



La vision stratégique de la R&D scientifique et technologique de demain à l'Andra

LES GRANDES ORIENTATIONS THÉMATIQUES

IMPLANTATION DES CENTRES DE STOCKAGE EXISTANTS ET DES INSTALLATIONS DE L'ANDRA



LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE À L'ANDRA

La science et la technologie sont au cœur de la mission de l'Andra, au regard de la particularité des déchets radioactifs (temps longs tant pour le développement des filières de gestion que pour leur sûreté à long terme, dangerosité). Les bases scientifiques et technologiques se doivent d'être rigoureuses et solides, construites suivant un processus structuré et transparent.

Ces bases de connaissances scientifiques et technologiques sont acquises notamment par la R&D, déployée tout au long de la vie des stockages (recherche de site d'implantation, études de faisabilité, conception, construction, exploitation, surveillance, fermeture) de manière proportionnée et adaptée à chaque phase de vie et à chaque type de déchets. Le caractère incrémental et progressif du déploiement des stockages sur plusieurs dizaines d'années, voire le siècle pour le projet Cigéo, permet en outre leur optimisation et l'intégration des progrès continus de connaissances.

Si cette R&D couvre majoritairement les sciences dites dures, les sciences humaines et sociales (SHS) sont également investies, au regard de l'objet même de la gestion des déchets radioactifs sujet tout aussi technique qu'éthique, sociétal et politique.

L'Andra est un maître d'ouvrage scientifique et technique. Sa R&D mobilise des organismes de recherche, en particulier académiques, reconnus dans leur domaine tant en France qu'à l'étranger, au travers de différents vecteurs (groupements de recherche, partenariats de recherche, projets nationaux, projets européens, collaborations internationales, etc.). Les résultats obtenus, fruits de leur excellence et de leur capacité d'innovation, sont le gage d'une gestion responsable de l'Andra, établissement public ayant une mission d'intérêt général.

Ces études scientifiques et technologiques, dont les bases et les outils ont été acquis par les travaux de R&D, sont régulièrement mises en œuvre pour répondre aux besoins des activités de l'Andra, en particulier pour le projet Cigéo et le projet FA-VL.

LES GRANDS JALONS FUTURS **DES STOCKAGES EXISTANTS ET EN PROJET**

Aujourd'hui, les deux centres de stockage de l'Andra dans l'Aube permettent de gérer à long terme la majeure partie du volume des déchets radioactifs (déchets FMA-VC et TFA) produits chaque année. Cependant, les déchets restants (déchets HA, MA-VL et FA-VL), de par leur haute activité et/ou leur durée de vie longue (jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de milliers d'années), ne peuvent être stockés dans ces centres construits en surface. Ils nécessitent la mise en œuvre de solutions pérennes spécifiques et proportionnées aux risques que présentent ces types de déchets.

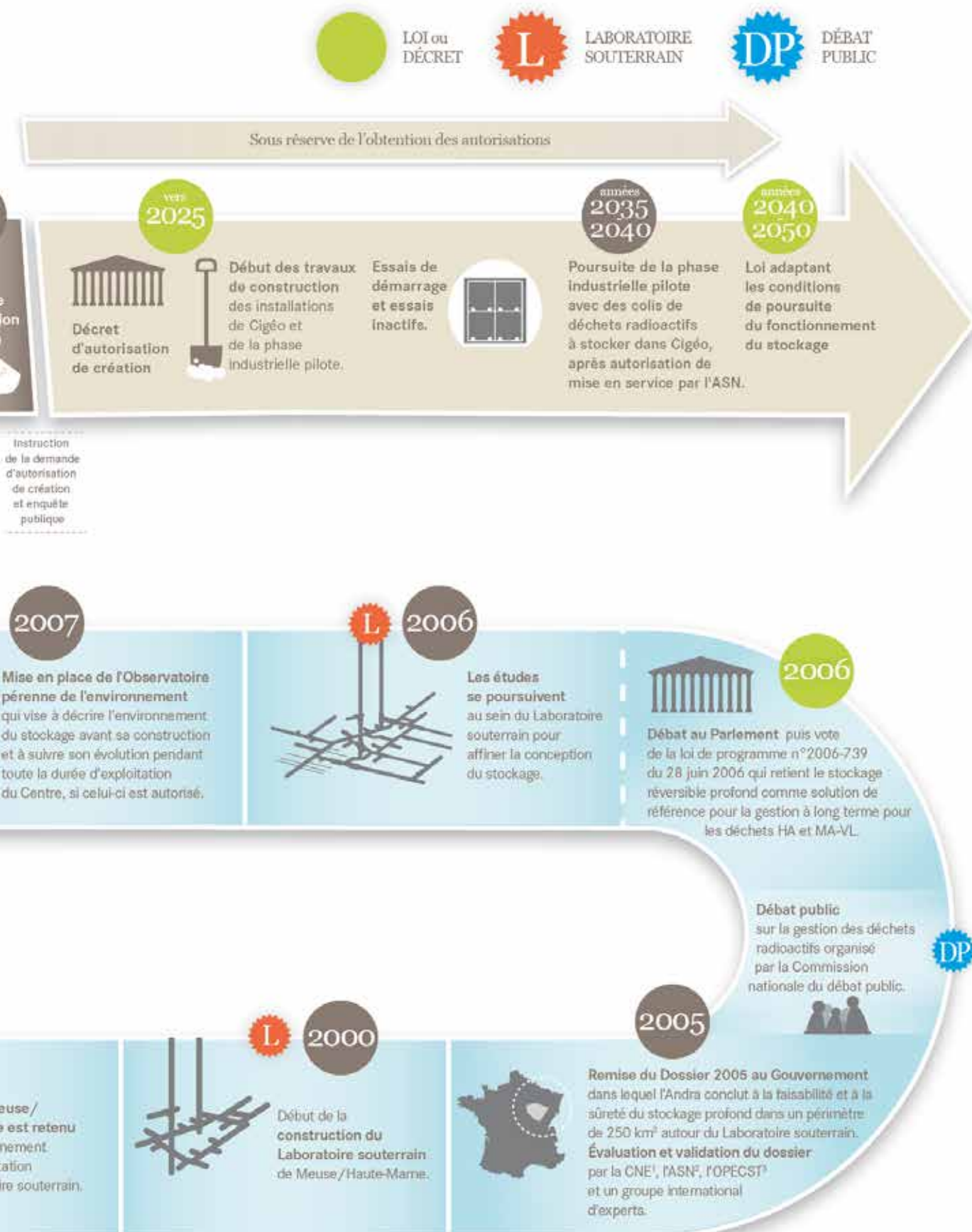
Au terme de quinze années de recherche organisée dans le cadre de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, le dossier 2005 remis par l'Andra a montré la faisabilité du stockage en formation géologique profonde de déchets HA et MA-VL dans l'est du bassin de Paris, au sein de la formation d'argilites du Callovo-Oxfordien. Cette étude de faisabilité s'est principalement attachée à évaluer les conditions dans lesquelles un stockage pourrait être construit, exploité et géré de manière réversible, dans un objectif de protection des personnes et de l'environnement. Après l'étude des différentes options de gestion à long terme (études sur la séparation-transmutation et l'entreposage de longue durée, pilotées par le CEA, étude sur le stockage géologique, pilotée par l'Andra), leur évaluation et un premier débat public, le Parlement a fait en 2006 le choix du stockage profond comme solution de référence pour les déchets HA et MA-VL et a demandé à l'Andra de concevoir une installation réversible, le centre industriel de stockage géologique Cigéo. La loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 a précisé les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde pour ces déchets radioactifs, défini le concept de réversibilité, fixé les modalités d'élaboration et de mise à jour du plan directeur pour l'exploitation du centre de stockage Cigéo et validé le principe de la phase industrielle pilote proposée par l'Andra à l'issue du débat public de 2013 sur le projet Cigéo. Si sa création est autorisée par décret après instruction par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et consultation des collectivités et du Parlement, le centre de stockage Cigéo sera implanté dans l'est de la France, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, où l'Andra mène des recherches scientifiques et techniques depuis plus de 20 ans, notamment dans son Laboratoire souterrain.

En 2016, l'Andra a transmis à l'ASN le dossier d'options de sûreté (DOS) du projet Cigéo. Le dépôt du DOS marque l'entrée du projet dans un processus encadré par la réglementation relative aux installations nucléaires de base (INB), notamment par l'article 6 du décret n° 2007.1557 du 2 novembre 2007. Instruit par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), appui technique de l'ASN, ce dossier a fait l'objet en 2017 d'une évaluation par les groupes permanents d'experts pour les déchets et pour les laboratoires et usines, et, à la demande de l'ASN, d'une revue internationale par des experts d'autorités de sûreté étrangères, coordonnée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Suite à l’instruction des différents dossiers et à ces expertises externes, l’ASN a estimé, dans un avis rendu public en janvier 2018, que le projet avait atteint globalement une maturité technique satisfaisante au stade du dossier d’options de sûreté, en jugeant ce dernier documenté et étayé. Elle a également exprimé plusieurs demandes, dont la prise en compte est attendue dans le dossier de Demande d’autorisation de création (DAC) (gestion des déchets radioactifs bitumineux, justification de l’architecture du stockage, dimensionnement de l’installation face aux agressions, surveillance de l’installation et gestion des situations post-accidentelles).

L'Andra prévoit maintenant de finaliser la Demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo, puis de déposer le dossier courant 2022. Après l'instruction de la DAC et l'obtention du décret, le développement industriel du projet Cigéo devrait débiter par une phase industrielle pilote, comprenant notamment un quartier pilote de déchets HA (déchets HA les moins exothermiques) et quatre alvéoles de déchets MA-VL. La réalisation des premiers ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo se ferait à partir de 2028, avec la phase industrielle pilote dont la durée de 15 à 25 ans, proposée par l'Andra, fait l'objet d'une concertation. La prise en charge des déchets MA-VL, avec un stockage de premiers colis de déchets au milieu des années 2030, s'inscrirait sur une échelle de temps de 50 ans, et celle des déchets HA débiterait à l'horizon 2080 (et bien au-delà pour les combustibles usés si la décision de politique nationale était prise de les considérer comme des déchets et de les stocker).





¹ Commission nationale d'évaluation

² Autorité de sûreté nucléaire

³ Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

POURQUOI UNE VISION STRATÉGIQUE DE LA R&D SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE DEMAIN À L'ANDRA ?

La mission d'intérêt général de gestion à long terme des déchets radioactifs portée par l'Andra présente des dimensions multiples (sociale, éthique, scientifique, technique, etc.), liées aux spécificités de ces déchets, et notamment aux échelles de temps particulièrement longues tant pour le développement que pour la sûreté à long terme des filières de gestion.

Dans ce cadre, l'Andra se doit d'asseoir cette mission sur des bases scientifiques et technologiques rigoureuses et robustes, suivant un processus d'études et de R&D structuré, transparent et s'appuyant sur l'excellence de la communauté scientifique et technologique nationale et internationale.

UN SOLIDE SOCLE DE CONNAISSANCES MULTIPLES ACQUIS PAR UN EFFORT CONTINU DE R&D DEPUIS 30 ANS

Depuis plus de 30 ans, les travaux de R&D ont été principalement portés par le projet de stockage des déchets radioactifs HA et MA-VL dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (projet Cigéo), mais concernent aussi les centres de surface (CSM, actuellement en phase de fermeture, CSA pour les déchets radioactifs FMA-VC et Cires pour les déchets radioactifs TFA) et les autres projets de filières (déchets radioactifs FA-VL). L'Andra a ainsi acquis une base de connaissances scientifiques et technologiques, solide et importante, régulièrement utilisée et enrichie au fur et à mesure de l'avancement des projets de stockage et de l'exploitation des stockages existants (recherche de site, études de faisabilité, avant-projet sommaire et avant-projet détaillé, dossier d'options de sûreté, Demande d'autorisation de création, réexamen de sûreté, etc.).

Cette base de connaissance, développée dans une approche systémique globale d'un centre de stockage, couvre l'ensemble des composants (radionucléides et toxiques chimiques, déchets, ouvrages, milieu géologique — environnement de surface/biosphère). Elle porte sur leurs propriétés physico-chimiques intrinsèques [(géo)mécaniques, hydraulique-gaz, (géo)chimiques, (géo)thermiques, etc.] et sur les mécanismes de base de leur comportement en situations de stockage, jusqu'à la description de l'évolution phénoménologique des composants et des systèmes de stockage dans le temps, en particulier sur le long terme en après-fermeture. Enfin, cette base inclut les méthodes et outils de caractérisation des composants, de monitoring et de traitement des données pour l'observation et la surveillance des systèmes de stockage, et de simulation numérique pour la conception et les évaluations de performance et de sûreté des systèmes de stockage en exploitation et en après-fermeture.

Ce socle de connaissances multiples, acquis par un effort continu de R&D depuis 30 ans, a notamment été capitalisé pour nourrir les différents grands dossiers déposés par l'Agence :

Dossier 2005, DOS pour le projet Cigéo ou encore réexamens de sûreté des centres de surface [cf. illustration ci-contre « Les grands jalons futurs des stockages existants et en projet »]. Soumis aux évaluations externes (ASN, Commission nationale d'évaluation (CNE), etc.), ils attestent d'un niveau de connaissances, d'identification et de maîtrise des incertitudes résiduelles suffisant pour mettre en œuvre des solutions de gestion fiables, sûres et bien adaptées.

La poursuite de la R&D après chaque grand dossier, comme après le dépôt de la Demande d'autorisation de création du projet Cigéo en 2022, s'inscrit dans des logiques propres à chaque phase de développement (conception, réalisation, exploitation, fermeture et surveillance) : support à l'instruction des dossiers, optimisations technico-économiques, accroissement des marges de sûreté, prospective et préparation des progrès de demain. Pour le projet Cigéo en 2022 s'ajoute spécifiquement l'adaptabilité du centre de stockage à des évolutions d'inventaires pouvant résulter d'inflexions de politique énergétique ou tout du moins de politique de gestion des matières et déchets radioactifs.



Photographies de quelques publications scientifiques et techniques de l'Andra (Dossier 2005, DOS, thèse, bilans des programmes de R&D, ouvrages, etc.).

UNE PÉRIODE CHARNIÈRE DE L'ANDRA POUR LA R&D DE DEMAIN

L'Andra est aujourd'hui à une étape importante de son histoire avec la finalisation de la Demande d'autorisation de création (DAC) du centre de stockage Cigéo, au premier semestre 2022, qui sera suivie de son dépôt, puis de son instruction, dans la perspective de l'industrialisation du projet et le début de son développement progressif sur une durée de l'ordre de la centaine d'années. À cela s'ajoutent les grandes orientations sur la gestion des matières et déchets radioactifs suite au débat public de 2019 sur le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), notamment pour les déchets ne disposant pas encore aujourd'hui de filière de gestion (FA-VL) et certains déchets TFA, en particulier ceux issus des démantèlements à venir des installations nucléaires, et sur le devenir de certaines matières (requalification en déchet ou utilisation dans certains composants des stockages).

Le début de la construction des installations d'un centre de stockage ne constitue pas un point d'arrêt pour les activités de R&D. Comme en témoignent les centres existants, un effort de R&D reste nécessaire, proportionné aux besoins et aux enjeux des différents types de déchets radioactifs et des filières de gestion associées. La R&D se développe tout au long du cycle de vie des programmes de gestion et de stockage des déchets radioactifs afin d'assurer l'optimisation des voies de gestion en général et des solutions de stockage en particulier, mais également de répondre aux préoccupations sociétales et aux exigences réglementaires en constante évolution. Ainsi, face aux temps longs du développement des stockages et aux incertitudes concernant la filière nucléaire dans le futur, la R&D se doit d'accompagner l'adaptabilité et la flexibilité nécessaires des activités de l'Andra.

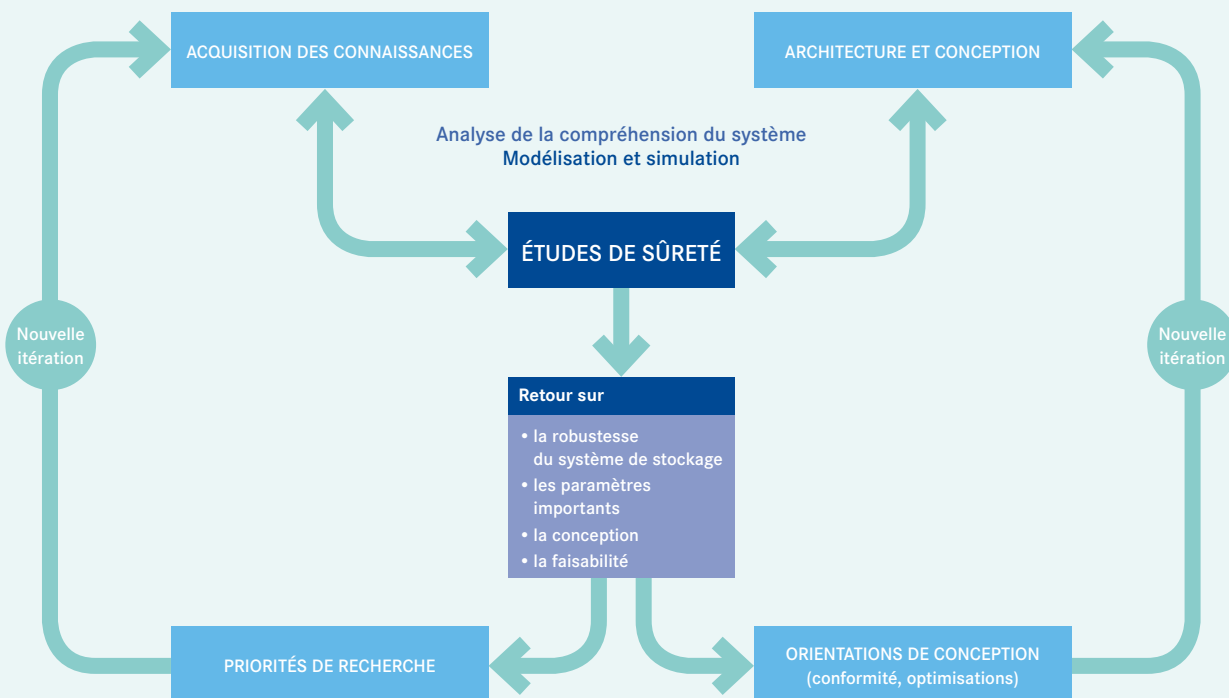


Le développement progressif du projet Cigéo : le processus itératif reliant acquisition de connaissances, conception et sûreté

Compte tenu de la spécificité du stockage en formation géologique profonde (son caractère « unique », son caractère souterrain et le fait qu'il doit assurer la protection des personnes et de l'environnement sur le long terme), le développement progressif du stockage s'appuie sur un lien très étroit entre trois piliers que sont la conception, les connaissances (scientifiques et technologiques) et la sûreté. Ainsi, le processus de développement progressif du centre de stockage Cigéo s'appuie, depuis environ 30 ans, sur des itérations périodiques entre ces trois piliers. Ces itérations mises en place dès le démarrage du programme de recherche et développement sur le stockage en 1991 par l'Andra ont intégré ainsi la sûreté, et notamment la sûreté à long terme, propre au projet Cigéo et au stockage géologique profond, dès les phases amont de conception. Elles permettent d'orienter progressivement les choix de conception de l'installation de stockage, de manière à accroître sa maturité et sa robustesse en prenant en compte l'avancée progressive des connaissances scientifiques et technologiques et les objectifs de sûreté qui lui sont conférés.

Chaque itération intègre ainsi l'acquisition de connaissances nouvelles et la consolidation des connaissances existantes, notamment *via* les résultats du programme de recherche et développement et les avancées sur la conception de l'installation de stockage en cohérence avec toutes ces connaissances et en lien avec les objectifs de sûreté. Les enseignements de chaque itération « sûreté/conception/connaissances » constituent une donnée d'entrée pour la suivante et permettent d'orienter en fonction de l'objectif visé, les études en matière d'acquisition de connaissances scientifiques et technologiques complémentaires, les études de conception, et les besoins en termes d'approfondissement des études de sûreté.

ILLUSTRATION DU PROCESSUS ITÉRATIF RELIANT ACQUISITION DE CONNAISSANCES, CONCEPTION ET SÛRETÉ

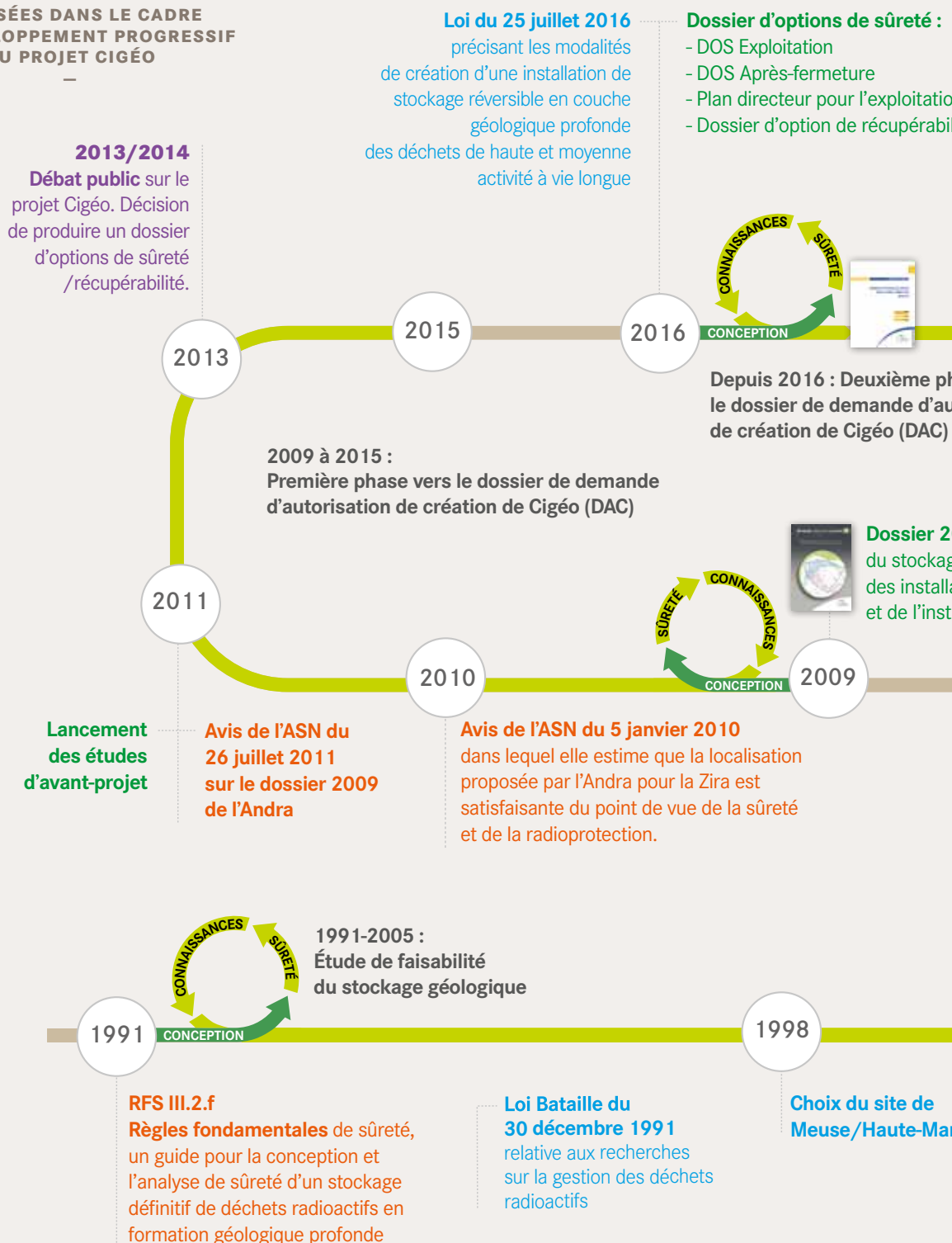


Pour tenir compte de l'objectif fondamental de protection sur le long terme dès le début du processus de développement du projet Cigéo, l'Andra a développé puis mis en œuvre une démarche de sûreté couvrant (i) les phases de fonctionnement, de démantèlement et de fermeture *via* des analyses de risques (et des fonctions de sûreté) similaires à celles pratiquées dans les installations nucléaires de base (INB) et (ii) les phases de surveillance et post-surveillance après la fermeture définitive du stockage (phase après fermeture), *via* une analyse des risques et incertitudes en lien avec l'état des connaissances notamment du comportement du stockage dans le temps et les fonctions de sûreté après fermeture qui lui sont allouées. Cette démarche de sûreté intègre les objectifs de sûreté, les éléments de conception et l'état des connaissances. En premier lieu, elle se fonde sur l'analyse du comportement du stockage tel qu'il peut être décrit au vu de l'état des connaissances scientifiques et technologiques. En second lieu, elle s'attache à identifier et évaluer les incertitudes de cette analyse pour définir un ensemble de scénarios représentant les différentes évolutions du stockage sur le long terme (évolution normale et différentes déviations de celle-ci en prenant en compte d'éventuels aléas internes et externes au stockage tels que perte de fonction de composants ouvragés, perte de mémoire du stockage après 500 ans entraînant la possibilité d'un forage « involontaire », etc.). Ce travail débouche, *in fine*, sur des évaluations quantitatives de la performance des composants ainsi que la performance globale du stockage, vis-à-vis des fonctions de sûreté à assurer et sur une appréciation de sa robustesse d'ensemble.

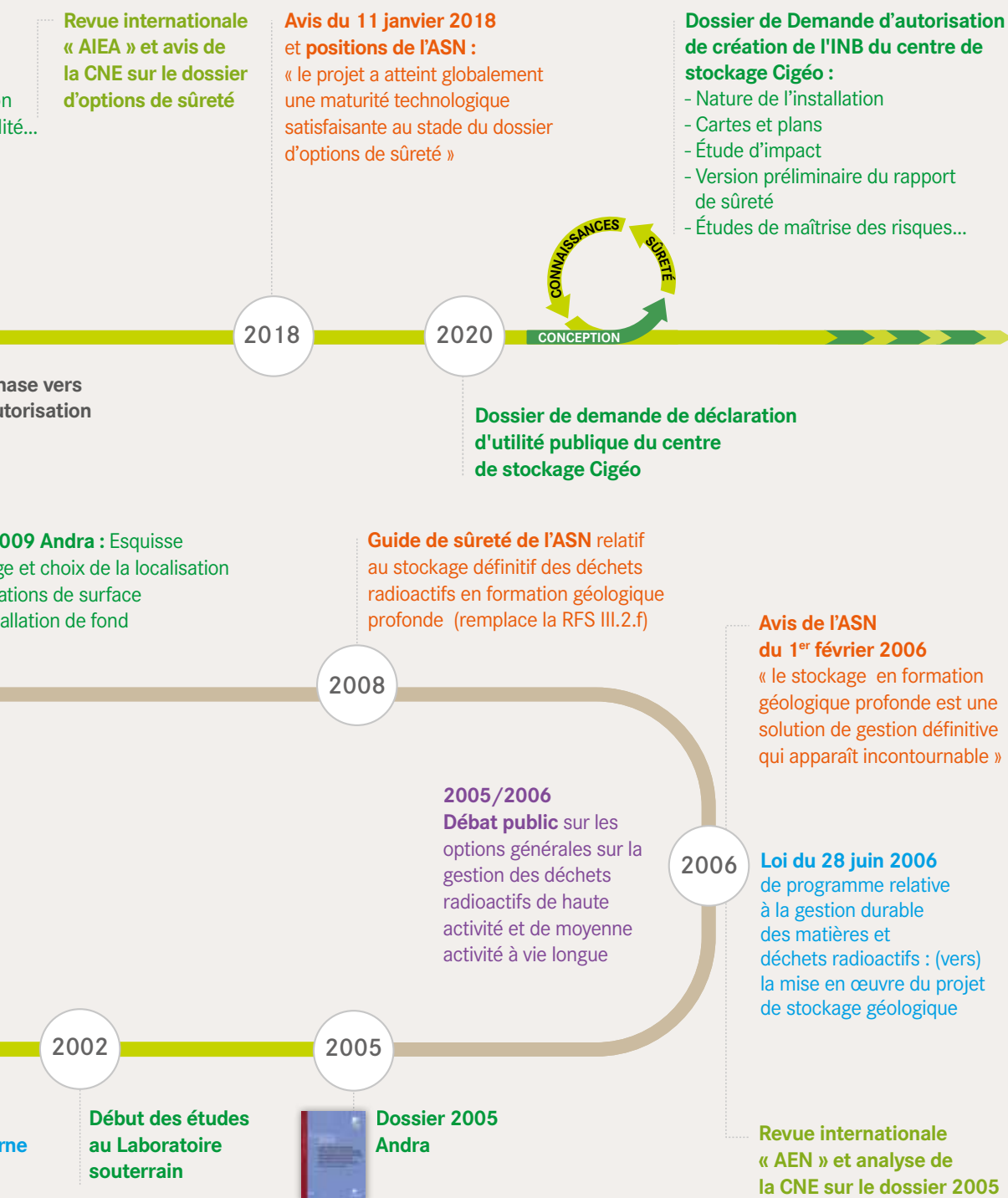
Cette démarche de sûreté s'inscrit complètement dans le processus itératif en mettant en perspective les différents phénomènes physiques et chimiques qui concourent à la sûreté du stockage mais qui peuvent également affecter les fonctions de sûreté. Cette démarche contribue à évaluer leur poids relatif et les conséquences des éventuelles incertitudes qui subsistent. Elle oriente également les recherches ultérieures en mettant en lumière les domaines où des avancées scientifiques et technologiques contribueraient le plus fortement à la sûreté.

Pour le projet Cigéo, sept itérations de sûreté ont été réalisées depuis 1991, chacune répondant à un objectif en lien avec une étape clé du développement progressif du projet de stockage : options initiales de conception, autorisation d'installation et d'exploitation du Laboratoire souterrain, préparation de la faisabilité, faisabilité, premières options de conception et de sûreté, choix de site, esquisse et options de sûreté. Ces itérations entre acquisition de connaissances, conception et sûreté se poursuivront au-delà du dossier de Demande d'autorisation

**ILLUSTRATION DES DÉMARCHES
D'ITÉRATIONS SUCCESSIVES
RÉALISÉES DANS LE CADRE
DU DÉVELOPPEMENT PROGRESSIF
DU PROJET CIGÉO**



de création, au cours de la phase industrielle pilote et du développement progressif du centre de stockage Cigéo. L'objectif est de favoriser l'intégration incrémentale des optimisations rendues possibles par les progrès scientifiques et technologiques sur la durée d'ordre séculaire du projet et la prise en compte du retour d'expérience apporté par la construction, l'exploitation et la surveillance des tranches d'ouvrages de stockage déjà réalisées.



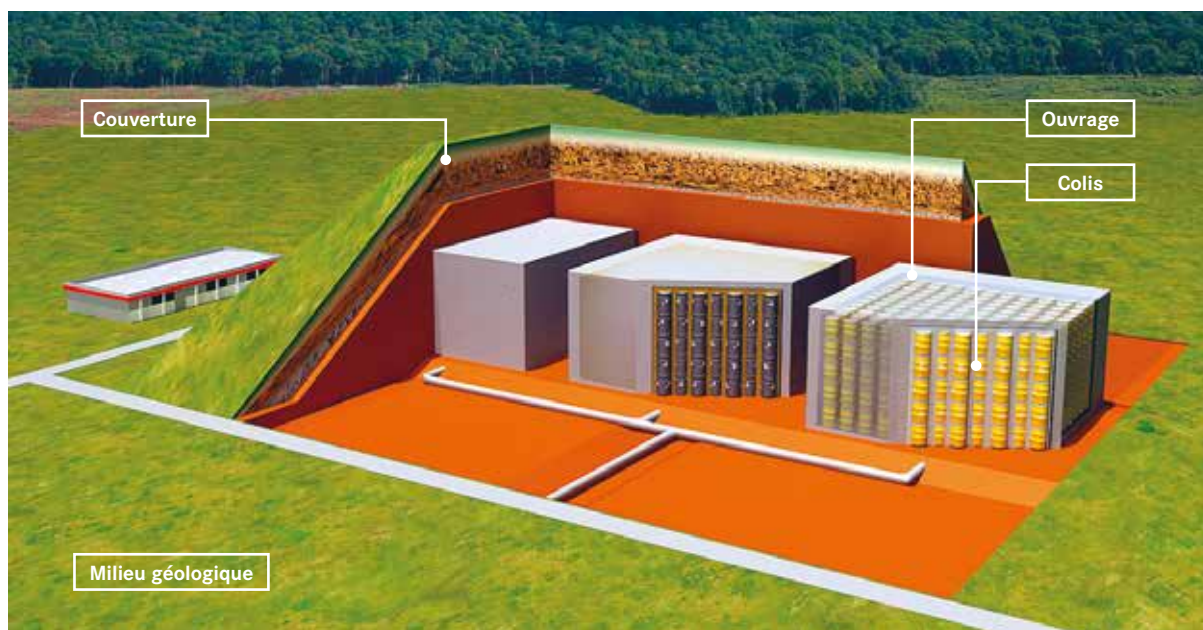
LE PROCESSUS DE DÉFINITION DE LA R&D SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE DEMAIN À L'ANDRA

Dans ce contexte, l'Andra a engagé en 2019 un processus de réflexion prospective sur sa R&D, en termes d'orientations thématiques (scientifiques et techniques) structurantes, de moyens humains et financiers, et de modalités de réalisation des travaux de R&D. Ce processus, qui a mobilisé l'ensemble des unités de l'Andra (direction de la R&D, direction de l'ingénierie, direction du projet Cigéo, direction des opérations industrielles, direction de la sûreté, de l'environnement et de la stratégie filière, direction dialogues et prospective), a par ailleurs été mené avec l'appui de son Conseil scientifique.

La « vision stratégique de la R&D scientifique et technologique de demain à l'Andra : les grandes orientations thématiques » a pour objet de tracer, à compter de 2021, les grandes orientations

thématiques structurantes de cette R&D de demain, en soutien au développement des activités opérationnelles de l'Andra, en termes à la fois d'enjeux opérationnels et d'enjeux scientifiques et techniques correspondants. Ces orientations sont largement transverses à l'ensemble des déchets radioactifs et des filières de gestion à long terme, bien que leurs mises en œuvre soient proportionnées aux enjeux propres à chacune. Elles sont aussi très souvent liées entre elles. Plus spécifiquement, dans une logique holistique de la gestion des déchets radioactifs, cette vision de la R&D de demain à l'Andra se doit de faire, en tant que de besoin, le lien avec la R&D sur les déchets radioactifs portée par les producteurs de déchets, en termes de caractérisation, de traitement et de conditionnement des déchets.

LES COMPOSANTS D'UN CENTRE DE STOCKAGE DE SURFACE



UN PÉRIMÈTRE TEMPOREL À 10 ANS ET DES GRANDES ORIENTATIONS THÉMATIQUES DE LA R&D DE DEMAIN AU CŒUR DES ACTIVITÉS DE L'ANDRA

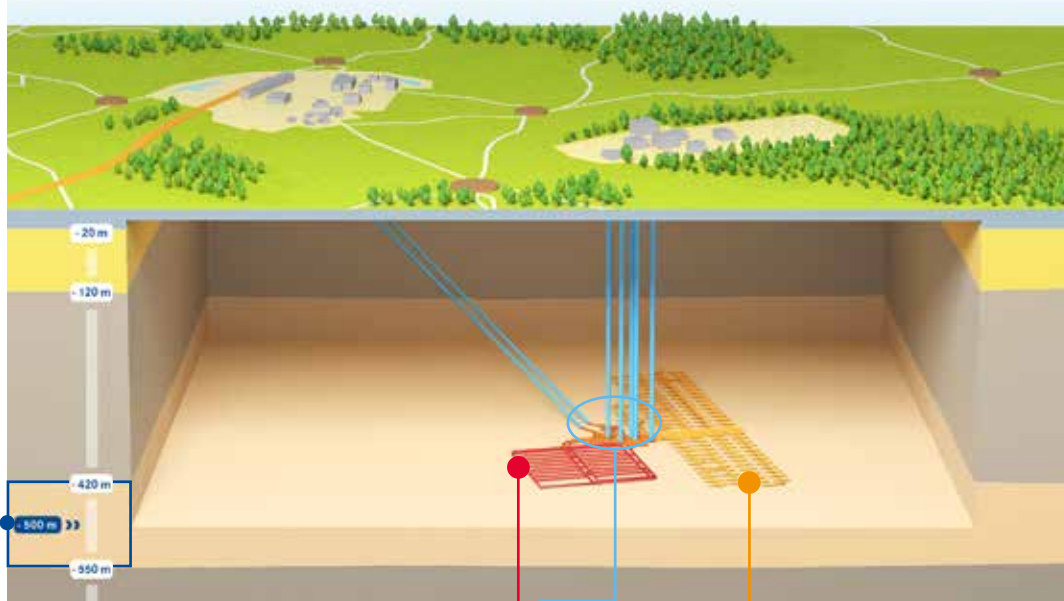
Les orientations thématiques présentées dans cette vision sont structurantes sur les dix prochaines années, inscrites sur la trajectoire dynamique à plus long terme du développement des centres existants et des projets. Toutefois, ces orientations thématiques ne peuvent préjuger des évolutions possibles du développement des activités de l'Andra, et donc de leurs besoins, ni des ruptures scientifiques et technologiques qui conduiraient à développer d'autres thématiques de R&D.

La R&D scientifique et technologique de l'Andra est focalisée

sur son « cœur de métier ». Elle ne couvre pas tous les domaines, toutes les thématiques et tous les composants des stockages mais s'étend à celles et ceux correspondant au besoin d'une maîtrise forte du fonctionnement des stockages, pour leurs aspects spécifiques et/ou leurs enjeux forts (sûreté en exploitation et en après-fermeture, coûts, développement progressif, lien avec les producteurs, filières, environnement, etc.). Par ailleurs, cette R&D s'inscrit dans un continuum de travaux de R&D entre science, ingénierie (et société).

LES COMPOSANTS DU CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO

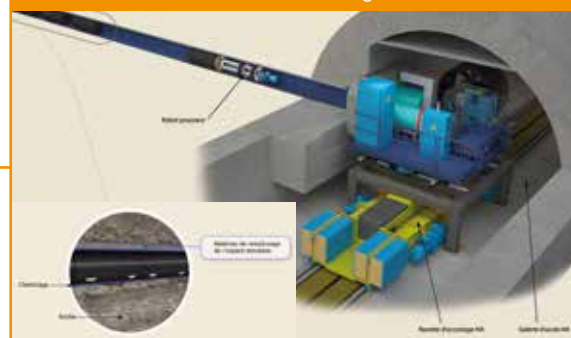
Milieu géologique :
formation
argileuse du
Callovo-Oxfordien



Les alvéoles de stockage MA-VL



Les alvéoles de stockage HA



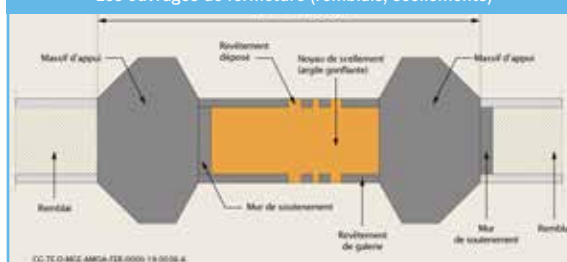
Les colis de déchets MA-VL



Les colis de déchets HA



Les ouvrages de fermeture (remblais, scellements)



► **Pour les composants**, il s'agit notamment, des déchets et des colis de déchets ; des milieux géologiques d'accueil des stockages ; des conteneurs de stockage ; des ouvrages souterrains (galeries, carrefours, descenderies, puits) ; des alvéoles/ouvrages de stockage (incluant le génie civil associé) ; des ouvrages de fermeture (scelllements et remblais du centre de stockage Cigéo, couvertures des centres de surface, etc.) ;

► **Pour les domaines/thématiques scientifiques et technologiques**, il s'agit notamment :

- ♦ des process industriels de réalisation, d'exploitation et de surveillance associés aux composants « cœur de métier » (travaux souterrains, génie civil, métallurgie/soudure, etc.) ;
- ♦ du contrôle, de la dégradation et des termes sources au sens large des déchets en situation de stockage, en lien avec leur caractérisation, traitement et conditionnement ;
- ♦ du comportement des radionucléides et des toxiques chimiques (du déchet à la biosphère), incluant la radio-écologie (effets sur l'homme et l'environnement) ;
- ♦ des géosciences (géologie, tectonique/sismique, hydrogéologie, géo-mécanique, géochimie, climatologie, etc.) ;
- ♦ du transfert de chaleur et d'énergie dans les milieux poreux et les milieux ouverts (aéraulique) ;

- ♦ des sciences des matériaux (bétons, métaux, céramiques, géopolymères, verres, organiques, etc.) ;
- ♦ des sciences de l'environnement [Observatoire pérenne de l'environnement (OPE), approche écosystémique, etc.] ;
- ♦ de la simulation numérique multi-physique et multi-composants ;
- ♦ de la chaîne de données (monitoring, science de la donnée, jumeau numérique phénoménologique, système d'aide à la décision).

Bien que la distinction ne puisse pas toujours être aussi tranchée, sur d'autres thématiques de R&D, l'Andra se positionne simplement en utilisateur *in fine* ou en *end user* éventuel fournissant des cas d'application spécifiques (par exemple : pour la robotique, la fabrication additive, ou les appareillages connectés).

Cette R&D est donc nécessairement adossée à un plan de veille active, afin de capter les avancées des connaissances et les innovations émergentes pertinentes et de les capitaliser pour faire évoluer les hypothèses scientifiques et techniques retenues par l'Andra, ou pour ouvrir des perspectives de progrès sur tout le spectre de ses activités (conception, réalisation, exploitation, sûreté d'exploitation et après-fermeture). Ces orientations feront ainsi l'objet d'actualisations régulières, via une revue tous les cinq ans.



Aligner la démarche de veille à la trajectoire de la R&D scientifique et technologique

Au-delà des grandes orientations thématiques fixées par cette vision stratégique des activités de R&D scientifique et technologique de demain à l'Andra, et sans définir à ce stade les processus de veille (internes et externes) qui seront mis en place pour couvrir l'ensemble des domaines et disciplines d'intérêt pour l'Agence, plusieurs grands principes guident leur définition.

Il s'agit, d'une part, de bénéficier des idées et connaissances nouvelles et innovantes émergeant dans les disciplines qui ne sont pas les domaines « cœur de métier » de l'Andra, pour être en capacité de détecter les avancées scientifiques et/ou les solutions technologiques pertinentes pour les développements futurs des centres de stockage et des filières de gestion. Le positionnement de l'Andra en observateur ou *end user* offrant des cas d'application doit notamment permettre à l'Agence d'évaluer les nouvelles idées et connaissances pour les adapter et/ou les qualifier au regard de ses besoins propres. Les outils de l'industrie 4.0 tels que les ordinateurs quantiques, les drones et les robots, la fabrication additive, etc. sont des exemples de sujets relevant de cette veille.

D'autre part, l'Agence se doit de maintenir une veille proportionnée aux enjeux y compris pour les thématiques « cœur de métier » pour lesquelles l'état des connaissances est jugé suffisant et qui ne sont pas identifiées parmi les grandes orientations stratégiques de sa vision R&D de demain. En effet, il s'agit de rester attentif aux progrès et évolutions des connaissances de façon à être en capacité d'identifier et traiter en amont leurs conséquences. C'est par exemple le cas de la géologie et de la géodynamique interne (sismicité, etc.), pour lesquelles les savoirs et savoir-faire acquis par l'Andra correspondent au meilleur de l'état de l'art et des moyens disponibles à un moment donné, mais ces sujets pourront être remobilisés à d'autres moments au regard de l'évolution des connaissances ou de la réglementation.

UN CADRE PRÉALABLE POUR UNE MISE EN ŒUVRE PERTINENTE ET ADAPTÉE DES ACTIONS DE R&D EN TERMES DE MOYENS ET DE PARTENAIRES

La réalisation (moyens, modalités, feuille de route) n'est pas traitée dans le présent document. Le niveau d'effort sera proportionné, adapté et défini au fur et à mesure de l'avancement du développement des stockages existants et en projet. On notera néanmoins à ce stade que si certaines thématiques scientifiques et techniques répondent à des enjeux propres aux activités de l'Agence, en particulier dans le domaine des géosciences, nombre d'entre elles, comme la transformation numérique (développement de nouvelles technologies numériques et leur intégration dans les activités opérationnelles), le monitoring, ou les nouveaux matériaux s'inscrivent dans des dynamiques de R&D portées par d'autres acteurs :

- autres maîtres d'ouvrage, au sein de la filière nucléaire (cf. le Gif et le contrat de filière avec l'État) et/ou dans d'autres filières (par exemple : génie civil, béton, aéronautique) ;
- organismes de recherche au travers notamment de plans nationaux (cf. le plan numérique en France), ou de grands projets européens (cf. Euratom) ou internationaux ;
- homologues de l'Andra à l'étranger.

Ces écosystèmes doivent permettre à l'Andra de mettre en œuvre des synergies fortes de moyens et de modalités (partenariats stratégiques, transfert de connaissances et de compétences, etc.).



Journée d'échanges à destination de la communauté scientifique et industrielle, organisée conjointement par l'Andra et l'ANR dans le cadre du programme d'Investissements d'avenir (PIA).

LE CONTEXTE DE LA R&D DE DEMAIN À L'ANDRA

L'histoire de l'Andra est riche d'expertises techniques et de démonstrations scientifiques destinées à justifier des solutions et franchir des jalons importants pour chacun de ses projets. Cette démarche, renforcée par de nombreux mécanismes d'évaluation permanente, a conduit l'Andra à développer une culture de l'expertise et de la preuve en support à ses propositions, toujours orientée vers des solutions opérationnelles quelles que soient les modalités de mise en œuvre de la R&D.

Jusqu'à présent, la R&D de l'Andra a été principalement portée par une logique de démonstration, en support plus particulièrement au projet Cigéo et au projet de stockage des déchets FA-VL, induisant de nombreuses retombées pour les centres de stockage existants (déchets FMA-VC et TFA). Cette R&D s'est focalisée en priorité sur les domaines scientifiques et technologiques au cœur des stockages comme les géosciences (géologie, géomécanique, géochimie, géodynamique, etc.), le

comportement des déchets, le comportement des radionucléides et des toxiques chimiques, le comportement des matériaux de base des stockages (béton, métaux, argiles remaniées) ou la simulation numérique. Elle s'est appuyée notamment sur des outils de recherche uniques développés par l'Andra depuis 20 ans : des outils de simulation numérique adaptés à la représentation (temps, espace) du fonctionnement des stockages, et à leur analyse de performance et de sûreté (principalement en après-fermeture), ainsi que le Laboratoire souterrain et l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) avec son Écothèque, dédiés plus particulièrement au projet Cigéo. Elle a mobilisé l'excellence de la communauté scientifique, en particulier au travers de grands programmes nationaux comme Forpro, ou des programmes européens dans le cadre d'Euratom, mais aussi les savoirs et savoir-faire du tissu industriel (dans et hors de la filière nucléaire). Plus spécifiquement, en ce qui concerne les déchets radioactifs, cette





R&D est menée en étroite collaboration avec les producteurs de déchets, responsables de la caractérisation, du traitement et du conditionnement de ces déchets en réponse aux exigences des centres de stockages, le comportement des déchets en situations de stockage étant de la responsabilité de l'Andra.

Ce temps de la recherche inscrite dans une logique de démonstration fait progressivement place à des enjeux plus complexes, intégrant aussi des dimensions politiques et sociétales, pour lesquels la décision ne peut se fonder uniquement sur des considérations techniques ou de calendrier. L'actuel contrat d'objectifs avec l'État (2017-2021) dégage ainsi d'ores et déjà trois principaux enjeux transverses à la question de la gestion à long terme des déchets radioactifs, structurants pour l'Andra et dimensionnants quant à son fonctionnement qu'il s'agisse du projet Cigéo, d'autres projets de stockage ou des centres existants : l'orientation des déchets selon une stratégie filière cohérente et proportionnée ; la prise en compte du temps et du cycle de vie des stockages ; le dialogue et la concertation avec les territoires d'implantation des installations de stockage.

Dans ce cadre général, plusieurs éléments vont guider les choix des grandes orientations thématiques retenues pour structurer la R&D de l'Andra :

Une période charnière dans l'évolution de l'Andra

L'Andra dispose d'un socle important de connaissances scientifiques et technologiques acquis depuis 30 ans, majoritairement dans un contexte de dossiers en support au développement du projet Cigéo et également valorisé pour les centres de stockage existants ou les autres projets de stockage. Cela concerne des domaines scientifiques et des savoirs et savoir-faire « cœur de métier » de l'Andra, comme les géosciences, le comportement des radionucléides ou le comportement des grandes familles de déchets radioactifs (déchets vitrifiés, déchets de structures, déchets d'exploitation, graphites, combustibles usés, etc.), ou le comportement des matériaux de base (béton, métaux, argiles remaniées, etc.).

Le dépôt de la Demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo marquera le passage de la démonstration à la justification, de la conception à l'industrialisation, avec la première étape du développement industriel du projet Cigéo, la phase industrielle pilote, étape importante d'appropriation par l'Andra et les parties prenantes du fonctionnement et de la gouvernance du projet Cigéo.

Un développement des filières de gestion qui doit anticiper d'éventuelles évolutions de la politique énergétique

Le débat public sur le prochain PNGMDR qui s'est tenu en 2019 a ouvert une nouvelle dynamique de définition de filières de valorisation et de gestion de matières et de déchets radioactifs (FA-VL, TFA), basée sur une approche globale de la gestion des déchets et matières radioactives (dont le stockage n'est qu'une composante) et impliquant plus encore les parties prenantes de la société civile. Ainsi, si cette approche globale de la gestion des déchets radioactifs trace des orientations pour certains déchets, elle laisse cependant ouvertes des options de gestion pour d'autres. Plus spécifiquement, dans ce cadre, la question de la gestion des combustibles usés, fortement dépendante de la politique énergétique de la France, doit être anticipée afin de vérifier qu'il n'y aurait pas d'élément rédhibitoire à leur stockage dans le projet Cigéo, si une telle décision venait à être prise. Cette dynamique de définition de filières de valorisation et de gestion de matières et de déchets radioactifs a fait l'objet d'un avis commun du ministère de la Transition écologique et de l'ASN en février 2020.

La gestion proportionnée des différents types de déchets radioactifs

Orienter les déchets radioactifs selon une stratégie de gestion cohérente et proportionnée en intégrant l'ensemble des enjeux, et plus largement les enjeux environnementaux ; prendre en compte le cycle de vie des stockages en optant pour des constructions progressives, par étapes et adaptables ; co-construire les prises de décision avec tous les acteurs des territoires d'implantation de ces stockages, sont des défis de demain. Cette gestion proportionnée, dont l'Andra est un des acteurs, se trouve à la croisée de nombreuses considérations : sociétale, éthique, sanitaire, environnementale, scientifique, technique, économique, etc. Elle recouvre notamment les notions de risques, d'incertitudes, de responsabilité et d'opportunités.

Une grande part des déchets radioactifs français dispose de filières de gestion à long terme opérationnelles ou en cours de développement. Néanmoins, des questions se posent aujourd'hui pour certains déchets sur la définition de modalités futures de leur gestion à long terme légitimement proportionnée à leur faible dangerosité, qu'il s'agisse des grands volumes de déchets de très faible activité, qui seront



produits par les démantèlements à venir, ou de déchets aux caractéristiques intermédiaires, comme les déchets dits de faible activité à vie longue. La recherche de solutions de stockage s'inscrivant dans l'approche graduée recommandée par l'AIEA passe par une meilleure compréhension de la dangerosité des différents déchets et par une analyse des justes besoins

en confinement et en isolement vis-à-vis de l'homme et de la biosphère. À ces besoins pourront être associées des caractéristiques de barrières de long terme et des durées sur lesquelles les performances de ces barrières pourront être raisonnablement évaluées.



Les temps longs des stockages et des filières de gestion à long terme des déchets

Les stockages sont caractérisés par les temps longs à deux titres :

➤ **les temps longs de la conception, la réalisation, l'exploitation et la fermeture**, de plusieurs décennies à la centaine d'années, sur plusieurs générations.

Ils permettent et impliquent une **dynamique de progrès scientifique et technologique continu**, au service de l'optimisation technico-économique et de l'accroissement de la maîtrise de la sûreté des stockages. Le développement d'un stockage est par nature progressif ; les besoins en connaissances scientifiques et techniques s'échelonnent donc dans le temps, aux différents jalons des stockages (faisabilité, autorisation de création, développement industriel, fermeture, etc.).

Sur de telles durées, il ne peut être exclu que d'éventuelles évolutions, de politique énergétique par exemple, puissent avoir des conséquences sur les déchets et leurs filières de gestion.

Cela implique une capacité d'**adaptation et de flexibilité** de la conception des stockages en projet, et un besoin de connaissances scientifiques et technologiques additionnelles suffisamment large afin de permettre des évolutions.

Enfin, ces temps longs supposent un processus de mémoire et de transfert intergénérationnel des savoirs et savoir-faire scientifiques et technologiques, dont la R&D est un ferment ;

➤ **les temps longs de l'après-fermeture**, pouvant aller bien au-delà de l'échelle humaine du fait de la finalité même des stockages.

D'une part, ils impliquent un **haut niveau de maîtrise de l'évolution phénoménologique des stockages**, au-delà des dispositions de conception permettant néanmoins d'accroître intrinsèquement cette maîtrise et des enjeux de sûreté qui doivent être proportionnés au type de déchets radioactifs. D'autre part, ils renvoient à des questionnements éthiques, au regard de la dangerosité des déchets et corrélativement des échelles de temps afférentes, pour apporter une réponse au « juste besoin ».



Les temps longs des stockages et des filières de gestion des déchets

Le développement, la capitalisation et la transmission des connaissances scientifiques et techniques figurent au cœur des objectifs de l'Agence (cf. axe 5 du contrat d'objectifs 2017-2021). En effet, les activités de l'Andra *s'inscrivent sur des temps particulièrement longs au regard d'autres activités industrielles* : temps longs de développement des concepts de stockage adaptés aux différentes filières d'une part, mais également temps longs d'exploitation (plus d'une centaine d'années pour le centre de stockage Cigéo) puis de surveillance des stockages. Ces durées impliquent non seulement une *adaptation continue des besoins en connaissances aux exigences des projets et des installations*, mais aussi une *transmission intergénérationnelle des savoirs et des savoir-faire, scientifiques et techniques notamment*, d'une part et de la *mémoire des stockages* d'autre part.

Pour assurer le passage de relais à un horizon aussi lointain que possible entre les générations qui interviennent dans la mise en œuvre de la gestion des déchets radioactifs, l'Andra s'appuie sur une démarche de gestion des connaissances (*knowledge management*). Cette démarche opérationnelle, basée sur l'analyse stratégique du patrimoine de connaissances, la structuration et la capitalisation des connaissances clés pour leur partage et leur transfert, se double d'une réflexion vers un programme de recherche et développement sur la transmission et la pérennisation des connaissances au sein de l'écosystème de l'Agence. Il s'agira de concevoir une architecture pour l'échange et la combinaison dans la durée des connaissances au sein de l'Andra et avec ses parties intéressées et d'en définir les principes et mécanismes appropriés.

Parmi ces connaissances clés, les savoirs scientifiques et techniques, sont constitués de *l'ensemble des connaissances de toutes natures* (mécanismes, processus, modèles, valeurs de paramètres, dispositifs techniques, etc.) acquises par l'Andra, *depuis les connaissances brutes, non structurées, puis structurées, jusqu'aux connaissances intégrées*, permettant de définir les données de référence sur la base desquelles les choix de conception et de sûreté s'appuient. Ils sont aujourd'hui capitalisés sous plusieurs formes (publications, bases de données, grands dossiers, outils développés, etc.) pour mieux en assurer l'information et la distribution. Depuis quelques années, ces sujets sont également *portés collectivement au niveau national mais aussi européen et international* à travers différents projets, structures ou entités, permettant ainsi de partager les connaissances acquises (par exemple : base de données Thermochimie, programme national NEEDS, European joint programming Eurad).

Au-delà de la transmission intergénérationnelle des connaissances, les temps longs des stockages et des filières de gestion renvoient également à la notion de mémoire collective. Si les filières de gestion développées et mises en place permettent d'assurer une sûreté passive à long terme même en cas d'oubli, l'Andra conçoit néanmoins les stockages avec l'objectif d'en conserver la mémoire et de la transmettre aux générations futures le plus longtemps possible. Après la définition d'une solution de référence et sa mise en œuvre pour les centres de stockage existants, l'Andra a lancé en octobre 2010 un programme « Mémoire pour les générations futures », étalé sur plusieurs décennies, visant à étudier de nombreuses pistes permettant de consolider et/ou de diversifier ses solutions de référence, en développant des réflexions et des études sur la mémoire plurimillénaire : « art et mémoire », conservation des supports d'information, linguistique et sémiotique, socio-anthropologie, archéologie des paysages et des matériaux, etc.

Le développement d'une approche environnementale globale des stockages existants et en projet

Les exigences réglementaires et sociétales en matière environnementale sont croissantes. Dans ce cadre, l'Andra se doit de considérer les impacts locaux et globaux des projets qu'elle conduit comme ceux des filières de gestion des déchets dans leur ensemble. Ceci est particulièrement pertinent lorsque les enjeux d'impacts environnementaux à court terme ou à long terme sont au même niveau ou supérieurs aux enjeux de radioprotection (par exemple : les transports des déchets radioactifs TFA, la préservation de la biodiversité, etc.). Cette approche environnementale globale nécessite notamment d'intégrer les scénarios d'évolution possible (changement climatique, etc.) et les aléas aux grandes échelles de temps sur lesquelles s'appliquent les solutions de gestion proposées (par exemple les transports des déchets radioactifs TFA, la préservation de la biodiversité, etc.).

La transformation numérique

Au même titre que pour l'ensemble de la filière nucléaire, la « digitalisation » des stockages au sens large, en particulier du projet Cigéo, est un enjeu de transformation pour répondre aux défis de demain en matière de performance multicritère (performance économique, performance technique, sûreté,

gouvernance). La transformation numérique est aussi un outil d'intégration des connaissances de toutes natures contribuant à leur capitalisation, leur lisibilité, leur mise en cohérence et leur transfert intergénérationnel.

Au travers de la transformation numérique, il s'agit de développer et d'agréger un ensemble d'outils numériques cohérents permettant le pilotage de la conception, la construction, l'exploitation, la maintenance, et la surveillance (dispositifs de monitoring, système de traitement et de visualisation des données, systèmes de décision) des stockages : le BIM (*Building information modeling*) et les jumeaux numériques en sont les outils majeurs, couplés aux outils de simulation numérique du comportement du stockage (de l'échelle des composants majeurs à celle du stockage dans son environnement).

Une demande sociétale de dialogue et de compréhension du fonctionnement du stockage

Le statut de l'expertise scientifique ou de la compétence technique a évolué et ne suffit plus à constituer une démonstration. Le dialogue avec toutes les parties prenantes et l'explication pédagogique des fondements scientifiques et technologiques des stockages s'accroissent et sont désormais une nécessité à toutes les étapes de développement de ces derniers.





LES GRANDES ORIENTATIONS THÉMATIQUES DE LA R&D DE DEMAIN À L'ANDRA

Les éléments de contexte décrits ci-dessus, qui concourent au maintien dans la durée d'une R&D à l'Andra, en fixent aussi les grands enjeux opérationnels et les orientations thématiques scientifiques et technologiques afférentes.

Les grands enjeux opérationnels

Au-delà des logiques de verrous vis-à-vis de la faisabilité des stockages ainsi que des controverses, les orientations thématiques scientifiques et technologiques de la R&D répondent à des enjeux opérationnels de natures multiples :

- accroître la maîtrise des risques et adapter les marges de conception et de sûreté au juste besoin ;
- accompagner l'exploitation et la construction incrémentale des stockages (surveillance, maintenance, aide à la décision, etc.) ;
- accompagner le fléchage des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux, en particulier être en capacité de s'adapter aux incertitudes

du futur en matière de nucléaire et de filières de déchets radioactifs ;

- optimiser la dimension technico-économique des stockages ;
- nourrir le dialogue avec les parties prenantes ;
- être en mesure de transposer les évolutions réglementaires intervenant sur les temps longs de la conception et de l'exploitation ;
- contribuer à maintenir les savoirs et savoir-faire scientifiques et techniques, en particulier ceux au cœur des activités de l'Andra, sur les temps longs de la conception et de l'exploitation des stockages, afin de vérifier en permanence la robustesse des hypothèses, des choix de conception au sens large (composants des systèmes de stockage, modalités de construction, exploitation, fermeture, etc.) et des analyses de sûreté, en particulier en après-fermeture au regard des progrès des connaissances.



QUATRE GRANDS AXES ET UNE DÉCLINAISON EN THÉMATIQUES DE R&D SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Les thématiques de R&D de demain à l'Andra peuvent être regroupées en quatre grands axes :

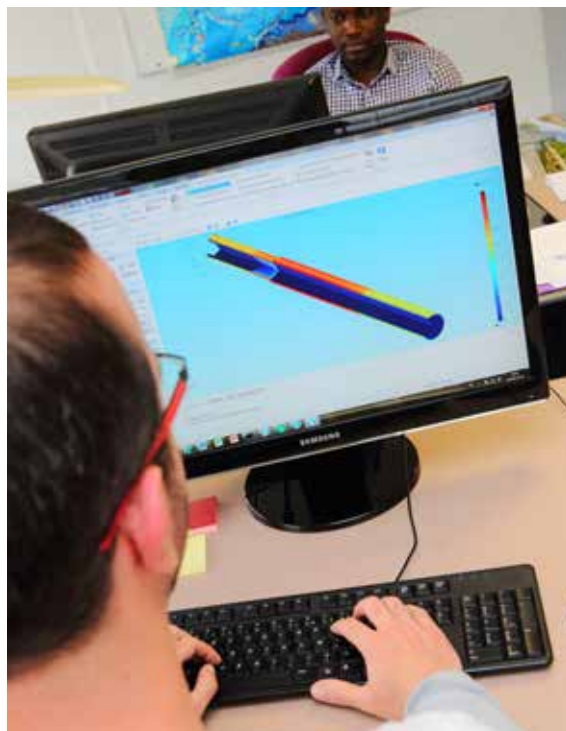
Maitriser les risques et optimiser les stockages et les filières de gestion des déchets

- améliorer la compréhension des processus naturels des sites et des milieux géologiques d'implantation des stockages (de la géodynamique externe aux mécanismes fondamentaux du comportement des milieux géologiques) ;
- accroître la maîtrise de l'évolution multi-physique et multi-composants des stockages, du déchet au stockage et son environnement naturel, du relâchement à la migration des radionucléides et toxiques chimiques (pour une représentation au plus près de la réalité) ;
- étudier l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies dans les stockages futurs et existants ;
- développer des technologies de construction et d'exploitation des stockages encore plus performantes, notamment sur les plans économique, de sécurité et de maîtrise des exigences.



Poursuivre le déploiement de la transition numérique et des outils 4.0 de l'observation/surveillance des stockages

- Accélérer le développement du digital 4.0 des stockages :
 - ❖ développer la simulation numérique multi-couplage et les méthodes d'analyse et de traitement des incertitudes, en appui à la représentation multi-physique des stockages pour la maîtrise des grands processus d'évolution phénoménologique des stockages au cœur de leur sûreté (exploitation et après-fermeture) ;
 - ❖ développer des jumeaux numériques en support aux différents usages, en particulier à la surveillance des stockages en exploitation pour s'assurer d'un fonctionnement phénoménologique de ces derniers conforme aux exigences de conception et de sûreté (exploitation et après-fermeture) ;
- développer un monitoring en appui à la surveillance du comportement multi-physique des stockages et en lien avec l'amélioration des technologies de construction et d'exploitation des stockages ;
- développer des méthodes de traitement des données d'observation et de surveillance des stockages (intelligence artificielle au sens large : apprentissage machine, fusion de données, système expert, méthodes statistiques, etc.).





Renforcer l'approche environnementale intégrée au cœur des actions de l'Andra

- Poursuivre le développement de l'approche écosystémique des territoires d'implantation des stockages, plus particulièrement pour le projet Cigéo ;
- développer la capacité d'appréhender une vision dynamique des évolutions environnementales des territoires d'implantation des stockages sur la période d'exploitation, mais aussi en après-fermeture, et adaptée à chaque filière de stockage, au regard des enjeux afférents, en particulier environnementaux et de radioprotection ;
- mieux appréhender les impacts radiologiques au *non human biota*, principalement en après-fermeture des stockages.



Appréhender les transformations de la société et venir en soutien au dialogue avec les parties prenantes

- Comprendre les attentes de la société et interagir avec elle, en appui aux dispositifs de gouvernance des stockages.



L'articulation avec les grandes orientations de la R&D de demain sur les déchets

Transversalement à ces grands axes s'ajoute la nécessité d'une logique systémique de la gestion des déchets et matières radioactives (cf. « Le contexte de la R&D de demain à l'Andra »).

Elle doit s'appuyer sur une maîtrise de la connaissance des déchets que l'Andra doit porter sur la durée au regard des temps longs du développement des stockages.

L'Andra continuera donc à interfacer sa R&D avec celle sur les déchets, menée par les producteurs (caractérisation, conditionnement, traitement, contrôle de la qualité des colis), et sur les matières (valorisation) afin notamment de s'assurer de l'adéquation entre les exigences spécifiées des stockages et les paramètres de production des déchets au sens large.





LA DÉCLINAISON DES GRANDES ORIENTATIONS THÉMATIQUES DE LA R&D DE DEMAIN À L'ANDRA



**Maîtriser les risques et
optimiser les stockages
et les filières de gestion
des déchets**



Perfectionner et garantir un haut niveau scientifique de représentation des processus naturels des sites et des milieux géologiques d'implantation des stockages

Les géosciences sont une des bases scientifiques des stockages, sur toutes leurs phases de vie (choix de site, conception, exploitation, fermeture, après-fermeture). Les enjeux opérationnels liés à la R&D de demain en géosciences sont à plusieurs niveaux :

- un accroissement de la maîtrise des risques en exploitation associés au changement climatique et à la sismique sur les temps de l'exploitation par nature longs (centre de stockage Cigéo) ou qui augmentent pour les centres de surface, et la réduction des marges de conception associées à ces risques, pour notamment anticiper ou accompagner des éventuels changements de réglementation ;
- un accroissement de la maîtrise de l'évolution des stockages de surface et à faible profondeur en après-fermeture, sur une échelle de temps de quelques milliers à quelques dizaines de

milliers d'années, pour accroître les marges de sûreté retenues, accompagner la conception des couvertures au juste besoin et soutenir la démonstration de sûreté dans une approche multicritère et proportionnée aux risques associés aux déchets de faible dangerosité concernés (TFA, FMA-VC, FA-VL) ;

- une réduction des marges de conception du projet Cigéo, retenues de manière prudente au stade du dossier de DAC, et un accroissement des marges de sûreté vis-à-vis de processus naturels du milieu géologique en général ou de la roche argileuse hôte, notamment pour les déchets HA ou les combustibles usés dans le cadre de l'adaptabilité du centre de stockage Cigéo, en support à la phase industrielle pilote avec le quartier pilote HA et à leur prise en charge dans plusieurs dizaines d'années.



Garantir la pertinence des modèles d'évolution climatique et de géodynamique interne sur le long terme

Enjeux opérationnels

+ Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en après-fermeture



Objectifs scientifiques

- + Maîtriser le couplage des effets naturels et des effets anthropiques sur l'évolution du climat aux grandes échelles de temps
- + Décrire l'évolution géodynamique interne d'un domaine à très faible sismicité
- + Ajuster les représentations à l'échelle des sites d'implantation

Déchets/filières

+ Tous stockages

Composants concernés

+ Sites géologiques d'implantation

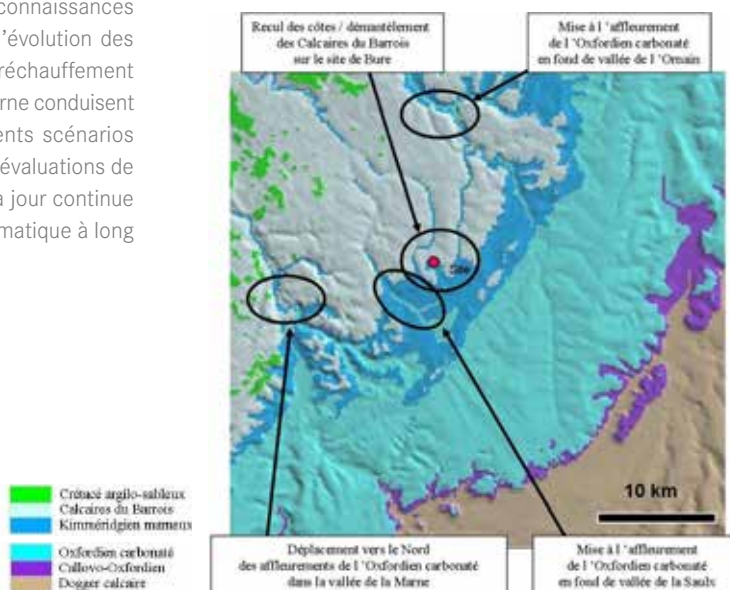
Les travaux de R&D réalisés depuis plus de 20 ans en géo-prospective ont été menés principalement pour appréhender au mieux l'évolution des sites de stockages sur des temps très longs (jusqu'au million d'années pour le centre de stockage Cigéo) en support à la démonstration de la **maîtrise de la sûreté en après-fermeture**. Ces travaux ont intégré l'analyse combinatoire des effets spatialement couplés et temporellement superposés de l'évolution géodynamique interne (tectonique des plaques) et de l'évolution géodynamique externe (climat). Ils permettent aujourd'hui de disposer de scénarios/modèles d'évolution prenant en compte l'ensemble des conséquences possibles de l'évolution géodynamique future, en particulier hydrogéologique et géomorphologique (érosion), vis-à-vis de la migration des radionucléides et des toxiques chimiques vers la biosphère et au sein de la biosphère vers l'homme, et d'encadrer avec confiance le domaine des possibles. Ces scénarios contribuent aussi à définir les biosphères types à retenir.

Les progrès actuels et futurs en paléoclimatologie (connaissances accrues des mécanismes du cycle du carbone, de l'évolution des calottes glaciaires, etc.), en modélisation du climat (réchauffement climatique) et en modélisation de la géodynamique interne conduisent à s'assurer en continu de la pertinence des différents scénarios climatiques et d'érosion retenus par l'Andra dans les évaluations de sûreté après-fermeture, par le maintien et une mise à jour continue d'un haut niveau de connaissances sur l'évolution climatique à long terme couplée à celle sur la géodynamique interne.

VISUALISATION DE L'ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DU SECTEUR D'IMPLANTATION DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO



Modèle actuel.



Modèle à 1 million d'années.

Mieux capter les événements rares et les extrêmes climatiques à court terme et l'évolution climatique à moyen terme

Enjeux opérationnels

- + Garantir la sûreté des installations de surface en exploitation (conception et maintenance)
- + Concevoir les couvertures des centres de surface
- + Soutenir une approche multicritère proportionnée aux risques (déchets TFA, FMA-VC, FA-VL)

Objectifs scientifiques

- + Maîtriser le couplage des effets naturels et des effets anthropiques sur l'évolution du climat aux petites échelles de temps
- + Ajuster les représentations à l'échelle des sites d'implantation

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Installations de surface ; couvertures des stockages de surface et à faible profondeur

Au regard de l'augmentation des temps d'exploitation des stockages existants, du temps long de l'exploitation de Cigéo (plus d'une centaine d'années), des échelles de temps plus réduites des stockages de surface et à faible profondeur, les évolutions climatiques tendanciennes actuelles caractérisées par l'occurrence, la durée et l'intensité accrues d'événements extrêmes (pluies, vents, neiges, etc.) conduisent à accompagner des évolutions possibles de la réglementation (RFS, Eurocodes), par un accroissement :

- d'une part, de la maîtrise des risques associés (aléas neige, température, vents extrêmes, tornade, pluie et inondation, etc.) pour les installations de stockage en exploitation aux temps « courts » (100 à 1 000 prochaines années) ;
- d'autre part, de la maîtrise de l'évolution des stockages de surface et à faible profondeur en après-fermeture sur les temps « moyens » (de quelques centaines d'années à quelques dizaines ou à la centaine de milliers d'années) comme donnée d'entrée d'une meilleure représentation de l'érosion des couvertures et des évolutions hydrogéologiques de sub-surface et hydrologique.

Cela exige d'une part d'affiner les simulations d'évolutions du climat jusqu'aux résolutions temporelles (annuelles à pluriannuelles) et spatiales (échelle régionale) adaptées spécifiquement aux sites de stockage, et d'autre part d'intégrer les modèles prédictifs d'évolution climatique actualisés (données du GIEC) et prenant en compte l'effet des activités anthropiques dont les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, etc.



Exemple d'événement climatique extrême.

Mieux représenter les écoulements et le transfert de solutés de surface et sub-surface sur les sites d'implantation des stockages

Enjeux opérationnels

- + Garantir la sûreté des installations de surface (conception et exploitation), principalement vis-à-vis du risque inondation
- + Garantir des incidences environnementales faibles/négligeables, par conception et en phase d'exploitation, pour les stockages de surface et à faible profondeur et les installations de surface du projet Cigéo



Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser les écoulements et les phénomènes de transport en milieux spécifiques des sites d'implantation (par exemple : des karsts pour le projet Cigéo), en prenant en compte le couplage hydrologie et hydrogéologie, à l'actuel et sur toute la phase d'exploitation, et en lien avec le changement climatique

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Milieu géologique de surface

Les formations géologiques de surface et sub-surface constituent des milieux complexes à l'interface entre compartiments hydrologique et hydrogéologique. La représentation des écoulements et des flux hydrogéochimiques dans ces milieux est au cœur de la maîtrise des **impacts radiologiques** et des **incidences environnementales** pour tous les centres et projets de stockage, en lien étroit avec leur conception et leur surveillance.

La typologie de ces milieux est extrêmement variable selon les sites des stockages, la nature des roches, les champs de contraintes naturelles actuels et passés, leur localisation à l'échelle des sites et territoires d'implantation des stockages, etc. La présence de structures hétérogènes (karstification pour le projet Cigéo avec les Calcaires du Barrois sur lesquelles seront implantées les installations de surface ; fracturation, altération de surface avec les schistes et grès pour le Centre de stockage de la Manche, etc.) induit un haut niveau de complexité impliquant *de facto* la nécessité de disposer de modèles dédiés pour représenter le fonctionnement des hydro-systèmes au regard des installations de surface.

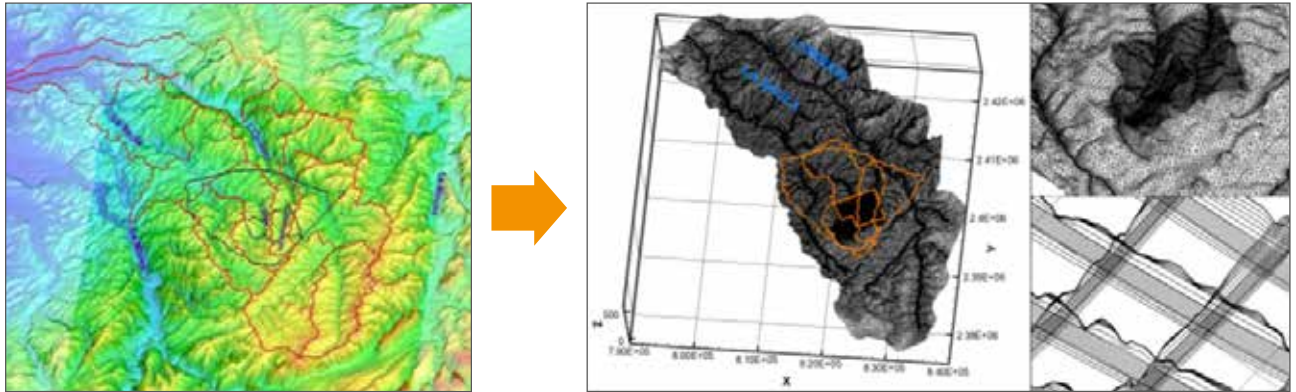
Cette complexité renvoie à la caractérisation et la modélisation des milieux géologiques discontinus (localisation et caractéristiques des fractures, des conduits/draines karstiques, etc.) et des interfaces entre la surface et les nappes souterraines et aux fonctionnements hydrogéochimiques dans un cadre **multi-échelle** (métrique à plurikilométrique) des incidences potentielles.

Cette démarche, entreprise pour les centres de surfaces (CSA, CSM, etc.) depuis de nombreuses années, se déploie actuellement pour l'hydro-système karstique des Calcaires du Barrois pour le projet Cigéo et doit se poursuivre en lien étroit avec la meilleure appréhension possible des événements rares et extrêmes climatiques à court terme, et de l'évolution climatique à moyen terme. Cela se fera au travers :

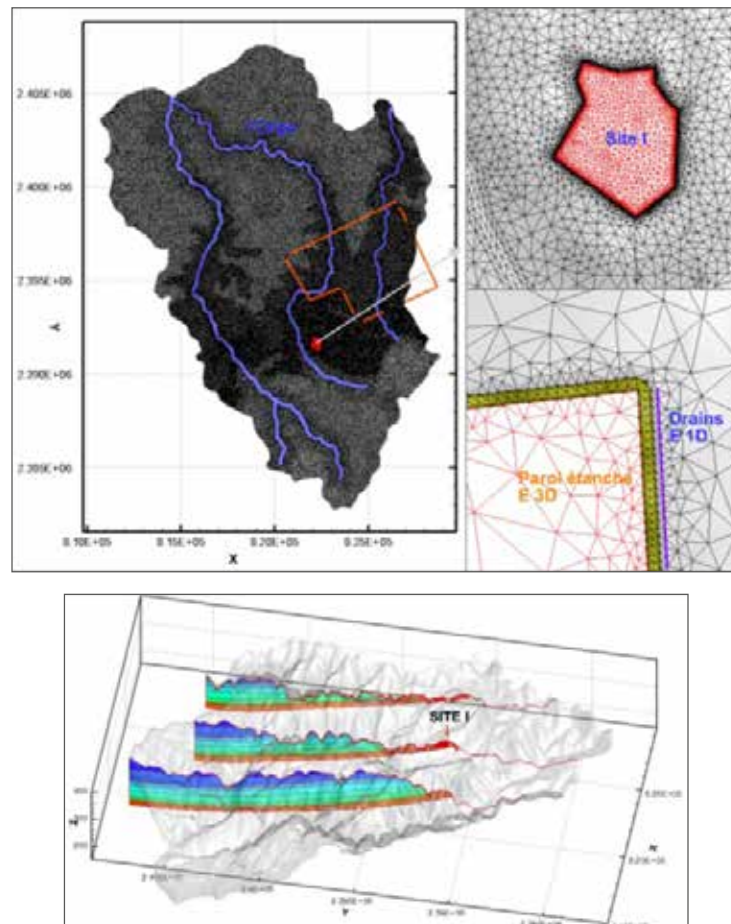
- › d'une **methodologie intégrée** alliant la caractérisation de leur structure et de leur fonctionnement jusqu'à la modélisation hydrodynamique et hydrogéochimique multi-échelle des transferts de solutés, par la mise en œuvre d'outils et de méthodes de caractérisation nouveaux et innovants (par exemple : Lidar, nouvelles méthodes géophysiques) et en adaptant/mettant en œuvre les méthodes de traitement des informations géologiques, hydrogéologiques et hydro-géo-chimiques ;
- › et de **géo-modeleur et d'outils de simulation numérique 4D performants**, capables de représenter les structures géologiques hétérogènes et les phénomènes d'interfaces (altération, fracturations), par des approches discrètes ou stochastiques, de représenter la dynamique des flux d'eau et de matières par l'implémentation d'approches milieu double/triple milieu et de conditions limites adaptatives (surface, réseau hydrographique, etc.), en intégrant le couplage avec le changement climatique et les événements climatiques extrêmes.

EXEMPLE D'APPLICATION DES COUPLAGES SURFACE/SUBSURFACE À LA SIMULATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS AU SEIN DES CALCAIRES DU BARROIS DANS LE CADRE DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO

- à l'échelle du système aquifère des Calcaires du Barrois (bassins-versants de la Saulx et de l'Ornain), en lien avec la maîtrise des impacts radiologiques et des incidences environnementales



- à l'échelle locale, au droit des descenderies et des puits d'accès, en lien avec les études d'impacts et les travaux d'ingénierie (prise en compte des structures, des drains et du réseau karstique)



Affiner les modélisations des états naturels hydraulique, mécanique et chimique des formations argileuses des sites de stockage et leur évolution sur le long terme

Enjeux opérationnels + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en après-fermeture + Optimiser la dimension technico-économique des stockages	Objectifs scientifiques + Caractériser et modéliser les processus multi-physiques naturels des formations argileuses hôtes des stockages aux différentes échelles spatiales, couplés avec les phénomènes géodynamiques internes et externes
Déchets/filières	Composants concernés
+ Majoritairement le projet Cigéo	+ Callovo-Oxfordien • Optimisation du dimensionnement thermique des quartiers de déchets HA (et de combustibles usés en adaptabilité) • Marge de sûreté en après-fermeture vis-à-vis de la fracturation au gaz

Les formations argileuses sont caractérisées par des états initiaux hydraulique, mécanique et chimique complexes (existence d'éventuelle surpression, champ de contraintes mécaniques naturelles anisotrope, champ d'état redox pour les formations affleurantes ou en sub-surface, etc.) hérités de leur histoire géologique. C'est le cas de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien du centre de stockage Cigéo caractérisée par une surpression interstitielle et un champ de contraintes naturelles anisotrope et variable en vertical.

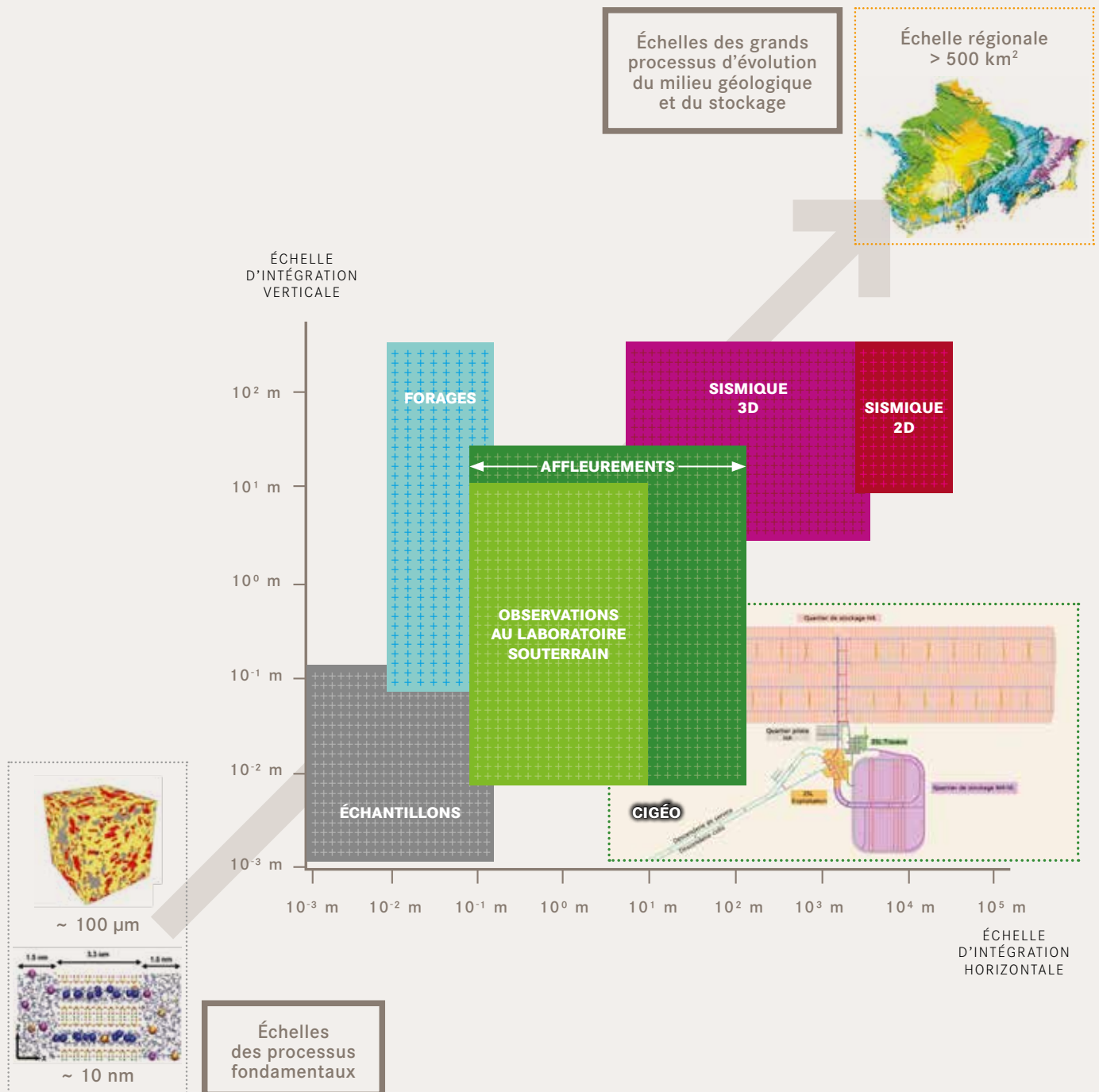
Ces états initiaux qui témoignent des caractéristiques des formations argileuses sur lesquelles reposent la capacité du milieu géologique à accueillir un stockage et en assurer la sûreté après-fermeture (faible perméabilité, etc.) sont difficiles à appréhender car ils mettent en jeu des processus physico-chimiques multi-couplés et multi-échelles (du pore à la formation argileuse et au site géologique en grand).

L'effort de recherche mené jusqu'à présent sur ces états initiaux a porté sur leur caractérisation macroscopique en support à leur représentation enveloppe et prudente dans la conception des stockages et leur sûreté après-fermeture, plus particulièrement vis-à-vis :

- des sollicitations thermique, mécanique et hydraulique-gaz (cf. domaine de fracturation de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien sous sollicitation thermique et gaz, dans le cadre du dimensionnement thermique du centre de stockage Cigéo ou le transitoire hydraulique-gaz en après-fermeture) ;
- des écoulements d'eau et de la migration des radionucléides et toxiques chimiques (cf. représentation de la surpression dans le Callovo-Oxfordien comme étant totalement d'origine hydraulique).

Il sera nécessaire d'obtenir une meilleure représentation de ces états initiaux (origine, nature et champ de distribution dans l'espace) et de leur évolution sur le long terme pour optimiser la conception des stockages dans les formations argileuses et la quantification précise des marges de sûreté en après-fermeture. Cela se fera en travaillant la représentation des phénomènes couplés hydromécanique et chimique aux petites échelles, en relation avec les phénomènes à grande échelle (géodynamiques interne et externe).

**VISUALISATION DE L'APPROCHE MULTI-ÉCHELLE SPATIALE
EN SUPPORT À LA COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES NATURELS
DE BASE DES FORMATIONS ARGILEUSES**





Améliorer la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages, de l'exploitation à l'après-fermeture

L'intégration des connaissances scientifiques et technologiques est au cœur du métier de l'Andra dans son rôle d'architecte ensemblier des différents stockages. Cette représentation intégrée constitue – à travers la caractérisation, la modélisation et la simulation numérique des phénomènes multi-physiques et de leurs couplages – la pierre angulaire de la description du fonctionnement phénoménologique des stockages dans le temps, en support aux activités de conception, de réalisation, d'exploitation, de surveillance et de sûreté.

Depuis 30 ans, la R&D de l'Andra a progressivement évolué d'une acquisition des connaissances de base avec des approches souvent mono-disciplinaires (géologie, géomécanique, etc.) vers l'intégration multi-physique des phénomènes couplés [thermique, hydraulique, (géo)mécanique, chimie, etc.] pour approcher au plus près la réalité du fonctionnement des stockages. La spécificité des stockages de déchets radioactifs implique de traiter ces couplages multi-physique à la fois sur les temps courts associés à la phase de fonctionnement des installations et sur les temps longs, de quelques centaines d'années pour les stockages de surface à quelques centaines de milliers d'années pour Cigéo.

En lien avec cette intégration multi-physique, la R&D de l'Andra a évolué d'une R&D à l'échelle du matériau vers une R&D à l'échelle du composant (déchets/colis de stockage, alvéoles/ouvrages, galeries remblayées et scellements, milieu géologique, environnement de surface) et du stockage en interaction avec son environnement. Pour le centre de stockage Cigéo, cet effort s'est notamment appuyé sur le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne où sont développées depuis quelques années

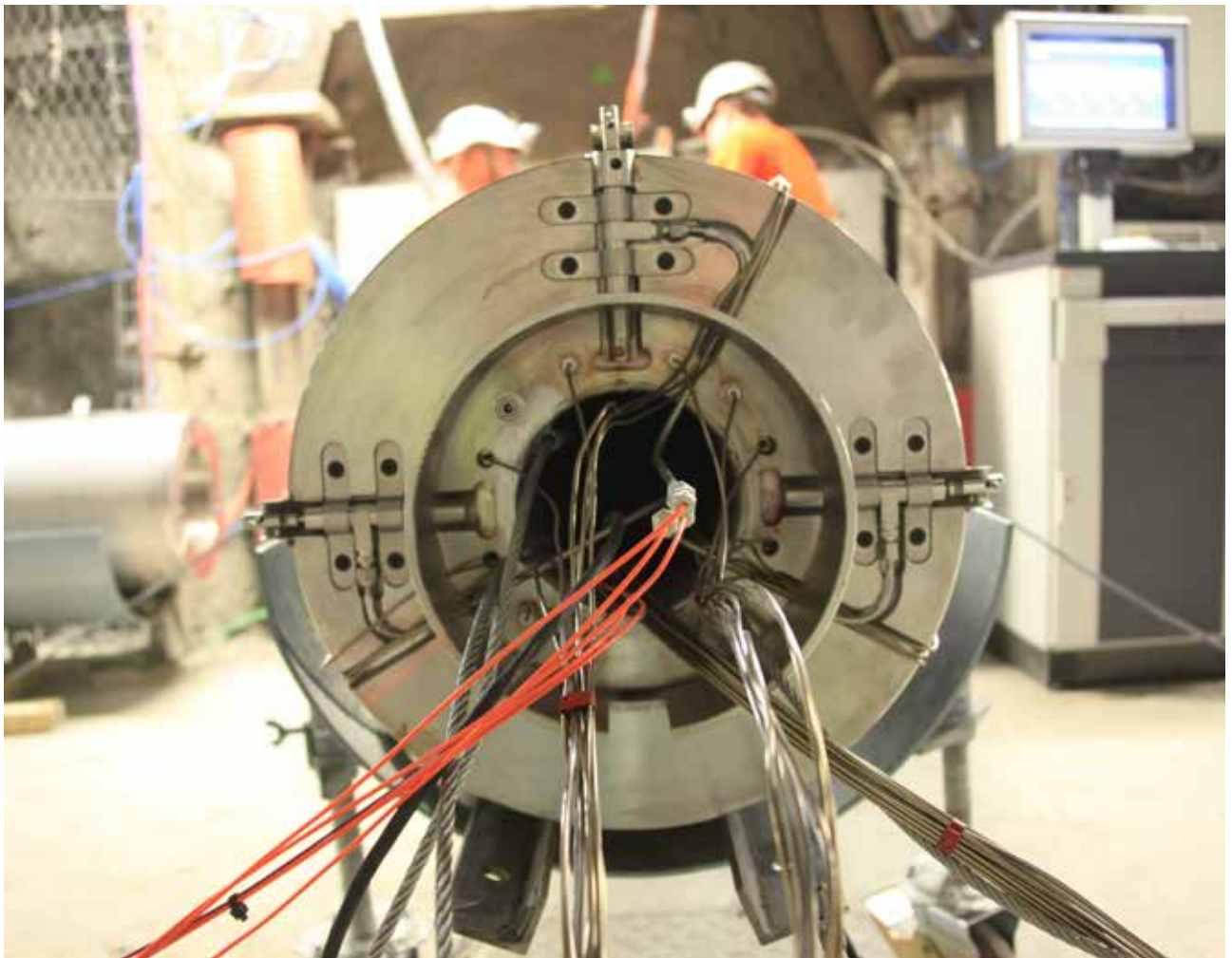
des expérimentations intégrées à des échelles de plus en plus représentatives du stockage. Un effort similaire a été mené sur la simulation numérique de l'évolution phénoménologique du stockage depuis la période d'exploitation jusqu'à après sa fermeture, avec le développement d'outils capables de rendre compte de processus à l'échelle du stockage.

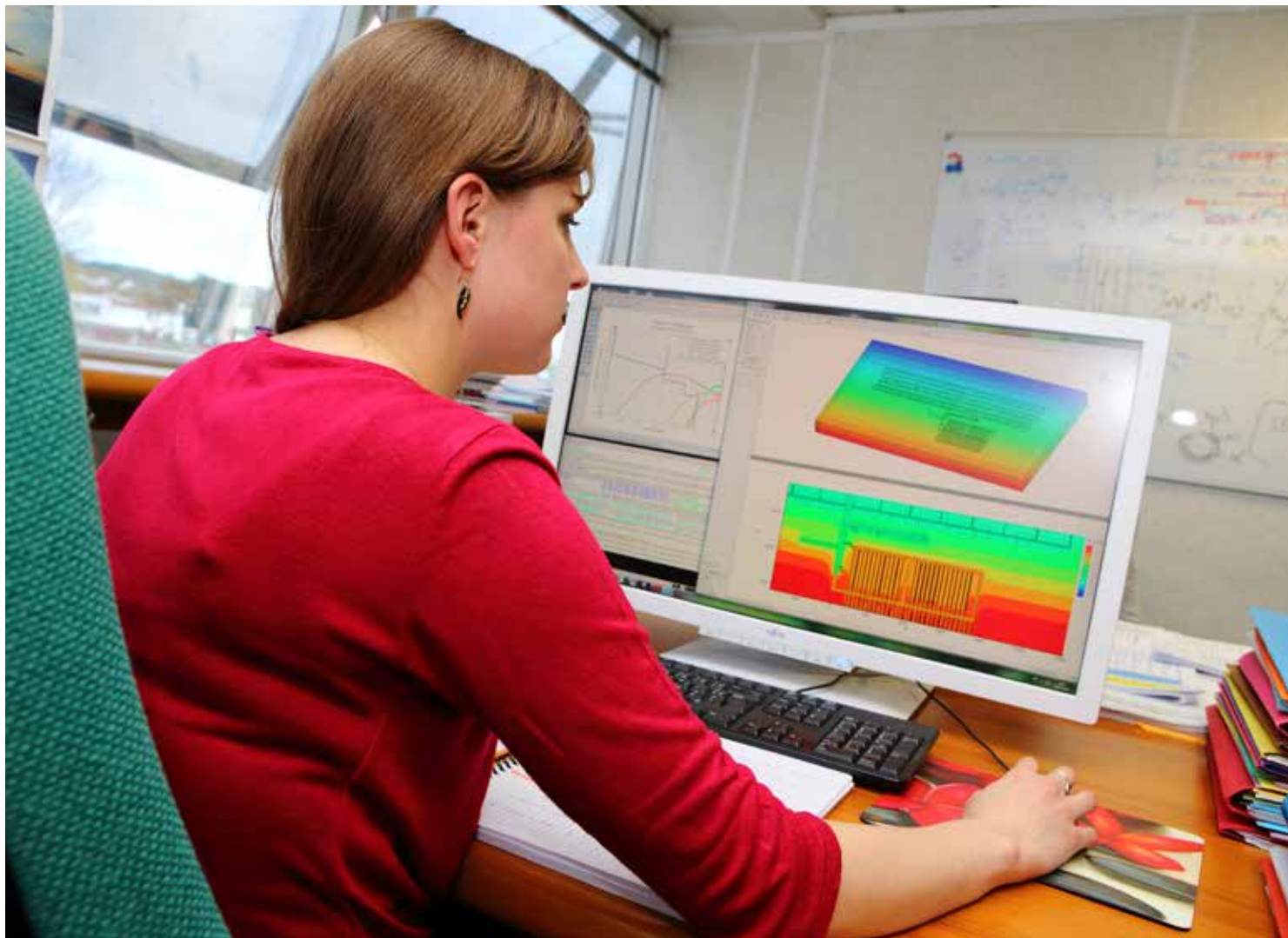
Grâce aux travaux réalisés ces dernières années, l'Andra dispose de solides acquis, notamment sur les couplages binaires, et d'éléments macroscopiques suffisants à ce stade, pour la conception d'un stockage et pour l'évaluation de sûreté après-fermeture. C'est notamment le cas de l'hydraulique couplé ou non à la thermique, du transport de soluté en milieu poreux saturé ou non saturé, du transfert diphasique eau-gaz (radionucléides gazeux inclus) en milieu poreux et du transport réactif en milieu poreux. Ces processus et couplages sont aujourd'hui bien appréhendés et ont été intégrés dans des outils de simulations permettant ainsi par exemple de réaliser le dimensionnement thermique du quartier de stockage HA du centre de stockage Cigéo, le dimensionnement mécanique et hydraulique des ouvrages de fermeture du centre de stockage Cigéo, ou de décrire le transfert en non saturé des radionucléides gazeux (tritium) pour le Centre de stockage de l'Aube. Au regard du niveau de caractérisation et des capacités des outils de simulation numérique, cette évaluation des grands processus couplés du fonctionnement des stockages par composant est aujourd'hui réalisée encore « par partie », de manière simplifiée ou découplée analytiquement au préalable (couplages thermo-hydro-mécanique, hydraulique-gaz, chimie-transport) et dans une logique de milieu poreux continu équivalent.

L'optimisation technico-économique des stockages et des filières de gestion des déchets au sens large, la quantification précise des marges de conception et de sûreté, le besoin de partager et de dialoguer avec les parties prenantes sur la base d'une description du fonctionnement des stockages au plus près de la réalité, notamment en phase d'exploitation, renvoient à un besoin affirmé de mettre en œuvre une approche de plus en plus intégrée et couplée des processus physico-chimiques qui sous-tendent le fonctionnement phénoménologique des stockages.

Cette intégration s'entend à plusieurs niveaux :

- la gestion des multi-échelles (temps et espace), des temps de l'exploitation au million d'années, de l'échelle du pore à celui des bassins-versants pour le projet Cigéo ;
- la gestion des multi-couplages avec, lorsque cela est pertinent, un effort de traitement le plus explicite possible (par opposition aux méthodes de couplages implicites ou indirectes plus classiquement mises en œuvre à ce jour).





De plus, la description du fonctionnement des stockages au plus près de la réalité nécessitera de prendre en compte explicitement des milieux discrets de type fracturés ou ouverts.

Cette approche doit être en mesure d'intégrer dans la représentation conceptuelle du fonctionnement et de l'évolution des stockages la réalité de l'ouvrage « tel que construit » et d'accéder à une capacité de représentation géométrique (gestion des échelles d'espaces), temporelle (gestion des échelles de temps) et physico-numérique (en particulier les multi-couplages) toujours plus fine (c'est-à-dire moins conservative) des phénomènes. Cette évaluation plus précise de la pertinence des marges prises, 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 du Callovo-Oxfordien) permettra d'optimiser le dimensionnement et l'emprise des stockages et de représenter plus finement l'évolution phénoménologique des stockages.

L'accroissement de l'intégration constitue plus particulièrement un enjeu pour mieux accompagner l'exploitation des centres de stockage dans la surveillance des installations, l'optimisation de la maintenance

des installations, la vérification que leur fonctionnement est conforme au domaine prévu en lien avec les règles générales d'exploitation et l'anticipation de l'effet d'une décision de gestion de l'installation sur son évolution future. Elle permet ainsi de mieux représenter les phénomènes qui vont se produire et d'être en mesure de prendre, le cas échéant, des dispositions correctives et de contribuer à la décision de passage d'une opération de stockage à une autre jusqu'à la fermeture *in fine* des installations. Cet accroissement de l'intégration va de pair avec la transformation numérique des stockages, au travers notamment du développement des jumeaux numériques (cf. « Poursuivre le déploiement de la transition numérique et des outils 4.0 de l'observation/surveillance des stockages »).

En conséquence, les grandes orientations de la R&D de demain sur l'intégration multi-physique et multi composant couvrent un ensemble de processus couplés au cœur du fonctionnement des stockages, tant en exploitation qu'en après-fermeture, alliant physique, modélisation et simulation numérique, en lien avec les observations à échelle 1 pour les centres de stockage existants, et le Laboratoire souterrain puis la phase industrielle pilote du centre de stockage Cigéo, à un horizon de 10-20 ans.



L'évolution phénoménologique multi-physique et multi-composant des stockages

De manière générale, l'évolution phénoménologique d'un stockage est caractérisée par un ensemble de processus ayant chacun différentes échelles de temps et d'espace, couplés ou non, et affectant tout ou partie des composants du stockage, en particulier ceux contribuant à sa sûreté. La conception du stockage et l'évaluation de sa sûreté prennent en compte ces processus et les incertitudes associées, suivant une démarche itérative, afin de s'assurer que la sûreté du stockage est garantie. Ainsi cette boucle peut viser la mise en œuvre de dispositions de conception permettant de limiter l'amplitude, les extensions spatiales et/ou temporelles des processus et d'accroître leur maîtrise et leur représentation.

Pour tous les types de stockage, la représentation de l'évolution phénoménologique d'un stockage ne cherche ni l'exhaustivité, ni le détail comme une représentation fine en 3D de l'ensemble des composants et des processus. Tout en visant à garantir une cohérence d'ensemble, elle s'attache aux composants/processus à forts enjeux (enjeux de sûreté, enjeux opérationnels, enjeux technico-économiques, etc.).

L'amélioration de la représentation multiprocessus et multi-composants des stockages s'adresse ainsi à un ensemble de processus précis :

COMMUNS AUX DIFFÉRENTS STOCKAGES, PAR EXEMPLE :

› L'hydraulique-gaz et le transport de soluté en non saturé

Évaluation de sûreté des différents stockages, notamment tritium et carbone 14 (quantification des marges de sûreté), évaluation du risque ATEX (optimisation technique pour accroître la sûreté d'exploitation), etc.

› La mécanique couplée à la dégradation chimique

Conception et/ou évaluations de performance des structures cimentaires (colis, revêtements/soutènements, carrefours, ouvrages des centres de surface, etc.), des composants métalliques et des ouvrages de fermeture, etc., en lien avec la durabilité des composants des stockages, optimisation technico-économique et accroissement de la sûreté.

› L'hydrogéologie couplée aux évolutions géodynamiques interne et externe dans le temps

Évaluations de sûreté en après-fermeture, conception et surveillance des technosols (couvertures, verses), études d'impacts, etc.

› Le transport réactif complexe, saturé et non saturé

Évaluations de sûreté en après-fermeture : représentation au plus près de la réalité de l'évolution chimique des ouvrages de stockage incluant les termes sources radionucléides des différents déchets et les perturbations, etc.

› L'érosion couplée à l'évolution climatique

Durabilité des couvertures des stockages de surface et à faible profondeur, études d'impacts, etc., en lien avec le fléchage des déchets, optimisation technico-économique, quantification des marges de sûreté en après-fermeture.

PROPRES À UN TYPE DE STOCKAGE, COMME POUR LE PROJET CIGÉO :

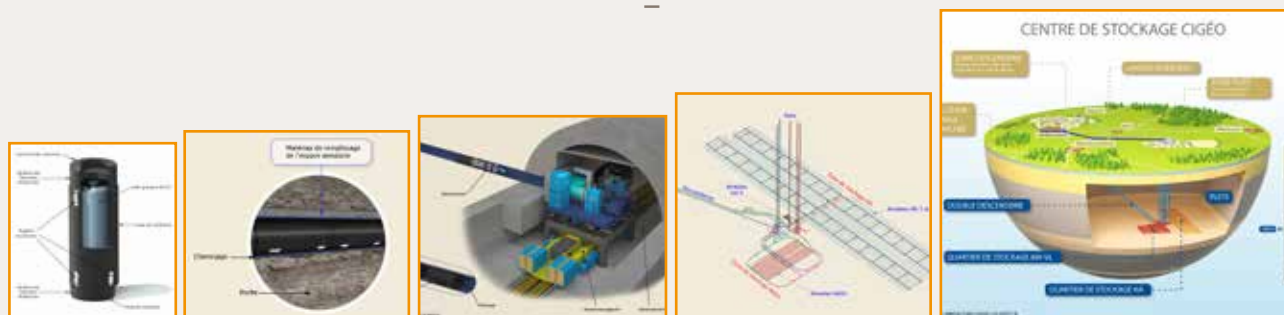
› Le couplage THM du Callovo-Oxfordien à grande échelle

Optimisation du dimensionnement thermique du centre de stockage Cigéo (optimisation technico-économique).

› Le couplage hydraulique-gaz et mécanique à grande échelle du centre de stockage Cigéo

Conception des ouvrages de fermeture (quantification et accroissement des marges de sûreté en après-fermeture).

VISUALISATION DES MULTI-COMPOSANTS ET MULTI-PHYSIQUES (PAR EXEMPLE : UN ALVÉOLE HA DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO)



Multi-composants

- Colis et ses composants (déchet, conteneur, etc.)
- Alvéoles, galeries, scellements
- Quartiers, zones de stockage
- Milieu géologique multi-couches

Multi-matériaux

- Verre
- Matériaux métalliques, etc.
- Béton, matériaux à base d'argile
- Milieu hôte : argiles, marnes, calcaires, karsts, etc.

Multi-échelles spatiales

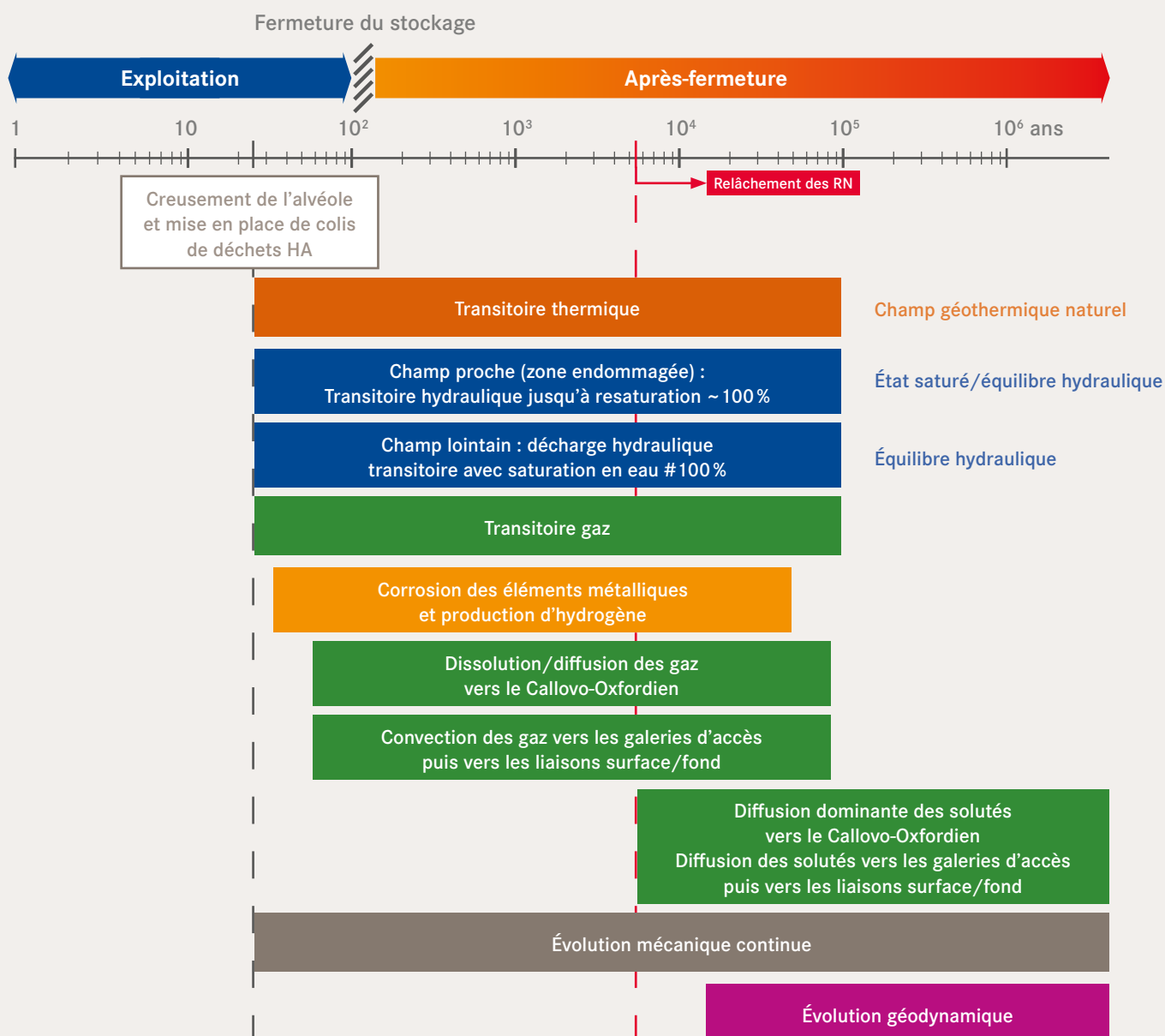
- inférieur au cm (déchets)
- ↓ 7 ordres de grandeur
- plusieurs centaines de km (milieu géologique)

Multi-processus physiques

- Exemple d'un alvéole HA en champ proche

Multi-échelles temporelles

- 6 ordres de grandeur



Préciser les dynamiques d'évolutions futures des sites de stockage en surface et à faible profondeur à l'échelle pluriséculaire

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en après-fermeture pour les sites de stockage en surface et à faible profondeur
- + Accompagner un fléchage des déchets FA-VL adapté à un site à faible profondeur (conception, étude d'impacts, sûreté, etc.)
- + Concevoir les couvertures des stockages afférents proportionnés à la dangerosité des déchets

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser les couplages géochimie, climatologie, (hydro)mécanique appliqués aux couvertures et environnements géologiques des sites de stockage en surface et à faible profondeur
- + Disposer des méthodes et des outils numériques robustes, efficaces et adaptés au multi couplage et aux différentes échelles de temps et d'espace concernées (calcul haute performance, gestion de maillages adaptatifs, etc.)

Déchets/filières

- + Sites de stockage en surface et à faible profondeur

Composants concernés

- + Couvertures et environnements géologiques
 - Modélisation des écoulements de surface (organisation des voies de transfert, risque inondation et ruissellement, etc.)
 - Conception des technosols (incidences environnementales, vieillissement, etc.)

La géodynamique externe, à une échelle de temps pluriséculaire, constitue un élément important pour la conception et la sûreté des centres de stockage de surface.

Ainsi, une représentation plus fine et plus continue des couplages entre la géodynamique externe (évolutions climatiques, érosion) et les conditions hydrogéologiques et hydrologiques permettra d'affiner les modèles prédictifs d'écoulement de surface (réseau hydrographique et bassin-versant, remontée de nappe) vis-à-vis de la gestion du risque inondation et ruissellement (intégration d'événements climatiques extrêmes), en support aux études d'impact, de sûreté en exploitation et à la conception (quantification des marges incluses). Ceci permettra également de mieux quantifier l'organisation des voies de transfert des radionucléides en support à la sûreté en après-fermeture et à la quantification des marges de sûreté nécessaires. Ces travaux impliquent de développer des méthodes et des outils numériques performants, tels que par exemple la gestion de maillages adaptatifs pour représenter la modification de l'hydrologie et de la topographie aux échelles adaptées.

L'autre enjeu important des couplages avec la géodynamique externe concerne la représentation de l'évolution dans le temps des technosols (couvertures, verses) constitués de roches argileuses excavées. Ainsi, l'amélioration des représentations chimie-transport dans une logique d'ouvrages industriels impliquant des phasages opérationnels (entreposage, montage par paliers et compactage, végétalisation progressive, etc.) permettra d'agir sur leur conception (géométrie, compaction, végétalisation, etc.) afin de limiter les incidences environnementales liées à leur altération (oxydation, lixiviation, etc.). Dans le cas particulier des performances hydrauliques des couvertures des stockages en surface et à faible profondeur, cela

se traduira par le développement d'une meilleure représentation de leur évolution hydromécanique et géochimique à long terme vis-à-vis de la géodynamique externe, intégrant également le vieillissement des ouvrages de stockage. Ce développement permettrait d'une part d'optimiser la conception des couvertures et de dégager ainsi d'éventuelles marges de sûreté lors du passage en post-surveillance en garantissant le même niveau de performance sur le long terme et, d'autre part, de préciser le programme de surveillance en lien avec la jouvence des couvertures.



**VISUALISATION DES EFFETS DE LA GÉODYNAMIQUE EXTERNE
SUR LES ENVIRONNEMENTS GÉOLOGIQUES DE SURFACE : EXEMPLE DES EFFETS
DES CYCLES DE GEL/DÉGEL EN PÉRIODE GLACIAIRE SUR LES CALCAIRES DU BARROIS**



Calcaires du Barrois – fracturation par gélifraction.



Calcaires du Barrois – déstructuration par gélifraction et cryoturbation.



Craies de la Région de l'Aube – déstructuration par cryoturbation.

Développer une représentation plus explicite et plus intégrée des transferts de fluides intégrant l'évolution chimique des composants

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en après-fermeture
- + Accroître la maîtrise du risque ATEX en exploitation
- + Optimiser la conception des ouvrages de fermeture, principalement pour le centre de stockage Cigéo (remblais et scellements)
- + Concevoir les couvertures des centres de surface proportionnées aux enjeux de sûreté des déchets considérés, notamment en termes de durabilité
- + Accompagner le fléchage des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser les transferts de fluides (échanges gazeux/hydraulique-gaz) et les couplages avec les processus chimiques (milieux poreux équivalents, milieux double porosité, etc.)
- + Disposer des méthodes et des outils numériques robustes, efficaces et adaptés au multi couplage et aux différentes échelles de temps et d'espace concernées (calcul haute performance, gestion de maillages adaptatifs, etc.)

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Projet Cigéo : alvéoles de stockage et ouvrages de fermeture de Cigéo ; stockages de surface et à faible profondeur : ouvrages et couvertures
 - Optimisation des ouvrages de fermeture du centre de stockage Cigéo vis-à-vis du transitoire hydraulique-gaz
 - Adapter la conception des couvertures aux enjeux des différents déchets/filières

Au sein du centre de stockage Cigéo, les transferts de fluides interviennent à la fois pendant la phase d'exploitation et en après-fermeture.

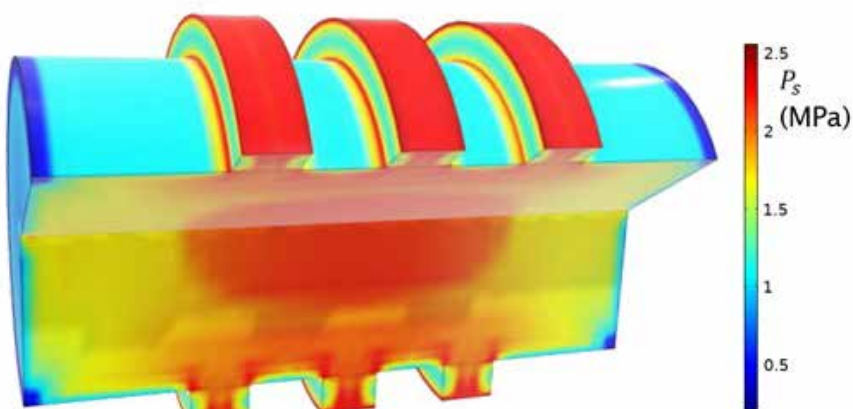
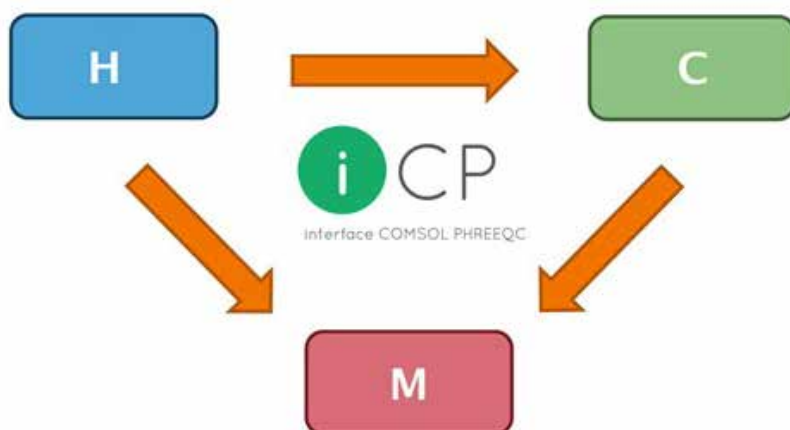
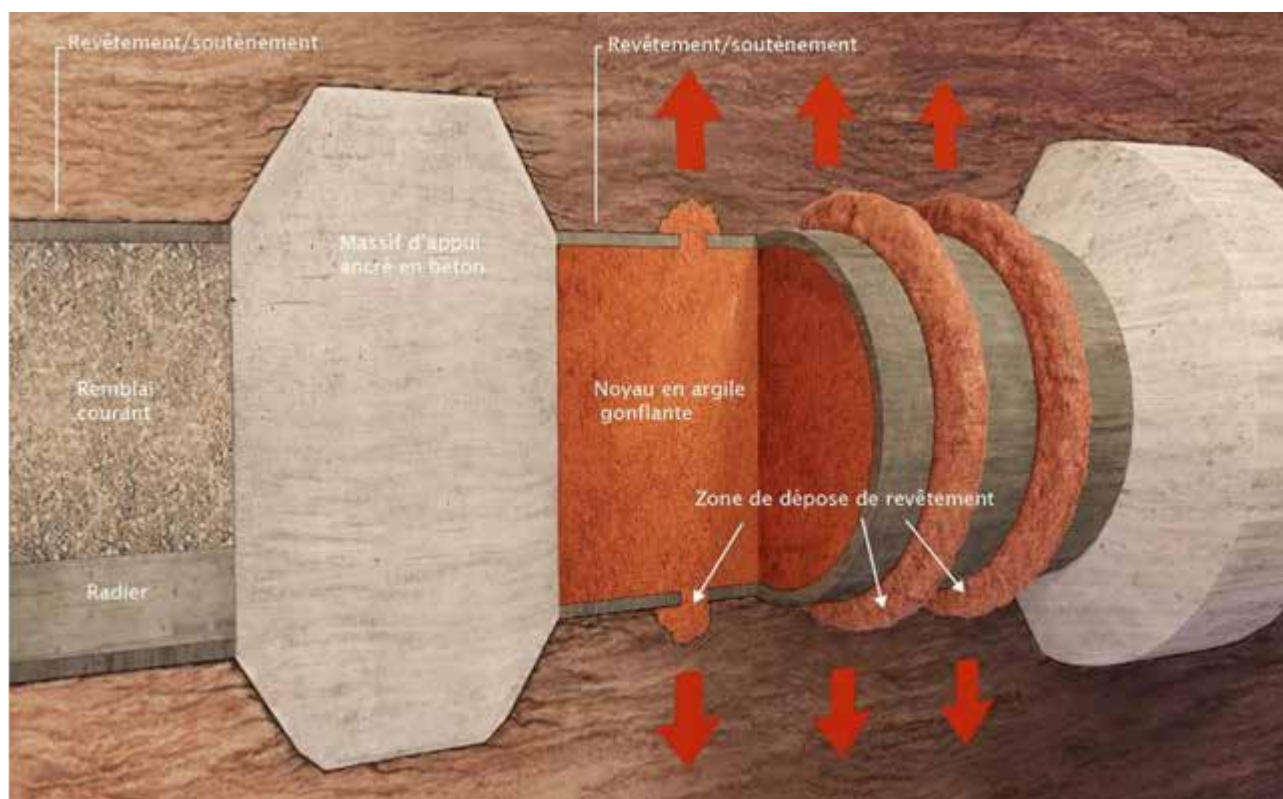
Durant la phase d'exploitation, une meilleure description et quantification du vieillissement des ouvrages sous l'effet de l'évolution des conditions thermo-hydrauliques nécessite une meilleure représentation des échanges gazeux/de masse entre l'air de ventilation (milieu ouvert) et les milieux poreux fracturés (couplage Darcy/Navier Stokes). Ceci permettra également de préciser les conditions de maîtrise du risque ATEX, ainsi que les marges de conception afférentes.

En après-fermeture, la représentation plus fine du transitoire hydraulique-gaz constitue un enjeu vis-à-vis de l'optimisation de la conception des ouvrages de fermeture et de la description de leurs performances à long terme. L'optimisation des ouvrages de fermeture implique une meilleure représentation (i) des milieux endommagés (zone fracturée, ouvrages fissurés) avec, si nécessaire, la prise en compte

du couplage explicite avec la mécanique, et (ii) des discontinuités de différentes natures : jeux, interfaces, matériaux non poreux. Il convient également de prendre en compte les interfaces avec les matériaux ouvragés cimentaires en intégrant les perturbations chimiques qu'ils engendrent au contact des composants argileux des galeries remblayées (argilite, etc.) et des scellements (noyau argileux).

Dans le cas des stockages de surface et à faible profondeur, il s'agit de préciser l'évolution hydromécanique des couvertures argileuses ainsi que celle de leurs propriétés de transfert, en lien avec les perturbations chimiques qui les affectent (saline, alcaline, organique, etc.) ainsi que l'évolution hydraulique-gaz (en termes de pression de gaz et de saturation en eau). Ces travaux visent d'une part à adapter la conception des couvertures aux différents stockages, permettant ainsi de garantir leurs performances sur le long terme, et d'autre part à éclairer l'orientation de certains déchets vers les filières de gestion adaptées et proportionnées.

EXEMPLE DE LA PRISE EN COMPTE DES COUPLAGES ENTRE PROCESSUS HYDRIQUES, CHIMIQUES ET MÉCANIQUES (HCM) DANS LE CAS D'UN SCELLEMENT DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO POUR QUANTIFIER À L'ÉCHELLE DE L'OUVRAGE LA PRESSION DE GONFLEMENT EXERCÉE PAR LE NOYAU ARGILEUX SOUS L'INFLUENCE DE LA PERTURBATION ALCALINE PROVENANT DES BÉTONS



Caractériser les processus chimiques complexes aux interfaces

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en après-fermeture
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages
- + Accompagner le fléchage des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux
- + Accompagner l'adaptabilité du centre de stockage Cigéo

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser le couplage entre transfert des solutés en non saturé et saturé, processus chimiques et spéciation des radionucléides (par exemple : comportement des déchets en stockage et relâchement/migration des radionucléides)
- + Caractériser et modéliser la dynamique des systèmes chimiques complexes et hors équilibre
- + Disposer des méthodes et des outils numériques robustes, efficaces et adaptés au multi-couplage et aux différentes échelles de temps et d'espace concernées (calcul haute performance, gestion de maillages adaptatifs, etc.)

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Projet Cigéo : déchets, alvéoles de stockage, ouvrages de fermeture et milieu géologique ; stockages (projets de stockage) de surface et à faible profondeur : alvéoles, couvertures et environnements géologiques
 - Vision intégrée et dynamique des transferts dans les environnements proches des stockages en appui à la démarche environnementale intégrée
 - Meilleure quantification des marges de sûreté en après-fermeture vis-à-vis du comportement des composants en situations de stockage (altération des déchets, dégradation des matériaux, transfert des radionucléides et des toxiques chimiques, etc.)

Les stockages de déchets radioactifs comprennent de nombreuses interfaces entre des composants de natures diverses, par exemple le milieu géologique ou l'environnement de surface où intervient une chimie complexe qui constitue le cadre du transfert des radionucléides et des toxiques chimiques.

En support aux évaluations réglementaires d'impacts sanitaires sur les populations, la maîtrise approfondie du devenir des radionucléides et des composés chimiques dans les environnements proches des installations de stockage jusqu'au vivant (*human* et *non human biota*) s'inscrit au sein d'une démarche environnementale intégrée. Les systèmes de surface et sub-surface où sont ou seront implantées des installations de stockage (CSA, CSM, Cires, troisième centre, etc.) sont au cœur de cette démarche. Ces milieux constituent des systèmes complexes et dynamiques de par leurs interfaces avec l'atmosphère,

le réseau hydrographique, les aquifères souterrains et la biosphère dans son ensemble. Si les modèles stylisés de représentation des transferts dans l'environnement satisfont aujourd'hui les évaluations réglementaires d'impacts sur les populations (et *non human biota*), le développement d'une vision intégrée et dynamique des transferts (hydrogéologie, spéciation des radionucléides, biogéochimie, évolution géomorphologique, etc.) permettrait de mieux préciser le devenir des radionucléides et des composés chimiques dans les environnements proches des stockages en support aux outils conventionnels de calcul de dose et d'en objectiver ainsi les résultats.

Les stockages de déchets, quant à eux, sont le siège de phénomènes chimiques qui sont tout d'abord influencés par le transitoire hydraulique (conditions insaturées) puis par les interactions entre les différents matériaux en interface, dont les déchets.

L'accroissement de la capacité des modèles existants à représenter les phénomènes chimie/transport en conditions insaturées, en particulier les processus liés à la réactivité des gaz (O_2 , CO_2 , vapeur d'eau, etc.), aux équilibres minéraux, à la mobilité des solutés et des fluides constitue un enjeu vis-à-vis d'une description plus fine de l'évolution dans le temps de la dégradation des matériaux des stockages, de l'extension des perturbations chimiques et du transfert des radionucléides (dissous et volatils) à proximité des déchets et des alvéoles/ouvrages de stockage. Plusieurs situations de stockages sont concernées (le fonctionnement hydrogéochimique des alvéoles/ouvrages de stockage pour les différents stockages de l'Andra, les relâchements diffus en radionucléides des ouvrages du CSA, etc.). Ces développements permettront de bâtir des scénarios de fonctionnement plus réalistes et donc moins enveloppes.

La connaissance de l'altération en stockage des déchets de haute activité repose sur plus de 20 ans de R&D, qu'il s'agisse des déchets vitrifiés HA ou des combustibles usés. Il subsiste encore quelques thématiques de recherche sur le comportement intrinsèque de ces déchets (vitesse résiduelle d'altération des déchets vitrifiés HA en lien avec leur auto-irradiation, fraction labile (IRF) des MOX en lien avec la tenue mécanique dans le temps des amas de plutonium). Cependant, les enjeux de demain portent principalement sur le développement de modèles couplés intégrant les interactions des déchets avec leur environnement (matériaux métalliques, matériau de remplissage à base cimentaire), à travers notamment les évolutions du pH, du redox et la formation des différents produits de corrosion, ainsi que le couplage avec le transitoire hydraulique-gaz. Ces modèles viseront par ailleurs à représenter plus finement la complexité de ces déchets comme par exemple, la fracturation des déchets vitrifiés, avec, pour enjeu, l'adaptation des marges actuellement considérées dans les évaluations de sûreté.

Au voisinage des déchets, la modélisation plus fine des processus de mobilisation/immobilisation des radionucléides nécessite de lever des verrous scientifiques sur la dynamique des systèmes complexes loin de l'équilibre chimique et impliquant des processus de précipitation/coprécipitation de matière. Ces développements viennent en support des études sur la reconcentration de matière fissile vis-à-vis des risques de criticité en après-fermeture (prise en compte des milieux ouverts) menées dans le cadre des études d'adaptabilité (cas des combustibles usés).

Les effets de chaque perturbation chimie résultant de l'inventaire des déchets (sels, organiques) sont aujourd'hui bien compris et les travaux futurs visent à mieux appréhender les effets conjugués de ces perturbations (approche *bottom up* de caractérisation et de modélisation alimentée par le développement des bases de données thermochimiques et des conceptualisations numériques) sur le transfert des radionucléides dans le cadre de l'évolution hydromécanique des stockages. Il s'agit ainsi de consolider les évaluations relatives au fonctionnement des alvéoles de stockages en support aux évaluations de sûreté, à la conception des stockages (FA-VL, matières) et à l'adaptabilité des stockages (bitumes).

La migration des radionucléides et des toxiques chimiques dans la géosphère et son interface avec la biosphère est une thématique « cœur de métier » de l'Andra qui a mobilisé des moyens de R&D importants depuis de nombreuses années en support à la conception et à la démonstration de sûreté de l'ensemble des stockages et projets de stockage. Les connaissances acquises sont nombreuses et concernent une variété de systèmes et situations de stockage. La capitalisation et l'intégration de ce socle de connaissance ont permis de développer une vision applicable à chacun des stockages pour répondre à leurs différents besoins (mise à jour des évaluations de sûreté, nouveau projet de stockage, projet d'extension, acceptation de nouveaux inventaires, etc.). Les développements de demain se veulent être au plus près de l'évolution dans le temps et dans l'espace des stockages pilotés par un ensemble de phénomènes multi-physiques.

Dans ce domaine, la R&D développée par l'Andra et ses homologues évolue progressivement du comportement intrinsèque des roches et des matériaux vers des mises en situation de stockage et la prise en compte de l'ensemble des sollicitations hydro-mécaniques et chimiques externes ou induites par le stockage. Il s'agira ainsi par exemple (i) d'affiner la modélisation des processus d'interactions long terme proches de l'équilibre (incorporation dans les phases solides, processus de sorption-réduction à cinétique lente, etc.), en support à la justification des marges pour les évaluations de sûreté se développant sur plusieurs milliers à centaines de milliers d'années notamment pour les radionucléides mobiles à vie longue qui sont les principaux contributeurs à la dose, (ii) d'améliorer le traitement temps-espace des phénomènes redox (induits par le stockage, par la présence de transitions naturelles ou la présence de phénomènes biotiques) et des effets induits de la spéciation et du transport des radionucléides et des toxiques chimiques, pour les éléments chimiques sensibles au redox et à spéciations multiples, en support à la conception des futurs stockages et aux évaluations de sûreté en après-fermeture.

Développer la multi-physique de la rupture et de sa propagation

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et des marges de dimensionnement/sûreté
- + Optimiser la conception des stockages d'un point de vue technico-économique (par exemple : dimensionnement thermique du centre de stockage Cigéo)
- + Accroître la maîtrise du risque ATEX en exploitation

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser les processus couplés de rupture et de sa propagation, propres aux différents milieux concernés (formations argileuses, composants béton, métalliques, etc.) aux différentes échelles spatiales afférentes
- + Disposer des méthodes et des outils numériques robustes, efficaces et adaptés au multi-couplage et aux différentes échelles de temps et d'espace concernées (calcul haute performance, gestion de maillages adaptatifs, etc.)

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Projet Cigéo : conteneurs, alvéoles de stockage, ouvrages de fermeture et milieu géologique ; stockages (projets de stockage) de surface et à faible profondeur : alvéoles, couvertures et environnements géologiques
 - Optimisation du dimensionnement thermique du quartier HA
 - Accroissement des marges de sûreté en après-fermeture vis-à-vis de la rupture de composants des stockages (par exemple : le Callovo-Oxfordien vis-à-vis du gaz)

La multi-physique de la rupture constitue un enjeu pour les stockages vis-à-vis de l'endommagement du milieu géologique et de la durabilité des matériaux ouvragés cimentaires et métalliques.

Le creusement des ouvrages du centre de stockage Cigéo induit la création d'une zone endommagée, résultant de l'apparition de fissures et de leur propagation en périphérie des ouvrages. Une meilleure représentation de ces processus, notamment au niveau des points singuliers (intersections, carrures, etc.), intégrant les perturbations thermo-hydro-mécanique et hydraulique-gaz, permettrait d'optimiser la conception des soutènements/revêtements et des entraxes des alvéoles HA, et de dégager des marges de sûreté vis-à-vis de la fracturation au gaz.

La représentativité des transferts eau/gaz et de leurs conséquences sur les ouvrages de fermeture au regard du transitoire hydraulique/gaz bénéficierait ainsi (i) d'une meilleure représentation de l'évolution des propriétés hydromécaniques des zones endommagées sous les différentes sollicitations (hydrique, thermique, hydraulique/gaz, chimique), et en particulier de l'auto-colmatage, et (ii) de la prise en compte explicite des discontinuités.

En ce qui concerne l'optimisation du dimensionnement du quartier HA, et donc de l'emprise du stockage, les gains potentiels futurs résulteront d'une meilleure représentation de l'endommagement diffus du Callovo-Oxfordien (modèles pré-pic non linéaires, etc.) et

d'une caractérisation plus poussée des paramètres thermo-hydro-mécaniques associés (coefficient de Biot, etc.).

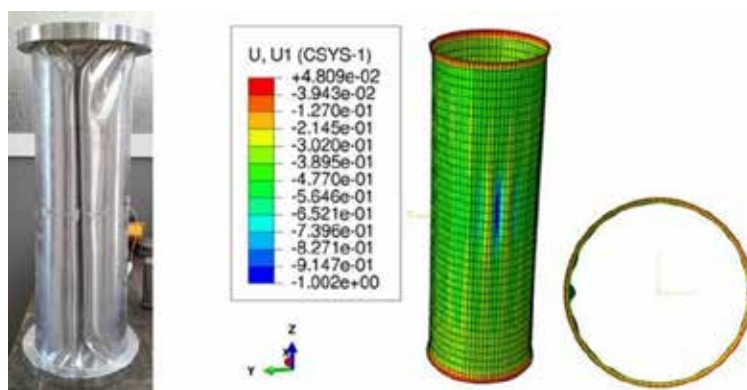
En ce qui concerne les matériaux cimentaires, les travaux viseront à améliorer le comportement en grand des différentes structures en béton armé en couplant leurs processus de dégradation chimique (carbonatation atmosphérique et sous eau, hydrolyse, attaque sulfatique, etc.) avec la corrosion des armatures, les contraintes mécaniques externes et l'évolution des conditions de saturation en eau afin de représenter au plus près la réalité de l'évolution à long terme de ces composants.

Les objectifs sont similaires pour les matériaux métalliques. Ils visent à obtenir une meilleure représentation en grand des composants métalliques de l'alvéole HA (chemisage, conteneur de stockage) en couplant les processus de corrosion, les contraintes mécaniques exercées par le milieu environnant et l'évolution des conditions de pH et de redox en lien avec l'évolution géochimique des matériaux environnants (notamment le matériau de remplissage) et le transitoire hydraulique/gaz (notamment l'oxygène). L'enjeu associé est une diminution des marges prises en compte dans leur conception ainsi que dans les évaluations de sûreté (en termes de durabilité). Pour ce faire, il sera nécessaire de renforcer la modélisation sur le comportement post-rupture (fissuration des structures en béton et des composants métalliques).

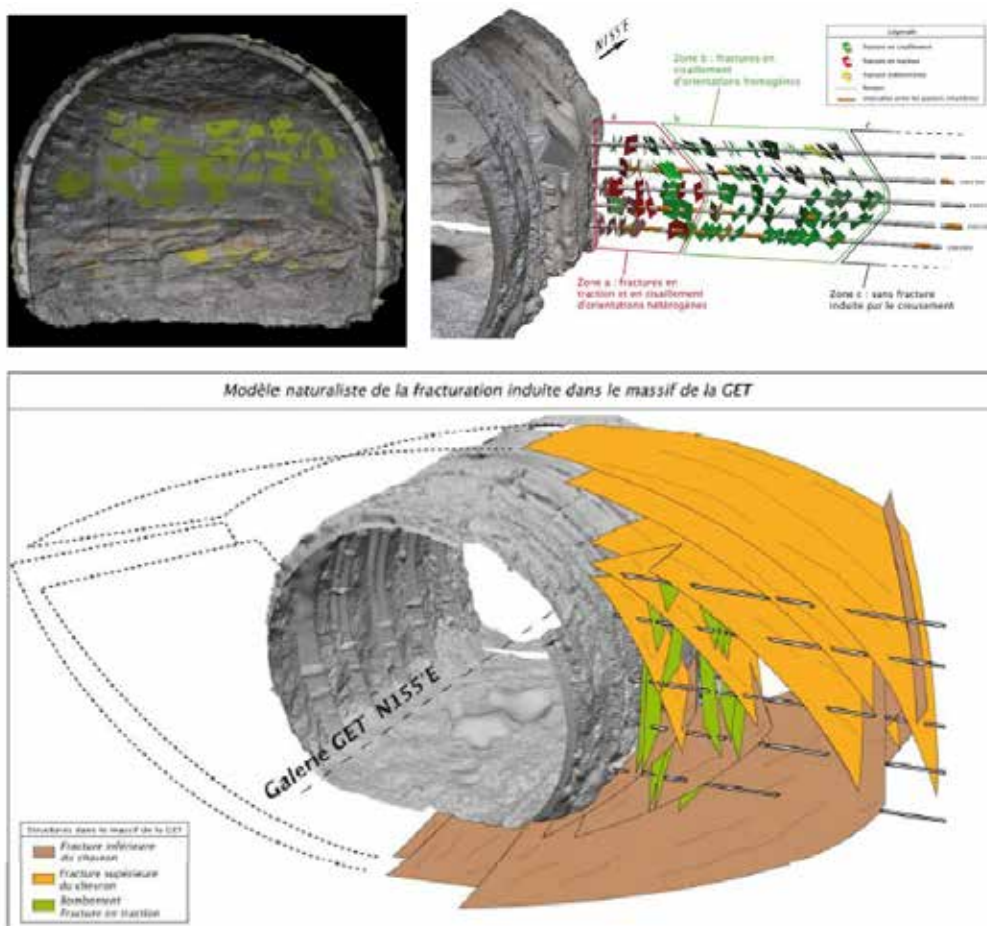
La maîtrise des risques liés aux situations incidentelles d'ATEX et d'incendie amène à s'interroger sur leurs conséquences au regard de la représentation du comportement mécanique des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo (roche/revêtements en béton/génie civil) et des colis de stockage. Dans le premier cas, les modèles de représentation de situation ATEX nécessitent d'intégrer la phénoménologie des explosions (ondes de choc, vitesse de propagation,

etc.) et leurs conséquences sur l'intégrité des matériaux (Callovo-Oxfordien, bétons armés). Dans le second cas, il s'agit d'intégrer la phénoménologie des incendies (pyrolyse, combustion, transport de gaz et de fumées, transfert thermique multi-vectoriel), pour évaluer leurs conditions d'initiation, d'occurrence et de propagation, et d'en évaluer les conséquences thermo-mécaniques sur les propriétés des matériaux (Callovo-Oxfordien) et des structures (bétons armés).

EXEMPLE DE FLAMBEMENT EXPÉRIMENTAL SUR COQUE CONFINÉE AVEC DU SABLE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ESSAI DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES CHEMISAGES DES ALVÉOLES HA DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO



VISUALISATION DE LA FRACTURATION INDUITE PAR LE CREUSEMENT AUTOUR D'UNE GALERIE DU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/Haute-MARNE



Développer les outils et les méthodes numériques en support à l'intégration des couplages multi-physique

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages

Objectifs scientifiques

- + Disposer des méthodes et des outils numériques robustes, efficaces et adaptés au multi-couplage, notamment fortement non-linéaire, et aux différentes échelles de temps et d'espace concernées (calcul haute performance, gestion de maillages adaptatifs, etc.)

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Tous composants
 - Augmentation de la performance, la robustesse et la précision des simulations numériques multi-couplages et multi-composants

En support à la simulation numérique de l'évolution multi-physique des stockages, la R&D de demain vise à développer des algorithmes performants de couplages (ou de chaînage) entre processus et/ou entre milieux de différentes natures (poreux/fracturé/ouvert), et à développer des bibliothèques de solveurs linéaires parallèles performants, robustes et précis permettant des taux de *speed-up* importants et compatibles avec des machines de type pré-Exascale (plusieurs centaines de peta-flops).

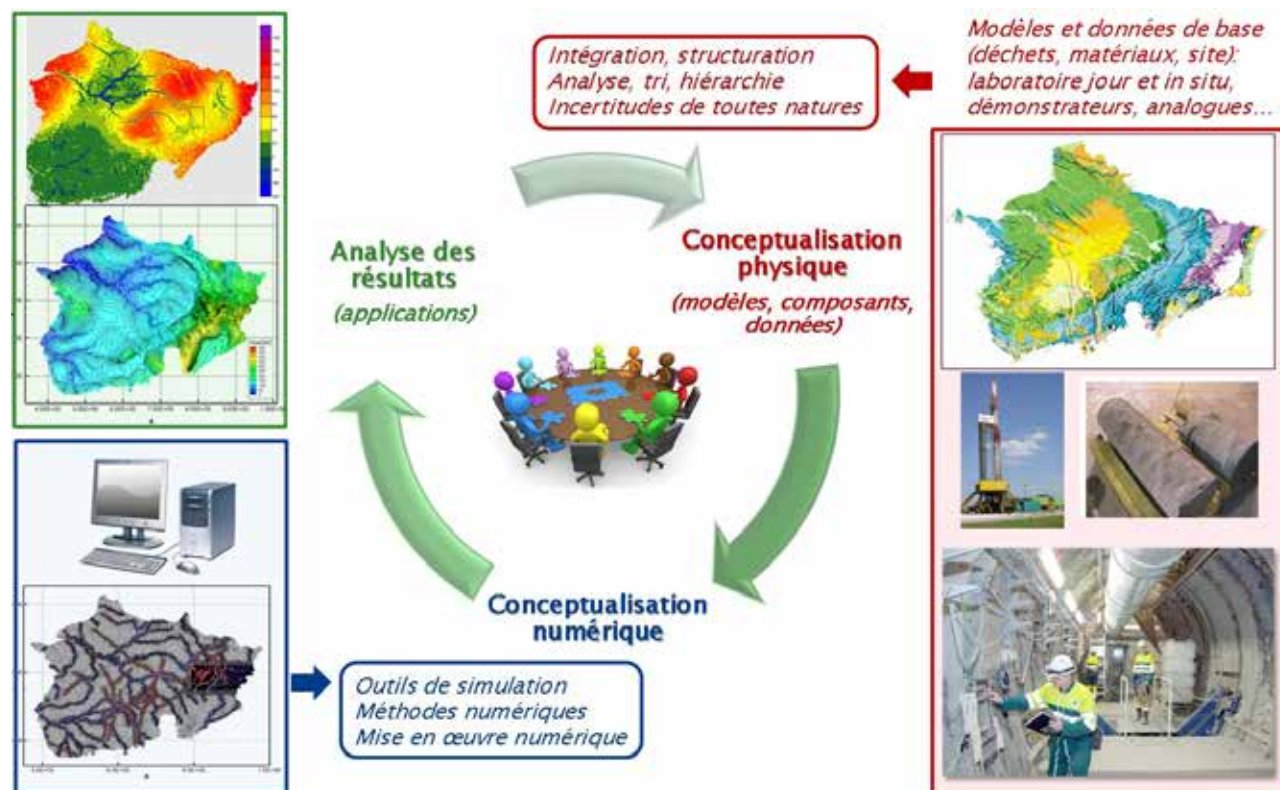
Par ailleurs, la résolution de systèmes complexes, notamment ceux mettant en œuvre un nombre important de données (par exemple : transport réactif), sera facilitée par l'implémentation progressive de l'intelligence artificielle (IA) dans les simulations numériques, notamment via des algorithmes d'apprentissage adaptés (*machine learning*).

Le développement de méthodes d'inversion de modèles (intrusives ou externes de type surrogate) visera à caler au mieux les données de modèles prédictifs complexes avec les observations de terrain.

La maîtrise de la qualité des simulations réalisées sera renforcée par l'utilisation systématique de la quantification d'estimateurs *a posteriori* afin d'évaluer la précision des calculs.

La mise en œuvre de simulations encore plus complexes en taille (nombre de données, couplages) nécessite une maîtrise conjointe de la gestion des incertitudes et des paramètres et modèles pilotant le système, et requiert de systématiser les domaines d'évolution. Pour ce faire, il sera nécessaire de disposer de méthodes d'analyse de sensibilité locales et globales adaptées aux simulations physiques multi-couplées au moyen (i) de techniques de *meta-modeling* par plans d'expériences adaptatifs pour la sensibilité globale et (ii) de méthodes de sensibilité locales (type état adjoint) pour mieux évaluer les gradients locaux.

VISUALISATION DU RÔLE DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE EN SUPPORT À L'INTÉGRATION DES COUPLAGES MULTI-PHYSIQUES

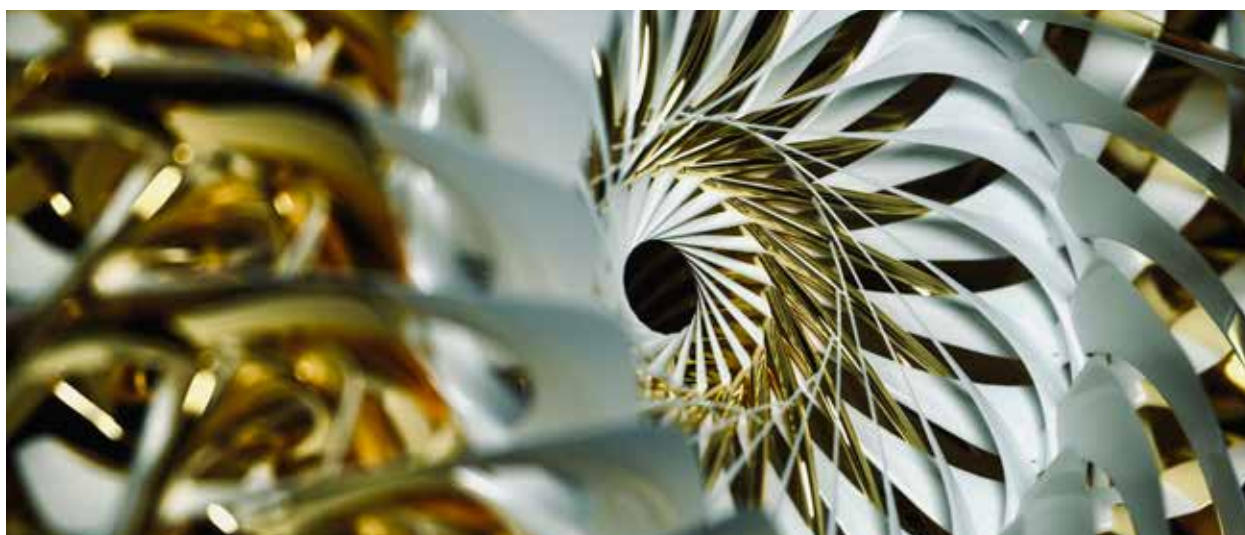




Concevoir les nouveaux matériaux des stockages pour accroître les performances des composants et la maîtrise de leur comportement et réduire les impacts environnementaux

Le développement de nouveaux matériaux pour les stockages répond à des enjeux opérationnels divers :

- contribuer à réduire l'impact environnemental des stockages et à préserver les ressources naturelles de certaines matières premières ;
- garantir l'adéquation des évolutions d'approvisionnement attendues de matières premières pour certains matériaux (principalement les bétons) aux exigences/spécifications des stockages ;
- accroître la durabilité physico-chimique de composants/matériaux et la maîtrise du fonctionnement phénoménologique des stockages, en lien avec leur sûreté (exploitation et/ou après-fermeture).



Valoriser les matériaux des sites de stockage, préserver les ressources naturelles en matériaux et sécuriser les approvisionnements en certaines matières premières

Enjeux opérationnels + Réduire l'impact environnemental des stockages et préserver les ressources naturelles + Garantir l'exploitation en sécurisant l'approvisionnement des matières premières + Optimiser la dimension technico-économique des stockages	Objectifs scientifiques et technologiques + Développer des formulations de nouveaux matériaux/composants adaptés aux exigences des stockages à partir des matériaux des sites (ciments, géopolymères, etc.) – Atteindre le TRL 4
Déchets/filières	Composants concernés
+ Tous stockages	+ Tous composants

Contribuer à réduire l'impact environnemental des stockages

L'intégration de la réduction de l'impact environnemental dans la démarche d'utilisation et de développement des matériaux des stockages s'entend au regard du développement de l'économie circulaire et de l'évolution probable de la réglementation sur les caractéristiques de certains matériaux actuels, principalement les bétons, matériaux très utilisés dans les stockages.

Cela se traduit par deux orientations thématiques de recherche :

- le développement des bétons bas carbone, en accompagnement et application de cette démarche générale d'évolution des bétons dans le cadre des exigences/spécifications des stockages ;

- l'utilisation des matériaux naturels des sites de stockage, en particulier les argiles avec notamment les déblais des argilites de la formation hôte du Callovo-Oxfordien pour le projet Cigéo, pour la fabrication de ciments et/ou de géopolymères.

Différents usages des géopolymères sont envisageables, par exemple comme matériaux ignifuges, ou en remplacement de certains composants métalliques des stockages au regard de leurs bonnes propriétés mécaniques (cf. chemisage des alvéoles HA pour le projet Cigéo).

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROCÉDÉ DE VALORISATION DES ARGILITES EXCAVÉES EN GÉOPOLYMÈRES



Garantir l'adéquation des évolutions d'approvisionnement attendues de matières premières des bétons aux exigences/spécifications des stockages

Au regard des temps longs du développement des stockages, de nombreuses évolutions des matières premières entrant dans la composition des bétons sont attendues. Bien que cette question ne soit pas propre à l'Andra, l'Agence doit s'y préparer afin de disposer dans la durée de bétons répondant à ses besoins et ses exigences, suivant deux orientations pouvant être combinées :

- en accompagnant les recherches sur le sujet, comme par exemple l'emploi de métakaolin, de pouzzolanes ou de fillers calcaires en réduction ou substitution du clinker (cendres volantes) ;
- en développant en propre des solutions, particulièrement en lien avec l'utilisation possible des matériaux naturels des sites de stockage comme les argiles, avec la fabrication de ciment à partir de la calcination d'argile.

Accroître la durabilité physico-chimique des composants/matériaux et la maîtrise du fonctionnement des stockages

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et des marges de conception et de sûreté
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages

Objectifs scientifiques

- + Développer des formulations de nouveaux matériaux « neutres » vis-à-vis du fonctionnement des stockages ou présentant des performances accrues adaptées aux exigences des stockages – Atteindre le TRL 4

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Projet Cigéo : conteneurs, alvéoles de stockage et galeries ; stockages de surface et à faible profondeur : alvéoles de stockage et couvertures

Des matériaux plus neutres vis-à-vis du fonctionnement phénoménologique des stockages

Les stockages en exploitation ou en projet utilisent aujourd'hui majoritairement les matériaux métalliques et les bétons. Ces matériaux présentent notamment d'excellentes performances mécaniques et un niveau de maîtrise élevé de leur mise en œuvre et leur comportement dans les stockages en lien avec leurs fonctions ; celles-ci sont majoritairement de nature mécanique, en tant que matériaux de structure de génie civil (par exemple : ouvrages en béton du centre de stockage des déchets FMA-VC dans l'Aube) et de génie souterrain (par exemple : revêtements/soutèvements des galeries du centre de stockage Cigéo) au sens large ou matériaux de conditionnement (par exemple : les conteneurs de stockage étanches en acier des déchets HA ou les chemisages en acier des alvéoles de déchets HA pour le projet Cigéo).

Ces matériaux ne sont pas inertes intrinsèquement et dans les conditions des stockages. Ils vont se dégrader progressivement et

générer des produits de dégradation (hydrogène, complexant, etc.) et des interactions physico-chimiques avec les autres composants des stockages (déchets, milieu géologique hôte, etc.). Ces processus sont pris en compte dans la conception des composants afférents et les évaluations de sûreté (exploitation et après-fermeture).

Le développement de matériaux « chimiquement inertes » en remplacement de certains composants en béton ou métalliques peut contribuer à accroître la maîtrise de l'évolution phénoménologique des stockages en réduisant ou annulant la complexité de processus de cette évolution, et *in fine* accroître les marges de sûreté. Cela peut aussi contribuer à la valorisation des matériaux des sites de stockage, la préservation des ressources naturelles en matériaux et la garantie de l'adéquation des évolutions d'approvisionnement attendues de matières premières des bétons aux exigences/spécifications des stockages (cf. paragraphe précédent).

À ce stade, les orientations en termes de matériaux et de composants des stockages considérés portent sur :

- les céramiques et composites à matrice céramique (CMC) pour les conteneurs de stockage de déchets HA ; Les CMC allient la résistance thermique et la stabilité chimique des céramiques à un comportement mécanique tenace du fait de leur structure composite (incorporation de renforts) ;
- les fibres (carbone recyclé, métalliques amorphes non acier, verre, basalte, etc.), en particulier en substitution des renforcements métalliques des bétons, notamment pour le projet Cigéo.

Des matériaux aux performances accrues

Par nature, les matériaux précédemment cités contribuent à l'objectif d'amélioration continue des performances des composants afférents.

Par ailleurs, plus spécifiquement pour certains composants métalliques comme les chemisages d'alvéoles HA pour le projet Cigéo, les revêtements de type sacrificiels peuvent présenter un intérêt : constitués de matériaux moins nobles que celui du composant à protéger, ils se consommeront à sa place même en cas de défauts, et contribueront ainsi à accroître la tenue à la corrosion donc *in fine* la tenue mécanique.

CONTENEURS CÉRAMIQUES ÉCHELLE ½ (RÉALISATION BERNARDAUD)





Optimiser les techniques de construction et d'exploitation des stockages



Optimiser les techniques de creusement et de travaux souterrains du projet Cigéo

Enjeux opérationnels

- + Optimiser les installations souterraines d'un point de vue technico-économique
- + Accroître la maîtrise des risques en exploitation

Objectifs technologiques

- + Accroître la sécurisation des activités et le cadencement des opérations, réduire l'endommagement induit de la roche, etc.
- + Atteindre le TRL 7 pour les solutions techniques de revêtements/soutènements compressibles

Déchets/filières

- + Projet Cigéo

Composants concernés

- + Ouvrages souterrains dont descenderies, galeries, alvéoles de stockage, puits

Creusement

L'industrialisation des opérations de creusement permet par l'emploi de solutions mécanisées d'atteindre différents objectifs compatibles : la sécurisation des activités, le cadencement des opérations (gains de planning et économiques), potentiellement la réduction de l'endommagement de la roche hôte au pourtour des ouvrages induit par l'excavation.

À cette fin, l'Andra doit poursuivre sa veille technologique avec les industriels spécialisés dans la conception et l'emploi des tunneliers, afin de rechercher les optimums techniques et de vérifier leur adéquation en tant que solution de référence pour la réalisation des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo. Elle doit mener aussi des développements propres pour des besoins spécifiques : dépose de voussoirs, réalisation de carrures, réalisation de saignées de grande profondeur dans la roche hôte comme solution pour les ouvrages de fermeture. Cette veille technologique doit porter non seulement sur les progrès des tunneliers « traditionnels » (ceux travaillant à l'horizontale ou en légère pente), mais aussi sur de nouvelles solutions permettant l'emploi de tunneliers verticaux pour le fonçage des puits.

Si l'objectif premier est la phase industrielle pilote, ces recherches de solutions innovantes et spécifiques se poursuivront sur toute la vie du stockage.

En parallèle, l'Andra se doit aussi de poursuivre ses recherches scientifiques et techniques sur les méthodes constructives traditionnelles (brise roche hydraulique, machine à attaque ponctuelle) adaptées au projet Cigéo qui demeureront nécessaires pour des portions d'ouvrages de faible extension et qui au demeurant constituent autant de solutions de repli des solutions mécanisées optimisées.

TUNNELIER VERTICAL



Alvéole HA

L'alcéole HA du centre de stockage Cigéo est un ouvrage souterrain sans équivalent dans le monde des travaux souterrains et fait l'objet d'un développement opérationnel incrémental par l'Andra depuis plus de 10 ans. Ce composant particulier du stockage est important car sa constructibilité, son exploitation, sa phénoménologie sont autant d'éléments dimensionnants du centre de stockage Cigéo. Il est l'exemple le plus marquant du caractère indissociable de l'imbrication de la technologie et de la science : les solutions techniques déployées influent sur la phénoménologie tout autant que les connaissances scientifiques acquises peuvent influencer sur les solutions mises en œuvre ou orienter vers de nouveaux choix.

Les efforts de développement R&D doivent se poursuivre tant pour le concept de référence proposé en phase industrielle pilote (constructibilité, exploitabilité, maintenance et monitoring) dans une logique d'industrialisation que pour les optimisations envisagées pour les tranches ultérieures (longueur, emploi de nouveaux matériaux cf. « Concevoir les nouveaux matériaux des stockages pour accroître les performances des composants et la maîtrise de leur comportement et réduire les impacts environnementaux », et techniques de creusement nouvelles).

OPÉRATION DE FONÇAGE DES CHEMISES D'UN DÉMONSTRATEUR D'ALVÉOLES DE TYPE HA DANS UNE GALÉRIE DU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/Haute-MARNE



Revêtements compressibles

La mise au point de solutions structurelles innovantes (emploi de différents matériaux compressibles) est aussi un axe de recherche fort, permettant de répondre à la fois à un accroissement de la tenue mécanique des ouvrages sur la période d'exploitation du stockage et à une optimisation technico-économique significative du dimensionnement des revêtements. L'emploi de tels matériaux

est d'intérêt tant pour le dimensionnement des voussoirs posés en partie courante par les tunneliers que pour la réalisation en méthode traditionnelle de portions d'ouvrage structurellement complexes (par exemple : carrefours en X, entonnements). Ces développements doivent intégrer la recherche d'un optimum technique et économique.

RÉALISATION DE PAROI MOULÉE



CREUSEMENT AU TUNNELIER AVEC POSE DES VOUSSOIRS EN PARTIE COURANTE



Optimiser le génie civil des ouvrages du stockage (utilisation de bétons non armés métalliquement à l'échelle du composant, béton grande masse, optimisation du ferrailage, etc.)

Enjeux opérationnels + Optimiser les installations souterraines d'un point de vue technico-économique + Accroître la maîtrise des risques en exploitation	Objectifs scientifiques et technologiques + Atteindre le TRL 7 pour les solutions techniques de génie civil des ouvrages
Déchets/filières	Composants concernés
+ Projet Cigéo	+ Ouvrages souterrains dont les alvéoles de stockage et les galeries

Le développement progressif des stockages permet l'optimisation du génie civil des ouvrages des stockages pour accroître la maîtrise de leur fonctionnement, réduire les marges de conception, notamment en limitant la production de produit de dégradation, comme l'hydrogène, en après-fermeture et optimiser leur dimensionnement sur le plan technico-économique.

Le déploiement de nouvelles solutions innovantes doit être guidé par une approche technique à la fois progressive (benchmark à l'international, développement de prototypes) et normative (nécessité de faire évoluer les recommandations et réglementations applicables). Elle implique d'adresser des enjeux scientifiques et techniques

tels que l'acquisition des connaissances sur le comportement aux différentes échelles de temps de ces nouvelles solutions dans les environnements complexes des stockages, leur modélisation et leur intégration dans les représentations multi-couplées.

À ce stade, les orientations portent sur des aspects de natures très différentes :

- la substitution du ferrailage par des renforcements non métalliques (cf. « Accroître la durabilité physico-chimique des composants/matériaux et la maîtrise du fonctionnement des stockages ») ;
- l'optimisation du dimensionnement du ferrailage.

Développer les moyens de fabrication des composants associés aux matériaux du futur

Enjeux opérationnels + Optimiser les installations souterraines d'un point de vue technico-économique + Accroître la maîtrise des risques en exploitation	Objectifs scientifiques et technologiques + Atteindre le TRL 7 pour les nouveaux matériaux
Déchets/filières	Composants concernés
+ Tous stockages	+ Centre de stockage Cigéo : conteneurs, alvéoles de stockage, ouvrages de fermeture de Cigéo ; + Stockages de surface et à faible profondeur : alvéoles de stockage, couvertures

La recherche sur les matériaux du futur (cf. « Concevoir les nouveaux matériaux des stockages pour accroître les performances des composants et la maîtrise de leur comportement et réduire les impacts environnementaux ») intègre *de facto* celle des moyens de fabrication,

dans une logique à la fois d'optimisation technico-économique et de maîtrise de la qualité sur toute la chaîne (approvisionnement, fabrication, mise en place).

Accroître la maîtrise de l'exploitation des stockages

Enjeux opérationnels

- + Garantir la sûreté en exploitation (surveillance, maintenance, aide à la décision, etc.)
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages

Objectifs scientifiques et technologiques

- + Développer les outils de soutien logistique intégré (SLI) spécifiques aux installations du centre de stockage Cigéo
- + Adapter les méthodologies d'analyse FSOH à la complexité spécifique du centre de stockage Cigéo (par exemple : multi-activités, développement progressif, etc.)

Déchets/filières

- + Tous stockages, principalement le centre de stockage Cigéo

Composants concernés

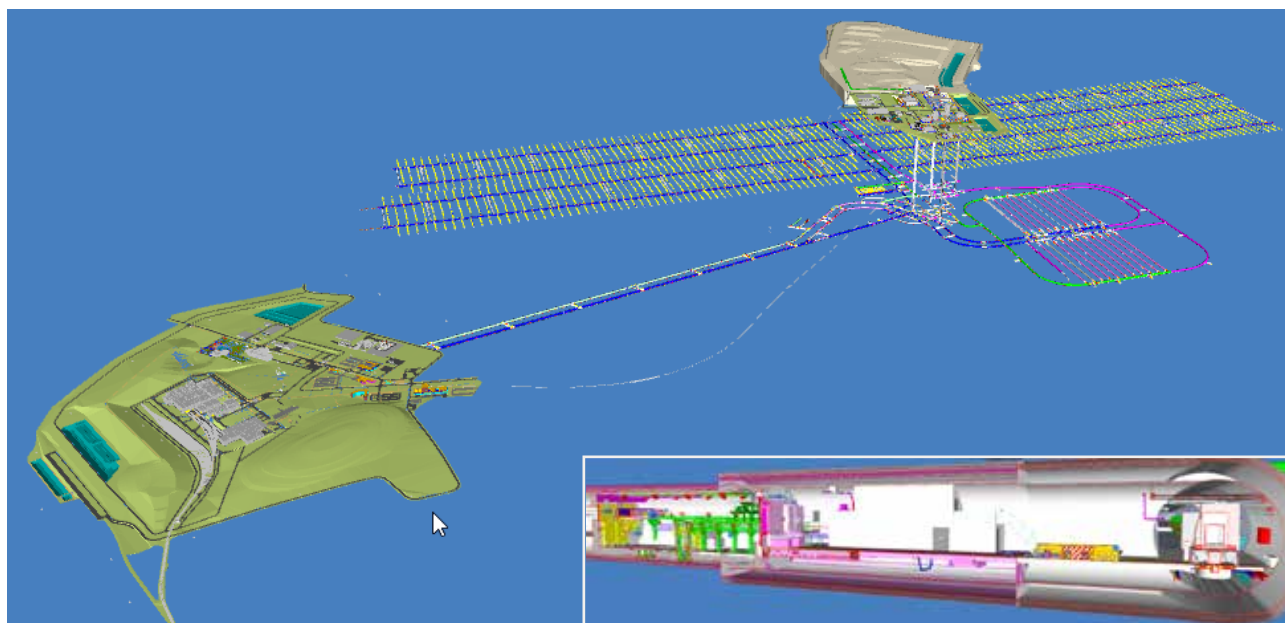
- + Tous composants

Développer les outils dédiés au soutien logistique intégré (SLI) : nouveaux outils (maintenance prédictive, aide à la maintenance, catalogue fournisseurs), nouvelles méthodes, BIM, etc.

Le projet Cigéo est un projet exceptionnel par sa durée et son ampleur, faisant appel à plusieurs générations de concepteurs, de constructeurs et d'exploitants. L'optimisation opérationnelle des activités et la fiabilisation du fonctionnement de l'installation (mais aussi la maîtrise de sa maintenance) requièrent une approche numérique innovante, intégrée en entreprise étendue, afin de partager l'historique de la construction, de l'exploitation et de la maintenance, les méthodes et process, l'évolution phénoménologique (corrosion, vieillissement des matériaux, production de gaz, comportement structurel).

Cet enjeu opérationnel s'appuiera nécessairement sur les axes évolution multi-physique et multi-composants des stockages, transformation numérique, sciences humaines et sociales et le développement des capteurs dédiés (cf. *infra*). Il impliquera, au niveau scientifique et technique, d'adapter les outils de soutien logistique innovants aux environnements du stockage et de développer les interfaces, modélisations, simulations, etc., nécessaires à leur implémentation. On peut citer par exemple : disposer de vecteurs d'inspection des ouvrages, d'aide au diagnostic et d'intervention sur les composants/ouvrages des stockages, dans les contextes des stockages (accessibilité, intrusivité, milieu « agressif », etc.) tels que robots ou drones, disposer de moyens d'analyses (outils de type IA), etc.

EXTRAIT DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO (VUE GLOBALE DU STOCKAGE ET COUPE D'UN ALVÉOLE MA-VL)



Accroître la maîtrise des facteurs sociaux, organisationnels et humains vis-à-vis de la sûreté des stockages en exploitation (FSOH)

La maîtrise des risques des installations nucléaires nécessite classiquement de prendre en compte les FSOH, et la durée inusuelle de l'exploitation d'une installation comme le centre de stockage Cigéo, au moins séculaire, et de s'interroger sur leur évolution possible.

Les moyens cités ci-dessous dédiés à l'aide au diagnostic et les outils d'analyses de type IA pourront être appliqués à l'analyse du comportement des opérateurs pour détecter des situations non conformes (erreurs humaines et actions malveillantes) et les bloquer (contrôle commande), etc.

OUTILS DE RÉALITÉ VIRTUELLE, BASÉS SUR LA MAQUETTE NUMÉRIQUE, PERMETTANT DE SIMULER LE FONCTIONNEMENT DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO EN SITUATION NORMALE ET ACCIDENTELLE



Modélisation dynamique des process industriels.



Évolution dynamique des situations.

Développer les dispositifs de monitoring et de surveillance des stockages en support aux outils du digital 4.0 des stockages

Enjeux opérationnels

- + Garantir la sûreté en exploitation (surveillance, maintenance, diagnostic, aide à la décision, etc.)
- + Vérifier que l'installation et son environnement, notamment géologique, restent dans le domaine de fonctionnement phénoménologique défini dans le cadre des évaluations de sûreté et de l'autorisation de mise en service
- + Garantir la maîtrise des conditions d'environnement des alvéoles de stockage pour la récupérabilité des colis de Cigéo

Objectifs scientifiques et technologiques

- + Mettre en oeuvre des dispositifs de mesure adaptés aux conditions complexes des stockages (durabilité, faiblement ou non intrusifs, mesure répartie, mesure intégrée, faible énergie, transmission sans fil, etc.) – Atteindre le TRL 7

Déchets/filières

- + Tous stockages, principalement le centre de stockage Cigéo

Composants concernés

- + Tous composants

La surveillance de tous les centres de stockages, répond en premier lieu à des besoins réglementaires classiques qui visent à s'assurer que l'installation reste dans le domaine de fonctionnement défini dans le rapport de sûreté (RDS). Pour le projet Cigéo, la surveillance intègre également sa spécificité d'installation souterraine et son environnement géologique, en s'assurant notamment que le fonctionnement phénoménologique du stockage en exploitation répond aux objectifs de sûreté en après-fermeture. De plus, la surveillance du centre de stockage Cigéo contribue à garantir la capacité de retrait éventuel des colis de stockage en support à la réversibilité.

À ces enjeux opérationnels, viennent s'ajouter des enjeux techniques sur les dispositifs de monitoring et de surveillance, liés aux spécificités des stockages :

- systèmes « confinés », parfois peu accessibles (alvéoles de stockage HA du centre de stockage Cigéo par exemple) ;
- mesures de grandeurs multi-échelle d'espace (de l'échelle du colis et de l'alvéole à l'échelle du stockage et de son milieu environnant) pour intégrer les besoins d'une vision locale et d'une vision globale du fonctionnement ;
- caractérisation de multiprocessus souvent couplés et multi-composants (le fonctionnement phénoménologique de l'alvéole de stockage prend en compte les processus mettant en jeu des composants de structure, des colis de stockage, un milieu géologique environnant/champ proche, etc.) ;
- temps longs de la surveillance, etc.

Ces conditions complexes des stockages nécessitent d'avoir des dispositifs de mesure adaptés (durabilité, faible intrusivité, mesure répartie, environnement potentiellement variable dans le temps, etc.)

pour les composants des stockages et le milieu géologique. Enfin, le développement des dispositifs de monitoring répond également aux enjeux d'industrialisation et d'optimisation des coûts.

Ces enjeux rejoignent ceux d'autres domaines techniques comme le génie civil avec l'auscultation des ouvrages, notamment en béton, les travaux et ouvrages souterrains, les ressources souterraines (mines, pétrole, etc.), avec la spécificité parfois propre du stockage.

Les expérimentations et essais technologiques menés au Laboratoire souterrain ainsi que dans d'autres laboratoires de recherche souterrains à l'étranger, ont permis de développer et mettre en œuvre de nombreux dispositifs de monitoring (adaptation de dispositifs et méthodes existantes ou développement de dispositifs et méthodes propres) pour des mesures de paramètres de toutes natures (thermiques, hydrogéologiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques) et pour différents milieux (roche, béton, matériaux argileux remaniés, métaux, etc.). Cela concerne plus spécifiquement le développement, d'une part, de technologies de capteurs discrets, autonomes et durables, adaptées à leur utilisation dans les conditions environnementales des stockages, et, d'autre part, de méthodes de contrôle, traitement, analyse et capitalisation des données issues de ces dispositifs (cf. « Améliorer la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages, de l'exploitation à l'après-fermeture »).

Cet état des connaissances permet aujourd'hui de disposer d'un panel de solutions techniques éprouvées et opérationnelles pour la surveillance des différents composants des stockages et de leur domaine de fonctionnement. Toutefois, au regard des temps longs du développement du centre de stockage Cigéo et des besoins de surveillance qui commenceront dès sa construction et qui se poursuivront, avec les adaptations nécessaires, pendant son exploitation

et après sa fermeture, les travaux de R&D et d'innovation sur les dispositifs de monitoring et sur la chaîne de données au sens large s'inscriront dans une logique de progrès continu.

Cela exige de poursuivre le développement, l'adaptation et la qualification des dispositifs de monitoring dédiés aux environnements des stockages pour améliorer l'assurance qualité et la métrologie des mesures. De tels dispositifs devront permettre de rendre compte de manière plus précise et répartie des grandeurs physiques et chimiques du fonctionnement des stockages et de leur environnement géologique, avec le moins de perturbation possible, sur les temps longs de l'exploitation et de l'après-fermeture (mesure répartie, dispositif peu/non intrusif et mesure non destructive, redondance des dispositifs, dispositifs aussi durables que raisonnablement possible en situations de stockage notamment grâce à des sources d'énergie longue durée et permettant le transfert des données aux différentes échelles spatiales des stockages). Ainsi, en lien avec les enjeux de R&D d'amélioration de la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages (cf. chapitre correspondant), les orientations de la R&D sur la chaîne de données viseront plus particulièrement à rendre compte des évolutions des paramètres caractéristiques des différents processus des stockages par le développement de dispositifs de mesure permettant :

- la mesure répartie des paramètres de suivi des processus THM à l'échelle des ouvrages des stockages, comme les dispositifs de mesure par fibres optiques. Il s'agit notamment, pour le panel de technologies éprouvées et adaptées dont dispose aujourd'hui l'Andra, de poursuivre les développements sur la qualification des mesures et le durcissement de l'ensemble du dispositif aux contraintes des stockages, notamment le centre de stockage Cigéo ;

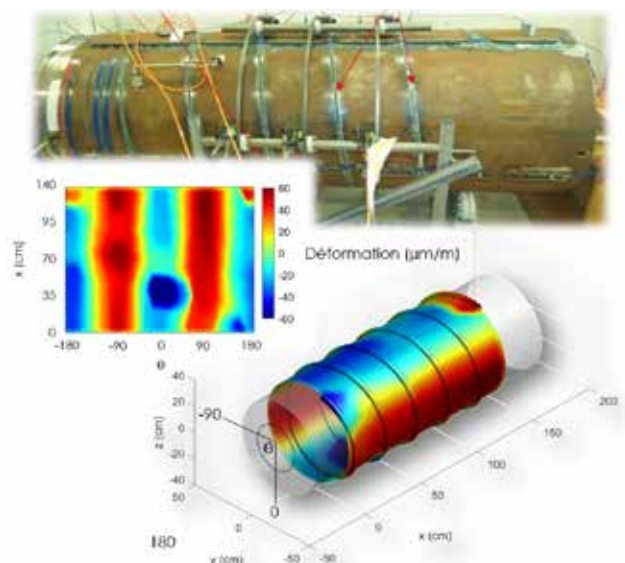
- le suivi des processus de transferts de fluides et leur couplage avec l'évolution chimique des composants des stockages, notamment des transferts de gaz dans les alvéoles de stockage HA du centre de stockage Cigéo : développement et adaptation de dispositifs de mesure de gaz déportés (de type Lidar Raman), qualification de capteurs ponctuels de mesure de la teneur en hydrogène (capteurs à corde vibrante, capteurs à conductivité thermique, etc.) adaptés aux conditions d'environnement des stockages ou encore qualification de capteurs ponctuels multi-gaz (type H2MeMS) ;
- la caractérisation des processus chimiques complexes aux interfaces, par exemple pour le suivi de la corrosion (sondes Aircorr, sondes électrochimiques, etc.) et le suivi du pH (capteur optode pH, etc.) ;
- le suivi des processus couplés de la rupture et de sa propagation, à l'échelle du composant voire du stockage en grand et de son environnement : suivi de la zone endommagée au droit des ouvrages souterrains du centre de stockage Cigéo pour lequel les études se poursuivront sur l'adaptabilité de méthodes de mesures géophysiques notamment vis-à-vis de leur application pour les travaux de caractérisation à l'avancement du creusement de ces ouvrages, suivi de l'état des couvertures des stockages de surface et à faible profondeur (méthode des muons), etc.

Associé au besoin de surveillance, le développement de moyens de caractérisation et d'auscultation « mobilisables » et non intrusifs, en particulier pour surveiller l'état mécanique du génie civil en béton et de la roche environnante des stockages, notamment en champ proche, fera également l'objet d'une veille technologique active. Il s'agit de disposer d'outils d'inspection des composants des stockages, d'outils d'aide au diagnostic et à la décision voire d'outils d'interventions sur les ouvrages, nécessairement couplés au développement de

EXEMPLES DE DISPOSITIFS DE MESURE EN COURS D'EXPÉRIMENTATION POUR LE SUIVI DES COMPOSANTS DES STOCKAGES



Pose d'extensomètres à corde vibrante pour une alvéole de stockage du centre de stockage de l'Aube pour les mesures de déformation.



Pose d'une fibre optique Raman spiralée en extrados d'un chemisage d'un démonstrateur d'alvéole de stockage de déchets HA du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne pour la mesure de température.

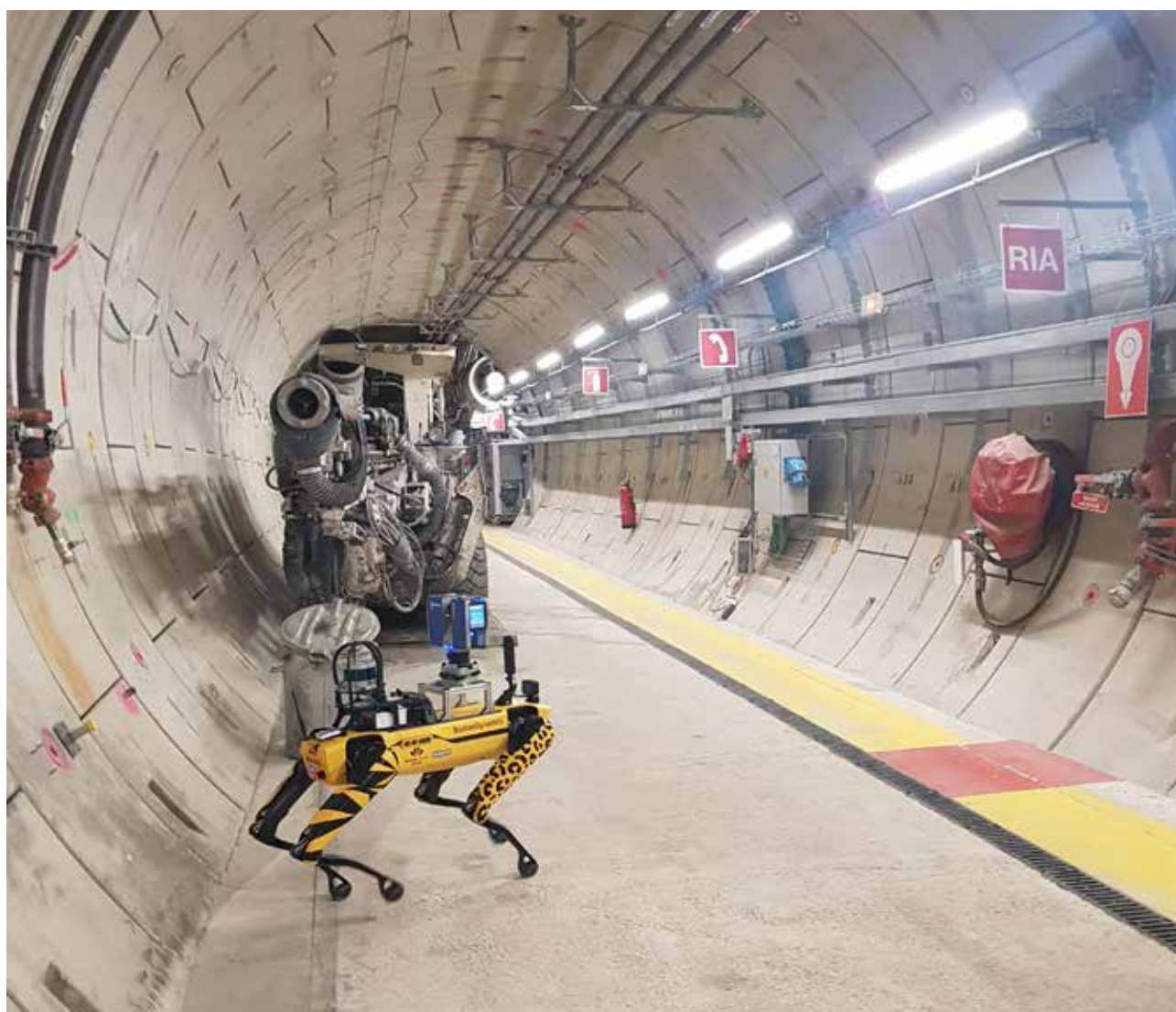
techniques d'analyses de situation et du comportement (basées sur l'Intelligence artificielle) pour détecter et bloquer les situations non conformes (erreurs humaines et actions malveillantes).

L'inspection visuelle de l'ouvrage par des experts est aujourd'hui complétée par des relevés à grand rendement et de haute définition par scanner ou photogrammétriques et l'Intelligence artificielle (IA) assiste l'ingénieur dans la détection et la classification des défauts et suggère aux experts des éléments de diagnostic. L'Internet des objets (IoT) et les nouvelles générations de capteurs permettent d'instrumenter les infrastructures et de télé-surveiller en continu un certain nombre d'indicateurs de santé de l'ouvrage depuis des centres de contrôles 24 heures sur 24 et 7 jours/7. Les progrès dans la modélisation de la dynamique de vieillissement, couplés à l'exploitation en masse des données par les *data scientists* permettent d'être plus pertinents dans le diagnostic et le suivi dans le temps des ouvrages. L'approche par les risques permet en outre une meilleure orientation des efforts de maintenance, en s'appuyant sur la normalisation (norme

ISO 55000 notamment) qui donne désormais un cadre commun à la gestion de la maintenance des actifs au bénéfice à développer, dont des ouvrages d'infrastructure.

Ce développement des dispositifs de monitoring et de surveillance s'interfacera donc nécessairement avec celui des vecteurs d'inspection, tels que robots ou drones [cf. « Développer les outils dédiés au soutien logistique intégré (SLI) : nouveaux outils (maintenance prédictive, aide à la maintenance, catalogue fournisseurs), nouvelles méthodes, BIM, etc. »], pouvant être déployés dans les contextes des stockages. De même, le déploiement de la transition numérique et des outils 4.0 de l'observation/surveillance des stockages permettra de fournir les outils de traitement des données multi-physiques issues du monitoring et de la surveillance pour alimenter la construction du jumeau numérique phénoménologique 4D et améliorer les simulations numériques dans le cadre de la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages.

**ROBOT SCAR SE DÉPLAÇANT DANS LES GALERIES DU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/HAUTE-MARNE
DANS LE CADRE DE LA CHAIRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION EN « INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR
APPLICATIONS ROBOTIQUES EN ENVIRONNEMENTS COMPLEXES » MINES DE NANCY-ANDRA**



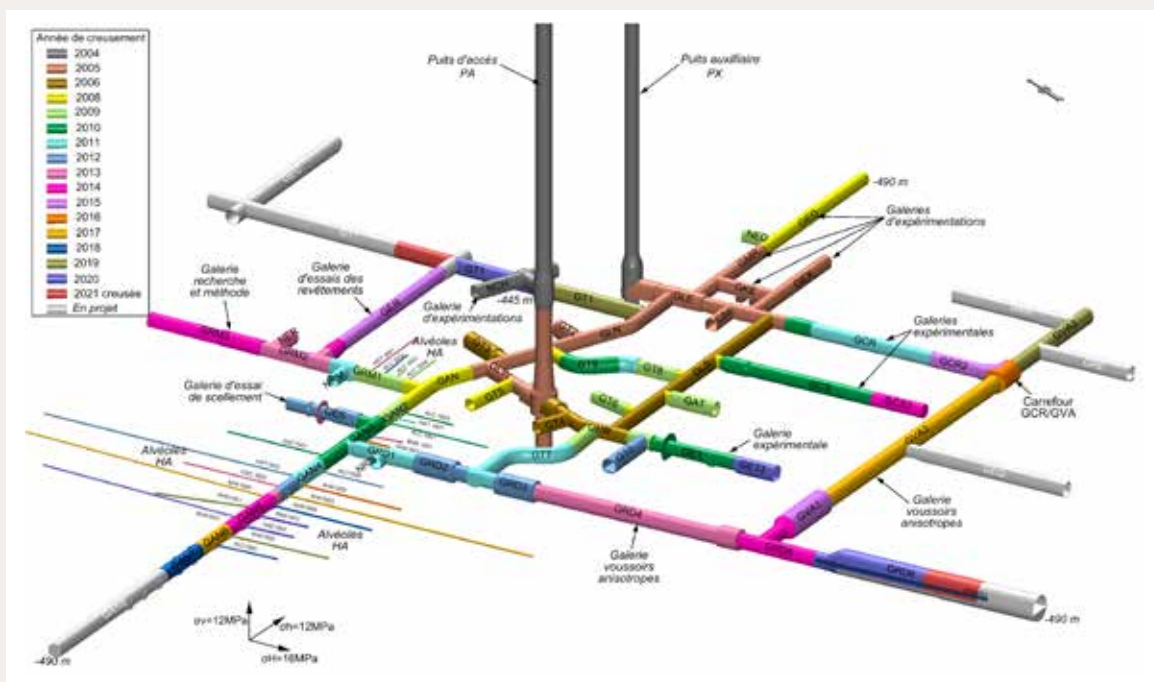
Le Laboratoire souterrain, un outil exceptionnel en appui au développement progressif du projet Cigéo

Le Laboratoire souterrain de l'Andra a aujourd'hui 20 ans. En complément d'autres moyens (travaux de reconnaissance depuis la surface par forages et sismique réflexion, essais et analyses sur échantillons, simulation numérique, etc.), il est un outil privilégié et incontournable permettant *in situ* (c'est-à-dire en conditions réelles ; TRL 6 en termes de maturité) l'observation et la mesure des propriétés de la roche hôte (le Callovo-Oxfordien), la mise au point de techniques d'ingénierie en lien avec les concepts de stockage et la surveillance future du stockage (creusement/soutènement d'alvéoles de stockage et de galeries, ouvrages de fermeture, dispositifs d'exploitation, dispositifs de monitoring, etc.), le comportement des matériaux et des composants ouvragés, et le comportement de la roche face aux sollicitations attendues pour le stockage (thermique, mécanique, chimique, etc.).

Le Laboratoire souterrain représente aujourd'hui plus de 2 km de galeries souterraines cumulées exploitées à - 445 m (niche) et - 490 m (niveau principal) de profondeur, implantées directement dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien. Plus de 80 expérimentations scientifiques et/ou technologiques y sont ou y ont été menées.

Son développement progressif depuis le début de l'année 2000 a accompagné celui du projet Cigéo en appui aux objectifs de conception et de démonstration de sûreté propres à chaque étape (dossier 2005, dossier 2009, dossier d'options de sûreté et dossier de Demande d'autorisation de création).

**SCHÉMA DU LABORATOIRE SOUTERRAIN AVEC DIFFÉRENTES PHASES DE DÉVELOPPEMENT
DES INSTALLATIONS SOUTERRAINES JUSQU'AU CHANTIER 4 (2019-2024)**



Depuis 2019, le Laboratoire souterrain s'est ainsi engagé dans une nouvelle phase, le chantier 4, qui, sur cinq ans, vise à soutenir l'instruction du dossier de DAC, préparer l'industrialisation du projet Cigéo, plus particulièrement la phase industrielle pilote, et préparer les optimisations de demain, notamment pour les tranches ultérieures à la tranche 1. Cette phase se focalise notamment sur certains composants (les alvéoles HA, les ouvrages de fermeture et les carrefours), au travers de démonstrateurs technologiques et scientifiques à échelle 1.

À un horizon de temps à 10 ans, le Laboratoire souterrain s'inscrit donc pleinement dans le cadre de la vision stratégique de la R&D demain à l'Andra, plus particulièrement en termes d'intégration multi-composants et multiprocessus, tant sur le plan scientifique que sur le plan technologique, sur l'ensemble des enjeux opérationnels généraux de cette vision.



**Poursuivre le déploiement
de la transition
numérique et des outils 4.0
de l'observation/
surveillance des stockages**



Développer la synergie des méthodes et les outils pour mener à bien la transformation numérique des stockages

La filière nucléaire, tout comme d'autres filières industrielles, a engagé depuis quelques années sa « quatrième révolution industrielle » (transformation numérique 4.0). Il s'agit de tirer parti des possibilités qu'apporte le développement des technologies numériques au service d'enjeux de performance et de coût, en matière de conception, construction, exploitation, maintenance, sûreté, sur les temps « longs » caractéristiques de l'industrie nucléaire.

La transformation numérique des stockages représente ainsi un enjeu majeur pour contribuer à maîtriser et optimiser les différentes phases de vie de l'installation depuis sa conception jusqu'à sa surveillance. Elle s'appuie notamment sur un outil fédérateur et interopérable, la maquette numérique, avec une mise en œuvre reposant sur une méthode de travail collaborative, le BIM (*Building information modelling*), pour la génération et l'exploitation des données de toutes natures. La maquette numérique du stockage est une représentation numérique tridimensionnelle des caractéristiques géométriques, fonctionnelles et physiques des installations, et est constituée d'objets et d'espaces identifiés et renseignés (géométrie, nature, composition, etc.). Elle a pour objectif, entre autres, de fédérer et partager la connaissance et les informations relatives aux différents composants et équipements du stockage et de son environnement naturel, afin de contribuer à disposer d'une base de référence fiable et facilement exploitable pour prendre des décisions tout au long de son cycle de vie.

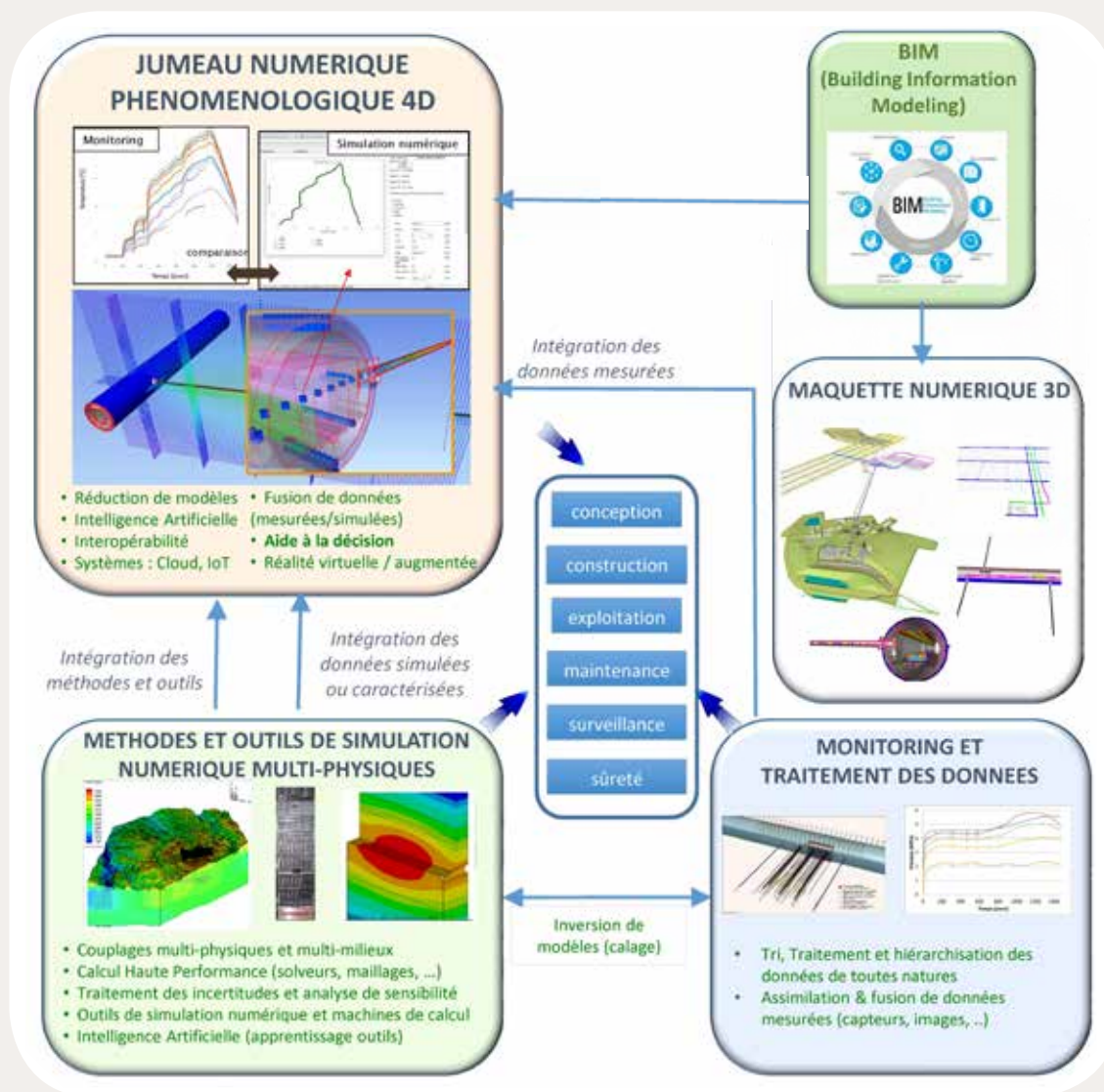
Tout ou partie d'un système physique et/ou d'un processus du stockage peut être « cloné » virtuellement et constituer, à partir de la maquette numérique et du BIM, et par affectation des caractéristiques du système ou du processus copié, un jumeau numérique. Selon l'usage visé (pilotage de projet, sécurisation, construction, conception, observation/surveillance, etc.), plusieurs jumeaux numériques peuvent être définis et constituer des outils opérationnels au cœur du management de projet.

En habillant en processus physiques les différents composants de la maquette, le jumeau numérique phénoménologique 4D fournira dans un environnement unifié, accessible, lisible, notamment grâce à la simulation numérique, des prédictions temps/espace de l'évolution phénoménologique du stockage. En phase d'exploitation et de surveillance, la spécificité du jumeau numérique phénoménologique réside dans le fait que ses modèles sont alimentés en continu par un ensemble de données ou métadonnées, issues d'objets disposés sur le système réel (capteurs, images, etc.) et interconnectés sur un réseau dédié (de type IoT). Ces données vont alimenter en temps réel les modèles pertinents à considérer dans les simulations ou consolider l'information du système de stockage par des techniques d'assimilation de données ou de fusion de données simulées et mesurées. Le jumeau numérique phénoménologique ainsi constitué fournira à chaque instant des informations sur l'état actuel de fonctionnement du système réel, mais aussi des prédictions en temps réel, constituant à terme un outil d'aide à la décision (vis-à-vis d'opérations de surveillance accrue, de maintenance, de dysfonctionnement, etc.).

Dans ce cadre, les techniques de résolution des couplages multi-physiques représentent un enjeu important pour accéder aux niveaux d'information pertinents. Afin de fournir des prédictions compatibles avec des prises de décision rapides, la question de la rapidité et de la qualité de la simulation numérique se pose encore plus. Plusieurs voies sont possibles afin de réduire les temps de calcul machine (CPU) tout en garantissant la qualité du calcul (précision, robustesse) sur des problèmes complexes. Ces voies s'inscrivent dans la logique du Calcul Haute Performance (HPC), avec le développement d'algorithmes de résolution massivement parallèles compatibles avec des machines de calcul adaptées (supercalculateurs, cloud, etc.) et la réduction de modèles, ainsi que le développement de techniques d'Intelligence artificielle (IA), en lien avec des algorithmes d'apprentissage automatique (*machine learning*) ou de réseaux de neurones (*deep learning*). Enfin, les prédictions des modèles de comportement doivent être assorties d'une gestion fine des incertitudes et d'identification des paramètres clés pilotant le système : ainsi, les méthodes de traitement des incertitudes et d'analyse de sensibilité doivent être adaptées au fonctionnement réel de l'installation, en lien avec la complexité des systèmes et le nombre important de paramètres pilotant les indicateurs de fonctionnement du système.

Dans ce contexte, et parmi les nombreuses activités liées à la transformation numérique du projet Cigéo, la R&D de demain sur le numérique 4.0 des stockages s'articule autour de 3 grandes thématiques interdépendantes, comme indiqué sur le schéma « les principaux outils de la transformation numérique 4.0 des stockages », ci-dessous :

LES PRINCIPAUX OUTILS DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE 4.0 DES STOCKAGES



• La construction du jumeau numérique phénoménologique 4D

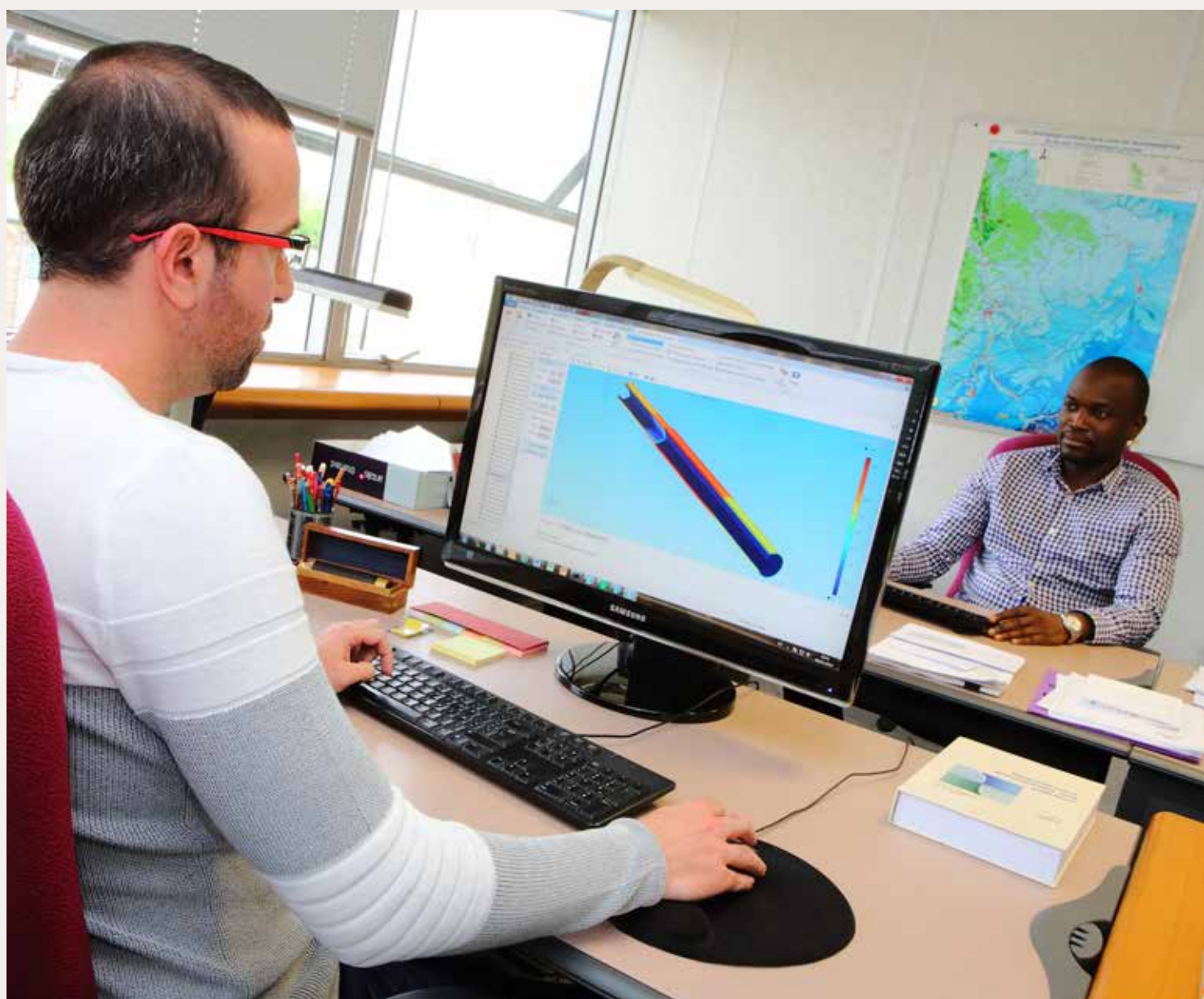
Il s'agit d'intégrer et de capitaliser les connaissances de toutes natures, en approche data centric avec une gestion de configuration « temps réel » des informations collectées et interprétées au regard de la vie du projet et de l'installation. Cela nécessite en particulier : (i) le développement de l'interopérabilité transverse pour garantir le transfert de l'information des différentes briques du jumeau (maquette, CAO, outils de maillage et de simulation numérique, post-traitement, etc.) ; (ii) la mise en œuvre de techniques de réduction de modèles, pour une implémentation pertinente des outils de simulation, ainsi que le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle (*machine learning* notamment) pour accéder rapidement à des informations de systèmes complexes ; (iii) le développement de techniques de réalité virtuelle ou augmentée, en support à la maintenance des installations.

- **Le traitement des données multi-physiques et autres données issues de la surveillance/observation**

Il s'agit d'appréhender la complexité du *Big Data* du stockage pour trier, identifier, et restituer une information pertinente et fiable issue de très grandes masses de données provenant de sources hétérogènes (activités de contrôle, surveillance, simulation, etc.) sur des objets de différentes natures, et *in fine* contribuer à définir des systèmes experts et constituer un outil d'aide à la décision. Cela nécessite la mise en œuvre de techniques de fusion ou d'assimilation de données, en lien possible avec des méthodes d'Intelligence artificielle, comme les méthodes de reconnaissance *via* des réseaux de neurones artificiels (*deep learning*).

- **La simulation numérique multi-physique et multi-composants**

Il s'agit de disposer de méthodes et d'outils de simulation pour accroître les capacités de représentation de systèmes de plus en plus intégrés, avec une gestion numérique des différents couplages multi-physiques, multi-milieux, et multi-échelles (cf. « Améliorer la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages, de l'exploitation à l'après-fermeture »).





Développer des jumeaux numériques phénoménologiques 4D des stockages pour capitaliser la connaissance multi-physique et contribuer à l'aide à la décision sur le développement progressif des stockages, en lien avec le développement des jumeaux numériques pour d'autres usages

Enjeux opérationnels

- + Contribuer à garantir la sûreté en exploitation (surveillance, maintenance, aide à la décision, etc.)
- + Vérifier que l'installation et son environnement, notamment géologique, restent dans le domaine de fonctionnement phénoménologique défini dans le cadre des évaluations de sûreté et de l'autorisation de mise en service
- + Garantir la maîtrise des conditions d'environnement des alvéoles de stockage pour la récupérabilité des colis du centre de stockage Cigéo

Objectifs scientifiques et technologiques

- + Adapter les technologies de développement des jumeaux numériques phénoménologiques aux spécificités des stockages (habillage multi physique 4D, réduction de modèles, implémentation de techniques d'IA, réalité virtuelle et/ou augmentée, etc.) et dans un environnement unifié, accessible, lisible (visualisation et partage des connaissances/aide à la décision)

Déchets/filières

- + Tous stockages, mais principalement le centre de stockage Cigéo

Composants concernés

- + Tous composants

Le développement d'un jumeau numérique phénoménologique interopérable permet de disposer d'un outil de capitalisation et d'accès aux connaissances de toutes natures, et de suivre en temps réel les transformations de l'installation ou du processus spécifique auquel il est attaché. En contribuant *in fine* à l'aide à la décision, son développement nécessite l'agrégation au sein du jumeau numérique (approche intrusive) des outils de simulation numérique du comportement du stockage (de l'échelle des composants majeurs à celle du stockage dans son environnement). La durée de certaines simulations numériques, en lien avec la complexité des couplages multi-physiques qu'elles mobilisent, peut s'avérer importante et incompatible avec une prise de décision rapide, dès lors qu'il s'agira de confronter les résultats des simulations et des observations.

Cela passe par la poursuite des efforts menés dans le cadre du développement du HPC (calcul haute performance), en termes d'accroissement de la précision, de robustesse et de performance

des calculs, et de réduction des temps de calcul. Les défis dans ce domaine sont bien connus : développement d'architectures matérielles et logicielles permettant d'accéder aux très grandes puissances de calcul ; méthodes de modélisation couplant différentes échelles et modèles physiques ; maîtrise de très grands volumes de données. L'IA peut ainsi jouer un rôle dans ce domaine, notamment pour réduire les temps de calculs pour des systèmes multi-physiques fortement couplés (cf. « Améliorer la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages, de l'exploitation à l'après-fermeture »).

NB : les différents éléments de stratégie indiqués ci-après seront testés et affinés dans le cadre de la surveillance des centres de stockage opérationnels existants (CSA et CSM) notamment sur le modèle hydrogéologique (comparaison « temps réel » entre l'observé et le simulé, et nature des rétroactions) ou sur le comportement hydrique des ouvrages cimentaires.

Développer des méthodes de construction de jumeaux numériques permettant l'intégration et la communication de différents outils et données

Les principales méthodes à développer s'articulent autour de l'interopérabilité des différentes briques du jumeau, et la construction d'un système « connecté » de gestion de grandes masses de données de différentes natures.

Garantir l'interopérabilité des différents composants

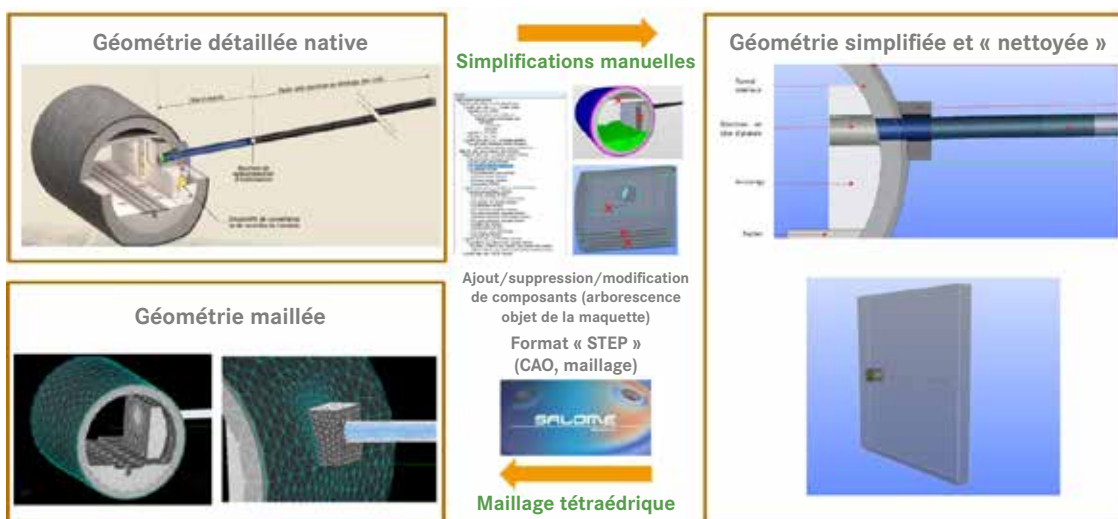
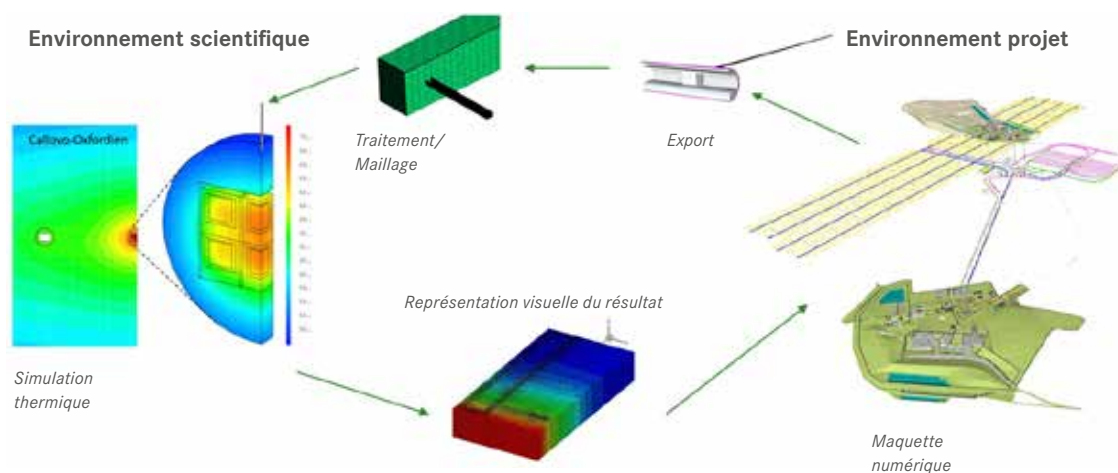
Il s'agit de développer des méthodes permettant de transférer et projeter, dans une logique « temps/espace » les résultats de simulation numérique au sein du jumeau numérique, en y intégrant toute la chaîne d'outils (maquette, CAO, géomodelleur, maillage, outils de simulation numérique, de post-traitement et vérification). Les principaux enjeux de développement sont liés aux modalités de passage entre le détail géométrique de la maquette numérique et la simplification afférente à chaque usage. Dans le cas du jumeau numérique phénoménologique, ces simplifications renvoient à la conceptualisation physique et numérique de chaque processus, aux

choix des composants physiques à conserver, et à la projection des résultats obtenus, en incluant la gestion automatisée des différents formats, au sein d'un environnement unifié de type plateforme logicielle.

Développer au sein du jumeau une architecture connectée de type IoT (Internet des objets), opérable sur des systèmes de type cloud

La mise en œuvre d'un jumeau numérique, notamment phénoménologique, mobilisera de grandes masses de données issues de différents systèmes et de composants physiques nombreux et variés. Cela nécessite le développement d'un environnement intégrateur composé d'objets connectés, de réseaux de communication sans fil, de plateformes de collecte/d'hébergement/de traitement des données de toutes natures, d'une supervision/sécurisation de toute la chaîne. La quantité de données pourra être externalisée sur des systèmes de type cloud.

VISUALISATION DE LA MÉTHODOLOGIE D'HABILLAGE D'UN EXTRAIT DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE PAR LES RÉSULTATS DE SIMULATION NUMÉRIQUE DES PROCESSUS THERMIQUES AU SEIN D'UN ALVÉOLE HA, PREMIER PAS VERS LE JUMEAU NUMÉRIQUE PHÉNOMÉNOLOGIQUE



Développer des algorithmes logiciels performants pour mieux confronter l'information réelle issue des mesures à celle prédictive issue des modèles

Il s'agit, sans altérer la précision et la robustesse d'une évaluation, de disposer de méthodes numériques performantes permettant de réduire de manière significative les temps de calcul des simulations numériques prédictives par l'utilisation d'algorithmes efficaces, et/ou la simplification de problèmes multi-physiques par réduction de modèles ou *meta-modelling*, et/ou d'utilisation de l'Intelligence artificielle par apprentissage machine (*machine learning*).

Développer des techniques de calcul Haute Performance (HPC) sur des machines de calcul parallèles

Cela concerne principalement le développement d'algorithmes de couplages multi-physiques et multi-milieux, de solveurs parallèles, de techniques de décomposition de domaines (temps/espace), d'adaptation de maillage, de calage de modèle par inversion/optimisation. La mise en œuvre de certains outils de simulation hautement parallèles devra s'appuyer sur l'utilisation de centres de calcul intensif ou d'un *cloud computing* dédié.

Développer des techniques de réduction de modèles

Il s'agit de simplifier, au regard des objectifs de quantification (temps/espace), la résolution du système d'équations aux dérivées partielles des processus physico-chimiques de l'évolution phénoménologique du stockage considérés, afin d'obtenir des calculs moins coûteux en temps et plus robustes. Ces méthodes de réduction constituent un énorme potentiel de progrès pour la résolution de problèmes hors de portée des codes de calcul industriels et ouvrent la voie à de nouvelles démarches pour lesquelles la simulation et l'analyse du comportement du système peuvent être menées quasiment en temps réel (même si les évolutions phénoménologiques des stockages sont majoritairement lentes à très lentes, et que la simulation en temps réel relève plus d'un objectif de comparaison de masses importantes de données de natures diverses entre l'observé et le prédictif).

Implémenter des algorithmes d'Intelligence artificielle (IA) par apprentissage automatique d'outils de calcul

Le *machine learning* (« apprentissage automatique ») est une technologie d'IA permettant aux ordinateurs d'apprendre par eux-mêmes, donc sans programmation explicite initiale, en fonction d'un historique. Des algorithmes d'apprentissage sont construits et alimentés par de grandes sources d'information, les bases d'apprentissage, à partir desquelles les modèles s'entraînent et « apprennent ». Cette combinaison données-algorithmes doit permettre de développer des modèles analytiques pour reconnaître et traiter des problèmes « complexes » comme ceux multi-physiques et multi-composants des stockages, d'extraire de la valeur grâce à ces connaissances, et, par la suite, de construire des outils de prédiction ou de classification afin de fournir une aide à la décision.

Il s'agit, en mobilisant les bases d'apprentissage pertinentes, d'obtenir des gains très significatifs sur les temps de simulation numérique multi-physique et ayant un très grand nombre de données d'entrée (par exemple : pour le transport réactif en milieu poreux).

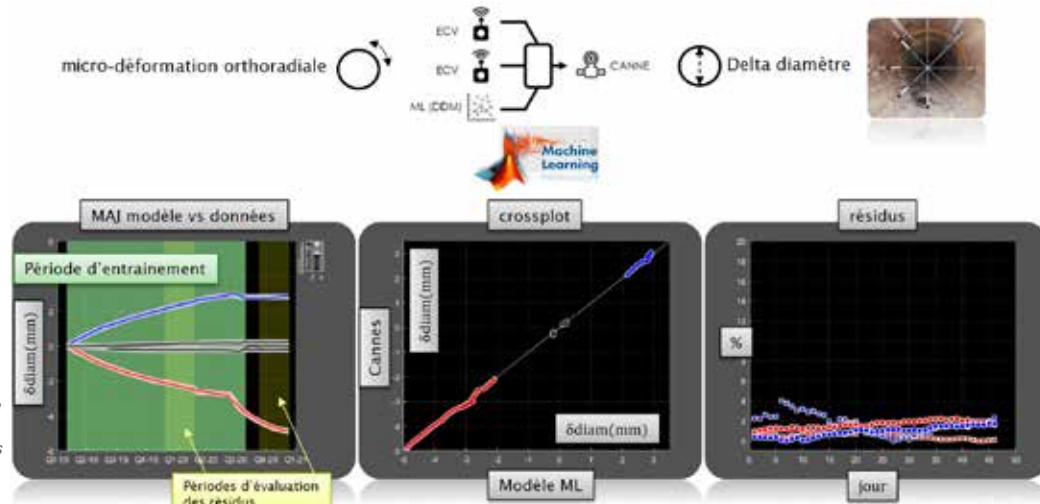
Développer des méta-modèles permettant d'approcher un outil de calcul par une surface de réponse

Ces méthodes sont complémentaires à celles du *machine learning*, permettent de contribuer à faire interagir en temps réel les estimations prédictives avec l'observé pour l'aide à la décision.

Il s'agit d'approcher, par des techniques de *meta-modelling*, la réponse (scalaire ou vectorielle) d'un modèle par des techniques de surface de réponse de type réseau de neurones ou méthodes spectrales, permettant d'appréhender le domaine de fonctionnement d'un outil de simulation d'un processus ou de plusieurs processus couplés avec de fortes non-linéarités, comme ceux des évolutions phénoménologiques des stockages.

ILLUSTRATION DE L'APPLICATION D'UNE MÉTHODE DE MACHINE LEARNING

Analyse des mesures acquises sur le démonstrateur technologique d'alvéole de stockage de déchets HA chauffant ALC1605 au Laboratoire souterrain de stockage de déchets de Meuse/Haute-Marne (à l'extrados du chemisage : extensomètres à corde vibrante (ECV), à l'intrados : cannes de convergence et sondes platines). Après une période d'apprentissage, l'algorithme est capable de prédire la mesure directe par les cannes à partir des mesures indirectes réalisées par les ECV en extrados.





Développer des méthodes de traitement des données pour une information intégrée et fiable

Enjeux opérationnels

- + Contribuer à garantir la sûreté en exploitation (surveillance, maintenance, aide à la décision, etc.)
- + Vérifier que l'installation et son environnement, notamment géologique, restent dans le domaine de fonctionnement phénoménologique défini dans le cadre des évaluations de sûreté et de l'autorisation de mise en service
- + Garantir la maîtrise des conditions d'environnement des alvéoles de stockage pour la récupérabilité des colis du centre de stockage Cigéo

Objectifs scientifiques

- + Adapter les techniques de traitement de données (fusion de données, méthodes statistiques, algorithmes d'IA et systèmes experts, etc.) aux spécificités des stockages et à un environnement unifié, accessible, lisible (visualisation et partage des connaissances/aide à la décision)



Déchets/filières

- + Tous stockages, mais principalement le centre de stockage Cigéo

Composants concernés

- + Tous composants

La maîtrise de la gestion de l'accroissement du nombre de données de surveillance/observation avec le développement progressif des stockages et du niveau des représentations/simulations multi-physiques couplées de l'évolution phénoménologique des stockages nécessite de mettre en œuvre des méthodes de traitement adaptées

afin de disposer d'une information qualifiée, fiable et robuste. Au-delà de la quantité de données, il est nécessaire de prendre en compte les sources hétérogènes de production des données et, en lien avec leur fiabilité (imprécisions et incertitudes éventuelles), de combiner ces informations.

Développer des algorithmes performants pour le calage de modèles

Les modèles multi-physiques parfois complexes des représentations/simulations multi-physiques couplées de l'évolution phénoménologique des stockages sont coûteux en temps de calcul, hétérogènes, et mobilisent un grand nombre de paramètres. Le calage de ces modèles nécessite de disposer de techniques de calibration efficaces afin de

garantir des modèles et des données pertinentes pour l'exploitation des modèles prédictifs par simulation numérique. Cela repose sur le développement d'algorithmes numériques par inversion ou de méthodes d'optimisation.

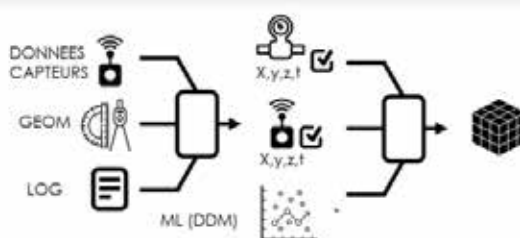
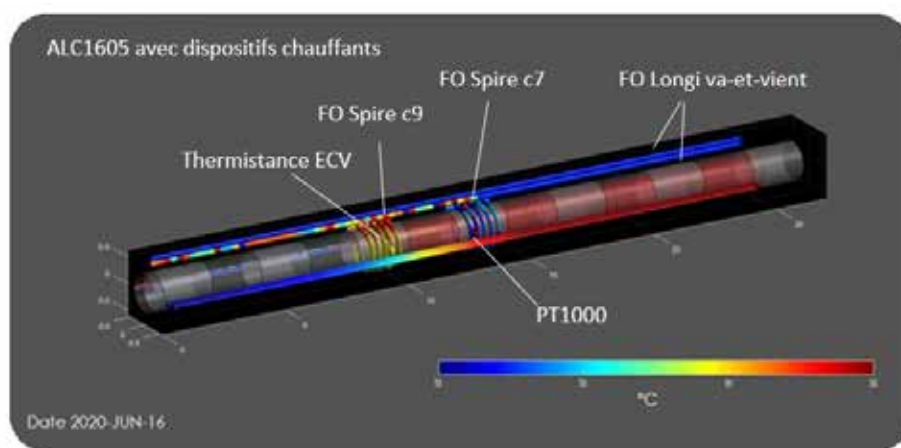
Développer des techniques de traitement de données (fusion, assimilation) pour une information qualifiée et robuste

Il s'agit de pouvoir gérer la combinaison de différentes sources de données (des mesures physico-chimiques *in situ*, des données issues de méta-modèles, des résultats de simulation, etc.), associées à de grands volumes de données, sur des objets hétérogènes, afin d'améliorer la compréhension d'un système et de son évolution.

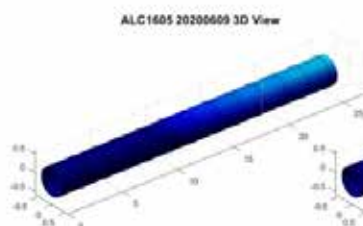
À travers le développement de méthodes de fusion ou d'assimilation de données, l'objectif est l'interprétation plus précise et plus fiable des données, à partir de leur complémentarité, des variabilités et des incertitudes de toutes natures, en incluant les précisions des dispositifs

de surveillance et leurs dérives éventuelles. À titre d'exemple, (i) la fusion de données (mesures/calculs) doit permettre de reconstituer une information manquante (défaillance ou absence d'un capteur) à partir des tendances de la simulation numérique et des données des autres capteurs, et (ii) l'assimilation de données doit permettre d'accéder rapidement à de la connaissance en support à l'aide à la décision, notamment par le développement de modèles d'intelligence artificielle de substitution (*surrogate AI models*), entièrement basés sur des données d'observation, et par des techniques de *deep learning* (réseau de neurones).

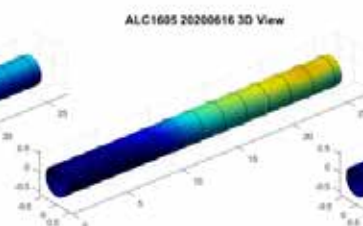
ILLUSTRATION DE L'APPLICATION D'UNE MÉTHODE DE FUSION DE DONNÉES DIRECTE



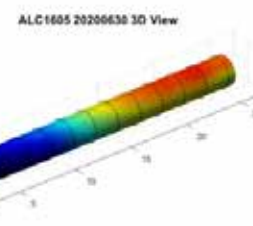
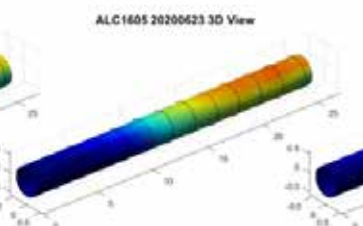
1. Contrôle des données



2. Initialisation ML



3. Régression 3D (X,θ,t)



Analyse des mesures acquises sur le démonstrateur technologique d'alvéole de stockage de déchets HA chauffant ALC1605 au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (à l'extrados du chemisage : extensomètres à corde vibrante (ECV), sondes platines, fibres optiques longitudinales et spiralées (FO) ; à l'intrados : jauges de déformation, cannes de convergence et sondes platines) pour obtenir une représentation du champ 3D de la température.



**Renforcer l'approche
environnementale
intégrée au cœur
des actions de l'Andra**

La gestion à long terme des déchets radioactifs a pour finalité la protection de l'environnement et de la santé des générations futures vis-à-vis de la dangerosité de ces déchets.

L'environnement est au cœur des actions de l'Andra à divers titres : d'une part, les stockages visent à protéger l'homme et l'environnement de la dangerosité des déchets radioactifs ; d'autre part, leur conception et leur exploitation doivent garantir une bonne intégration environnementale (suivant la méthode ERC pour éviter-réduire-compenser). Ces objectifs se déclinent de manière proportionnée à la dangerosité des déchets et de manière propre à chaque filière de gestion (stockage de surface, stockage à faible profondeur, stockage profond) et chaque site associé.

La prise en compte des problématiques environnementales passe classiquement par l'acquisition et le traitement de données de natures

différentes dans le temps et dans l'espace : biodiversité, pédologie, géologie, hydrologie/hydrogéologie, sciences de l'atmosphère, géographie, sociologie, économie, etc.

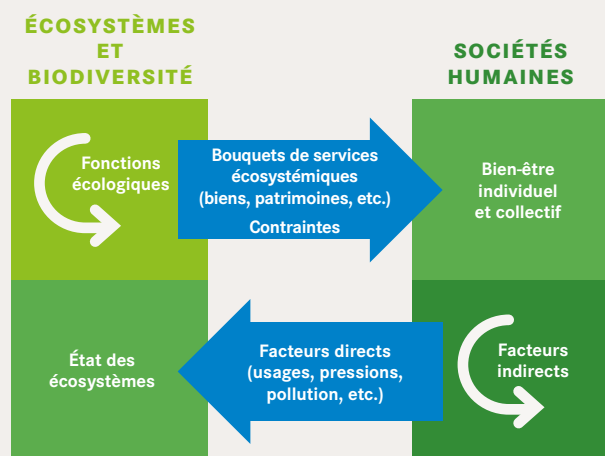
Le constat d'une demande sociétale de plus en plus forte de prise en compte de la protection environnementale et corrélativement d'un renforcement de la réglementation en la matière amène les porteurs de projets d'installations industrielles et les exploitants, ainsi que la communauté scientifique, à développer des approches plus intégratrices d'évaluation des incidences des forçages anthropiques (changement climatique, développement industriel, etc.) sur les écosystèmes et sur les usages de l'environnement par l'homme. Demandée depuis peu dans les dossiers réglementaires, cette évaluation intégrée des interrelations entre les milieux qui s'appuie sur l'analyse croisée de données d'observation multiples relève encore largement de la recherche.



L'approche écosystémique et les services écosystémiques

L'approche écosystémique identifie la complexité des interactions entre les sols, l'eau, l'atmosphère, la biodiversité et les usages par l'homme des ressources naturelles. Elle permet de proposer un cadre conceptuel d'interprétation de cette complexité pour favoriser la conservation et l'utilisation durable et soutenable des ressources. Les services écosystémiques traduisent ces interactions à travers l'évaluation des bénéfices au sens large que l'homme tire des écosystèmes.

VISUALISATION DU CADRE CONCEPTUEL DE L'APPROCHE ÉCOSYSTÉMIQUE ET DIFFÉRENTS SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES PRÉSENTS SUR LE TERRITOIRE D'IMPLANTATION DU PROJET CIGÉO



L'Andra a déjà engagé le développement de méthodologies et de techniques d'observation et de suivi applicables à la diversité des environnements de stockage (géologie/écologie et climat ainsi que choix de stockage en surface ou profond) et aux spécificités des déchets radioactifs pris en charge (niveau de radioactivité, volume). Le développement progressif du projet Cigéo, mais aussi la prise en compte de l'environnement dans l'analyse multicritère de définition des filières de gestion de certains déchets aujourd'hui sans filière (par exemple : les déchets FA-VL) ou pour lesquels des évolutions peuvent être envisagées (par exemple : les déchets TFA des démantèlements futurs) en sont des moteurs forts pour poursuivre et renforcer ces développements.

L'Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques EFSE CGDD 2017 propose une démarche d'analyse des services écosystémiques qui se justifie dans une perspective de gestion durable des environnements, dans le contexte de dégradation des milieux naturels accentué par les pressions anthropiques comme le changement climatique.

L'objectif pour l'Andra en matière d'évaluation environnementale intégrée est de construire une vision globale et cohérente de l'ensemble des interactions entre compartiments environnementaux, en y incluant les usages par l'homme. Au-delà de cette évaluation environnementale intégrée à l'actuel, il s'agit également de proposer des scénarios d'évolutions possibles qui tiennent compte au mieux de la complexité spatiale et temporelle des interactions et des usages par l'homme sur des périodes allant de quelques dizaines d'années à quelques dizaines de milliers d'années.

L'approche développée par l'EFSE qui s'attache à documenter les trajectoires passées et attendues de l'état des écosystèmes et des services associés peut être adaptée aux spécificités des sites d'implantation des centres de stockage et aux échelles de temps considérées. Cette analyse prend d'autant plus de sens en ce qui concerne les déchets pour lesquels les enjeux environnementaux peuvent dépasser ceux liés à la radioprotection, particulièrement les déchets TFA.

L'Andra s'inscrit pleinement dans cette démarche par l'acquisition de nombreuses données d'observation et en développant des projets de recherche visant à intégrer ces données (cf. la mise en place dès 2007 d'un Observatoire pérenne de l'environnement en Meuse/Haute-Marne dans le cadre du projet Cigéo et l'étude d'impact de la demande de Déclaration d'utilité publique du projet Cigéo déposée en août 2020).

L'approfondissement de cette démarche doit se déployer sur trois axes :

- renforcer l'approche environnementale intégrée par la poursuite d'un déploiement adapté aux territoires d'implantation des stockages et par une meilleure évaluation des perceptions et représentations environnementales de ces territoires par les populations ;
- définir des scénarios d'évolution environnementale dans le futur, notamment sur le long terme ;
- mieux appréhender les impacts radiologiques au *non human biota*, notamment en après-fermeture des stockages.



L'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE)

Développé entre 2007 et 2013, l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) est un outil exceptionnel d'observation de l'évolution environnementale du territoire d'implantation du projet Cigéo, avant sa réalisation et durant toute son exploitation. Son existence répond au caractère exceptionnel du projet Cigéo (sa nature, sa durée d'exploitation d'ordre séculaire, etc.) et à la volonté et l'intuition de l'Andra de dépasser le cadre classique des études environnementales en disposant d'un outil contribuant au dialogue avec les acteurs du territoire autour du projet Cigéo et au développement durable du territoire.

L'OPE comprend un ensemble complet de moyens d'observation des écosystèmes (eaux, air, sol, biodiversité) et de conservation d'échantillons de l'environnement, sur une zone d'environ 350 km² autour du site d'implantation du projet Cigéo. Deux grands principes ont présidé à sa mise en place : (i) assurer pour chaque observable la représentativité spatio-temporelle de l'échantillonnage par un choix de la taille de maille et de la périodicité des mesures qui soit adapté à la variabilité du territoire et aux forçages actuels et supposés dans le futur, et (ii) intégrer les réseaux environnementaux nationaux lorsqu'ils existent, dans un double objectif d'excellence scientifique (notamment en appliquant les normes et protocoles en vigueur), et d'accessibilité à une échelle spatiale dépassant celle du territoire d'implantation. Les données et connaissances acquises par l'OPE complètent des observations environnementales spécifiques aux études d'impacts menées sur une zone plus restreinte, autour des emprises du projet Cigéo.



L'approche écosystémique identifie la complexité des interactions entre les sols, l'eau, l'atmosphère, la biodiversité et les usages par l'homme des ressources naturelles. Elle permet de proposer un cadre conceptuel d'interprétation de cette complexité pour favoriser la conservation et l'utilisation durable et soutenable des ressources. Les services écosystémiques traduisent ces interactions à travers l'évaluation des bénéfices au sens large que l'homme tire des écosystèmes.

VISUALISATION DES SPÉCIFICITÉS DE L'OPE (ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES RECUEILLIES)



3 000 échantillons
prélevés/an



130 jours d'observation/an
de la biodiversité
(Chiroptère, amphibien,
insectes, oiseau,
poisson, flore et
habitats)



10 000 analyses chimiques
réalisées par des
prestataires
(eau, sol)



30 millions de mesures
(paramètres météo,
qualité de l'air,
qualité de l'eau,
mesures de flux radiatif,
hydrique, etc.)



**2 bases de données
géo référencées**
(1 pour les mesures
en continu
et 1 pour les mesures
ponctuelles
et les observations)

Fort de cette base de données environnementales multifactorielles, l'OPE évolue depuis 2018 vers un observatoire homme-environnement dans le cadre de la mise en œuvre de l'approche écosystémique. Les développements méthodologiques et scientifiques attendus permettront d'adapter, aux échelles des stockages, des modèles d'évaluation des incidences des projets et des outils prospectifs d'aide à la décision en termes d'aménagement des stockages et de leurs territoires hôtes.

Les outils méthodologiques et d'observation des fonctions et services écosystémiques rendus par le territoire pourront être généralisables aux centres de stockages existants et aux futurs projets de stockage de l'Andra. Cette démarche innovante pourrait aussi être partagée au-delà des activités de l'Andra, pour l'implantation de grands projets industriels.

TOUR À FLUX DU SITE EXPÉRIMENTAL FORESTIER DE MONTIERS-SUR-SAULX



DISPOSITIFS DE CONSERVATION DES ÉCHANTILLONS À L'ÉCOTHÈQUE



Conservation à sec.



Conservation en cuve cryogénique.



Renforcer l'approche environnementale intégrée pour les centres et les projets de stockage

Enjeux opérationnels

- + Alimenter les études d'impact du projet Cigéo et anticiper les évolutions réglementaires
- + Nourrir le dialogue avec les parties prenantes
- + Accompagner l'intégration des activités de l'Andra sur leur territoire d'implantation

Objectifs scientifiques

- + Développer par une approche écosystémique (homme-environnement) des modèles d'évolution environnementale à court et moyen terme des sites et territoires des stockages
- + Développer les démarches de concertation et de co-construction

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Environnement, milieu géologique



Poursuivre le déploiement d'une démarche environnementale résolument intégratrice

Afin de répondre aux enjeux opérationnels des projets de stockage ainsi qu'aux questions d'ordre scientifique, réglementaire ou territorial liées à l'implantation de projets d'envergure nationale dans des zones essentiellement rurales, l'Andra s'est engagée dans le processus d'analyse des nombreuses observations environnementales dont elle dispose, dans une approche écosystémique en incluant la prise en compte des grands équilibres environnementaux et des aspects socio-économiques associés. Dans ce cadre, l'évaluation des services écosystémiques (SE), c'est-à-dire les services rendus par la nature à l'Homme, doit permettre de développer des outils de modélisation des trajectoires d'évolution environnementale des sites et des territoires à court terme (quelques années à quelques dizaines d'années). Cette démarche s'inscrit dans le champ plus global de la recherche d'un aménagement plus durable des territoires et d'une approche écosystémique.

La poursuite du déploiement de cette approche environnementale intégrée repose sur la mise en œuvre d'une boucle itérative (caractérisation, modélisation) permettant de réduire les incertitudes sur l'évaluation des incidences des projets de stockage à court et moyen termes et de fournir des outils de connaissance aux aménageurs du territoire. Elle comporte trois aspects :

- définir les indicateurs les plus pertinents et représentatifs pour caractériser les évolutions des écosystèmes ;
- développer des techniques de mesure des indicateurs environnementaux applicables aux réseaux de surveillance et d'observation propres aux sites de stockage et/ou aux infrastructures d'observation environnementales locales, nationales et internationales ;
- développer des modèles prenant en compte les forçages climatiques et sociétaux (pratiques agricoles, évolution démographique, etc.), les caractéristiques spécifiques des sites (hydrologie, géologie, géomorphologie) et des déchets à stocker (impact radiologique/toxicologique et sur la santé des populations).

Mieux prendre en compte les perceptions et les représentations sociales de l'environnement sur les territoires d'implantation des stockages

Afin d'appréhender dans leur globalité les interrelations homme-environnement, l'approche intégratrice écosystémique fondée sur la connaissance du fonctionnement des milieux au travers de leurs caractéristiques physiques et biologiques, doit considérer l'influence, sur les comportements humains et donc sur l'usage que l'Homme fait de son environnement, d'éléments subjectifs liés aux perceptions et représentations sociales de l'environnement. En effet, celles-ci sont des éléments déterminants pour l'évaluation par les populations de la qualité du service rendu par l'environnement au bien-être de l'Homme au travers de son cadre de vie et donc de l'équilibre acceptable entre bénéfices et contreparties de l'installation ou de l'exploitation des centres de stockage.

L'évaluation des représentations et des perceptions comporte deux aspects :

- mieux comprendre comment les individus et les groupes sociaux s'approprient leur environnement/territoire. Qu'elles soient économiques, sanitaires, idéelles, spirituelles ou de loisirs, les perceptions et les représentations de l'environnement sont propres à chaque individu ou groupe d'individus ;
- identifier les enjeux de natures diverses liés à la façon dont les individus ou les groupes d'individus perçoivent et se représentent leur environnement.



Définir des scénarios d'évolution de l'environnement des centres de stockage à moyen et à long termes

Enjeux opérationnels

- + Alimenter les études d'impact et anticiper les évolutions réglementaires en matière d'environnement
- + Accompagner le fléchage de déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées
- + Nourrir le dialogue avec les parties prenantes
- + Accompagner l'intégration des activités de l'Andra sur leurs territoires d'implantation

Objectifs scientifiques

- + Établir une vision dynamique de l'évolution de l'environnement à moyen et long termes
- + Anticiper les incidences environnementales directes et indirectes des stockages, notamment en projet, sur l'environnement



Déchets/filières

- + Tous stockages

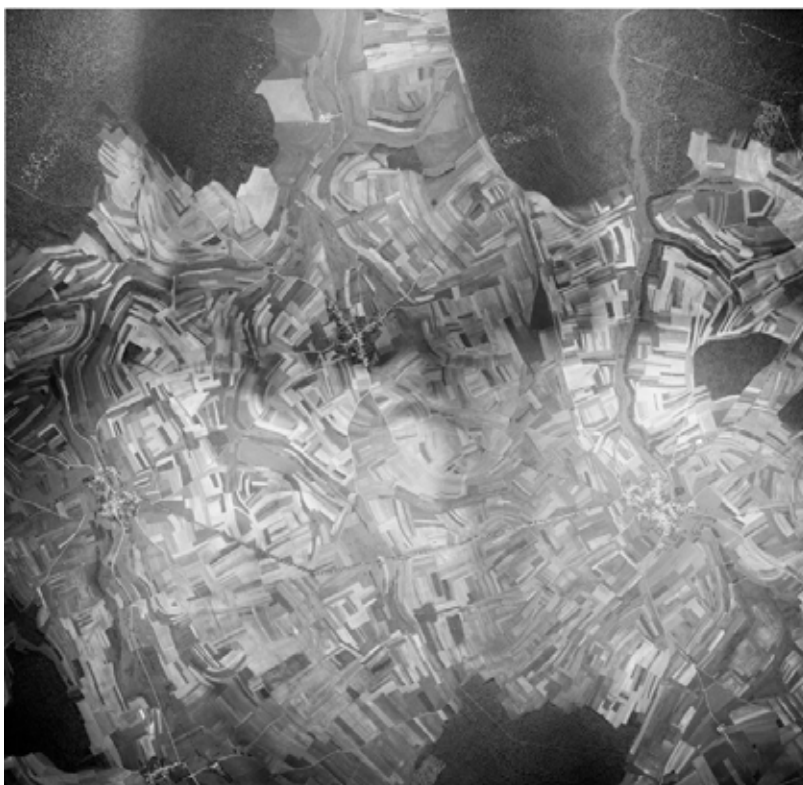
Composants concernés

- + Environnement, milieu géologique

L'analyse des évolutions environnementales à moyen et long termes, c'est-à-dire de la centaine d'années à plusieurs dizaines de milliers d'années, nécessite d'intégrer des données prédictives diverses et auxquelles sont associées de fortes incertitudes à ces échelles de temps. L'Andra s'inscrit donc dans une démarche de recherche prospective autour des deux axes :

- développer des scénarios d'évolution future du climat (température, précipitation, intensité et fréquence des événements extrêmes) et des mécanismes de rétroaction physique ou biologique qui régulent ou amplifient l'impact sur l'activité humaine des changements climatiques ;
- développer des scénarios d'évolution des sociétés humaines sous contrainte (climatique, industrielle, etc.).

**ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LE TEMPS : EXEMPLE DE L'ÉVOLUTION DU TERRITOIRE
D'IMPLANTATION DU CENTRE DE STOCKAGE CIGÉO EN 60 ANS**



Vue aérienne de 1958.



Vue aérienne de 2018.



Mieux appréhender les impacts radiologiques au *non human biota*, notamment en après-fermeture des stockages

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et préciser les marges de sûreté en après-fermeture
- + Alimenter les études d'impact et anticiper les évolutions réglementaires en matière d'environnement
- + Accompagner l'évolution de la réglementation

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser le couplage entre transfert des solutés, processus chimiques et spéciation des radionucléides dans les environnements de surface
- + Développer des modèles de calcul de dose aux écosystèmes (*non human biota*) en après-fermeture

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Environnement, milieu géologique

Les évaluations des impacts radiologiques et toxiques à l'homme font partie des fondamentaux de la sûreté des stockages des déchets radioactifs pendant leur exploitation et après leur fermeture. Les exigences environnementales actuelles préconisent une application de ces évaluations à l'ensemble du vivant non humain (*non human biota*). Ces dernières concernent déjà aujourd'hui la phase d'exploitation et visent à intégrer l'après-fermeture du stockage impliquant de plus longues échelles de temps.

Les méthodes d'évaluation d'exposition radiologiques et toxiques à l'homme et au *non human biota* dans des environnements actuels et pour l'exploitation permettent de répondre aujourd'hui aux exigences réglementaires (*non human biota*). Cependant, pour l'après-fermeture et les longues échelles de temps associées, les incertitudes associées requièrent de mieux appréhender les voies d'exposition de la faune et de la flore en lien avec l'évolution des conditions environnementales.

Améliorer les modèles de représentation des différentes voies de transfert des radionucléides et des situations potentielles d'exposition du *non human biota* sur le long terme

La concentration des radionucléides et des composés chimiques dans les compartiments (eau, sol, sédiment, végétation) de l'environnement proche des installations de stockage constitue une donnée d'entrée essentielle des modèles de transfert à la faune et à la flore. Un réalisme augmenté de représentation des différentes voies de transfert sur un temps long nécessite de mieux décrire le devenir spatio-temporel des éléments radioactifs et toxiques en intégrant l'évolution des inventaires de déchets, les caractéristiques des sites (hydrologie, géomorphologie, etc.) et les transferts à l'interface géosphère-biosphère. En s'appuyant sur les réseaux scientifiques internationaux constitués autour des évaluations d'impacts radiologiques ainsi que sur les études nationales de R&D menées sur la dynamique des écosystèmes, il s'agit en particulier de développer une simulation plus explicite et objective du comportement des radionucléides

et des composés chimiques, gouverné par le fonctionnement des écosystèmes dans les environnements proches des stockages, autour de trois aspects :

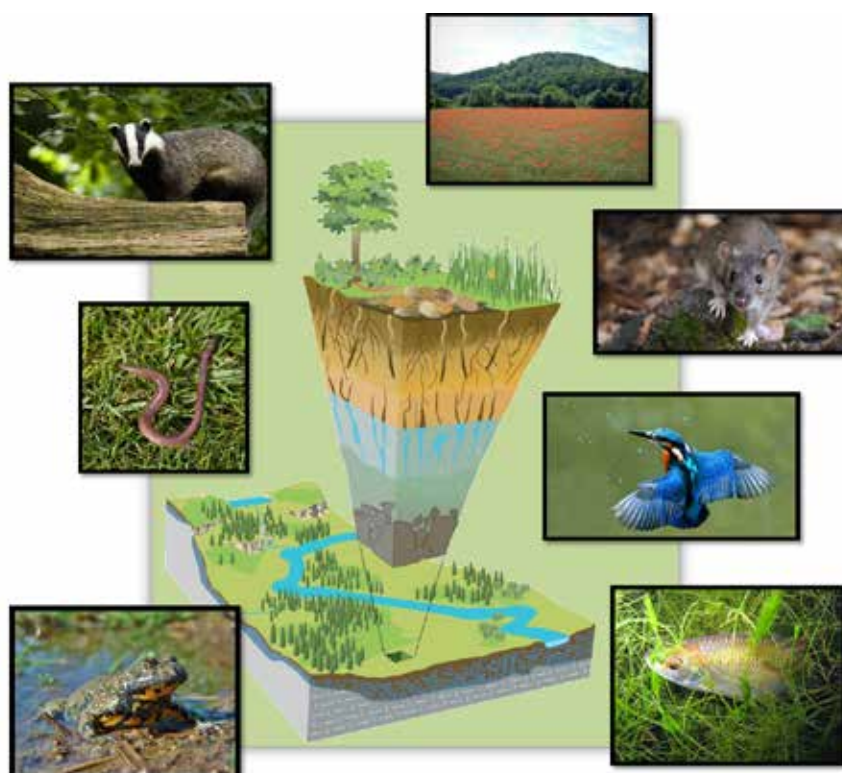
- améliorer la représentation de la spéciation et la biodisponibilité des radionucléides et des composés chimiques dans les écosystèmes des environnements des stockages ;
- appréhender la dynamique de redistribution des radionucléides entre les écosystèmes (terrestre vs. aquatique) et compartiments (nappe, sol, végétation, atmosphère) de l'environnement local ;
- appréhender le couplage entre l'évolution climatique et l'évolution écologique des sites des stockages au cours du temps, au travers de scénarios prospectifs.

Mieux définir les facteurs de transfert des radionucléides au *non human biota*

En matière de radioprotection environnementale, l'estimation de la concentration en radionucléides dans les organismes est l'un des éléments fondamentaux de la prévision des débits de dose reçus par la faune. Au niveau international, les bases de données des paramètres de transfert restent aujourd'hui parcellaires du fait des nombreuses combinaisons radionucléides-organismes et des spécificités propres à chaque environnement des sites de stockages ;

En s'appuyant sur les développements et les recommandations au niveau des réseaux de radioprotection internationaux afin de s'approprier des méthodes alternatives d'extrapolation des données génériques aux sites de stockage, l'objectif est d'obtenir des données spécifiques aux sites de stockages par l'utilisation de méthodes basées sur des éléments analogues et la prise en compte des formes disponibles avérées des radionucléides.

EXEMPLES DU VIVANT NON HUMAIN (FAUNE ET FLORE) CONCERNÉ PAR L'ÉVALUATION DES IMPACTS RADIOLOGIQUES





**Appréhender
les transformations
de la société et venir
en soutien au dialogue
avec les parties prenantes**

Au-delà des questions scientifiques et technologiques, la gestion des déchets radioactifs s'accompagne d'un ensemble de questions sociétales de natures diverses : gouvernance, organisation, perception du temps, appréciation et gestion du risque, décision politique, confiance envers les experts, vérité scientifique, gestion des incertitudes, etc.

L'Andra a mené, depuis plus d'une dizaine d'années, un ensemble de travaux de recherche et d'études dans le domaine des sciences humaines et sociales, en particulier sur les thématiques de la réversibilité, de la mémoire, de la gestion des incertitudes, et sur l'économie des grands projets.

Ces thématiques, toujours d'actualité, continueront à figurer parmi les sujets d'intérêt de l'Andra dans les années à venir, en particulier ceux relatifs à la gestion des incertitudes auxquelles doit faire face la société (évolution institutionnelle, économique ou sociale, mais aussi

technique), et à la caractérisation des risques pour les générations futures. En revanche, des thématiques, plus nouvelles pour l'Andra, émergent sur le sujet des représentations, ou la dimension territoriale des projets de gestion des déchets radioactifs et leurs incidences locales. L'ensemble de ces thématiques feront l'objet, dans un cadre d'une gouvernance dédiée, de contributions par l'Andra au domaine des sciences humaines et sociales, par le biais de recherches académiques ou d'études notamment.

Ainsi, la R&D de demain de l'Andra en sciences humaines et sociales contribuera à mieux comprendre les évolutions et attentes de la société, en appui aux dispositifs de gouvernance des stockages, pour nourrir le dialogue avec les parties prenantes et accompagner l'intégration territoriale des activités de l'Andra.

Des attentes sociétales fortes

La protection de l'environnement et de la santé, fondement de la gestion des déchets radioactifs et plus particulièrement de leurs stockages, ne peut se concevoir qu'en interaction étroite avec la société et reposant sur des principes forts :

- **la responsabilité : les déchets radioactifs sont là et doivent être gérés dans une logique de long terme et le respect des générations actuelles et futures ;**
- **la solidarité nationale : la gestion à long terme de déchets radioactifs, en particulier des stockages, nécessite une implantation sur des territoires où ces déchets, provenant en général d'autres territoires, sont regroupés pour mieux les isoler, les confiner et les surveiller ;**
- **la responsabilité intergénérationnelle : l'identification de ces territoires d'implantation puis la mise en œuvre concrète des solutions de stockage impliquent des décisions publiques engageantes sur les plans environnemental et économique, en s'appuyant sur les principes de responsabilité intergénérationnelle, de prévention des risques induits par les déchets produits et de précaution au regard des temps longs des stockages.**

Si ces questions concernent aujourd'hui en premier lieu Cigéo, le projet de centre industriel de stockage géologique des déchets radioactifs les plus dangereux, elles s'appliquent à toutes les installations de l'Andra et plus particulièrement au développement de nouveaux projets dans l'Aube (projet Acaci d'extension de capacité du Cires ; projet de nouveau centre pour accueillir une partie des déchets FA-VL et prendre la relève du Cires pour les déchets TFA dans le futur), ainsi qu'à la détermination de modes complémentaires de gestion à long terme pour les déchets radioactifs qui ne seront pas pris en charge sur ces installations.

Les enjeux de la gestion à long terme des déchets radioactifs interpellent directement la société. Il s'agit pour une grande part de préparer des décisions à prendre par les générations actuelles dans une logique de protection des intérêts des futures générations.

Les activités de l'Andra constituent un cadre unique pour les sciences humaines et sociales de par la nature de ces activités, en particulier les temporalités considérées. L'Andra questionne la communauté académique des sciences humaines et sociales sur ces enjeux afin de déterminer les domaines d'action susceptibles de constituer des champs d'investigation d'intérêts communs. La gestion des déchets radioactifs s'inscrit ainsi dans le cadre plus général du dialogue entre science et société, encouragé en 2020 par la ministre de l'Enseignement, de la Recherche et de l'Innovation dans un courrier aux chercheurs de France.



Comprendre et accompagner les transformations des territoires

Enjeux opérationnels

- + Nourrir le dialogue avec les parties prenantes
- + Accompagner l'intégration territoriale des activités de l'Andra



Objectifs scientifiques

- + Analyser les implications de l'éthique interterritoriale et comprendre la transformation des territoires

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Tous composants

Chaque territoire d'implantation a des spécificités et une histoire propre qu'il est nécessaire de respecter pour garantir une bonne intégration des installations de stockage et favoriser l'apport

de bénéfices de natures diverses et le développement de projets pour ces territoires.

Comprendre les perceptions et les représentations sociales sur les territoires

L'implantation d'installations de l'Andra conduit à une transformation notable des caractéristiques sociales, économiques et environnementales des territoires qui les accueillent. Cette transformation s'accompagne d'une modification de la perception des habitants de ce qu'est leur territoire. De ce fait, au-delà de la perception environnementale des territoires (cf. « Mieux prendre en compte les perceptions et les représentations sociales de l'environnement sur les territoires d'implantation des stockages », il est tout aussi important de connaître les perceptions et les représentations sociales, parfois contradictoires, rattachées à ces transformations, autour de la notion d'équilibre entre bénéfices de l'implantation (activités économiques, etc.) et contreparties (travaux, etc.).

Il paraît donc important de :

- > **comprendre comment les individus et les groupes sociaux s'approprient leur environnement/territoire.** Qu'elles soient économiques, sanitaires, idéelles, spirituelles ou de loisirs, les perceptions et les représentations de l'environnement sont propres à chaque individu ou groupe d'individus. Il convient alors, dans une optique d'interaction de l'ensemble des composantes du territoire, de les comprendre afin d'être en mesure de les prendre en compte dans les actions de gouvernance ;
- > **rendre compte des enjeux présents sur ce territoire.** La façon dont les individus ou groupes d'individus perçoivent et se représentent leur environnement permet de faire émerger

des enjeux de natures diverses. Caractériser ces enjeux, quelles que soient leurs natures, permet aussi de mieux adapter sa gouvernance dès lors qu'il s'agit d'y répondre et de les intégrer dans une stratégie décisionnelle de dialogue (concertation, aménagement du territoire et choix divers de manière générale).

Concernant le territoire de Meuse/Haute-Marne pour le projet Cigéo, l'observation « intensive » (environnement, géologie, économie, etc.) générée par la présence de l'Andra doit faire l'objet d'un point d'attention particulier. En effet, elle peut être perçue comme intrusive : auscultation du sous-sol et de l'environnement, observation de l'activité humaine (y compris pour satisfaire des attentes locales comme en matière de surveillance sanitaire), mouvements d'opposition, etc. Elle implique donc à dessein la présence des acteurs locaux dans la gouvernance des différents dispositifs d'observation et de suivi du territoire et du développement du projet de centre de stockage Cigéo pour qu'ils soient pleinement acteurs de ces dynamiques.

PROJET DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE ÉLABORÉ À L'ÉCHELLE DES DÉPARTEMENTS DE LA MEUSE ET DE LA HAUTE-MARNE PAR L'ÉTAT, EN CONCERTATION AVEC LES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES CONCERNÉES, LES ACTEURS ÉCONOMIQUES LOCAUX, L'ANDRA ET LES ENTREPRISES DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE, CO-FINANCEURS DU PROJET CIGÉO





Comprendre les processus de construction des représentations et des décisions

Enjeux opérationnels

- + Nourrir le dialogue avec les parties prenantes
- + Accompagner l'intégration territoriale des activités de l'Andra



Objectifs scientifiques

- + Comprendre les perceptions : environnement, gestion des incertitudes et de la preuve, interaction science/société dans les processus de décision, temporalité
- + Questionner le rapport de la société à la gestion des déchets radioactifs

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Tous composants

L'implantation d'un projet de stockage de déchets radioactifs est de nature à bouleverser les usages et les habitudes des riverains, et amène à questionner leur place dans les processus de décision.

Si ces questions renvoient plutôt aux décisions de principe à l'échelle nationale, elles s'adressent directement au cadre de vie des riverains à l'échelle locale, *a fortiori* dans un territoire rural.

Comprendre les ressorts des représentations associées aux déchets radioactifs

Dans l'esprit collectif, la gestion des déchets radioactifs est associée à l'histoire du nucléaire à la fois civil et militaire. Cette histoire génère souvent une représentation négative, et même mortifère. Une autre représentation négative s'y ajoute *via* la notion de déchets : ce dont on ne veut plus, que l'on « rejette » et que l'on veut « enfouir ». Les échelles de temps considérées pour la gestion des déchets radioactifs entretiennent également une défiance sur la capacité des scientifiques, et plus largement de la société, à les

appréhender et à agir dans une logique de long terme. Malgré un enjeu d'intérêt collectif pour les générations actuelles et futures, ces diverses représentations peuvent paradoxalement devenir un frein à la mise en œuvre concrète de solutions de gestion des déchets radioactifs pour protéger sur le long terme l'homme et l'environnement, en complexifiant le dialogue avec la société civile. Mieux les comprendre permettrait d'ouvrir des pistes pour créer un meilleur climat d'écoute mutuelle et de confiance.

Mieux appréhender les notions de risque et d'incertitudes

Un autre frein potentiel à un dialogue responsable et dépassionné autour de la gestion des déchets radioactifs est constitué par la difficulté de la société à appréhender le risque et les incertitudes afférentes, ici encore sans que cela ne soit une question spécifique aux déchets radioactifs. La mission sur la modernisation de la culture du risque en France mise en place par le ministère de la transition écologique et qui a rendu ses conclusions en 2021 témoigne de

la nécessité de mieux sensibiliser les citoyens au risque. Au cœur de cette problématique se trouve le paradoxe entre le citoyen qui perçoit les sciences et techniques comme capables d'éliminer le risque et l'émergence depuis moins d'un siècle (typiquement à partir de 1945) de risques d'origine anthropique tendant à prendre le pas sur les risques naturels ou à amplifier ceux-ci.

Analyser les implications d'une éthique interterritoriale

Stocker des déchets radioactifs nécessite de s'implanter sur un territoire où ces déchets, provenant en général d'autres territoires, seront regroupés, d'où un premier questionnement sur l'équité interterritoriale entre le territoire d'implantation du stockage et le

reste de la nation. Des questions interterritoriales se posent aussi lorsqu'une installation concerne deux territoires voisins (comme pour le projet Cigéo, avec la Meuse [55] et la Haute-Marne [52]) ou encore entre les échelles locale, départementale et régionale.

Étudier et prendre en compte les inévitables mutations de la société

Dans le contexte du réchauffement climatique et des crises sanitaires ou environnementales, appelées à se multiplier, les décisions ayant un impact sur le long terme ou motivées par la prise en compte des générations futures doivent aussi se prendre dans une logique d'anticipation et de prise en compte de situations dites de « KO » périodiques, courtes ou plus durables (cf. encadré ci-dessous « L'étude socio-économique du projet global Cigéo publiée en 2020 »).

Dans le prolongement de l'étude socio-économique (ESE) du projet global Cigéo, la recherche sur les questions relatives au financement

de grands projets industriels ou d'infrastructures sur le temps long, c'est-à-dire qui impliquent nécessairement plusieurs générations, doit être poursuivie. Au-delà des questions d'ordre économique (financement à long terme, taux d'actualisation, etc.) qui méritent également d'être étudiées, un sujet de cette recherche est la poursuite de l'élaboration et la formalisation de scénarios d'évolution de la société et de ses institutions, en gardant la logique des scénarios « OK » et « KO » de l'ESE, et en approfondissant, à l'aune des enseignements de la crise mondiale de la Covid-19, l'étude des possibles évolutions de la société.



L'étude socio-économique du projet global Cigéo publiée en 2020

Comme tout grand projet mobilisant une part importante d'investissement public, le projet du centre de stockage Cigéo a fait l'objet d'une évaluation socio-économique. Il s'agit d'un exercice inédit pour la filière nucléaire comme pour le domaine économique, compte tenu de la nature du projet et de sa temporalité, inscrite dans le temps long.

Cette évaluation socio-économique objective les implications de la réalisation ou non du projet de centre de stockage Cigéo, en termes de bénéfices (économiques, sociétaux et environnementaux) pour notre génération mais aussi pour celles qui nous suivent. Il s'est agi d'un travail académique co-piloté par l'Andra et un groupe d'experts reconnus. Cette étude a également fait l'objet d'une contre-expertise indépendante conduite par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI). Lors de cette évaluation socioéconomique, le projet de centre de stockage Cigéo a fait l'objet de comparaison avec des options alternatives de gestion des déchets radioactifs, afin de mener un raisonnement différentiel. Pour prendre en considération le temps long qui caractérise le projet de centre de stockage Cigéo, différentes hypothèses de taux d'actualisation ont été utilisées dans le cadre de deux scénarios contrastés d'évolution de la société, pour se projeter à une échelle de temps intergénérationnelle. Ces deux types d'évolution de la société sont modélisés. La première — dite « OK » — s'inscrit dans la continuité de la société actuelle, à savoir prospère, en paix et jouissant d'institutions fortes. La seconde décrit une évolution — dite « KO » — vers une société chaotique, dysfonctionnelle et en régression durable, avec des probabilités d'accidents majeurs plus élevées, pouvant notamment découler de situation d'abandon des entreposages des déchets radioactifs.

De cette analyse, il ressort que l'entreposage sans cesse renouvelé est la solution de gestion la plus intéressante dans le cas d'une société à fonctionnement normal, avec un taux d'actualisation relativement élevé. Mais, dès lors que l'on envisage la possibilité d'une baisse du taux d'actualisation au sein de cette société ou une société chaotique, l'analyse montre que le projet de centre de stockage Cigéo constitue la solution de gestion la plus intéressante, traduisant ainsi une attention forte pour les générations futures. En d'autres termes, l'entreposage de longue durée ne l'emporte sur le projet de centre de stockage Cigéo qu'à condition d'être optimiste dans l'avenir, et/ou peu attentif aux générations futures et en excluant tout basculement socio-politique vers une société plus chaotique.

Le centre de stockage Cigéo constitue ainsi une forme d'assurance face à un risque de dégradation de la société à l'horizon de 150 ans. Le coût de cette assurance a été estimé à une prime unique de 118 euros par habitant par l'estimation quantitative de l'évaluation socio-économique.

Cette réflexion permet donc de poser, pour la première fois en termes économiques et académiques, les enjeux du débat et de la prise de décision quant à l'opportunité sociétale du projet, et ceci de façon très différente au débat public de 2005. En 2020, face aux nombreuses incertitudes (crise climatique, crise sanitaire de Covid-19, désordres géopolitiques, etc.), palpables ne serait-ce qu'à l'échéance de quelques décennies, et dès lors que le projet de centre de stockage Cigéo est progressif et adaptable, la question n'est pas de « construire Cigéo ». Il s'agit « d'engager Cigéo » aujourd'hui, tout en laissant ouverts, pour demain, l'ordonnancement des décisions qu'il reste à entériner et l'adaptabilité du projet qui sera traitée dans le cadre de la gouvernance du projet. Ce choix revient à prendre ainsi une assurance au bénéfice des générations actuelles et futures, tout en organisant un phasage cohérent entre l'utilisation de l'électricité, la responsabilité des exploitants nucléaires et la disponibilité des compétences et des ressources financières de la gestion des déchets radioactifs.

Le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) a rendu un avis sur l'évaluation socio-économique du projet Cigéo. L'avis du SGPI est « favorable, tant pour le projet dans sa globalité que pour son volet transport », soulignant que « le projet Cigéo a une forte valeur prudentielle et assurantielle face aux risques environnementaux et sanitaires qui se manifesteraient localement autour d'entrepôts non surveillés voire abandonnés dans le cas où une société future se trouverait dans une situation très dégradée dans laquelle les normes de sûreté ne seraient plus respectées ».

Pour en savoir plus : www.andra.fr/sites/default/files/2021-03/Andra-Note_synthese_ESE.pdf.

Contribuer à l'amélioration des processus du dialogue et de concertation pour renforcer la légitimité de la décision

Le dialogue avec l'ensemble des parties prenantes vise à préparer des décisions. La progressivité du centre de stockage Cigéo doit permettre la mise en place d'un processus quasi continu de prise de décisions, au fur et à mesure de son développement et de son exploitation. De même les questions *infra* autour de l'acceptabilité du risque à très long terme ne pourront pas prétendre être traitées sans dialogue avec les parties prenantes et plus généralement la société civile.

L'organisation du dialogue et du processus de décision peut mobiliser les sciences humaines et sociales sur des axes de recherche permettant de développer les outils méthodologiques en soutien au dialogue et de comprendre les processus de décision autour des thématiques :

➤ **décision et démocratie environnementale** : la création, l'exploitation et la fermeture d'un stockage impliquent des décisions publiques successives, renvoyant aux modalités de participation des parties prenantes et à la nécessité de créer de la confiance pour favoriser cette participation, nécessité soulignée par le récent débat public sur le PNGMDR ;

➤ **connaissance et incertitudes** : l'existence d'incertitudes, qu'elles soient d'ordre social ou scientifique et technique, peut être perçue comme une carence voire comme un motif pour ne pas agir. En matière scientifique, la question de la gestion des incertitudes (ou de la preuve) pour la prise de décision a d'ores et déjà été largement traitée depuis plusieurs années, dans de nombreux domaines (santé publique, etc.) ;

➤ **réversibilité** : la réversibilité inscrit la temporalité longue du projet de centre de stockage Cigéo dans le processus de décision, et notamment y intègre le libre arbitre des générations suivantes. Elle a été intensivement explorée depuis presque vingt ans et reste un sujet de discussion continue (notamment dans le cadre des réflexions sur la gouvernance du centre de stockage Cigéo).

In fine, c'est l'enjeu du rétablissement du lien de confiance entre les citoyens et les sciences ou les scientifiques, et au-delà l'accompagnement des décisions politiques, qui est interrogé.

PREMIÈRE RÉUNION DES 17 CITOYENNES ET CITOYENS DE LA CONFÉRENCE DE CITOYENS SUR LA PHASE INDUSTRIELLE PILOTE DE CIGÉO ORGANISÉE À PARIS LES 28 ET 29 MAI 2021



Pour en savoir plus : <https://concertation.andra.fr/pages/la-conference-de-citoyens-sur-la-phase-industrielle-pilote-de-cigeo>.



Appréhender la relation homme/environnement aux temps longs

Enjeux opérationnels

- + Nourrir le dialogue avec les parties prenantes
- + Accompagner le « fléchage » des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux



Objectifs scientifiques

- + Appréhender les questions intergénérationnelles
- + Développer les scénarios d'évolutions futures pour les différentes filières (coûts, bénéfices ou détriments, actuels et futurs)

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Tous composants

Appréhender les questions intergénérationnelles

Engager un stockage de déchets radioactifs est mettre en pratique les principes de responsabilité et d'équité intergénérationnelle : si l'existence des déchets résulte de la production passée et en cours d'énergie nucléaire, dont les générations actuelles bénéficient, leur stockage s'adresse principalement aux générations futures (au-delà de plusieurs dizaines d'années).

L'intergénérationnel interroge sur le niveau d'effort qu'il est raisonnable, pour la génération actuelle, de consacrer à la protection de générations de plus en plus lointaines, selon la dangerosité des déchets radioactifs. Corollairement au niveau d'effort, la question ouvre sur la gamme d'échelles de temps à considérer vis-à-vis des générations lointaines. Si la décroissance radioactive permet souvent de borner cette durée, par exemple à quelques siècles pour le stockage des déchets à vie courte, il n'en n'est pas de même pour certains déchets contenant essentiellement des radionucléides à période très longue (déchets FA-VL uranifères ou thorifères), renvoyant alors à un questionnement principalement sociétal et éthique.

Le confinement des déchets radioactifs sur de très longues périodes est étudié sous l'angle des sciences « dures » et de la modélisation depuis près de 40 ans. En revanche, aborder d'aussi grandes périodes de temps est une problématique neuve dans le domaine des sciences humaines et sociales :

- aucune autre activité humaine n'a jusqu'ici fait l'objet d'analyses sur d'aussi grandes échelles de temps. Les controverses sur la gestion des déchets nucléaires, particulièrement sur le projet Cigéo, tendent à mettre en avant les grandes échelles de temps comme un problème spécifique du domaine. Pourtant, la production de déchets radioactifs n'est pas la seule activité humaine impactant le très long terme, comme en témoigne l'émergence du concept d'Anthropocène à partir des années 1920 ;
- les sciences humaines et sociales s'intéressant aux générations futures considèrent usuellement des échelles de temps très limitées au regard de celles des études scientifiques de la gestion à long terme des déchets radioactifs. Ainsi la prospective et l'économie se limitent en général à des temps inférieurs au siècle. La période observée par les historiens est d'environ 5 000 ans, durée modeste au regard du long terme des déchets radioactifs.

Les règles de sûreté de l'ASN prescrivent d'évaluer l'impact radiologique sur l'homme aux diverses échelles de temps y compris à très long terme afin d'apprécier l'acceptabilité du risque encouru par les générations futures. Faute de pouvoir décrire de façon phénoménologique les générations futures lointaines, ces règles de sûreté se fondent sur le postulat de l'invariance de l'homme dans le futur (mêmes pratiques qu'en ce début du XXI^e siècle, y compris au plan technologique, sans limite de temps).

Cependant, pour les déchets radioactifs à vie longue, notamment ceux de faible activité, les grandes échelles de temps au regard des évolutions sociales et technologiques questionnent sur la façon de prendre en compte des actions humaines lointaines.

Les constats précédents invitent à s'interroger sur la manière d'appréhender l'évaluation et l'acceptabilité des risques aux grandes échelles de temps. Par exemple, l'Anthropocène pourrait-il modifier les schémas archétypaux des générations futures, et corollairement leurs actions en présence de déchets de générations antérieures ?

Les générations les plus lointaines, au-delà de quelques centaines d'années, jusqu'à plusieurs dizaines, voire centaines de milliers d'années, posent probablement les questions les plus complexes aux sciences humaines et sociales :

➤ comment représenter des générations de plus en plus lointaines ?

➤ comment évaluer les risques à long terme et apprécier leur acceptabilité ?

➤ comment mettre en perspective de ces risques les justes efforts à consacrer par les générations actuelles en tenant compte de la dangerosité des différentes catégories de déchets, au-delà des analyses coûts-bénéfices sur les tout prochains siècles ?

Enfin, les travaux autour de la transmission du risque associé aux déchets radioactifs doivent aussi être reliés à la transmission de la mémoire : les besoins mémoriels commencent au passage de relais entre les générations qui interviennent dans la mise en œuvre de la gestion des déchets radioactifs (*knowledge management*) pour aller aussi loin que possible dans le futur.

ILLUSTRATION DES ÉCHELLES DE TEMPS LONGS DES STOCKAGES PAR ANALOGIE AVEC QUELQUES POINTS DE RÉFÉRENCE HISTORIQUES





**Garantir la maîtrise de
la qualité des déchets et
affiner la représentation
de leur comportement
en situations de stockage**

Transversalement aux grandes orientations thématiques de la R&D scientifique et technologique de demain s'ajoute la nécessité d'une logique systémique de la gestion des déchets et matières radioactives.

Les travaux menés conjointement par les producteurs de déchets et l'Andra depuis plus de 30 ans permettent de disposer aujourd'hui d'un socle de connaissances très important sur la caractérisation (inventaires radiologiques et toxiques, inventaire des matériaux organiques et métalliques, etc.) et le comportement des déchets intrinsèque et en situations de stockage (processus, modèles et paramètres) : dégradation, produits de dégradation, termes sources des radionucléides et toxiques chimiques, terme source gaz, etc. Ce socle couvre le spectre des différents déchets (TFA, FA-VL, FMA-VC, MA-VL et HA) mais aussi les combustibles usés. Il intègre par ailleurs les connaissances acquises à l'international, notamment par les homologues de l'Andra. Ces connaissances ont en particulier permis d'accompagner le développement des centres industriels de l'Aube (CSA et Cires) depuis leur ouverture jusqu'à leur exploitation en cours, les différentes étapes de développement du projet Cigéo jusqu'à sa Demande d'autorisation de création, et les premiers développements relatifs au projet de stockage de déchets de faible activité à vie longue.

La R&D de demain sur les déchets radioactifs répond aux mêmes éléments de contexte que celle pour les autres thématiques. Forte du socle de connaissance déjà acquis sur les déchets, la R&D de demain sur les déchets s'inscrit majoritairement dans un besoin de garantir la maîtrise de la qualité des déchets et de représenter le comportement des déchets en situations de stockage au plus près de la réalité, au regard des différents enjeux opérationnels propres à chaque type de déchets et filière(s) de gestion correspondante(s).

Pour chaque type de déchets et les combustibles usés, leur caractérisation et/ou leur comportement peut nécessiter des besoins de connaissances complémentaires ciblés. À cela s'ajoutent des besoins en conditionnement de certains déchets spécifiques, ou la poursuite vers l'industrialisation du traitement de certains déchets.

La R&D de demain de l'Andra sur les déchets est de ce fait majoritairement portée par l'axe « Maîtriser les risques et optimiser les stockages et filières de gestion des déchets », en s'articulant avec la R&D des producteurs de déchets.





Affiner la connaissance de déchets radioactifs pour permettre leur fléchage vers les filières de gestion adaptées et proportionnées ou accroître la maîtrise des risques en exploitation et en après-fermeture

Enjeux opérationnels

- + Accompagner le fléchage des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux
- + Accroître la maîtrise de la qualité des colis de déchets, la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en exploitation et en après-fermeture
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages
- + Garantir l'adaptabilité du projet Cigéo

Objectifs scientifiques

- + Caractériser les déchets (inventaire et spéciation de radionucléides, matériaux, comportement intrinsèque, etc.) au plus près de la réalité (en tant que possible et raisonnable)



Déchets/filières

- + Tous stockages, notamment FA-VL

Composants concernés

- + Déchets et combustibles usés

Thématique portée par les producteurs, il s'agit de préciser les caractéristiques de certains déchets afin d'optimiser leur fléchage vers les filières de gestion adaptées et proportionnées aux enjeux (centre de stockages, stockage sur site de production, valorisation/recyclage) ou accroître les marges de sûreté retenues. Cela vise :

- les inventaires et la spéciation de radionucléides : par exemple le ^{14}C pour les déchets graphites au regard de leur fléchage entre le centre de stockage Cigéo ou un stockage à faible profondeur, le ^{79}Se pour les déchets HA au regard des marges de sûreté en après-fermeture, les déchets TFA au regard de leur potentiel stockage sur site, ou au Cires ou leur valorisation possible (métaux TFA) ;
- le comportement intrinsèque de certains déchets. Sont concernés plus particulièrement :
 - ◆ les enrobés bitumés (réactivité thermique et gonflement sous eau) au regard du choix de leur voie de gestion dans le centre de stockage Cigéo (stockage en l'état ou stockage après traitement),
 - ◆ les déchets vitrifiés (effet de l'auto-irradiation, continuum de comportement entre non saturé et saturé, fracturation) et les combustibles usés, au regard des modèles prudents de

dissolution en tout saturé, retenus dans les évaluations de sûreté en après-fermeture.

CHEMISE EN GRAPHITE AVEC FILS DE SELLES (DÉCHET FA-VL)





Développer des traitements et des conditionnements innovants pour des déchets radioactifs spécifiques

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise de la qualité des colis de déchets, la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages
- + Garantir l'adaptabilité du projet Cigéo

Objectifs scientifiques et technologiques

- + Développer des matrices de conditionnement optimisées/innovantes pour des déchets spécifiques



Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

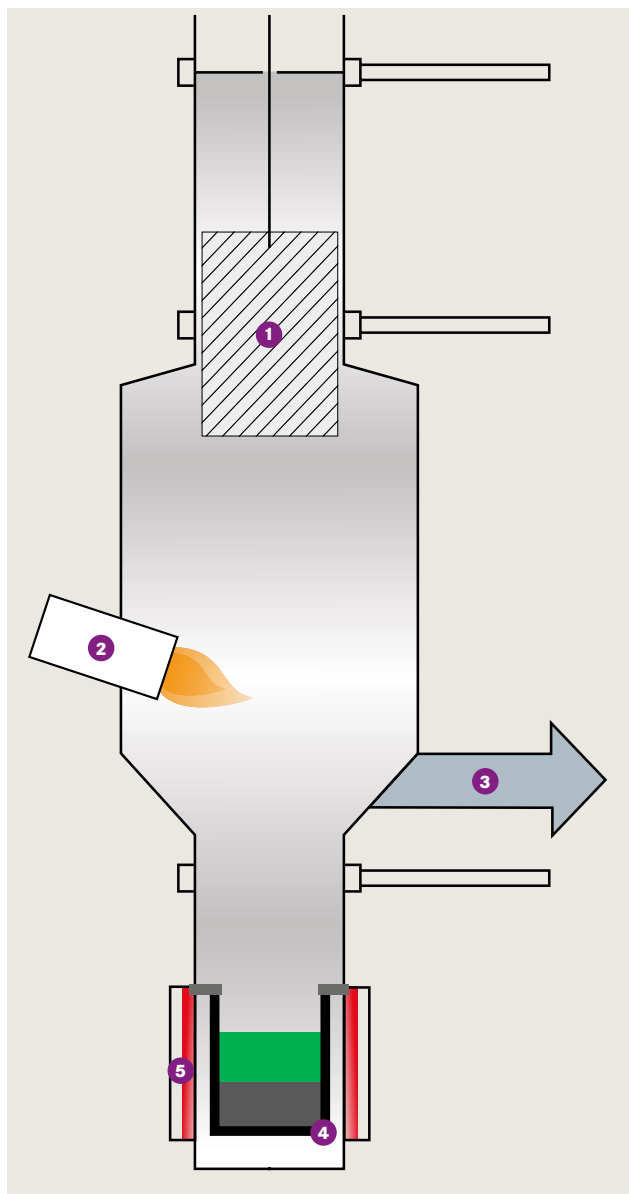
- + Déchets

Thématique portée par les producteurs, il s'agit de développer des conditionnements innovants adaptés à des déchets radioactifs spécifiques, plus particulièrement :

- les déchets MA-VL organiques contaminés alpha de Melox (déchets PIVIC) ;
- les métaux réactifs (MA-VL et TFA) ;
- les huiles TFA ;
- les déchets tritiés.

PROCÉDÉ PIVIC « PROCÉDÉ D'INCINÉRATION FUSION ET VITRIFICATION *IN CAN* », DÉVELOPPÉ DANS LE CADRE DU PROJET CEA-ORANO DU MÊME NOM ACCOMPAGNÉ PAR L'ANDRA DANS LE CADRE DU PROGRAMME « NUCLÉAIRE DE DEMAIN » DES INVESTISSEMENTS D'AVENIR

Dispositif de traitement



- ❶ Les déchets radioactifs, constitués de métal, de verre et de matière organique, sont introduits en partie haute du procédé (four).
- ❷ Dans cette partie haute, une torche à plasma chauffe les déchets à environ 800 °C. À cette température, la matière organique brûle et se transforme en gaz et en cendres.
- ❸ Le gaz est évacué vers un système de traitement.
- ❹ La partie basse du procédé (fusion) est constituée d'un conteneur métallique (le can) chauffé par induction directe, dans lequel les déchets issus de la partie haute (métal, verre et cendres issus de l'incinération de la matière organique) sont introduits. De la fritte de verre est également ajoutée.
- ❺ L'induction directe a pour effet de faire fondre le métal, qui va lui-même provoquer la fusion de la fritte de verre et l'incorporation des cendres dans cette fritte de verre fondue.

Coupe du contenu du "Can"





Mettre à disposition des moyens de contrôle hors flux innovants de colis de déchets

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques en exploitation et en après-fermeture
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages

Objectifs scientifiques et technologiques

- + Atteindre le TRL 7 pour les moyens de contrôle hors flux de colis HA et MA-VL (puissance thermique des déchets HA, matière fissile et taux de vide de déchets MA-VL)

Déchets/filières

- + Projet Cigéo

Composants concernés

- + Colis de déchets HA et certains colis de déchets MA-VL

Il s'agit de développer industriellement et au juste besoin, des moyens de contrôle hors flux innovants de certains colis de déchets relevant du projet Cigéo, au regard des enjeux de leur prise en charge (c'est-à-dire les spécifications d'acceptation), notamment pour la phase industrielle pilote.

Trois paramètres sont principalement visés : la puissance thermique (cf. déchets HA), la quantité de matière fissile et le taux de vide (cf. certains déchets MA-VL afférents). L'objectif est de bénéficier de dispositifs de contrôles simples, robustes et efficaces, au regard notamment de la précision de mesure spécifiée.

CONTRÔLE D'UN COLIS DE DÉCHET FMA-VC AU CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE



Par radiographie rayons X.



Par spectrométrie.



Accroître la représentation du comportement des déchets en situations de stockage au plus près de la réalité

Enjeux opérationnels

- + Accroître la maîtrise des risques et la quantification des marges de sûreté en exploitation et en après-fermeture, par rapport à des approches de base de sûreté prudentes
- + Optimiser la dimension technico-économique des stockages
- + Accompagner le fléchage des déchets radioactifs vers les filières de stockage adaptées et proportionnées aux enjeux
- + Accompagner l'adaptabilité du projet Cigéo

Objectifs scientifiques

- + Caractériser et modéliser, en saturé et en non saturé, les dynamiques :
 - de systèmes chimiques complexes multi-composants (milieux poreux, milieux continus, milieux ouverts) et hors équilibre
 - de processus (thermo)-hydromécaniques en non saturé et en saturé, multi-composants (milieux poreux, milieux continus, milieux ouverts), et couplés à la chimie
- + Caractériser et modéliser le relâchement et la migration des radionucléides au sein de ces dynamiques

Déchets/filières

- + Tous stockages

Composants concernés

- + Déchets, conteneurs de stockage, alvéoles de stockage, milieu géologique environnant (couverture comprise pour les stockages de surface et à faible profondeur)

La conception et la sûreté des stockages reposent sur des approches prudentes, notamment enveloppes, de représentation du comportement des déchets au sein des alvéoles en situations de stockage. Ces représentations s'écartent de la réalité tout en garantissant une cohérence en termes d'évaluation de sûreté. Elles présentent ainsi des marges de conception et d'évaluation de sûreté.

Il s'agit d'affiner la représentation du comportement des déchets et corrélativement celle du relâchement et de la migration des radionucléides en situation de stockage, au plus près de la réalité, par la prise en compte :

- des différentes interfaces (milieu géologique, composants de structure et matériaux de remplissage des alvéoles de stockage, conteneur de stockage, matrice de conditionnement ou de blocage des déchets, déchets) et de leur évolution dans le temps ;
- des processus physico-chimiques couplés ou non couplés au cœur du fonctionnement des alvéoles de stockage ou des stockages en

grand (cf. « Améliorer la représentation intégrée multi-composant et multi-physique de l'évolution phénoménologique des stockages, de l'exploitation à l'après-fermeture ») :

- ◆ les processus chimiques complexes et hors équilibre, en non saturé et en saturé, incluant les processus liés au rayonnement et à la radiolyse,
- ◆ les processus (thermo)-hydromécaniques en non saturé et en saturé, couplés à la chimie.

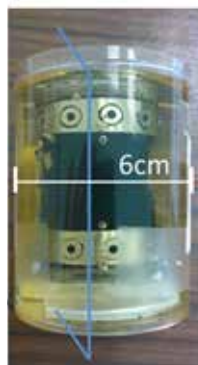
En effet, les alvéoles de stockage et leur environnement proche peuvent être considérés comme des systèmes physico-chimiques. Ils sont le siège de nombreux processus chimiques et (thermo) hydromécaniques d'interaction. L'objectif est de caractériser et modéliser finement ces dynamiques d'interaction, et le relâchement et la migration des radionucléides au sein de ces dynamiques.

**EXPÉRIMENTATION “MVE” AU LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MEUSE/Haute-MARNE
POUR ÉTUDIER L’ALTÉRATION SOUS EAU DU VERRE SON68* EN PRÉSENCE DE FER À 50 °C**

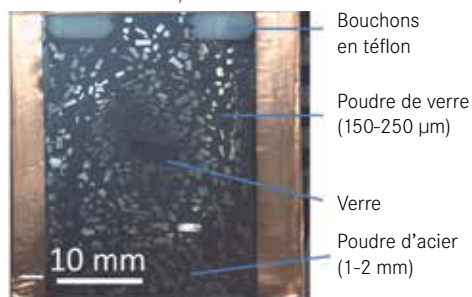
MISE EN PLACE DE LA COMPLÉTION DANS LE FORAGE



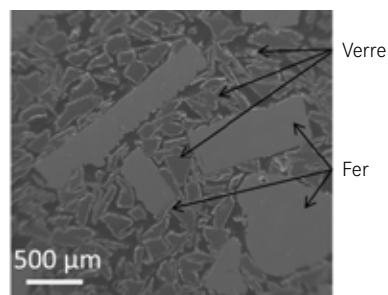
PRÉLÈVEMENT APRÈS 4,5 ANS



*Échantillon de canne
enrésiné avant
découpe.*



Coupe transverse selon l'axe bleu.



Observation au microscope optique à balayage.

*Verre de référence inactif pour le confinement des déchets de la production des réacteurs EPR.



Glossaire

GÉNÉRAL

Adaptabilité	Capacité à modifier l'installation pour l'adapter à de nouvelles hypothèses de dimensionnement (par exemple : des évolutions d'inventaire) impliquant des modifications notables des équipements existants ou des constructions d'ouvrages nouveaux.
Approche enveloppe	Approche construite sur la base des exigences applicables au centre de stockage et de choix de modèles et valeurs de paramètres qualifiés de « conservatifs » dans la gamme de valeurs disponible, majorant le transfert des radionucléides et toxiques chimiques (sont exclues les valeurs extrêmes jugées non réalistes).
Alvéole	Dans une installation de stockage, structure élémentaire conçue pour stocker des colis de déchets radioactifs.
Calcaires du Barrois	Formation calcaire appartenant au Kimméridgien terminal – Tithonien. Cette formation est affleurante sur le plateau de Bure.
Callovo-Oxfordien	Formation géologique faisant partie du jurassique et âgée de 160 millions d'années. Elle apparaît sous forme argileuse dans l'est de la France. C'est la formation dans laquelle l'installation souterraine de Cigéo, notamment les alvéoles de stockage, est implantée. Sur la zone d'implantation des ouvrages souterrains, l'épaisseur du Callovo-Oxfordien varie entre environ 140 et 160 m.
Colis de déchets	Déchets radioactifs conditionnés et emballés.
Colis de stockage	Colis de déchets radioactifs pouvant être placé en l'état dans l'installation de stockage. Un complément de colisage est susceptible de compléter les colis primaires en provenance des producteurs de déchets.
Composant du stockage	Composants de l'installation de stockage qui ont un rôle dans la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage. Ils sont généralement regroupés en trois classes : › les colis de déchets dans lesquels les substances radioactives sont incorporées ; › les composants ouvragés, qui comprennent les ouvrages de génie civil dans lesquels les colis de déchets sont placés, les scellements des ouvrages de stockage et des ouvrages d'accès, ainsi que le cas échéant une couverture façonnée par l'homme ; › la formation géologique hôte.
Conteneur de stockage	Récipient manutentionnable fermé dans lequel sont placés un ou plusieurs colis primaires en préalable à la mise en stockage. Il est composé d'un corps et d'un couvercle et est constitué de béton ou d'acier jusqu'à présent.
Couverture définitive du stockage	Composant d'un centre de stockage de surface ayant pour rôle de garantir la sûreté à long terme en limitant la quantité d'eau de pluie susceptible d'être en contact avec les ouvrages de stockage durant la phase de surveillance de plus de 300 ans. Mise en place à l'issue de la phase d'exploitation du centre de stockage, la couverture définitive est un dispositif multi-barrière, composé de plusieurs couches de matériaux naturels.
Démonstrateur	Ouvrage inactif permettant de tester des méthodes de réalisation, des opérations d'exploitation, des optimisations et de mesurer des comportements phénoménologiques spécifiques.
Développement progressif du stockage ou développement incrémental du stockage	Le développement progressif des centres de stockage se caractérise par une construction en plusieurs parties, appelées « tranches », correspondant à la construction d'un ensemble de bâtiments de surface et/ou d'ouvrages souterrains. Après la construction initiale durant laquelle une première tranche de l'installation sera réalisée, les travaux d'extension des quartiers de stockage se succéderont par tranches successives. Outre son adaptabilité aux évolutions d'inventaire, le développement progressif des centres de stockage permet d'accélérer ou au contraire de temporiser leur développement, par exemple : pour tenir compte d'évolutions du programme de livraison des colis. Il favorise l'intégration incrémentale aux futures tranches de construction des améliorations rendues possibles par les progrès scientifiques et technologiques sur la durée d'exploitation. Le retour d'expérience apporté par la construction, l'exploitation et la surveillance des tranches précédentes contribue à ces progrès. Le développement progressif donne également le temps de lever prudemment les questionnements résiduels relatifs à l'éventuelle évolution de modes de conditionnement et aux modalités de mise en stockage de déchets déjà conditionnés (cas des bitumes pour le projet Cigéo, etc.). Enfin, le développement progressif permet de stocker les colis de déchets en tenant compte des besoins industriels.

Digital 4.0, « Quatrième révolution industrielle » ou transformation numérique 4.0	Développement des technologies numériques (modélisation/simulation/ prédiction, objets connectés, réalité virtuelle, etc.) au service des enjeux de performance et de coût de l'industrie. Pour le secteur nucléaire, il s'agit de transposer les nouvelles technologies numériques à la conception, construction, exploitation, maintenance, sûreté, sur les temps « longs » caractéristiques de l'industrie nucléaire.
Domaine d'évolution normale	Après fermeture du stockage, ensemble des situations de stockage défini par : ➤ une situation de référence, dite « phénoménologique », dont les processus, événements, hypothèses et données sont définis sur la base de la meilleure connaissance scientifique et technique disponible ; ➤ des études de sensibilité destinées à approcher les limites du domaine de l'évolution normale en intégrant les incertitudes de toutes natures.
Facteurs sociaux, organisationnels et humains	Facteurs ayant une influence sur la performance humaine, tels que les compétences, l'environnement de travail, les caractéristiques des tâches, et l'organisation.
Filière de gestion des déchets	Les déchets radioactifs sont très divers de par leur radioactivité, leur durée de vie, leur volume ou encore leur nature (ferrailles, gravats, huiles, etc.). Chaque type de déchets nécessite un traitement et une solution de gestion à long terme adaptés afin de maîtriser les risques présentés, notamment le risque radiologique. En France, chaque catégorie de déchets est gérée dans une filière particulière qui comprend une série d'opérations comme le tri, le traitement, le conditionnement, l'entreposage et le stockage de déchets ultimes (source : ASN).
Fonctionnement normal	Fonctionnement de l'installation qui comprend l'ensemble des états et des opérations courantes de l'installation, y compris les situations de maintenance ou d'arrêt programmées, que les matières radioactives soient présentes ou non ; relève également du fonctionnement normal toute situation définie comme telle dans la démonstration de sûreté.
Gestion proportionnée des déchets	Orientation des déchets radioactifs vers des solutions de gestion à long terme assurant un niveau de sûreté optimal selon une approche globale intégrant l'ensemble des enjeux, et notamment les enjeux environnementaux : dangerosité de chaque type de déchets (relativement aux impacts radiologiques mais également aux autres impacts, sur l'ensemble de la biosphère), intégration de toutes les étapes en amont du stockage, prise en compte du cycle de vie des stockages (développement progressif et adaptabilité), concertation avec tous les acteurs des territoires d'implantation de ces stockages, etc.
Jumeau numérique	Représentation virtuelle de tout ou partie d'un système physique et/ou d'un processus du stockage à partir de la maquette numérique et du BIM auxquels sont affectées les caractéristiques du système ou du processus copié. Le jumeau numérique phénoménologique est le jumeau numérique portant les prédictions temps/espace de l'évolution phénoménologique du stockage, obtenu en habillant en processus physiques les différents composants de la maquette numérique.
Milieu géologique	Le milieu géologique est constitué par les formations géologiques du site et notamment la roche hôte qui correspond à la formation géologique au sein de laquelle seront disposés les colis de déchets radioactifs. Selon les options de conception retenues, les colis de déchets pourront être isolés de la surface, soit par une couverture façonnée par l'homme (cas des centres de stockage en surface), soit par le milieu géologique naturel existant (cas du centre de stockage Cigéo).
Modèle conceptuel	Modèles visant à donner la représentation de l'état du milieu géologique ou du comportement d'un ou plusieurs composants du stockage au cours de leur évolution. Ils décrivent ainsi les processus thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques et sont utilisables en vue des analyses de sûreté et des simulations numériques associées.
Modèle phénoménologique	Dans l'absolu, modèle reposant sur la compréhension la plus complète du phénomène à modéliser, et dont l'aptitude à rendre compte de résultats de mesures directes ou indirectes a été vérifiée. En comparaison avec les autres modèles disponibles, celui qui permet la meilleure adéquation entre la réalité qu'il entend représenter et les résultats numériques qu'il permet d'obtenir dans le calcul d'impact, dans la gamme de variation des paramètres qui est celle de l'étude.
Non human biota	Espèces de l'environnement considérées pour leur devenir propre et non au regard de l'impact sur l'espèce humaine (faune et flore sauvages).

Ouvrage de fermeture	Ouvrages complémentaires de la barrière géologique permettant d'assurer le bon fonctionnement du stockage après fermeture, c'est-à-dire permettant d'assurer sa sûreté de façon passive.
Parties prenantes	Acteur individuel ou collectif (groupe ou organisation), activement ou passivement impliqué, concerné ou intéressé par une décision ou un projet (équivalent français du terme anglais : <i>stakeholder</i>).
Période après-fermeture du stockage	Période prévue par l'article L. 542-10-1 du Code de l'environnement et débutant à l'achèvement de la fermeture définitive du stockage. Elle comprend les phases de surveillance et de post-surveillance.
Phase d'exploitation et de fonctionnement (d'un centre de stockage)	« Période débutant à la mise en service d'une installation mentionnée à l'article L. 593-11 du Code de l'environnement » (c'est-à-dire la première mise en œuvre de substance radioactive dans l'installation) « et allant jusqu'à la date d'arrêt définitif de l'installation telle que déclarée par l'exploitant au ministre chargé de la Sûreté nucléaire et à l'Autorité de sûreté nucléaire dans les conditions définies à l'article L. 593-26 du Code de l'environnement » (c'est-à-dire l'arrêt définitif de réception de nouveaux déchets).
Phase industrielle pilote	Période temporelle du projet de centre de stockage Cigéo. L'Andra propose qu'elle débute à la création de l'installation nucléaire de base du centre de stockage Cigéo. Elle prendra fin dans les conditions qui seront fixées par la loi après quelques années de fonctionnement.
Récupérabilité de Cigéo	Capacité à retirer des colis de déchets stockés en formation géologique profonde.
Réversibilité de Cigéo	La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion. La réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique. Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés selon des modalités et pendant une durée cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.
Scellement	Ouvrage de fermeture d'une galerie, d'un puits ou d'une descenderie permettant de s'opposer à la circulation d'eau, en vue de contribuer au confinement des déchets sur le long terme.
Scénario de sûreté	Situation ou ensemble de situations construites pour servir de support à une démonstration de sûreté. Un scénario constitue une situation particulière du stockage (en exploitation ou en après-fermeture), destinée à couvrir un ensemble de situations similaires dans leurs effets.

ACRONYMES ET SIGLES

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ATEX	Atmosphère explosive
ASN	Autorité de sûreté nucléaire
BIM	<i>Building information modeling</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Cigéo	Centre industriel de stockage géologique
Cires	Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage
CMC	Composite à matrice céramique
CMHM	Centre de Meuse/Haute-Marne
CNE	Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs
CPU	<i>Central processing unit</i> (unité centrale de traitement)
CSA	Centre de stockage de l'Aube
CSM	Centre de stockage de la Manche
CU	Combustibles usés
DAC	Demande d'autorisation de création
DOS	Dossier d'options de sûreté
EFESE	Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
EPIC	Établissement public à caractère industriel et commercial
ESE	Étude socio-économique
Eurad	<i>European joint programme on radioactive waste</i>
EURATOM	Programme de recherche et de formation de la Communauté européenne de l'énergie atomique
FA-VL	Faible activité à vie longue
Forpro	Groupe national de recherche « Formation géologiques profondes » du CNRS et de l'Andra
FMA-VC	Faible et moyenne activité à vie courte

FSOH	Facteurs sociaux, organisationnels et humains
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
Gifén	Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire
H2MeMS	Projet « Microsystèmes résonants pour la détection d'hydrogène dans les ouvrages de stockage de déchets radioactifs » dans le cadre de l'appel à projets « Optimisation de la gestion des déchets radioactifs de démantèlement » du programme des Investissements d'avenir
HA	Haute activité
HPC	Calcul haute performance
IA	Intelligence artificielle
INB	Installation nucléaire de base
IoT	Internet des objets
IRSN	Institut de recherche en sûreté nucléaire
Lidar	<i>Laser imaging detection and ranging</i> (télédétection par laser)
MA-VL	Moyenne activité à vie longue
MELOX	Usine située sur le site de Marcoule fabriquant des assemblages de combustibles MOX destinés aux réacteurs électronucléaires à eau légère
MOX	Mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium
NEEDS	Programme de recherche multipartenaire « Nucléaire : énergie, environnement, déchets, société » porté par le CNRS avec l'Andra, le BRGM, le CEA, EDF, Framatome, l'IRSN et Orano
OPE	Observatoire pérenne de l'environnement
Phipil	Phase industrielle pilote
PIVIC	Procédé d'incinération fusion et vitrification <i>in can</i>
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
RDS	Rapport de sûreté
RFS	Règle fondamentale de sûreté
SHS	Sciences humaines et sociales
SLI	Soutien logistique intégré
TFA	Très faible activité
THM	Thermique, hydraulique-gaz et mécanique
TRL	<i>Technology readiness level</i> (niveau de maturité technologique)



**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

