

# PROGRAMME DE R&D 2013-2016

**EXECUTIVE SUMMARY**

# ÉDITO



En soulignant l'évolution de l'environnement externe de l'Agence et en définissant les nouvelles priorités que lui assignent les Pouvoirs Publics en matière de gestion des déchets radioactifs pour la période 2013-2016, le contrat d'objectif 2013-2016 entre l'Etat et l'Andra a fixé trois orientations stratégiques à l'Agence : (1) en concertation avec l'ensemble des parties prenantes, préparer les décisions et la construction pour les stockages des déchets HA et MAVL, et FA-VL, (2) en garantissant un haut niveau de sûreté, améliorer la satisfaction des clients vis-à-vis du stockage de leurs déchets ultimes TFA et FMA-VC et, (3) fournir et valoriser des solutions innovantes pour une gestion optimisée des déchets radioactifs.

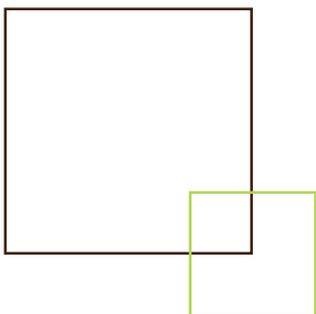
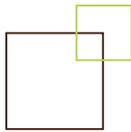
Ces orientations stratégiques se déclinent en un ensemble d'objectifs opérationnels, autour en particulier du rôle réaffirmé de l'Andra en tant que Concepteur-Ensembleur disposant d'une recherche de haut niveau. Depuis plus de vingt ans, d'abord dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 dédiée aux déchets de haute activité et à vie longue, puis dans celui plus élargi de la loi du 28 juin 2006 relative aux matières et déchets radioactifs, la recherche est un des ferments des grands dossiers de l'Agence, apportant les éléments de connaissances solides et rigoureux nécessaires aux études de conception et de sûreté, tant pour les projets de stockage que pour l'exploitation des centres existants.

Les objectifs et moyens de la recherche et développement à l'Andra ont constamment suivi l'évolution des projets et de l'exploitation des centres de stockage existants, au fur et à mesure de leur avancement. Par ailleurs, comme souligné par l'AERES (Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur) en 2012, l'Andra a su développer une recherche originale par sa diversité thématique, par sa capacité à mobiliser la communauté scientifique française et internationale tant dans le domaine de la recherche académique que dans celui des sciences appliquées, autour de questions opérationnelles, souvent transverses et donc pluridisciplinaires, et par la mise en place des outils majeurs que sont le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne, l'Observatoire Pérenne de l'Environnement et la simulation numérique.

Le programme de R&D 2013-2016 témoigne à la fois de la capacité d'adaptation de l'Andra et de l'exigence d'une recherche de haut niveau, au service de ses missions. Il adopte ainsi une structure nouvelle, élargie à l'ensemble des activités de l'Agence, et résolument opérationnelle, depuis la caractérisation et le traitement des déchets jusqu'à la conception, l'exploitation, et la surveillance des stockages et de leurs environnements. Par la lecture de ce programme, j'espère que vous trouverez Madame, Monsieur, matière à appréhender l'ambition partagée par l'Etat et l'Andra de conforter l'Agence dans sa contribution à une gestion sûre et responsable des déchets radioactifs, afin que la France reste exemplaire en la matière et une référence au niveau international.

# SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>06</b>
1.1 Des jalons importants pour l'Andra sur la période 2013-2016.....	06
1.2 La déclinaison en besoins opérationnels pour la R&D .....	09
1.3 Une structuration de la R&D autour de 5 thématiques opérationnelles.....	11
1.4 Un affichage scientifique sous-jacent aux thématiques opérationnelles.....	12
<b>2. PRÉSERVER LA RESSOURCE RARE DES SITES DE STOCKAGE</b>	<b>14</b>
2.1 Améliorer la caractérisation de l'inventaire radiologique des déchets .....	15
2.2 Mettre au point de nouvelles méthodes de traitement et de conditionnement des déchets.....	17
2.3 Affiner les connaissances permettant de concevoir un stockage plus compact .....	19
2.4 Evaluer la gouvernance et les aspects socio-économiques des stockages .....	24
<b>3. DÉFINIR LES EXIGENCES ET LES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE BESOINS (STB) ET LES ADAPTER AU PROGRÈS DES CONNAISSANCES</b>	<b>26</b>
3.1 Améliorer la connaissance de l'inventaire non radiologique des déchets et caractériser les processus de dégradation.....	27
3.2 Acquérir les données intrinsèques aux matériaux et aux milieux naturels .....	31
3.3 Caractériser et modéliser les mécanismes d'interaction aux échelles pertinentes pour réduire les incertitudes phénoménologiques.....	36
3.4 Améliorer la conceptualisation et la simulation du fonctionnement phénoménologique des stockages et de leurs environnements naturels sur le long terme.....	41
3.5 Traiter au travers d'approches complémentaires (Sciences Humaines et Sociales, mathématiques) la problématique des longues échelles de temps .....	46
<b>4. ACCOMPAGNER LES OPÉRATIONS DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION DES STOCKAGES</b>	<b>48</b>
4.1 Optimiser la conception et la construction des ouvrages par l'intégration du retour d'expérience de l'exploitation, des démonstrateurs et des ouvrages témoins .....	49
4.2 Accroître la prédictibilité du fonctionnement à court et moyen termes des stockages et de leur environnement naturel par la simulation numérique.....	51
4.3 Préparer et accompagner le plan de surveillance environnementale du stockage, et définir les marqueurs pertinents vis-à-vis des différents risques .....	55
4.4 Evaluer et mettre en œuvre les processus décisionnels, et garantir l'adaptabilité et la flexibilité des stockages.....	59
<b>5. DÉFINIR ET EXPLOITER LES TECHNIQUES ET LES RÉSEAUX D'AUSCULTATION ET D'INFORMATION</b>	<b>60</b>
5.1 Développer des méthodes innovantes de contrôle des colis.....	61
5.2 Disposer des moyens de mesure et d'auscultation des stockages et innover dans le domaine des capteurs.....	62
5.3 Mettre en œuvre des moyens de traitement des données pour l'aide à la décision.....	66
5.4 Gérer, tracer et diffuser les données, et assurer la transmission intergénérationnelle .....	67
<b>6. OPTIMISER LES MATÉRIAUX DES STOCKAGES</b>	<b>70</b>
6.1 Réduire l'impact des conséquences de la dégradation des matériaux .....	71
6.2 Innover dans la conception des composants du stockage .....	72
6.3 Mener une veille active sur les matériaux intelligents, en lien avec l'auscultation du stockage .....	73
<b>ANNEXES</b>	<b>74</b>





PROGRAMME DE R&D / 2013-2016  
**EXECUTIVE SUMMARY**

---

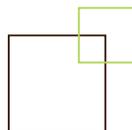
# PRÉAMBULE



Depuis un peu plus de vingt ans et avec la loi du 30 décembre 1991 sur les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), les activités de Recherche et Développement de l'Andra ont accompagné les grands objectifs de l'Agence et leurs grandes étapes, pour répondre aux besoins de caractérisation (déchets, milieux naturels, matériaux), de conception et d'évaluation de sûreté, propres aux centres de stockage existants (déchets de faible et moyenne activité vie courte - FMA-VC - et déchets de très faible activité - TFA -) et aux projets de stockage (déchets de haute activité - HA-, de moyenne activité à vie longue - MA-VL - et de faible et moyenne activité - FA-VL -).

Le projet de stockage de déchets radioactifs HA et MA-VL (Cigéo) a été emblématique de cet effort de recherche mené à l'Andra. Les résultats obtenus ont nourri les différents dossiers du projet au fur et à mesure de son développement (Dossier 2005 sur la faisabilité du stockage, Dossier 2009 de proposition de choix de la zone d'implantation des installations fond et de surface sur la zone de transposition...). Cela a été notamment accompli au travers d'une politique et d'une démarche scientifiques de rigueur, d'excellence et de transparence vis-à-vis des acteurs internes à l'Andra et externes, en particulier les instances d'évaluation, les représentants politiques, les producteurs de déchets, le public et le monde scientifique.

De par l'évolution des besoins des différents projets et centres de stockages existants, les activités de R&D de l'Andra se sont déployées progressivement sur un large spectre de domaines scientifiques et technologiques (sciences de la terre, sciences des matériaux, sciences de l'environnement, mathématiques appliquées, informatique, robotique, sciences



et technique de l'information et de la communication, sciences humaines et sociales...) et de disciplines scientifiques (hydraulique, mécanique, thermique, chimie...). Pour ce faire, l'Andra s'est appuyée sur le tissu national et international d'acteurs de la recherche et du développement (laboratoires académiques, grands instituts de recherche nationaux et privés...), en particulier au travers de partenariats, en développant ou fédérant les énergies autour de thématiques de recherche intégrées multidisciplinaires, et en contribuant à des projets nationaux (groupements nationaux de recherche...) et internationaux (projets européens...).

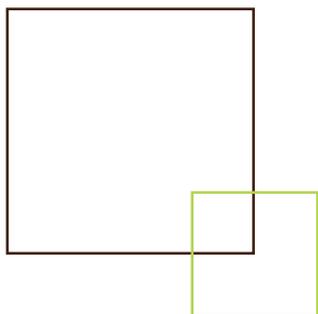
Dans ce cadre, l'Andra s'est dotée d'outils en propre, d'une part, l'infrastructure de recherche « SOMET » spécifique à Cigéo et comprenant le Laboratoire souterrain de recherche (LS), l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) – et une écothèque – et d'autre part, la simulation numérique, besoin transverse des centres de stockage existants et des projets de stockage.

2013-2016 est une période particulière et charnière pour la R&D à l'Andra. Cela est lié (i) au nombre et à l'importance des dossiers, qui concernent l'ensemble des centres existants et des projets de stockage (demande d'autorisation de création de Cigéo, dossier de synthèse pour le projet de stockage de déchets FA-VL, rapport de sûreté des centres de stockage de surface...), (ii) au passage progressif vers la réalité industrielle de Cigéo – voire de FA-VL – et, (iii) au besoin affirmé de la mise en œuvre d'une approche intégrée de la gestion des déchets radioactifs au travers de filières de stockage adaptées et de la prise en compte le plus en amont possible de la problématique des déchets (traitement, conditionnement...) en lien avec les producteurs, dans un souci d'optimisation de la gestion in fine des stockages, sur les plans technique, économique et sociétal.

S'appuyant sur le socle de connaissances scientifiques déjà acquis par l'Andra, la R&D s'engage désormais sur une dynamique marquée de support à **l'optimisation technico-économique des stockages** et des filières de gestion des déchets au sens large, de consolidation des connaissances en termes de **quantification des marges et de réduction des incertitudes** vis-à-vis de la conception et des évaluations de sûreté, et de prospective sur le long terme. Les actions de R&D sur la période 2013-2016 sont donc une étape de R&D dans les plans de déroulement des centres existants et des futurs centres, en particulier Cigéo.

Auparavant, la programmation se faisait par projet et centre de stockage existant. Avec ce programme, désormais quadriennal, de Recherche et Développement (R&D) 2013-2016, l'Andra se dote d'un outil de programmation et de prospective intégré, qui prend en compte de manière globale les besoins des projets de stockage et des centres de stockage existants, en dégagant notamment les synergies. Il est aussi guidé par le contrat quadriennal Etat – Andra 2009-2012 qui indiquait : « À l'échéance du présent contrat, un nouveau programme scientifique concernant l'ensemble des activités de l'Agence sera établi en support à un pilotage et une prospective de l'ensemble des activités de R&D pour l'après 2015 ».

**En réponse aux enjeux sur la période 2013-2016 et en préfigurant ceux au-delà de 2016, le programme de R&D (2013-2016) adopte une structuration nouvelle**, originale par sa construction autour de thématiques opérationnelles au cœur de la gestion des déchets radioactifs et de leur stockage, et calée en particulier sur le développement temporel d'un stockage : (i) préserver la ressource rare des sites de stockage, (ii) définir les exigences et les spécifications techniques de besoin (STB) et les adapter aux progrès des connaissances, (iii) accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages, (iv) définir et exploiter les techniques et les réseaux d'auscultation et d'information et (v) optimiser les matériaux du stockage. Les axes et les thématiques de R&D y sont déclinés de manière spécifique ou transverse, sur la période (2013-2016), avec une mise en perspective au-delà de 2016.



# INTRODUCTION

## 1.1 DES JALONS IMPORTANTS POUR L'ANDRA SUR LA PÉRIODE 2013-2016

La période 2013-2016 est marquée par un ensemble de jalons majeurs concernant toutes les activités de l'Agence (projet de stockage des déchets HA et MA-VL (Cigéo<sup>1</sup>), projet de stockage des déchets FA-VL, centres de stockage en surface de déchets de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte - FMA-VC), et s'inscrivant dans une dynamique temporelle, commencé avant 2013 et se poursuivant après 2016.

Figure 1 : Classification des déchets radioactifs (PNGMDR<sup>2</sup> 2013-2015)

	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
~ Centaines Bq/g	<b>Très faible activité (TFA)</b>	Recyclage ou stockage dédié en surface (centre de stockage des déchets de très faible activité de l'Aube)	
~ Millions Bq/g	<b>Faible activité (FA)</b>	Stockage de surface (centre de stockage des déchets de faible et moyenne activité de l'Aube) sauf certains déchets triés et certaines sources scellées	Filères à l'étude dans le cadre de l'article 3 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
	<b>Moyenne activité (MA)</b>		Filière en projet dans le cadre de l'article 3 de la loi du 28 juin 2006 codifiée
~ Milliards Bq/g	<b>Haute activité (HA)</b>	Non applicable	

Le dossier de la Demande d'Autorisation de Création (DAC), et, de manière générale, le projet Cigéo, s'inscrit ainsi dans une logique de mise en œuvre industrielle.

#### • Le projet de stockage de déchets HA et MA-VL (Cigéo)

Dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, en s'appuyant sur l'ensemble des recherches, (campagnes de reconnaissance géologique, laboratoire souterrain), **le Dossier 2005 a statué sur les caractéristiques favorables du milieu géologique, et du Callovo-Oxfordien en particulier**, et la faisabilité d'un stockage de déchets HA et MA-VL, sur la zone de 250 km<sup>2</sup> (dénommé ZT : zone de transposition) dans laquelle les résultats du laboratoire souterrain peuvent être transposés.

Le choix du stockage profond réversible pour la gestion à long terme des déchets HA et MA-VL a été entériné par la loi du 28 juin 2006. L'Andra a été chargée de poursuivre les études et les recherches afin de concevoir et d'implanter un centre de stockage profond de telle sorte que sa demande d'autorisation (DAC) puisse être déposée en 2015. Sous réserve de son autorisation, la loi prévoit sa mise en service vers 2025. **Le stockage doit être réversible pour une durée d'au moins 100 ans et ces conditions seront définies par une future loi qui devra être votée avant que le stockage soit autorisé.** Une campagne de reconnaissance complémentaire a ainsi été menée en 2008-2009 qui a confirmé le caractère favorable des caractéristiques du milieu géologique. **La proposition de l'Andra d'une zone souterraine d'environ 30 km<sup>2</sup>** (dénommée ZIRA : Zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie) située au sein de la zone de transposition **a été validée par le gouvernement**, après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), de la Commission nationale d'évaluation (CNE) et après consultation des élus et du Comité local d'information et du suivi du laboratoire souterrain (Clis). En parallèle, plusieurs zones ont été identifiées par l'Andra pour étudier l'implantation des installations de surface de Cigéo, notamment l'implantation des descenderies d'accès au stockage dans une zone interdépartementale autour du Laboratoire souterrain, côté Haute-Marne, contiguë à la Meuse, et plusieurs scénarios d'implantation des puits d'accès au stockage, en privilégiant une implantation dans une zone boisée pour limiter la consommation des terres agricoles.

**Le dossier de la Demande d'Autorisation de Création (DAC), et, de manière générale, le projet Cigéo, s'inscrit ainsi dans une logique de mise en œuvre industrielle.** Il concerne l'ensemble de l'inventaire des déchets à stocker dans Cigéo tel que défini dans le programme de gestion industrielle des déchets (PIGD). Il inclura une architecture de stockage à terminaison<sup>3</sup> et une évaluation de sa sûreté après fermeture. Le dossier de la DAC devra présenter les éléments supportant la démonstration de la sûreté des opérations réalisées dès la mise en service et pendant les premières années d'exploitation (mise en stockage, ventilation, coactivité...).

Pour les opérations engagées de façon plus lointaine (stockage de déchets vitrifiés HA1-2, déchets HA issus de l'usine de retraitement de Areva La Hague, prévu en 2075 par exemple), le niveau de description et de démonstration ne sera pas forcément équivalent.

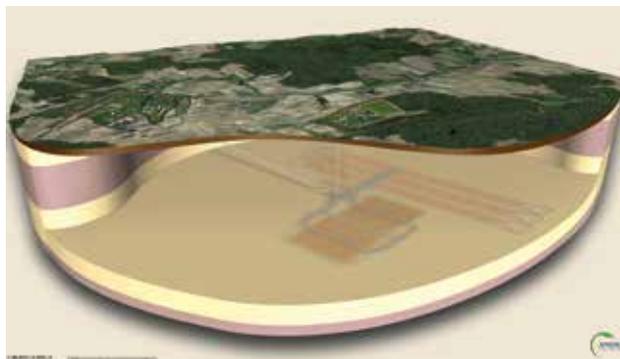


Figure 2 : Cigéo - centre industriel de stockage géologique

1 - Centre industriel de stockage géologique

2 - Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs

3 - Architecture de Cigéo au moment de sa fermeture, c'est-à-dire comprenant l'ensemble des zones de stockage de déchets à stocker

#### • **Le projet de stockage de déchets FA-VL**

Le rapport de l'Andra sur les scénarios de gestion à long terme des déchets FA-VL remis au Gouvernement à fin 2012 a conclu que :

- Le stockage des déchets radifères est aujourd'hui une priorité car la majorité de ces déchets est déjà produite et est actuellement entreposée dans des installations temporaires dont certaines seront saturées d'ici une dizaine d'années ;
- Les progrès en matière de caractérisation des déchets de graphite ainsi que les résultats des investigations géologiques sur un(des) site(s) doivent permettre de proposer un scénario de gestion optimal en 2015. En particulier, la possibilité de stocker les déchets de graphite les moins actifs à faible profondeur avec les radifères et les plus actifs dans Cigéo à grande profondeur est étudiée en alternative à la création d'un stockage dédié à une centaine de mètres de profondeur ;
- L'inventaire d'autres déchets FA-VL (déchets bitumés du CEA, sources scellées usagées, objets contenant du radium, déchets à radioactivité naturelle renforcée, résidus du traitement de l'uranium naturel...), susceptibles d'un stockage à faible profondeur avec les déchets radifères doit être précisé, notamment sur la base des résultats des investigations géologiques.

Par ailleurs, l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2012 a montré que de nouvelles capacités de stockage pour les déchets TFA produits par le démantèlement des installations nucléaires sont à prévoir à l'horizon 2025. Pour favoriser la synergie entre filières de stockage, l'Andra a proposé d'étudier un centre de stockage capable de prendre en charge des déchets TFA et FA-VL sur un même site.

**Après concertation avec les différents acteurs, l'Andra a reçu l'autorisation de mener des investigations géologiques sur le territoire de la Communauté de Communes de Soulaines, en explorant par ailleurs d'autres pistes de recherche d'un site.** L'Andra a proposé de fixer un nouveau rendez-vous, en 2015, où les orientations pour la suite du projet pourront être discutées sur la base d'une proposition d'une ou plusieurs solutions industrielles pour la gestion des déchets FA-VL et TFA et du bilan des démarches de concertation qui auront été menées. Il s'agit pour l'Andra de remettre un **dossier de synthèse au Gouvernement** qui inclura une évaluation de sûreté du stockage sur le(s) site(s) investigué(s) et le périmètre des déchets concernés ainsi qu'un bilan des scénarios de gestion des déchets de graphite et des bitumes.

#### • **Les centres de stockage de surface de déchets FMA-VC et TFA**

Les centres de stockage de déchets FMA-VC sont soit en phase de surveillance (CSM<sup>4</sup>), soit en phase d'exploitation (CSA<sup>5</sup> - et Cires<sup>6</sup> pour les TFA). Ils font l'objet d'un examen de sûreté (i.e. rapport de sûreté - RDS) tous les 10 ans, et d'un suivi régulier par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). **Le prochain RDS est celui du CSA en 2016 : il devra intégrer le retour d'expérience d'un peu plus de 20 ans d'exploitation.**

**Le Rapport de sûreté (RDS) du CSM est prévu en 2019 :** en phase de surveillance après sa fermeture en 1994, le CSM comporte une couverture provisoire constituée notamment d'une membrane bitumineuse jouant un rôle important dans la sûreté du stockage en limitant les flux d'eau d'infiltration au sein des ouvrages ; un dossier concernant une couverture pérenne (pertinence, caractéristiques) doit être remis en 2014, en réponse à la recommandation du Groupe permanent lors du dernier RDS en 2009.

## 1.2 LA DÉCLINAISON EN BESOINS OPÉRATIONNELS POUR LA R&D

Les besoins opérationnels des projets de stockage des centres de stockage existant couvrent 3 grands domaines :

- La conception et le dimensionnement des stockages
- La gestion flexible et/ou réversible des stockages
- L'évaluation de sûreté des stockages en exploitation et après fermeture

De manière générale, les besoins opérationnels des projets de stockage et des centres de stockage existants couvrent trois grands domaines :

- La conception et le dimensionnement des stockages (définition des filières de gestion, optimisation technico-économique, spécifications fonctionnelles et techniques de besoin des composants) ;
- La gestion flexible et/ou réversible des stockages, associée à leur observation et surveillance et celle de leur environnement ;
- L'évaluation de sûreté des stockages en exploitation et après fermeture (analyse des situations de stockage avec les évolutions de conception, définition des scénarios, quantification des impacts et évaluations des marges de sûreté).

Sur la période 2013-2016, pour chacun de ces domaines, les enjeux se déclinent de manière spécifique ou transverse aux projets et centres existants, en besoins opérationnels - et prospectifs - prioritaires pour la R&D.

### • Le projet de stockage de déchets HA et MA-VL (Cigéo)

Les besoins prioritaires se déclinent suivant plusieurs axes :

#### - Répondre à un ensemble de questions opérationnelles relatives à la réalisation industrielle et l'optimisation technico-économique de Cigéo :

- le dimensionnement des structures de stockage, plus particulièrement les soutènements/revêtements en béton des galeries et des alvéoles MA-VL, avec un objectif d'optimisation des épaisseurs de béton,
- le dimensionnement des chemisages métalliques des alvéoles HA0<sup>7</sup> et des surconteneurs des colis primaires de déchets HA0, avec un objectif de démarrage de la zone HA0 dès la première tranche de Cigéo,
- la conception des scellements de galeries et des bouchons d'alvéoles HA avec un objectif de démonstration de la capacité de réalisation industrielle en support à l'instruction de la DAC,
- la possibilité de co-stockage de déchets MA-VL dans une même alvéole, avec l'objectif à terme de rationalisation de la gestion des déchets MA-VL ;

#### - Préparer les pistes futures d'optimisation, l'observation et le contrôle de Cigéo :

- la relaxation de certains critères de température, en particulier pour les déchets HA1-2<sup>8</sup>, avec notamment pour objectif l'augmentation de la capacité de la zone HA1-2,
- les moyens techniques d'observation du stockage (capteurs...), avec un objectif à terme de démonstration de la capacité de maîtrise du fonctionnement de Cigéo dans le cadre de sa gestion progressive réversible et en lien avec sa gouvernance (cf. ci-dessous),



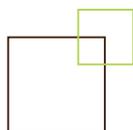
4 - Centre de stockage de la Manche

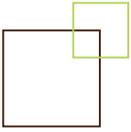
5 - Centre de stockage de l'Aube

6 - Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage

7 - Déchets de haute activité vitrifiés issus de l'usine de retraitement de Marcoule, prévus d'être stockés dès la première tranche de Cigéo.

8 - Déchets de haute activité vitrifiés - HA1 : verres produits dans les ateliers R7/T7 de La Hague ; HA2 : verres dopés au Pu (production future)





- les moyens de contrôle de second niveau<sup>9</sup> des colis de déchets, avec l'objectif à terme de rationalisation de la garantie de la qualité des colis reçus ;

- **Définir l'accompagnement de la réalisation d'un projet « hors normes » comme Cigéo** au travers de sa gouvernance au sens large, dans le cadre d'une confiance partagée entre les différents acteurs quant à la gestion progressive réversible de Cigéo ;
- **Répondre aux besoins des études de sûreté, de réversibilité et d'évaluation de performances en support à la DAC**, notamment par la réduction d'incertitudes de connaissances et l'actualisation des descriptions du fonctionnement phénoménologique du stockage depuis la période d'exploitation jusqu'après fermeture ;
- **Contribuer à l'établissement des états initiaux** autour du futur site de stockage pour la DAC et à la préparation du dispositif de surveillance environnementale qui sera mis en place autour de Cigéo, avec l'OPE et l'écothèque.

*A cela s'ajoute la préparation à un éventuel stockage direct de combustibles usés, qui conduit à consolider les connaissances sur leurs inventaires radiologiques et leur comportement dans le temps et, à réévaluer le concept de stockage au regard notamment des travaux scientifiques et technologiques menés depuis 2005 sur les déchets HA, en particulier au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.*

*Enfin, sur un plan prospectif à moyen et long terme, tant sur le plan de l'optimisation technico-économique que celui de l'accroissement de la maîtrise et de la robustesse du comportement phénoménologique du stockage en support aux évaluations de sûreté, les orientations en matière de matériaux du futur minimisant les interactions, par exemple la production d'hydrogène, ou accroissant les performances (mécaniques et chimiques notamment) de composants doivent être définies.*

#### • **Le projet de stockage de déchets FA-VL**

Dans le cadre du dossier de synthèse de 2015, les besoins principaux sont :

- **Disposer des éléments de connaissances sur le milieu géologique** permettant d'évaluer l'adéquation du site aux orientations générales du guide de sûreté. Cela concerne en particulier un certain nombre de critères techniques de choix de site, dont des capacités de confinement des radionucléides dans un volume suffisant pour accueillir le stockage, des conditions géotechniques de construction et d'exploitation du centre, ainsi que les conditions géodynamiques de son évolution sur le long terme ;
- **Améliorer la caractérisation de l'inventaire des déchets**, en particulier des graphites pour ce qui concerne le <sup>36</sup>Cl et le <sup>14</sup>C et, dans une approche préparatoire et prospective au-delà de 2016, disposer d'éléments quant à la faisabilité du traitement des graphites, afin d'évaluer le fléchage des déchets graphites vers la filière de gestion adéquate (FA-VL, Cigéo...).

#### • **Les centres de stockage de surface de déchets FMA-VC et TFA**

Les questionnements posés sur 2013-2016 portent sur le **soutien à l'exploitation des centres, notamment en termes d'optimisation technico-économique ou de prise en charge de déchets spécifiques, et la préparation des futurs RDS**, plus spécifiquement celui du CSA en 2016, sur la base des recommandations émises à l'issue de l'instruction des précédents RDS. Cela se traduit par les besoins principaux suivants :

- Consolider/améliorer la représentation des écoulements au CSA et au CSM, en support aux évaluations de sûreté et à l'implantation des futurs ouvrages (définition des plus hautes eaux) ;
- Améliorer la connaissance sur les inventaires en <sup>14</sup>C sous forme organique et son comportement en situations de stockage du CSA, en support aux évaluations de sûreté ;
- Disposer des éléments de synthèse quant à la maîtrise de durabilité de la membrane bitumineuse de la couverture provisoire du CSM, en support au dossier d'étape sur la couverture définitive.

*A cela, il faut ajouter, les activités de R&D prospectives visant à caractériser les déchets de démantèlement, afin in fine de réduire le volume de déchets devant aller au stockage TFA.*

#### • **L'entreposage**

Les perspectives de nouvelles installations à créer pour les déchets HA et MA-VL au-delà de 2015 conduisent à renforcer la complémentarité de ces futures installations avec Cigéo sur les plans de :

- La durabilité des installations, en visant un objectif séculaire ;
- La surveillance des installations et des colis entreposés ;
- La polyvalence vis-à-vis des colis de déchets reçus, y compris des colis de déchets qui seraient retirés du stockage.

*Les études et recherches sur l'entreposage visent en priorité une application à des installations dont la conception industrielle, la construction et l'exploitation nucléaire relèvent des producteurs de déchets (sites de La Hague, Cadarache, Marcoule).*

## 1.3 UNE STRUCTURATION DE LA R&D AUTOUR DE 5 THÉMATIQUES OPÉRATIONNELLES

Avec la prise en compte de toutes les activités de R&D de l'Agence, **le programme de R&D 2013-2016 adopte désormais une structuration thématique opérationnelle valorisant les synergies potentielles entre les activités et donnant une cohérence d'ensemble aux approches de R&D.**

En s'appuyant sur les acquis très importants des programmes de R&D antérieurs, il vise en premier lieu au partage équilibré entre une nécessaire augmentation de l'opérationnalité des recherches notamment pour l'optimisation technico-économique de la gestion des déchets, le maintien au niveau requis des connaissances fondamentales, et une ouverture prospective. Il s'inscrit également dans la durée, en répondant à l'évolution attendue des projets et des activités de l'Agence sur une période *a minima* d'ordre décennal : en particulier il intègre une visée prospective au-delà de 2016 en préparant les évolutions et l'optimisation technico-économique dans la durée au travers d'une R&D innovante, et le déploiement des actions de R&D en amont du stockage, notamment en ce qui concerne la caractérisation et le traitement des déchets. Enfin, elle prend en compte les attentes (i.e. recommandations, avis, directives, expressions de besoin) des évaluateurs (ASN, Commission Nationale d'Évaluation - CNE, revues de projet externes...), et du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR).

Le niveau de détail des connaissances nécessaires et l'enclenchement de leur acquisition dépendent de la phase de développement du projet ou du centre ainsi que des principales motivations associées, en particulier les jalons pour lesquels il est attendu des résultats. C'est pourquoi, une structuration dynamique et temporelle a été retenue, autour de 5 grandes thématiques qui constituent en elles-mêmes les jalons de déroulement d'un projet de stockage.

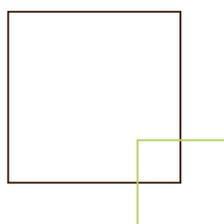


- **Préserver la ressource rare des sites de stockage**

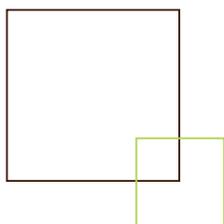
*En amont*, la préservation de la ressource rare des sites de stockage repose sur une bonne caractérisation de l'inventaire des déchets radioactifs, la réduction du volume de déchets et/ou l'obtention d'une compacité optimale des stockages.

- **Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins** (STB) et, les adapter au progrès des connaissances

*En phase d'avant-projet* – principalement – puis en phase d'exploitation, l'utilisation des meilleures connaissances disponibles ou l'accroissement des connaissances (i.e. réduction des incertitudes) sont une condition nécessaire à la définition et l'adaptation pertinentes des spécifications techniques de besoin, notamment dans une logique d'optimisation technico-économique et tout en garantissant les objectifs de sûreté.



9 - Contrôles effectués par l'Andra afin de s'assurer de la conformité des colis reçus aux spécifications de mise en stockage



- **Accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages**

*Au cours de la construction* – et en partie de l'exploitation –, il s'agit de fournir tous les éléments de connaissance nécessaires au dimensionnement, à l'évaluation technique et socio-économique et à la démonstration des solutions retenues, notamment en tirant parti du retour d'expérience des installations en exploitation mais aussi des résultats des dispositifs expérimentaux sur le moyen et le long terme. A cela s'ajoute la fourniture à l'exploitant des outils permettant une anticipation des conditions d'exploitation.

- **Définir et exploiter les techniques et les réseaux d'auscultation et d'information**

*Pendant l'exploitation*, l'observation et la surveillance du comportement du stockage sont essentielles, notamment pour une optimisation continue des concepts, mais aussi pour informer l'ensemble des acteurs (Andra, pouvoirs publics, représentation nationale et locale, autorité de sûreté, public...) des conditions de gestion des stockages et des déchets radioactifs au sens large.

- **Optimiser les matériaux du stockage**

*Pour le futur*, il s'agit de rechercher des solutions très innovantes pour les matériaux et les structures du stockage, afin notamment de réduire l'impact des conséquences de la dégradation des matériaux.

## 1.4 UN AFFICHAGE SCIENTIFIQUE SOUS-JACENT AUX THÉMATIQUES OPÉRATIONNELLES

Dans une lecture plus scientifique, des axes robustes de thématiques scientifiques apparaissent en filigrane au travers des thématiques opérationnelles décrites ci-dessus :

- Surfaces et interfaces continentales

Cet axe intègre le milieu géologique et les thématiques environnementales. Il recouvre notamment les enjeux liés à l'exploration de nouveaux sites (incluant les installations de surface de Cigéo), qui concernent plus particulièrement les quelques premières dizaines de mètres de la géosphère et l'évaluation des éventuels impacts environnementaux induits par les stockages.

- Mesure, traitement de l'information et bases de données

Cet axe est une chaîne complète de R&D, intégrant des recherches très amont (capteurs innovants et méthodes d'aide à la décision par exemple) et affichant des objectifs opérationnels.

- Matériaux et comportement des ouvrages

Cet axe associe formulation, acquisition de connaissances, caractérisation/expérimentation pour le dimensionnement des ouvrages, quel que soit le stockage considéré. Au travers de recherches fondamentales, le couplage de ces domaines offre des pistes d'optimisation pour les différents composants des stockages.

- Déchets en situation de stockage

Cet axe vise à réaffirmer le rôle de l'Andra dans la caractérisation des déchets (aspects radiologiques et chimiques), à construire une base de modèles et de données solide en amont des agréments et à compléter les connaissances concernant le comportement et le transfert des radionucléides et toxiques chimiques, notamment en champ proche.

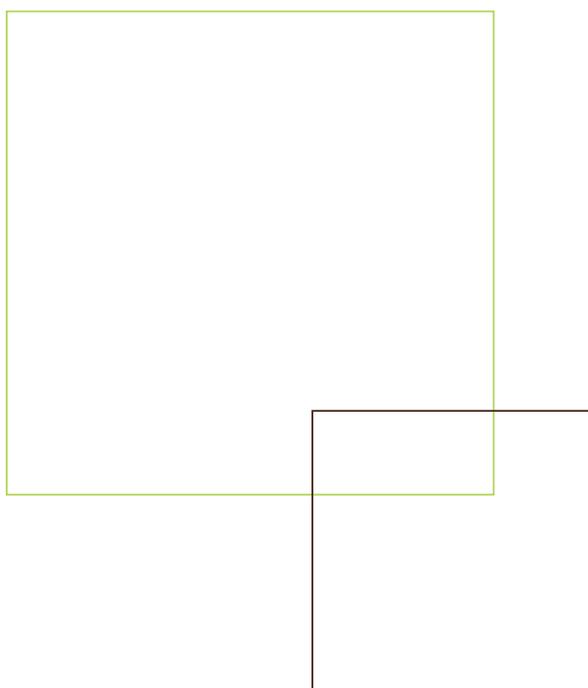
- Simulation numérique

L'intégration des activités de simulations numériques, antérieurement décrites au sein du programme de simulation, permet une présentation logique de la démarche scientifique au sein de chaque thématique, en particulier la part consacrée aux modélisations puis aux simulations numériques, et ainsi de dégager les activités de R&D en matière de simulation numérique, communes ou spécifiques à chaque thématique.



- Sciences Humaines et Sociales (SHS)

Les Sciences Humaines et Sociales sont désormais une composante à part entière de la R&D à l'Andra. Elles se développent de manière transverse aux cinq grandes thématiques de la R&D autour des trois axes, l'administration de la preuve<sup>10</sup>, l'économie des filières sur le long terme et la gouvernance.



---

*10 - Par administration de la preuve, ou construction de la preuve, on s'intéresse au processus qui conduit à la démonstration de la sûreté et de la maîtrise des risques du stockage et à la confiance que peuvent lui accorder les différents acteurs dont le public*



PROGRAMME DE R&D / 2013-2016  
EXECUTIVE SUMMARY

2

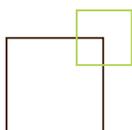
## PRÉSERVER LA RESSOURCE RARE DES SITES DE STOCKAGE

Comme souligné dans le Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2013-2015, la capacité de stockage de déchets radioactifs dans les centres est une ressource rare à préserver dans un souci permanent d'économie du volume, de la surface occupée ou de la capacité radiologique, notamment en termes de fléchage des déchets vers la bonne filière de gestion et/ou d'optimisation des marges de conception et de sûreté. Cette préservation se joue à deux niveaux :

- **En amont**, quels que soient les stockages, la connaissance de l'inventaire radiologique et le volume de déchets primaires ainsi que les volumes conditionnés est primordiale pour minimiser la consommation des stockages disponibles. La R&D vise alors (i) à **améliorer la caractérisation de l'inventaire radiologique** en donnée d'entrée pour les éventuels traitements et le choix pertinent de la filière de gestion, et (ii) à **rechercher des procédés de traitement, des modalités de conditionnement et/ou des possibilités de recyclage**, qui conduiraient à diminuer les volumes à stocker.
- **En aval**, la compacité des architectures de stockage peut également contribuer à préserver la ressource rare. La R&D concerne alors deux thématiques principales. La première est d'**évaluer la compatibilité physico-chimique des déchets entre eux et/ou avec leur environnement immédiat** afin, par exemple pour Cigéo, de réduire les entraxes entre alvéoles MA-VL ou le nombre d'alvéoles en permettant le co-stockage de déchets. La seconde concerne spécifiquement les déchets radioactifs exothermiques, en particulier

les déchets vitrifiés HA, et regroupe des travaux fondamentaux dédiés au comportement des matrices verre et des radionucléides à des températures supérieures à 50°C afin de **réviser certains critères thermiques** retenus à ce stade et, *in fine*, de réduire l'emprise de la zone de stockage de ces déchets.

Au regard des plannings de gestion des différents types de déchets et des temps caractéristiques de développement de la R&D dans les domaines cités plus avant, les actions de R&D afférentes à la préservation de la ressource rare des stockages s'inscrivent pour l'essentiel dans une opérationnalité de leurs résultats au-delà de 2016. Sur la période 2013-2016, il s'agit principalement d'établir des éléments de **(pré)faisabilité** et de connaissance complémentaire, sans viser à leur complétude et leur opérationnalité. Pour Cigéo, ces éléments permettront d'instruire des **pistes futures d'optimisation** et de préparer les réponses opérationnelles sans rupture dans la chaîne de R&D. Pour les déchets FA-VL, il s'agit de consolider la faisabilité d'un stockage à faible profondeur au regard des objectifs de sûreté et de préciser l'inventaire des déchets susceptibles d'y être accueillis.



## 2.1 AMÉLIORER LA CARACTÉRISATION DE L'INVENTAIRE RADIOLOGIQUE DES DÉCHETS

Les études de conception et d'évaluation de sûreté passées ont permis d'identifier les radionucléides importants, les plus mobiles comme l'<sup>129</sup>I, le <sup>36</sup>Cl ou le <sup>14</sup>C sous forme organique, nécessitant une amélioration de la connaissance de leur inventaire (quantité, forme et localisation). Différents thèmes privilégiés ont ainsi été identifiés sur la période 2013-2016, en termes de définition de la filière de gestion adaptée (cas des graphites) ou d'accroissement des marges de sûreté.

### 2.1.1 L'<sup>129</sup>I ET LE <sup>36</sup>Cl DES DÉCHETS HA ET LE <sup>14</sup>C DES DÉCHETS MA-VL

L'<sup>129</sup>I et le <sup>36</sup>Cl d'une part, et potentiellement le <sup>14</sup>C d'autre part, sont les radionucléides contribuant le plus à l'impact radiologique sur l'environnement du stockage profond de déchets HA<sup>11</sup> pour les deux premiers, MA-VL pour le troisième.

- L'inventaire global en <sup>129</sup>I le plus important est aujourd'hui celui des déchets vitrifiés. Il est jugé enveloppe, car acquis à partir de bilans matières et non de mesures. Dans le cadre du projet fédérateur national NEEDS<sup>12</sup> Déchets, un axe d'étude dédié à sa mesure dans les verres a ainsi été inclus dans l'appel à propositions.
- L'inventaire en <sup>36</sup>Cl des déchets HA de La Hague repose sur la corrélation avec la teneur en chlore stable des pastilles de combustible UOx<sup>13</sup>. Des travaux récents d'EDF et du CEA ont montré des teneurs en chlore stable plus faibles que celles actuellement retenues, ainsi que leur non-dépendance avec l'enrichissement. Ces résultats encourageants seront consolidés,
- Le <sup>14</sup>C concerne surtout les déchets de structure activés, notamment les coques et embouts.

L'<sup>129</sup>I et le <sup>36</sup>Cl et potentiellement le <sup>14</sup>C, sont les radionucléides contribuant le plus à l'impact radiologique du stockage profond.

11 - Et des combustibles usés dans le scénario de gestion sans retraitement

12 - Le programme national de recherche, Nucléaire Energie Environnement Déchets Société (NEEDS) lancé mi-2012 comprend un projet fédérateur « NEEDS-Déchets » dédié à la mise au point de solutions innovantes de caractérisation, traitement et conditionnement des déchets radioactifs. Codirigé par l'Andra, il vise à développer des actions prospectives dans le domaine du traitement/conditionnement et à mobiliser les laboratoires académiques autour de cette thématique

13 - Combustible UOx (Uranium Oxyde) : combustible constitué par des pastilles de dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>)



Dans le cadre du projet européen CAST (CARbon 14 Source Term) et du projet national NEEDS-Déchets, les études viseront à déterminer la répartition du  $^{14}\text{C}$  entre le cœur des coques capable d'assurer un bon confinement du  $^{14}\text{C}$  et la couche d'oxyde de surface (zircone) moins résistante.

### 2.1.2 LE $^{14}\text{C}$ DES DÉCHETS FMA-VC

Au CSA, le  $^{14}\text{C}$  est principalement localisé dans des résines échangeuses ions. La problématique liée à ce radionucléide est, d'une part, sa période radioactive (5 730 ans) et, d'autre part, sa possibilité de migrer sous des formes mobiles gazeuse et liquide organique. Dans le cadre du projet européen CAST qui débute mi-2013, un axe de R&D portera sur la spéciation du  $^{14}\text{C}$  dans ces résines, afin de déterminer les formes chimiques organiques présentes en solution.

### 2.1.3 LES INVENTAIRES EN $^{36}\text{Cl}$ , $^{14}\text{C}$ ET $^3\text{H}$ DES DÉCHETS GRAPHITE

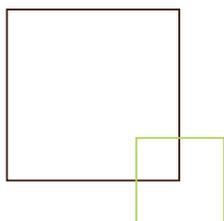
L'amélioration de la connaissance des inventaires en  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$  et  $^3\text{H}$ , aujourd'hui connus de manière enveloppe (conservative) pour une grande part, sera menée suivant trois axes entre 2013 et 2015 :

- 
- La mise à jour des *inventaires des empilements et des chemises*, sur la base d'une méthode statistique d'évaluation développée par EDF, afin de pallier les limites expérimentales de caractérisation des radionucléides au sein du graphite ;
  - Les causes de *la mobilité des radionucléides dans le graphite en réacteur* : (i) l'irradiation et la corrosion radiolytique vs la mobilité du  $^{36}\text{Cl}$ , (ii) les dépôts carboxy-hydrogénés et carboxydés susceptibles de piéger les radionucléides, (iii) la température vs la mobilité du  $^3\text{H}$  et le profil de l'impureté lithium dans un graphite nucléaire vierge.
  - la *structure du graphite* et son évolution en réacteur sous l'effet de l'irradiation et de la température, avec des travaux de modélisation par dynamique moléculaire, qui porteront d'abord sur les cascades de déplacements liées à la production de  $^{14}\text{C}$  par activation du  $^{13}\text{C}$  et de  $^{14}\text{N}$ , puis sur la production du  $^{36}\text{Cl}$  en considérant un potentiel d'interaction  $^{14}\text{C}$  et  $^{36}\text{Cl}$ .

### 2.1.4 LES INVENTAIRES DES DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT

Des techniques de caractérisation très performantes des activités radiologiques (types, quantité, localisation) sont déjà disponibles. Au regard de la nature et des volumes des déchets de démantèlement, des améliorations envisageables seront étudiées, en particulier afin d'abaisser les limites de détection, et d'optimiser les opérations de tri, de décontamination, voire de recyclage. À titre d'exemple, on peut citer la quantification non destructive des émetteurs bêta purs (tritium,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ...), parfois difficiles aujourd'hui à quantifier compte tenu de l'atténuation rapide des rayonnements bêta et de leur recouvrement énergétique.

## 2.2 METTRE AU POINT DE NOUVELLES MÉTHODES DE TRAITEMENT ET DE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS



Dès 2010, l'Andra a initié une veille technologique et une première ébauche d'activités prospectives sur le développement de procédés de traitement des déchets radioactifs, en particulier avec le programme des Investissements d'Avenir (IA), pour lequel l'Agence a reçu une dotation spécifique. Une dynamique s'est ainsi créée avec les producteurs de déchets radioactifs (Areva, EDF, CEA), et les acteurs du domaine (SIA RADON, Veolia...), avec notamment la participation à des programmes nationaux et internationaux (défi NEEDS, AIEA<sup>14</sup>...). Les différents travaux, initiés depuis 2010 se poursuivront notamment autour des axes suivants :

- Le traitement des déchets technologiques alpha MA-VL ;
- Le traitement des déchets de graphite, au regard des enjeux pour les stockages FA-VL et Cigéo ;
- Le développement de nouvelles matrices de piégeage/stockage des effluents radioactifs.

Les prévisions actuelles soulignent un accroissement des déchets de démantèlement, avec près de 500 000 m<sup>3</sup> envisagés au Cires à l'horizon 2030 alors que la capacité résiduelle du centre était de 450 000 m<sup>3</sup> à fin 2011. L'objectif sera, sur la période 2013-2016, d'intégrer à la stratégie de R&D le développement de nouvelles technologies de démantèlement, en termes de caractérisation, de traitement et de conditionnement. Un appel à projets est aussi en préparation et devrait être lancé début 2014

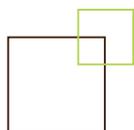
### 2.2.1 LE TRAITEMENT THERMIQUE DES DÉCHETS TECHNOLOGIQUES ALPHA ORGANIQUES MA-VL

Une part importante des déchets technologiques des installations françaises de fabrication de combustible MOx<sup>15</sup> et des usines de retraitement du combustible de La Hague est constituée de matière organique (polymères) contaminée exclusivement par des émetteurs alpha.

Depuis 2010, AREVA et le CEA travaillent au développement d'un procédé d'incinération/fusion/vitrification par voie plasma permettant de minéraliser totalement la matière organique tout en assurant une fusion des autres déchets technologiques (verres, métaux...) sans tri préalable.

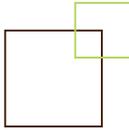


Figure 3 : Exemple d'essai de fusion/vitrification par voie plasma



14 - AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique - organisation internationale sous l'égide de l'ONU

15 - MOx (Mixed Oxyde) : combustible constitué d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium



Une première phase de R&D est prévue jusqu'à fin 2018, autour de 2 axes menés en parallèle :

- Le développement technologique du procédé. Les études actuelles et à venir visent à tester séparément les différents éléments technologiques macroscopiques choisis du procédé final puis à les assembler sur une même maquette ;
- la caractérisation du matériau résultant du traitement des déchets alpha (phase vitreuse associée à une phase métallique), en termes de propriétés (composition, microstructure, viscosité...), de comportement à long terme (vitesse d'altération et interprétation phénoménologique), d'inventaire radiologique (nature et distribution). Sur cette base, les regroupements possibles avec d'autres verres MA-VL dans le stockage seront évalués, en support à la définition de l'architecture de Cigéo portée à la DAC.

Ces travaux, partiellement financés dans le cadre des Investissements d'Avenir, doivent aboutir fin 2018 à une plateforme d'essais échelle 1 qualifiée en inactif, c'est à dire sur des matériaux non radioactifs. Une mise en service industrielle est envisageable à l'horizon 2030, après conception industrielle, notamment la nucléarisation du procédé.

### 2.2.2 LE TRAITEMENT DES DÉCHETS GRAPHITE

Dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNG-MDR) 2010-2012, l'Etat a demandé à l'Andra, en collaboration avec les producteurs de déchets radioactifs, d'ouvrir les options de gestion des déchets FA-VL.

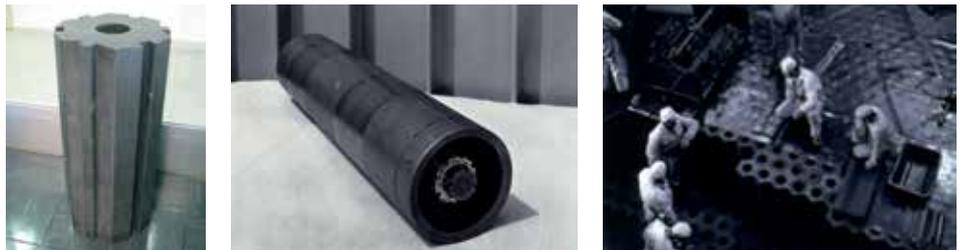


Figure 4 : Brique de graphite d'empilement (à gauche), chemise graphite (au centre) et empilement graphite du réacteur EDF Chinon A3 en cours de construction en 1965 (à droite). Les chemises en graphite contenant le combustible à base d'uranium naturel s'inséraient au centre des briques de graphite.

Dans le cas des déchets graphite, un des scénarios de gestion à l'étude prévoit une étape de traitement dont l'objectif est la décontamination partielle en  $^{14}\text{C}$  et  $^{36}\text{Cl}$ .

Le programme de R&D commun EDF/CEA/Andra établi en 2011 s'est traduit par deux volets d'études corrélés sur la période 2013-2016 :

- Le traitement thermique de graphite irradié afin de tester l'influence de la température et de la composition de l'atmosphère gazeuse sur sa décontamination ;
- Le conditionnement des déchets générés par le traitement, en particulier des radionucléides extraits de la matrice graphite.

En parallèle de ces actions, EDF, le CEA et l'Andra participent conjointement depuis 2011 à un projet de recherche coordonné par l'AIEA sur le traitement des graphites « *Treatment of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal* ». L'objectif commun porte sur la caractérisation du  $^{36}\text{Cl}$  dans le graphite afin de mieux appréhender son comportement lors des traitements.

### 2.2.3 LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES MATRICES DE PIÉGEAGE/STOCKAGE DES EFFLUENTS RADIOACTIFS

Le premier appel à propositions du programme NEEDS fin 2012 a conduit à retenir le développement de matrices de conditionnement de type « *Metal-Organic Framework* » (MOF) déjà largement étudiées pour des applications dans le domaine conventionnel, et présentant d'excellentes propriétés de piégeage, notamment de l'iode. Elles pourraient ainsi présenter un intérêt tout particulier pour le piégeage de l' $^{129}\text{I}$  généré par les activités de retraitement du combustible usé. Les travaux en cours qui se poursuivront jusqu'à 2014, visent à étudier l'incorporation de l'iode dans ces matrices ainsi que leur tenue à la radiolyse.

## 2.2.4 L'OPTIMISATION DE LA GESTION DES DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT



Figure 5 : Installation nucléaire en cours de démantèlement.

L'Andra souhaite lancer début 2014, avec l'appui de l'Agence nationale de la Recherche, un appel à projets de R&D dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir. L'objectif est de dynamiser la R&D et faire émerger des initiatives novatrices autour de la gestion des déchets radioactifs issus du démantèlement des installations nucléaires, depuis les étapes de caractérisation des sites et des installations à démanteler jusqu'au stockage en passant par le tri, le traitement et le conditionnement des déchets générés. Cet appel à projets vise à mobiliser, au-delà du seul secteur nucléaire, la communauté académique et les acteurs industriels, en particulier le tissu de PME/ETI françaises, au travers de projets fortement collaboratifs.

4 grandes thématiques de R&D ont été définies, dont une thématique transversale spécifique aux sciences humaines et sociales :

- Caractérisation des installations/sites à démanteler et des déchets générés ;
- Tri et traitement des déchets ;
- Nouveaux matériaux pour le stockage ;
- Innovation et société.

L'appel à projets vise à financer des projets de R&D sur une large gamme de niveau de maturité technologique (TRL 1 à 7), à la fois en recherche fondamentale, en recherche industrielle et en développement expérimental. L'appel à projets sera ouvert à tous, du laboratoire académique au grand groupe industriel. L'implication de la communauté académique et des PME/ETI sera fortement encouragée.

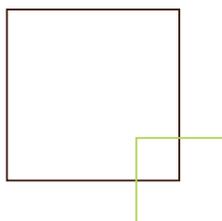
## 2.3 AFFINER LES CONNAISSANCES PERMETTANT DE CONCEVOIR UN STOCKAGE PLUS COMPACT

L'emprise et les volumes actuels des stockages, en particulier Cigéo, ont été établis de manière prudente sur des critères de limitation des interactions, principalement thermiques et chimiques, afin de préserver ou de maîtriser les performances des composants du stockage et du milieu géologique hôte. Sur 2013-2016, des travaux de R&D seront menés afin de réviser tout ou partie de ces critères ou d'évaluer la faisabilité de pistes d'optimisation au-delà de 2016 :

- Augmentation des températures maximales admissibles : (i) pour les déchets HA (actuellement 50°C pour les matrices verre avec une marge de 10°C) et (ii) pour les radionucléides - tous déchets confondus - (actuellement 50°C - 60°C, dans les argilites et 70°C dans les bétons) ;

- Augmentation de la compacité de la zone MA-VL : principalement par (i) le co-stockage de déchets MA-VL contenant des substances organiques et/ou des sels avec d'autres déchets MA-VL au sein d'une même alvéole (actuellement non autorisé), (ii) la réduction des distances entre alvéoles MA-VL contenant des substances organiques et/ou des sels et les autres alvéoles MA-VL (actuellement 80 m).

La conception d'un stockage FA-VL peut aussi être optimisée vis-à-vis d'un co-stockage et de la prise en charge des nouveaux déchets (i.e. bitumes et graphites décontaminés suivant les scénarios de gestion).



### 2.3.1 LA RELAXATION DU CRITÈRE DE TEMPÉRATURE MAXIMALE DE LA MATRICE VERRE DES DÉCHETS HA

Sur la période 2013-2016, l'objectif sera d'obtenir les courbes complètes de valeurs de la vitesse initiale de dissolution en présence d'eau de site et de matériaux d'environnement (produits de corrosion...) ainsi que les premiers éléments sur la vitesse de dissolution résiduelle, au-delà de 50°C jusqu'à 90°C, en tenant compte de la présence éventuelle de vapeur d'eau avant l'arrivée d'eau liquide. Deux points seront particulièrement examinés : (i) la nature et le devenir des produits de corrosion formés à 90°C lors de la chute de température et leurs conséquences sur l'altération du verre, (ii) le risque de reprise d'altération qui serait d'autant plus fort que la température est élevée.

### 2.3.2 LA MAÎTRISE DU COMPORTEMENT DES RADIONUCLÉIDES AU-DELÀ DE 50°C JUSQU'À 80°C-90°C DANS LES ARGILITES

- La spéciation des radionucléides jusqu'à 90°C

Pour le domaine (20°C, 50°C), l'application généralisée des méthodes d'extrapolation (approximation de Van't Hoff<sup>16</sup>) des données à 20°C sera poursuivie. Pour le domaine (50°C, 80°C), l'approximation de Van't Hoff ne permettant pas d'extrapoler les constantes d'équilibre, plusieurs approches d'évaluation seront utilisées et comparées, notamment en fonction de leur compatibilité avec les codes numériques et de la disponibilité des paramètres. En parallèle, plus spécifiquement, des composés solides amorphes et cristallisés pouvant contrôler la solubilité des radionucléides feront l'objet d'expériences de solubilité suivant un cycle 25°-80°-25°C.

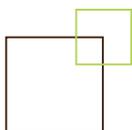
- Le transport et la sorption des solutés et des radionucléides jusqu'à 80°C

La diffusion des traceurs de référence (HTO, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>) a déjà fait l'objet d'essais de diffusion jusqu'à 80°C, montrant une faible augmentation des coefficients de diffusion, d'un facteur 3 entre 25°C et 80°C et la totale réversibilité de cet effet. Ces résultats seront vérifiés avec les interprétations de mesures de diffusion des différents traceurs sur une maquette pluri-décimétrique (expérience initiée en 2010 et qui s'achèvera en 2014). Par ailleurs, une expérience de diffusion d'un radionucléide fortement interagissant (Ni, Zn ou Co) sera mise en œuvre. En parallèle, dans la continuité des premiers essais sur matériaux dispersés, la sorption des radionucléides représentatifs de familles de comportement chimique sera étudiée sur les argilites entre 25°C et 80°C.

Enfin, l'évaluation qualitative des processus de transfert non dominant associés à la température, thermo-osmose et thermo-diffusion, qui repose actuellement essentiellement sur des matériaux analogues aux argilites, fera l'objet de travaux expérimentaux de consolidation sur les argilites, dans les domaines de température et de gradient de température correspondant à la relaxation des critères de température actuels.

### 2.3.3 LE CO-STOCKAGE DE DÉCHETS MA-VL ET LES INTERACTIONS CHIMIQUES ENTRE ALVÉOLES MA-VL

L'optimisation du co-stockage de déchets MA-VL et des interactions entre alvéoles MA-VL, concerne principalement les déchets organiques, et, dans une moindre mesure, les déchets salins, notamment les déchets C5<sup>17</sup>. La spécificité et l'inventaire important des boues



bitumées limitent *de facto* les possibilités de co-stockage avec d'autres déchets MA-VL. Sur la période 2013-2016, l'objectif est de disposer des éléments de connaissances nécessaires à la définition de l'architecture de base de la zone MA-VL (i.e. nombre et géométrie des alvéoles) qui sera portée à la DAC.

### 2.3.3.1 Les déchets MA-VL organiques

Les travaux porteront sur des axes complémentaires :

- Le comportement des produits organiques dans les argilites et les bétons

Pour la DAC, comme pour les phtalates et à l'ISA pour lesquelles on dispose déjà de données, la rétention et la diffusion dans les argilites de l'ensemble des produits de dégradation hydrosolubles des déchets technologiques seront évaluées à l'échelle macroscopique. Cette démarche sera également appliquée aux matériaux cimentaires constitutifs des alvéoles et des colis de stockage MA-VL. En plus des molécules organiques issues des déchets, les molécules organiques d'adjuvantation des bétons seront aussi appréhendées.

- La simulation du transfert des organiques et des radionucléides associés en situation de stockage. Sur la base des données de caractérisation citées plus avant, des simulations numériques en transport réactif seront effectuées à l'aide de codes dédiés afin de quantifier les zones de migration des produits de dégradation au sein des alvéoles MA-VL, dans le Callovo-Oxfordien entre alvéoles et vers le toit et le mur du Callovo-Oxfordien, en couvrant différentes situations représentatives du fonctionnement du stockage. Des études de sensibilité seront menées sur les distances entre alvéoles MA-VL et sur les charges en déchets organiques (i.e. nombre et localisation des colis) au sein des alvéoles MA-VL.

### 2.3.3.2 Les déchets MA-VL salins

Les travaux sur le co-stockage de déchets salins (type C5) avec d'autres déchets MA-VL suivront la logique d'étude des déchets organiques MA-VL, en s'appuyant sur les travaux déjà menés sur les boues bitumées en milieu cimentaire et dans les argilites, pour des concentrations en sels moins importantes, compte tenu du relâchement progressif des sels par la matrice de bitume.

- Le comportement des sels en concentration élevée dans les argilites et le comportement des radionucléides associés

Le relâchement de sels par des déchets MA-VL est soit contrôlé par une matrice (cas des boues bitumées), soit instantané à l'arrivée d'eau (cas des sels pastillés du colis C5). Cela conduit à deux gammes de concentration en  $\text{NaNO}_3$  et en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , de l'infra-molaire jusqu'au pluri-molaire. La réduction des nitrates, peut induire un transitoire oxydant au sein et en pourtour des alvéoles, du fait de la dénitrification qui est cinétiquement limitée et nécessite une catalyse abiotique (i.e. surfaces métalliques) ou bactérienne.

Les maquettes pluri-décimétriques déjà mises au point pour les boues bitumées afin d'accéder à l'évolution spatio-temporelle des profils de diffusion de sels au sein de blocs massifs d'argilite seront utilisées en augmentant le gradient de concentration en sels. L'interprétation des résultats des maquettes s'appuiera sur des développements numériques dédiés. Pour ce faire, en parallèle, deux autres axes de recherche seront suivis, sur la période 2013-2015 : (i) la généralisation des théories d'activité ionique dans les calculs transfert-chimie, en calant et justifiant les simplifications nécessaires vis-à-vis des contraintes numériques, et (ii) le calcul des activités ioniques des radionucléides pour un sel bivalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Enfin, les forts gradients de concentration pouvant aussi induire la migration des espèces en solution par co-diffusion et par effet osmotique, ces phénomènes qui ne sont connus

---

16 - Procédures d'estimation utilisant les corrélations entre les entropies d'espèces analogues et des paramètres tels que les rayons cristallographiques, les volumes molaires, la masse, ou la charge électrique

17 - Boues STE2 (ancienne station de traitement des effluents d'AREVA La Hague) séchées, compactées et immobilisées dans un conteneur métallique

que qualitativement aujourd'hui, feront l'objet d'expériences dédiées afin de disposer des modèles représentatifs de transfert des solutés ioniques au sein d'un panache salin.

- La simulation du transfert des sels et des radionucléides associés en situation de stockage. Suivant la logique d'étude des déchets MA-VL organiques, l'ensemble des données expérimentales acquises sera intégré dans des simulations numériques en transport réactif afin d'évaluer le comportement des sels et des radionucléides au sein des alvéoles, dans les argilites entre alvéoles et vers le toit et le mur du Callovo-Oxfordien, sous l'angle du co-stockage au sein d'une même alvéole et de l'interaction entre alvéoles adjacentes.



### 2.3.4 LA GÉOMÉTRIE DES ALVÉOLES MA-VL ET LES DISTANCES ENTRE ALVÉOLES DU POINT DE VUE DES INTERACTIONS THERMO-HYDROMÉCANIQUES

La géométrie, l'extension et l'évolution de la zone endommagée, ainsi que les modalités de chargement et de rupture du revêtement/soutènement, dépendent pour partie du diamètre de l'alvéole. Pour la DAC, des expérimentations et des simulations seront menées afin de mieux caractériser la zone endommagée et son évolution dans le temps autour d'alvéoles MA-VL de grand diamètre envisagées dans Cigéo.

Sur le plan expérimental, à l'échéance de la DAC, on disposera dans le Laboratoire souterrain des chambres de montage dans la galerie GRD3<sup>18</sup> (pour l'expérimentation GGD<sup>19</sup>) et dans la galerie GVA<sup>20</sup> dont le diamètre est de l'ordre de 8 m. La caractérisation de la zone endommagée initiale constituera une donnée supplémentaire pour valider la structure de la zone endommagée, et la loi donnant son extension en fonction du diamètre.

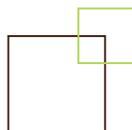


Figure 6 : la galerie GRD3

Des simulations seront menées pour des alvéoles MA-VL jusqu'à des diamètres de 12 m, et pour différentes distances entre alvéoles MAVL. On s'intéressera notamment aux conditions de la coalescence des zones endommagées. Les simulations prendront en compte les concepts de référence et ceux alternatifs (évolution des taux de vides dans les alvéoles MA-VL selon le type de colis considéré, avec ou sans remplissage des différents vides).

### 2.3.5 LE CO-STOCKAGE DES DÉCHETS FA-VL RADIFÈRES ET LES INTERACTIONS PHYSICO-CHIMIQUES ENTRE ALVÉOLES

L'inventaire actuel des déchets radifères révèle trois grands types chimiques de déchets : (i) les déchets stabilisés sous forme de co-précipité avec la barytine, (ii) les déchets sous formes de phosphates d'éléments lourds (notamment <sup>238</sup>U et <sup>232</sup>Th qui sont les radionucléides





à vie longue), (iii) les déchets issus des sites pollués qui ne sont pas stabilisés. En outre, les déchets tels que les résidus radifères (RRA) contiennent des nitrates (élément soluble).

Les possibilités de regroupement de ces grands types de déchets au sein d'une même alvéole seront étudiées, en évaluant dans un premier temps les conditions de stabilité les plus adaptées pour chacun d'eux, puis en traitant les effets chimiques combinés, suivant plusieurs conditions d'environnement (i.e. concept d'alvéole).

En parallèle, par simulation en transport réactif, on évaluera les distances d'interaction entre alvéoles comportant des déchets de natures différentes, permettant de limiter leurs interactions physico-chimiques et les effets sur la mobilité des radionucléides, plus particulièrement pour les résidus radifères (RRA) qui contiennent l'essentiel de l'inventaire en sels nitrates solubles.

Pour cela, on s'appuiera sur les travaux menés sur les alvéoles des déchets MA-VL salins du projet Cigéo, même si le contexte hydrogéologique n'est pas le même.

### 2.3.6 LE STOCKAGE OPTIMISÉ DES DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT ET DES STÉRILES INDUSTRIELS

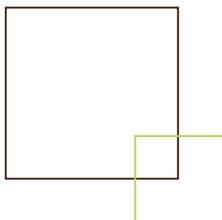
Les déchets de démantèlement au sens large seront constitués essentiellement de déchets métalliques, de gravats et d'emballages divers (plastique, filtres...). Selon leur origine, ils pourront comporter des actinides (U, Th, Pu, Am, Tc, Np, Pa...) et des composants chimiques contenant des ions fluorure, nitrate, sulfate et/ou chlorure.

Il s'agira, dans un premier temps, de définir les conditions d'insolubilisation des radionucléides et des toxiques chimiques, en fonction des différentes conditions aqueuses possibles. Dans un second temps, la mobilité des radionucléides et des toxiques chimiques sera modélisée pour les conditions de sites potentiels, en évaluant différentes options de conception (i.e. emploi de matériaux cimentaires et/ou de matériaux de colisage, nature et mélange des déchets...).

### 2.3.7 LA PRISE EN CHARGE DE DÉCHETS SPÉCIFIQUES AU CSA ET AU CIRES

Certains déchets FMA-VC ou TFA, tels que ceux de la station de traitement des effluents du CEA de Saclay (Stella), présentent des quantités importantes de composés organiques. Le stockage de ce type de déchets soulève la question du rôle des complexants organiques relâchés dans le transfert des radionucléides, à l'échelle du colis de stockage et à l'échelle de l'ouvrage où ils seraient co-stockés avec d'autres types de déchets. Sur la base des données de caractérisation acquises par ailleurs sur le comportement des complexants organiques en milieu cimentaires et celui des radionucléides associés, la mobilité des radionucléides sera évaluée quantitativement de manière générique et par simulation en hydraulique-transport à l'échelle de l'ouvrage, en fonction des différentes solutions de co-stockage.

L'analyse sur les déchets organiques sera étendue à d'autres déchets, notamment aux déchets cellulosiques et aux résines échangeuses d'ions. L'objectif est de disposer des modèles de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques pour ces conditions de stockage, afin de remonter aux évaluations de migration des radionucléides du colis à l'ouvrage (avec les mélanges à retenir en hypothèses) puis vers la nappe.



18 - Galerie de Recherche et Développement

19 - Galerie Grand Diamètre

20 - Galerie Voussoirs anisotropes



## 2.4 ÉVALUER LA GOUVERNANCE ET LES ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DES STOCKAGES



La notion de ressource rare des sites de stockage des déchets radioactifs prend tout son sens dans le cadre de la gouvernance de l'Andra, au travers de l'intervention régulière d'une pluralité d'acteurs dans la prise de décisions et le contrôle démocratique de ses activités, et des longs processus de concertation et de recherche nécessaires à la réalisation puis l'exploitation des stockages.

Les recherches « en amont du stockage » prévues dans le domaine des sciences humaines et sociales (SHS) visent principalement à répondre à la question de la gouvernance et de l'ancrage territorial des stockages, mais aussi, de façon plus spécifique, à celle des méthodes d'évaluation socio-économique susceptibles d'enrichir les analyses technico-économiques du projet Cigéo, projet industriel avec une composante R&D essentielle et dans une perspective temporelle inédite.

Le développement d'une expertise propre de l'Andra sur ces questions doit permettre de mieux veiller au juste équilibre entre les enjeux sociétaux, de sûreté et industriels. Le contrat d'objectifs Etat-Andra 2013-2016 reprend ces éléments et prévoit les moyens de leur mise en œuvre, en particulier dans le cadre des Investissements d'Avenir et de l'appel à projets R&D de l'ANR sur la gestion des déchets de démantèlement, avec un volet sur les SHS. Cette expertise pourra aussi être mise à contribution au niveau international, dans le cadre de l'*Implementing Geological Disposal Technology Platform (IGD-TP)*<sup>21</sup>, dans laquelle l'Andra est fortement impliquée et dont les travaux pourront contribuer à l'élaboration de propositions pour la future loi sur les conditions de réversibilité de Cigéo.

Deux axes de R&D seront suivis :

- La gouvernance dans le domaine de la gestion de déchets radioactifs

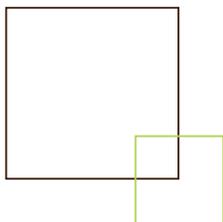
La place et le rôle de l'Andra dans les dispositifs de gouvernance des déchets radioactifs font déjà l'objet de travaux depuis 2011, qui se poursuivront jusqu'à 2014, afin de mieux comprendre et orienter l'évolution de l'Agence, dans une perspective historique et organisationnelle. Ces travaux intégreront l'évolution de la gouvernance dans d'autres domaines où la question de la temporalité est également prégnante, notamment ceux des politiques énergétiques et environnementales (changement climatique, activités de prospective...).

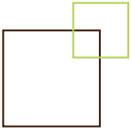
Par ailleurs, la création de nouvelles filières, dont l'organisation économique et la régulation politique sont à prévoir, feront l'objet de travaux. De multiples arbitrages au sujet notamment des modalités de traitement, du conditionnement ou de la mise en stockage sont à prévoir, mettant en jeu les pouvoirs publics comme des acteurs privés. Dans le cadre de ces arbitrages, les aspects socio-économiques liés à la ressource rare que représentent les stockages seront prépondérants. L'appel à projets R&D sur la gestion des déchets de démantèlement prévu en collaboration avec l'ANR pour le début 2014, visera, de manière exploratoire, à étudier le positionnement futur de l'Andra en amont de la filière électronucléaire, aux côtés des grands opérateurs du nucléaire. L'extension du rôle prescriptif de l'Andra et sa participation à l'innovation dans cette nouvelle phase pourraient entraîner une modification significative du paysage de gouvernance actuelle dans ce domaine.

- L'évaluation socio-économique des projets « hors normes »

A l'image d'autres projets à caractère « hors norme », le projet Cigéo se caractérise par son dynamisme, d'une part, mais également par les désaccords normatifs existants entre les parties concernées, d'autre part. Ces caractéristiques peuvent être considérées comme habituelles pour un mégaprojet (maîtrise des budgets, des plannings...). Elles peuvent également être valorisées en termes d'adaptation et d'apprentissage du projet, en cohérence avec l'exigence de réversibilité (technique et décisionnelle) de Cigéo. Au-delà des études d'impact socio-économiques, axées sur la création d'emploi et d'infrastructures, cela renvoie à une considération amont des choix qui permettent précisément ce juste équilibre recherché entre les enjeux sociétaux, de sûreté et industriels au cours de l'histoire du projet.

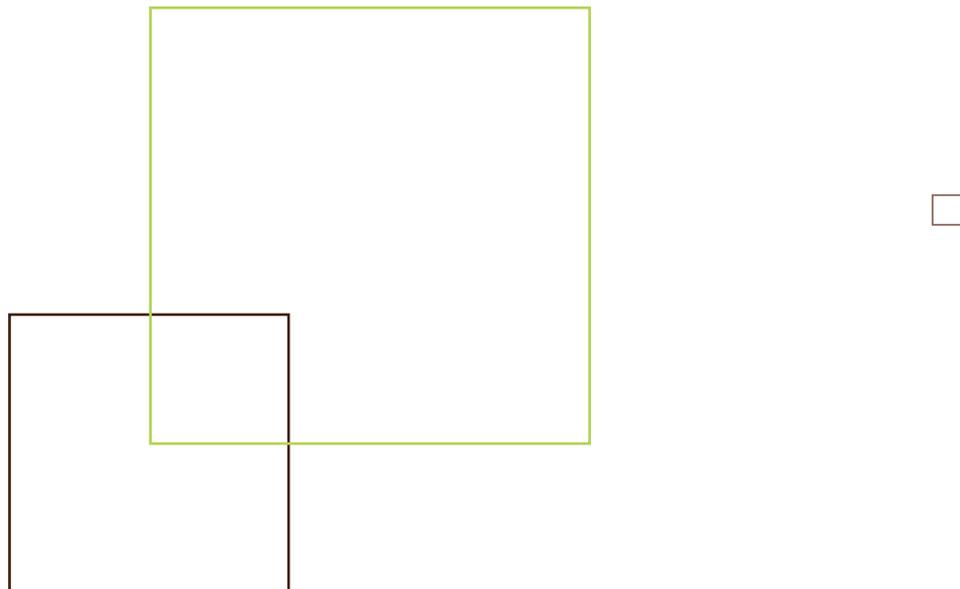
Les recherches « en amont du stockage » prévues dans le domaine des sciences humaines et sociales (SHS) visent principalement à répondre à la question de la gouvernance et de l'ancrage territorial des stockages





Un premier travail, initié en 2012, sur les méthodologies et les pratiques d'évaluation des « mégaprojets » avec le concours de l'Institut Francilien Recherche Innovation Société (IFRIS) a permis d'examiner la pertinence de cette approche, ainsi que des méthodologies communément utilisées, vis-à-vis du projet Cigéo. Il contribuera à l'examen des différents courants théoriques existants dans ce domaine et de leurs supports empiriques respectifs, et sera complété par une enquête de terrain auprès des principaux acteurs concernés, et par un benchmark international.

Ces travaux se prolongeront jusqu'en 2016 avec l'ambition de sortir du cadre techno-économique habituel pour s'intéresser aux aspects liés au cadre de vie, très localisés et difficilement quantifiables. Ils pourront être menés dans le cadre du projet fédérateur « Nucléaire, Risques, Société » du défi interdisciplinaire NEEDS du CNRS et s'inscrire également dans l'axe structurant « nouveaux usages du sous-sol », proposée au Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche pour le contrat de site Lorrain, conjointement avec le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) et l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS). Ils pourront bénéficier éventuellement des recherches menées au sein du projet européen «*Large-scale immobilization infrastructures - LESLIE*», qui, s'il est accepté, prévoit d'étudier en détail le cas Cigéo.



---

21 - Plateforme, créée en 2009 à la demande de l'Union européenne, Elle regroupe 14 pays Européens, et une cinquantaine d'organismes, dont 11 Agences en charge de la gestion des déchets radioactifs



PROGRAMME DE R&D / 2013-2016  
EXECUTIVE SUMMARY

3

## DÉFINIR LES EXIGENCES ET LES SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DE BESOIN (STB) ET LES ADAPTER AU PROGRÈS DES CONNAISSANCES

Lors du déroulement des programmes scientifiques de l'Andra des vingt dernières années, on a pu enregistrer un effort considérable de R&D en matière de caractérisation (i) des propriétés physico-chimiques au sens large des composants des stockages (déchets, matériaux, milieux naturels), et (ii) des processus phénoménologiques (Thermique, Hydraulique-gaz, Mécanique, Chimie, comportement des radionucléides et des toxiques chimiques) mis en jeu en situation de stockage, en particulier sur le long terme. Pour Cigéo, cet effort s'est notamment appuyé sur le Laboratoire souterrain dont le développement depuis quelques années a été marqué par l'accroissement des expérimentations intégrées et à des échelles de plus en plus représentatives du stockage. Un effort similaire a été mené sur la simulation numérique de l'évolution phénoménologique du stockage depuis la période d'exploitation jusqu'après sa fermeture.

Sans prétendre à une réduction complète des incertitudes résiduelles, le corpus des connaissances acquises a ainsi contribué aux différents dossiers relatifs à la gestion des déchets HA-MA-VL (2005, 2009, 2012) et au soutien à l'exploitation des centres de surface, en particulier du CSA avec les travaux sur les spécifications des colis et l'implantation des futures tranches d'ouvrages.

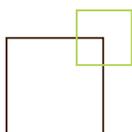
**Sur la période 2013-2016**, le développement du projet Cigéo vers l'industrialisation, la conception de nouvelles tranches d'ouvrage au CSA et de la réalisation du prochain rapport de sûreté de ce centre, soulèvent des **enjeux de conception et de sûreté de plus en plus précis ou nouveaux** :

- La maîtrise et/ou l'optimisation technico-économique de la conception des ouvrages de stockage ;
- L'identification et/ou l'accroissement des marges de sûreté après fermeture ;
- L'amélioration de la maîtrise de l'impact des stockages sur les environnements de surface à court et à moyen terme.

Sur la même période, l'enjeu pour les déchets FA-VL est la préparation du dossier de synthèse à remettre en 2015, sur la base notamment de la reconnaissance de site(s) potentiel(s) (faisabilité, schéma industriel, démarche de concertation).

Sur la période 2013-2016, la réponse de la R&D à ces enjeux se traduira par un ensemble de thèmes de R&D spécifiques ou communs pour les déchets, les milieux naturels, les matériaux, les processus, et la simulation :

- **L'amélioration de la connaissance de l'inventaire non radiologique des déchets** et des processus de dégradation ;
- **L'acquisition de données intrinsèques aux matériaux et aux milieux naturels ;**
- **La caractérisation et la modélisation des mécanismes d'interactions aux échelles pertinentes ;**
- L'amélioration de la conceptualisation et de la simulation du fonctionnement phénoménologique des stockages et de leurs environnements géologiques et de surface ;
- Le traitement au travers d'approches complémentaires (sciences humaines et sociales, mathématiques appliquées) de la problématique des longues échelles de temps.



## 3.1 AMÉLIORER LA CONNAISSANCE DE L'INVENTAIRE NON RADIOLOGIQUE DES DÉCHETS ET CARACTÉRISER LES PROCESSUS DE DÉGRADATION

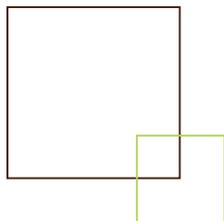
La caractérisation des inventaires non radiologiques et des processus intrinsèques de dégradation des déchets relève, pour une grande part, des producteurs en donnée d'entrée des travaux de l'Andra sur le comportement des déchets en situation de stockage.

La caractérisation des inventaires non radiologiques et des processus intrinsèques de dégradation des déchets relève, pour une grande part, des producteurs en donnée d'entrée des travaux de l'Andra sur le comportement des déchets en situation de stockage.

L'analyse de l'état des connaissances réalisé en 2013 a souligné des manques ou une nécessité d'acquisition de connaissances complémentaires pour tout ou partie des déchets portés aux inventaires, notamment dans la logique de développement industriel, pour la DAC de Cigéo et le dossier de synthèse des déchets FA-VL en 2015.

Ces besoins de connaissances complémentaires concernent (i) la sûreté d'exploitation (ex. risque incendie, maîtrise des rejets de gaz et radionucléides volatils), (ii) l'optimisation technico-économique de la conception (ex. co-stockage de déchets MA-VL, notamment organiques, voire salins, avec d'autres déchets MAVL), (iii) la consolidation des évaluations de sûreté après fermeture.

Ainsi, de manière transverse aux centres existants et aux projets de stockage Cigéo et FA-VL, et pour chaque type de déchets, des thématiques se dégagent plus particulièrement (i) la production de gaz, spécifiquement par radiolyse des matériaux organiques et par corrosion des matériaux métalliques, (ii) la production et le relâchement des produits de dégradations hydrosolubles résultant de la radiolyse/hydrolyse des déchets organiques, (iii) les modalités de relâchement des radionucléides en lien avec les processus de dégradation des différents composants des déchets. A cela s'ajoute le traitement de déchets spécifiques non pris en compte jusqu'à présent.



### 3.1.1 LES DÉCHETS MÉTALLIQUES ACTIVÉS (MA-VL, FMA-VC ET TFA)

De manière générale, les déchets métalliques activés sont une source principale ou importante en  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{129}\text{I}$ , radionucléides ayant un impact radiologique important en stockage. L'amélioration des connaissances sur les déchets métalliques porte donc sur les mécanismes – vitesses – de corrosion et sur le relâchement associé de ces radionucléides ainsi que sur la production d'hydrogène par corrosion. A cet égard, les études en cours sur la corrosion des alliages de zirconium et de nickel, ainsi que sur les aciers inoxydables seront poursuivies. Des études sur les vitesses de corrosion des matériaux activés, sur le rôle de l'oxyde dans le relâchement du  $^{14}\text{C}$  et sur la spéciation du  $^{14}\text{C}$  relâché, sont également envisagées dans le cadre du projet européen CAST (démarrage mi-2013). Les résultats disponibles sur la corrosion des métaux activés très réactifs (alliages de magnésium et d'aluminium) soulignent par ailleurs la nécessité de consolider les connaissances relatives à la corrosion de ces métaux<sup>22</sup> lorsque ceux-ci sont enrobés dans un liant hydraulique ou dans un des nouveaux matériaux d'enrobage envisagés pour les métaux activés (bétons phospho-magnésiens, géo-polymères alumino-silicatés...).

### 3.1.2 LES DÉCHETS GRAPHITE (FA-VL, MA-VL - RÉSERVES DE CIGÉO-, FMA-VC)

Les études sur les déchets graphite FA-VL se sont focalisées, dans les années précédentes, sur l'évolution de la microstructure en réacteur, sur le relâchement du  $^{36}\text{Cl}$  et du  $^{14}\text{C}$ . Les besoins de connaissances portent désormais sur (i) les vitesses résiduelles de relâchement du  $^{36}\text{Cl}$  afin d'estimer le comportement en stockage des graphites démantelés sous eau, notamment en conditions agressives de lixiviation, (ii) la nature du  $^{14}\text{C}$  associé à des composés dissous ou à des gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ...) exprimés ou dissous. Les résultats de ces travaux pourront être extrapolés par la suite aux déchets graphite stockés au CSA afin de réduire les incertitudes sur le relâchement des radionucléides par ces déchets pour le prochain RDS.

### 3.1.3 LES DÉCHETS SALINS (MA-VL ET FA-VL)

Les besoins portent principalement sur les colis C5 (MA-VL) et sur les déchets radifères FA-VL.

L'acceptabilité à Cigéo du colis C5, dont des éléments d'appréciation sont nécessaires d'ici la DAC, conduit à répondre aux besoins de connaissances sur la production de gaz de radiolyse, le rôle de confinement de l'enveloppe primaire, et l'effet du relâchement de sels (sulfates, nitrates, chlorures, carbonates...) en quantité importante sur le transfert des radionucléides et la tenue des matériaux cimentaires :

- Concernant la production de gaz, il s'agira de finaliser l'acquisition des rendements radiolytiques des différents sels et du lubrifiant puis de valider ces mesures par des expérimentations sur des boues réelles non conditionnées ;
- La corrosion de l'enveloppe sera étudiée à différentes humidités relatives de l'atmosphère environnante en phase d'exploitation et d'entreposage ;
- Le relâchement des sels sera étudié pour deux types de boues (sulfatée et carbonatée) suivant différents pH et différentes forces ioniques. Suite à ces expériences, une modélisation de la solubilité des principaux actinides sera réalisée.

Les déchets FA-VL radifères présentent également un inventaire important en sels (ions chlorure, fluorure, nitrate, sulfate, phosphate, ammonium...). Les études sur ces déchets viseront à évaluer les termes sources à travers deux approches successives : (i) une approche de type « solide brut » reposant sur des calculs de solubilité à l'équilibre épaulés par des essais de lixiviation en mode statique et qui pourra être mise en œuvre en support au dossier de synthèse FA-VL de 2015, (ii) une approche de type « assemblage de phases solides » reposant sur la mesure des cinétiques de relâchement des espèces à partir d'essais de lixiviation en mode dynamique qui ne débiteront qu'à partir de 2015/2016 à l'issue des conclusions sur le dossier de synthèse FA-VL.

### 3.1.4 LES DÉCHETS ORGANIQUES - POLYMÈRES - (MA-VL ET FMA-VC)

Les déchets organiques, notamment les polymères et les résines échangeuses d'ions (REI), se dégradent sous l'effet du rayonnement entraînant la formation des nouvelles espèces moléculaires, notamment des gaz et des molécules hydrosolubles.

La R&D menée par le CEA et AREVA depuis 2012 sur la caractérisation des produits de dégradation des polymères MA-VL a déjà permis de déterminer les rendements radiolytiques de production des gaz pour la plupart de ces polymères et d'identifier et de quantifier les molécules générées par la dégradation d'un grand nombre des polymères. L'identification actuelle des produits hydrosolubles porte toutefois sur une liste limitée d'acides carboxyliques (acide formique, acide acétique, oxalique, adipique, phtalique et isosaccharinique). Le bilan de matière devra être complété ainsi que l'identification d'autres espèces hydrosolubles potentiellement complexantes générées par la dégradation des polymères PVC, PUR, cellulose et EPR. Ces travaux se poursuivront jusqu'à 2014. En fonction des résultats, une identification et une quantification plus poussée des produits hydrosolubles issus des autres polymères présents dans les colis des déchets seront menées.

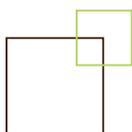
Les études sur les gaz se poursuivront pour définir l'effet de la dose intégrée sur les valeurs de rendements radiolytiques de production des gaz, notamment pour les gaz oxydants comme le dioxyde et le monoxyde de carbone.

Un travail similaire sera conduit sur les résines échangeuses d'ions (REI), avec un focus particulier sur la formation des ions agressifs vis-à-vis des liants hydrauliques (ions sulfates, ammonium). Dans le cadre du projet européen CAST, un intérêt particulier sera porté sur la spéciation du  $^{14}\text{C}$  présent dans les résines EDF stockées au CSA, afin de déterminer les formes chimiques organiques présentes en solution.

### 3.1.5 LES BOUES BITUMÉES (MA-VL, FA-VL, FMA-VC)

Les besoins en R&D sur 2013-2016 visent à consolider les connaissances acquises ou à évaluer des points de comportement particuliers dans le cadre de la conception et des évaluations de sûreté en support à la DAC de Cigéo ; ils portent principalement sur le risque incendie en exploitation, le dimensionnement mécanique des colis de stockage et des alvéoles de colis de boues bitumées (i.e. gonflement des enrobés) et le comportement à long terme des enrobés (production de gaz, termes sources radionucléides, sels et complexants) :

- Les travaux du CEA sur la *production de gaz par radiolyse* des boues bitumées ont conduit à diminuer les termes source en hydrogène du fait principalement de la révision à la baisse du rendement radiolytique alpha. Les travaux à réaliser en 2013-2014 visent à déterminer la production d'hydrogène de colis spécifiques, comme ceux de la STEL<sup>23</sup> produits après 1978, de la station STE2 sur la base de la campagne de 2002 et de ceux non conformes produits sur la station STE3<sup>24</sup> ;
- Le *terme source (radionucléides, sels)* des boues bitumées repose sur le modèle COLONBO développé par le CEA. Les études sur 2013-2016 viseront à consolider son domaine d'applicabilité sur l'ensemble de l'inventaire, et à évaluer un modèle alternatif si nécessaire. Pour les colis de boues bitumées des centres de surface, les travaux tiendront compte des spécificités de ces stockages. En parallèle, un modèle cinétique de relâchement des espèces organiques issues de la dégradation des boues bitumées sera proposé ;



22 - Ces travaux pourront être étendus au zinc, qui commence à être utilisé dans l'exploitation des réacteurs et apparaît dans les déchets

23 - Station de Traitement des Effluents Liquides du CEA Marcoule

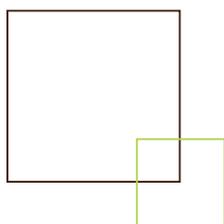
24 - STE3 : Station de Traitement des Effluents n°3. Installation de traitement des effluents liquides, en exploitation depuis 1989 sur le site de COGEMA La Hague, produisant des colis de boues bitumées

- Les travaux sur le *gonflement sous radiolyse* porteront sur l'amélioration du modèle de gonflement, notamment pour prendre en compte les effets des faibles débits de dose et l'évolution couplée de la rhéologie des boues bitumées. La modélisation devrait être validée par des comparaisons avec des mesures réalisées sur des fûts réels de STE2 et STE3. Des simulations du gonflement en situation de stockage seront menées sur des colis réels de la STEL produits avant 1995, en prenant en compte des conditions aux limites mécaniques réalistes au sein des alvéoles ;
- Les données disponibles sur le *gonflement sous eau* des boues bitumées reposent uniquement sur les travaux réalisés par le SCK-CEN (Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire en Belgique) sur les eurobitumes qui diffèrent des bitumes d'AREVA et du CEA par leur teneur en sels plus élevée et un bitume de nature différente. Afin de valider l'absence de potentiel de gonflement important, les courbes « gonflement/pression de gonflement » des bitumes AREVA et CEA seront déterminées expérimentalement et utilisées dans des simulations mécaniques à l'échelle d'une alvéole ;
- Le domaine de *non-réactivité thermique des boues bitumées* aujourd'hui défini jusqu'à 100 °C de manière prudente sera évalué expérimentalement. Il s'agira notamment d'identifier les réactions des composants potentiellement réactifs en donnée d'entrée de l'évaluation de leur rôle sur la tenue au feu des enrobés.

### 3.1.6 LES DÉCHETS VITRIFIÉS HA ET MA-VL

En s'appuyant sur l'important corpus de connaissances acquis sur le comportement des verres nucléaires, les études sur les déchets vitrifiés HA sur la période 2013-2016 viseront à consolider des points particuliers du comportement en support aux évaluations de sûreté de la DAC : auto-irradiation, fracturation, comportement sous vapeur d'eau et sous eau en présence des matériaux du stockage.

- *Fracturation* : L'amélioration du modèle de fracturation thermomécanique existant mené dans le cadre d'une collaboration CEA/AREVA NC/Andra sera poursuivie avec notamment la caractérisation des comportements visqueux et viscoélastique du verre à basse température. De nouvelles modélisations seront menées pour évaluer l'évolution de la fracturation dans un colis de verre soumis aux contraintes lithostatiques en situation de stockage et valider l'absence d'effet significatif. Un volet expérimental dédié permettra également d'évaluer l'impact de la lixiviation sur la propagation sous-critique de fissures au sein du verre.
- *Altération par la vapeur d'eau* : établie à 90 °C pour le verre SON68, l'altération par de la vapeur d'eau sera étudiée pour le domaine de températures 30 à 50 °C, ainsi qu'après remise en eau. Le rôle du pH sera évalué à travers l'utilisation de différents gaz (NH<sub>3</sub>, argon, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S). Il est également envisagé d'étudier l'effet de l'irradiation sur l'altération du verre par la vapeur d'eau.
- *Altération sous eau* : Les connaissances sur l'altération du verre dans l'eau (eau pure, eau cimentaire et eau argileuse de site) sont jugées globalement suffisantes au vu des résultats désormais disponibles. Néanmoins, les travaux seront poursuivis sur les deux aspects suivants : les corrosions hétérogènes observées sur quelques expériences et les conditions de reprise d'altération.
- *Altération sous eau en présence de matériaux/solides d'environnement* : Les travaux expérimentaux et de modélisation sur l'altération des verres HA en présence de matériaux d'environnement seront poursuivis suivant deux axes :
  - des expériences intégrales en laboratoire jour et des essais dormants au Laboratoire souterrain afin d'évaluer différentes combinaisons « verre/magnétite » et « verre/fer » suivant différents rapports « surface de verre sur masse de fer » et différentes configurations (granulométrie du verre, fracturation, rôle du conteneur, ajouts siliceux...). Par ailleurs, des études sur des analogues naturels permettront de préciser la nature des produits de corrosion formés à l'interface « verre/fer » et de caractériser leurs interactions avec le silicium (2014). Le démantèlement de la maquette Arcorr 2008 fournira des éléments complémentaires sur la nature des produits de corrosion à l'interface « verre/fer » et « fer/argilite »,

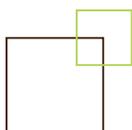


- des expériences *in situ* au Laboratoire souterrain dédiées aux cinétiques d'altération du verre, en se focalisant sur la phase de chute de la vitesse de dissolution, le temps de passage à la vitesse résiduelle et la valeur de cette vitesse.

Les études ne se limiteront pas au verre SON68. Des expériences intégrales (verre/fer/argilite) en cours portent sur les verres AVM et les essais dormants comprendront des échantillons de différents verres (AVM, UMo, verre basaltique, verre archéologique des Embiez et de laitier de Glinet).

Concernant l'altération des verres MA-VL, les travaux de R&D sur la période 2013-2016 porteront sur :

- *L'influence des matériaux cimentaires sur la cinétique d'altération.* Les expériences déjà menées en eaux cimentaires ont permis d'appréhender la phénoménologie de l'altération dans ce milieu grâce à une simplification du système réel. Néanmoins, d'autres mécanismes, comme les interactions du Bore, pouvant intervenir en présence directe de matériaux cimentaires seront évalués,
- *L'identification des phases néoformées (CSH, zéolithes)* susceptibles de piloter la dissolution du verre à long terme. Plus particulièrement, les conditions de reprise d'altération par la formation de phases zéolithes qui déstabilisent le gel préalablement formé et leur rôle à long terme, seront évaluées,
- *L'altération par de la vapeur d'eau.* Les résultats seront comparés à ceux menés sur le verre HA SON68 afin de préciser les mécanismes d'altération dans ces conditions et d'évaluer la variabilité du comportement des verres MA-VL et HA de compositions différentes.



## 3.2 ACQUÉRIR LES DONNÉES INTRINSÈQUES AUX MATÉRIAUX ET AUX MILIEUX NATURELS

Les matériaux des stockages (argiles, bétons et métaux principalement) et les milieux géologiques (Cigéo, Centres de surface) font l'objet d'une caractérisation intensive de leurs propriétés physico-chimiques depuis plus de vingt ans. Un effort similaire a été mené pour le comportement en solution, la rétention et le transport des radionucléides et des toxiques chimiques dans les bétons, les argiles et les roches hôtes, à l'état sain et pendant ou après sollicitations principalement thermiques, chimiques et mécaniques.

Pour les argiles remaniées (argile gonflante et argilites) et les bétons, on dispose aujourd'hui d'un corpus de connaissances important sur leurs propriétés intrinsèques thermiques, mécaniques, hydrauliques-gaz, chimique et de transport-rétention des radionucléides, en lien avec les formulations et les modes de mise en forme et de mise en place.

Pour les métaux, les travaux de R&D passés ont couvert les aciers non ou faiblement alliés et les alliages de Ni/Cr au sens large, au travers de l'acquisition des cinétiques de corrosion généralisée et de l'évaluation des risques de corrosion localisée, dans différents environnements physico-chimiques attendus en situation de stockage (atmosphérique, aqueux argileux et cimentaires, saturés et non saturés).

Pour les milieux géologiques, et plus particulièrement celui de Cigéo, on dispose aujourd'hui d'une bonne image géologique, structurale et pétro-physique de l'échelle centimétrique-millimétrique (échantillon) jusqu'à l'échelle plurikilométrique à pluridéca-kilométrique (site, secteur, région). L'organisation et les caractéristiques des écoulements et du transport des solutés sont bien appréhendées, notamment en ce qui concerne la formation hôte du Callovo-Oxfordien et les grandes formations calcaires encaissantes du Dogger et de l'Oxfordien (Cigéo). Comme pour les matériaux, les propriétés physiques et chimiques de base ont été acquises, en particulier pour les formations hôtes (Callovo-Oxfordien pour Cigéo, nappe des

sables de l'Aptien pour le CSA...). Plus spécifiquement pour Cigéo, les interprétations de la sismique 3D menée en 2010 sur la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie, consolident l'habillage 3D de la couche du Callovo-Oxfordien en propriétés pétrographiques, minéralogiques, physiques (thermique, mécanique, transport de solutés...) et chimiques. L'ensemble de ces travaux a traité l'état actuel, et l'état futur (par modélisation), en particulier sur le prochain million d'années pour Cigéo.

Sur la période 2013-2016, la R&D en matière de caractérisation des matériaux et des milieux géologiques vise désormais en priorité des points spécifiques pour le développement industriel de Cigéo, le futur RDS du CSA en 2016, et le projet FA-VL. A cet égard, la R&D portera principalement sur :

- La caractérisation de matériaux nouveaux, les bétons « bas pH » et d'argile remaniées des noyaux de scellement (ouvrages de fermeture de Cigéo); l'amélioration de la représentation des écoulements de (sub)surface, l'évaluation des impacts hydrauliques des ouvrages et la prédiction et le suivi géologique à l'avancement lors des opérations de construction (besoins propres à Cigéo) ;
- La réduction d'incertitudes résiduelles sur des points particuliers, par exemple sur les données de base thermodynamique de substances organiques (cf. enjeux technico-économique du co-stockage de déchets MA-VL pour Cigéo) ;
- La caractérisation des sites dans le cadre du projet FA-VL.

L'effort de R&D portera principalement sur les bétons « bas pH » envisagés pour les ouvrages de fermeture de Cigéo.

### 3.2.1 LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

L'effort de R&D portera principalement sur les bétons « bas pH » envisagés pour les ouvrages de fermeture de Cigéo. En lien avec la poursuite du développement des formulations déjà engagé, il s'agira de disposer des paramètres intrinsèques de caractérisation des propriétés physiques (mécanique, hydraulique et thermique) et chimiques (solides et fluides), nécessaires à l'évaluation des comportements en situations de stockage face aux différentes sollicitations attendues (thermique, chimique, par exemple le contact avec les eaux des argilites, et mécanique). Une attention particulière sera portée à l'état au jeune âge qui conditionne le comportement dans le temps, et au comportement mécanique en non-saturé et sous température, de manière couplée ou non, dans le domaine 50°C, 80°C environ, peu exploré jusqu'à présent.

De manière générale, les travaux de R&D de fond sur les données de caractérisation intrinsèques des couplages « endommagement / déformation » et « endommagement / propriétés de transfert des fluides et des solutés » des bétons « classiques » se poursuivront afin de consolider les modèles de comportement mécanique et hydraulique développés, notamment en termes de représentation intégrée et complète des couplages.

### 3.2.2 LES ARGILES REMANIÉES

Au regard des enjeux de l'Andra sur la période 2013-2014, les travaux de R&D porteront principalement sur les assemblages de pellets d'argile gonflante retenus comme solution de référence pour les noyaux des scellements de galeries et d'alvéoles MA-VL de Cigéo. En lien avec le développement des formulations de mélanges de pellets, des conditions de mise en œuvre et des domaines de densité sèche atteinte à la mise en place dans les conditions de Cigéo, les propriétés (thermo)hydromécanique saturées et non saturées des mélanges de pellets seront déterminées. On s'appuiera pour cela sur les modèles de comportement hydromécanique des mélanges de pellets déjà développés par le passé. Une attention particulière sera portée à la chimie des eaux de saturation, hors processus chimiques de transformation minéralogique de l'argile gonflante. L'ensemble de ces travaux sera mené en liens étroits avec les essais de démonstrateurs, en particulier le démonstrateur de scellement FSS au jour.

Enfin, de manière générale, le comportement en fluage des argiles gonflantes sera de nouveau investigué expérimentalement, afin de vérifier *in fine* l'absence de risque d'effondrement des mélanges de pellets d'argile gonflante sur le long terme, phénomène qui pourrait être préjudiciable à la fonction hydraulique des ouvrages de fermeture de Cigéo.

### 3.2.3 LES MILIEUX GÉOLOGIQUES

#### - Les besoins propres à Cigéo

Le modèle 3D géométrique et de propriétés physico-chimiques (péto-physiques, thermiques, hydrauliques, hydro-dispersives et mécaniques) du Callovo-Oxfordien à l'échelle de la ZIRA sera consolidé, à partir de l'interprétation détaillée et complète des données de la sismique 3D réalisée en 2009-2010 et en corrélation avec l'ensemble des mesures en forage et sur échantillons. De nouvelles mesures de la perméabilité seront menées avec les dispositifs développés ces dernières années, plus particulièrement pour l'étude du transfert des gaz et des solutés dans les argilites. En effet, tout en confirmant les faibles valeurs de perméabilité, les premières données acquises indiquent des valeurs plus faibles que celles obtenues avec la technique classique de mesure « *pulse test* ».

Pour l'hydrogéologie, la R&D concernera essentiellement les formations de surface et plus précisément les calcaires du Barrois qui pourront impacter ou être impactés par les installations de Cigéo (surface et ouvrages de liaison surface-fond) sur le plan hydraulique notamment.

Notamment, il s'agira de préciser le modèle d'écoulement de surface et dans les calcaires du Barrois, notamment les transferts souterrains entre vallées et le long des vallées. Le modèle conceptuel et numérique de distribution de racines d'altérations et de puits karstiques fossiles sera établi sur la base de reconnaissances ciblées dès 2013 au niveau des zones potentielles d'implantation des installations de surface de Cigéo.

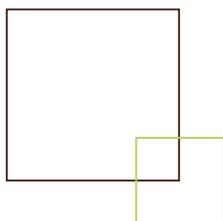


Figure 6 : reconnaissance par méthode de géophysique de surface

#### - Les besoins propres aux centres de surface CSA et CSM

Les recommandations émises lors de l'instruction des RDS précédents et les questionnements apparus ces dernières années dans l'exploitation du CSA et du CSM sur des points particuliers (par exemple l'évaluation précise des plus hautes eaux pour le CSA en vue de l'implantation de nouveaux ouvrages ou le devenir du tritium au CSM) conduisent à actualiser les modèles hydrogéologiques de ces centres notamment en améliorant la représentation des formations géologiques en place.

#### - Les besoins propres au projet FA-VL

Le stockage de déchets FA-VL sous couverture remaniée nécessite la caractérisation fine des formations argileuses cibles, de leurs encaissements, des écoulements des aquifères et des transferts. Pour ce faire, des travaux de reconnaissance par forages, des mesures géophysiques et des reconnaissances hydrogéologiques de surface seront notamment entrepris dès 2013 sur la zone évaluée comme géologiquement favorable au niveau de la Communauté de Communes de Soulaïnes. L'analyse et l'interprétation des données de reconnaissance serviront, à l'horizon 2014-2015, au développement d'un modèle géologique conceptuel et numérique 3D de la géométrie et des propriétés des couches argileuses cibles

et des encaissants. En parallèle, l'étude de la stabilité du site vis-à-vis de l'érosion et du risque sismique sera menée. Ce modèle géologique servira de base au modèle hydrogéologique nécessaire aux évaluations de sûreté, en support au dossier de synthèse en 2015.

- Les besoins communs ou transverses aux projets Cigéo et FA-VL et aux centres de surface  
Les représentations des évolutions géodynamiques internes et externes (surrection, aléa sismique, évolution climatique...) seront améliorées en prenant en compte les spécificités de chaque site (à titre d'exemple pour Cigéo, reprise des spectres de réponse élastique dans le cadre d'une approche probabiliste afin de couvrir une période supérieure à 10 000 ans, conformément à l'évolution de la réglementation post-Fukushima). Ces améliorations devraient permettre de :

- Réduire les dispositions conservatives et les marges, en particulier vis-à-vis des conséquences sur les écosystèmes et les écoulements (i.e. performance de confinement des stockages et des formations géologiques concernées),
- Traiter plus précisément les premières centaines et les premiers milliers d'années, notamment pour les centres de surface et le projet FA-VL.

### 3.2.4 LES MODÈLES THERMODYNAMIQUES ET CINÉTIQUES DES SOLUTÉS ET DES SOLIDES

Les modèles mathématiques simulant le transport réactif d'éléments au sein et au voisinage des différents types de stockages utilisent la base de données ThermoChimie de l'Andra. Les objectifs principaux de la R&D sur 2013-2015 visent à : (i) consolider la base afin de dégager des marges en termes de comportement phénoménologique et d'évaluation de sûreté / performance, (ii) traiter les manques de connaissances sur les systèmes fortement réactifs et aux interfaces afin de disposer des données nécessaires aux travaux de conception et d'évaluation de sûreté de Cigéo (cf. co-stockage de déchets MA-VL) et du projet de stockage FA-VL.

#### 3.2.4.1 Les données thermodynamiques et cinétiques des solutés

Les travaux de R&D porteront sur l'intégration de données thermodynamiques complémentaires pour les radionucléides et les toxiques, et de données sur les cinétiques de réactions acido-basiques et d'oxydo-réduction majeures, afin de bien rendre compte des comportements aux exutoires à l'interface biosphère-géosphère. Ainsi, l'accent sera mis sur (i) les acquisitions de données thermodynamiques des toxiques chimiques en solution, (ii) les acquisitions de données thermodynamiques des complexes aqueux de radionucléides et toxiques chimiques, (iii) les modèles de correction d'activité ionique (influence de la force ionique), (iv) les réactions redox en solution dans la zone d'interface géosphère-biosphère (GBIZ).

#### 3.2.4.2 Les données thermodynamiques et cinétiques sur les phases solides

La base ThermoChimie sera consolidée par l'acquisition de données thermodynamiques sur (i) les phases solides contrôlant la solubilité des radionucléides et toxiques chimiques (ii) les phases minérales argileuses, (iii) les phases cimentaires ainsi que d'autres phases solides clés. Une base de données des constantes de cinétique de dissolution pour les phases majeures et ubiquistes constitutives des différents systèmes géochimiques des stockages de déchets radioactifs (Cigéo, FA-VL, CSA...) sera mise en place.

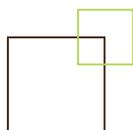
#### 3.2.4.3 Les modèles thermodynamiques relatifs aux composés organiques

Un modèle de relâchement de la matière organique dissoute (MOD) sous conditions de perturbations chimiques (oxydation, hydrogène et eaux cimentaires) sera développé. En parallèle, les données de spéciation des Produits de Dégradation Hydrosolubles (PDH)<sup>25</sup> des déchets organiques devraient être acquises (Cigéo, FA-VL...).

Une approche expérimentale sera développée afin de mieux caractériser et quantifier la complexation des radionucléides et des toxiques chimiques avec la matière organique dissoute au sein et au voisinage des stockages (FA-VL, Cigéo et CSA).

### 3.2.5 LE COMPORTEMENT CHIMIQUE ET LE TRANSFERT DES RADIONUCLÉIDES (ET AUTRES SOLUTÉS)

Le programme de R&D comporte des actions visant, en premier lieu, à améliorer la compréhension des mécanismes gouvernant la composition des eaux porales de chaque composant, puis les phénomènes déterminant la spéciation et le piégeage des radionucléides et des toxiques chimiques pour chaque situation. Le programme comporte également des actions visant à améliorer la compréhension du transport, en régime de diffusion dominante au sein des milieux poreux et en convection/diffusion aux interfaces et dans les discontinuités, des espèces mobiles des radionucléides et des toxiques chimiques.



**3.2.5.1** Les radionucléides et les toxiques chimiques dans les milieux argileux  
Pour le projet FA-VL, il s'agit d'acquérir les paramètres de transfert (diffusion et rétention) des radionucléides et des toxiques chimiques dans le cadre de la reconnaissance de site.

Pour Cigéo, les paramètres du transport diffusif des radionucléides et toxiques chimiques prioritaires dans les argilites du Callovo-Oxfordien et les matériaux à base d'argile gonflante, sont globalement disponibles et jugés satisfaisants. Le programme de R&D portera sur : (i) la consolidation des mécanismes aux petites échelles gouvernant le transfert diffusif des radionucléides, (ii) les mécanismes de piégeage aux temps longs, (iii) l'influence de la matière organique naturelle dissoute sur la rétention des radionucléides.

**3.2.5.2** Les radionucléides et les toxiques chimiques dans les matériaux cimentaires  
Comme pour les argiles, les travaux de R&D qui seront menés sur les matériaux cimentaires s'inscrivent dans une logique de consolidation des données déjà disponibles et importantes. Ils seront menés au travers de (i) la modélisation des mécanismes de rétention des radionucléides et des toxiques chimiques, depuis les valeurs de coefficients de partage  $R_d$  jusqu'au développement de modèles thermodynamiques et cinétiques, au regard des différentes situations de stockage, (ii) la définition de modèles chimie-transfert, en couplant les paramètres coefficient de diffusion effectif  $D_e$ , porosité effective à la diffusion et coefficient de distribution  $K_d$ , en particulier pour le  $^{14}\text{C}$ .

Les couplages transfert-rétention seront étudiés : (i) dans le cadre d'une approche macro-micro avec le développement de modélisations multi-échelles, intégrant progressivement l'acquisition expérimentale, (ii) au sein d'échantillons de béton fracturés avec comme objectif de caractériser et modéliser leur rétention au sein d'une fracture, en fonction des débits et de la composition de l'eau de percolation, (iii) dans le cadre d'un changement de Redox avec pour objectif d'en évaluer l'impact sur la spéciation de radionucléides/toxiques chimiques.

**3.2.5.3** Les radionucléides et toxiques chimiques dans les matériaux remaniés de la couverture FA-VL

En lien avec les travaux de caractérisation des matériaux pour la couverture, les paramètres de transfert ( $D_e$ ,  $\omega$ ,  $K$ ) des solutés ioniques seront déterminés en fonction de la nature des matériaux remaniés, de l'usage éventuel d'additifs minéraux (argiles gonflantes, sables) et de la densité apparente de l'ensemble.

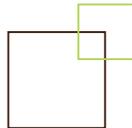
Le programme de R&D comporte des actions visant en premier lieu à améliorer la compréhension des mécanismes gouvernant la composition des eaux porales de chaque composant, puis les phénomènes déterminant la spéciation et le piégeage des radionucléides et des toxiques chimiques pour chaque situation.

## 3.3 CARACTÉRISER ET MODÉLISER LES MÉCANISMES D'INTERACTION AUX ÉCHELLES PERTINENTES POUR RÉDUIRE LES INCERTITUDES PHÉNOMÉNOLOGIQUES



Comme les propriétés intrinsèques, les processus d'interactions thermique, hydraulique-gaz, mécanique et chimique au sens large (en incluant les radionucléides) entre les matériaux et entre les matériaux et les milieux géologiques, font l'objet d'importants travaux de recherche depuis plus de 20 ans, car ils sont *in fine* le fondement des travaux d'évaluation de sûreté et de conception, en particulier vis-à-vis du long terme.

Ces processus sont aujourd'hui bien appréhendés, en particulier ceux relatifs à la chimie (perturbation alcaline sur les argiles, dégradations chimiques des bétons, perturbation fer-argile, corrosion des aciers). Sur les plans de la mécanique et de l'hydraulique-gaz, des progrès ont été accomplis depuis 2005 sur les argilites du Callovo-Oxfordien avec une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement (fracturation localisée et diffuse, auto-colmatage, relation entre fluage et endommagement) et des processus de transfert des gaz dans les milieux argileux (domaine d'application du modèle diphasique, valeur des paramètres comme les pressions d'entrée de gaz...). Ces dernières années ont aussi vu l'accroissement des travaux sur les couplages, en particulier les couplages chimio-mécaniques. L'ensemble des acquis a alimenté la simulation numérique (temps, espace) des processus et de l'évolution des composants des stockages, en support à la représentation du fonctionnement des stockages et *in fine* à la conception et aux évaluations de sûreté.



La poursuite de l'approfondissement des connaissances sur les mécanismes d'interactions vise donc principalement à dégager des marges, soit vis-à-vis de la sûreté (par exemple pour tout ce qui concerne les processus chimiques aux interfaces) soit vis-à-vis de la conception (par exemple pour le comportement mécanique des argilites afin d'optimiser le dimensionnement des revêtements/soutènements des galeries ou des alvéoles MAVL), en support notamment au dossier de la DAC de Cigéo. Des lignes de force en matière de R&D peuvent ainsi être dégagées sur la période 2013-2016 :

- **Les processus chimiques** : traitement des systèmes complexes (salins et organiques), évaluation des processus à court terme (cas de la corrosion et des vitesses de corrosion transitoires élevées à court terme), prise en compte des discontinuités (fractures) au sein des matériaux (cas des bétons par exemple) ;
- **Les processus hydraulique-gaz** : consolidation du domaine d'application des écoulements diphasiques dans les milieux argileux initialement saturés en eau et réduction des incertitudes sur les valeurs des paramètres de transfert des gaz dans ces mêmes milieux ;
- **Les processus mécaniques** : habillage des bétons et argilites endommagées (milieux fracturés) en comportement différé (fluage, gonflement...), anisotropie de comportement des argilites (notamment en extension) et représentation de son effet sur l'endommagement, fluage des milieux argileux multicouche (i.e. couverture des centres de surface et du stockage de déchets FA-VL à faible profondeur) ;
- **Le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques** : traitement des interfaces et des systèmes chimiques complexes (cf. ci-dessus), en incluant le Redox.
- La représentation des milieux et des mécanismes aux petites échelles (du nanomètre au micromètre).

### 3.3.1 L'INVESTIGATION DES MÉCANISMES THMC<sup>28</sup>-GAZ AUX PETITES ÉCHELLES ET LES CHANGEMENTS D'ÉCHELLE

Les travaux de caractérisation des processus d'interaction ont été menés à l'échelle macroscopique pour l'essentiel. Les techniques d'approches aux petites échelles et l'intégration des données obtenues aux échelles supérieures seront développées et appliquées aux processus mécaniques et de transfert des gaz principalement, autour des deux axes de recherche qui sont étroitement liés :

- Le développement et la mise en œuvre des techniques d'imagerie scientifiques «petites échelles» L'objectif principal sera de développer plus largement l'application des techniques d'imagerie tridimensionnelles hautes résolutions aux matériaux argileux compacts et cimentaires pour des états de contraintes contrôlées, afin de disposer *in fine* d'un modèle numérique tridimensionnel et multi-échelles en support aux modélisations THMC<sup>26</sup> à petites échelles ;
- Le développement et l'application des techniques de changement d'échelles, des petites échelles aux échelles macroscopiques pertinentes pour la conception et les évaluations de sûreté. Trois différentes approches seront suivies :
  - L'approche directe aux petites échelles : dynamique moléculaire, méthodes de milieux (solvant, solide) continus et méthode sur réseaux de Boltzmann,
  - Les méthodes d'homogénéisation basées sur l'intégration des résultats acquis par les techniques d'imagerie (connaissance de la microstructure) et leur validation vis-à-vis des propriétés réelles des matériaux du stockage,
  - Les modèles de représentation de matériaux modèles, tels que les réseaux de pores, analogues aux matériaux du stockage.

### 3.3.2 LA CORROSION DES MÉTAUX EN MILIEU ARGILEUX VIS-À-VIS DU DIMENSIONNEMENT DES ALVÉOLES HA

Les travaux concerneront principalement Cigéo et porteront sur un processus au cœur de la conception et de l'optimisation technico-économique : la corrosion des métaux en milieu argileux vis-à-vis du dimensionnement des alvéoles HA. Néanmoins, des travaux sur les processus classiques d'interactions chimiques (bétons/argiles, argile/fer, bétons/métaux, oxydation des argilites, comportement chimique des argilites et argiles gonflantes en température...) seront poursuivis avec pour objectif la consolidation des modèles existants, en particulier le couplage entre les processus chimiques et les processus de transfert).

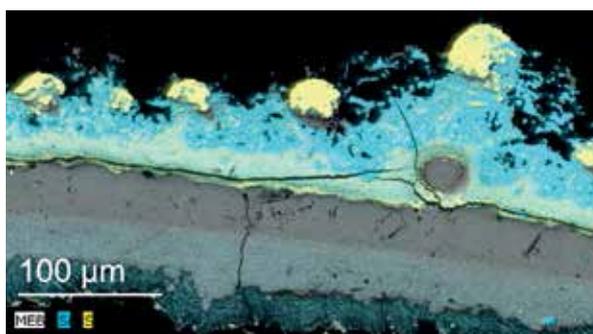
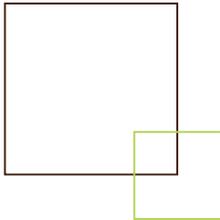


Figure 7 : Produits de corrosion d'un acier non allié en milieu argileux

Les travaux de R&D seront conduits autour de points particuliers, notamment vis-à-vis du choix des nuances d'acier, du dimensionnement des composants métalliques (i.e. épaisseurs) et de la production d'hydrogène, comme suit :

- La consolidation des faibles cinétiques de corrosion généralisée en milieu anoxique à moyen et long terme, en lien avec la quantification des temps d'atteinte de ces faibles cinétiques, l'évaluation des mécanismes de la période de corrosion transitoire et l'influence de cette dernière sur les processus de corrosion à long terme ;

26 - THMC : Thermique, hydraulique, Mécanique, Chimique.



- La vérification du rôle des rayonnements (en particulier l'absence de corrosion significative au-delà de 10 Gy/h critère retenu dans les exigences de Cigéo), des micro-organismes ou des conditions locales (milieu hétérogène, présence de soufre, courants vagabonds...) sur l'augmentation des vitesses de corrosion généralisées ou le développement d'une corrosion localisée ;
- La vérification de l'absence de risques de processus particuliers de corrosion (corrosion sous contrainte, fragilisation par l'hydrogène...) pouvant conduire à une rupture prématurée du sur-conteneur et du chemisage, par le choix de nuances d'acier adaptées ;
- La caractérisation des produits de corrosion afin de confirmer leur caractère protecteur en lien avec les faibles valeurs de cinétique de corrosion, et de déterminer leurs propriétés vis-à-vis de la dissolution du verre (sorption et/ou co-précipitation de silicium) ou des contraintes mécaniques qu'ils pourraient exercer sur l'environnement ;
- La modélisation des processus couplés corrosion/évolution géochimique afin de rendre plus robuste le choix des cinétiques de corrosion pour les dimensionnements ;
- La proposition d'éventuels traitements de surface ou revêtements pour protéger les sur-conteneurs ou chemisages dans une phase transitoire.

Les travaux menés seront à la fois expérimentaux, notamment avec l'analyse des résultats des expérimentations de longue durée au Laboratoire souterrain (MCO, matériaux-corrosion) et de modélisation avec l'intégration des modèles de représentation des processus fins dans le code de corrosion Calipso, couplé avec des codes de simulation en transport-chimie afin de mieux rendre compte des conditions d'environnement locales de la corrosion.

### 3.3.3 LES INTERACTIONS MÉCANIQUES ENTRE COMPOSANTS/STRUCTURES DE STOCKAGE ET AVEC LEUR ENVIRONNEMENT NATUREL

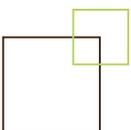
La R&D portera principalement sur le comportement mécanique des argilites pour le projet Cigéo et en particulier sur la zone endommagée autour des ouvrages. Sur la période 2013-2014, l'objectif sera de consolider et d'améliorer les modèles « classiques » existants, sur la base d'une réduction des incertitudes sur les processus et les valeurs de paramètres. Sans prétendre à une représentation parfaite des processus, ces modèles doivent permettre un dimensionnement raisonnable des ouvrages souterrains de Cigéo, avec un focus sur les cinétiques de déformation différée sur la période des premières centaines d'années. En parallèle, le développement déjà engagé de modèles plus sophistiqués et proches d'une représentation réaliste des argilites et plus particulièrement de la zone endommagée, suivant l'approche de milieu fracturé ou de localisation de l'endommagement sera poursuivi.

Dans ce cadre les thèmes principaux de R&D sur le comportement mécanique des argilites seront les suivants :

- *L'anisotropie de comportement des argilites saines* suivant différents chemins de sollicitation. Une attention particulière sera portée au comportement en extension à pression moyenne constante, chemin attendu au moment du creusement des ouvrages ;
- *Les mécanismes de déformations différées* aux petites échelles tant pour les argilites endommagées de manière diffuse que pour les argilites endommagées par fracturation « macroscopique » (cf. zone endommagée). Un focus sera fait sur le gonflement en fonction du fluage et de la propagation sub-critique de fissures, sur les déviateurs faibles à nul et sur le chemin en extension. De même, le comportement proche de la saturation totale en eau sera évalué afin de déconvoluer les effets de la non-saturation sur le comportement différé, et de quantifier les artefacts ;
- *La localisation des mécanismes de déformation différée dans la zone endommagée (fractures vs blocs)* et l'habillage de la zone endommagée en tant que double milieu ou milieu fracturé en comportement contrainte – déformation élasto-viscoplastique. Différentes approches de représentation seront suivies, milieu poreux continu équivalent vs milieu fracturé...en lien avec les codes de calculs associés.

S'ajouteront des travaux sur des thèmes plus spécifiques, principalement en support aux évaluations de sûreté après fermeture :

- *L'endommagement thermique* des argilites (saines, endommagées de manière diffuse et endommagées de manière localisée), avec pour objectif de consolider le domaine d'endommagement aujourd'hui estimé au-delà de 80°C ;



- *Les frottements avec les composants cimentaires et métalliques.* Il s'agira de disposer de données quantifiées dans le cadre de la conception et de l'évolution à long terme des ouvrages. Cela concerne tout particulièrement les alvéoles HA et les scellements ;
- *L'auto-colmatage des argilites endommagées.* Il s'agira de consolider les données existantes, notamment pour ce qui concerne les argilites au droit des scellements. Un focus particulier sera fait sur le faciès silto-carbonaté des argilites correspondant au toit du Callovo-Oxfordien, au regard de l'importance des scellements de liaison surface-fond dans la sûreté à long terme.



Le traitement de tout ou partie de ces thèmes de R&D s'appuiera sur les expérimentations au Laboratoire souterrain déjà engagées comme les démonstrateurs d'alvéoles HA, l'essai de pose de voussoir avec un tunnelier et l'essai LUCOEX de chargement thermique ou à venir comme l'essai ERA de remplissage de l'extrados d'un chemisage HA.

### 3.3.4 LES COUPLAGES MULTIPROCESSUS THM-GAZ

L'effort de R&D portera principalement sur le transfert des gaz afin d'améliorer la représentation des transitoires hydraulique-gaz dans les stockages aussi bien pendant les phases d'exploitation que de post-fermeture. Pour Cigéo, cela concerne les argilites et les argiles gonflantes avec comme enjeu principal une meilleure estimation (i) des pressions de gaz maximales dans le stockage après fermeture notamment, afin de consolider l'absence d'impact sur les performances du Callovo-Oxfordien et des scellements, (ii) des conditions de transfert des gaz au sein du stockage afin de quantifier de manière moins conservatrice le transfert du C<sup>14</sup> sous forme gazeuse vers les ouvrages de liaison surface-fond après fermeture.

Au cours des dernières années, des efforts importants ont été consacrés à la caractérisation du comportement au gaz des matériaux du stockage (argile et béton) à travers un programme dédié piloté par l'Andra mais aussi par l'intermédiaire du projet Européen FORGE (*Fate Of Repository GasEs*, 2009-2013) dédié à la problématique du gaz dans les stockages en formation géologique profonde. Afin de réduire les incertitudes résiduelles ou consolider les données acquises dans le cadre de ce projet, les travaux expérimentaux et de modélisation aux différentes échelles porteront sur les points suivants :

- La consolidation du domaine d'applicabilité du modèle diphasique aux argiles compactes initialement saturées, sur lequel sont fondées les évaluations de performance du stockage Cigéo, donc in fine les évaluations de sûreté après fermeture ;
- La quantification du coefficient de diffusion de l'hydrogène dissous dans les argilites saturées, qui pilote en partie le temps d'évacuation de l'hydrogène produit dans le stockage ;
- La quantification des transferts de gaz aux interfaces des composants argilites/argile gonflante/béton des scellements et argilites/aciers des alvéoles HA afin respectivement de consolider le rôle limité des scellements au cours du transitoire hydraulique-gaz et évaluer l'état redox des alvéoles HA au cours de la période d'exploitation en lien avec la corrosion des chemisages ;
- La consolidation de l'absence d'impact du transfert de gaz dans les argilites endommagées sur leur capacité d'auto-colmatage et de récupération et l'évaluation de la possibilité d'une diminution de la pression d'entrée des gaz dans les fractures d'argiles colmatées sur le long terme.

### 3.3.5 LE COMPORTEMENT DES RADIONUCLÉIDES ET TOXIQUES CHIMIQUES AUX INTERFACES

Les objectifs de R&D 2013-2016 seront de mieux caractériser et comprendre les évolutions des paramètres déterminant les comportements spécifiques des radionucléides dans les zones d'interface entre milieux<sup>27</sup>.

27 - Cigéo : argilites de la zone endommagée/air de ventilation ; verre HA/produits de corrosion/argilites oxydées ; béton dégradé des alvéoles MAVL/argilites de la zone endommagée ; scellement en argile gonflante/argilites de la zone endommagée ; FAVL : béton dégradé des alvéoles/matériaux argileux de couverture...)

L'effort de R&D portera principalement sur le transfert des gaz afin d'améliorer la représentation des transitoires hydraulique-gaz dans les stockages aussi bien pendant les phases d'exploitation que de post-fermeture.





### 3.3.5.1 Dans les zones de matériaux chimiquement perturbés

Deux zones d'interface en conditions saturée et non saturée feront l'objet d'études expérimentales et de modélisation spécifiques : (i) la zone comprenant les produits de corrosion des conteneurs et sur-conteneurs en acier autour des alvéoles HA et les argilites, (ii) le milieu argileux peu perméable perturbé chimiquement en contact avec les matériaux cimentaires.

Afin d'accéder aux échelles pertinentes, la démarche de caractérisation des propriétés de transfert des radionucléides et toxiques chimiques aux interfaces s'appuiera sur la mise en œuvre de méthodes de caractérisation des propriétés de transport (convection, diffusion) à petites échelles. L'effet de la température sur les diverses cinétiques réactionnelles de précipitation/dissolution des phases solides, de sorption, d'échange ionique de radionucléides/toxiques chimiques identifiées aux interfaces argilites saines/argilites de la zone endommagée, argilites/fer et argilites/béton, sera aussi investigué.

### 3.3.5.2 Dans les argilites de la zone endommagée au droit des scellements en argiles gonflantes (Cigéo)

Les effets des processus de cicatrisation hydraulique (i.e. auto-colmatage) des fractures/fissures de la zone endommagée au droit des scellements sur le transfert des radionucléides seront étudiés afin de quantifier l'efficacité de l'auto-colmatage sur les propriétés de transferts de radionucléides pour différents contextes d'endommagement et environnementaux (eau de site, cimentaire...).

### 3.3.5.3 Dans les zones de transition redox entre les déchets (MA-VL, FA-VL, TFA) et l'environnement confinant (argilites du Callovo-Oxfordien, argile remaniée de couverture (FA-VL et TFA))

Les travaux de R&D sur la catalyse bactérienne de la réduction des nitrates à basse concentration en présence de matière organique seront complétés par l'étude de la réactivité en présence d'H<sub>2</sub> en systèmes argileux et cimentaires à plus fortes concentrations. Ils seront étendus aux autres accepteurs d'électrons, en l'occurrence le Fe(III), le Mn, les sulfates puis les carbonates. L'impact de la réactivité de ces oxydants sur l'évolution du potentiel redox, sur la spéciation et la mobilité des radionucléides et toxiques chimiques sera évalué en laboratoire de surface et *in situ* au Mont-Terri.

### 3.3.5.4 Le transport des radionucléides sous forme colloïdale

Pour le projet Cigéo, les travaux expérimentaux en cours concernant le modèle de transport de colloïdes au sein d'argilites saines et perturbées seront poursuivis afin de confirmer les seuils de coupure des colloïdes, puis d'évaluer les interactions électrostatiques et chimiques des colloïdes avec les surfaces des pores et les radionucléides.

Pour le CSA, l'objectif est d'acquérir les paramètres nécessaires à l'évaluation du transport colloïdal dans les sables de l'Aptien et d'en apprécier l'importance par rapport au transport de solutés.

## 3.3.6 LE COMPORTEMENT DES RADIONUCLÉIDES ET TOXIQUES CHIMIQUES DANS LES ENVIRONNEMENTS SUPERFICIELS

### 3.3.6.1 La GBIZ (zone d'interface entre la géosphère et la biosphère / *Geosphere-Biosphere Interface Zone*)

La représentation du fonctionnement de la GBIZ dans des modèles appropriés est essentielle pour anticiper l'impact des stockages FA-VL sur le transfert à long terme vers la biosphère des radionucléides et toxiques chimiques les plus mobiles et de ceux sensibles aux fluctuations des conditions redox.

- Le fonctionnement de la GBIZ

Les études de caractérisation viseront une représentation réaliste des gradients de propriétés qui contrôlent la spéciation (texture, changements redox, activité microbienne...) et la mobilité (disponibilité en eau, distribution racinaire...) des radionucléides et toxiques chimiques au sein de colonnes de sol typiques d'exutoires naturels potentiels.

- Les modèles de transfert réactif des radionucléides et toxiques chimiques sensibles au redox  
Les nouvelles études théoriques et expérimentales envisagées dès 2013 ont pour objectif



d'identifier les réactions d'oxydo-réduction dominantes dans un environnement de subsurface (CSA, CSM, FA-VL), afin d'intégrer les couples redox actifs ainsi que leur cinétique réactionnelle dans des modèles hydro-bio-géochimiques. A terme, des modèles hydro-bio-géochimiques simulant le transport réactif des radionucléides et toxiques chimiques au niveau de l'interface géosphère-biosphère (FA-VL 2014, RDS CSA 2016) seront calibrés en utilisant des lois cinétiques associées à la base de données ThermoChimie.

- Les transferts des radionucléides et toxiques chimiques à l'interface entre la zone saturée et la zone non saturée

Le modèle SAMM (modèle multicouche) initialement développé pour quantifier le transfert des radionucléides mobiles arrivant depuis un stockage HA/MA-VL dans un exutoire naturel a été étendu pour des applications à un stockage à faible profondeur (FA-VL) et de surface (CSA). Les modélisations rendront compte des processus de transfert les plus importants (advection, diffusion et transfert racinaire) ainsi que des transformations liées (i) à la désintégration/filiation, (ii) aux changements de rétention liés à la spéciation (effet redox).

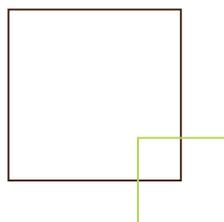
- Les modèles biogéochimiques  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$

Une étude bibliographique et une approche expérimentale dédiée devront permettre de caler les cinétiques d'échange entre fractions organique et inorganique dans les sols, suivant leurs caractéristiques.

#### 3.3.6.2 La biosphère

Afin de disposer de modèles dynamiques et semi-mécanistiques plus réalistes (flux d'eau et de biomasse, taux de transformation...), utilisables en support aux modèles opérationnels prédictifs, trois axes complémentaires de recherche sont envisagés : (i) l'étude du cycle biogéochimique des radionucléides et toxiques chimiques, (ii) évaluation du taux de transformation dans les sols (transformation des pools organiques et inorganiques des radionucléides et toxiques chimiques, volatilisation des radionucléides et toxiques chimiques), (iii) le développement de modèles.

## 3.4 AMÉLIORER LA CONCEPTUALISATION ET LA SIMULATION DU FONCTIONNEMENT PHÉNOMÉNOLOGIQUE DES STOCKAGES ET DE LEURS ENVIRONNEMENTS NATURELS SUR LE LONG TERME



Depuis 2001, l'Andra porte un effort important sur le développement d'outils numériques (méthodes, codes et machines) pour simuler le fonctionnement des stockages, en support à la conception, la gestion des stockages en exploitation et la sûreté après fermeture. Les domaines phénoménologiques concernés sont ceux au cœur de l'évaluation de sûreté et de la conception d'un stockage : l'hydraulique et le transport de soluté en milieu poreux saturé ou non saturé ; le transfert diphasique eau-gaz multi-composant gaz (radionucléides gazeux inclus) en milieu poreux ; le transport réactif en milieu poreux.

En lien étroit avec l'acquisition de connaissances, l'effort de R&D sera poursuivi sur 2013-2016 afin de (i) disposer des outils de simulation encore plus performants, tant sur le plan numérique que sur celui de la représentation de la complexité du système de stockage (composants, processus, temps, espace), (ii) mettre en œuvre les simulations numériques impliquant de forts couplages multi-physiques, « THMCR<sup>28</sup> », nécessaire à l'optimisation technico-économique et aux évaluations de la performance et de la sûreté des stockages, notamment pour Cigéo.

28 - THMCR : Thermique, hydraulique, Mécanique, Chimique, Radiologique.

### 3.4.1 LES OUTILS DE SIMULATION

Quatre grands axes de la R&D sur les outils de simulation seront poursuivis.

#### 3.4.1.1 La simulation des processus physiques

- Le transfert de masse et de chaleur entre milieu ouvert et milieu poreux

Pour Cigéo, l'objectif est de contribuer à améliorer la connaissance sur le comportement des gaz (risque ATEX, ATmosphères EXplosives) au cours de la phase d'exploitation, à travers une approche phénoménologique plus complète. Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du partenariat entre l'Andra et l'INRIA.

Pour le CSA, les travaux porteront sur (i) l'impact de la variabilité du climat sur les échanges de masse et de chaleur entre l'ouvrage et l'air environnant, (ii) la migration des liquides et des gaz dans et autour des cellules de stockage (notamment Tritium sous forme liquide (HTO), ou gazeux (HTO, HT)).

- Le relâchement, les transferts eau/gaz en milieu poreux, et les couplages avec l'hydraulique-hydrique

Les travaux porteront sur l'amélioration des modèles conceptuels et mathématiques relatifs (i) aux écoulements en milieu poreux, notamment dans les matériaux endommagés présentant des hétérogénéités de type fissuration, (ii) au couplage hydraulique-gaz et à la production d'hydrogène par corrosion anoxique.

- Les comportements mécaniques multiprocessus

La modélisation des discontinuités, i.e. des fissures/fractures, nécessite le développement de schémas numériques performants capables de générer des réseaux de fissures/fractures 3D à partir des observations *in situ* ou de résultats numériques. Afin de mieux représenter le comportement de la zone fracturée autour des ouvrages, les travaux porteront principalement sur le développement d'approches par (i) milieux discrets, (ii) éléments finis étendus, (iii) éléments finis enrichis.

Par ailleurs, les mécanismes non-linéaires (plasticité, fluage de la matrice rocheuse, propagation sous-critique des discontinuités, corrosion des parties métalliques) seront pris en compte dans les outils de simulation.

- Les processus complexes ou couplés du transport réactif en milieu poreux

Sur le transport réactif en milieux poreux non saturé et/ou à double porosité, **les travaux auront pour objectif de mieux représenter le couplage entre l'eau produite ou consommée par réaction chimique et l'hydraulique du système.** Par ailleurs, des travaux de couplage entre les zones fracturées d'argilites et les fissures dans les bétons seront effectués (double porosité) et implémentés dans des modèles de chimie. De même, dans l'attente qu'un modèle de dégradation du verre (type GRAAL) ou des composants en acier (type CALIPSO) soit complètement opérationnel sur de grandes échelles de temps et d'espace, des solutions seront développées pour simuler la réactivité à la surface de ces matériaux non poreux.

Les travaux relatifs au rétrocouplage entre processus chimiques et processus hydro-dispersifs porteront sur l'amélioration de la représentation du phénomène d'écrantage (formation de minéraux secondaires à la surface de matériaux dont les minéraux initiaux font l'objet d'une dissolution) qui contribue à diminuer l'accessibilité de certains minéraux primaires. De même, en fonction du type de matériaux (argileux, cimentaire...), les réactions de dissolution/précipitation modifient différemment la texture de porosité et, par conséquent, la valeur du coefficient de diffusion effectif. L'introduction de lois de couplage plus raffinées permettra de mieux coupler l'évolution du coefficient de diffusion effectif (global ou relatif à chaque espèce aqueuse) à celle de la porosité en fonction des réactions de dissolution/précipitation locales.

### 3.4.1.2 Les méthodes de résolution

L'enjeu est d'améliorer la capacité des outils de simulation à représenter de manière détaillée les couplages multi-physiques sur de grandes échelles de temps et d'espace, et avec des temps de calcul raisonnables. Les travaux porteront sur la mise en œuvre systématique du calcul haute performance : (i) mise en place de (nouveaux) solveurs parallèles sur les codes de référence de l'Andra, (ii) méthodes de décomposition de domaines en espace (phénomènes physiques contrastés) et en temps (nécessité d'une discrétisation temporelle très fine et très localisée pour la gestion des interfaces).



Ils seront associés à l'utilisation de moyens matériels permettant la mise en œuvre de ces méthodes de résolution, l'utilisation des processeurs des cartes graphiques (GPU) à des fins de calcul scientifique, l'accès au centre de calcul intensif national (CINES) à travers GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), et l'acquisition en propre de moyens de calculs de type cluster ou grille de calcul.

### 3.4.1.3 Les méthodes d'analyse

Il s'agira de développer des méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude, du type algorithmes d'évaluation de surfaces de réponse et méthodes d'analyse des moments d'ordre 3 et 4, afin de mener des analyses probabilistes sur des modélisations complexes.

### 3.4.1.4 La plateforme de calcul Cassandra

La plateforme Cassandra (Codes Appliqués à la Simulation des Stockages de l'Andra) est le lieu de capitalisation des méthodes de résolution et d'analyse l'intégration des outils, des couplages et des méthodes numériques. L'effort de développement et d'intégration des codes de calculs, et des couplages relevant notamment de l'hydraulique et du transfert de solutés en milieu poreux saturé/insaturé sera poursuivi.

## 3.4.2 L'ANALYSE PHÉNOMÉNOLOGIQUE DES SITUATIONS DE STOCKAGE ET L'ÉVALUATION DE PERFORMANCE/SÛRETÉ DES STOCKAGES APRÈS FERMETURE

### 3.4.2.1 Le relâchement et le transfert des gaz

L'évaluation de l'ensemble des composants ouvrages à grande échelle au sein d'une seule simulation sera poursuivie en améliorant la représentation géométrique, en actualisant les modèles conceptuels phénoménologiques de comportement, notamment en ce qui concerne le terme source gaz de corrosion.

### 3.4.2.2 Le comportement mécanique des ouvrages et de leur environnement naturel

- Le comportement THM grande échelle du milieu géologique

Afin d'affiner les connaissances sur la réponse thermo-hydrromécanique en grand du milieu géologique à la charge thermique des différentes zones du stockage Cigéo, jusqu'à présent modélisée 2D, une modélisation THM couplée multi-échelles 3-D sera développée.

- Le comportement THM des ouvrages de stockage

■ Tous ouvrages :

**Cigéo** : Les recherches seront poursuivies avec une représentation plus fine de l'endommagement initial et de son évolution pour les différents ouvrages du stockage Cigéo en fonction de leurs orientations, leurs profondeurs, leurs diamètres et en lien avec la conception de ces derniers. Pour le comportement différé de l'argillite, les approches numériques validées seront utilisées dans les simulations de l'évolution mécanique des ouvrages de stockage en prenant plus finement en compte les couplages THM au cours des différentes situations de stockage en lien avec l'évolution des connaissances sur (i) les lois de comportement HM, (ii) l'anisotropie des propriétés des argillites, (iii) l'évolution des matériaux.

**Centres de surface** : Les travaux sur le comportement mécanique global des bétons fissurés et sur l'évolution de ces fissures/fractures sur le long terme, seront poursuivis. Afin de mesurer l'influence de la fissuration sur le comportement hydraulique et de transfert des solutés au sein de l'ouvrage, le couplage avec les transferts hydriques devrait également être étudié.



#### ■ Alvéoles HA

Les résultats des expérimentations en laboratoire souterrain de sollicitations thermiques (TER/TED/TEC)<sup>29</sup> et des démonstrateurs HA, associés à une prise en compte plus fine de la représentation de la zone de fracturation (approche discrète vs approche continue) et de la corrosion des aciers devraient permettre de disposer d'une représentation continue et précise du comportement phénoménologique d'une alvéole HA.



Figure 8 : Les dispositifs de régulation de chauffe de l'expérimentation TED



#### ■ Alvéoles MA-VL

Les recherches porteront sur l'évolution mécanique des alvéoles MA-VL jusqu'à leur rupture, et sur les conséquences induites sur l'évolution mécanique de la zone de fracturation. Par ailleurs, les recherches seront complétées (pour les alvéoles concernées) par l'étude de la dégradation chemo-mécanique des matériaux cimentaires consécutive à la dissolution des sels présents dans les colis de déchets.

#### ■ Ouvrages de liaison

Comme pour les alvéoles MA-VL, de nouvelles évaluations consolidant et améliorant la représentation de l'évolution thermo-hydomécanique à court, moyen et long terme, des ouvrages de liaison, avec et sans prise en compte du gaz, seront menées en considérant la zone de fracturation et son évolution, le comportement intrinsèque de l'argilite (notamment son anisotropie), la dégradation des matériaux cimentaires, le comportement des interfaces et leurs évolutions.

#### ■ Scellements/bouchon

Scellements : Des simulations numériques seront réalisées pour affiner le comportement hydromécanique des scellements pendant la phase transitoire de post-fermeture. En particulier, une évaluation plus précise des effets de la chaleur d'hydratation des bétons (de type « bas pH ») sur les différents ouvrages (soutènement, revêtement et massifs d'appui) sera effectuée sur la base des données les plus récentes.

Au-delà, de nouvelles évaluations thermo-hydomécaniques seront effectuées sur la base des concepts actualisés (notamment ceux des massifs d'appui) et en intégrant (i) les résultats des simulations chimiques réalisées à ce stade, (ii) les apports des différents essais en laboratoire jour et fond.

Bouchon d'alvéoles HA : Des évaluations thermo-hydomécaniques seront menées en tenant compte les différents processus en jeu, en tête d'alvéole HA : dilatation thermique des différents composants, surpressions interstitielles dans les argilites, gonflement du bouchon d'argile gonflante et conséquences mécaniques, effets de la corrosion.

### 3.4.2.3 L'évolution chimique des ouvrages de stockage et de leur environnement naturel

- Cigéo

- Alvéoles HA

Des travaux seront menés sur (i) l'évaluation de l'impact de l'activité bactérienne (ii) la prise en compte explicite de la phase gaz, (iii) la prise en compte de la consommation d'eau par corrosion dans l'hydraulique du système et la limitation induite sur les cinétiques réactionnelles, (iv) l'intégration du caractère non poreux des composants en acier et des déchets vitrifiés. Une représentation explicite des discontinuités sera également considérée dans l'évolution chimique d'une alvéole HA sur le long terme.

- Alvéoles MA- VL

Les différentes études envisagées traiteront du comportement des alvéoles contenant les grandes catégories de déchets MA-VL : déchets de structure<sup>30</sup>, déchets organiques, boues bitumées, déchets salins et déchets vitrifiés.

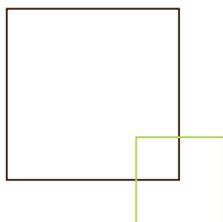


Figure 9 : coques et embouts

- Ouvrages de fermeture en conditions multiphasiques pendant la période de post-fermeture : Les évaluations de type chimie-transport envisagées aborderont l'évolution physico-chimique des bétons « bas pH » retenus pour réaliser les massifs d'appui et les revêtements/soutènement au droit des scellements.

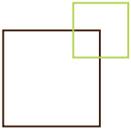
- Le stockage FA-VL : Les études envisagées ont pour objectif de fournir une description et une quantification (i) de l'évolution dans ce type de stockage des différentes familles de déchets radifères dont en particulier les déchets RRA<sup>31</sup> riches en nitrates, (ii) de celle de leur environnement (formation argileuse hôte et couverture remaniée). Ces études permettront notamment de préciser l'impact du panache salin sur le comportement physico-chimique des ouvrages de couverture et de la roche hôte et les conséquences sur le transfert des solutés.

- Le CSA : Les études porteront sur la dégradation de différents types de déchets contenant des composés organiques et ses conséquences en termes de relâchement de radionucléides et de toxiques chimiques (cinétiques de relâchement et comportement des composés organiques) en conditions cimentaires au sein des ouvrages de stockage.

29 - TER : « Réponse de l'argilite à une sollicitation thermique » ; TED : « Propriété et effets thermiques » ; TEC : « Test d'élongation d'un chemisage »

30 - Déchets métalliques issus du traitement des assemblages combustibles

31 - Résidus radifères issus du traitement de la monazite



#### 3.4.2.4 Le relâchement et le transfert de radionucléides

- Les alvéoles HA et MA-VL : Les travaux porteront sur le relâchement, le transfert et la rétention des radionucléides et des toxiques chimiques d'intérêt, en représentant les cinétiques de relâchement et les processus de rétention (échanges d'ions, sorption, complexation aqueuse...).
- Le stockage FA-VL : Les études de conception du stockage FA-VL porteront sur l'analyse du comportement des radionucléides en lien en particulier avec l'évolution des conditions redox dues soit à la présence d'oxygène, soit à la réactivité du panache de nitrates et au relâchement de sels (nitrates, sulfate, phosphate...).
- Le CSA : Les études s'attacheront à évaluer également la migration des radionucléides d'intérêt présents dans les différents types de déchets étudiés (déchets riches en organiques, résines...), en fonction de la présence d'organiques.

## 3.5 TRAITER, AU TRAVERS D'APPROCHES COMPLÉMENTAIRES (SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES, MATHÉMATIQUES), LA PROBLÉMATIQUE DES LONGUES ÉCHELLES DE TEMPS

Les temporalités impliquées dans la gestion des déchets radioactifs sont uniques comparées à d'autres domaines industriels et soulèvent des questions d'une très grande complexité. Elles constituent un véritable défi, en particulier pour la simulation numérique en vue de la démonstration de sûreté de Cigéo. Elles interrogent également avec acuité les méthodes d'évaluation socio-économique, pour lesquelles l'échelle séculaire est déjà extraordinaire. Compte tenu des incertitudes inhérentes à l'anticipation sur des longues durées, la question principale qui se pose est donc celle de la crédibilité des travaux scientifiques et techniques sur ce sujet, notamment pour les non spécialistes, et plus généralement des modalités de production et d'usage de l'expertise en situation d'incertitude.

Cette problématique de l'administration de la preuve sera traitée avec le concours des Sciences Humaines et Sociales (SHS), dans une perspective transdisciplinaire menée au sein de l'Agence, dans le but de rendre plus robuste l'approche de l'Andra dans son cœur de métier. Il s'agit donc d'un travail de fond et à long terme qui vise plus précisément à : (i) engager une démarche réflexive sur les activités principales de l'Agence, (ii) intégrer leurs dimensions sociétales (historiques, socio-économiques, culturelles...), (iii) faire transparaître cette démarche au niveau de l'ensemble des parties intéressées.

Les travaux prévus seront ponctués par une série de rencontres scientifiques, avec des publications associées, lesquelles aboutiront à l'organisation d'un colloque interdisciplinaire de niveau international au printemps 2016. Ils mobiliseront plusieurs disciplines et acteurs académiques en sciences humaines et sociales (histoire, sociologie, économie...) et nécessiteront la collaboration active des scientifiques et des ingénieurs de l'Andra. Les thèmes traités seront notamment abordés sous l'angle de la qualification des incertitudes liées au long terme pour la démonstration de sûreté et dans l'évaluation socio-économique du « mégaprojet » Cigéo.

#### **La constitution de l'expertise en matière de sûreté du stockage des déchets radioactifs**

Les conceptions et les pratiques relatives à la sûreté du stockage des déchets radioactifs se sont constituées par l'imbrication de différentes histoires s'inscrivant dans des temporalités

longues et à des échelles transnationales. La mise en perspective historique de ces évolutions permettra de déceler les spécificités et les enjeux de la démarche de sûreté de Cigéo.



Les collaborations internationales dans l'organisation de l'expertise et les épreuves publiques auxquelles ces savoirs d'expertise sont soumis seront ainsi abordées. Ces travaux permettront notamment de cartographier de façon dynamique les différentes communautés professionnelles concernées et de les mettre en contexte.

L'analyse précise des différents outils cognitifs et opérationnels utilisés (scénarisation, modélisation-simulation, expérimentation...) et de la qualification des incertitudes opérée dans cette démarche fera l'objet d'une attention particulière, à l'égard de ce qui a été réalisé dans d'autres domaines.

### **Les communautés d'experts en modélisation-simulation et scénarisation dans le domaine nucléaire**

L'étude de la structuration de communautés d'experts en modélisations-simulations et scénarisation et du statut de ces activités dans le régime technoscientifique du nucléaire, très peu connu par rapport au domaine du climat, sera réalisée en vue de mieux saisir le positionnement, les innovations et les spécificités apportés par les démarches de l'Andra dans le cadre du projet Cigéo.

### **Les activités de démonstration menées par l'Andra au regard de la sûreté à long terme**

Une compréhension fine et « en situation » des activités de démonstration menées par l'Agence et leur mise en perspective historique contribueront à enrichir l'analyse de la démonstration de sûreté et permettront aux acteurs d'avoir un retour sur leurs propres pratiques. Elles permettront aussi notamment de mieux saisir les rapports entre simulations/modélisations et réalité du stockage.

### **La démonstration de sûreté de Cigéo sous l'angle de la théorie de la décision**

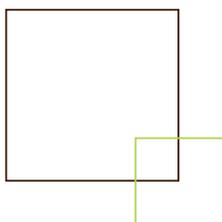
L'incertitude qui porte sur l'identification des scénarios futurs et l'estimation de leurs probabilités, dans la démonstration de sûreté, rend délicate l'application au projet Cigéo d'outils communs du calcul économique comme l'analyse coûts-bénéfices ou la valorisation d'options réelles, fondés sur des modèles de relation cause-effet.

Les travaux prévus s'attacheront donc, dans un premier temps, à une description systématique de la qualification des incertitudes dans la démarche de sûreté (en termes d'horizon temporel, de source, de nature, etc.) de manière à, dans un second temps, analyser cette démarche à l'aune de modèles décisionnels capables d'intégrer les risques et l'incertitude. Ces modèles permettraient ainsi d'articuler la sûreté aux évaluations socio-économiques.

### **L'appréhension du temps long dans l'évaluation socio-économique de Cigéo « mégaprojet »**

Avec une période d'exploitation d'une durée d'un siècle, voire au-delà, le projet Cigéo constitue véritablement un projet à caractère tout à fait unique du point de vue industriel. Cette durée rend son évaluation particulièrement difficile dans une perspective socio-économique.

La prise en compte de cette temporalité extraordinaire constitue un des enjeux principaux des évaluations « ex-ante » ou « en continu » qui seront étudiées par ailleurs dans d'autres chapitres, en amont du stockage et en lien avec la réversibilité (valorisation de l'apprentissage, actualisation...). Il s'agira aussi d'étudier, dans ce chapitre, à travers notamment l'interrogation d'experts et l'analyse sociolinguistique, les conceptions sous-jacentes de l'avenir qui sont inscrites dans les dispositifs d'évaluation socio-économique dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs et les formes de raisonnement associées, à l'égard de l'évolution de la filière nucléaire et de l'économie en général.





PROGRAMME DE R&D / 2013-2016  
EXECUTIVE SUMMARY

4

## ACCOMPAGNER LES OPÉRATIONS DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION DES STOCKAGES

La construction et l'exploitation des stockages doivent naturellement bénéficier du retour d'expérience des travaux antérieurs, des résultats d'opérations de démonstration et des progrès scientifiques. L'Andra doit être en mesure de se préparer à assurer avec efficacité l'intégration de ces données de façon à détecter les optimisations, faciliter l'exploitation notamment en proposant des pistes d'amélioration pour la sûreté.

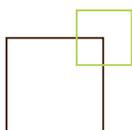
Parallèlement, l'Andra doit pouvoir garantir **la préservation de l'environnement** tout au long de l'activité industrielle d'un centre de stockage. Cela repose sur la capacité d'identifier et de transmettre les alertes nécessaires, et d'indiquer les possibles améliorations des modalités d'exploitation des stockages.

Enfin, dans une vision plus large de la gestion des déchets, l'Andra doit pouvoir **anticiper et répondre aux évolutions envisageables de la politique énergétique française**, à ses conséquences potentielles sur les inventaires de déchets et les concepts associés (cf. stockage direct éventuel de combustibles usés des réacteurs électrogènes d'EDF actuels dans le cadre de leur non-retraitement) à prendre en compte dans les stockages et pour la gouvernance de l'Agence.

Sur la **période 2013-2016**, ces trois ensembles d'exigences trouvent des contributions essentielles, d'une part au **Dossier de la DAC** (conception de la première tranche, définition du plan de surveillance environnemental) et d'autre part au **débat sur la réversibilité**.

Ces objectifs se traduisent par des besoins en R&D autour de quatre axes principaux, principalement pour Cigéo :

- **Le retour d'expérience des différents démonstrateurs d'ouvrages de stockage**, plus particulièrement pour Cigéo (essais au laboratoire souterrain et au jour), au travers (i) de l'évaluation des liens avec les processus phénoménologiques, (ii) de l'aide au suivi de la réalisation et du fonctionnement phénoménologique des stockages ;
- **L'amélioration de la prédictibilité des processus sur des temporalités pertinentes pour l'exploitant des stockages**, et de l'opérationnalité croissante des modèles conceptuels, notamment géologique et hydrogéologique, en appui à la construction des stockages, au travers de l'amélioration de la modélisation et de la simulation ;
- **La préparation du suivi environnemental**, en tant que sentinelle et intégrateur des impacts potentiels des stockages ;
- L'évaluation et l'anticipation des processus décisionnels, au travers d'une part de **l'évaluation des aspects socio-économiques de la gouvernance des stockages** (approche en Sciences Humaines et Sociales) et d'autre part de la **caractérisation et du comportement des combustibles usés en situations de stockage** en lien avec les concepts de stockage dédiés (approche scientifique et technique).



## 4.1 OPTIMISER LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES PAR L'INTÉGRATION DU RETOUR D'EXPÉRIENCE DE L'EXPLOITATION, DES DÉMONSTRATEURS ET DES OUVRAGES TÉMOINS

Toutes choses égales par ailleurs, l'Andra dispose de deux exemples différents en matière d'évolution de la conception et de l'exploitation d'un centre de stockage au regard d'un retour d'expérience progressif : les centres de surface et le laboratoire souterrain.

La conception même du CSA tire parti du retour d'expérience du CSM, avec notamment une conception modulaire (ouvrages de stockage en béton) et la création du réseau souterrain gravitaire enterré permettant de collecter les eaux qui viendraient à percoler dans les ouvrages ; il en va de même pour les tranches d'ouvrages qui ont été progressivement construites au CSA, et dont la conception et la construction ont bénéficié de l'expérience des tranches précédentes (formulations de béton, modalités de remplissage des ouvrages). De manière plus générale, la couverture du CSM constitue une référence pour la future couverture du CSA. Ce retour d'expérience s'appuie sur les procédures de conception, de réalisation et d'exploitation, ainsi que sur les dispositifs de mesure (ouvrages, milieu géologique, environnement de surface), qui permettent ainsi une maîtrise de la sûreté et notamment du fonctionnement du centre.

Le laboratoire souterrain constitue en soi un retour d'expérience particulier pour Cigéo, dans la mesure où il a été conçu comme un lieu de préparation et de validation du stockage, sous l'angle multiple de la compréhension des processus phénoménologiques, de la conception du stockage avec les démonstrateurs, et de la définition des dispositifs d'observation/surveillance (capteurs de mesure ; dispositifs de transmission des données ; bases de données pour capitaliser, intégrer, fusionner et transmettre les données).

Sur la période 2013-2016, l'objectif principal en matière de conception et de réalisation des ouvrages, au travers de démonstrateurs, visera à apporter les éléments supports nécessaires à la DAC et portera sur deux aspects : (i) la réalisation d'ouvrages (i.e. galeries ou alvéole MA-VL) de grand diamètre proches de ceux envisagés dans Cigéo, en intégrant les modalités de soutènement, en lien avec l'évaluation du comportement mécanique des argilites en champ proche et

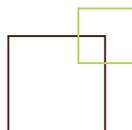
l'optimisation technico-économique des ouvrages (épaisseur de revêtement/soutènement), (ii) la réalisation et l'évaluation de la performance (hydraulique) d'ouvrages de fermeture (scellement de galerie et bouchon d'alvéole HA).

#### 4.1.1 LA PRÉPARATION DES DÉMONSTRATEURS À L'ÉCHELLE 1 DES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DU STOCKAGE DANS LE LABORATOIRE SOUTERRAIN ET DANS LE STOCKAGE



La programmation et la planification des essais technologiques relatifs au projet Cigéo sur la période 2013-2016 prévoit de nombreuses expérimentations en Laboratoire souterrain dans des conditions et à des échelles réalistes par rapport aux ouvrages du stockage. Elles sont, de ce fait, des objets intéressants pour, d'une part, compléter les observations et données sur les interactions entre ouvrages et milieu géologique en support à la conception de Cigéo et plus particulièrement à son optimisation technico-économique, d'autre part, préparer le programme d'auscultation et d'observation des premiers ouvrages témoins dans le stockage, qui ne seront construits qu'au-delà de 2020. Il s'agit d'une part des essais de creusement et de soutènement des galeries et alvéoles MA-VL et des essais de démonstration des alvéoles HA vis-à-vis du dimensionnement de Cigéo, plus particulièrement son optimisation et, d'autre part, des essais de scellement de galerie ou d'alvéole MA-VL vis-à-vis de l'évaluation de sûreté en support à la DAC.

#### 4.1.2 L'OPTIMISATION DE LA CONCEPTION ET DE LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES, EN INTÉGRANT EN CONTINU LE REX DE L'EXPLOITATION DU STOCKAGE POUR AMÉLIORER LES CONNAISSANCES



La construction et l'exploitation de Cigéo seront progressives et dureront plus de cent ans. La conception et la construction des ouvrages pourront donc être progressivement optimisées en utilisant le REX des tranches réalisées précédemment et en s'appuyant sur le modèle géologique 3D de la ZIRA. Cela implique d'effectuer des observations géologiques et des mesures spécifiques tout au long du creusement des ouvrages. Les principaux enjeux sont de développer et d'adapter les méthodes aux techniques et contraintes du creusement et de l'exploitation du stockage, en prenant en compte, d'ici 2015, le savoir-faire acquis dans le Laboratoire souterrain. Deux thèmes de R&D seront suivis sur la période 2013-2016 dans ce cadre :

- Le modèle géologique 3D de la ZIRA comme cadre de référence pour le suivi de la construction du stockage

L'objectif sera d'identifier, de développer et d'utiliser des méthodes de suivi géologique adaptées aux différentes méthodes de creusement et de soutènement retenues pour le stockage à l'issue de la phase d'esquisse. Les méthodes non destructives « en temps réel » seront privilégiées compte tenu des contraintes de chantier dans le stockage. Des tests seront réalisés dans le Laboratoire souterrain d'abord avec des méthodes telles que l'imagerie multi-spectrale, qui peut donner une image détaillée de la stratigraphie, combinée ou complétée éventuellement par des techniques de réalité augmentée d'observation et d'enregistrement en temps réel, puis avec des méthodes sismiques réalisées dans les ouvrages avec des équipements source-capturs utilisant des hautes fréquences, pour se localiser par rapport à des niveaux de référence du Callovo-Oxfordien.

- La caractérisation et le suivi des perturbations thermomécaniques autour des ouvrages de stockage

L'objectif est de traiter les deux échelles de perturbations emblématiques de Cigéo, d'une part autour de chaque ouvrage avec la décharge induite par le creusement, et d'autre part à plus grande échelle avec la modification transitoire des champs géothermiques et de contraintes naturels :

- Différentes techniques géologiques (scanner 3D) et géophysiques (imagerie sismique) ont été testées dans le Laboratoire souterrain pour suivre l'évolution dans le temps de la zone fracturée autour des galeries. Des développements seront réalisés pour adapter ces techniques aux conditions spécifiques du stockage ;

- A l'échelle globale du stockage, la technique de suivi dans le temps de l'évolution du milieu géologique, développée dans d'autres domaines, est le monitoring sismique 4D et/ou la surveillance micro-sismique utilisant un réseau de capteurs placés dans des forages au-dessus de la zone à surveiller. L'applicabilité de ce type de méthode aux spécificités de Cigéo sera évaluée.

## 4.2 ACCROÎTRE LA PRÉDICTIBILITÉ DU FONCTIONNEMENT À COURT ET MOYEN TERME DES STOCKAGES ET DE LEUR ENVIRONNEMENT NATUREL PAR LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Pour Cigéo, la nouvelle itération de choix d'option de conception, sûreté et réversibilité relatif au Dossier 2009 et la proposition d'une Zira, a souligné la nécessité de consolider et de détailler encore plus les processus au cœur de la sûreté, de la durabilité et de la réversibilité du stockage, notamment ceux mis en jeu au sein des alvéoles de stockage et aux interfaces du stockage avec le Callovo-Oxfordien (amplitude temps-espace).

Les principaux domaines concernés relèvent de l'hydraulique, de l'hydrique, de l'étude des gaz (hydrogène), de l'aéraulique, et de la thermique comme clés d'entrée des processus mécaniques et chimiques des alvéoles MA-VL, des galeries et des alvéoles HA. En lien avec les concepts de stockage de 2009, les différents schémas d'exploitation, différentes évaluations numériques ont permis de quantifier de manière plus précise, les conditions de réversibilité, l'évaluation du risque ATEX, un couplage entre la thermique et l'aéraulique, et de donner une première vision détaillée de l'état du stockage pendant l'exploitation séculaire.

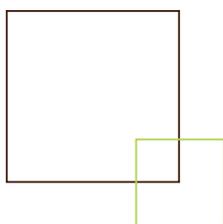
Dans la logique opérationnelle qui prévaut à l'établissement de la DAC en 2015, les travaux de simulation doivent être en mesure de fournir des réponses exhaustives et appropriées aux besoins des exploitants, qui peuvent être de plusieurs natures :

- Une consolidation/précision des représentations déjà existantes, sur la base des nouvelles connaissances : transitoire thermique de Cigéo, transitoire multi-composants gaz : risque ATEX, consommation d'O<sub>2</sub>, modèle hydrogéologique de surface des différents stockages, hydrique des ouvrages pendant leur exploitation, impact hydraulique ;
- De nouvelles représentations, par la mise en œuvre de simulations numériques multi-physiques : études d'impact (simulation de rejet atmosphérique, et couplage avec l'environnement et les différents écosystèmes), couplage entre la dégradation chimique et le comportement mécanique des ouvrages.

Ces travaux nécessitent la mise en œuvre de simulations numériques. Ils concernent pour l'essentiel :

- La représentation et la prédiction des perturbations liées aux fluides (perturbation hydraulique dans les formations géologiques traversées, fonctionnement des nappes, comportement aéraulique et hydrique des ouvrages souterrains ventilés, transfert multiphasique et rejets gazeux dans et autour du stockage...);
- La maîtrise du vieillissement des ouvrages et des conditions de la réversibilité et de la fermeture de Cigéo (modalités de récupérabilité, état physico-chimique des composants...).

Pour l'ensemble des scénarios de gestion et d'exploitation possibles, ces travaux d'intégration et de simulation numérique pour la période 2013-2016 viseront ainsi à accroître la prédictibilité du comportement à court et moyen terme (de l'année à la centaine d'années) en



La prédiction et le suivi des perturbations hydrauliques induits par la construction et l'exploitation du futur stockage seront établies par simulations numériques en fonctionnements normal et accidentel.

représentant plus finement les processus et en réduisant marges. Cet objectif est très lié aux moyens de surveillance (cf. § 4.3 et chapitre 5) mis en place dans le stockage.

#### 4.2.1 CIGÉO : LA PRÉDICTION ET LE SUIVI DES PERTURBATIONS INDUITES PAR LES TRAVAUX DANS LES FORMATIONS ENCAISSANTES

La prédiction et le suivi des perturbations hydrauliques induits par la construction et l'exploitation du futur stockage seront établis par simulations numériques en fonctionnements normal et accidentel et contribueront à définir et optimiser le dispositif de mesures (localisation) pour le suivi des perturbations au cours de la construction du stockage, de son exploitation et après sa fermeture.

##### 4.2.1.1 Modélisation et simulation prédictive des perturbations

Les modélisations et simulations prédictives des impacts hydrogéologiques conduiront à (i) l'estimation de l'extension latérale de la perturbation hydraulique induite par le creusement des ouvrages de liaison surface/fond et de l'impact sur les ressources en eau souterraine voire sur les ressources en eau de surface, (ii) la prédiction des débits des venues d'eau dans les puits et les descenderies au cours du creusement et durant l'exploitation du stockage, (iii) l'estimation du front non saturé autour des ouvrages pendant leur creusement et au cours de l'exploitation du stockage et de l'extension de la zone dénoyée, (iv) l'estimation du temps de resaturation après la fermeture du stockage.

##### 4.2.1.2 Le dispositif d'observation et de mesure des perturbations

L'extension du domaine d'observation sera dimensionnée pour permettre l'analyse et l'évaluation du comportement transitoire des écoulements souterrains et de leurs interactions avec les eaux de surface. Elle doit inclure les bassins versants et les bassins hydrogéologiques susceptibles d'être perturbés.

#### 4.2.2 CSA : LE FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE DE L'APTIEN VS L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS AUX LIMITES DE SURFACE AVEC LA CONSTRUCTION DES TRANCHES

De nouvelles évaluations d'écoulements d'eau dans la nappe seront menées, prenant en compte de manière réaliste les évolutions anthropiques (influence des structures sur la recharge et imperméabilisation progressive) et les parties souterraines de ces infrastructures. En outre, l'intégration de ces améliorations dans le modèle hydrogéologique de la nappe de l'Albien devrait permettre une meilleure représentativité des évolutions de cette nappe et donc une meilleure estimation des NPHE (Niveau des Plus Hautes Eaux) nécessaires à la bonne implantation de nouvelles alvéoles sur le centre au regard du risque d'inondation.

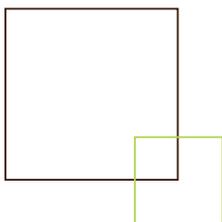
#### 4.2.3 LE COMPORTEMENT AÉRAULIQUE, HYDRIQUE ET MULTI-COMPOSANT GAZ DES STOCKAGES

##### 4.2.3.1 Cigéo : la maîtrise de la thermo-aéraulique et de l'état hydrique des ouvrages au fur et à mesure de l'exploitation

Pendant la période d'exploitation, la prédiction des conditions d'environnement régnant dans les ouvrages est un enjeu qui conduit à définir les deux axes de travaux suivants :

- Les conditions d'environnement thermique et hydrique dans les ouvrages  
Prévoir l'évolution des conditions thermiques et hydriques de l'air de ventilation nécessite la prise en compte de modèles conceptuels physico-numériques adaptés.

Des travaux de simulation numérique (i) quantifiant l'évolution temporelle du couple température - humidité relative en différents points du stockage et (ii) permettant de définir les conditions d'environnement dans lesquelles vont évoluer les travailleurs et les composants ouvrages (conditions moyennes, conditions extrêmes...) seront donc reconduits, en tenant compte de considérations conceptuelles (concepts de stockage et chroniques d'exploitation actualisés), et d'un meilleur couplage entre l'air de ventilation et les échanges en paroi.



Par ailleurs, ces simulations viseront à évaluer l'impact de conditions climatiques de surface exceptionnelles (épisode caniculaire ou de grand froid prolongé, épisode durablement humide...) sur les conditions d'environnement dans les ouvrages de stockage, notamment à proximité des accès.

- Les conditions de ventilation préalables au retour sur les ouvrages

Afin de disposer d'éléments actualisés sur la durée de ventilation nécessaire pour refroidir une galerie d'accès aux alvéoles de stockage HA, à un niveau de température d'air et de paroi suffisant pour permettre une intervention humaine en galerie dans des délais raisonnables en situation normale (pose du remblai par exemple) ou incidentelle (il sera procédé à la mise en œuvre de simulations numériques thermiques (conduction/convection) de type multiparamétrique.

**4.2.3.2** CSA et Cires : la représentation de l'aéraulique des centres et du couplage hydrique avec les ouvrages

De nouvelles évaluations intégreront la variabilité du climat au cours de l'année, variabilité qui influence les conditions hydriques au sein des ouvrages de stockage, ceci aussi bien en phase d'exploitation (avant et après fermeture des ouvrages par une dalle en béton) que sur le long terme après mise en place de la couverture définitive. Ces simulations permettront d'améliorer la connaissance sur la migration des liquides et des gaz dans et autour des cellules de stockage, notamment en ce qui concerne le Tritium (liquide, HTO, ou gazeux, HT) et son transfert vers la nappe ou l'atmosphère.

#### 4.2.4 LES TRANSFERTS MULTIPHASIQUES ET LES REJETS GAZEUX DANS ET AUTOUR DES STOCKAGES

**4.2.4.1** Cigéo : la maîtrise des risques ATEX (atmosphère explosive) au sein du stockage

Selon la nature des ouvrages concernés il est envisagé :

- Dans les ouvrages non ventilés (alvéoles HA en exploitation, alvéole MA-VL après fermeture) : une modélisation fine d'un transitoire hydraulique/multi-composant gaz qui permettra d'évaluer dans l'espace et dans le temps les concentrations des phases gazeuses en présence et de quantifier les flux d'hydrogène drainés vers la galerie d'accès ;
- Dans les ouvrages ventilés (galeries d'accès au sein des quartiers HA, alvéoles MA-VL en exploitation) : des modélisations qui viseront à évaluer finement l'évolution de la concentration en hydrogène dans l'air en fonctionnement normal et incidentel (arrêt de ventilation).

Ces études envisageront notamment une production d'hydrogène variable dans le temps, dépendante du type de colis, et en considérant de manière fine un couplage entre la ventilation, la production et la migration de l'hydrogène et l'état hydrique/hydraulique de l'alvéole ou du colis jusqu'au quartier.

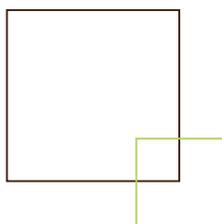
**4.2.4.2** La représentation des rejets gazeux dans l'atmosphère

- Cigéo

Afin de quantifier de manière précise les rejets gazeux dans l'atmosphère produits par la ventilation des ouvrages souterrains, des modélisations et simulations numériques de processus aérauliques de surface seront menées. Il s'agira notamment de caractériser l'intensité des rejets gazeux de vapeur d'eau, d'hydrogène, de radionucléides gazeux ou de toxiques volatils, ainsi que l'extension de panaches sur une surface de plusieurs kilomètres carrés. Ces évaluations s'appuieront sur les caractéristiques atmosphériques de site, sur la géomorphologie et l'organisation des installations de surface, sur les caractéristiques de la couverture végétale, ainsi que sur les caractéristiques intrinsèques de l'air au sortir des puits. Certaines de ces données s'appuieront sur les mesures de l'OPE.

- CSA et FA-VL ( $^3\text{H}$  et/ou de  $^{14}\text{C}$  dans l'atmosphère)

Au CSA, deux types de rejets sont actuellement évalués : (i) les rejets canalisés de l'atelier de conditionnement des déchets (ACD), (ii) les relâchements diffus en tritium, estimés trimestriellement à partir d'un dégazage conventionnel. L'objet des travaux à mener est de réévaluer les facteurs d'atténuation appliqués au flux sortant des ouvrages, actuellement



Pour répondre aux enjeux de maîtrise du vieillissement des ouvrages et des conditions de réversibilité, deux axes de R&D sont envisagés :

- Prédire l'état physico-chimique des composants à l'issue de la période d'exploitation ;
- Contribuer à l'identification des modalités de récupérabilité des colis.

estimé de manière simplifiée, sur la base de simulations numériques réalistes. En complément, le transfert de tritium en conditions diphasiques dans un ouvrage gravillonné et dans un ouvrage présentant un radier fissuré sera étudié.

Pour FA-VL, des études sur le devenir du  $^{14}\text{C}$  présent sous forme de composés organiques mobiles en phase gazeuse (principalement  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) dans les déchets FA-VL, sont envisagées. Des simulations du transitoire hydraulique/multi-composants gaz seront conduites afin d'évaluer quantitativement le transfert de  $^{14}\text{C}$  gazeux dans un stockage à faible profondeur et vers ses exutoires (atmosphère, zone non saturée, dissolution dans la nappe...) ainsi que ses impacts en fonction des options de conception et d'architecture.

Ces modélisations préliminaires reposeront sur les différentes caractéristiques de conception et de site, ainsi que sur une caractérisation fine des termes sources en  $^{14}\text{C}$ .

**4.2.4.3** La représentation des rejets  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$  en phases gazeuse et liquide vers la nappe pour les centres de surface et FA-VL

- CSA

Afin d'améliorer la compréhension du phénomène de transfert de tritium sous les formes HTO et HO dans un ouvrage bétonné, les modèles existants seront affinés en prenant en compte (i) l'évolution de la résine Epoxy appliquée sur la dalle et sur les voiles, isolant l'ouvrage de toute infiltration d'eau, (ii) le taux de dégazage des colis et leur inventaire, (iii) l'oxydation progressive du tritium sous forme HT en HTO, dans le remblai et dans le terrain sous ouvrage (Livre Blanc Tritium de l'ASN).

Ces résultats permettront de proposer un taux de dégazage maximum admissible pour un colis générique dans un ouvrage générique. L'étape suivante consistera à coupler le modèle diphasique eau-gaz multi-composant/gaz de l'ouvrage avec le battement de la nappe, afin de simuler l'accumulation et le lessivage de tritium dans la zone de battement de la nappe et de se rapprocher au mieux des mesures de concentration en tritium effectuées sous les ouvrages de stockage.

- FA-VL

Sur la base des caractéristiques d'un site générique et de la nature des déchets à stocker, des évaluations de performance d'un stockage « SCR<sup>32</sup> » et/ou « SCI<sup>33</sup> » (transfert par l'eau) ont été réalisées depuis 2010. Deux d'entre elles ont été menées avec un inventaire comprenant du  $^{14}\text{C}$  et font référence à des déchets bituminés et aux déchets graphite. Les évaluations de performance (transfert par l'eau en milieu poreux continu équivalent saturé) seront reprises sur la base de premières données de site.

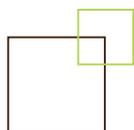
#### 4.2.5 LA MAÎTRISE DU VIEILLISSEMENT DES OUVRAGES ET DES CONDITIONS DE LA RÉVERSIBILITÉ ET DE LA FERMETURE DE CIGÉO

Pour répondre aux enjeux de maîtrise du vieillissement des ouvrages et des conditions de réversibilité, deux axes de R&D sont envisagés :

- Prédire l'état physico-chimique des composants à l'issue de la période d'exploitation (colis, structure)

Au cours de la phase d'exploitation réversible du stockage, les structures, les alvéoles et les colis de déchets MA-VL seront soumises à une atmosphère contenant du dioxyde de carbone et présentant une humidité relative variable mais globalement basse. L'état physique de tous les composants cimentaires à l'issue de la période d'exploitation sera évalué.

Des évaluations intégrées espace/temps à l'échelle des ouvrages doivent être menées sur la corrosion des aciers en milieu cimentaire, en fonction des états de saturation des bétons et des modifications éventuelles causées par la présence des déchets. Ces travaux intégreront notamment les couplages entre les cinétiques de corrosion et l'évolution des différents processus susceptibles de les modifier.



- Contribuer à l'identification des modalités de récupérabilité des colis :

Dans le cadre des simulations antérieures, les vides résiduels, en particulier les jeux de manutentions et leurs évolutions ont été analysés. Pour les alvéoles MA-VL, le remplissage de ces jeux par des matériaux est envisagé et fera l'objet de simulations numériques.

#### 4.2.6 LE TRANSITOIRE OXYDANT DANS LES ALVÉOLES HA

Des simulations, de type transitoire hydraulique multi-composant gaz avec production et consommation d'espèces, viseront à évaluer dans les alvéoles HA en phase d'exploitation, le transfert et la réactivité de l'oxygène de l'air issu de la ventilation de la galerie d'accès en tenant compte des couplages entre le transitoire hydraulique de l'alvéole et les processus de production et de consommation de l'oxygène.

Par ailleurs, afin d'évaluer l'effet du transitoire oxydant sur (i) la chimie des eaux, (ii) les cinétiques de corrosion (évolution du pH...), (iii) le transfert des radionucléides et des toxiques chimiques des déchets HA, les simulations auront également pour objet de représenter l'évolution physico-chimique des alvéoles HA pendant la phase d'exploitation et après fermeture, couplée à son évolution hydraulique.

#### 4.2.7 LA VALIDATION DE L'ANALYSE PHÉNOMÉNOLOGIQUE DES SITUATIONS DE STOCKAGE EN EXPLOITATION POUR CONSOLIDER LA PRÉDICTIBILITÉ

L'Analyse Phénoménologique des Situations de Stockage (APSS) est une méthodologie d'analyse par simulation numérique, rigoureuse, qui s'appuie sur la description qualitative et quantitative du fonctionnement et de l'évolution THMCR du stockage et de son environnement. Des évolutions sont envisagées afin (i) d'accompagner les évolutions de conception, (ii) de contribuer à la définition de la stratégie d'observation et de surveillance, (iii) de vérifier la conformité du fonctionnement du stockage au domaine de fonctionnement autorisé/attendu, (iv) de connaître le fonctionnement phénoménologique des ouvrages et du stockage en grand pour anticiper les phénomènes futurs, (v) d'appréhender les situations qui s'écartent du domaine de fonctionnement de référence et évaluer les temps d'intervention en cas de situation incidente, (vi) de disposer d'éléments pour prédire et évaluer les modalités de retour en arrière (réversibilité), (vii) d'identifier les tolérances et dégager des marges de dimensionnement.

## 4.3 PRÉPARER ET ACCOMPAGNER LE PLAN DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE DU STOCKAGE, ET DÉFINIR LES MARQUEURS PERTINENTS VIS-À-VIS DES DIFFÉRENTS RISQUES

La conception et l'implantation des stockages, projets industriels « hors normes » notamment de par leur durée d'exploitation, nécessitent de disposer de données environnementales détaillées prenant en compte les variabilités intra et interannuelles ainsi que leurs historiques. Les observations et études environnementales visent également à préparer et accompagner les plans de surveillance de l'environnement autour des centres de stockage des déchets radioactifs. Ces deux besoins nécessitent une observation en amont de la construction pour

32 - Scénario couverture remaniée

33 - Scénario couverture intacte

déterminer, d'une part, l'état initial des zones de stockage, et, d'autre part, les approches les plus adaptées au suivi environnemental. Compte tenu des exigences en matière de rejets s'appliquant aux stockages en exploitation ou en projet, le système d'observation environnementale doit être en mesure de détecter des impacts diffus, chroniques et de faible intensité. Il nécessite également de distinguer l'origine et de comprendre les effets d'autres perturbations qui pourraient masquer ou amplifier les impacts apparents des centres de stockage.

Par ailleurs, l'évaluation de la sûreté à long terme nécessite la définition et la validation de modèles de transfert (hydrologique et atmosphérique) et de fonctionnement des écosystèmes pertinents vis-à-vis des spécificités des sites. Les données acquises dans le cadre de la définition de l'état de référence avant la construction puis au cours du suivi environnemental seront donc aussi utilisées pour préciser les modèles et les valider.

Sur les échelles de temps des stockages, trois grands types de perturbations vont influencer les écosystèmes continentaux environnant les stockages. A l'échelle locale, les implantations industrielles auront des impacts directs liés à la construction et à l'exploitation mais également des impacts indirects au travers des changements démographiques et des activités de la zone concernée. A l'échelle régionale, les contraintes sociales et économiques mais également les réglementations de protection des habitats conduiront à des modifications des pratiques agricoles et sylvicoles et de l'aménagement du territoire. Enfin, à une échelle plus globale, les changements climatiques et atmosphériques pourront également avoir une influence sur l'environnement. Les impacts potentiels de ces trois grands types de perturbations nécessitent d'être appréhendés pour définir le système d'observation et disposer d'outils adaptés à leur discrimination. En effet, l'Andra se devra d'être en mesure d'interpréter toute perturbation de l'environnement autour des centres.

Dans le cadre du projet Cigéo, l'Andra a progressivement mis en place, à partir de 2007, l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE), dispositif capable de décrire précisément l'ensemble des milieux, grâce à un programme d'observation multidisciplinaire et au suivi simultané de nombreux paramètres environnementaux, représentatif de la variabilité spatiale à travers un maillage serré du territoire et de la variabilité temporelle grâce à des stations de mesure en continu, fortement instrumentées. Les premiers bilans contribuent à la définition des sensibilités écologiques du territoire et à la fourniture des données d'entrée en vue de la conception et de la localisation des installations Cigéo, ainsi qu'à l'établissement de l'état de référence environnemental.

L'insertion des outils d'observation de l'Andra dans les réseaux nationaux et internationaux d'observation de l'environnement permet de disposer de moyens d'observation validés, de systèmes de contrôle qualité et de bases de données harmonisées. Ces dernières pourront être analysées afin d'interpréter l'évolution environnementale observée autour des centres de stockage au regard de données obtenues à l'échelle nationale ou européenne. A ce titre, l'OPE a été labellisé mi-2010 par Allenvi<sup>34</sup> (comme SOERE<sup>35</sup>).

Enfin les activités de R&D autour de l'OPE participeront à la construction des réseaux de surveillance constitués d'un ensemble de moyens (capteurs, indicateurs, analyses, cartographies, protocoles...) permettant de détecter des signes précurseurs ou des niveaux d'alerte. Les priorités seront données, d'une part, à la définition détaillée et intégrée de l'état de référence, d'autre part, à la détection des signaux de bas niveau.

Les observations et les expérimentations menées dans le domaine de l'environnement dans le cadre de Cigéo permettront également de répondre à certains besoins du projet FA-VL et des centres en exploitation ou surveillance.

#### 4.3.1 L'ACQUISITION DE DONNÉES POUR LA CONCEPTION ET LA LOCALISATION DES INSTALLATIONS

L'implantation des installations de stockage nécessite l'acquisition de paramètres et de données de référence à la fois pour le dimensionnement et la conception des ouvrages (données climatiques, hydrologiques, etc.), mais aussi pour anticiper la sensibilité écologique relative à l'emprise en surface des zones envisagées.

Ainsi, les travaux porteront sur (i) l'acquisition de données météorologiques (mesures de paramètres météorologiques, calcul de débits de ruissellement, identification la caractérisation des extrêmes météorologiques), (ii) la validation des modèles d'inondation, (iii) étude des éventuelles variations de grande ampleur en particulier en ce qui concerne les espèces remarquables/protégées.

#### 4.3.2 L'ÉTAT DE RÉFÉRENCE ET L'ORIGINE DU BRUIT DE FOND

L'analyse de l'état de référence obtenu sur une durée pluriannuelle sera mise à profit pour déterminer les indicateurs et marqueurs les plus pertinents et dimensionner le système de surveillance environnementale qui accompagnera l'exploitation des stockages. Afin d'optimiser l'étendue de l'observation et de la surveillance, une méthode de hiérarchisation des substances à suivre sera développée avec une approche pluraliste (basée sur deux types d'avis, groupe d'experts et groupe de parties prenantes du projet).

Par ailleurs, les recherches porteront sur : (i) le bruit de fond atmosphérique (amélioration de la compréhension des fluctuations des propriétés atmosphériques, identification de leurs origines potentielles, compréhension du rôle relatif des effets locaux (exploitation agricole, mise en travaux de Cigéo), évaluation des processus de transfert longues distances), (ii) la qualité des sols (établissement d'un état de référence des paramètres mesurés (propriétés physico-chimiques, paramètres pédologiques, teneurs en micropolluants organiques et inorganiques, diversité biologique), suivi des évolutions par rapport à l'état de référence), (iii) la qualité chimique et biologique des écosystèmes aquatiques (surveillance de l'état de santé des poissons et mise en place de tests écotoxicologiques), (iv) l'origine du fond radiologique et chimique (suivi de la qualité des produits issus de l'apiculture (éléments intégrateurs de l'environnement local) et suivi de ruches instrumentées, en complément des connaissances déjà acquises sur la qualité environnementale du territoire).

#### 4.3.3 LA MODÉLISATION DE DIFFÉRENTS PROCESSUS ÉCOSYSTÉMIQUES

Les travaux porteront sur : (i) le transfert atmosphérique (intégration des données de la station atmosphérique de l'OPE aux analyses statistiques nécessaires aux calculs d'impact et de transfert atmosphérique), (ii) le transfert hydrologique (caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère karstique des Calcaires du Barrois), (iii) le transfert dans les sols et les écosystèmes (surveillance au long terme des transferts dans les sols à trois échelles spatiales (territoire, parcelle, lysimètre<sup>34</sup>)), (iv) le transfert à l'homme, les liens expositions environnementales et la santé humaine (études sur les habitudes de vie en lien avec les ressources du territoire, établissement d'un recueil de données d'expositions humaines (qualité chimique de l'eau, du sol, de l'air et des produits agro-alimentaires)).

#### 4.3.4 LA PRÉPARATION DE LA SURVEILLANCE DÉDIÉE AUX PHASES DE CONSTRUCTION, D'EXPLOITATION ET DE POST-FERMETURE

La préparation de la future surveillance des sites vise à (i) extraire du suivi exhaustif des différents compartiments de l'environnement, les paramètres qui devront faire l'objet d'un suivi particulier, (ii) définir leur maillage temporel et géographique, (iii) optimiser les moyens techniques et analytiques de la surveillance, (iv) garantir une adaptabilité à l'évolution du chantier du stockage.

Ainsi, les travaux porteront sur (i) les développements analytiques pour la surveillance bas niveau, (ii) les systèmes d'observations (capteurs, analyseurs et prélèvement) assortis de protocoles de maintenance et de contrôle qualité, (iii) le lien entre les concentrations mesurées

34 - Alliance nationale des organismes de recherche pour l'environnement

35 - Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement

36 - Monolithe de sol de 1m<sup>2</sup> sur 2 m de profondeur

□ dans l'atmosphère et les émissions de surface (industrielles ou autres), (iv) la surveillance des eaux de surface et sub-surface et des milieux aquatiques (compréhension du fonctionnement du bassin-versant de la zone étudiée et de ses relations avec les cours d'eau, définition des meilleurs marqueurs de perturbation ou indicateurs biologiques liés aux travaux puis au stockage des déchets de Cigéo, intégration des réseaux impliqués dans la compréhension du fonctionnement des écosystèmes aquatiques et de l'impact des activités humaines), (v) la surveillance des sols et des écosystèmes, (vi) la surveillance de la biodiversité (inventaires complémentaires aux suivis en cours sur les zones définies pour l'implantation des installations de surface).

#### 4.3.5 L'ANTICIPATION DE L'ÉVOLUTION À LONG TERME DES SOLS ARTIFICIELS MIS EN PLACES (VERSES DE CIGÉO ET SOLS DE COUVERTURE)

Lors de la construction de Cigéo, des déblais d'argilites du Callovo-Oxfordien et d'autres matériaux naturels constitutifs du site seront progressivement excavés et entreposés en surface en milieu ouvert pour former des sols artificiels (verses) qui seront stabilisés par végétalisation.

Les travaux de R&D viseront à comprendre les processus physico-chimiques mis en jeu lors de l'altération des verses pour quantifier et modéliser leur impact sur le long terme et à différentes échelles spatiales.

Enfin, une étude de l'évolution à long terme des sols remaniés (Callovo-Oxfordien, sols de couverture des centres de stockage après fermeture) sera lancée en se basant sur les caractéristiques des sols présents sur site. La structure expérimentale de couverture (SEC) du CSA et la couverture du CSM, pourront être utilisées comme sites d'observation privilégiés. L'étude de l'évolution des sols remaniés entrera également dans le programme du projet FA-VL.

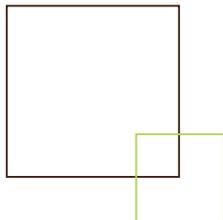
#### 4.3.6 LA CONSTRUCTION D'UNE MÉMOIRE DE L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉTUDE DES FACTEURS D'ÉVOLUTION À LONG-TERME

Des études de correspondance entre facteurs économiques (évolution socio-économique et dynamique du territoire) et l'évolution des écosystèmes seront réalisées.

Dans le cadre de l'optimisation de la conservation des échantillons dans l'écothèque, deux objectifs seront poursuivis : le premier, industriel, vise à conserver la mémoire de l'état de référence avant construction et à fournir la possibilité de refaire des analyses rétrospectives après plusieurs dizaines d'années ; le second, scientifique, vise à disposer de chroniques d'échantillons sur plusieurs dizaines d'années, à reconstituer la rémanence ou la présence de polluants éventuels, voire la caractérisation de polluants non encore identifiés lors de la mise en conservation, et à accompagner les politiques publiques en matières de production et utilisation de substances chimiques. Des études de recherche et développement auront également comme objectif d'améliorer le traitement, la conservation et la gestion des échantillons.

Concernant les facteurs d'évolution de la biodiversité, les études viseront à suivre et interpréter les évolutions des espèces ainsi que leur aire de distribution en fonction de l'échelle de temps considérée.

## 4.4 ÉVALUER ET METTRE EN ŒUVRE LES PROCESSUS DÉCISIONNELS, ET GARANTIR L'ADAPTABILITÉ ET LA FLEXIBILITÉ DES STOCKAGES



Le travail méthodologique abordera notamment le passage de relais intergénérationnel impliqué par la réversibilité. En fonction des résultats obtenus, ces travaux pourront être poursuivis en lien avec les recherches sur l'évaluation socio-économique, de manière à alimenter l'évaluation en continu, propre à la réversibilité opérationnelle.

Les processus décisionnels concernant les différentes modalités de traitement, de conditionnement ou de mise en stockage de déchets radioactifs font l'objet de nombreux arbitrages, aussi bien de la part des acteurs privés que de la part de la puissance publique, en particulier entre les aspects financiers et ceux relatifs à la sûreté.

La question du financement de la réversibilité opérationnelle se pose notamment, dans le respect du principe de limitation des charges des générations futures établie par la loi du 28 juin 2006, et en particulier des arbitrages intergénérationnels entre sûreté et coûts. Dans la perspective du schéma directeur de l'exploitation et de la fermeture de Cigéo (SDEF), les générations futures doivent disposer des ressources financières et technologiques nécessaires pour assurer la réversibilité jusqu'à l'étape suivante, dans une logique de « passage du relais », et supporter donc son coût à hauteur des bénéfices qu'elles en retirent. Sur ces bases, un travail méthodologique a débuté en 2012 avec le Centre d'économie industrielle de Mines-ParisTech - CERNA.

- Appui de la R&D à la réversibilité

L'Andra propose que, tout au long de la phase de construction et d'exploitation progressive du projet, des rendez-vous réguliers soient organisés sur la base notamment du retour d'expérience et des avancées techniques et scientifiques. Ce processus pluridisciplinaire (comportant notamment des aspects socio-économiques et environnementaux) pourra conduire à des arbitrages susceptibles d'affecter d'autres filières de gestion (déchets graphites, utilisation de matériaux recyclés...). Le travail de R&D consistera à contribuer à la définition des modalités d'organisation de ces rendez-vous réguliers.

Le travail méthodologique débuté avec le CERNA abordera notamment le passage de relais intergénérationnel impliqué par la réversibilité. En fonction des résultats obtenus, ces travaux pourront être poursuivis en lien avec les recherches sur l'évaluation socio-économique, de manière à alimenter l'évaluation en continu, propre à la réversibilité opérationnelle.

- Appui de la R&D au management de la sûreté de l'Andra

La promotion d'une culture de sûreté implique la mise en place de processus d'apprentissage en continu et de dispositifs d'évaluation performants sur l'ensemble de ses composantes dont notamment les aspects organisationnels, le rôle des pratiques et des comportements (valeurs individuelles et collectives), les dynamiques en cours, les liens spécifiques avec l'environnement et la santé.

En soutien à l'amélioration continue du système de management et de la culture de sûreté à l'Andra, des collaborations avec d'autres partenaires ayant de l'expérience dans ce domaine, comme EDF ou l'IRSN, seront envisagées en fonction des besoins du projet. Une étude exploratoire en début du programme permettra de s'approprier les réflexions, les expériences et les principaux axes de recherches et existants à ce sujet.

## DÉFINIR ET EXPLOITER LES TECHNIQUES ET LES RÉSEAUX D'AUSCULTATION ET D'INFORMATION

Du point de vue de l'exploitation et de l'évaluation de sûreté, l'Andra doit maîtriser la qualité des colis qu'elle reçoit et connaître le fonctionnement phénoménologique du stockage (observation-surveillance) :

- Vis-à-vis du fonctionnement du stockage, l'objectif est de pouvoir vérifier le comportement phénoménologique attendu, et de conforter les connaissances acquises préalablement à l'exploitation. Les spécificités du projet Cigéo renvoient à des technologies de capteurs adaptées aux milieux dans lesquels ils seront utilisés, la plupart du temps dans des conditions environnementales sévères sur les plans radiologique et physico-chimique ;
- Vis-à-vis des colis, en exploitation, l'Andra doit pouvoir contrôler la qualité des colis qu'elle reçoit, au regard des exigences fixées : il s'agit des contrôles dits de second niveau, sans préjuger du contrôle qualité de fabrication des colis et des contrôles une fois fabriqués et en entreposage, tels que mis en œuvre par les producteurs de déchets. Comme pour le fonctionnement phénoménologique, les spécificités des colis HA et MA-VL renvoient à des moyens de contrôle adaptés.

Les objectifs fixés aux recherches sur l'entreposage conduisent à considérer également l'étude de moyens de surveillance et d'observation.

Toutes ces acquisitions produiront par ailleurs une quantité importante de données et de connaissances qu'il faudra **gérer, capitaliser, conserver et transmettre**, notamment sur de longues échelles de temps, *a minima* celle de l'exploitation.

Enfin, la dimension temporelle impliquée dans la gestion de déchets radioactifs est sans commune mesure avec celle d'autres domaines industriels. Se pose ainsi la question de la pérennité des dispositifs techniques, politiques et sociétaux et de leur capacité à prévenir des événements sur de très longues durées. Un travail d'analyse et de recherche a été initié sur l'ensemble de ces besoins dès 2008. Sur la période 2013-2016, l'objectif est d'aboutir à un premier niveau de faisabilité permettant (i) d'appuyer le dossier de la DAC et le débat sur les modalités de la gestion réversible de Cigéo, (ii) de préfigurer la mise en œuvre opérationnelle des moyens de contrôle, d'auscultation et de traitement de l'information au fur et à mesure du développement et de l'exploitation de Cigéo à partir de 2025.

Cela se traduit par des actions de R&D autour de quatre axes principaux :

- **Le développement de méthodes innovantes de contrôle des colis**, en se focalisant sur les technologies les plus prometteuses identifiées depuis 2008, avec un objectif d'étude de faisabilité scientifique et technologique et de qualification par de premiers essais en parallèle de la phase APS du projet Cigéo ;
- **Le développement de capteurs robustes et innovants**, notamment dans les domaines de la discrétion, de l'autonomie et de la durabilité, en se focalisant sur (i) le développement et la qualification des technologies, des méthodes et des techniques sélectionnées depuis 2008, (ii) le traitement et l'interprétation des signaux ;
- **L'extension et la fusion des bases de données et de connaissances** existantes et l'amélioration des outils de visualisation, afin de faciliter l'aide à la décision ;
- **La capitalisation et la transmission des connaissances d'un point de vue technique et d'un point de vue sociologique** en lien avec la gouvernance des stockages.

## 5.1 DÉVELOPPER DES MÉTHODES INNOVANTES DE CONTRÔLE DES COLIS

Les actions de R&D pour les contrôles des colis ont été initiées dès 2009 selon 3 axes d'études : (i) le prélèvement d'échantillons solides sur colis MA-VL, (ii) le contrôle non destructif de colis de déchets, (iii) le contrôle des gaz et des radionucléides gazeux. Les travaux menés entre 2009 et 2012, ont conduit à privilégier la mise en œuvre de techniques non destructives pour accéder aux paramètres et aux limites de détection recherchées. Certains paramètres ne seront néanmoins pas accessibles par contrôle non-destructif et nécessiteront des prélèvements au sein des colis. Les axes de R&D sur la période 2013-2016 pour le contrôle des colis sont focalisés sur les technologies les plus prometteuses.

### 5.1.1 LES COLIS HA ET MA-VL

Sur la base des techniques existantes ou récemment développées, les travaux porteront sur les développements complémentaires nécessaires pour accéder aux paramètres à contrôler : (i) intégrité et dimensions de l'enveloppe, (ii) constitution interne du colis (tomodensitométrie double énergie permettant la différenciation des matériaux présentant des densités similaires), (iii) activités des radionucléides / masse et isotopie de la matière fissile (définition d'un programme de R&D sur l'interrogation photonique active (IPA)), (iv) corrosion interne des colis (applicabilité des techniques d'évaluation de la corrosion existantes et définition des besoins de R&D complémentaires), (v) puissance thermique des colis (avantages et inconvénients des méthodes identifiées dans le cadre du projet WATTCO en collaboration avec le Laboratoire National de Métrologie et d'Essai (LNE), choix des techniques et développements complémentaires), (vi) débit de dégazage et composition des gaz relâchés par les colis MA-VL (démonstration expérimentale de la faisabilité de la mesure de la molécule HTO par CRDS (*Cavity Ring Down Spectroscopy*)), (vii) composition chimique du contenu des colis MA-VL (essai de prélèvements de microéchantillons dans des maquettes représentatives des matériaux et des géométries de colis MA-VL, mise au point d'un banc industriel).

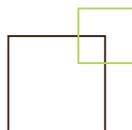
## 5.1.2 LES COLIS FMA-VC

L'amélioration de techniques de contrôle portera sur : (i) les épreuves techniques d'évaluation du coefficient de diffusion des matériaux avec le développement d'un essai accéléré de mesure du coefficient de diffusion par application d'un champ électrique, (ii) les techniques analytiques de radionucléides difficiles à mesurer (émetteurs alpha et bêta) avec la technique de spectrométrie de masse par accélérateur qui est jugée la plus prometteuse.



## 5.2 DISPOSER DES MOYENS DE MESURE ET D'AUSCULTATION DES STOCKAGES ET INNOVER DANS LE DOMAINE DES CAPTEURS

Face aux besoins spécifiques du monitoring des stockages, l'Andra a choisi dès 2009 de démontrer la durabilité, la fiabilité des instruments de la mesure, et d'initier la qualification et la certification de technologies. Les travaux dans le domaine de l'instrumentation en milieux sévères nécessitent de faire cohabiter des systèmes hétérogènes bâtis autour de sous-ensembles de technologies et de systèmes d'acquisition diversifiés. La méthodologie scientifique mise en place a déjà permis d'adapter et de qualifier des moyens de mesures existant et d'innover en cas de lacunes technologiques. Elle a également pris en compte la problématique de la gestion des nombreuses données issues des capteurs.



Les résultats font apparaître un certain nombre d'avancées majeures telles que le suivi de la température et des déformations par capteur à fibre optique, de la teneur en eau des matériaux denses par une analyse fréquentielle du signal des sondes TDR<sup>37</sup>, de l'hydrogène par des capteurs à conductivité thermique... D'autres développements ont également connu des avancées telles que la mise en place d'un système de suivi des pH et redox en multi-électrodes « tout solide », la qualification d'une solution de transmission sans fil à travers les matériaux denses.

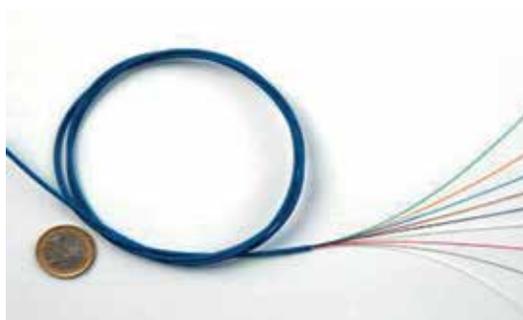


Figure 10 : capteurs à fibre optique

Le durcissement des technologies a été initié en parallèle des développements et a permis d'optimiser la conception et le choix des fibres optiques. Les premiers essais de mise en œuvre et de qualification de technologies ont été initiés très tôt dans ce programme d'étude. L'essai mené au sein de la galerie GCR<sup>38</sup> disposant d'une section instrumentée a permis d'asseoir les choix technologiques et d'obtenir un niveau de qualification avancé pour certains systèmes de mesures THM.

Les travaux se poursuivront afin d'être en mesure de disposer d'un ensemble de technologies et de répondre aux besoins des stockages, que ce soit en termes de durabilité, de métro-

logie ou d'utilisation en conditions d'environnement sévères. De manière complémentaire, les technologies mobiles et non destructives pour l'inspection ponctuelle d'ouvrages seront étudiées.

### 5.2.1 LES COLIS DE STOCKAGE MA-VL

L'enjeu est de justifier la loi de comportement du colis de stockage en béton dans son milieu d'emploi. Ainsi, l'instrumentation doit accompagner la réalisation des colis prototypes de manière à veiller à ce que le comportement au jeune âge atteste que les performances sont en adéquation avec les exigences retenues, puis apporter, au cours de l'exploitation, les données THMCR qui témoigneront de l'état du colis vis-vis des agressions précédemment identifiées. Deux axes sont prévus : (i) un bilan des données mesurées pour différentes formulations (BHP, fibré) et conceptions (monolithe, coulé par le haut...) testées dans le programme de conception des conteneurs de stockage MA-VL mené sur la période 2004-2012, (ii) l'instrumentation des conteneurs de stockage définis dans le cadre des nouveaux concepts.

### 5.2.2 LES SYSTÈMES DE MESURE ROBUSTES ET DURABLES ADAPTÉS À L'AUSCULTATION DES STOCKAGES

Le développement de solutions innovantes sera poursuivi pour compléter les solutions existantes et répondre aux besoins de suivi des paramètres THMCR déterminants. L'objectif est d'intégrer en amont des développements de technologies, les problématiques de mise en œuvre opérationnelle sur le terrain, de durcissement aux conditions sévères du stockage et de durabilité.

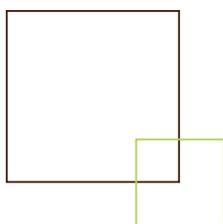
Des démonstrateurs d'ouvrages de plus en plus réalistes des situations de stockage et fortement instrumentés, permettant de qualifier les instruments à demeure, seront développés dans le cadre du projet européen Modern. Ainsi, la programmation d'essais de démonstration d'auscultation sur le moyen et long terme sera nécessaire et décisive afin d'évaluer les limites, d'optimiser un futur déploiement industriel et de consolider les interprétations.

Enfin, en complément des instruments à demeure, seront développés des moyens dits « mobilisables » (visionique, télémessures, télémétrie et adaptations de capteurs sur des robots).

#### 5.2.2.1 Les outils d'auscultation pour le stockage

Depuis 2012, la base de données « REX Encyclopédique capteurs » permet de disposer de données (résultats de mesures, historique, connaissances disponibles...) sur les différents types de technologie. Le développement de la base se poursuivra en 2013.

Les travaux de R&D porteront par ailleurs sur les thèmes suivants : (i) Température (développement de nouveaux capteurs à fibre optique résistants intégrant des fibres multi-mode (Raman) et monomode (Brillouin et Rayleigh)), (ii) Humidité/teneur en eau (étude d'une nouvelle méthode d'interrogation des sondes fondée sur une technologie fréquentielle et non plus temporelle, automatisation de la technologie dite « pulse » afin de disposer d'une technique opérationnelle en redondance), (iii) thermo-hydro-mécanique (au regard des conditions du stockage : amélioration de la conception des capteurs à corde vibrante, adaptation des capteurs à fibres optiques (nucléarisation, durabilité séculaire...), développement de nouvelles générations de fibres et de câbles, optimisation des caractéristiques des constituants des extensomètres à corde vibrante pour la mesure des pressions interstitielles, recherche d'une solution innovante pour les capteurs de pression totale, étude d'une instrumentation passive sur la base de capteur de type inductif ou RFID (Radio Frequency Identification) déposé en partie externe du sur-conteneur ou noyé en peau, pour le suivi des jeux dans les alvéoles MA-VL), (iv) Gaz (développement de moyens de mesure et d'analyse pour les gaz radioactifs



37 - TDR: Time Domain Reflectometry - Méthode de mesure de la permittivité d'un milieu, par exemple celle un milieu poreux qui est fonction de la teneur en eau

38 - Galerie de Conception Rigide

(du type Tritium,  $14\text{CxOyHz}\dots$ ), développements complémentaires sur les capteurs par micro-poutres, par technologie LiDAR<sup>39</sup> déportées, sur la technologie à cordes vibrantes multiples et sur fibres optiques pour l'hydrogène), (v) Chimie (développement d'une technique électrochimique de mesure du pH, fondée sur une grappe d'électrodes, recherche de composants couvrant la gamme complète des pH attendus dans le stockage pour les optodes (matériaux réactants en extrémité des fibres optiques), travaux sur la corrosion (suivi de la perte de masse de « coupons normalisés », mesure par ondes sonores des variations d'épaisseur, méthodes du type spectroscopie électrochimique d'impédance (SEI)<sup>40</sup>), (vi) Radiologique (recensement des moyens disponibles pour la mesure de débit de dose et définition des besoins de R&D).



Figure 11 : extensomètre à corde vibrante



### 5.2.2.2 Les méthodes mobilisables et distantes

Les développements de méthodes non-destructives et déportées rassemblées sous la dénomination « moyens mobilisables » porteront, dans un premier temps, sur les moyens visuels (visionique) de type caméras durcies (résistant aux conditions de Cigéo) et s'élargiront aux techniques d'endoscopie 3D pour la surveillance des structures et le suivi des désordres. Le premier axe sera mené par mutualisation avec les études sur le contrôle des colis.

La télémessure<sup>41</sup> des paramètres majeurs et la télémétrie<sup>42</sup> constituent un autre axe de recherche sur les moyens mobilisables. De manière à utiliser ces techniques après fermeture des alvéoles, il est nécessaire de travailler sur des fenêtres de vision qui ne dégradent pas la mesure déportée (hublots blindés, fibres optiques « relais » installées au sein même des structures de protection pour injecter et collecter le signal laser...).

L'introduction de capteurs ou moyens de mesures au sein de l'alvéole par des moyens téléopérés doit aussi être étudiée. Les moyens robotiques disponibles seront recensés.

Le système d'auscultation nécessaire à la détection et au suivi des encaissements supérieurs du Callovo-Oxfordien jusqu'en surface (évolution thermomécanique et impact hydraulique des infrastructures du stockage) sera également étudié. Une étude du principe sera menée pour évaluer l'apport de la technique de micro-gravimétrie vis-à-vis de méthodes plus intrusives (réseau de forages de suivi de perturbation) ou de méthodes sismiques pour la détection de mouvements de terrain.

**5.2.2.3** Le durcissement des capteurs, l'assurance qualité et la traçabilité de la mesure  
 Pour maîtriser la précision et la dérive des capteurs, des travaux de R&D seront initiés dans les domaines suivants : (i) durcissement des technologies afin de s'assurer de la tenue des performances des capteurs sur la période d'observation-surveillance, (ii) assurance qualité et traçabilité de la mesure, (iii) méthodes de traitement des données.

La traçabilité de la mesure entre les différents types de technologies utilisées pour une même grandeur devra être garantie. Les procédures de raccordement entre capteurs à demeure et techniques mobilisables seront donc initiées.

#### 5.2.2.4 Les réseaux et l'énergie

Les développements relatifs aux câbles sont intégrés aux recherches sur le durcissement des capteurs pour chaque technologie.

Les travaux de recherche sur la transmission sans fil à travers différentes couches géologiques se poursuivront. Des travaux d'adaptation des émetteurs aux technologies de capteurs sont également prévus. Une veille active sur les solutions permettant d'accroître la durée de vie des émetteurs est poursuivie.

#### 5.2.2.5 Les essais d'auscultation au sein de démonstrateurs dédiés

Le développement de l'instrumentation doit être qualifié au travers d'essais sur des ouvrages réels. Il s'agit également de travailler sur l'optimisation technique et économique des sections instrumentées pour Cigéo. Dans ce cadre, des tests seront réalisés dans différentes situations au Laboratoire souterrain ou dans des laboratoires souterrains partenaires (Mont Terri, Mol).

##### - Scellement

En complément de l'expérimentation NSC<sup>43</sup>, des sections dédiées au scellement d'alvéole et de module seront instrumentées dans le cadre de la collaboration avec RWMC (*Radioactive Waste Management Committee*) au sein du laboratoire d'Horonobe au Japon. Il s'agira de valider un premier concept d'instrumentation par communication sans fil. Des actions de R&D sont également prévues dans le cadre du projet POPLU Project plug (instrumentation prévue début 2014) du programme européen DOPAS (*Full Scale Demonstration of Plugs and Seals*) avec POSIVA. La collaboration avec l'AECL (*Atomic Energy of Canada Limited, Canada*) sur l'essai ESP<sup>44</sup> qui vise à suivre l'évolution des scellements du puits du laboratoire souterrain canadien du lac du Bonnet sera poursuivie.

##### - Alvéole HA

Les premiers résultats de la phase 2 des démonstrateurs d'alvéole HA au Laboratoire souterrain sont prometteurs mais, l'instrumentation mise en œuvre ne reflète que partiellement les dispositifs envisagés pour Cigéo. La phase 3 des démonstrateurs d'alvéole HA prévoit une instrumentation qui doit permettre de mesurer l'influence de la température sur l'ouvrage en prenant en compte l'ensemble des contraintes de mise en œuvre de Cigéo.

##### - Recensement de l'auscultation possible des revêtements en béton

La première section instrumentée au sein de l'expérimentation ORS<sup>45</sup> (revêtement coulé en place) a donné satisfaction notamment à travers un taux de survie des capteurs à hauteur de 100 %. Une phase d'analyse de données a été initiée et doit permettre, à terme, d'établir une méthodologie de traitement automatisé de ces données. L'Andra continuera également à bénéficier de démonstrateurs dits « opportunistes » dans le cadre des collaborations avec des industriels ou des homologues.

39 - LiDAR: Light Detection And Ranging - Technologie de télédétection ou de mesure optique basée sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. À la différence du radar basé sur un principe similaire, le lidar utilise de la lumière visible ou infrarouge au lieu d'ondes radio. La distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi

40 - La participation de l'Andra à l'essai Half scale test 2 (HSTII) avec EIG Euridice doit permettre de bénéficier d'un premier test comparatif des trois méthodes utilisant la SEI

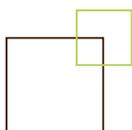
41 - Technique de mesure à distance.

42 - Technique de mesure des distances.

43 - Noyau de scellement

44 - Enhanced Sealing Project (ESP).

45 - Observation du revêtement et du soutènement



## 5.3 METTRE EN ŒUVRE DES MOYENS DE TRAITEMENT DES DONNÉES POUR L'AIDE À LA DÉCISION



La fusion de données est un domaine de R&D émergeant, qui a pour objectif de permettre une description d'ensemble des ouvrages, du stockage et de son environnement, à partir des multiples mesures acquises par les capteurs. Elle permettra de répondre aux exigences de caractérisation du milieu, de servir de support *a posteriori* aux études phénoménologiques, d'aider à la décision concernant la réversibilité et d'appuyer la sûreté d'exploitation.

Les travaux de R&D, relatifs à la fusion de données, s'inscriront dans ces objectifs. Les différents axes de R&D visent à identifier et construire les bases d'un futur système expert et d'aide à la décision. Ces axes de R&D sont les suivants : (i) poursuite des travaux de recherche avec l'INSERM sur la mise en place d'un réseau de neurones qui intégrera la méthode ARMAX (*Auto Regressive Moving Average with eXternal inputs*) et une approche sur la somme cumulée dynamique (DCS), (ii) exploitation des données de l'expérimentation ORS réalisée dans le Laboratoire souterrain avec l'INERIS sous l'aspect de la fusion de données et confrontation des mesures avec la modélisation, (iii) définition d'un maillage pour caractériser l'environnement et ses différents milieux, en partenariat avec l'Inria, (iv) qualification du système envisagé pour le stockage Cigéo à travers des démonstrateurs instrumentés en partenariat avec l'Inria, (v) instrumentation des futurs démonstrateurs de conteneurs de stockage MA-VL, (vi) mise en place d'une méthode d'assimilation de données permettant une vision consistante du système dans toute sa dimension spatio-temporelle.

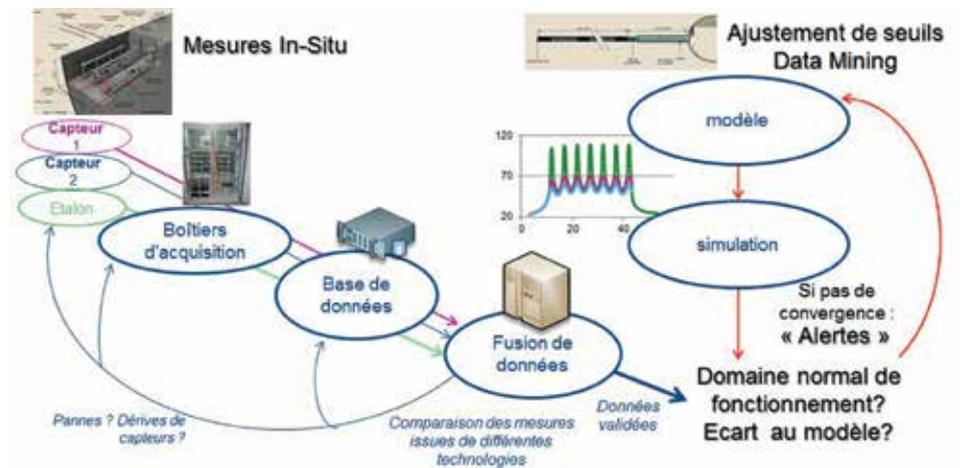
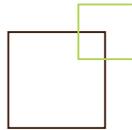


Figure 12 : diagramme de principe de la fusion des données

## 5.4 GÉRER, TRACER ET DIFFUSER LES DONNÉES, ET ASSURER LA TRANSMISSION INTERGÉNÉRATIONNELLE

Les objectifs du programme de R&D relatifs à la gestion, la diffusion et l'utilisation des données et des connaissances, sont d'améliorer les capacités techniques des outils et d'étendre leur utilisation à l'ensemble des activités de l'Agence.

Les données scientifiques ont un rôle central dans le choix des modèles pour les évaluations phénoménologiques, le dimensionnement et les évaluations de sûreté, en particulier après fermeture. Le dossier 2005 avait souligné l'importance de la gestion, de la traçabilité et de la diffusion des données dans le cadre des processus décisionnels internes Andra, et mis en évidence la nécessité d'un cadre formel, pour éviter les pertes potentielles de connaissances. Fort de ce retour d'expérience, depuis 2005, l'Andra a cherché à renforcer le formalisme du processus de transmission de la connaissance scientifique d'une part avec la mise en œuvre d'un premier outil de type *Knowledge Management*, la base de données DIAMS (données structurées) et, d'autre part, avec le renforcement des outils de gestion des données des bases SAGD et GEO au Laboratoire souterrain (données brutes et de référence). En parallèle, les données sur les colis de déchets HA et MA-VL ont été capitalisées dans la base OSCAR (Organisation du Socle de connaissances des Colis de l'Andra).

Le projet ISIS (*Integration and Structuring of Scientific data*) est venu compléter cette chaîne de connaissances en 2012.

Les objectifs du programme de R&D relatifs à la gestion, la diffusion et l'utilisation des données et des connaissances, sont donc d'améliorer les capacités techniques des outils et d'étendre leur utilisation à l'ensemble des activités de l'Agence, centres de surface et projet FA-VL. A cela s'ajoute un volet particulier autour de la mémoire des sites.

### 5.4.1 LA GESTION ET LA TRAÇABILITÉ DES DONNÉES ET DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES À L'ANDRA : LE PROJET ISIS

Le projet ISIS a pour objectifs de tracer les données scientifiques depuis leur acquisition jusqu'à leur utilisation, de justifier les choix des données retenues et utilisées par l'Agence et de maintenir une accessibilité aisée à tous les types de données. Ce projet vise à assurer une traçabilité exemplaire des données qui caractérisent le milieu géologique, les matériaux et les ouvrages de stockage.

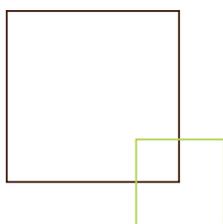
Des outils (logiciels, bases de données, base de connaissances) permettant de mettre en œuvre le processus de gestion seront mis en place, en utilisant au mieux les outils existants tels que la base de données GEO et la base de connaissances DIAMS, en les adaptant.

### 5.4.2 LES BASES DE DONNÉES ET DE CONNAISSANCES

- La base de données GEO

Créée par l'Andra en 1993, GEO permet la gestion des données relatives aux travaux (opérations scientifiques en surface et dans le Laboratoire souterrain), aux échantillons fluides et solides, aux réseaux piézométrique et environnemental de surface. De plus, elle assure la gestion informatique des échantillons (provenance, mouvement et lieux de stockage). La R&D a pour objectif de faire progresser la base GEO sur les points suivants :

- Extension des modes de gestion des données de la base GEO au CSA et au Cires ;
- Application du mode de gestion des données des échantillons solides et fluides aux échantillons de type matériaux qui seront prélevés durant la réalisation des installations de Cigéo ;
- Gestion des données des échantillons qui vont être conservés dans l'écothèque ;
- Amélioration de la gestion des données issues des travaux scientifiques sur la base des pratiques actuelles de la Maîtrise de Chantier qui est en charge de la supervision des travaux scientifiques en galeries souterraines ;
- Accessibilité aisée aux données de référence caractérisant les milieux géologiques.





- La base de données SAGD (Système d'Acquisition et de Gestion des Données)

Mis en place sur le CMHM en 2001, le SAGD permet l'acquisition et la consultation des mesures automatiques (capteurs) et des mesures manuelles acquises sur les réseaux piézométrique et environnemental de surface et dans le Laboratoire souterrain. Au 1<sup>er</sup> janvier 2013, la base contenait 1 milliard de valeurs acquises à partir de plus de 10.000 points de mesures et plus d'une centaine de vues de consultation des données via le logiciel Géo-scope. Le flux de mesures gérées quotidiennement par le SAGD s'élève à environ 1 million de valeurs par jour. Les voies de progrès relatives au SAGD sont les suivantes :

- Extension de la zone de télégestion des stations de surface avec la télégestion des capteurs des forages de la campagne de reconnaissance du projet FA-VL et du projet Cigéo ;
- Augmentation des capacités de gestion des mesures du SAGD pour qu'ils puissent assurer l'acquisition des données de plus de 50 000 capteurs attendus pour l'instrumentation de Cigéo ;
- Développement des fonctionnalités du SAGD pour qu'il puisse être utilisé dans le cadre de la fusion de données et de l'aide à la décision ;
- Création des éléments statistiques et estimer le flux d'informations géré par le SAGD ;
- Amélioration de la représentation graphique des données et de la qualité des modes de recherche ;
- Facilitation du travail de qualification des mesures automatiques.

- La base de connaissances DIAMS

Créée en 2008, DIAMS a principalement permis de capitaliser les analyses critiques des données caractérisant la formation géologique du Callovo-Oxfordien et d'aider à la décision pour le choix d'un modèle ou d'une valeur de paramètre. Cette capitalisation des connaissances doit se poursuivre.

Pour Cigéo, il s'agira de mettre à disposition des connaissances analysées et consolidées intégrant les nouvelles données acquises sur les paramètres du Callovo-Oxfordien, mais aussi de mettre à disposition les analyses critiques des paramètres caractérisant les formations encaissantes et les matériaux dans les conditions de stockage.

La base de connaissances DIAMS sera étendue aux connaissances géologiques et hydrogéologiques ainsi qu'aux connaissances sur le comportement des ouvrages des Centres de surface (CSA, Cires et FA-VL).

En termes d'évolutions techniques de l'outil informatique, le portail DIAMS devra s'adapter à l'intégration et à la visualisation des connaissances concernant les matériaux/ouvrages et les formations géologiques des Centres de surface.

- La base de connaissances OSCAR

L'évaluation des termes sources gaz et des espèces chimiques des colis de stockage HA et MA-VL dont les connaissances sont capitalisées dans la base OSCAR, repose sur la connaissance des processus de corrosion et de radiolyse/hydrolyse des différents matériaux, mais également sur une caractérisation de l'ensemble des déchets. Cette caractérisation des déchets est aujourd'hui disponible au sein de la base OSCAR. Afin d'assurer la cohérence entre les données, un outil de calcul des termes sources gaz et espèces chimiques, couplé avec la base de connaissances OSCAR sera développé.

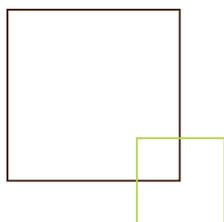
**5.4.2.1** Le traitement et la visualisation des données de la reconnaissance et de l'observation

- Le référencement des données scientifiques

Le référencement des données scientifiques du milieu géologique, qui a débuté en 2012 avec le projet ISIS, se poursuivra pour Cigéo et pour les centres de surface.

- Cigéo

Le référencement des données du milieu géologique concernera l'ensemble des formations (Callovo-Oxfordien, Dogger, Oxfordien, Kimméridgien, Tithonien). Ces dernières seront les données d'entrée à l'établissement des modèles géométriques et quantitatifs du milieu géologique à l'échelle du secteur d'étude (ZT recentrée Zira). Il conviendra de dissocier et référencer l'ensemble des données acquises sur roche saine et roche perturbée mécaniquement.



Les données relatives aux ouvrages et aux matériaux qui, à ce jour, ne sont répertoriées dans aucune base de données seront référencées et intégrées dans un système de gestion adapté. Les données issues des thèses, des partenariats, des groupements de laboratoire... seront prises en compte dans le référencement.

- Centres de surface

L'objectif majeur sera de référencer l'ensemble des données acquises sur le milieu géologique, les ouvrages et les matériaux et de les intégrer dans un système de gestion adapté. En prenant en compte le retour d'expérience de la gestion des données mise en place pour Cigéo, ce référencement s'efforcera d'adopter le même formalisme et les mêmes procédures de vérification, validation et intégration que pour le projet Cigéo afin que les données puissent être comparables. Une réflexion sera menée sur la démarche de référencement à adopter pour les « anciennes » données scientifiques (matériaux, ouvrages, milieu géologique) du CSM répertoriées actuellement uniquement dans les documents et rapports.

D'ici 2016, l'ensemble des données de référence, pour le projet Cigéo, le CSA et le CSM devront être les seules données d'entrées pour les analyses critiques (fiches DIAMS), les choix des modèles et des calculs d'analyses phénoménologiques, de dimensionnement et de sûreté.

- La visualisation des données « Métiers » avec un Système d'Informations Géographique (SIG)  
Les données scientifiques acquises sont des données « Métiers » pluridisciplinaires qui proviennent de sources et de bases de données diverses : travaux, infographie, environnement, géologie, hydrogéologie, géochimie, géo-mécanique, données de modélisation et données d'auscultation. Afin de prévoir l'intégration progressive des éléments acquis lors de la construction des infrastructures souterraines et de surface de Cigéo, et de gérer les données scientifiques associées, il est nécessaire que la gestion et la consultation des données soient effectuées dans un environnement unique.

Pour ce faire, un système d'information géographique sera développé en plusieurs phases successives : (i) le développement d'un prototype simplifié du SIG pour valider les choix en termes de données utilisées, de fonctionnalités proposées et d'ergonomie, (ii) la rédaction d'un document sur le retour d'expérience de l'utilisation de la maquette SIG, (iii) le développement du SIG, (iv) le déploiement du SIG sur le réseau Andra.

### 5.4.3 LA TRANSMISSION DE LA MÉMOIRE INTERGÉNÉRATIONNELLE

La transmission intergénérationnelle comporte une dimension matérielle et une dimension sociologique. Les travaux déjà engagés sur chacune d'elles seront poursuivis afin notamment de nourrir les réflexions sur la gouvernance des stockages, et de Cigéo, plus particulièrement.

Concernant la dimension matérielle, les travaux porteront sur (i) la durabilité des supports de la connaissance avec la poursuite des études sur les papiers et les encres, et des études préliminaires sur des supports innovants comme des céramiques, (ii) les moyens de détection des traces d'un stockage de surface ou profond avec l'approfondissement des travaux d'archéologie et géomorphologie, de télédétection et de mémoire d'occupation des sols.



Figure 12 : Détection de villas et activités gallo-romaines au niveau du massif forestier de Montiers (technologie Lidar)



PROGRAMME DE R&D / 2013-2016  
EXECUTIVE SUMMARY

6

## OPTIMISER LES MATÉRIAUX DES STOCKAGES

La R&D sur les matériaux du futur des stockages s'inscrit dans une dynamique prospective à long terme. Son objectif est l'optimisation des matériaux sur deux points principaux :

- **Augmenter leurs performances et leur durabilité** (propriétés mécaniques des bétons, tenue à la corrosion), par exemple en optimisant la composition des matériaux (nouveaux additifs, couches protectrices...);
- **Limiter les conséquences de leur dégradation sur la roche hôte** ou **accroître leur compatibilité avec les autres matériaux du stockage** et les déchets auxquels ils sont associés, au travers, par exemple, de l'emploi de matériaux inertes.

S'ajoute le développement de matériaux intelligents capables de remplir une fonction du stockage et de transmettre les informations pertinentes sur un paramètre physico-chimique, par exemple relatif à leur dégradation.

Sur la période 2013-2016, le programme marque une volonté d'investissement de l'Andra dans ce domaine. Il s'appuie pour cela sur les travaux préliminaires menés par l'Andra, notamment sur les céramiques pour les sur-conteneurs de déchets HA, et dans une moindre mesure, sur les bétons de très haute performance.

## 6.1 RÉDUIRE L'IMPACT DES CONSÉQUENCES DE LA DÉGRADATION DES MATÉRIAUX

### 6.1.1 DES MATÉRIAUX INERTES EN REMPLACEMENT DES ACIERS DE COMPOSANTS DE CIGÉO

Les matériaux inertes - non métalliques - sont une alternative possible à certains composants du stockage aujourd'hui métalliques (ex. sur-conteneur et chemisage HA), afin de limiter la production d'hydrogène par corrosion anoxique en condition de stockage.

De par leur inertie chimique, les céramiques ont été les premiers matériaux à être étudiés en remplacement des sur-conteneurs en acier des colis HA.

Sur la période 2013-2016, la R&D sur les céramiques se poursuivra, principalement autour de la question de la fermeture du sur-conteneur HA qui est une étape clé dans l'évaluation de sa faisabilité au regard de la fonction d'étanchéité recherchée. En parallèle, une réflexion sera initiée pour préciser l'incidence d'un sur-conteneur non métallique sur la phénoménologie en conditions de stockage en tenant compte des spécificités du matériau (conductivité thermique, coefficient d'absorption des rayonnements). Ces études conduiront à une actualisation du design du sur-conteneur qui sera couplée à une réflexion sur les procédés de préhension compatibles avec le principe de réversibilité.

Ce type d'étude sera étendu à d'autres matériaux, notamment au carbure de silicium, mais également aux matériaux composites à matrice non organique (type CmC), au travers d'une étude comparative selon différents critères (propriétés mécaniques et chimiques, mise en œuvre à l'échelle industrielle, faisabilité d'un scellement, coûts...). La faisabilité et l'intérêt de revêtements à base de ces matériaux alternatifs déposés sur un sur-conteneur en acier seront également étudiés.

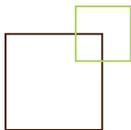
### 6.1.2 DES BÉTONS SPÉCIAUX BAS PH ET DES GÉO-POLYMÈRES À BASE DE SILICE POLYMÉRISÉE EN MILIEU ALCALIN POUR L'ENROBAGE DE DÉCHETS MÉTALLIQUES RÉACTIFS MA-VL ET FMA-VC

Certains déchets radioactifs, par exemple des déchets technologiques FMA-VC et MA-VL, sont des métaux réactifs, aluminium et magnésium. En présence d'eau, par corrosion, ils peuvent générer des élévations de température et une production d'hydrogène importantes. Des spécifications de mise en stockage sont ainsi définies pour limiter ces effets et garantir la sûreté. Dans le futur, on peut néanmoins envisager de limiter les effets de la corrosion par l'utilisation de matériaux d'enrobage spécifiques comme les ciments bas pH et les géo-polymères.

L'aluminium métallique fait l'objet de restrictions de prise en charge au CSA lorsque les déchets sont immobilisés dans une matrice à base de liant hydraulique. Afin de lever les restrictions, les ciments phospho-magnésiens sont une alternative intéressante du fait d'un pH de leur solution interstitielle plus faible que celui des ciments silico-calciques usuels. Récemment, des géo-polymères dont la base est une silice polymérisée en milieu alcalin ont été développés, et pourraient aussi être une solution d'enrobage de déchets métalliques réactifs, magnésium et aluminium.

Sur la période 2013-2016, des travaux seront menés sur la caractérisation, d'une part, du comportement de l'aluminium dans les ciments phospho-magnésiens, en compléments des données obtenues en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis, d'autre part, sur les propriétés physiques et chimiques des géo-polymères à base de silice.

Sur la période 2013-2016, la R&D sur les céramiques se poursuivra, principalement autour de la question de la fermeture du sur-conteneur HA qui est une étape clé dans l'évaluation de sa faisabilité au regard de la fonction d'étanchéité recherchée.



## 6.2 INNOVER DANS LA CONCEPTION DES COMPOSANTS DU STOCKAGE

### 6.2.1 DES BÉTONS THERMIQUEMENT ET MÉCANIQUEMENT PLUS RÉSISTANTS POUR CIGÉO

Des structures en béton de Cigéo pourront être soumises à des élévations de température modérées mais associées à des gradients thermiques significatifs et ce sur des durées importantes. Par ailleurs, certains déchets MA-VL – cas des boues bitumées – doivent être protégés d'une éventuelle augmentation de température (normale ou accidentelle). Enfin, l'exigence de maîtrise de la sûreté de Cigéo sur la période d'exploitation séculaire et la radioprotection peuvent conduire à des épaisseurs importantes de structures en béton.

Des dispositions de conception sont déjà définies pour garantir les fonctions des composants, notamment avec le choix des solutions de béton existantes. Cependant, afin de fournir une palette de matériaux cimentaire plus large améliorant les tenues thermique et mécanique des composants associés et réduisant les dimensionnements, une veille active sera menée sur les bétons du futur. Sur la période 2013-2016, les travaux seront axés sur des solutions techniques plus particulières, comme les bétons fibrés ou avec des granulats métalliques (radioprotection), dont on évaluera les propriétés thermo-hydrromécaniques, les processus de dégradation chimiques et les conditions de mise en œuvre.

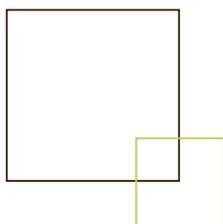
### 6.2.2 DES MATÉRIAUX POUR OPTIMISER LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES OU CHIMIQUES DES INTERFACES

Cigéo et, dans une moindre mesure, les centres de surface, mettent en jeu des interfaces dans la fonction de composants au travers d'une performance mécanique et/ou chimique. Il s'agit, par exemple, pour Cigéo du matériau de bourrage derrière les voussoirs de soutènement de galerie, de l'interface entre le chemisage HA et les argilites ou des interfaces entre béton des massifs d'appui des scellements de galeries et d'alvéole MA-VL.

Par nature, ces interfaces sont des discontinuités de propriétés, et de potentiels points faibles, nécessitant la mise en œuvre de dispositions de conception souvent enveloppes pour s'affranchir des incertitudes de comportement. L'amélioration de la maîtrise du comportement de ces interfaces et leur optimisation technico-économique reposent sur le développement de matériaux nouveaux.

Sur la période 2013-2016, on se focalisera sur des composants précis et importants pour Cigéo dans le cadre du Dossier de la DAC, le matériau de bourrage derrière les voussoirs, l'interface entre les argilites et l'extrados des chemisages HA et les interfaces cimentaires au sein des massifs d'appui en béton des scellements de galeries et d'alvéoles MAVL.

Une analyse prospective de nouveaux matériaux, principalement à base d'argile et de béton, sera menée sur leurs propriétés physico-chimiques et leurs mises en œuvre dans les conditions du stockage. Ces travaux, à la fois bibliographiques et expérimentaux si possible, s'appuieront sur les résultats des essais de démonstrateurs menés au Laboratoire souterrain (expérimentations TPV<sup>46</sup>, ERA<sup>47</sup> et FSS<sup>48</sup>).



## 6.3 MENER UNE VEILLE ACTIVE SUR LES MATÉRIAUX INTELLIGENTS, EN LIEN AVEC L'AUSCULTATION DU STOCKAGE

Les recherches sur les matériaux intelligents ou « *smart materials* » ont d'abord été menées pour la domotique et des applications spécifiques (vitrages, isolation, peintures), mais elles se développent actuellement plus largement dans le domaine du génie civil. La notion de matériau « intelligent » repose sur des capacités particulières de sensibilité, d'adaptation et d'évolution du matériau face à des sollicitations externes et l'instrumentation du matériau à une micro-échelle. Pour ce faire, différentes pistes sont suivies :

- Utiliser des matériaux dont les caractéristiques propres leur permettent de se comporter comme un capteur (détecter des signaux) ou un actionneur (effectuer une action sur son environnement), en modifiant spontanément leurs propriétés physiques ;
- Rendre actif les matériaux par l'emploi et l'insertion de nanostructures, nanomatériaux ou nano-capteurs en leur sein. Associés à des systèmes électroniques, ces matériaux deviennent « actifs » et peuvent s'adapter ou réagir à leur environnement ;
- Recouvrir les composants d'élément détecteur (peintures, produits d'étanchéité...). Des solutions opérationnelles existent et sont mises en œuvre sur des éoliennes (sur les éléments métalliques mais aussi en fondation) à travers une peinture capable de détecter de microscopiques problèmes structurels (fissures, etc.), en remplacement des techniques et méthodes traditionnelles de surveillance et de contrôle généralement très ponctuelles et ne permettant pas d'accéder à des zones peu accessibles.

En vue de garantir leur complétude ou leur redondance avec les technologies développées pour l'auscultation des stockages et au regard de l'intérêt que peuvent présenter ces développements, il sera mené une veille active sur les R&D entreprises sur ces matériaux « intelligents ».

46 - Essai technologique d'un tunnelier avec pose de voussoirs

47 - Faisabilité d'une injection de coulis classique à l'extrados du chemisage

48 - Démonstrateur de scellement

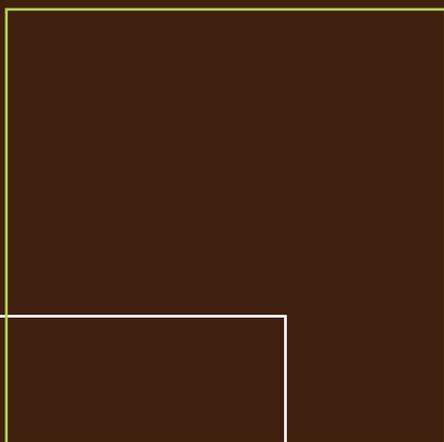


PROGRAMME DE R&D/2013-2016  
**EXECUTIVE SUMMARY**

---

# ANNEXE

OBJECTIFS PRIORITAIRES  
DU PROGRAMME DE R&D 2013-2016



# TABLEAU 1

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Préserver la ressource des sites de stockage »

Axe « Améliorer la caractérisation de l'inventaire radiologique des déchets » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Déchets de démantèlements	Cires/TFA	Intégrer à la stratégie de R&D les développements de (i) méthodes innovantes de caractérisation des déchets, (ii) procédés de tri, traitement et décontamination, et (iii) nouveaux matériaux et nouveaux conditionnement	Les actions seront définies en fonction des réponses suite à l'appel à projets en 2014 dans le cadre des Investissements d'Avenir <sup>1</sup> (IA)	Projets soutenus jusqu'en 2020 au plus tard
Spéciation du <sup>14</sup> C dans les résines échangeuses d'ions <sup>2</sup>	CSA/FMA-VC	Quantifier les fractions organiques et inorganiques du <sup>14</sup> C des résines EDF afin de consolider les marges de sûreté du CSA en vue du prochain RDS du CSA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acquisition dans le cadre du projet européen CAST (2014-2017)</li> <li>Caractérisation de l'inventaire de résines irradiées et essais de lixiviation.</li> </ul>	Fin des études en 2017. Les résultats seront utilisés pour l'instruction du RDS CSA (prenant en compte les premiers résultats).
Inventaire en <sup>14</sup> C et en <sup>36</sup> Cl des déchets graphite <sup>2</sup>	Cigéo et FAVL/graphites	Améliorer la connaissance de la localisation et la spéciation du <sup>3</sup> H, du <sup>14</sup> C et du <sup>36</sup> Cl en vue du dossier de synthèse FA-VL et de la DAC de Cigéo (réserves Cigéo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Affiner l'inventaire radiologique des chemises graphite (expériences, simulation)</li> <li>Expérimentations et modélisation par dynamique moléculaire dans le cadre du GT R&amp;D graphite (CEA, EDF, Andra)</li> <li>Échanges dans le cadre du projet européen CAST (2014-2017)</li> </ul>	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Inventaire en <sup>129</sup> I des déchets vitrifiés HA <sup>2</sup>	Cigéo/HA	Affiner les marges de sûreté liées au mode de calcul de l'inventaire en <sup>129</sup> I dans les déchets vitrifiés HA en vue de la DAC de Cigéo	Thèse en partenariat avec l'institut CARNOT-M.I.N.E.S reposant sur la formulation de verres dopés à l'iode et la mesure de la teneur en iode par ICPMS HR.	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Inventaire en <sup>36</sup> Cl des combustibles usés <sup>2</sup>	Cigéo/CU	Initier la consolidation de l'inventaire en <sup>36</sup> Cl des combustibles usés en vue d'évaluer les marges de sûreté de Cigéo (support aux évaluations de sûreté) en cas de stockage direct des combustibles usés	Travaux expérimentaux dans le cadre du programme PRECCI	Mise à jour de l'inventaire en <sup>36</sup> Cl, si nécessaire (2020)

1 - Initiés par le gouvernement dans le cadre de la loi de finances rectificative de mars 2010.

2 - Actions relevant des producteurs en lien avec les exigences de l'Andra.

# TABLEAU 2

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Préserver la ressource rare des sites de stockage »

Axe « Mettre au point de nouvelles méthodes de traitement et de conditionnement des déchets » sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Traitement des déchets alpha MA-VL	Cigéo/MA-VL organiques	Démontrer la faisabilité d'un procédé de traitement par incinération / fusion / vitrification par torche à plasma et initier son développement technologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conception et fabrication d'une maquette complète échelle 1</li> <li>Caractérisation des déchets à traiter, formulation du déchet final et étude de son comportement à long terme (vitesse d'altération, distribution de l'activité...) Travaux dans le cadre d'Investissements d'Avenir<sup>1</sup> (IA)</li> </ul>	Poursuite des études jusqu'en 2018 (qualification du pilote échelle 1 en inactif)
Traitement des déchets graphite	FA-VL (graphite décontaminé)	Démontrer la faisabilité d'une technique de décontamination partielle des graphites par carboxygazéification	2011-2014 : thèse Andra sur le procédé de carboxygazéification : compréhension des mécanismes, essais en actif, caractérisation structurale... Travaux dans le cadre d'une collaboration EDF/CEA/CNRS	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
	Cigéo (déchets induits par le traitement) et FA-VL (graphite résiduel)	Identifier, sélectionner et initier le développement de procédés de gestion des déchets induits par le traitement des graphites (demande PNGMDR 2010-2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2013 : revue bibliographique des procédés envisageables pour la gestion des radionucléides extraits du graphite lors d'un traitement thermique</li> <li>2014 : R&amp;D sur les solutions les plus pertinentes</li> <li>2015 : poursuite de la R&amp;D - orientation pour le choix du scénario industriel de gestion des graphites (jalon PNGMDR) <i>Contrat spécifique EDF/Andra sur la gestion des déchets induits (2013-2015)</i></li> </ul>	Si le scénario de traitement est retenu pour la gestion des déchets graphite : étude du comportement en stockage des déchets générés par le traitement
Optimisation de la gestion des déchets de démantèlement	CSA/FMA-VC Cires/TFA (pour l'essentiel)	Faire émerger des initiatives novatrices autour de la gestion des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caractérisation des installations/sites à démanteler et des déchets générés</li> <li>Tri et traitement des déchets</li> <li>Nouveaux matériaux pour le stockage</li> <li>Innovation et société</li> </ul> <i>Appel à projet dans le cadre des IA<sup>1</sup></i>	Projets soutenus jusqu'en 2020 au plus tard
Nouvelles matrices de piégeage/conditionnement des effluents radioactifs	Tous déchets	Étudier la faisabilité de solutions innovantes de conditionnement pour les effluents radioactifs	Défi NEEDS (2012-2017)	À définir à l'issue des résultats des travaux

<sup>1</sup> - Initiés par le gouvernement dans le cadre de la loi de finances rectificative de mars 2010

# TABLEAU 3

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Préserver la ressource rare des sites de stockage »

Axe « Affiner les connaissances permettant de concevoir un stockage plus compact » sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Comportement des verres en température	Cigéo/HA	Déterminer les vitesses initiales de dissolution des verres R7/T7 en eau de site jusqu'à 80 °C, en support à l'évaluation de la relaxation des critères thermiques de dimensionnement, et support aux évaluations de sûreté pour la DAC de Cigéo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Études en laboratoire jour</li> <li>Étude de pistes d'optimisation</li> <li>Justification des choix de représentation pour les situations de défaillance après fermeture</li> </ul>	Acquisition des données complètes en eau et en atmosphère (expériences <i>in situ</i> et en laboratoire jour) et calage des modèles de dissolution, pour les dossiers de lancement des tranches HA 1-2 <sup>1</sup> (prévues à partir de 2075)
Comportement chimique et transport des radionucléides et toxiques chimiques dans les argilites pour un domaine de températures étendu	Cigéo/HA	Disposer de premiers modèles de comportement chimie-transfert des radionucléides / toxiques chimiques entre 60°C et 80°C dans les argilites couplés au comportement des verres, en support à l'évaluation de la relaxation des critères thermiques de dimensionnement, et en support aux évaluations de sûreté pour la DAC de Cigéo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Études en laboratoire jour</li> <li>Études de spéciation à partir de la base Thermo-Chimie</li> <li>Simulations numériques</li> <li>Justification des choix de représentation pour les situations de défaillance après fermeture</li> </ul>	Fourniture des modèles et des valeurs de paramètres pour un domaine de température étendu à 80 °C, pour les dossiers de lancement des tranches HA 1-2 (prévues à partir de 2075)
Co-stockage de déchets MA-VL	Cigéo/MA-VL	Évaluer les interactions physico-chimiques et le comportement des radionucléides / toxiques chimiques, en support aux études d'optimisation technico-économique de Cigéo en vue de la DAC de Cigéo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Études en laboratoire jour</li> <li>Études de spéciation à partir de la base Thermo-Chimie</li> <li>Simulations numériques</li> </ul>	Lancement des tranches MA-VL de Cigéo afférentes à ces déchets (> 2030) et du stockage FA-VL (> 2020) : fourniture des modèles et données suivant des conditions de co-stockage étendues
Interaction Thermo-hydrromécanique entre alvéoles de stockage	Cigéo/MA-VL	Améliorer la représentation de la zone endommagée entre alvéoles MA-VL et son évolution, en fonction de la distance entre alvéoles, en support aux études d'optimisation technico-économique de Cigéo en vue de la DAC de Cigéo	Expérimentations et simulations numériques sur la base des modèles de comportement thermo-hydrromécanique établis à ce jour (approche milieu poreux continu équivalent et approche milieu argileux à double porosité/fracturé)	Lancement des tranches MA-VL de Cigéo au-delà de la tranche 1 : utilisation de modèles complets calés et du REX des alvéoles des tranches déjà construites
Déchets de démantèlement et stériles industriels	Cires/TFA	Évaluer les conditions de migration/immobilisation des radionucléides concernés, en support aux études de conception et d'évaluation de sûreté pour la définition des filières de gestion de ces déchets adaptées	Études de spéciation à partir de la base Thermo-Chimie	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

1 - Déchets de haute activité vitrifiés : HA1, verres produits dans les ateliers R7/T7 de La Hague ; HA2, verres dopés au Pu (production future)

# TABLEAU 4

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Préserver la ressource rare des sites de stockages »

Axe « Evaluer la gouvernance et les aspects socio-économiques des stockages » sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
La gouvernance dans le domaine de la gestion de déchets radioactifs	Tous projets et centres	Contribuer à l'évaluation des différents scénarios au plan socio-économique et politique en lien avec l'innovation, avec un focus particulier sur le recyclage (seuil de libération/confiance) et les graphites (arbitrages), en support à la définition du développement progressif des stockages et à la gestion optimisée des déchets radioactifs, notamment pour la DAC de Cigéo et le dossier de synthèse FA-VL	<ul style="list-style-type: none"> <li>Thèse 2011-2014 : place et rôle de l'Andra dans le dispositif de gouvernance des déchets radioactifs</li> <li>Appel à projets R&amp;D sur la gestion des déchets de démantèlement avec l'ANR (2014-2017)</li> <li>« Étude de cas graphites » en 2015</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modalités de mise en place et suivi de la gouvernance du projet Cigéo</li> <li>Définition d'une gouvernance pour la filière de recyclage des déchets radioactifs TFA</li> </ul>
L'évaluation socio-économique des mégaprojets	Cigéo	Mieux apprécier les aspects qualitatifs et difficilement quantifiables qui pourraient intervenir dans l'évaluation <i>ex-ante</i> de Cigéo (adaptabilité, cadre de vie...) ainsi que les méthodologies et les pratiques susceptibles d'être mobilisées pour l'aide à la décision, pendant toute la durée de vie du projet, en support à la définition du développement progressif de Cigéo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projet « Méthodologies et pratiques d'évaluation des mégaprojets »</li> <li>Suite : programme NEEDS du CNRS/Projet européen LESLIE/ Groupement de laboratoires</li> </ul>	Contribution à l'évaluation socio-économique « en continu » de Cigéo

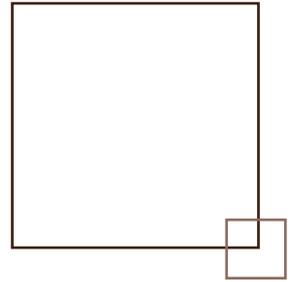
# TABLEAU 5

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »

Axe « Améliorer la connaissance de l'inventaire non radiologique des déchets et caractériser les processus de dégradation » - Inventaire, sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Nature et géométrie des pièces métalliques <sup>1</sup>	Cigéo (déchets métalliques)	Disposer d'informations sur la nature des alliages utilisés et sur la géométrie des pièces métalliques et évaluer la production de gaz par corrosion afin d'affiner les évaluations de sûreté après fermeture de la DAC de Cigéo	À partir des données fournies par les producteurs, définition des termes sources de déchets	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Composition chimique et structurale des polymères <sup>1</sup>	Cigéo (Polyacrylates, résines échangeuses d'ions)	Estimer plus précisément la nature des produits de dégradation hydrosolubles en termes de (i) composition chimique des polyacrylates, (ii) natures possibles des squelettes pour les résines échangeuses d'ions, en support aux évaluations de sûreté après fermeture de la DAC de Cigéo		À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Caractérisation des bitumes <sup>1</sup>	Cigéo et FA-VL (bitumes de la station de traitement des effluents de Marcoule - STEL)	Déterminer les teneurs en asphaltènes et en maltènes des bitumes de la STEL et les comparer aux bitumes de La Hague afin d'affiner les évaluations de sûreté après fermeture pour la DAC de Cigéo et le dossier de synthèse FA-VL		À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

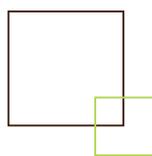
<sup>1</sup> - Actions relevant des producteurs en lien avec les exigences de l'Andra



# TABLEAU 6

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »

Axe « Améliorer la connaissance de l'inventaire non radiologique des déchets et caractériser les processus de dégradation » - Processus, sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016



THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Production de gaz non radioactifs	Cigéo, CSA	Déterminer les termes sources de la production de gaz par radiolyse des polymères avec notamment prise en compte de l'effet de la dose intégrée, pour la conception, l'évaluation de la sûreté d'exploitation et après fermeture en vue de la DAC de Cigéo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expérimentations en laboratoire jour</li> <li>Modélisation et simulations numériques</li> </ul>	Validation du relâchement d'hydrogène par radiolyse des matériaux cimentaires et des matériaux organiques avec des mesures sur des colis réels
		Déterminer la production d'hydrogène par corrosion de l'aluminium en conditions non saturées et du magnésium enrobé dans un liant hydraulique pour consolider les marges de sûreté, en vue des évaluations de performances pour la DAC de Cigéo et des évaluations de sûreté du prochain RDS du CSA	Expérimentations en laboratoire jour	Détermination des vitesses de corrosion des alliages de zirconium, des aciers inoxydables irradiés et des aciers non alliés (en présence de déchets organiques)
Déchets vitrifiés HA, MA-VL, FA-VL et FMA-VC : relâchement des radionucléides	Cigéo, FA-VL, FMA-VC	En vue de consolider les marges de sûreté pour la DAC Cigéo : <ul style="list-style-type: none"> <li>Améliorer les modèles de fracturation existants et développer de nouveaux modèles pour évaluer l'évolution de la fracturation des déchets vitrifiés HA en fonction de leurs conditions de fabrication et des contraintes en stockage</li> <li>Évaluer l'altération des différents déchets vitrifiés par la vapeur d'eau</li> <li>Préciser la nature des produits de corrosion formés à l'interface verre/sur-conteneur</li> <li>Préciser les mécanismes d'altération des déchets vitrifiés (HA et MA-VL) en présence de matériaux d'environnement</li> </ul>	Études expérimentales, modélisation et simulations numériques en thermomécanique (fracturation du verre)	Évaluation : <ul style="list-style-type: none"> <li>Effet de l'irradiation sur l'altération des déchets vitrifiés par la vapeur d'eau</li> <li>Complétude du modèle d'altération des déchets vitrifiés HA en présence de matériaux d'environnement</li> <li>Validation en actif du modèle d'altération des déchets vitrifiés HA en présence de matériaux d'environnement</li> </ul>
		Affiner les connaissances relatives à la spéciation du <sup>14</sup> C relâché par les graphites et des résines échangeuses d'ions (fraction organique) pour évaluer les marges de sûreté en vue (i) du prochain RDS du CSA, de la DAC Cigéo, et du dossier de synthèse FA-VL	Expérimentations en laboratoire jour	Spéciation du <sup>14</sup> C relâché par corrosion des alliages de zirconium, des aciers inoxydables et par dégradation des graphites et des résines échangeuses d'ions

# TABLEAU 6 suite



THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
		Consolider les résultats déjà acquis au sujet de l'influence de la fissuration des matériaux cimentaires sur leurs propriétés de confinement afin d'évaluer les marges de sûreté en vue du prochain RDS CSA	Expériences et simulations numériques	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
		Préciser les mécanismes associés à la vitesse résiduelle de relâchement du <sup>36</sup> Cl par les déchets graphite, pour le dossier de synthèses FA-VL	Travaux expérimentaux dans le cadre du GT R&D Graphite (CEA, EDF, Andra)	Modélisation du relâchement des radionucléides par les graphites traités et simulations numériques à l'échelle du stockage
		Évaluer le relâchement des radionucléides conditionnés dans une matrice époxyde pour le prochain RDS du CSA	Étude bibliographique	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Déchets organiques et salins : relâchement des espèces chimiques	Cigéo	En support aux évaluations de sûreté pour la DAC de Cigéo : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier le caractère conservatif de la liste des espèces complexantes actuellement considérées ;</li> <li>• Déterminer les produits de dégradations hydrosolubles des résines échangeuses d'ions</li> </ul>	Expérimentation en laboratoire jour	Quantification/consolidation des cinétiques de relâchement des produits de dégradation hydrosolubles
Comportement des boues bitumées (gonflement, incendie)	Cigéo	Déterminer le relâchement des sels par les colis C5' et par les colis de boues bitumées en support aux évaluations de performance pour la DAC de Cigéo  En support aux études de conception et aux évaluations de sûreté (exploitation et après-fermeture) pour la DAC de Cigéo <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérifier la tenue du colis de stockage à la suite du gonflement sous radiolyse des boues bitumées</li> <li>• S'assurer de la faisabilité des essais de gonflement sous eau des boues bitumées</li> <li>• Évaluer le comportement thermique des boues bitumées</li> </ul>	Expérimentation en laboratoire jour	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

1 - Boues STE2 (ancienne station de traitement des effluents d'AREVA La Hague) séchées, compactées et immobilisées dans un conteneur métallique

**Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »**

Axe « Acquérir les données intrinsèques aux matériaux et aux milieux naturels » sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Matériaux cimentaires	Cigéo	S'assurer de la faisabilité des scellements et des bouchons d'alvéoles HA en définissant des formulations et en caractérisant les propriétés physico-chimiques de bétons « bas pH », en vue de la DAC de Cigéo	Travaux expérimentaux en lien avec le démonstrateur de scellements à échelle 1 FSS (projet européen DOPAS)	Qualification des formulations utilisées pour les démonstrateurs de scellement dès le démarrage de Cigéo
	Cigéo	S'assurer de la faisabilité des scellements et des bouchons d'alvéoles HA en définissant des formulations et en caractérisant le comportement hydromécanique de mélanges de pellets d'argile gonflante, en vue de la DAC de Cigéo	Travaux expérimentaux en lien avec le démonstrateur de scellement à échelle 1 FSS (projet européen DOPAS)	Qualification des formulations utilisées pour les démonstrateurs de scellement dès le démarrage de Cigéo
Milieux géologiques	Cigéo	En support à la DAC de Cigéo, notamment pour les évaluations de sûreté après fermeture (habillage 3D du Callovo-Oxfordien) <ul style="list-style-type: none"> <li>Disposer d'un modèle hydrogéologique préliminaire des calcaires du barrois en vue de l'implantation des installations de surface</li> <li>Disposer de modèles conceptuels de site en définissant un habillage 3D de la couche du Callovo-Oxfordien en propriétés physico-chimiques</li> </ul>	Modélisation et simulations numériques	Modèle hydrogéologique consolidé des calcaires du Barrois pour le suivi des éventuelles perturbations liées à la construction et l'exploitation de Cigéo
	FA-VL	Disposer des éléments essentiels de reconnaissance géologique pour le dossier de synthèse FA-VL	Reconnaissance sur le terrain (forages, sismique...) et caractérisation des propriétés sur échantillons en laboratoire jour	Reconnaissance approfondie du site (fonction de la décision du gouvernement à l'issu du dossier de synthèse FA-VL)
Radionucléides et toxiques chimiques : base de données thermodynamique	Cigéo, CSA/CSM, FA-VL	Affiner les évaluations des évolutions géodynamiques internes et externes sur la période (0, 10000 à 50000) ans avec un pas de 1000 ans et en évaluer qualitativement les effets, pour la DAC de Cigéo, le dossier de synthèse FA-VL et le prochain RDS du CSA (concerne également le CSM)	Modélisation et simulations numériques	Modélisation quantitative des effets géodynamique à court et moyen terme (période de temps de quelques centaines à quelques milliers ou dizaines de milliers d'années)
	Tous projets	Compléter la base de données ThermoChimie : complexes organiques, milieux salins, béton « bas H »...; en support notamment à la DAC de Cigéo (évaluation des possibilités de co-stockage de déchets MA-VL, évaluation de sûreté après-fermeture) et au dossier de synthèse FA-VL	Acquisitions expérimentales	Consolidation de la base Thermo-Chimie en support aux dossiers d'autorisation de stockage des déchets afférents notamment (avec ou sans co-stockage de déchets MA-VL pour Cigéo)

# TABLEAU 8

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »

Axe « Caractériser et modéliser les mécanismes d'interaction aux échelles pertinentes pour réduire les incertitudes phénoménologiques » sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Comportement mécanique des argilites	Cigéo	<p>En support à la DAC de Cigéo :</p> <p>(Pré)dimensionner les scellements/bouchons d'alvéoles HA, les revêtements des galeries / alvéoles MA-VL et le chemisage des alvéoles HA :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En déterminant l'anisotropie des paramètres mécaniques des argilites</li> <li>• En évaluant le comportement au cisaillement des argilites endommagées et en évaluant les frottements argilites/béton/acier</li> <li>• En évaluant la localisation des déformations différées dans la zone endommagée (milieu fracturé)</li> <li>• En évaluant les cinétiques de déformation différée sous déviateur faible à nul</li> <li>• En développant un modèle d'endommagement anisotrope (concept milieu poreux continu équivalent)</li> <li>• En (pré)développant un modèle de milieu fracturé et en effectuant une comparaison préliminaire avec l'approche milieu continu équivalent</li> </ul> <p>Consolider la faisabilité la zone HA-1-2<sup>1</sup> et réaliser l'analyse de sûreté après fermeture en évaluant l'absence d'endommagement thermique</p> <p>Affiner l'analyse de sûreté après fermeture en consolidant le processus d'auto-collimatage des argilites (endommagement diffus et fractures)</p>	<p>Travaux expérimentaux (incluant expériences dans le Laboratoire souterrain), modélisation et simulations numériques</p>	<p>Consolidation des mécanismes et développement d'un modèle d'endommagement anisotrope de type milieu fracturé pour les dossiers de conception et de réalisation des revêtement/ soutènements</p>
		<p>En support à la DAC de Cigéo, (pré)dimensionner les chemisages et sur-conteneurs des alvéoles de déchets HA (notamment HAO<sup>2</sup> prévus dès la première tranche de Cigéo , en :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• évaluant l'absence de risque de corrosion sous contrainte</li> <li>• évaluant la corrosion sous rayonnement dans le domaine 1 à 100 Gy/h : vérification de l'absence d'effet, <i>a minima</i> sous 10 Gy/h</li> <li>• évaluant les mécanismes et les temps du transitoire (acide) de corrosion en situation de stockage : vérification de temps petits</li> <li>• consolidant les valeurs de vitesses de corrosion après le transitoire (acide)</li> <li>• vérifiant l'absence de couplage corrosion, plastification et propagation de fissures</li> </ul>	<p>Travaux expérimentaux (incluant expériences dans le Laboratoire Souterrain), modélisation et simulations numériques</p>	<p>Consolidation des mécanismes pour le dossier de conception des chemisages et sur-conteneurs HAO (2018-2020) pour le démarrage de Cigéo</p>

1 - Déchets de haute activité vitrifiés : HA1, verres produits dans les ateliers R7/T7 de La Hague ; HA2, verres dopés au Pu (production future).

2 - Déchets de haute activité vitrifiés issus de l'usine de retraitement de Marcoule.





THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Comportement mécanique et chimique des bétons « bas pH »	Cigéo	En support à la DAC de Cigéo, (pré)dimensionner les massifs d'appui en béton « bas pH » des scellements, en : <ul style="list-style-type: none"> <li>consolidant les schémas réactionnels d'interaction chimique entre les argilites et les bétons « bas pH »</li> <li>développant un modèle réactionnel consolidé pour les simulations de l'évolution chimique des massifs d'appui en béton des scellements</li> <li>effectuant une évaluation préliminaire du couplage entre dégradation chimique et comportement mécanique des bétons « bas pH »</li> </ul>	Travaux expérimentaux (incluant expériences dans le Laboratoire souterrain), modélisation et simulations numériques	Consolidation des mécanismes pour le dossier de conception des scellements (démonstrateurs à échelle 1 prévus dès le démarrage de Cigéo)
Interactions chimiques entre les déchets salins ou organiques (incluant produits de dégradation organiques) et le milieu géologique	Cigéo (et FA-VL)	En support à la DAC de Cigéo (évaluation des possibilités de co-stockage de déchets MA-VL, évaluation de la sûreté après-fermeture) et du dossier de synthèse FA-VL : affiner l'analyse de sûreté après fermeture et la conception de la zone MA-VL de Cigéo (co-stockage) en évaluant et en consolidant les schémas réactionnels en donnée d'entrée des simulations de l'évolution chimique des alvéoles MA-VL (et FA-VL).	Travaux expérimentaux	Consolidation de la base de connaissance en support aux dossiers d'autorisation de mise en stockage des déchets afférents
Comportement des Radionucléides et des toxiques chimiques dans des environnements salins et/ou en présence d'organiques	Cigéo (et FA-VL)	En support à la DAC de Cigéo (évaluation des possibilités de co-stockage de déchets MA-VL, évaluation de la sûreté après-fermeture) et du dossier de synthèse FA-VL : affiner l'analyse de sûreté après fermeture et la conception de la zone MA-VL de Cigéo (co-stockage) en complétant la base de données ThermoChimie : complexes organiques, milieux salins, béton « bas pH »... en donnée d'entrée des simulations de l'évolution chimique des alvéoles MA-VL (et FA-VL)	Travaux expérimentaux (expérimentations intégrées)	Consolidation de la base de connaissance en support aux dossiers d'autorisation de stockage des déchets
Transfert de gaz dans les argilites saturées	Cigéo	En support aux évaluations de sûreté après fermeture de la DAC de Cigéo, consolider l'applicabilité du modèle diphasique aux argilites (argilites et bentonite) initialement saturées utilisé pour représenter le transitoire non saturé du stockage	Travaux expérimentaux (incluant expériences dans le Laboratoire souterrain), modélisation et simulations numériques	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

# TABLEAU 9

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »

Axe « Améliorer la conceptualisation et la simulation du fonctionnement phénoménologique des stockages et de leurs environnements naturels sur le long terme » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D – MODALITÉS DE RÉALISATION	
Relâchement et transfert des gaz	Cigéo, CSA, Cires, FA-VL	<p>En support aux évaluations de sûreté d'exploitation/post-fermeture dans le cadre de la DAC de Cigéo, des RDS du CSA et du CSM et du dossier de synthèse FA-VL, ainsi qu'à la gestion de l'évolution progressive de la conception de Cigéo :</p> <p>Préciser et affiner l'évolution phénoménologique des stockages :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cigéo : en actualisant les évaluations en grand de la migration multi-composants gaz sur la solution d'ensemble retenue (organisation des flux et des pressions eau/gaz dans le stockage)</li> <li>• Cigéo/FA-VL : en évaluant la migration diphasique du <math>^{14}\text{C}</math> (formes organique et inorganique)</li> <li>• CSA : en étudiant la migration <math>^{14}\text{C}/^3\text{H}</math> dans les ouvrages pendant la phase d'exploitation</li> </ul>	Travaux expérimentaux, modélisation et simulations numériques haute performance, notamment pour les évaluations à grande échelle	<p>Consolidation des évaluations sur la base (i) de nouveaux éléments de conception et d'exploitation (ii) d'un meilleur couplage entre les processus multi-physiques (iii) des outils de simulations enrichis de nouvelles fonctionnalités physiques et numériques</p>
Comportement THM du milieu géologique à grande échelle	Cigéo	<p>En support aux évaluations de sûreté après fermeture de la DAC de Cigéo : préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en évaluant la réponse thermo-hydrromécanique des argilites (déformation/contraintes/surpression) à la charge thermique du stockage</p>	Modélisation et simulations numériques (avec intégration de la représentation milieu fracturé de la zone endommagée)	
Comportement THMC des scelllements	Cigéo	<p>En support aux évaluations de sûreté après fermeture de la DAC de Cigéo : préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en évaluant le comportement chimo-hydrromécanique des scelllements (alvéole MA-VL, galerie) intégrant le transitoire de resaturation, le fluage, le chargement des massifs d'appui, et les effets de dégradation chimique aux interfaces (béton « bas pH »)</p>		
le comportement THMC des ouvrages (hors scelllements)	Cigéo	<p>Préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en consolidant et en améliorant la représentation de l'état initial et de l'évolution hydrromécanique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• de la zone endommagée initiale (intégration de lois de comportement améliorées avec anisotropie des argilites...)</li> <li>• de l'alvéole MA-VL (impact des vides, conditions de rupture du revêtement/soutènement, mise en charge des colis, évolution long terme)</li> <li>• de l'alvéole HA (devenir des jeux, charge thermomécanique, conditions de mise en charge mécanique des verres)</li> <li>• des ouvrages de liaison (effet et comportement du remblai, intersections des ouvrages, conditions de rupture du revêtement/soutènement)</li> </ul>		





THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Évolution chimique des alvéoles de stockages et de leur environnement naturel	CSA	En support aux évaluations de sûreté du prochain RDS CSA, préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en évaluant l'évolution mécanique des ouvrages bétonnés avec prise en compte des retrait et des fissures et en analysant qualitativement les effets sur les paramètres hydro-dispersifs	Modélisation et simulations numériques	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
	Cigéo	En support aux évaluations de sûreté après fermeture et à la conception de Cigéo pour la DAC, préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage par : <ul style="list-style-type: none"> <li>• la consolidation et l'amélioration de la représentation de l'évolution chimique de (i) l'alvéole HA (intégration des sauts de connaissance sur la dissolution des verres couplée à la corrosion des aciers, couplage avec H-Gaz, ...), (ii) l'alvéole MA-VL de déchets de structure, bitumés, salins, organiques, vitrifiés</li> <li>• l'évaluation des perturbations chimiques : nature et caractérisation des extensions espace/temps et modifications du transfert/rétention</li> </ul>	Travaux expérimentaux Modélisation et simulations numériques en transport réactif	Pour les tranches de la zone HA/MA-VL, au-delà de la tranche 1 Consolidation des évaluations sur la base de nouveaux éléments de conception et d'exploitation, d'un meilleur couplage entre les processus multi physiques et des outils de simulations enrichis de nouvelles fonctionnalités physiques et numériques
	FA-VL	Pour le dossier de synthèse FA-VL, en support à la sûreté post-fermeture et à la conception, préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en consolidant et en améliorant la représentation de l'évolution chimique du transitoire oxydant et du transfert de sels : impact du panache salin sur l'environnement et transfert des solutés (prise en compte du redox...)	Travaux expérimentaux, modélisation et simulations numériques en transport réactif	
	CSA	Pour le prochain RDS du CSA, préciser et affiner l'évolution phénoménologique du stockage en étudiant le transfert des radionucléides (colis Stella...) couplé à l'évolution chimique d'un ouvrage et au relâchement des complexants	Modélisation et simulations numériques en transport réactif	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

# TABLEAU 10

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir les exigences et les Spécifications Techniques de Besoins »

Axe « Traiter au travers d'approches complémentaires (Sciences Humaines et Sociales, mathématiques) la problématique des longues échelles de temps » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Constitution de l'expertise en matière de sûreté du stockage des déchets radioactifs	Cigéo	Déceler les spécificités et les enjeux de la démarche de sûreté de Cigéo, en se focalisant sur les outils mobilisés et la qualification des incertitudes pour contribuer en continu à la DAC de Cigéo et à la définition du schéma de développement et de fermeture de Cigéo	Cartographie dynamique des différentes communautés professionnelles concernées, avec une perspective comparative	
Communautés d'experts en modélisation-simulation et scénarisation dans le domaine nucléaire	Cigéo	Saisir les logiques de structuration et d'organisation des activités modélisation-simulation et scénarisation en France et analyser le positionnement et les apports des démarches de l'Andra, pour contribuer en continu à la DAC de Cigéo	Mise en perspective comparative des différentes politiques nationales et internationales à ce sujet	
Activités de démonstration menées par l'Andra au regard de la sûreté à long terme	Cigéo	Pour contribuer en continu à la DAC de Cigéo et à la loi « réversibilité » : <ul style="list-style-type: none"> <li>Disposer d'un retour sur les pratiques et enrichir la démonstration de sûreté</li> <li>Mieux saisir le mode de confrontation au réel et les modalités de validation et de plausibilité des activités de modélisation-simulation et leurs rapports au stockage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mise en perspective historique et culturelle des activités de démonstration mobilisées par l'Agence</li> <li>Thèse Andra 2012-2015</li> </ul>	Renforcer la robustesse de l'approche de l'Andra en matière de sûreté à long terme (réflexivité, intégration des aspects sociétaux, parties concernées)
Démonstration de sûreté de Cigéo sous l'angle de la théorie de la décision	Cigéo	Pour contribuer en continu à la DAC de Cigéo et à la définition du schéma de développement et de fermeture de Cigéo, s'assurer de la possibilité d'articuler sûreté et évaluation socio-économique (réversibilité, taux d'escompte).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Description systématique de la qualification des incertitudes dans la démarche de sûreté</li> <li>Mise en relation avec des modèles décisionnels capables d'intégrer les risques et l'incertitude</li> </ul>	
Appréhension du temps long dans l'évaluation socio-économique du mégaprojet Cigéo	Cigéo	Pour contribuer en continu à la DAC de Cigéo et à la définition du schéma de développement et de fermeture de Cigéo : <ul style="list-style-type: none"> <li>Intégrer la valorisation de l'apprentissage dans l'évaluation de Cigéo</li> <li>Appréhender les conceptions de l'avenir inscrites dans les dispositifs de calcul et d'évaluation socio-économique, et les formes de raisonnement associées, à l'égard de Cigéo</li> <li>Appréhender la problématique de l'actualisation des coûts sur une période séculaire</li> </ul>	Interrogation d'experts et analyse sociolinguistique, avec prise en compte du contexte, évolution de la filière, et de l'économie	Contribution à l'évaluation socio-économique « en continu » du projet Cigéo

# TABLEAU 11

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages »

Axe « Accroître la prédictibilité du fonctionnement à court et moyen termes des stockages et de leur environnement naturel au travers de la simulation numérique » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Impact de la construction et de l'exploitation des stockages sur l'hydraulique des formations géologiques	Cigéo	<p>En vue de la DAC de Cigéo, disposer d'une évaluation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>de la décharge hydraulique dans les horizons poreux de l'Oxfordien (extension, intensité) et débits d'eau drainés par les ouvrages</li> <li>de la probabilité d'interception des structures karstiques par les ouvrages de liaison surface/fond</li> <li>du temps de retour hydraulique à l'équilibre après fermeture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Définition d'un modèle de représentation du réseau karstique du Barrois (double milieu), intégration des modèles dans les outils, et mise en œuvre des simulations</li> <li>Mise en place du dispositif de suivi des perturbations hydrauliques des liaisons surface-fond (LSF) dans l'Oxfordien</li> <li>Instruction des pistes d'optimisation (creusement/position/étanchéité)</li> </ul>	<p>Consolidation du modèle de représentation des impacts hydrauliques sur la base :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>d'une caractérisation détaillée du Barrois</li> <li>d'un meilleur couplage entre les nappes fibres et nappes profondes</li> <li>du REX de creusement/ exploitation des ouvrages de liaison surface/fond (ajustement calculs/mesures)</li> </ul>
	CSA	<p>Pour les calculs de sûreté du prochain RDS CSA, améliorer la représentativité du modèle hydrogéologique de l'Aptien en considérant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>les évolutions anthropiques</li> <li>la recharge de la nappe</li> <li>une meilleure caractérisation géologique</li> </ul>	<p>2013-2014 : actualisation des NPHE<sup>1</sup> et meilleure représentation (simulation numérique) des écoulements et du transfert de solutés dans les nappes de l'Aptien vers les exutoires</p>	<p>À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016</p>
	Cigéo	<p>Pour la DAC de Cigéo, quantifier les conditions d'environnement thermique et hydrique dans les ouvrages, incluant le risque Atex (atmosphère explosive)</p>	<p>Modélisation et simulation numérique du comportement diphasique multi-composants gaz en phase d'exploitation, avec une description fine de la géométrie et des conditions d'exploitation</p>	<p>Consolidation des évaluations sur la base de nouveaux éléments de conception et d'exploitation, et d'un meilleur couplage entre les transferts d'eau/chaleur entre milieu ouvert et milieu fermé</p>
	CSA	<p>Pour le prochain RDS du CSA : améliorer l'évaluation en non saturé du transfert de tritium et de fluides dans l'ouvrage en tenant compte des variations d'hygrométrie saisonnière et des précipitations (passage de la pluie brute à la pluie efficace et à la recharge de la nappe)</p>	<p>2014-2015 : contribution aux spécifications de dégazage (tritium...) en considérant une meilleure représentation de l'ouvrage du CSA (intégration détaillée de l'ensemble des composants ouvrages, et d'un meilleur couplage entre la nappe et l'ouvrage</p>	<p>À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016</p>

<sup>1</sup> - Niveau des Plus Hautes Eaux.

# TABLEAU 11 suite



THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Transferts multiphasiques et les rejets gazeux dans et autour des stockages	Cigéo	Pour la DAC de Cigéo, disposer d'une quantification détaillée (composants, couplage) du risque Atex (concentration espace / temps des gaz) en phase d'exploitation, au sein des différents ouvrages de stockage (ventilés, non ventilés)	<i>Idem</i> ci-avant (comportement aéraluque)	Consolidation des évaluations sur la base (i) de nouveaux éléments de conception et d'exploitation (ii), d'un meilleur couplage entre les transferts de masse et de chaleur entre milieu ouvert et milieu fermé, (iii) de termes de productions / consommations d'espèces
	Cigéo	Pour la DAC de Cigéo, fixer un cadre phénoménologique des rejets atmosphériques du stockage en termes de direction, concentration, extension de panaches en situation normale (vapeur d'eau, hydrogène, RN volatils), et en situation incidente type incendie (fumée) (Intégration des données de l'OPE)	Modélisation et simulations numériques détaillées (intégrant la nature et le positionnement des infrastructures et l'environnement extérieur - eau, sol, air) sur des outils de type mécanique des fluides, de la propagation de différents types de polluants (+ interactions de ces polluants avec leur environnement)	Contribution aux demandes d'autorisation de rejet et prise en compte réaliste du site et des effets anthropiques
	CSA, FA-VL, Cires	Pour le prochain RDS CSA et le dossier de synthèse FA-VL, en support aux évaluations de sûreté en exploitation et post-fermeture : déterminer de façon détaillée les rejets en <sup>3</sup> H et/ou de <sup>14</sup> C dans l'atmosphère et dans la nappe des sites, en considérant un ouvrage non saturé Pour le prochain dossier ICPE du Cires : affiner l'évaluation des rejets gazeux		À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016
Comportement thermo-hydro-chemio-mécanique des ouvrages	Cigéo	Pour la DAC de Cigéo, améliorer la représentation détaillée de : <ul style="list-style-type: none"> <li>la dégradation chimique (dégradation du béton et corrosion) et le comportement mécanique d'un béton armé</li> <li>l'évolution hydraulique, mécanique et chimique couplée des alvéoles HA pendant la période d'exploitation (transitoire oxydant...)</li> </ul>	Définition/amélioration des modèles de couplage (i) entre la dégradation chimique et le comportement mécanique de l'ouvrage (ii) l'évolution chimique et le transitoire hydraulique-gaz ; intégration dans les outils, couplage d'outils et mise en œuvre simulations numériques	Consolidation des évaluations sur la base de nouveaux éléments de conception et d'exploitation et d'un meilleur couplage entre les différents phénomènes

# TABLEAU 12

## Principaux objectifs et principales actions de R&D concernant la thématique opérationnelle « Accompagner les opérations de construction et d'exploitation des stockages »

Axe « Préparer et accompagner le plan de surveillance environnementale du stockage, et définir les marqueurs pertinents vis-à-vis des différents risques » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Contexte et variabilité hydro-climatique du site	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo, disposer de chroniques de longue durée pour évaluer variabilité et extrema : étude de dimensionnement du réseau pluvial, des bâtiments, des conditions de dilution des rejets liquides et gazeux. Extension possible à FA-VL	Mesures <i>in situ</i> (OPE), interprétation, analyses	Mesure et veille sur les évolutions anticipées (GIEC, Météo-France...) Contribution aux rapports de sûreté
Valeurs de la biodiversité	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo, appréhender la sensibilité écologique du projet en : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparant et cartographiant les localisations possibles des installations et celles des espèces protégées ou remarquables</li> <li>• en anticipant le cas échéant les mesures compensatoires les plus pertinentes vis-à-vis de la protection des habitats et espèces</li> </ul> Extension possible à FA-VL	Prospection sur la zone d'implantation des installations de surface	Démonstration de l'absence d'impact du projet à court et long terme sur la biodiversité et la pertinence des mesures compensatoires
Évolution des sols artificiels (verses et couverture des centres)	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo, connaître et limiter les impacts liés à l'aménagement de sites à l'aide d'une caractérisation chimique et radiologique, d'une évaluation du potentiel de lixiviation et d'études de végétalisation Extension possible aux autres sites.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesures (i) <i>in situ</i> sur les verses du Laboratoire Souterrain (ii)</li> <li>• en lysimètres</li> <li>• Essai de végétalisation</li> </ul>	Modèles et mécanismes/processus d'évolution pédogénétique à long terme et extrapolation aux sols de couverture des centres de surface (maintien des performances d'imperméabilité)
Bruit de fond chimique et radiologique très bas niveau - chimio-diversité	Tous projets et centres	En vue notamment de la DAC de Cigéo et du dossier de synthèse FA-VL, disposer d'un état initial et pour ce faire : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mettre en place un maillage fin et complet sur les milieux observés et de plus bas niveau possible, si besoin par des développements analytiques pour mesures <sup>210</sup>Pb « naturels » bas niveau (AMS)</li> <li>• Conserver cet état initial à travers des échantillons (Écothèque)</li> <li>• Hiérarchiser les substances à surveiller selon les enjeux (Apprios) pour le milieu aquatique</li> </ul>	Mesures sur échantillons en laboratoire jour	Veille sur les substances émergentes et développements métrologiques bas niveau pour compléter le cas échéant l'état initial. Suivi de l'évolution du bruit de fond et poursuite de la hiérarchisation des substances à surveiller pour les autres milieux en vue de l'optimisation du futur plan de surveillance

# TABLEAU 12 suite



THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Indicateurs de qualité et de pollution (santé des écosystèmes)	Tous projets et centres	<p>En vue notamment de la DAC de Cigéo et du dossier de synthèse FA-VL, disposer d'indicateurs de qualité et de pollution pertinents en sélectionnant les indicateurs par milieu et par substance (sol, eau, air, biodiversité, Homme), en définissant des protocoles, des localisations et des fréquences pertinentes pour le suivi des rejets prévus (poussières, gaz, eaux...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mise en place de nouveaux capteurs <i>in situ</i> et de prélèvements</li> <li>Analyses en laboratoire jour</li> </ul>	<p>Suivi et interprétation, comme contribution à la surveillance de l'environnement au fur et à mesure du développement des centres de stockage (notamment Cigéo)</p>
Transferts dans la biosphère et bio-géochimie, liens environnement-santé	Tous projets et centres	<p>En vue notamment de la DAC de Cigéo et du dossier de synthèse FA-VL, appréhender les impacts à long terme dans la biosphère en :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Disposant de modèles de flux entre compartiments (air, eau, sol, végétaux...)</li> <li>Réalisant les bilans de distribution au sein des écosystèmes des éléments d'intérêt (<sup>36</sup>Cl, Bore, Se...) et en contribuant aux modèles d'évaluation d'impact (habitudes de vie et consommations alimentaires)</li> <li>Modélisant les rejets atmosphériques, hydrologique...</li> <li>Modélisant les liens environnement/santé et en définissant des indicateurs d'exposition environnementale</li> </ul>	<p>Essais et mesures en laboratoire jour</p>	<p>Validation des modèles d'évaluation des cycles biogéochimiques sur les éléments d'intérêt et interprétation par rapport aux éléments majeurs (C, Ca...) comme contribution à la surveillance de l'environnement au fur et à mesure du développement des centres de stockage (notamment Cigéo)</p>
Mémoire et évolution à très long terme de l'environnement	Tous projets et centres	<p>Conserver la mémoire des évolutions à très long terme de l'environnement :</p> <p>Définir des indicateurs d'activité sur le long terme post-fermeture (télé-détection) et rechercher et étudier des analogues naturels pour les biosphères futures.</p> <p>Déterminer la dynamique du territoire et les évolutions climatiques à long terme</p>	<p>Mise en œuvre de l'Écothèque au CMHM</p>	

# TABLEAU 13

## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir et exploiter les techniques et les réseaux d'auscultation et d'information »

Axe « Développer des méthodes innovantes de contrôle des colis » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Techniques de contrôle des colis	HA/MA-VL (et potentiellement les colis des autres filières)	<p>En vue de la DAC de Cigéo, démontrer la faisabilité de techniques, de préférence non-destructives, permettant de contrôler les caractéristiques des colis suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégrité de l'enveloppe et dimensions</li> <li>• Constitution interne</li> <li>• Contenu radiologique</li> <li>• Corrosion interne</li> <li>• Puissance thermique</li> <li>• Débit et composition du dégazage</li> <li>• Composition chimique du colis (nécessite la prise d'échantillons)</li> </ul> <p>Le cas échéant, (pré)dimensionnement des cellules de contrôle</p>	Travaux expérimentaux	Industrialisation des technologies, en vue des dossiers de qualification des procédés (2016-2022), puis construction et mise à disposition des différentes cellules de contrôles pour la mise en service de Cigéo.
Techniques analytiques pour la quantification des radionucléides difficilement mesurables	FMA-VC	Disposer de méthodologies de mesures en routine des Radionucléides suivants : <sup>36</sup> Cl, <sup>129</sup> I, <sup>10</sup> Be et <sup>41</sup> Ca afin de les inscrire au catalogue des contrôles Andra sur les colis de déchets FMA-VC	Essais en laboratoire jour	Développement de techniques analytiques pour la quantification d'autres radionucléides difficilement mesurables à définir (par exemple <sup>79</sup> Se, <sup>93</sup> Mo...)
Coefficient de diffusion des matériaux cimentaires	FMA-VC	En vue du prochain RDS du CSA, disposer d'une nouvelle éprouve technique permettant d'évaluer en quelques jours le coefficient de diffusion des matériaux cimentaires (mesure sous champ électrique)	Essais en laboratoire jour	À définir en fonction des résultats des travaux 2013-2016

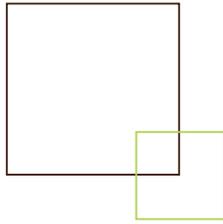
# TABLEAU 14

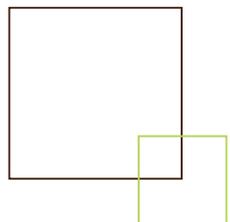
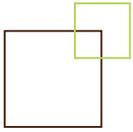
## Objectifs prioritaires et actions de R&D associées concernant la thématique opérationnelle « Définir et exploiter les techniques et les réseaux d'auscultation et d'information »

Axe « Disposer des moyens de mesure et d'auscultation des stockages, et innover dans le domaine des capteurs » envisagés sur la période 2013-2016 et au-delà de 2016

THÈME	PROJETS/DÉCHETS	PROGRAMME DE R&D 2013-2016		OBJECTIFS ET ACTIONS DE R&D AU-DELÀ DE 2016
		OBJECTIFS/ENJEUX	PRINCIPALES ACTIONS DE R&D - MODALITÉS DE RÉALISATION	
Instrumentation et suivi des colis de stockage	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo, justifier les lois de comportement du colis en phase d'exploitation et à long terme	Définition et mise à l'épreuve de l'instrumentation pour un suivi <i>in situ</i> de colis témoins	<p>Suivi à long terme des colis de stockages instrumentés et consolidation de l'instrumentation, notamment pour le démarrage de Cigéo</p>
Moyens à demeure pour le suivi THMC <sup>1</sup> des ouvrages	Cigéo, FA-VL, FMA-VC IA <sup>2</sup> (démantèlement)	<p>En vue notamment de la DAC de Cigéo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Démontrer la faisabilité de la mise en place de moyens de mesure à demeure pour suivre l'évolution THMC des ouvrages du stockage : compte-tenu des contraintes imposées par le stockage sur l'instrumentation (échelle de temps pluri-décennale de fonctionnement, inaccessibilité des dispositifs d'auscultation et absence possible de maintenance, conditions d'environnement localement agressives).</li> <li>Développer l'instrumentation et les moyens de mesures <i>in-situ</i> pour les paramètres suivants : température, teneur en eau des matériaux, déformation et désordres (fissures), gaz radioactifs et explosifs, évolution chimique des matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inventaire de solutions techniques pour les phases APS et APD de Cigéo</li> <li>Établissement d'une base de données de capteurs pour le dossier de la DAC Cigéo</li> <li>Collaboration avec EDF</li> <li>Développement de solutions non-intrusives implique la mise en œuvre d'« accès » spécifique aux alvéoles (hublots, fibre relais...)</li> <li>Adaptation des moyens de mesures sur des systèmes embarqués et mobiles pour des inspections ciblées d'ouvrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industrialisation des technologies en vue des dossiers de qualifications</li> <li>Mise en place de nouvelles normes pour l'instrumentation nucléaire</li> <li>Qualification des technologies et systèmes de mesures pour la mise en œuvre sur la première tranche</li> <li>Exploitation du retour d'expérience pour les tranches suivantes et les évaluations périodiques de sûreté</li> </ul>
Moyens non intrusifs, non destructifs et mobiles pour le suivi de l'ensemble des alvéoles	Cigéo, FA-VL, FMA-VC IA <sup>2</sup> (démantèlement)	En vue notamment de la DAC de Cigéo, optimiser les moyens de mesure en développant des moyens non intrusifs et mobiles pour le suivi des paramètres suivants : visuels, température, déformation, gaz explosifs		<p>Mise à disposition de solutions dès l'installation des premiers colis dès le démarrage de Cigéo</p>
Réseaux et énergie	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo, optimiser les réseaux d'auscultation du stockage : <ul style="list-style-type: none"> <li>En développant des câbles durcis et en démontrant qu'il est possible de limiter le foisonnement des câbles dédiés aux capteurs</li> <li>En développant un protocole de transmission pour traverser les matériaux géologiques sur 150 m</li> <li>En développant des « batteries » et des systèmes de production d'énergie longue durée pour alimenter des capteurs et transmetteurs sans fil</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Extension de la portée des transmissions à 500 m</li> <li>Industrialisation des chaînes de mesures sans-fil</li> </ul>
Démonstrateurs et traitement des données	Cigéo	En vue de la DAC de Cigéo : <ul style="list-style-type: none"> <li>Qualifier les technologies et les sections d'auscultation prévues pour les ouvrages</li> <li>Consolider et tester les systèmes d'acquisition, de fusion de d'interprétation des données ainsi que la corrélation mesures/modélisation</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Capitalisation d'un retour d'expérience d'ordre décennal avant le démarrage de Cigéo</li> <li>Confirmation des premiers stades d'évolutions des processus contribuant aux fonctions de sûreté</li> </ul>

1 - Thermique, Hydrique, Mécanique et Chimique.  
2 - Investissements d'avenir.







AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION  
DES DÉCHETS RADIOACTIFS

1-7, rue Jean-Monnet  
92298 Châtenay-Malabry cedex  
Tél. : 01 46 11 80 00

[www.andra.fr](http://www.andra.fr)