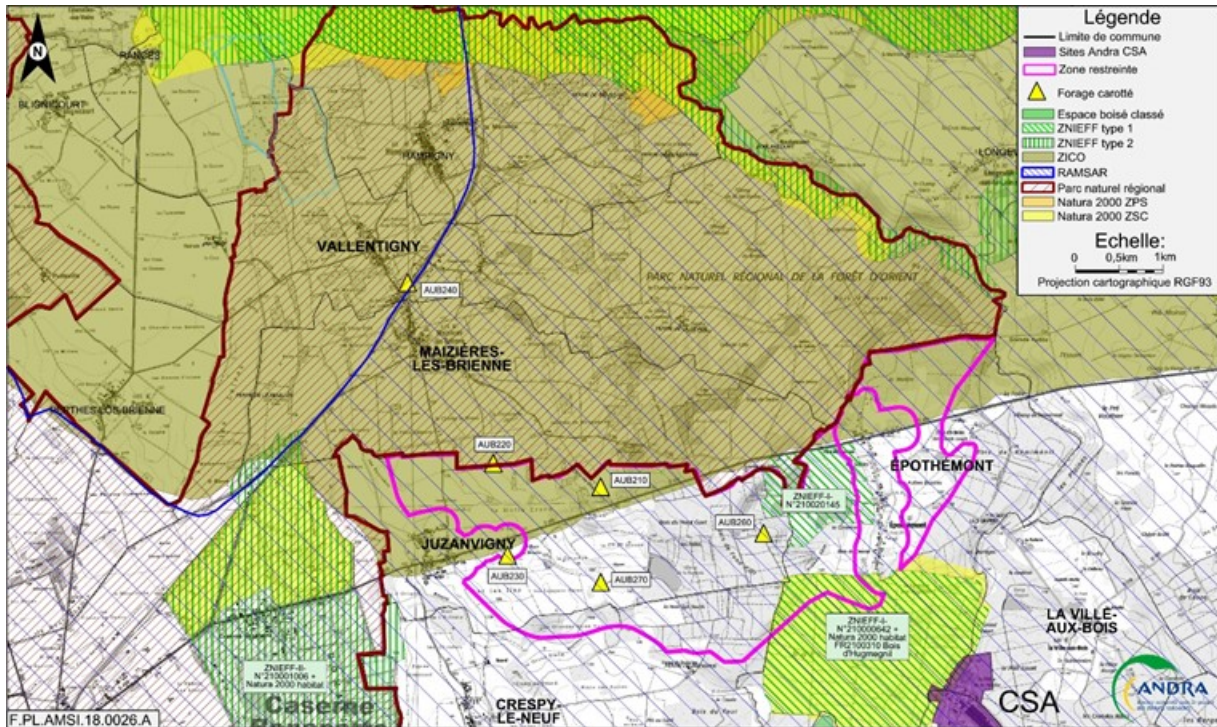


Figure 12 : Carte des zones naturelles (Natura 2000, ZNIEFF, ZICO, PNR, RAMSAR)

4.2.4 Une logique de déploiement progressive pour répondre aux stratégies de démantèlement et de désentreposage des producteurs

Sans préjudice de la part de déchets FA-VL susceptible d'être stockés sur le site de la Communauté de communes de Vendevre-Soulaines, l'étalement des besoins de prise en charge exprimés par leurs producteurs conduit à proposer un déploiement incrémental des installations de stockage et une exploitation par campagnes. Chaque campagne de stockage pourra alors donner lieu à la réalisation d'un ou de modules de stockage *ad hoc* : l'implantation des modules dans la ZR et le choix de la meilleure technique de réalisation disponibles seront adaptés aux caractéristiques des déchets faisant l'objet de chaque campagne.

L'acceptation de flux de déchets dans plusieurs décennies dépendra d'instructions techniques qui interviendront de fait à cet horizon. En plus des caractérisations des déchets qui seront alors réalisées et des évolutions plus générales des connaissances, ces instructions prendront en compte l'expérience acquise au cours des phases d'exploitation antérieures du centre. Des autorisations d'exploitation progressives pourront alors être mises en place avec une vision globale prospective. Aussi un déploiement incrémental suppose d'instaurer un mode de gouvernance intégrant des rendez-vous réguliers entre parties prenantes.

Afin d'illustrer la logique de déploiement incrémental, on présente dans la suite un scénario de campagnes successives. Ce scénario a été élaboré à titre purement illustratif et n'intègre pas à ce stade une réflexion approfondie sur la meilleure technologie disponible. Il ne préjuge pas d'autres scénarios possibles.

➤ Scénario illustratif de la logique de déploiement incrémental

Le scénario illustratif présenté à la Figure 13 comprendrait trois campagnes successives qui permettraient d'instruire l'acceptabilité de déchets présentant des enjeux similaires à la même échelle de temps.

Campagne 1

L'autorisation en vue de la mise en service du nouveau centre pourrait porter sur des déchets FA-VL entreposés aujourd'hui en attente de stockage et dont la connaissance du comportement en stockage rend la démonstration d'acceptabilité accessible à court terme : colis de déchets radifères contenant peu d'uranium, déchets contenant peu de radionucléides mobiles... Ces déchets se caractérisent notamment par une faible mobilité des radionucléides contenus¹⁶ et par une décroissance significative de leur activité radiologique à l'échelle de la dizaine de milliers d'années. Pour répondre aux besoins de stockage tels qu'ils sont exprimés par les producteurs à ce jour, cela concernerait notamment les déchets radifères de Solvay et de l'Andra.

En fonction des avancées en matière de maîtrise de leur comportement en stockage, il serait également envisageable de considérer une prise en charge des colis d'enrobés bitumineux FA-VL à cet horizon, sans préjudice des autres voies de gestion à l'étude en lien avec les colis d'enrobé bitumineux de l'inventaire de référence de Cigéo. Ces colis pourraient faire l'objet de modules de stockage dédiés compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques.

La mise en service pour des déchets FA-VL pourrait être couplée avec celle de capacités de stockage de déchets TFA succédant à celles du Cires.

La durée de la première campagne dépendra des flux possibles de désentreposage et de la capacité opérationnelle du centre.

Campagne 2

A l'horizon 2045-2050, la décision de stocker des déchets radifères contenant une certaine quantité d'uranium pourrait être instruite concomitamment à celle des matières thorifères et uranifères dans le cas où elles n'auraient pas été valorisées. Ces déchets et matières ont comme caractéristique commune une quasi-absence de décroissance radioactive. Cela concernerait les déchets uranifères à produire de Malvési. Les déchets Framatome de Jarrie pourraient aussi être pris en charge à cet horizon si leur évacuation est compatible avec la gestion de leur entreposage. L'ouverture du stockage aux déchets UNGG de La Hague suppose au préalable d'avoir instruit les questions liées à la gestion du ³⁶Cl et du magnésium.

Campagne 3

A l'horizon 2065-2070 viendrait la question du stockage des déchets de graphite EDF et CEA. Conformément au besoin du CEA, les déchets radifères d'Itteville pourraient aussi être pris en charge à cet horizon.

Une possibilité d'implantation dans la ZR est présentée à la Figure 14 dans le cas d'un stockage réalisé intégralement par terrassement à ciel ouvert depuis la surface (lignes d'alvéoles de stockage construites par parois moulées où les colis sont stockés sur 4 à 5 niveaux). Elle correspond aux différents modules de stockage associés aux campagnes d'exploitation décrites ci-dessus. Une logique analogue de modules de stockage indépendantes est aussi applicable à une réalisation en travaux souterrains ou encore à une combinatoire entre les deux modes de réalisation.

¹⁶ A condition de s'assurer du maintien de conditions physico-chimiques et hydrogéologiques favorables.

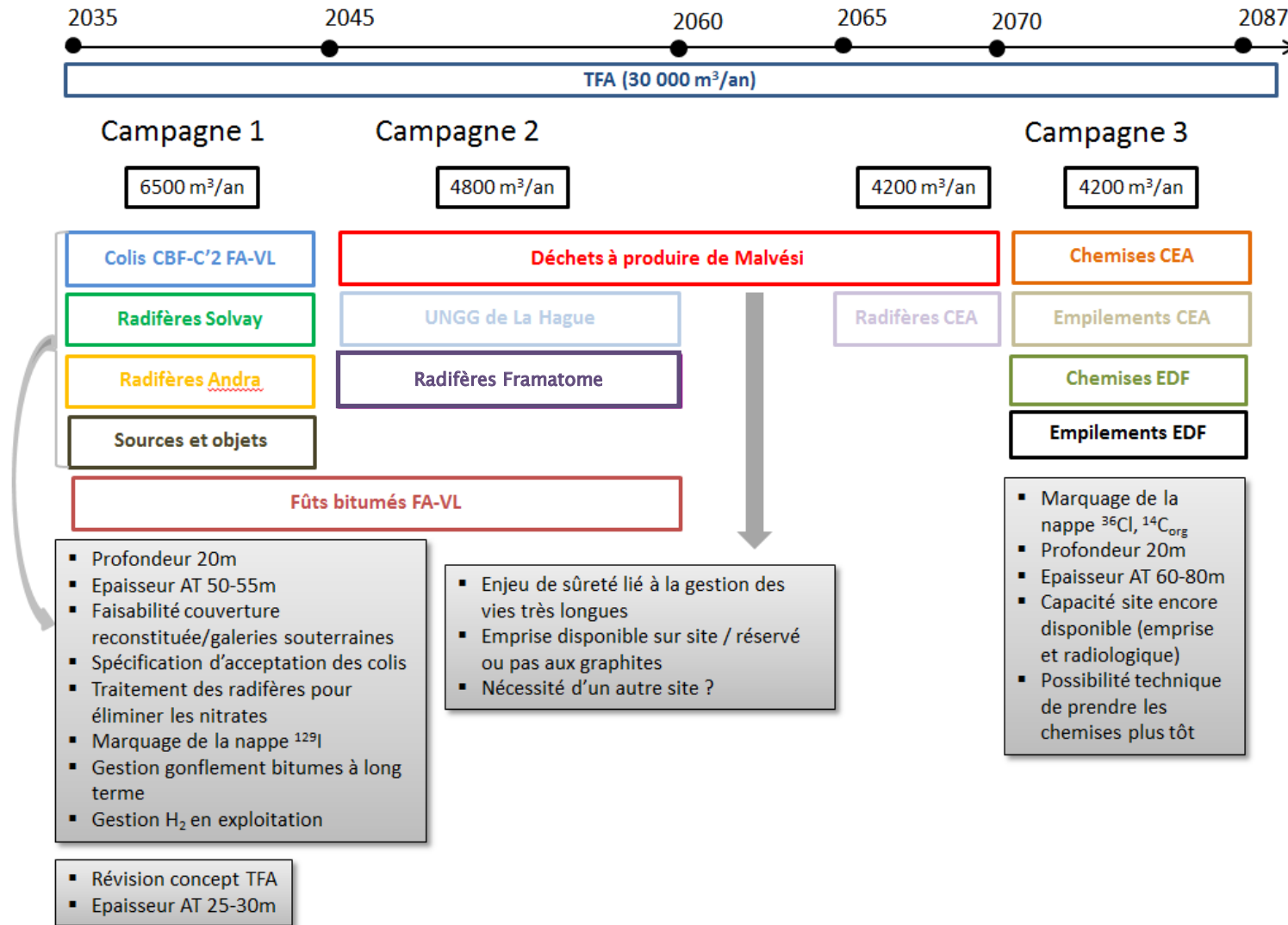


Figure 13 : Scénario illustratif d'un déploiement industriel possible du nouveau centre avec une hypothèse de mise en service à l'horizon 2035

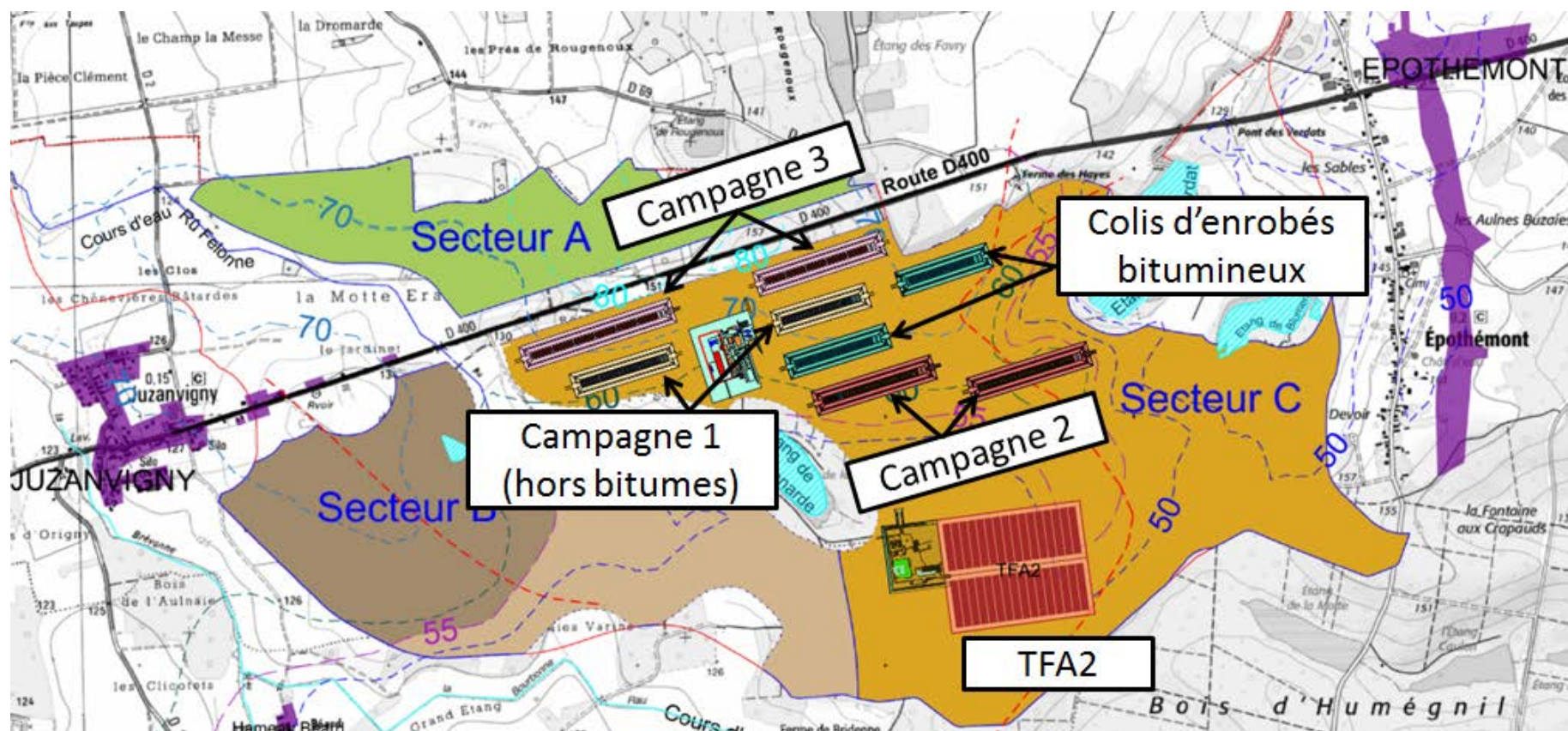


Figure 14 : *Possibilité d'implantation des différentes campagnes de stockage suivant le scénario illustratif de déploiement dans la ZR - option de réalisation à ciel ouvert avec parois moulées et couverture reconstituée*

4.3 Quelles modalités pour rechercher un ou d'autres sites ?

Dans son avis N°2016-AV-264 du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets FA-VL remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, l'ASN indique :

- *« Compte-tenu des caractéristiques du site [de la CC de Vendevre-Soulaines], de l'épaisseur et de la profondeur de la couche d'argile, compte-tenu des propriétés hétérogènes des déchets FA-VL étudiés dans le rapport d'étape [2015] de l'Andra et des exigences de sûreté associées pouvant être opposées en termes de positionnement dans la formation hôte, l'ASN estime qu'il sera difficile de démontrer la faisabilité, dans la zone investiguée, d'une installation de stockage de l'intégralité des déchets de type FA-VL retenus par l'Andra. »*
- *« Sans préjudice des conclusions des investigations et études que l'Andra mène sur le territoire de la Communauté de communes de Soulaines, le site étudié ne devrait pas être en capacité d'accueillir l'ensemble des déchets FA-VL, et notamment les déchets (...) de Malvési. Il convient donc que l'Andra complète, en lien avec les producteurs de ces déchets radioactifs, les solutions de gestion des déchets FA-VL en étudiant notamment le traitement de certains déchets, la possibilité d'implantation d'un 2^{ème} site de stockage et le stockage de certains déchets FA-VL dans Cigéo. »*

Partant de cet avis de l'ASN, le PNGMDR 2016-2018 stipule que *« puisque le site investigué par l'Andra ne peut pas prendre en charge la totalité de ces déchets, il convient de définir une feuille de route permettant de disposer d'une stratégie de gestion pour la totalité des déchets FA-VL, y compris ceux produits à compter du 1er janvier 2019 sur le site de Malvési relevant d'une filière de gestion FA-VL. Cette stratégie de gestion doit être adaptée à l'hétérogénéité et à la dangerosité de ces déchets, proportionnée aux enjeux de sûreté, techniques et économiques et envisagée selon un calendrier réaliste. Elle devra se fonder sur un schéma industriel combinant :*

- *le site investigué sur la Communauté de communes de Soulaines,*
- *un autre site à rechercher, pour les déchets qui ne pourront pas être stockés dans le site de Soulaines et dans une optique d'optimisation globale des impacts,*
- *la poursuite des études sur la caractérisation des déchets (notamment l'inventaire radiologique),*
- *des études sur les procédés de tri ou traitement en amont du stockage en lien avec les conditions d'acceptabilité des sites,*
- *la prise en compte, à titre conservatoire, de certains déchets dans les réserves ou l'inventaire de référence de Cigéo, dans la continuité des préconisations du PNGMDR précédent. »*

Par précaution les bitumes FA-VL et une part du volume des déchets de graphite sont inscrits à l'inventaire de réserve de Cigéo : l'Andra a ainsi prévu de montrer que Cigéo est suffisamment adaptable pour accueillir si besoin ces déchets.

Par ailleurs l'acceptabilité de déchets de graphite au Centre de stockage de l'Aube (CSA) est principalement contrainte par leur contenu en ³⁶Cl. La réévaluation en cours de l'inventaire en ³⁶Cl des déchets de graphite déjà stockés au CSA et celle de déchets de graphite à produire par le démantèlement des réacteurs UNGG ouvre la possibilité de gérer une partie limitée du flux à venir au CSA.

Dans ce contexte, les sections qui suivent proposent une méthodologie de recherche d'un deuxième site de stockage pour les déchets FA-VL, en accord avec les recommandations du HCTISN du 7 octobre 2011.

4.3.1 Rappel du processus de recherche de site engagé en 2008

Fin 2007, l'Andra a proposé une démarche de recherche de site progressive et fondée sur le volontariat des collectivités. En 2008, le ministre d'Etat, ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, a missionné le président du conseil d'administration de l'Andra pour engager, selon les modalités proposées, la recherche de sites susceptibles d'accueillir un stockage de déchets FA-VL.

En s'appuyant sur une étude confiée au BRGM, l'Andra a sélectionné 184 cantons présentant des caractéristiques a priori favorables, sur la base du concept à faible profondeur en milieu argileux qui avait été étudié jusqu'alors. Ces cantons se situent majoritairement dans le Bassin parisien (voir Figure 15 et encadré ci-dessous).

L'appel à candidatures a été lancé par l'Andra en juin 2008, avec l'envoi d'un dossier d'information à 3 115 communes, réparties dans 8 régions et 20 départements. Le dossier d'information transmis aux maires a par ailleurs été envoyé aux préfets des régions et des départements concernés, aux présidents des Conseils régionaux et généraux concernés, aux parlementaires des zones concernées, aux présidents des Associations départementales des maires concernées ainsi qu'aux présidents des Conseils économiques et sociaux des régions concernées.

Suite à cet appel à candidatures, 42 communes ont marqué leur intérêt pour le projet. A l'exception d'une commune en Picardie, les communes candidates étaient toutes situées en Champagne-Ardenne et en Lorraine, à une distance moyenne de 55 km des sites de l'Andra (CSA, CIRES, CMHM). Parmi ces communes candidates, 10 communes étaient situées dans le département de l'Aube et 5 dans la Communauté de communes de Soulaines¹⁷.

En juin 2009, le Gouvernement a annoncé la sélection de deux communes parmi celles qui s'étaient portées candidates pour y mener des investigations géologiques et environnementales approfondies. Sous la pression des opposants, les deux communes ont retiré leur candidature.

En 2011, le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) a réalisé un bilan de la démarche de recherche de site et formulé des recommandations pour la suite. En particulier, le Haut comité a recommandé de s'appuyer sur les résultats de l'appel à candidatures 2008 et de privilégier le choix de territoires accueillant déjà des installations nucléaires. Le Haut Comité a également recommandé que l'interlocuteur privilégié au niveau local soit a minima l'échelon intercommunal, avec le soutien de l'Etat et des grandes collectivités.

Comme indiqué au chapitre 1, l'Andra a alors repris contact en 2012 avec les collectivités où des communes s'étaient déclarées intéressées suite à l'appel à candidatures, en leur indiquant qu'elle se tenait à leur disposition pour leur présenter la démarche en cours et recueillir leurs intentions. A l'exception de la Communauté de communes de Vendevre-Soulaines, les autres collectivités où des communes s'étaient déclarées intéressées par le projet en 2008 n'ont pas renouvelé leur intérêt. En complément des investigations sur la Communauté de communes de Vendevres-Soulaines, qui accueille déjà le CSA (INB n°149), l'Andra a réalisé une analyse géologique des autres sites et territoires accueillant des installations nucléaires, sur la même base du concept à faible profondeur en milieu argileux. Ce travail n'a toutefois pas fait l'objet d'échange avec les acteurs locaux.

¹⁷ Suite à la réorganisation territoriale de 2017, la communauté de communes de Soulaines a fusionné avec celle des Rivières pour donner naissance à la communauté de communes de Vendevres-Soulaines.



Figure 15 : Localisation des cantons présélectionnés en 2008 pour l'appel à candidatures

Encadré : caractères favorables du Bassin parisien

Parmi les trois grands bassins sédimentaires français, le Bassin parisien accueille les formations argileuses présentant *a priori* le plus grand nombre de caractéristiques favorables :

- Le Bassin parisien présente une très faible activité sismique. Il est en effet localisé à l'aplomb d'un bloc cratonique stable en équilibre isostatique, qualifié d'asismique.
- Il se trouve, exception faite de son auréole triasique la plus orientale, à distance de toutes déformations actives et n'a pas été le siège de déformations néotectoniques et actives, si ce n'est sur son épaulement ardennais. Son éloignement des zones à structuration complexe et des structures tectoniques limite ainsi la présence de failles et fractures susceptibles de constituer des drains à l'origine de circulations hydrauliques.
- Les formations géologiques du Bassin parisien sont plutôt homogènes. En raison de sa nature épicontinentale, ce bassin a enregistré une phase de subsidence thermique rapide à moyenne tout au long au Mésozoïque à l'origine du dépôt de formations homogènes sur de grandes épaisseurs dans un environnement stable.
- Le contexte du Bassin parisien est plutôt limitant vis-à-vis des phénomènes d'érosion globaux : il est situé à distance de chaînes montagneuses, siège de glaciers et langues glaciaires à grand pouvoir d'érosion mécanique, et à distance des dernières calottes glaciaires nordiques.

Toutefois la présence de formations aquifères de part et d'autres des couches argileuses et l'existence de mécanismes d'érosion sont inévitables sur l'ensemble du bassin.

4.3.2 La recherche d'un site doit conjuguer critères techniques, acceptation locale et insertion territoriale

L'expérience de la recherche de site engagée en 2008 comme celle ayant mené à la construction du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne puis au projet Cigéo montrent l'importance de la concertation avec les territoires préalablement à toute décision. Si le respect de critères techniques permettant d'assurer la protection de l'homme et de l'environnement est incontournable, il ne peut y avoir de recherche de site sans manifestation d'intérêt de la part des collectivités territoriales ni travail collectif pour favoriser l'insertion du projet dans le territoire.

C'est une fois que la Communauté de communes de Soulaines a donné son accord en 2013 pour la réalisation d'investigations géologiques sur son territoire, que le Gouvernement a demandé à l'Andra d'y réaliser des investigations. L'avancement du projet a alors fait régulièrement l'objet d'une présentation aux élus et à la commission locale d'information. Une structure de concertation relative au développement du territoire a été mise en place par le préfet de l'Aube avec les élus, les producteurs et l'Andra. Suite à la première phase d'investigations (2013-2015) qui a conduit l'Andra à définir une zone de 10 km² au nord du secteur (ZR), les élus de la Communauté de communes ont délibéré en septembre 2015 pour autoriser l'Andra à poursuivre ses investigations géologiques. Les élus locaux ont également fait valoir auprès de l'Etat que le projet FA-VL était un élément à prendre en compte pour élaborer la nouvelle carte des regroupements intercommunaux¹⁸. La concertation sur le projet FA-VL bénéficiait du travail d'insertion territoriale du CSA puis du Cires mené par l'Andra et les acteurs locaux depuis les années 1990.

4.3.3 Perspectives

Pour compléter le dispositif d'ensemble de gestion des déchets FA-VL, la question peut se poser de rechercher le même type de site que celui investigué avec des propriétés un peu différentes, ou bien d'ouvrir davantage la gamme des possibilités. Dans le premier cas, la recherche risque logiquement de se heurter aux mêmes limites à la fois techniques (par exemple la sensibilité à l'érosion ou la présence d'une formation aquifère à proximité) et sociales.

Plutôt que de chercher à répondre d'entrée de jeu à cette question, il paraît plus pertinent de s'interroger dans un premier temps sur les concepts de stockage qui seraient les plus aptes à compléter celui susceptible d'être déployé sur le site investigué, en ouvrant largement sur les différentes options (par exemple quelle fonction de sûreté privilégier ?). A ces concepts complémentaires pourront alors correspondre des critères de recherche d'un site complémentaire assortis d'une pondération entre ces critères :

- Aptitude à la construction d'ouvrages simples ;
- Résistance à l'érosion ;
- Caractéristiques de l'environnement et des exutoires ;
- Capacité de confinement.

Dans une démarche d'optimisation technique et économique, le choix des solutions de gestion dépend à la fois des caractéristiques des déchets mais aussi des volumes impliqués. Il va de soi que les concepts complémentaires visent les déchets qui ne seraient pas gérés sur le site actuellement investigué. Cependant le choix entre déchets à stocker sur ce site et déchets à stocker par ailleurs n'est pas nécessairement trivial dans une optimisation globale.

Par ailleurs la prise en compte de substances apparentées permettrait non seulement de réduire à l'avenir le risque de voir le périmètre des déchets FA-VL continuer à croître, mais aussi d'ouvrir des opportunités techniques en termes de synergies et de site.

¹⁸ La réorganisation territoriale a conduit à la fusion depuis le 1^{er} janvier 2017 des communautés de communes de Soulaines et des Rivières, cette dernière étant située au sud-ouest de la Communauté de communes de Soulaines. Cela a donné lieu à la nouvelle Communauté de communes de Vendevre-Soulaines.

Enfin, comme indiqué *supra*, la recherche d'un site potentiellement apte à accueillir un centre de stockage ne peut pas se limiter à la vérification de critères techniques. Elle nécessite une démarche transparente et ouverte auprès des territoires concernés. L'adhésion au projet et la prise en compte des enjeux d'insertion territoriale sont primordiales, même si elles contraignent le champ des possibilités techniques.

Ainsi il apparaît aujourd'hui prématuré de relancer une recherche d'un site complémentaire à celui investigué sans avoir progressé sur les concepts de stockage les plus appropriés et sur les types de site correspondants. Cela permettra notamment de mieux cibler la recherche potentielle de site et de pouvoir la motiver pleinement auprès des territoires. Le lancement d'une telle recherche ne nécessitera cependant pas d'avoir au préalable figé un concept précis à retenir en complément du site investigué sur la Communauté de communes de Vendevre-Soulaines. Au contraire le maintien de quelques concepts différents en parallèle permettrait d'élargir le champ de la recherche de site, par exemple en matière de milieu géologique, de mieux associer les territoires à la démarche technique et au final d'accroître les chances de succès.

4.4 Les questions à instruire pour proposer un dispositif d'ensemble cohérent

Pour proposer un dispositif d'ensemble visant à une optimisation tant au plan des concepts que de la répartition des déchets, l'Andra propose de revenir sur un travail plus amont, à l'instar de ce qui avait été effectué en 2012 mais sur un périmètre élargi pour constituer une base plus solide :

- Regrouper les différentes familles de déchets FA-VL et substances apparentées par thématiques proches en regard de leur dangerosité ;
- Identifier et élaborer divers scénarios de gestion possibles combinant concepts et répartition des déchets, dans un esprit le plus ouvert possible vis-à-vis des possibilités techniques ;
- Evaluer comparativement ces scénarios afin de faire émerger les pistes les plus justifiées.

4.4.1 Clarifier la notion de déchet FA-VL, caractériser la dangerosité des déchets

Comme explicité dans le PNGMDR, la classification actuelle des déchets radioactifs vise schématiquement à associer à chaque catégorie de déchets une filière de gestion de l'Andra (Cf. section 2.1). Plusieurs aspects importants concernant cette classification sont à souligner :

- Il n'existe pas de critère de classement unique permettant de déterminer la catégorie d'un déchet. Il est en effet nécessaire d'étudier l'activité des différents radionucléides présents dans le déchet pour le positionner dans la classification.
- Un déchet peut relever d'une catégorie définie mais ne pas être accepté dans la filière de gestion correspondante du fait d'autres caractéristiques de ce déchet (sa composition chimique ou ses propriétés physiques par exemple) ou de contraintes spécifiques à la filière elle-même (capacités radiologiques d'un centre).

Les déchets FA-VL posent particulièrement la question de la nature de leurs points communs et de la mise en regard de cette catégorie avec un principe de gestion unique (le stockage à faible profondeur), d'autant plus que se dessine la perspective d'orienter ces déchets vers plusieurs solutions en fonction de leurs caractéristiques et de la temporalité de leur mise en stockage :

- La difficulté à définir un déchet FA-VL et le continuum des niveaux d'activités des différents déchets (§ 2.3.1) conduisent à une certaine porosité à l'interface avec les autres catégories.
- Le principe d'un stockage à faible profondeur offre une perspective théorique large dans la gestion de tout déchet non acceptable en stockage de surface existant mais dont le niveau de dangerosité semble inciter à la recherche d'une solution plus proportionnée que le stockage géologique profond. Ce cas est illustré par les enrobés bitumineux et les déchets technologiques de La Hague.

Afin de stabiliser l'inventaire des déchets à considérer dans les études rattachées à l'appellation « FA-VL », il conviendrait de chercher à objectiver la qualification d'un déchet en catégorie FA-VL autrement que par défaut par rapport aux filières existantes et à Cigéo. Cela conduirait d'une part à revisiter la place de déchets actuellement classés FA-VL par rapport aux autres déchets et, d'autre part, à rechercher des critères de classement permettant de mieux définir le contour de cette catégorie de manière intrinsèque aux caractéristiques des déchets et à leur dangerosité.

Les critères à examiner comprennent les éléments suivants :

- Activité massique du déchet, débit de dose, présence de matières fissiles (criticité), thermicité ;
- Activité totale de la famille de déchets ;
- Période radioactive, en distinguant potentiellement les demi-vies courtes (< 31 ans), longues (comprises entre 31 ans et une période intermédiaire comme celle du plutonium 240 : 6 563 ans) et très longues (> 6 563 ans) ;
- Radiotoxicité et son évolution ;
- Nature des radionucléides contenus et leur sensibilité à leur environnement, mobilité, sensibilité à la présence de matière organique ou de sels ;
- Production de radon ;
- Possibilités de marquage de l'environnement ;
- Réactivité chimique des déchets (présence de matières organiques, de sels ou de métaux réactifs).

Ce travail pourra intégrer les réflexions confiées à l'IRSN pour définir des indicateurs de nocivité¹⁹, prenant en compte à la fois les risques radiologiques et non radiologiques, vis-à-vis de la santé et de l'environnement.

4.4.2 Construire des scénarios de gestion des déchets

Partant des regroupements possibles des déchets d'une part en fonction de leurs caractéristiques physiques et d'autre part des contraintes industrielles des producteurs, diverses options de stockage seront considérées en fonction de la dangerosité des déchets et notamment de la mobilité des substances toxiques qu'ils contiennent :

- ✓ Des concepts tels que ceux déjà étudiés, mais aussi des concepts novateurs susceptibles d'apporter des réponses aux questions posées lors de l'instruction du rapport d'étape 2015,
- ✓ Des jeux d'hypothèses concernant les déchets à stocker dans le site investigué dans la Communauté de Vendevre-Soulaines, sans préjudice de l'identification de scénarios ne mettant pas en œuvre ce site,
- ✓ La prise en charge potentielle de certains déchets FA-VL dans d'autres filières (Cigéo, CSA).

Chaque scénario consolidera un ensemble d'options de manière à couvrir l'ensemble du périmètre, en recourant à plusieurs sites de stockage intégrés dans une approche cohérente et en envisageant des combinaisons de déchets par proximité d'enjeux. La temporalité des besoins de stockage sera aussi prise en compte (§ 4.1).

Les étapes antérieures de la gestion d'un déchet radioactif FA-VL jusqu'à son stockage, en passant par un traitement le cas échéant, doivent aussi être intégrées dans les scénarios (voir *infra*).

Les éléments à prendre en compte, particulièrement les besoins temporels de stockage et les étapes antérieures, nécessiteront d'associer les producteurs de déchets à ce travail.

¹⁹ Suite à l'avis de l'Autorité environnementale sur l'évaluation environnementale du PNGMDR et en réponse à l'article 1 de l'arrêté du 23 février 2017 établissant les prescriptions du PNGMDR, l'IRSN a remis en juin 2018 au GT PNGMDR une proposition de méthodologie et de critères envisageables pour apprécier la nocivité des matières et déchets radioactifs.

4.4.3 Evaluer les scénarios

Ces scénarios de gestion, une fois formalisés, devront être comparés pour mettre en exergue leurs avantages et leurs limites respectifs. Ce besoin d'évaluation comparée a été mis en exergue par l'Autorité environnementale (Ae) lors de son avis n°2016-036 du 20 juillet 2016 portant sur l'évaluation environnementale du PNGMDR (2016-2018).

L'Ae y souligne d'une part, le besoin de « *produire une évaluation comparée des impacts pour la population et l'environnement (rejets et déchets) des différentes alternatives possibles ou envisagées et de démontrer leur cohérence avec les principes de gestion qui leur sont applicables.* » ; d'autre part, elle y recommande d'« *appliquer une méthodologie adaptée à chaque filière de gestion des matières ou des déchets, en fonction des principaux enjeux environnementaux qui la concerne.*»

L'Ae appelle ainsi à mener une évaluation environnementale stratégique des différentes solutions de gestion, revenant à engager une analyse multicritère, requérant l'identification de catégories d'impacts environnementaux.

En outre, l'Ae appelle à élargir les catégories d'impact à considérer au-delà des effets liés à la radioactivité. Les critères pouvant être pris en considération relèvent en première analyse des typologies citées à la section 2.5.2.2 (page 23).

Cependant, si l'évaluation environnementale de scénarios de gestion est, sur le plan réglementaire, bien décrite sur la forme (article R122-20 du Code de l'environnement), la méthodologie détaillée de son élaboration reste à construire. Plus spécifiquement pour les filières de gestion des déchets radioactifs, cette évaluation devra répondre aux objectifs suivants :

- Être en mesure de recenser et de qualifier l'ensemble des impacts environnementaux (consommation de ressources, contaminations chimiques éventuelles, ...) et des risques en ne se cantonnant pas aux effets liés à la radioactivité des déchets ;
- Prendre en compte l'intégralité de la filière de gestion des déchets pour ne pas occulter d'éventuels transferts d'impact de l'amont vers l'aval du processus ;
- Aborder la question des temps longs et de leur appréhension pour une exhaustivité de l'évaluation des impacts actuels ou à venir.

La bibliographie montre que l'évaluation par analyse du cycle de vie (ACV) pourrait être la base d'une méthode pertinente. Elle est notamment préconisée par la recommandation européenne n°2013/179/UE pour mesurer la performance environnementale des organisations. Elle a été également retenue dans le cadre d'évaluation de performances environnementales de la gestion des déchets conventionnels.

Néanmoins, elle présente certaines limites pour une application aux filières de gestion des déchets radioactifs. Les principales limites identifiées à ce stade concernent : l'intégration des temps longs, l'intégration des effets locaux comparés aux effets globaux, la caractérisation des impacts des rayonnements ionisants en comparaison des effets chimiques et la prise en compte des risques. Par conséquent, les méthodes traditionnellement employées en ACV devront être adaptées pour répondre au mieux aux objectifs définis plus haut.

Une fois les différents impacts environnementaux objectivés, il devient possible de présenter des indicateurs d'impacts environnementaux élargis des différents scénarios de gestion. Ces indicateurs ne constitueront qu'un éclairage sous différents angles de la question des avantages et inconvénients des différents scénarios.

Néanmoins, les choix à retenir *in fine* ne pourront se faire sans une concertation approfondie des parties prenantes pour, notamment, s'accorder sur le poids des différents critères dans la décision.

Au-delà des questions environnementales, ces choix devront pleinement intégrer des enjeux d'acceptabilité sociale autour d'une dangerosité faible mais qui se maintient sur le très long terme et la recherche d'une cohérence avec la politique envisagée par les producteurs de déchets pour le démantèlement de leurs installations et le désentreposage de leurs déchets.

5. Références

- [1] Etude de la gestion durable des sources scellées usagées – Andra, 2008 - Z.RP.APRG.08.0041
- [2] PNGMDR 2010-2012 - Rapport du groupe de travail « optimisation des filières » - Orano, CEA, EDF, Solvay, Andra, 2012 - Z RP ADMR 12-0001.
- [3] PNGMDR 2013-2015 - Rapport 2015 du groupe de travail « Optimisation de la répartition des déchets entre filières de gestion » - Orano, CEA, EDF, Solvay, Andra, 2015 - FRPADPG150004.
- [4] Rapport d'étude PNGMDR 2013-2015 : Gestion à long terme des déchets à produire du procédé de conversion – Orano, Andra, 2015.
- [5] PNGMDR 2010-2012 - Etude conservatoire sur la gestion à long terme de l'uranium appauvri – Orano, 2010.
- [6] Etude des filières possibles de gestion des matières thorifères si à l'avenir elles sont considérées comme déchets – Andra, 2011 - ZRPADES110003.
- [7] PNGMDR 2010-2012 - Perspectives de valorisation du Thorium et étude conservatoire de gestion dans le cas où cette matière serait requalifiée en déchet – Orano, 2011.
- [8] Devenir des matières thorium si qualifiées de déchets - Article 4 du projet Arrêté PNGMDR 2009 – RHODIA, 2010
- [9] Etude des scénarios de gestion à long terme des déchets de faible activité massique à vie longue – Andra, 2012 - FRPADPG120020.
- [10] Projet de stockage de déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue (FA-VL) - Rapport d'étape 2015 – Andra, 2015 - FRPADPG150010.
- [11] Avis n°2016-AV-264 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire du 29 mars 2016 sur les études relatives à la gestion des déchets de faible activités à vie longue (FA-VL) remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2016-2018.
- [12] Rapport du Groupe de travail présidé par le Professeur Goguel, Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques profondes, critères techniques de choix de site, 1987
- [13] Courrier ASN du 19 juillet 2016, « étude PNGMDR : rapport d'étape du projet FA-VL relatif à la gestion des déchets de faible activité à vie longue », CODEP-DRD-2016-013550.
- [14] Etude de la possibilité de stocker d'autres types de déchets de faible activité à vie longue avec les déchets de graphite et radifères – Andra, 2008 - Z.RP.APRG.08.0048
- [15] Orientations générales de sûreté de l'ASN en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massique à vie longue – ASN 2008.
- [16] Avis n° 2016-AV-0253 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 2 février 2016 sur les études relatives à la gestion de certaines catégories particulières de déchets remises en application du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.
- [17] Avis n° 2016-AV-0256 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 9 février 2016 sur les études relatives à l'évaluation du caractère valorisable des matières radioactives remises en application du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2013-2015, en vue de l'élaboration du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2016-2018.

6. Annexe 1 : Périmètre des déchets FA-VL

Le périmètre des déchets FA-VL regroupe historiquement des déchets radifères et des déchets de graphite, auxquels se sont progressivement ajoutés des enrobés bitumineux, certaines sources scellées usagées, des déchets technologiques et des déchets uranifères à produire par l'installation de Malvési d'Orano. On ne peut exclure que d'autres colis de déchets soient aussi à considérer à l'avenir²⁰. Cette annexe présente les principales caractéristiques des diverses familles de déchets rattachées à la catégorie FA-VL en 2018.

Tableau 2 *Volumes des différents déchets FA-VL*

Familles de déchets	Volume estimé de stockage sous les hypothèses de conditionnement de 2015 (m ³)
Empilements en graphite	66 000
Chemises en graphite	9 500
Déchets UNGG de la Hague	5 000
Déchets bitumés « FA-VL »	42 000
Déchets technologiques de la Hague « CBF-C'2 FA-VL »	1 600
Déchets radifères	60 100
Divers déchets NORM	7 000
Sources et objets	2 000
Déchets de Malvési à produire à partir de 2019 de type FA-VL	55 000

6.1 Les déchets radifères

Les déchets radifères contiennent des radioéléments des trois chaînes naturelles 4N (thorium 232 et ses descendants), 4N+2 (uranium 238 et ses descendants), et 4N+3 (uranium 235 et ses descendants) avec une prédominance des chaînes 4N et 4N+2. L'activité massique moyenne des déchets est de l'ordre de 20 becquerels par gramme (Bq/g) en uranium 238 ainsi qu'en thorium 232 et de l'ordre de 60 Bq/g en radium 226 (entre quelques Bq/g et quelques centaines de Bq/g selon les déchets). Les déchets radifères exhalent du radon dû à la désintégration radioactive du radium 226.

Les déchets présentent des teneurs variables en sels solubles (nitrates, sulfates) susceptibles d'influencer la mobilité des différents radionucléides et toxiques chimiques. Le radium initial présent dans la majorité des déchets radifères se trouve sous une forme chimique peu soluble (sulfate ou phosphate). Les quantités de toxiques chimiques restent assez faibles dans l'inventaire prévisionnel. Il s'agit essentiellement de bore (2600 parties par millions, ppm), de plomb (2500 ppm), d'uranium (1 300 ppm) et de chrome (780 ppm). Des quantités limitées de nickel (120 ppm) et d'arsenic (75 ppm) peuvent aussi être observées.

Les déchets radifères regroupent différentes familles selon les activités industrielles qui les produisent.

²⁰ En particulier le CEA envisage de re-catégoriser certains de ses déchets.

6.1.1 Les déchets issus de l'extraction de terres rares (Solvay)

Jusqu'en 1994, la société Solvay (préalablement Rhône-Poulenc puis Rhodia) a traité dans son usine de La Rochelle de la monazite pour en extraire des terres rares. Cette production a généré des déchets radifères²¹ de type FA-VL. Les fûts de résidus radifères (RRA) sont entreposés sur le site CEA de Cadarache (5 090 tonnes de déchets) et sur le site de La Rochelle (environ 230 tonnes de déchets) où une petite production se poursuit, issue du lavage d'installations, d'opérations de reconditionnement ou de curage. A l'horizon 2030, la quantité estimée de résidus radifères (RRA) est d'environ 5 400 tonnes. Le conditionnement actuellement envisagé pour leur stockage pourra être soit sous la forme des fûts tels qu'entreposés, soit un placement des fûts dans un caisson métallique.

Un stock de 8 400 tonnes de résidus solides banalisés (RSB), considéré à ce jour comme de type FA-VL, est également entreposé sur le site de La Rochelle de Solvay.

Solvay étudie par ailleurs le traitement des 21 700 tonnes d'hydroxydes bruts de thorium (HBTh) pour valoriser le thorium, l'uranium et les terres rares contenus. Les déchets radifères qui seront produits par ce traitement sont estimés à 9 400 tonnes.

Enfin, la possibilité de stocker les RSB dans une filière de type TFA plutôt qu'à faible profondeur est aussi examinée compte tenu de leur faible niveau d'activité massique. Les RSB ne sont pas acceptés aujourd'hui au Cires à cause de leur contenu en thorium 232 qui ne respecte pas la capacité radiologique prévue jusqu'ici pour ce centre.

6.1.2 Les déchets issus du traitement de minerais d'uranium (CEA)

Les déchets du CEA sont issus du traitement de minerais d'uranium et de thorium et d'opérations d'assainissement du site du CEA de l'ancienne usine du Bouchet (Essonne) qui traitait ces minerais. L'usine a été exploitée de 1946 à 1970. Les résidus de traitement de minerais ont été entreposés sur le site CEA d'Itteville qui avait servi également de bassin de décantation des boues. Ce site a été réhabilité en 1993 par la mise en place d'une couverture d'argile dans le cadre de l'arrêté préfectoral du 3 août 1992.

La masse totale des déchets de la dépositante est estimée, par le CEA à 40 000 tonnes dont 28 000 tonnes de type TFA et 12 000 tonnes de type FA-VL²². Cette répartition a été effectuée sur la base de l'activité radiologique moyenne en ²²⁶Ra, ²³⁸U et ²³²Th.

Les opérations de reprise de ces déchets pour leur évacuation vers un centre de stockage définitif ne sont pas prévues par le CEA avant l'horizon 2060-2070.

6.1.3 Les déchets issus de l'assainissement d'anciens sites pollués par de la radioactivité (Andra)

Les déchets de type FA-VL issus des opérations d'assainissement de sites²³ menées par l'Andra sont entreposés dans le bâtiment de regroupement et d'entreposage du Cires ainsi que sur le site CEA de Cadarache. D'autres déchets seront également produits par les futures opérations d'assainissement de sites. La quantité de déchets de type FA-VL issus des opérations d'assainissement a été réévaluée à l'ordre de 1 400 tonnes à l'horizon 2030.

La capacité d'entreposage du Cires sera suffisante pour l'ensemble de ces déchets. A ce jour 810 m³ de déchets y sont entreposés pour une capacité de 4 500 m³. Une évacuation deviendrait nécessaire vers l'horizon 2050-2060.

²¹ Ces déchets sont également de type NORM

²² Le CEA a mené une campagne de 100 forages carottés sur la profondeur du dépôt (de 6 à 8 m), les 50 premiers ont été répartis selon un maillage uniforme sur la surface du dépôt, et les 50 carottages complémentaires ont été par la suite réalisés pour préciser la répartition entre déchets TFA et FA-VL.

²³ Il s'agit de sites ayant abrité par le passé des activités industrielles utilisant le radium ou exploitant le thorium

6.1.4 Les déchets issus de l'extraction de zirconium (Framatome, Jarrie)

Les déchets de type FA-VL produits par Framatome dans son installation de Jarrie (Isère) sont issus du procédé de fabrication d'éponges de zirconium, utilisées pour la fabrication de gaines de combustibles nucléaires. Les déchets radifères produits²⁴ sont entreposés sur le site de l'usine à Jarrie. La quantité de déchets radifères à terminaison est estimée de l'ordre de 3 700 tonnes.

La capacité d'entreposage sur le site de Jarrie étant limitée, Framatome a prévu de construire un nouvel entrepôt. Cette construction renverrait le besoin en stockage à quelques décennies.

6.1.5 Les autres déchets à radioactivité naturelle élevée (NORM)

Les déchets à radioactivité naturelle élevée (naturally occurring radioactive material, NORM) sont des déchets générés par la transformation de matières premières naturellement riches en radioéléments, non utilisées pour leurs propriétés radioactives, comme c'est le cas pour certains déchets radifères. Ces déchets sont d'origines très diverses. Les plus grands volumes (plusieurs dizaines de millions de mètres cubes) concernent les cendres de charbon, les phosphogypses et les boues rouges. Selon leurs caractéristiques, plusieurs méthodes de gestion sont pratiquées en France (valorisation, stockage in situ, stockage avec des déchets conventionnels ou avec des déchets radioactifs de type TFA). Certains de ces déchets présentent des niveaux d'activité les rattachant à la catégorie FA-VL. En plus des déchets de Solvay et Jarrie, le volume conditionné de ces déchets pris en compte dans le rapport d'étape 2015 est d'environ 7 000 m³.

La transposition en droit français de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 sur la question des expositions aux sources naturelles de rayonnements pourra élargir la gamme de déchets NORM à gérer en tant que déchets radioactifs. Les volumes concernés restent néanmoins limités en l'état des connaissances.

Selon les volumes produits, ces déchets pourraient être entreposés au Cires si leurs producteurs ne disposaient pas de capacités d'entreposage suffisantes.

6.2 Les empilements et les chemises en graphite (EDF, CEA)

Les déchets de graphite proviennent de l'exploitation et du démantèlement des réacteurs de l'ancienne filière Uranium Naturel Graphite Gaz (UNGG) et de certains réacteurs expérimentaux. L'exploitation de la filière UNGG a conduit à l'utilisation d'importantes quantités de graphite comme modérateur neutronique. Deux types de déchets sont issus de ces réacteurs : les chemises qui entouraient le combustible ainsi que les empilements, qui constituaient le cœur des réacteurs et les protections biologiques.

L'essentiel des radionucléides contenus dans les déchets de graphite sont des produits d'activation du graphite et de ses impuretés : c'est le cas notamment du cobalt 60, du fer 55 et du tritium pour les produits d'activation à période courte, du carbone 14, chlore 36, calcium 41, nickel 59 et 63, niobium 94 pour les produits d'activation à période longue. Il s'y ajoute des produits de fission (strontium 90, césium 137 et 135, technétium 99...) et des actinides (américium, plutonium...) qui ont été relâchés par des combustibles lors du fonctionnement des réacteurs.

Les plus fortes activités dans les empilements sont représentées par le carbone 14 (5 730 ans), le tritium (de période 12,3 ans) et le nickel 63 (100 ans), dans les chemises par le fer 55 (2,7 ans), le cobalt 60 (5,27 ans), le nickel 63 et le strontium 90 (29 ans). Une attention particulière est à porter à l'activité du chlore 36 qui est un radionucléide à période très longue particulièrement mobile. Le chlore 36 issu de l'activation des impuretés résiduelles de chlore présente une très faible concentration dans le graphite après irradiation (de l'ordre de la dizaine de milligrammes par tonne de graphite).

²⁴ Ces déchets sont également de type NORM.

La masse totale des déchets de graphite est de l'ordre de 22 000 tonnes, dont 19 000 tonnes d'empilements (15 000 tonnes provenant des réacteurs EDF, 4 000 tonnes des réacteurs CEA) et environ 3 000 tonnes de chemises (2 000 tonnes pour EDF entreposées à Saint-Laurent, un peu moins de 1 000 tonnes pour le CEA entreposées à Marcoule).

Les empilements seront produits lors du démantèlement des réacteurs. EDF a proposé en 2016 une évolution de sa stratégie, repoussant le besoin de mise à disposition de capacités de stockage pour les empilements à l'horizon 2070. Pour sa tête de série de démantèlement, EDF propose en référence leur stockage au CSA compte tenu de leur faible inventaire radiologique. Pour les chemises de Saint-Laurent, étant donné les incertitudes sur la date de mise en service d'un stockage à faible profondeur, EDF a décidé de construire un nouvel entrepôt, qui devra être opérationnel avant 2030, renvoyant ainsi le besoin d'un stockage à l'horizon 2070-2080.

Le CEA affiche, dans son dossier de priorisation de ses opérations d'assainissement et démantèlement remis aux autorités de sûreté en décembre 2016, que les démantèlements des réacteurs G1, G2 et G3 ne sont pas prioritaires. Ce démantèlement est différé à une date en cohérence avec les travaux pilotes menés par EDF dans le cadre de son programme de démantèlement de ses réacteurs UNGG. Pour les chemises en graphite des fosses de l'installation MAR400, le CEA envisage leur reprise au-delà de 2034 et prévoit ces déchets dans l'inventaire de dimensionnement de son futur entrepôt intermédiaire polyvalent, renvoyant ainsi le besoin en stockage au-delà de 2070.

Si aujourd'hui les résultats des études sur le traitement du graphite ne sont pas totalement probants, on ne peut exclure, à ces échéances lointaines, l'hypothèse que des évolutions en matière de R&D ouvrent la voie à un tel traitement qui supprimerait le besoin de stockage en l'état de ces déchets.

6.3 Les déchets dits UNGG de La Hague (Orano)

Les déchets dits UNGG de La Hague d'Orano proviennent du traitement des combustibles UNGG entre 1966 et 1990. Historiquement, il s'agit des déchets entreposés dans les silos 115 et 130 et les décanteurs 1 et 2. Entre 2016 et 2017, suite aux opérations de reprise et de conditionnement des déchets anciens (RCD) de l'usine UP2-400 et dans le cadre du projet DFG d'Orano²⁵, le périmètre de ces déchets a évolué avec l'incorporation des déchets actuellement entreposés dans le décanteur 8 et les fosses 211-06, 217-01 et 217-02. Ils se caractérisent par leur hétérogénéité physico-chimique : graphite, magnésium, acier inoxydable, uranium métallique, diatomées, zéolithes, résines échangeuses d'ions (billes ou broyées). Leur masse est de 1 118 tonnes. Les plus fortes activités sont représentées par le césium 137 (30 ans), le plutonium 241 (14 ans), le nickel 63 (100 ans) et le strontium 90 (29 ans).

Orano examine plusieurs options pour le devenir de ces déchets, y compris pour certains un stockage en surface. En tout état de cause, une fois les déchets repris et conditionnés, ils pourront être entreposés pendant plusieurs dizaines d'années sur le site de La Hague. Il est à noter que ces déchets représentent de faibles volumes et un apport limité en émetteurs bêta à vie longue et alpha.

6.4 Les fûts d'enrobé bitumineux de Marcoule (CEA)

Les fûts d'enrobé bitumineux de Marcoule (FEB) proviennent du traitement des effluents liquides radioactifs générés par les installations du CEA sur le site de Marcoule. Environ 62 000 fûts sont entreposés sur le site de Marcoule.

Lors de leur production, ces fûts ont été entreposés dans des fosses en zone nord du site et dans des casemates en zone sud. Tous les fûts de la zone nord ont été repris, sur-conditionnés en fût inox et sont actuellement entreposés à l'EIP (Entreposage intermédiaire polyvalent) à Marcoule. La reprise des colis entreposés dans les casemates en zone sud afin de les transférer après sur-conditionnement vers l'EIP est en cours.

L'EIP est fondé sur un concept modulaire constitué d'alvéoles (16 au maximum, chacune d'une capacité d'environ 6 000 fûts EIP) construits en tant que de besoin. Deux alvéoles ont été construits et mis en service en 2000, le CEA construit actuellement deux alvéoles supplémentaires.

²⁵ Le projet DFG (Déchets de faible granulométrie) d'Orano vise la reprise et le conditionnement en cimentation de déchets actuellement entreposés dans différents décanteurs et fosses du site de la Hague

Pour entreposer la totalité des fûts d'enrobés bitumineux présents sur le site de Marcoule il faut 10 à 11 alvéoles. Eu égard à la capacité de chaque alvéole et aux cadences d'entreposage dans l'EIP et de désentreposage vers le centre de stockage, la mise en service d'un stockage avant 2030 permettrait d'éviter la construction de deux alvéoles EIP.

Ces déchets présentent un spectre radiologique diversifié. Les plus grandes activités radiologiques sont représentées par le césium 137, le strontium 90, le plutonium 241 et l'américium 241. Une attention particulière est à porter à l'iode 129, au chlore 36, au technétium 99 et aux plutoniums 239 et 240.

Le CEA a mis en œuvre un programme d'analyses radiochimiques lors des opérations de reprise des fûts entreposés dans les casemates. Ces analyses montrent que les teneurs en iode 129 et chlore 36 sont inférieures aux limites de détection. Cela a conduit à réévaluer depuis 2010 les inventaires radiologiques de ces radioéléments, à un niveau très faible.

Depuis 2006, les fûts produits entre 1966 et 1995 hors assurance qualité (environ 33 000 fûts) ont été orientés vers la catégorie FA-VL après leur refus au Centre de stockage de l'Aube (CSA). En 2017, le CEA a ré-analysé la répartition des fûts d'enrobé bitumineux de Marcoule entre catégories FA-VL et MA-VL, compte tenu de l'actualisation des connaissances sur ces fûts. Cette analyse a conduit le CEA à demander à l'Andra d'inscrire 99 % de ses FEB dans l'inventaire de dimensionnement d'un stockage FA-VL, seuls 1 % relevant alors de Cigéo. Néanmoins la totalité des FEB de Marcoule seraient maintenus par précaution dans l'inventaire de réserve de Cigéo.

Les quantités de FEB à considérer dans les études de stockage de déchets FA-VL en constituent une incertitude notable.

6.5 Déchets technologiques de la Hague (colis CBF-C'2 FA-VL, Orano)

Les déchets technologiques d'Orano du site de la Hague sont générés par l'exploitation de différents ateliers et laboratoires du site et par les opérations de maintenance ou de démantèlement. Depuis mars 1994, une partie des déchets technologiques de La Hague est conditionnée dans des conteneurs en béton-fibres cylindriques de type CBF-C2. Ils sont actuellement triés sur la base des critères d'acceptation des colis au CSA : les colis dépassant les critères de débit d'équivalent de dose et de limite maximale d'activité alpha à 300 ans sont entreposés sur le site de La Hague (colis de déchets CBF-C'2) et sont tous inscrits par défaut dans l'inventaire de référence de Cigéo.

Le retour d'expérience d'Orano de la production d'environ 4 800 colis de 1994 à fin 2010 montre que les caractéristiques de ces colis conduisent à une répartition continue entre des valeurs de critères acceptables au CSA et des valeurs plus élevées. De ce fait, dans le cadre des travaux du groupe de travail PNGMDR « optimisation de la répartition des déchets entre filières », Orano a estimé qu'une partie des colis (environ 30 %) affectés aujourd'hui par défaut à Cigéo pourrait relever d'une catégorie « FA-VL » et a demandé à l'Andra, en 2013, d'analyser la possibilité de leur stockage à faible profondeur sur le site investigué. La projection de cette répartition à la production jusqu'à 2043 (environ 8 300 colis) conduirait à un nombre de colis d'environ 2 500. S'il dépasse les critères d'acceptation du CSA, le niveau d'activité à vie longue de ces colis de déchets reste faible et présente une décroissance marquée dans le temps (§ 2.3.2.4), ce qui a motivé leur prise en compte dans les études d'un stockage à faible profondeur. Ces colis contiennent essentiellement du césium 137, du strontium 90, du plutonium (238, 239, 241), de l'américium 241 et du cobalt 60.

Dans son avis sur le rapport d'étape FA-VL 2015, l'ASN estime que ces déchets devraient relever d'un stockage dans Cigéo.

6.6 Sources scellées usagées et objets au radium, thorium ou uranium

Les études menées par l'Andra sur la gestion de sources scellées usagées et des objets au radium, au thorium ou à l'uranium ont conduit à considérer la prise en charge de différentes sources à l'américium et au radium, en particulier des détecteurs de fumée, dans le stockage à faible profondeur ainsi que d'une partie des objets au radium, au thorium ou à l'uranium. Ces déchets sont, pour la partie collectée par l'Andra, entreposés au Cires.

Le volume de ces déchets, in fine, n'est pas figé à ce jour. Il dépend en particulier des opérations de collecte menées par l'Andra et de la consolidation des inventaires des sources et objets réalisée par leurs détenteurs (Défense nationale, CEA, CisBio...). A ce stade un volume prévisionnel d'environ 2 000 m³ est considéré. Ce volume devra être consolidé dans les années à venir dans le cadre des études demandées par le PNGMDR sur ces déchets.

6.7 Les résidus de conversion de l'uranium (Orano, Malvési)

L'installation d'Orano à Malvési (Aude) met en œuvre depuis 1960 la première étape de la conversion de concentrés uranifères provenant des mines en procédant à leur purification et à leur transformation en tétrafluorure d'uranium (UF₄). Cette transformation produit des résidus du traitement de conversion de l'uranium (RTCU) contenant essentiellement de l'uranium 238, de l'uranium 234 et du thorium 230.

Afin de pérenniser le fonctionnement du site et de sécuriser la gestion des déchets solides de procédé à venir, Orano a développé deux projets destinés, d'une part à réduire le volume des déchets solides produits et à privilégier les filières de gestion existantes, et d'autre part à traiter (par un procédé thermique) les futurs effluents liquides de procédé, conjointement à ceux déjà entreposés dans les bassins d'évaporation.

Ces évolutions du procédé conduiraient à différencier quatre familles prévisionnelles de déchets de procédé à produire :

- des fluorines et des gypses issus d'une évolution de procédé consistant à séparer à la source les déchets qui seront produits à l'avenir par l'usine ;
- un stock de boues déshydratées issues de la vidange et de la filtration des déchets déjà présents dans les bassins de décantation lors de la mise en œuvre de l'évolution de procédé ;
- des déchets solides issus du traitement thermique des effluents liquides nitrates qui seront produits par le fonctionnement à venir des installations de conversion, mais aussi par la reprise du stock déjà entreposé dans les bassins d'évaporation.

Le PNGMDR distingue les déchets « historiques » et à « produire ». Orano est chargée de développer une solution de gestion à long terme des déchets historiques, aujourd'hui entreposés dans l'INB « Ecrin »²⁶. En revanche le PNGMDR 2016-2018 considère que les déchets à produire devront être pris en charge dans les filières de gestion de déchets radioactifs existantes ou en projet gérées par l'Andra. L'analyse exploratoire menée conjointement par Orano et l'Andra a montré que les gypses et les boues déshydratées seraient ainsi susceptibles de relever de la catégorie FA-VL. A la date de 2015, il s'agissait d'un stock de boues déshydratées d'environ 35 000 m³ et d'un flux de production moyen de gypses de 570 m³/an (volume conditionné) entre 2020 et 2054.

Pour mémoire, le PNGMDR estime le volume de déchets historiques de Malvési de type FA-VL à 355 000 m³.

²⁶ Anciens bassins de l'usine implantés sur des stériles ou résidus de l'ancienne mine de soufre de Malvési

7. Annexe 2 : Retour d'expérience d'ouvrages de génie civil réalisés à faible profondeur dans des formations argileuses

Cette annexe synthétise l'analyse du retour d'expérience apporté par un ensemble de pratiques ou de chantiers de génie civil menés à faible profondeur en milieu argileux.

7.1 Grands terrassements à ciel ouvert et couverture remaniée

7.1.1 Comblement de carrière en fin d'exploitation

- **Similitudes :**

Bien que présentant *a priori* peu de similitude avec le concept étudié pour les déchets FA-VL, le retour d'expérience de la pratique du comblement de carrières en fin d'exploitation est toutefois intéressant en matière de gestion des eaux et de constitution d'un remblai de grande hauteur.

En fin d'exploitation du site ou d'une zone l'exploitant doit, dans le cadre de son dossier réglementaire remettre en état le site conformément au projet de réaménagement prévu à la demande d'autorisation d'exploiter. Ce réaménagement est par ailleurs couvert par une garantie financière.

- **Objectifs recherchés :**

Outre la mise en sécurité du site, les principaux objectifs recherchés sont principalement paysagers et environnementaux. Il s'agit de restituer le site de manière à garantir le développement de la biodiversité et la colonisation d'habitats tout en limitant les déformations qui pourraient affecter la stabilité des ouvrages et les contraintes hydrologiques fixées.

- **Performances atteintes :**

Le parti paysager retenu permet de satisfaire les critères de sécurité tout en valorisant la biodiversité du site. La stabilité de l'ouvrage est garantie mais celui-ci n'est pas dimensionné pour mettre en place des fonctionnalités particulières. De fait, des tassements des remblais mis en œuvre sont acceptables car ceux-ci sont intégrés dans la géométrie de telles sortes que les écoulements soient pérennes.

La mise en œuvre des matériaux nécessite généralement l'assèchement du carreau de la carrière. Cette mesure impose la mise en œuvre des pompes.

La gestion des eaux en phase travaux est un élément clé pour la réussite des aménagements.

- **Caractéristiques des matériaux :**

Les matériaux mis en œuvre sont de natures très diverse. En premier lieu sont utilisés les stériles de carrière, les matériaux de découverte, des matériaux de classe 3 de provenance extérieure. Peu de critères sont imposés si ce n'est de limiter les apports à des matériaux naturels non pollués.

- **Opérations d'entretien et de surveillance :**

Généralement il n'y a pas de protocole de surveillance mis en place si ce n'est d'un point vue environnemental : développement de l'habitat et suivi des espèces.

De la même façon il n'y a pas d'opération de maintenance sauf en cas de modification de l'hydrologie du site.

- **Enseignements pour le stockage à faible profondeur:**

Le point majeur à retenir concerne la gestion des eaux. Il est indispensable de garantir l'exhaure des eaux avant mise en place des remblais et par conséquent de dimensionner le pompage en considérant les périodes d'intempérie et en intégrant une redondance des dispositifs, comme cela est réalisé dans les mines à ciel ouvert pour des profondeurs supérieures à 40 m.

7.1.2 Ouvrages en terre des infrastructures linéaires : déblai expérimental de Gumond sur l'autoroute A 89

- **Similitudes :**

Le chantier expérimental considéré ici a pour but de valider le réemploi des matériaux extraits (pélites) pour la constitution des remblais de la section courante autoroutière tout en précisant les modes d'utilisation et d'exploitation économiquement fiables et réalistes.

- **Objectifs recherchés :**

Il s'agit de définir les conditions de mise en œuvre des différents faciès pour garantir la stabilité des remblais et la non évolution des matériaux mis en œuvre :

- Comportement des pélites altérées traitées à la chaux en assise de remblai.
- Procédure d'exécution pour réutiliser les pélites argileuses rocheuses en corps de remblai (épaisseur des couches, énergie de compactage, teneur en eau) pour garantir un matériau non évolutif.
- Procédure d'exécution pour réutiliser les argiles rippées et minées en couche de formes avec traitement chaux + ciment à différents dosages et énergie de compactage.

- **Caractéristiques des matériaux :**

Les matériaux extraits sont issus des formations permo-carbonifères du bassin de Brives. Ce sont principalement des pélites présentes sous trois faciès :

- Pélites argileuses altérées A2
- Pélites argileuses « rocheuses » R31 ($V = 2500$ à 3000 m/s) se dégradant en argiles A2 similaires à la phase altérée pouvant contenir des minéraux réputés gonflants : smectites et montmorillonites.
- Pélites gréseuses R 34 ($V = 2500$ à 3500 m/s) se dégradant en sable B3 à B5

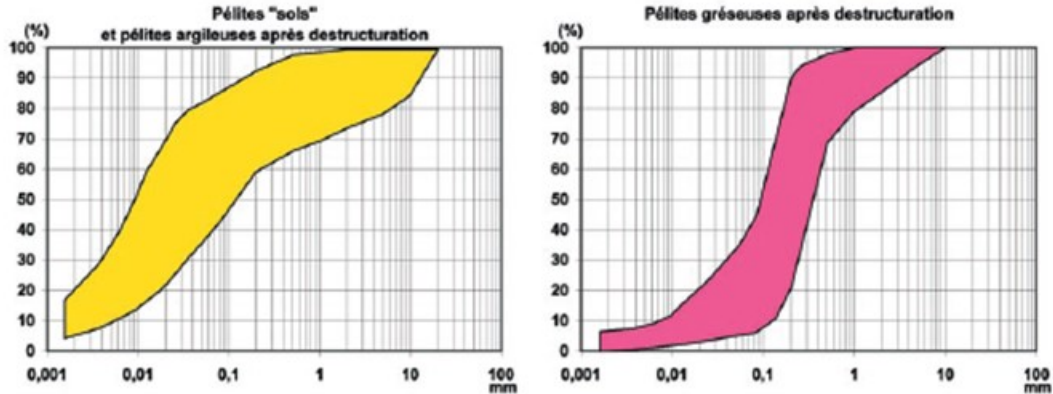


Figure 16 : Courbes granulométriques des pélites

Les pélites argileuses R31 sont évolutives peu fragmentables mais fortement dégradables. Leur utilisation en remblai routier est déconseillée du fait des risques d'évolution granulaire et du comportement à moyen et long terme dus aux charges apportées par le remblai, conjuguées à d'éventuels changements d'état hydrique.

Les pélites gréseuses R34 sont des roches évolutives fragmentables dont la granulométrie et la teneur en eau lors de la mise en œuvre conditionnent les possibilités de réutilisation ainsi que la stabilité des ouvrages.

Les pélites altérées A2 sont sensibles à l'eau : chute de la portance après imbibition et gonflement significatif pour les argiles compactées coté sec.

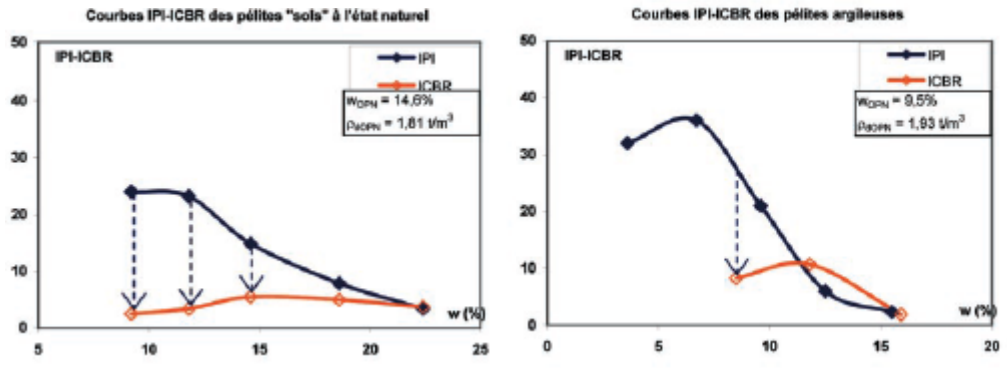


Figure 17 : Caractéristiques des pélites

- Performances atteintes :

Les enseignements issus du chantier expérimental ont permis de valider les conditions de réemploi des pélites argileuses altérées et rocheuses : évolution granulométrique, épaisseur des couches, énergie de compactage, et diminution de la sensibilité des argiles altérées à l'imbibition après traitement à la chaux (réaction pouzzolanique : augmentation de la rigidité, floculation des argiles : diminution de la plasticité, augmentation de la perméabilité).

L'ensemble de ces mesures a permis de maîtriser les déformations du corps de remblai.

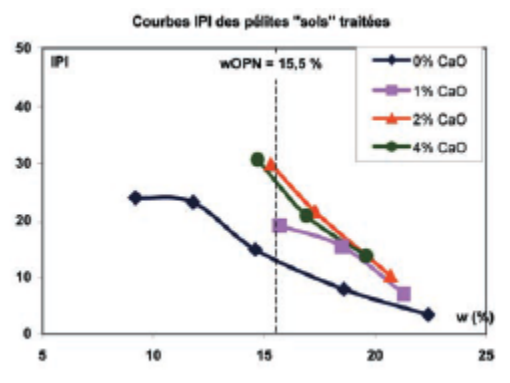


Figure 18 : Caractéristiques des pélites traitées

- Opérations d'entretien et de surveillance :

Lors de la montée du remblai une instrumentation a été mise en place, principalement des tassomètres complétés par des inclinomètres, des piézomètres et un suivi topographique en fin de remblai.

A partir de l'exploitation de l'ensemble des mesures de suivi, sur une durée de 19 mois, il a été conclu que, dans la mesure du respect des règles établies pour la mise en œuvre des matériaux, la réutilisation en remblai des pélites était possible tant sur le plan technique qu'économique.

Les tassements internes du remblai expérimental mesurés sur la période sont négligeables et les déformations horizontales en tête (stabilité des talus) faibles, stabilisées au bout de deux ans.

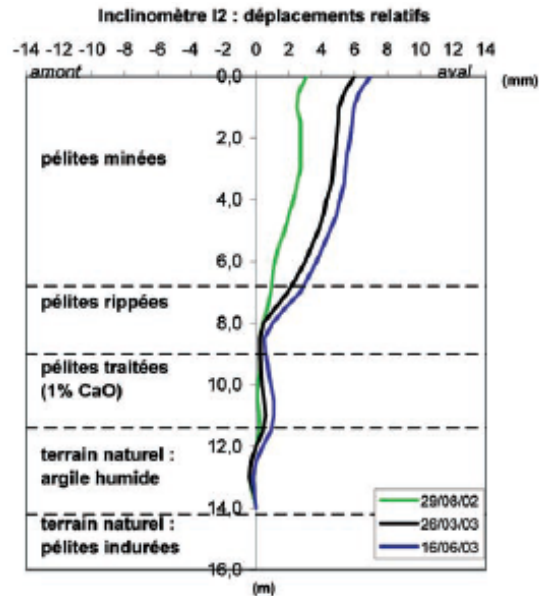


Figure 19 : Comportement des pélites

- Enseignements pour le stockage à faible profondeur :

Les principaux enseignements concernent les conditions de mise en œuvre des matériaux, notamment en terme d'évolution granulométrique et de correction de la teneur en eau nécessaires pour garantir la stabilité de l'ouvrage et le non évolution des matériaux.

Le retour d'expérience quant au traitement à la chaux est positif pour une amélioration des performances mécaniques et la diminution de la sensibilité à l'eau dans le contexte du chantier mais par ailleurs le traitement à la chaux augmente les perméabilités de manière significative.

7.1.3 Barrage de Moulay Bouchta (Maroc)

De Moulay Bouchta au Maroc est un barrage de 60 m de haut avec noyau argileux. L'étanchéité au niveau de l'assise et des appuis est assurée par une paroi moulée en béton souple.

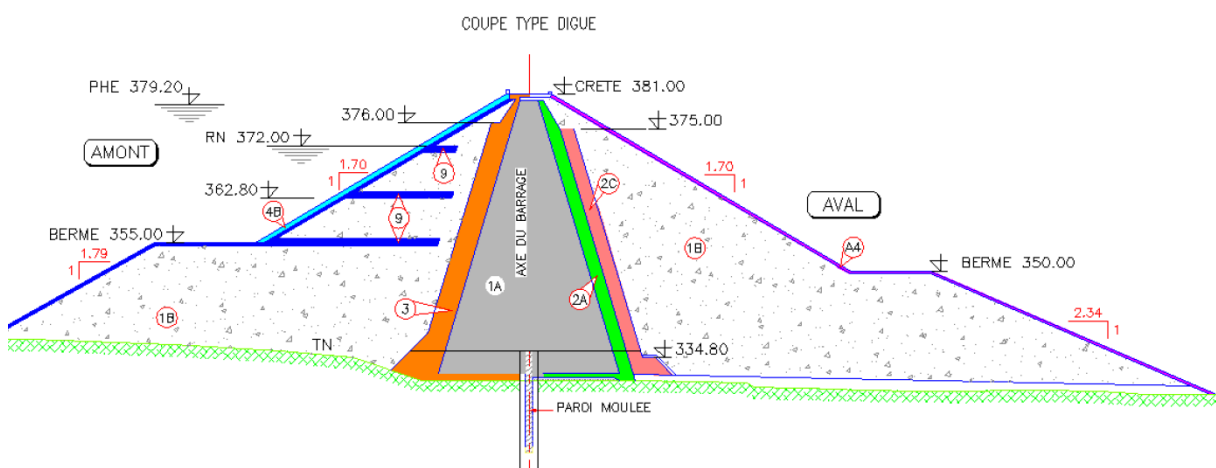


Figure 20 : Coupe du barrage Moulay Bouchta

- Similitudes :

Les points de similitude avec le projet FA-VL sont un remblai de grande hauteur, des conditions de perméabilité faible et une valorisation des matériaux argileux.

- **Objectifs recherchés :**

Les principales fonctions à assurer sont les suivantes :

- Garantir la stabilité de l'ensemble en phase provisoire et définitive
- Constituer une barrière hydraulique afin de limiter les écoulements et ainsi maîtriser les débits de fuite au sein du noyau mais également au niveau de l'assise.
- Réutiliser les déblais argileux pour la constitution du noyau.

- **Performances atteintes :**

La valorisation des matériaux argileux a été possible en adaptant les conditions d'extraction et de préparation (suppression des blocs de plus de 300 mm). La procédure de mise en œuvre : teneur en eau, épaisseur des couches, énergie de compactage a permis de satisfaire la condition d'homogénéité du noyau. Ceci a pu être vérifié par des mesures de densité et des mesures de perméabilité. Globalement la perméabilité était inférieure à 10^{-9} m/s.

La mise en œuvre des épaulements de part et d'autre du noyau à l'avancement a permis de garantir la stabilité de l'ouvrage et a protégé le noyau de la dessiccation.

L'inclusion de la paroi moulée dans la base du noyau sur une hauteur de 4 m a permis d'assurer l'étanchéité au contact de l'assise.

- **Caractéristiques des matériaux :**

Principalement les matériaux extraits étaient des flyschs (pélites) de classification A2.

- **Opérations d'entretien et de surveillance :**

On ne dispose pas du protocole de surveillance adopté pour cet ouvrage particulier mais celui-ci est généralement calé pour ce type d'ouvrage sur les recommandations professionnelles. Il inclut en général la pose d'inclinomètres, de piézomètre, des cellules de tassement, un suivi topographique et un contrôle des débits de fuite.

- **Enseignements pour le stockage à faible profondeur:**

Les principaux enseignements concernent les conditions de réemploi des matériaux argileux pour obtenir les perméabilités escomptées tout en conservant les caractéristiques géomécaniques pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

En parallèle les études de formulation conduites sur les bétons de la paroi ont permis d'aboutir à un béton souple de faible déformation avec une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s.

7.1.4 Synthèse des contrôles sur les barrières passives des centres de stockages de déchets managers et industriels

Le concept de barrière passive des installations de stockage de déchets conventionnels est similaire sur plusieurs points au concept de reconstitution d'une couverture argileuse remaniée pour déchets FA-VL.

Les dispositions imposées pour l'implantation d'un stockage de déchets ménagers ou industriels intègrent une barrière passive avec des performances spécifiées : notamment la couche supérieure doit être caractérisée par une perméabilité inférieure à 10^{-9} m /s.



Figure 21 : *Réalisation de barrières passives*

- **Enseignements pour le stockage à faible profondeur:**

- Plasticité des matériaux :

Plus les matériaux présenteront un faciès limoneux (A1 selon la norme NFP 11 300) plus il sera difficile d'obtenir les performances escomptées sans traitement complémentaire à la bentonite.

Plus les matériaux seront plastiques (A3 selon la norme NFP 11 300) plus les performances escomptées seront atteignables mais avec beaucoup de difficultés de mise en œuvre liées à la faible traficabilité des matériaux dans les plages de teneur en eau visées (coté humide de la courbe Proctor).

La synthèse des chantiers réalisés montre que les matériaux A2 sont les plus faciles à travailler pour respecter l'objectif de perméabilité.

- Homogénéité des matériaux :

Quel que soit le matériau utilisé, la constitution d'un pré-stock est indispensable pour homogénéiser le gisement (déblai du site ou apport extérieur).

- Procédure de mise en œuvre :

L'obtention d'une performance de 10^{-9} m/s dans l'épaisseur de chaque couche unitaire et à l'interface de deux couches nécessite les opérations suivantes :

- ✓ Préparation des argiles sur stock : humidification des argiles coté humide du PN, suppression des mottes (80 % des mottes inférieures à 20 mm, diamètre max des mottes inférieur à 60 mm).
- ✓ Mise en œuvre par couche unitaire de 30 - 35 cm avec passage du pulvimixeur sur 40 à 45 cm (épaisseur de la couche rapportée + 10 cm)
- ✓ Compactage de la couche au pied dameur.
- ✓ Protection de la couche vis-à-vis de la dessiccation et du gel.

7.1.5 Plateforme de la tranche 2 du Cires

Le retour d'expérience présenté ici sur le Cires porte sur la reconstitution de la barrière passive argileuse sur plusieurs mètres, travaux préparatoires nécessaires en vue d'obtenir un massif d'argile homogène avant réalisation de la fouille. Bien qu'il ne s'agisse pas de la réalisation de la couverture du Cires, la problématique se rapproche de la mise en œuvre d'une couverture remaniée pour des déchets FA-VL.

- **Similitudes :**

Il s'agit certainement du projet qui présente le plus de similitudes avec le concept de couverture argileuse remaniée. En effet il s'agit de reconstituer la plateforme qui accueille les alvéoles de stockage du Cires tout en garantissant à court et long terme les performances escomptées.

La reconstitution a été faite sur 5,6 m d'épaisseur.

- **Objectifs recherchés :**

L'objectif principalement recherché est de garantir le confinement des déchets à long terme. Pour cela le projet prévoit le respect de l'épaisseur de la couche d'argile Aptienne sous le niveau inférieur des déchets (7 m) et l'obtention d'une perméabilité maximale de 10^{-9} m/s.

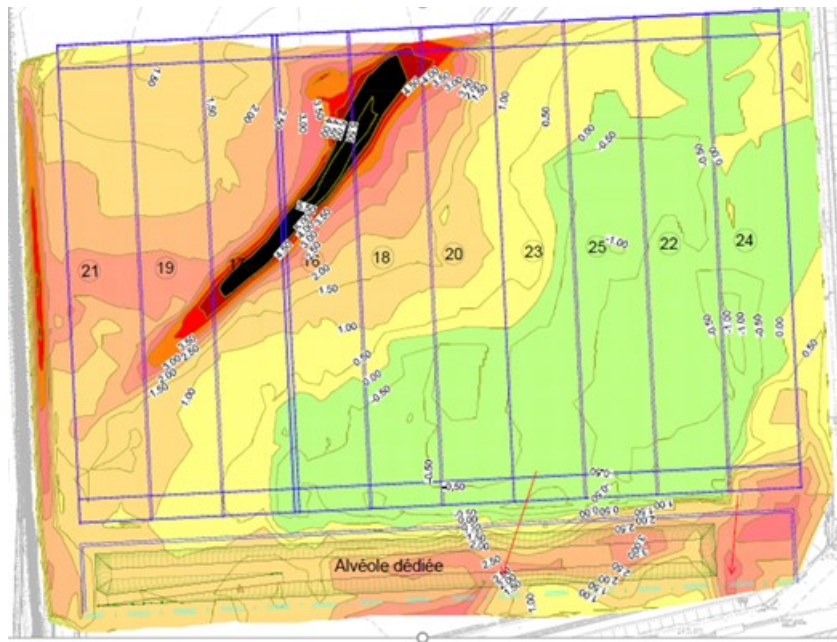
En parallèle la reconstitution de la plateforme doit garantir une homogénéité de la couche verticalement et latéralement, garantir une continuité des performances aux interfaces argiles en place / argiles remaniées et présenter des caractéristiques géomécaniques suffisantes pour le creusement des alvéoles.

La méthodologie appliquée pour la reconstitution de la barrière passive en argile est basée sur les résultats de la thèse de Sophie Camp Ép Devernay « COMPORTEMENT SOUS FLEXION D'UNE ARGILE : APPLICATION A LA COUVERTURE D'UNE ISD TFA » (Sciences de l'ingénieur [physics], Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008).

- **Performances atteintes :**

Le plan de contrôle réalisé pour la préparation de la tranche 2 a permis de démontrer que les performances souhaitées étaient atteintes.

Quelques essais de perméabilité ont été réalisés sur les argiles en déblais (argiles en place) afin de vérifier que l'argile de l'Aptien en place avait bien été dégagée et qu'elle présentait les caractéristiques de perméabilité attendues. Tous les essais présentent des perméabilités inférieures à 10^{-9} m/s.



Cartographie des zones de déblai/remblai d'argile après sondages



Figure 22 : *Zones de déblai/remblai d'argile*

Mesures de la teneur en eau

Des mesures de teneur en eau ont été réalisées avant humidification (environ 1 mesure pour 500 m² de remblai), après mise en œuvre et malaxage (idem), et après compactage (environ 1 mesure pour 350 m² de remblai). Après compactage 100 % des teneurs en eau étaient supérieures à $W_{opn} + 2\%$, sans excéder $W_{opn} + 2.5\%$. La teneur en eau a été parfaitement maîtrisée.

Mesures de la densité sèche

Des mesures au gammadensimètre de la densité sèche ont été réalisées sur chaque couche d'argile mise en œuvre (20 mesures par couche et par jour de réalisation, soit environ 1 mesure pour 150 m² de remblai). Le critère fixé a été respecté, à savoir : 95 % des valeurs > 98.5 γ_d ref.

Mesures de la perméabilité

Plus de 100 mesures de perméabilité ont été réalisées en remblai (soit environ 1 tous les 1 500 m³) et 4 en déblai. Chaque essai mesurant la perméabilité en forage sur 60 cm d'argile, les essais ont été

réalisés toutes les 2 couches de 30 cm, ce qui a permis de tester toutes les couches (soit environ 1 mesure pour 2 500 m² de remblai. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Perméabilité en m/s	Moyenne	Maxi	Mini	Nbre de valeurs
Contrôle externe par l'entreprise	4.69*10 ⁻¹⁰	9.80*10 ⁻¹⁰	1.70*10 ⁻¹²	79
Contrôle extérieur par le maître d'ouvrage	3.49*10 ⁻¹⁰	2.38*10 ⁻⁹ *	3.80*10 ⁻¹³	24
Global (ensemble des contrôles)	4.42*10 ⁻¹⁰	2.38*10 ⁻⁹	3.80*10 ⁻¹³	103

* Seule valeur au-dessus du seuil de 1*10⁹ m/s

Tableau 3. Mesures de perméabilité

- **Enseignements pour le stockage à faible profondeur:**

Ce retour d'expérience démontre qu'il est possible de maîtriser la perméabilité des argiles reconstituées pour des volumes et des surfaces importantes (130 000 m³ reconstitués pour la tranche 2 du Cires).

Outre les contrôles qui ont permis de vérifier la perméabilité, les terrassements des alvéoles dans cette partie reconstituée ont permis de vérifier l'absence d'anomalie au droit des talus que ce soit au niveau des couches élémentaires, des inter-couches ou que ce soit au niveau des interfaces avec les argiles en place.



Figure 23 : Terrassement à l'abri d'un dôme de protection

7.1.6 Paroi moulée

Le retour d'expérience proposé se fonde sur la note de dimensionnement d'une paroi moulée de grande hauteur (26 m environ) dans des matériaux partiellement argileux. Le projet correspondant consiste en la construction d'un bassin de lutte contre la pollution constitué d'un réservoir de stockage des eaux pluviales et d'une station de relèvement. Le projet est situé à Lille (Angle des rues Paul Ramadier et des Bateliers). La station de pompage et le bassin de stockage enterré de 20.000 m³ sont réalisés par paroi moulée + radier.

	Bassin de stockage	Station de pompage
Diamètre	42 m	25 m
Profondeur du radier	26 m	15 m

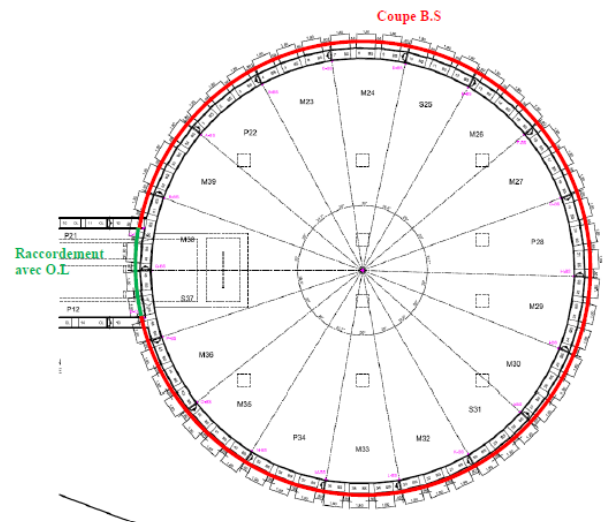


Figure 24 : Caractéristiques et vue en plan du bassin de stockage

7.1.6.1 Caractéristiques des matériaux

Formation	Profondeur (m/TA)	Epaisseur
Remblais	De 0 à 3 m	3.00 m
Limons quaternaires	De 3.00 à 6.25 / 8.25 m	3.25 à 5.25 m
Sables d'Osticourt (Landénien)	De 6.25 / 8.25 m à 16.25 / 18.00 m	8.00 à 11.75 m
Argile de Louvil (Landénien)	De 16.25 / 18.00 à 22.25 / 23.00 m	4.25 à 6.75 m
Tuffeau de base	De 22.25 / 23.00 m à 28.25 / 29.00 m	5.25 à 6.75 m
Craie du Sénonien	A partir de 28.25 / 29.00 m	

Sur le plan hydrologique, le site est baigné par 2 nappes aquifères *a priori* isolées l'une de l'autre par les argiles de Louvil, l'une libre, contenue dans les sables (niveau piézométrique vers 7.00 m de profondeur) et l'autre captive, contenue dans la craie (Niveau piézométrique entre 10 et 14 m de profondeur).

➤ Caractéristiques mécaniques des sols

Bassin de stockage

Sol	Profondeur (m/TA)	Epaisseur (m)	Em (Mpa)	PI* (MPa)	Rd (MPa)
Remblais et sols remaniés	De 0 à 4.50 / 5.60	De 4.50 à 5.60	1.50 à 5.67	0.11 à 0.74	0.60 à 11.00
Les sables d'Osticourt	De 4.50 / 5.60 à 17	De 11.40 à 12.50	8.98 à 140	1.74 à 5.84	1.70 à 20
L'argile de Louvil	De 17 à 25.00	8.00	6.12 à 37.7	0.78 à 3.05	-
« Tuffeau » de base	De 25.00 à 28.70 / 29.80	De 3.70 à 12.80	60.7 à 389	> 4.82	-
La craie du Sénonien	De 28.70 / 29.80 à 40.00* / 56.00*	-	146 à 556	> 4.82	-

Station de pompage :

Sol	Profondeur (m/TA)	Epaisseur (m)	Em (Mpa)	PI* (MPa)	Rd (MPa)
Remblais et sols remaniés	De 0 à 2.00 / 5.10	De 2.00 à 5.10	2.39 à 14.5	0.57 à 0.85	2.10 à 13.00
Les sables d'Osticourt	De 2.00 / 5.10 à 16.50 / 17.00	De 11.90 à 14.50	2.97 à 120	0.58 à 5.36	4.50 à 22.00
L'argile de Louvil	De 16.50 / 17.00 à 24.00 / 25.00*	De 7.50 à 8.00	4.96 à 33.10	1.05 à 3.28	-
« Tuffeau » de base	De 24.00 à 30.00	6.00	54.30 à 299	> 4.75	-
La craie du Sénonien	De 30.00 à 35.00*	5.00	219 à 266	> 4.80	-

➤ Perméabilités des sols

Plusieurs essais d'eau ont été effectués dans les sondages carottés (Essais Lefranc). Seul un essai Lugeon a été effectué dans le sondage SC2 à 41 m de profondeur / TA.

Sondage	Prof. Essai / TA (m)	Cote essai NGF (m)	Nature du sol / étage stratigraphie	Perméabilité k (m/s)
SC1	25.5 - 26.5	-2 / -3	Argile ferme voire indurée (AL)	5×10^{-8}
	35.1 - 36	-11.6 / -12.5	Craie blanche fracturée du Sénonien	5×10^{-8}
	44 - 45	-20.5 / -21.5	Craie blanche fracturée du Sénonien	5×10^{-6}
SC2	25 - 26	-0.6 / -1.6	Argile ferme (AL)	4×10^{-8}
	32 - 33	-7.6 / -8.6	Craie blanche fracturée du Sénonien	2×10^{-6}
	39.5 - 41	-15.1 / -16.6	Craie blanche fracturée du Sénonien	0
	47 - 48	-22.6 / -23.6	Craie blanche fracturée du Sénonien	6×10^{-6}
	53.8 - 55	-29.4 / -30.6	Craie dure grise du Turonien	1×10^{-5}
	61 - 62	-36.6 / -37.6	Marnes du Turonien	8×10^{-6}
	68 - 69	-43.6 / -44.6	Marnes du Turonien	UL = 226
SC3	9 - 10	14.4 / 13.4	Argile silteuse (SO)	1×10^{-5}
	13.5 - 14.5	9.9 / 10.9	Sable fin avec passées argileuses (SO)	6×10^{-7}
	19 - 20	4.4 / 3.4	Argile très ferme (AL)	5×10^{-8}
	20 - 21	3.4 / 2.4	Argile indurée (AL)	5×10^{-8}
	21.5 - 22.5	1.9 / 0.9	Argile très ferme (AL)	5×10^{-8}
SC4	10 - 11	13.2 / 12.2	Sable grésifié avec passées argileuses (SO)	3×10^{-7}
	14.5 - 15.5	8.7 / 7.7	Sable grésifié avec passées argileuses et indurées (SO)	2×10^{-5}
	21 - 22	2.2 / 1.2	Argile très ferme avec niveaux indurés (AL)	2×10^{-8}
	23 - 24	0.2 / -0.8	Argile plastique (AL)	7×10^{-9}
SC5	8 - 9	15.1 / 14.1	Argile sableuse avec niveaux indurés (SO)	6×10^{-7}
	23 - 24	0.1 / -0.9	Argile ferme avec niveaux indurés (AL)	5×10^{-8}
SC6	12 - 13	11.4 / 10.4	Sable fin et niveaux grésifiés (SO)	2×10^{-7}
	19.5 - 20.5	3.9 / 2.9	Argile ferme avec niveaux indurés (AL)	2×10^{-8}
SC7	6 - 7	16.8 / 15.8	Remblai sablo-limoneux	2×10^{-7}
	9 - 10	13.8 / 12.8	Argile sableuse ferme (AL)	2×10^{-7}

Avec : AL = Argiles de Louville et SO = sables d'Ostricourt

7.1.6.2 **Approche dimensionnelle**

Le dimensionnement recherché est basé sur les 2 entrants suivants :

- Epaisseur de paroi imposée de 100 cm ;
- Soutènement autostable en phase travaux et en phase de service.

La première partie de la note de dimensionnement de la paroi moulée consiste à analyser les contraintes générées sur la paroi par les grues de chantier (Figure 25).

La surcharge appliquée par la grue CKE 800 est inférieure à la charge d'exploitation prise par défaut et qui vaut 2 t/m^2 . Il en résulte que cette surcharge n'a pas à être prise en compte dans les calculs. Les phases de travaux sont reportées sur la coupe de calcul (Figure 26) :

Phase 1 :

- Réalisation de la paroi à partir de la plate-forme de forage à 24 NGF (soit niveau TN)
- Réalisation de la poutre de couronnement
- Terrassement au fond de fouille à -4.70 NGF avec rabattement de la nappe à - 5.70 m NGF

Phase 2 :

- Application de la surcharge du camion Bc 300 kN

Phase 3 :

- Application de la surcharge de la grue GMK 4080-1

Phase 4 :

- Réalisation du radier non butonnant (présence d'un joint sec de 4 cm entre la paroi et le radier).
- Réalisation de la dalle de couverture de 40 cm à la cote 23.20 NGF.

Les phases de service retenues sont reportées sur la coupe de calcul (Figure 26) :

Phase 5 :

- Fluage du béton
- Calcul en EF niveau +16.50 NGF avec station vide

Phase 6 :

- Application de la surcharge du camion Bc 300 kN

Phase 7 :

- Application de la surcharge de la grue GMK 4080-1

Phase 8 :

- Calcul en EB niveau +6.00 NGF avec station pleine

Phase 9 :

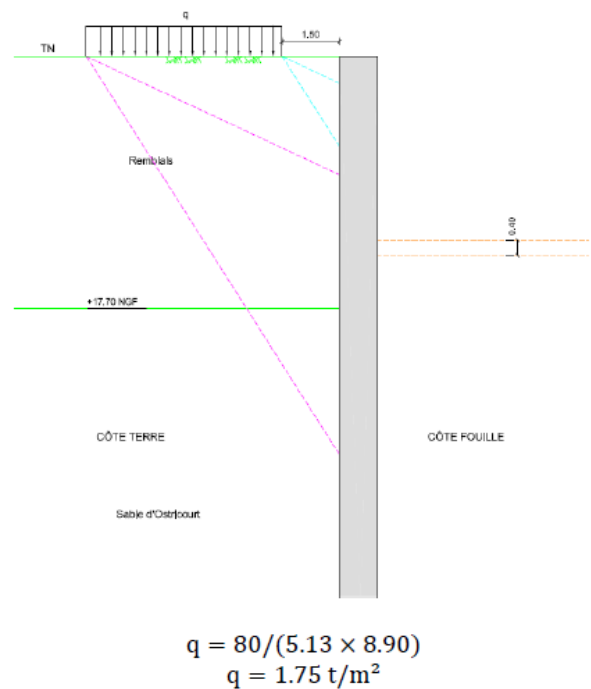
- Calcul en EH niveau +19.00 NGF avec station vide

Phase 10 :

- Calcul en EE niveau +19.50 NGF avec station vide



**La grue mobile à chenilles
type CKE 800**



$$q = 80 / (5.13 \times 8.90)$$

$$q = 1.75 \text{ t/m}^2$$

Figure 25 :

Analyse des contraintes générées sur la paroi par les grues de chantier

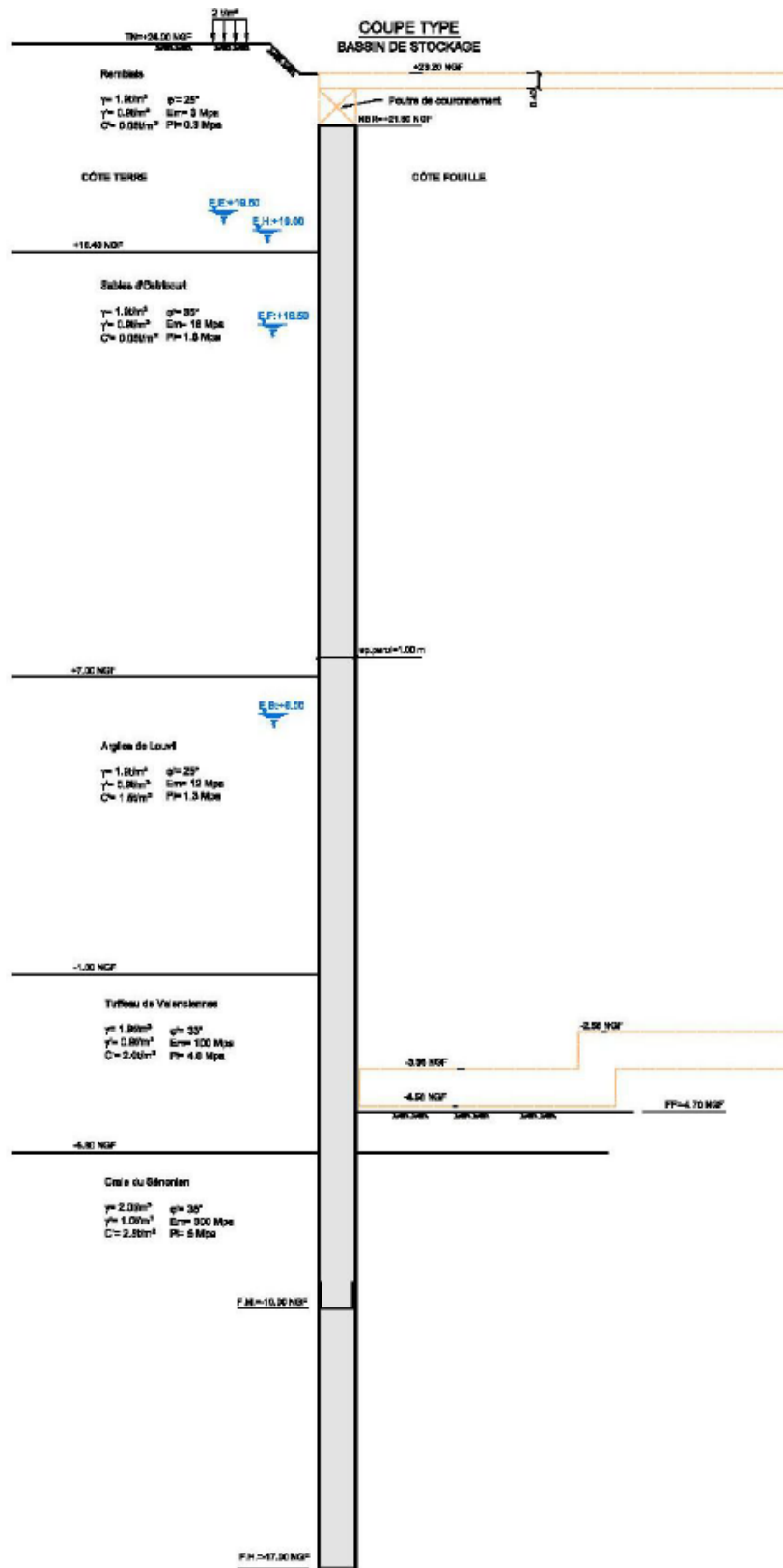


Figure 26 : Coupe de calcul

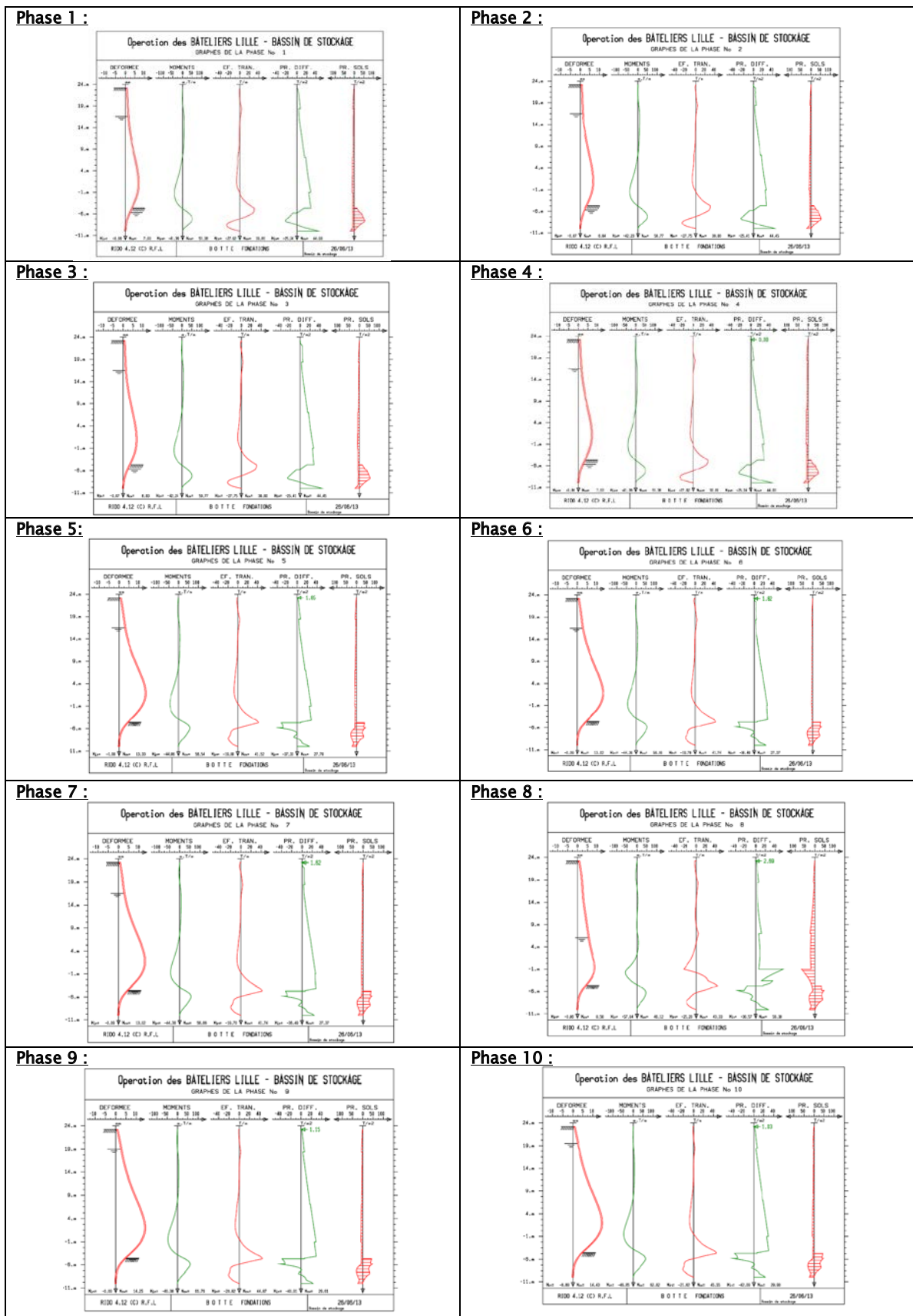


Figure 27 : Graphes RIDO obtenus en fonction de chaque phase de calcul

Les autres paramètres vérifiés par le calcul dans le cadre du dimensionnement de la paroi moulée sont :

- Vérification de la fiche
- Vérification de la flèche
- Vérification de la contrainte dans le béton
 - Vérification des cages courantes
 - Vérification des cages de liaison avec l'ouvrage de liaison
- Ferrailage
 - Armatures longitudinales
 - Armatures transversales
 - Vérification des ouvertures de fissures
- Stabilité de la paroi au droit du raccordement avec l'ouvrage de liaison
- Capacité portante

Les justifications présentées ci-dessus tiennent compte d'un ajout de surcharge de Caquot qui annule l'effet du gradient hydraulique induit de manière perverse par la modélisation d'un décroché de nappe. En effet la nappe est emprisonnée sous le radier, donc le gradient n'existe pas et une compensation s'impose. La méthode utilisée est conforme aux recommandations de la notice du logiciel RIDO.

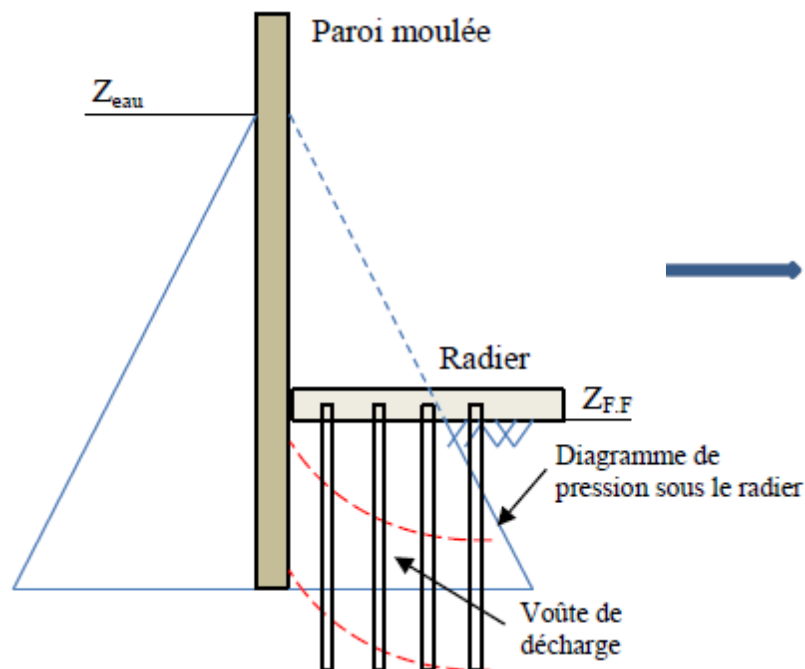


Figure 28 : Effet du gradient hydraulique

7.1.6.3 Opérations d'entretien et de surveillance :

Dans le cadre du projet une instrumentation a été mise en place pour suivre à chaque étape de creusement la déformée de la paroi. Des inclinomètres ont été suivis associés à des mesures topographiques. Les mesures obtenues ont mis en évidence une déformation inférieure aux déformées calculées.

7.1.6.4 Enseignements pour le stockage à faible profondeur:

Ce retour d'expérience montre qu'il est possible de mettre en œuvre des parois moulées autostables dans les formations argileuses pour constituer les alvéoles de stockages.

7.2 Ouvrages réalisés en souterrain

7.2.1 Ouvrages souterrains réalisés en méthode conventionnelle

7.2.1.1 Ligne 11 métro Parisien Tunnel Lilas Liberté (Argiles Vertes)

Dans le cadre du prolongement de la ligne 11 du métro parisien, un puits et une galerie d'essai ont été réalisés sur la commune des Lilas. Cette galerie servira d'accès pour les futurs travaux au droit du prolongement entre la station Mairie des Lilas et la station Gainsbourg (tunnel réalisé en méthode conventionnelle).

Le puits présente un diamètre excavé de 10,2 m environ et une hauteur de 18,3 m environ. A la fin du terrassement du puits, une galerie a été réalisée dans les Argiles vertes en méthode conventionnelle avec des passes de terrassement variables entre 0,8 m et 1 m et pose d'un soutènement provisoire composé par des cintres HEB 160 et du béton projeté. Ce soutènement est complété avec un présoutènement devant le front comportant un boulonnage du front avec boulons en fibre de verre et voute parapluie. La demi-section supérieure a été excavée dans un premier temps sur une longueur totale de 16 m environ. La section présente une largeur maximale de presque 10 m (au niveau des pattes d'éléphant) et une hauteur de 5 m environ.

Les argiles vertes sont des argiles très plastiques (IP de l'ordre de 46), de caractéristiques pressiométriques relativement faibles ($p_l = 1,3$ MPa, $E_m = 20$ MPa avec une cohésion court terme C_u estimée à 70 kPa).

Au niveau des Lilas, on retrouve ces argiles sous une couverture d'une dizaine de mètres de calcaire de Brie, avec une épaisseur de 10 à 12 m.

En résumé, il s'agit d'un tunnel excavé en milieu urbain dans des formations argileuses déformables sous faible couverture (de l'ordre du diamètre d'excavation). La problématique du chantier est donc la maîtrise des déformations, en particulier en surface (présence de bâtis sensibles). Pour cela, même si à court terme le front de taille est stable, le confortement du front de taille est indispensable afin de limiter les déformations du front (extrusion).

Dans le cadre de cette galerie d'essai, il a été mesuré une extrusion de l'ordre de 10 mm et des tassements en surface qui ont atteint 25 mm en fin de terrassement et 30 mm après stabilisation (2 mois après la fin de terrassement).

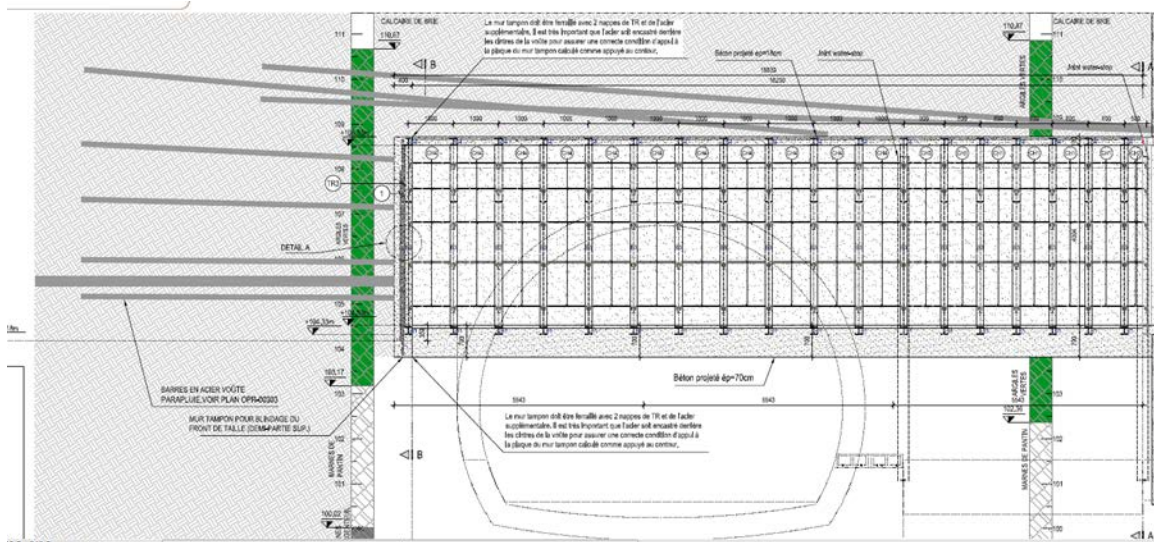


Figure 29 : Profil en long de la galerie Calmette



Figure 30 : Front de taille avec renforcement par boulons fibre de verre

7.2.1.2 **Cross rail croisement C300/C410**

Les argiles de Londres sont également une argile très plastique (IP compris entre 30 et 55, moyenne de l'ordre de 45), avec une cohésion C_u augmentant avec la profondeur entre 80 et 350 kPa.

Cet horizon présente une épaisseur pouvant atteindre une centaine de mètres dans le contexte Londonien.

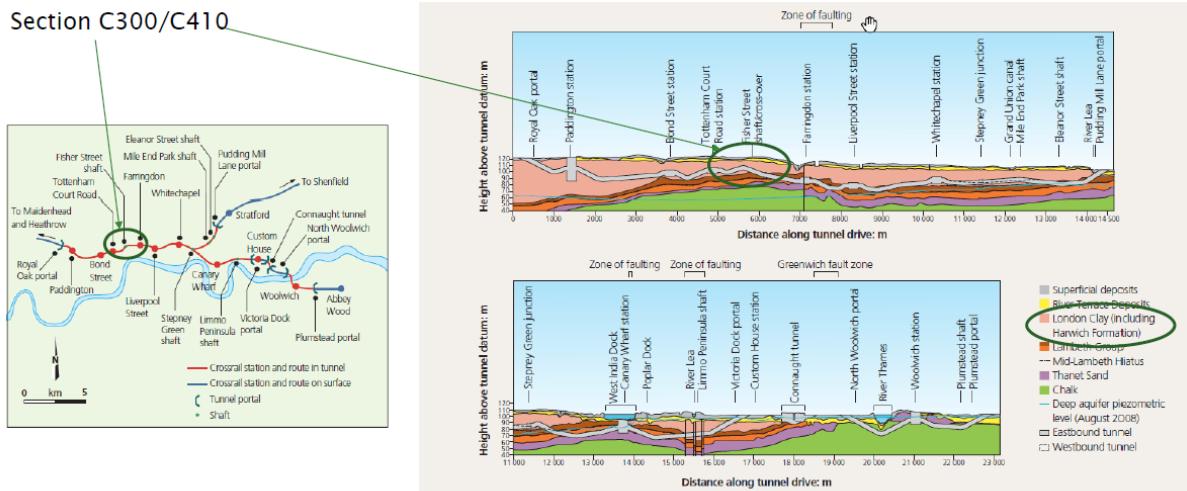


Figure 31 : Localisation Cross rail section C300/C410

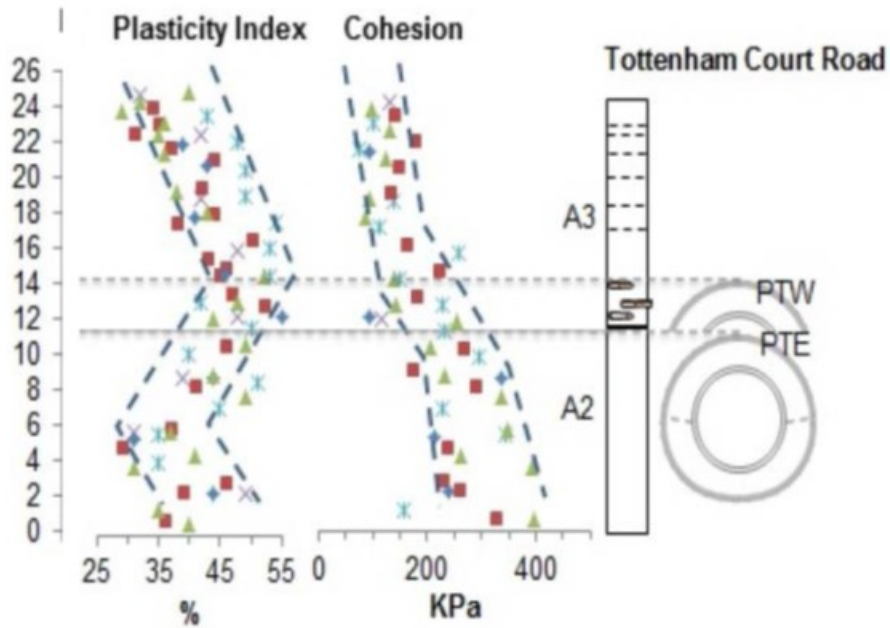


Figure 32 : *Caractérisation des Argiles de Londres*

De nombreux travaux ont été réalisés en méthode conventionnelle dans cette formation. Dans le cadre du projet Cross rail, une jonction entre deux tubes de métro a été réalisée (croisement C300/C400) nécessitant un élargissement du tunnel jusqu'à une largeur de 12 m : aucune instabilité du front n'a été constatée, mais des déformations importantes ont été mesurées en surface (jusqu'à 45 mm).



Figure 33 : *Front de taille dans les argiles de Londres sans renforcement*

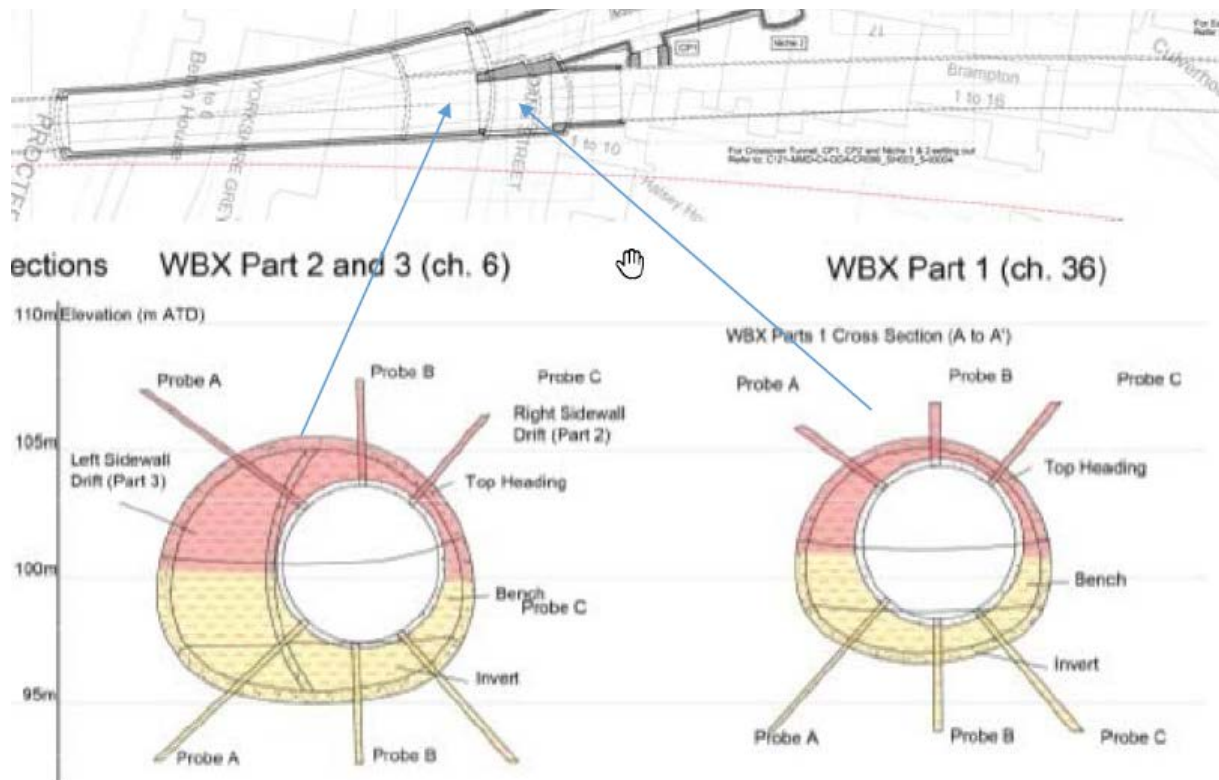


Figure 34 : *Coupes en travers*

7.2.1.3 Enseignements concernant la méthode conventionnelle dans les argiles à faible profondeur

Ces deux exemples de chantier réalisés sous faible couverture dans des argiles plastiques montrent la faisabilité de telles excavations. Néanmoins, cette technique montre ses limites en termes de maîtrise des déformations, que ce soit au niveau de l'excavation (convergences souvent pluri centimétrique) ou en surface. Ce type de méthodologie nécessite la mise en place d'un soutènement lourd, complété par un présoutènement important (voûte parapluie, boulonnage du front de taille) réduisant les cadences d'avancement.

Les conditions d'excavation sont fortement dépendantes de la tenue des argiles à court terme (cohésion, déformabilité), en relation avec la couverture (facteur de stabilité $N = \sigma_v/c_u$) : avec une cohésion inférieure à 100 kPa et 30 m de couverture ($N=6$), le front est fortement plastifié et instable. Si la cohésion est supérieure à 300 kPa, le présoutènement peut être fortement réduit.

7.2.2 Ouvrages souterrains réalisés en méthode mécanisée par tunneliers

7.2.2.1 Métro de Lille

Le métro de Lille a été réalisé entre 1994 et 1999. Il s'agit d'un tunnel de 6,8 m de diamètre intérieur.

Le lot 2 a été excavé à l'aide d'un tunnelier en grande partie dans les argiles de Flandres (Yprésien) caractérisée comme une argile plastique, avec un indice de plasticité IP généralement compris entre 30 et 80 et une cohésion C_u comprise entre 100 et 300 kPa, sous une couverture variant entre 10 et 25 m.

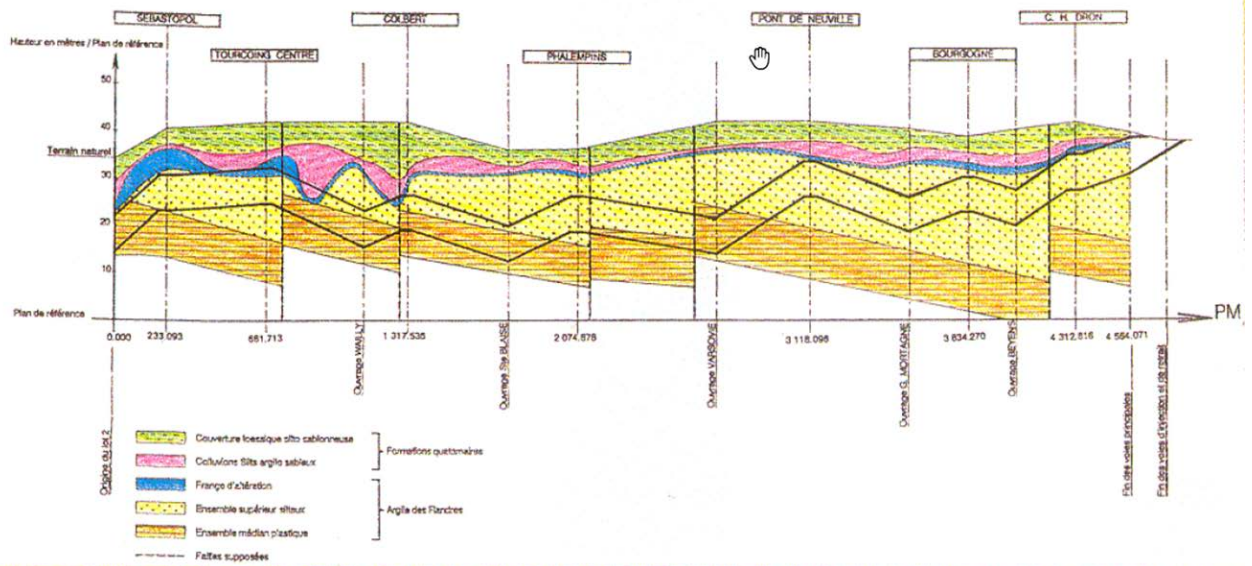


Figure 35 : Profil en long métré de Lille

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce projet :

Objet des travaux		Ligne 2 - Lot 2- tunnel de 4000ml foré au tunnelier	
Date		1995-1997	
Caractéristiques du tunnelier	mode de confinement	Pression de terre	
	diamètre foré	7,72m	
	poussée	5250 T	
	additif au front	injection de mousse dans la chambre afin de fluidifier les argiles et éviter les colmatages et régulariser la pression de confinement	
Soutènement revêtement		voussoirs épaisseur 34cm	
Géologie hydrogéologie géotechnique		Argile des Flandres (Yprésien) caractérisée comme une argile plastique, gris bleu indice de plasticité généralement compris entre 30 et 80 Cu compris entre 100 et 300 kPa SPT indiquent une valeur moyenne N=25	
Hauteur de couverture		10 à 25 m (soit 1,5D et 3D environ)	
Avancements		moyenne : 15 ml/j ; 290 ml/mois	
Tassements en surface		inférieurs au cm	
Références articles		- fiche tunnelier AFTES - Pression de terre à Lille du lot 1 au lot 3, F. Mauroy, TOSn°128, 1995	

On notera comme enseignement sur ce projet une bonne maîtrise des déformations (tassements inférieurs au centimètre en surface), avec des avancements moyens corrects (250 ml /mois). Les principales difficultés sont liées aux risques de colmatage, difficultés maîtrisées avec l'adjonction de mousse dans la chambre.

7.2.2.2 Galerie hydraulique de Dunkerque

Le tunnel du terminal LNG de Dunkerque sert à acheminer une partie des eaux tièdes issues de la centrale nucléaire de Gravelines jusqu'au terminal méthanier afin de regazéifier le gaz liquide par réchauffement.

Le tunnel de 5 km de long, 3,8 m de diamètre a été creusé au tunnelier à pression de terre en 23 mois de creusement. Son tracé est inscrit exclusivement dans les Argiles de Flandres, sous une couverture de l'ordre de 45 m constituée d'argile des Flandres sur 7 à 12 m puis d'alluvions.

Sur le secteur de Dunkerque, l'épaisseur d'argile des Flandres atteint une centaine de mètres. Il s'agit également d'une argile plastique (IP variant entre 40 et 75). Ses caractéristiques augmentent avec la profondeur avec en particulier une cohésion évoluant entre 50 kPa à proximité de son toit jusqu'à 400 kPa en base de la couche (cf figure 12). Au niveau de la galerie hydraulique, il a été retenu une cohésion de l'ordre de 130 kPa et un module de déformation de l'ordre de 50 MPa.

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce projet.

Objet des travaux	Réalisation d'une galerie hydraulique entre la centrale de Gravelines et le terminal LNG de Dunkerque- tunnel de 5024 ml foré au tunnelier	
Date	2013-2015 (creusement)	
Caractéristiques du tunnelier	mode de confinement	Pression de terre
	diamètre foré	3,72m
	poussée	800 Tonnes en service, 1216 T en situation exceptionnelle
	Pression au front	entre 0 et 1 bar sous le port, jusqu'à 3 bars sous le CNPE
Soutènement revêtement	voussoirs ep.25cm	
Géologie hydrogéologie géotechnique	Argile des Flandres (Yprésien) caractérisée comme une argile plastique indice de plasticité généralement compris entre 40 et 80 (60 en moyenne) Cu compris entre 20 et 200 kPa sur les 15 premier mètres d'argiles (augmente avec la profondeur) : 120 à 150 kPa à l'axe du tunnel PI moyen de 1,2 MPa ; qc moyen de 3 MPa ; Em = 23 MPa ; E= 46 MPa à Court terme	
Hauteur de couverture	45 m en moyenne, 7 à 12 m d'Argile en couverture	
Avancements (moyens/maxi)	moyenne : 400 à 500 ml/mois (hors arrêt tunnelier)	
Tassements en surface	20 mm au démarrage (Zone du Clippon), inférieur à 10 mm zone CNPE	
Références articles	JP. Janin, P. Renier, A. Bergère et H. Le Bissonnais - WTC, San Francisco, April 2016 JP. Janin, P. Renier et H. Le Bissonnais - AFTES, Paris, Novembre 2017	

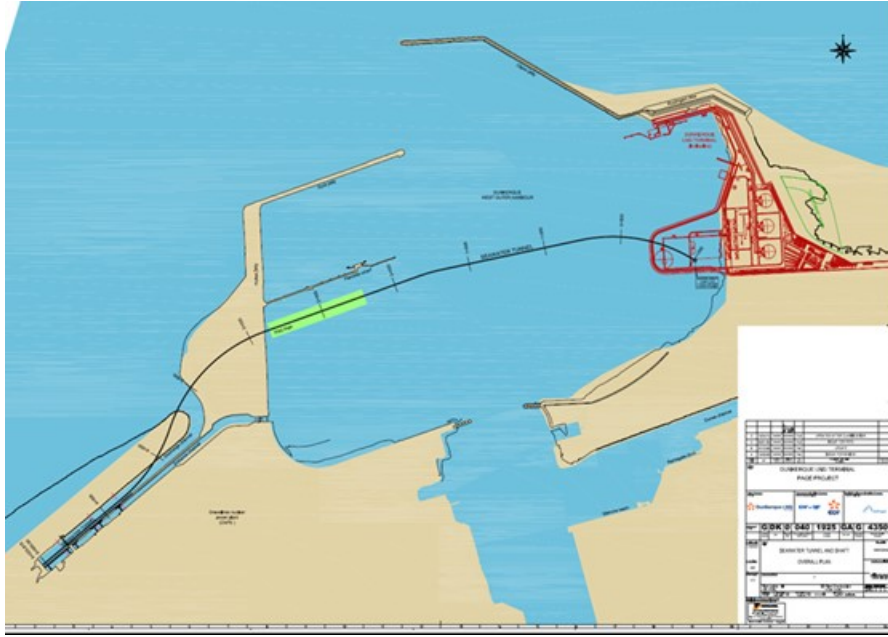


Figure 36 : Vue en plan du tracé de la galerie

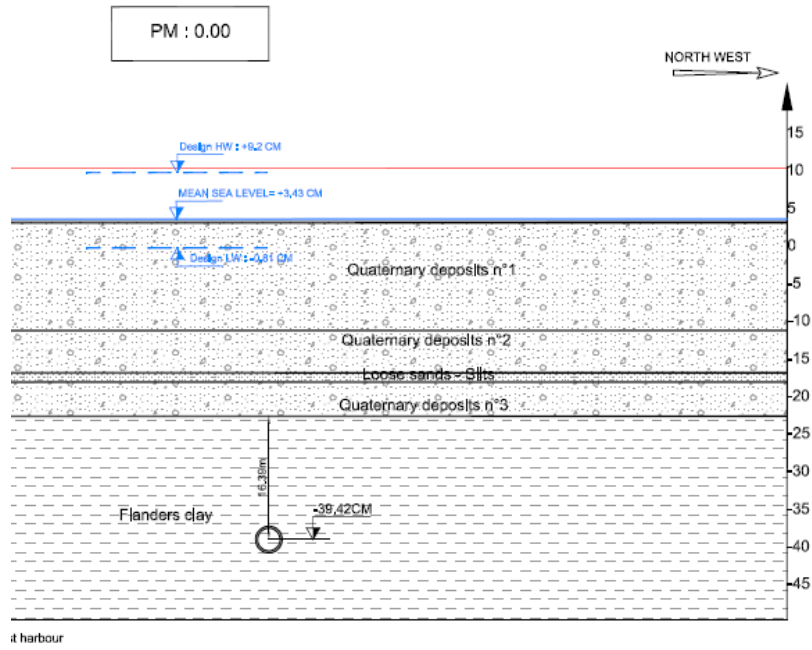


Figure 37 : Coupe en travers

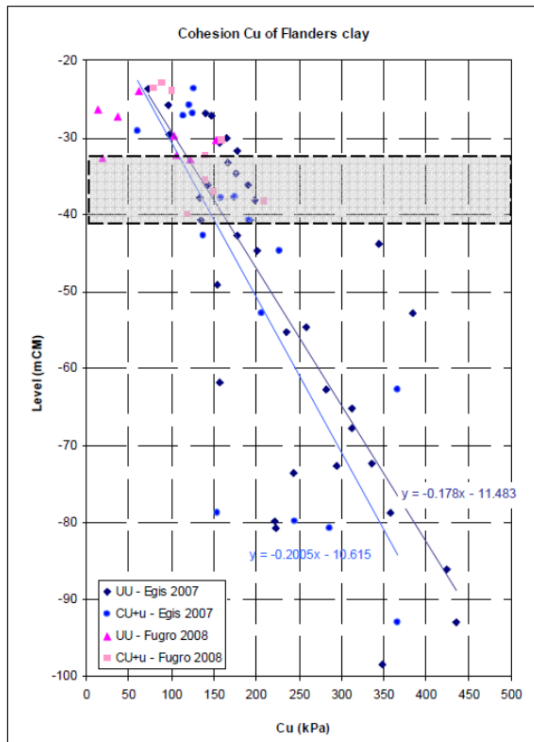


Figure 38 : *Evolution de la cohésion de l'argile de Flandre avec la profondeur et front de taille*

Les principaux éléments marquants de ce projet sont :

- Réalisation d'une galerie de recul sur 30 ml au démarrage du tunnelier à l'aide du fonçage d'une trousse coupante : si cette méthodologie a plutôt bien fonctionné, il a néanmoins été constaté des instabilités de front de taille qui ont nécessité la mise en place de boulons en fibre de verre.
- une avarie majeure du tunnelier, alors que le tunnelier était encore sous la mer (rupture de l'entraînement entre les motoréducteurs et la roue de coupe). La réparation devant se faire depuis l'avant du tunnelier, coté roue de coupe, il a été nécessaire de réaliser en méthode traditionnelle une galerie latérale au tracé, d'une cinquantaine de mètres depuis l'arrière du tunnelier, et une chambre de démontage juste devant la roue de coupe.
- le creusement sous la centrale nucléaire de Gravelines, où le tunnelier ne devait pas générer en surface plus de 1 cm de tassement. Une zone en remblai a permis de tester au préalable les paramètres de pilotage du tunnelier (pression de confinement de la chambre et derrière la jupe, pression d'injection du mortier de bourrage) et les modèles de calcul. Les tassements dans ce secteur ont finalement été limités à 6 mm.

7.2.2.3 Grand Paris Express (Argile Plastique)

La ligne 15 sud du Grand Paris Express intercepte les Argiles Plastiques de l'Yprésien sur plusieurs kilomètres entre Issy et Arcueil. Il s'agit d'une argile très plastique de teinte grise sur quelques mètres puis devenant bariolée (bleuâtre, verdâtre rouille à lie de vin). Son épaisseur peut atteindre 18 m à l'ouest de la gare d'Arcueil, avec une épaisseur moyenne plutôt de l'ordre de 8 m.

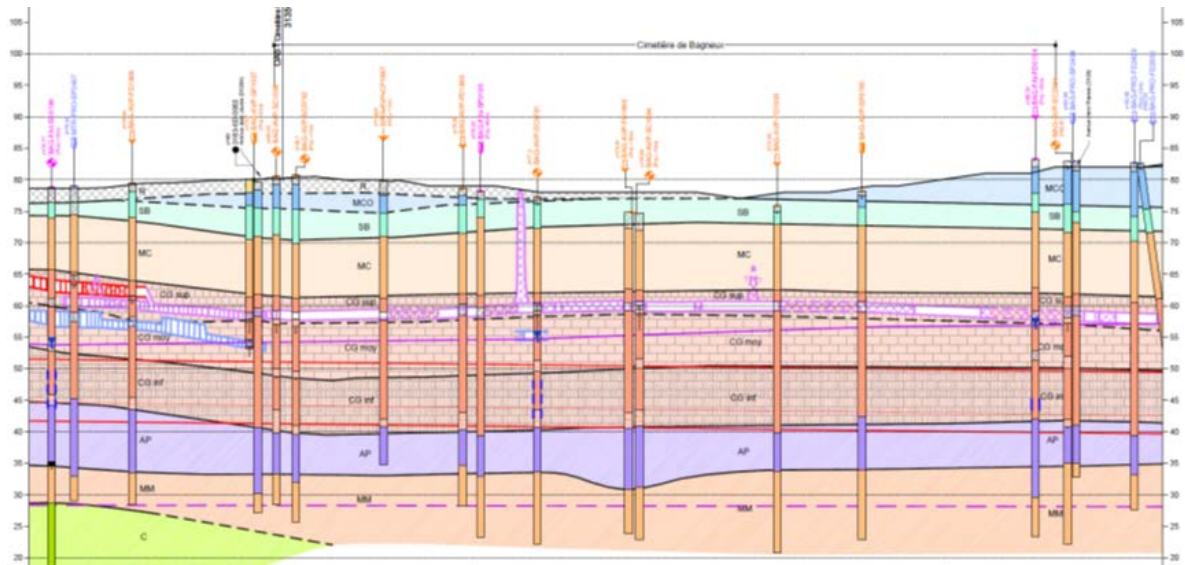


Figure 39 : Profil en long Ligne 15 Sud Grand Paris Express (secteur Bagneux)

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ce projet :

Objet des travaux	Tronçon T3C du Grand Paris Express Secteur Clamart Arcueil dans les Argiles Plastiques		
Date	2013-2016 (conception) - Travaux en cours (démarrage tunnelier en 2019)		
Caractéristiques du tunnelier	mode de confinement	Pression de terre	
	diamètre foré	9.87 m	
	poussée	6000 Tonnes en service, 6900 T en situation exceptionnelle	
	Pression au front	5 bars max à l'axe / dispositif d'injection de bentonite à travers la jupe	
Soutènement revêtement	voussoirs ep.40cm		
Géologie hydrogéologie géotechnique	Argile Plastique (Yprésien) caractérisée comme une argile très plastique indice de plasticité généralement compris entre 40 et 60 (48 en moyenne) Cu compris entre 80 et 150 kPa ; 120 kPa en moyenne Pl moyen de 2,5 MPa ; qc moyen de 5 MPa ; Em = 60 MPa ; E= 120 MPa à court terme		
Hauteur de couverture	35 à 50 m		
Avancements	moyenne : 200 à 250 ml / mois prévus		

Le creusement des tunnels n'ayant pas encore démarré lors de la réalisation du retour d'expérience, on ne dispose pas de mesures de tassements ; néanmoins, les différentes modélisations réalisées en phase conception ont montré la nécessité de prévoir un confinement du front de taille avec des pressions de l'ordre de 2 à 3 bars afin de limiter les tassements en surface.

7.2.2.4 Cross Rail – tunneliers dans les argiles de Londres

La plupart des tunnels du projet Cross rail excavés dans les argiles de Londres ont été réalisés en méthode mécanisée avec un tunnelier de type pression de terre. Le diamètre d'excavation est de 7,1 m, la profondeur du tracé varie essentiellement entre 20 et 40m.

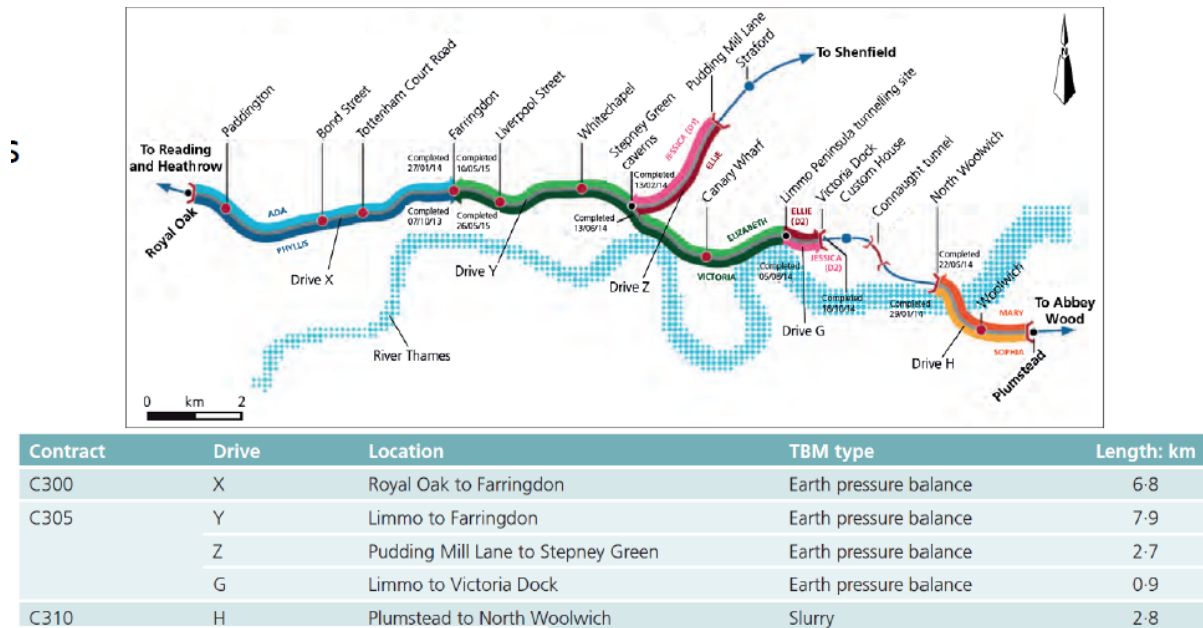


Figure 40 : Vue en plan du tracé du Crossrail

TBM	Phyllis	Ada
Drive	X	X
Total tunnelling time: d	519	522
Tunnelling time excluding delays: d	358	313
Average progress including delays: rings/d	9.0	8.9
Average progress excluding delays: rings/d	13.1	14.9
Maximum progress: m/d	52.8	48.0
Maximum progress: rings/d	33	38
Maximum progress: rings/week	179	185

Les tassements mesurés en surface ont été inférieurs au centimètre, confirmant la bonne maîtrise du confinement des argiles avec un tunnelier de type pression de terre.

On notera les avancements importants qui peuvent atteindre quasiment 300 m par semaine en vitesse maximale.

7.2.2.5 Enseignements des retours d'expérience de tunnels au tunnelier

La réalisation de tunnels au tunnelier en subsurface permet de garantir une certaine fiabilité en terme de maîtrise des déformations (inférieure au cm) dans la plupart des formations argileuses, y compris des formations plus plastiques et plus déformables que les Argiles tégulines du site investigué dans l'Aube. La limitation des déformations nécessite néanmoins une pression de confinement relativement élevée (plusieurs bars), en lien avec la déformabilité des argiles et la couverture de terrain.

Dans le contexte argileux, un confinement à pression de terre est le plus adapté.

Il n'a pas été noté d'évolution à long terme du massif environnant sur une période de retour importante (plusieurs dizaines d'années pour les métros en site urbain par exemple), les revêtements étant généralement très rigides.

L'homogénéité des couches argileuses permet d'envisager des vitesses d'avancement élevées (500 ml par mois, voire plus), avec un niveau de sécurité élevé.

7.2.3 Ouvrages souterrains réalisés en méthode mécanisée par microtunneliers

La grande majorité des tunnels réalisés au micro tunnelier sont de diamètre relativement réduit (généralement 1 à 2 m) avec des longueurs variant entre 100 m (voire moins) et 1 km. Les profondeurs des galeries excavées selon ce principe peuvent être très réduites (inférieures à 10 m parfois). Des tracés à plusieurs dizaines de mètres de profondeur ont été également réalisés.

De nombreux projets ont traversé des formations argileuses (collecteur d'assainissement en Colombie ou à Mexico, collecteur pour le Siapp dans les Argiles Plastiques de l'Yprésien) démontrant l'adaptabilité de la méthode à tous types de terrains.

Plusieurs chantiers ont néanmoins été réalisés avec des diamètres plus importants, supérieurs à 3 m :

- Tunnel à Cologne sur plus d'1 km avec un diamètre intérieur de 3,6 m et une vingtaine de mètres de profondeur ;
- Tunnel à Clichy avec un diamètre de 3,5 m sur 183 ml (en courbe) dans les Sables de Beauchamp (sable fin argileux) à une dizaine de mètres de profondeur

Les nombreuses galeries réalisées par fonçage ont montré la compatibilité de la méthode à tous les types de géologie, avec une grande fiabilité. Les profondeurs sont variables : plusieurs dizaines de mètres mais également très réduites sans impact sur le massif environnant (inférieures à 10 m)

On peut néanmoins noter que le marinage des déblais se faisant dans la plupart des cas à l'aide d'une boue bentonitique avec centrale de séparation, les formations argileuses sont moins favorables à cette technologie.

Dans la configuration du site investigué dans l'Aube, on pourrait envisager des galeries de diamètre supérieure à 3 m réalisées par une machine à attaque ponctuelle fixée à l'intérieur d'une trousse coupante, associée à une mise en place des anneaux de revêtement par fonçage (solution plus économique que les voussoirs). Le confinement du front pourrait être de type air comprimé, bien adapté aux formations peu perméables.



Figure 41 : Exemple de microtunnelier



Figure 42 : *Tunnel de Cologne*

8. Annexe 3 : Demandes et recommandations du courrier de l'ASN réf. CODEP-DRC-2016-013550 du 19 juillet 2016 auxquelles le présent rapport apporte des réponses.

Cette annexe identifie les demandes et recommandations formulées par l'ASN suite au rapport d'étape 2015, auxquelles le présent rapport apporte des éléments de réponse.

- 1) *« L'ASN considère que les gypses qui seront produits lors de la mise en œuvre des nouveaux procédés de gestion des déchets du site Areva NC de Malvézi dont la mise en service est annoncée au premier trimestre 2019 doivent être considérés comme des déchets FA-VL. »*
 - Ces déchets sont pris en compte dans le rapport.
- 2) *« L'ASN ne se prononce pas a priori sur le choix de la conception de stockage. Je vous rappelle que le choix de la conception du stockage (stockage avec terrassement depuis la surface ou stockage en galeries souterraines) devra être fait en fonction des évaluations de sureté de la phase d'exploitation du stockage et après fermeture. À cet effet, il appartient à l'Andra d'apporter les éléments permettant de montrer que les objectifs préliminaires de performance d'ensemble du stockage peuvent être atteints sans difficulté majeure, sur la base notamment du retour d'expérience industriel disponible (établi à partir des connaissances acquises sur les centres de stockage existants ou en projet, mais également lors de la construction d'ouvrages souterrains ou de barrages en terre). L'Andra devra notamment apporter des compléments importants sur la mise en œuvre d'une couverture reconstituée, le creusement dans la couche argileuse et les risques de tassements liés à la dégradation des composants du stockage. »*
 - L'Andra a fait mener une expertise sur les techniques de réalisation à l'issue de laquelle une analyse multicritères a été réalisée. Le rapport présente les éléments de cette expertise ainsi que les résultats de l'analyse multicritère. L'expertise présentée dans le rapport a notamment permis de consolider le retour d'expérience pour les ouvrages avec terrassement en grande masse et les ouvrages souterrains. Ces divers éléments seront à compléter par des études plus détaillées dans une prochaine étape.
- 3) *« Afin de pouvoir statuer sur la qualité des performances de la couche d'argile hôte, il conviendra de déterminer la perméabilité « en grand » de la formation des argiles téglines, ainsi que celles d'éventuelles zones plus perméables, notamment au niveau de la partie inférieure située entre le stockage et l'aquifère des Sables verts, qui sont des paramètres clés. Il conviendra également de déterminer la distance de garde à maintenir, le cas échéant, entre d'éventuelles failles et le stockage, afin de s'éloigner de zones qui pourraient constituer des chemins d'écoulement préférentiels, notamment vers la nappe sous-jacente. »*
 - L'homogénéité de la formation des argiles téglines a été confortée par la campagne complémentaire de caractérisation.
- 4) *« Je vous demande de me présenter le résultat de ces investigations géologiques complémentaires. »*
 - Le rapport synthétise les résultats de la campagne de caractérisation complémentaire de la ZR.
- 5) *« L'ASN considère que pour permettre d'envisager l'implantation d'un stockage sur le site étudié, l'Andra devra notamment analyser de façon approfondie les caractéristiques de la partie inférieure de la couche d'argiles téglines (en termes d'épaisseur, d'homogénéité, de faible perméabilité...) afin de s'assurer qu'elles garantiront la limitation du relâchement de radioéléments vers l'aquifère des Sables verts. En tout état de cause, elle devra s'assurer de conserver une épaisseur de garde inférieure suffisante pour limiter ces relâchements même en cas de présence de discontinuités mineures et enfin vérifier l'absence de scénarios conduisant à un relâchement inacceptable dans cet aquifère »*
 - La nouvelle campagne de reconnaissance complémentaire a permis de conforter les connaissances déjà acquises.



AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex
www.andra.fr