

# REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE



L'INFORMATION DE RÉFÉRENCE SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

## **.46** DÉCRYPTAGE

Transports sous surveillance

## **.50** SCIENCES ET TECHNIQUES

TeraPower, le réacteur de Bill Gates

## **.60** NUCLÉAIRE ET SOCIÉTÉ

Nucléaire militaire et civil : « L'exception française »



## **.11** DOSSIER LE PROJET CIGÉO

# Stocker les déchets les plus radioactifs



TRACTEBEL

ENGIE

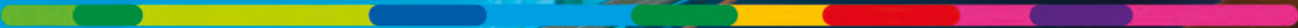
---

# Delivering your nuclear future now

---

For over 60 years, we are offering reliable, innovative and tailor-made solutions to our customers worldwide, thanks to the high-level expertise of our engineers. We support Operators in their challenges of operating their plants safely and with profitability. We also accompany Nuclear Players in their projects in radwaste and decommissioning, as well as investors, future operators or constructors in the development and construction of NPP's, SMR's and Research Reactors.

 [tractebel-engie.com](https://tractebel-engie.com)



Shaping our world

# REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE

## ÉDITEUR SFEN

Société française d'énergie nucléaire  
103 rue Réaumur - 75002 Paris  
Tél 01 53 58 32 10 - Fax 01 53 58 32 11  
contact@sfen.org - www.sfen.org

## DIRECTRICE DE LA PUBLICATION Valérie Faudon

## RÉDACTRICE EN CHEF Isabelle Jouette

## RÉDACTION SFEN Boris Le Ngoc

CONCEPTION GRAPHIQUE,  
RÉDACTION, MISE EN PAGES  
ET SÉCRÉTARIAT DE RÉDACTION  
Rouge Vif Éditorial (E. Seghers,  
S. Canavaggio, D. Andrivon)  
www.grouperougevif.fr

ABONNEMENT  
Tél. : 01 53 58 32 20 - Fax : 01 53 58 32 11  
abo-rgn@revuegeneralenucleaire.org

Bimestriel - 6 numéros par an  
Prix de l'abonnement (6 numéros)  
France : 106 € TTC  
Étranger (UE) - exonéré TVA : 126 €  
Étranger (UE et hors UE) : 128 € TTC

VENTES AU NUMÉRO  
Tél. : 01 53 58 32 20 - Fax : 01 53 58 32 11  
Prix du numéro  
France : 20 € TTC  
Étranger (UE) - exonéré TVA : 23 €  
Étranger (hors UE) : 25 € TTC

PUBLICITÉ  
Publicité en régie :  
pub-rgn@grouperougevif.fr  
Tél. 01 84 24 00 57

TIRAGE  
2000 exemplaires  
Impression : Abella

© couverture : Cécile Massart

Numéro d'enregistrement à la  
commission paritaire : 0719 G 808 91

ISSN 0335 5004

La Revue générale nucléaire  
créée le 1<sup>er</sup> février 1975 à l'initiative  
de la Société française d'énergie  
nucléaire - SFEN est destinée à la  
publication d'articles scientifiques,  
techniques et économiques et  
d'informations sur l'énergie nucléaire  
dans toutes ses applications civiles.  
Périodicité bimestrielle

LA REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE  
n'est pas solidaire  
des opinions émises  
par les auteurs d'articles.



## .04 EN DIRECT

Les actualités du nucléaire, en France et dans le monde :  
économie, recherche, formation, filière...



## .11 DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,

## Stocker les déchets les plus radioactifs

Si la construction de Cigéo est autorisée, le centre de  
stockage permettra de protéger l'homme et la nature  
des déchets les plus radioactifs. Au croisement des  
enjeux techniques et de société, le projet Cigéo est l'un  
des grands chantiers de la filière nucléaire française.

## .46 DÉCRYPTAGE

- Angleterre - Suisse : itinéraire des résidus vitrifiés
- Transports sous surveillance

## .50 SCIENCES ET TECHNIQUES DU NUCLÉAIRE

TerraPower, le réacteur de Bill Gates

## .55 PARTENARIATS

COP22 : *Nuclear for Climate* se met à l'heure marocaine

## .56 REPORTAGE

L'Écothèque : une porte vers l'avenir

## .60 NUCLÉAIRE & SOCIÉTÉ

- Histoire : développement du nucléaire militaire et civil,  
« l'exception française »
- Fission sur les planches

## .66 REGARD SUR

Thierry Keller, rédacteur en chef du magazine *Usbek et Rica*



www.revuegeneralenucleaire.fr



## éditorial

« *Ne pas enfouir!* » Au moins sur le plan de la terminologie, les opposants et les promoteurs du projet de stockage géologique en profondeur Cigéo sont d'accord! En effet, avec Cigéo, il ne s'agit pas « d'enfouir » les déchets les plus radioactifs. Au contraire.

Enfouir, c'est « *mettre en terre dans un trou creusé à cet effet et rejeter de la terre par-dessus pour le cacher* ». C'est aussi cacher, engloutir, ensevelir, dissimuler, omettre, taire, mentir... Avec Cigéo, nous sommes à des années-lumière de l'enfouissement et de la dissimulation. Avec Cigéo, on parle bien de « stockage » qui est l'action de « *conserver un produit, une énergie en attente pour une utilisation ultérieure* ».

Quand l'enfouissement laisse supposer l'abandon, le stockage s'inscrit dans l'avenir.

Avec Cigéo, nous parlons des générations futures pour des milliers d'années, un exercice ambitieux et respectueux. Ambitieux car il s'agit de réfléchir à des problématiques rarement abordées et notamment la sûreté sur le très long terme, le travail sur la mémoire, la récupérabilité. Respectueux parce que la réflexion prend aussi en compte l'évolution des sociétés humaines, qu'elles continuent sur la voie du progrès humain, ou pas... C'est bien dans cette dimension de très long terme que s'inscrit le projet de stockage géologique en couche profonde des déchets les plus radioactifs français. Les associations écologistes opposées à ce projet préconisent le stockage en surface, oubliant la question essentielle de la « durée de vie » des déchets et des installations à très long terme, et s'affranchissant de la stabilité des sociétés chargées de surveiller ces installations. *A contrario*, Cigéo propose une solution la plus robuste et la plus durable, garantissant le confinement des matières radioactives pour des dizaines de milliers d'années. Quelle autre industrie réfléchit à si long terme?

La loi doit, à l'issue d'un long parcours qui a impliqué la société civile, décider d'autoriser la construction de Cigéo.

Puissent les débats être ouverts et apaisés, car Cigéo et les générations futures le méritent.

**Isabelle Jouette**  
Rédactrice en chef

## Pollution

# Les externalités positives du nucléaire

À LA DIFFÉRENCE D'AUTRES ÉNERGIES, LE NUCLÉAIRE N'ÉMET QUE TRÈS PEU DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES. À SON ÉCHELLE, IL CONTRIBUE DONC À LIMITER UNE SITUATION DEVENUE ALARMANTE EN TERMES DE RISQUES SANITAIRES. CE CRITÈRE MÉRITERAIT D'ÊTRE PRIS EN COMPTE.

### La pollution, enjeu de santé publique et gouffre financier

Huit citadins sur dix respirent un air qui dépasse les recommandations sanitaires de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'ampleur du phénomène est telle que la pollution de l'air est devenue le principal risque environnemental pour la santé. Selon l'OMS, 3,7 millions de personnes meurent ainsi chaque année prématurément à cause de la pollution atmosphérique.

Le Sénat a récemment évalué le coût de la pollution pour l'économie française à 100 milliards d'euros par an. À une autre échelle, dans une étude publiée en 2010, l'OMS et l'OCDE avaient évalué à 1 430 milliards de dollars le coût économique de la pollution aux particules et de la pollution intérieure dans les 53 pays européens membres de l'OMS.

### Intégrer les externalités positives des énergies bas carbone

Les impacts économiques de la pollution touchent la santé, le

PIB (coût des décès prématurés, des maladies et de l'absentéisme engendrés), la qualité de vie, les finances publiques (dépenses de santé), le patrimoine bâti (détérioration des façades)... Autant d'« externalités négatives », qui ne sont pas imputées aux modes de production d'énergie responsables de leur origine. Si elles étaient internalisées, les effets seraient positifs pour les énergies bas carbone comme le nucléaire, accroissant d'autant leur compétitivité par rapport aux énergies carbonées. Mais aujourd'hui, seules les externalités négatives du nucléaire sont prises en compte. Ainsi, dans son rapport de 2014, la Cour des comptes calcule le coût de production électronucléaire en incluant l'ensemble du cycle de vie : de la construction au démantèlement de la centrale, en passant par la gestion des déchets radioactifs. À quand la prise en compte des externalités positives ?...



Périphérique de Pékin, Chine



## Transition énergétique

# Un nucléaire flexible pour **plus de renouvelables**

**INJUSTEMENT OPPOSÉS DANS LE DÉBAT PUBLIC, L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LES RENOUELABLES RECÈLENT D'IMPORTANTES SYNERGIES QUE LES INDUSTRIELS DU SECTEUR S'EMPLOIENT À RENFORCER. ALORS QUE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EST EN MARCHÉ, EDF RENFORCE LA MODULARITÉ DE SON PARC NUCLÉAIRE POUR ACCOMPAGNER LE DÉPLOIEMENT DE L'ÉOLIEN ET DU SOLAIRE DANS LE MIX ÉLECTRIQUE.**

La plupart des centrales nucléaires actuelles disposent de solides capacités de fonctionnement en régime flexible, leur permettant de s'adapter à la consommation d'électricité, variable selon les heures de la journée. On appelle cela « le suivi de charge ». Dès les années 1980, les centrales nucléaires françaises ont ainsi été rendues plus manœuvrantes pour ajuster en permanence la production d'électricité à la consommation. Une flexibilité favorisée par la taille du parc français : chacun des 58 réacteurs contribue seulement à une portion du besoin de flexibilité globale.

### Réduire l'utilisation des énergies fossiles

D'ici 2018, EDF souhaite arrêter ses centrales thermiques classiques, source d'émissions de CO<sub>2</sub> et de coûts. Pour compenser la fin du thermique, les équipes

d'ingénierie de l'électricien proposent d'appliquer le fonctionnement en suivi de charge aux deux tiers de ses réacteurs (contre un sur deux actuellement). Cette possibilité de variation de la puissance du parc nucléaire permettra à l'entreprise de réduire son recours aux énergies fossiles. Accroître les capacités de modulation du parc nucléaire est également économiquement bénéfique. Le coût et le temps de redémarrage d'un réacteur nucléaire augmentent lorsque celui-ci est à l'arrêt complet. Améliorer la « manœuvrabilité » du parc nucléaire permet donc à l'exploitant de limiter les pertes de production.

### Plus de flexibilité pour soutenir le développement des renouvelables

À mesure de la montée en puissance des énergies renouvelables

intermittentes, les modulations de la production nucléaire devront être plus importantes et plus fréquentes pour répondre aux besoins de flexibilité croissants du système électrique.

« *Ce qui change avec l'intermittence des énergies solaire et éolienne, c'est que nous avons besoin de faire varier davantage de réacteurs en même temps* », explique Stéphane Feutry, délégué à l'état-major à la direction de la production nucléaire d'EDF. Renforcer la flexibilité (ou la manœuvrabilité) du nucléaire est déterminant pour réussir la transition vers une économie décarbonée et réussir l'intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le réseau électrique.

## PORTAIL

### 1, 2, 3, TÉLÉDÉCLAREZ !

Depuis la fin 2015, les industriels peuvent accéder au portail de télédéclaration Pastel mis en place par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) pour saisir et envoyer directement leurs déclarations d'activités en lien avec un programme nucléaire (recherche et développement, cycle du combustible nucléaire, etc.).

Dans le cadre du protocole additionnel au Traité de non-prolifération nucléaire (TNP), la France doit fournir des informations régulières sur l'ensemble des activités nucléaires menées dans le pays.

## FESSENHEIM

### L'INDEMNISATION D'EDF SERA FIXÉE PAR DES EXPERTS INDÉPENDANTS

Le montant de l'indemnisation d'EDF pour la fermeture de la centrale de Fessenheim sera fixé par des « *tiers experts, mandatés par les administrateurs indépendants* », a affirmé le ministre de l'Économie, Emmanuel Macron, lors d'une audition devant la commission des finances du Sénat mercredi 25 mai. Dans un courrier adressé à Jean-Bernard Lévy, le p-dg d'EDF, la ministre de l'Énergie, Ségolène Royal, évoquait un montant de 80 à 100 millions d'euros, très inférieur à toutes les estimations. « *Ce n'est ni le gouvernement ni M. Lévy qui va définir le bon niveau d'indemnisation* », a déclaré la ministre.



Enquête

# L'économie bas carbone emploie **238 000 personnes au Royaume-Uni**

L'INSTITUT STATISTIQUE BRITANNIQUE (ONS) S'EST INTÉRESSÉ AUX EMPLOIS GÉNÉRÉS PAR LES ACTIVITÉS DE L'ÉCONOMIE BAS CARBONE (EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE, NUCLÉAIRE, RENOUVELABLES, ETC.) AU ROYAUME-UNI. RÉSULTATS DE CETTE ÉTUDE PUBLIÉE LE 18 MAI: 96 500 ENTREPRISES ET 238 500 PERSONNES ÉQUIVALENT TEMPS PLEIN TRAVAILLAIENT DANS CE SECTEUR EN 2014, RÉALISANT UN CHIFFRE D'AFFAIRES CUMULÉ DE 46,2 MILLIARDS DE LIVRES (60 MDS€).



Le domaine de l'énergie bas carbone et des énergies renouvelables (ou LCRE pour *Low Carbon and Renewable Energy*) représente 4,4 % des entreprises du pays et

1,3 % de ses employés, hors secteur financier, précise l'ONS. Il est réparti entre plusieurs catégories. La plus importante concerne les activités de construction, avec respectivement

52,8 % des entreprises et 40 % des employés de l'économie LCRE, pour un chiffre d'affaires de 12,4 Mds£, soit 26,9 % du total. Le secteur de l'industrie compte nettement moins d'entreprises, 6 000 (soit 6,2 % de l'ensemble), mais a enregistré un chiffre d'affaires de 13,5 Mds£, s'arrogeant la plus importante part des revenus de l'économie LCRE. Les entreprises actives dans le domaine de la fourniture d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné, ont aussi largement contribué au secteur, avec un chiffre d'affaires de 8,6 Mds£ (18,5 % du total). La catégorie « industrie des activités professionnelles, scientifiques et techniques », qui inclut notamment les activités de conseil et de conception, a quant à elle pesé 3,6 Mds£ de revenus et employé

39 000 personnes (16,4 % du total). Enfin, le reliquat de revenus est dispersé entre différentes activités: agriculture, gestion des déchets, et autres.

Le rapport de l'ONS met également en évidence la diffusion de l'économie LCRE au sein de l'économie générale. Selon le NIA (*Nuclear industry association*), l'industrie nucléaire civile, en particulier, emploie plus de 63 000 personnes à haute valeur ajoutée à travers le Royaume-Uni. Au total, elle représente plus de 80 000 emplois directs et indirects.

Au cours des deux prochaines décennies, compte tenu du renouvellement du parc nucléaire et des chantiers de démantèlement, le secteur pourrait générer jusqu'à 40 000 emplois supplémentaires au pic de son activité.

Sortie du nucléaire

# L'AIE recommande à la Belgique de **reporter son calendrier**

LA BELGIQUE A DÉCIDÉ, FIN 2014, DE PROLONGER LA DURÉE DE FONCTIONNEMENT DES DEUX RÉACTEURS NUCLÉAIRES (DOEL 1 ET 2) DE DIX ANS, TOUT EN MAINTENANT 2025 COMME DATE DE SORTIE DÉFINITIVE DU NUCLÉAIRE. L'AGENCE INTERNATIONALE POUR L'ÉNERGIE (AIE) ESTIME QUE LE ROYAUME DOIT REVOIR CE CALENDRIER POUR NE PAS METTRE EN PÉRIL SA SÉCURITÉ D'APPROVISIONNEMENT EN ÉLECTRICITÉ.

En 2014, l'atome comptait pour environ la moitié de la production d'électricité du pays, malgré l'arrêt de plusieurs réacteurs. Les experts de l'AIE craignent que la Belgique

ne dispose pas des capacités de production alternatives suffisantes pour combler le manque de capacités qu'entraînerait la sortie du nucléaire en 2025: le renforcement

des interconnexions électriques ne suffira pas, tout comme le déploiement des énergies renouvelables, et les investissements dans de nouvelles capacités thermiques.

En outre, l'AIE souligne qu'une sortie dès 2025 augmenterait les émissions de CO<sub>2</sub> du pays et ses coûts de production d'électricité. Pour permettre à la Belgique d'atteindre ses objectifs énergétiques et climatiques, elle propose de faire fonctionner les quatre réacteurs raccordés au réseau entre 1982 et 1985

(Doel 3 et 4, et Tihange 2 et 3) tant que le régulateur juge leur sûreté suffisante.

Un report de la sortie du nucléaire n'est actuellement pas envisagé par l'exécutif belge, a affirmé la ministre de l'Énergie, Marie-Christine Marghem. La question pourrait toutefois être à nouveau débattue dans le cadre de l'élaboration du pacte énergétique interfédéral qui vise à définir une stratégie énergétique commune pour l'État et les régions.

## Accès à l'électricité

## En Inde, le réseau n'est pas la panacée

PLUS DE 20 % DE LA POPULATION INDIENNE NE DISPOSAIT TOUJOURS PAS, EN 2012, D'UN ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ\*. UNE ÉTUDE DU *WORLD RESOURCES INSTITUTE* (WRI) SUR L'IMPACT DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE PETITE TAILLE DÉMONTRE QUE LA PROBLÉMATIQUE DE L'ACCÈS AU RÉSEAU RESTE TRÈS DÉPENDANTE DE LA QUALITÉ ET DE LA RÉGULARITÉ DES APPROVISIONNEMENTS.

Les chercheurs se sont entretenus avec 859 ménages et 74 PME de communautés rurales indiennes et népalaises. Ils ont ainsi pu constater que les patrons de PME préfèrent la plupart du temps « *un approvisionnement limité mais fiable de micro-réseaux, à un approvisionnement erratique provenant du réseau* ». Et si la plupart des ménages ayant accès à l'électricité estime que l'éclairage électrique est bénéfique à l'éducation des enfants, les moins convaincus se trouvent dans le groupe desservi par le réseau.

### Les micro-réseaux ont le vent en poupe

Les micro-réseaux se sont multipliés ces dernières années en Inde et au Népal. Si le prix de l'électricité qu'ils produisent est comparable à celui du courant généré à l'aide de moteurs diesel, il reste supérieur aux prix réglementés et subventionnés par les communautés rurales connectées. En matière de technologie, le rapport observe que le solaire se popularise rapidement dans les campagnes, en remplacement de micro-réseaux biomasse, non viables s'ils dépendent



seulement de la demande des particuliers, ou en équipement direct des maisons. L'ensemble le plus courant est constitué d'un panneau solaire chinois de 20 W et d'une batterie d'une puissance équivalente à celle d'une voiture. L'utilisation et la maintenance de la batterie est cependant source de problèmes pour de nombreux ménages, qui continuent à utiliser des lampes à pétrole alimentées au kérosène.

\* Source: Banque Mondiale

## Chine

## Nouveau jalon pour le premier réacteur AP 1000

LE PREMIER RÉACTEUR AP 1000 DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE SANMEN, DANS LA PROVINCE DE ZHEJIANG EN CHINE, A PASSÉ AVEC SUCCÈS SON TEST HYDROSTATIQUE À FROID. CE SUCCÈS CONFIRME SA TENUE AUX CONTRAINTES DE PRESSION DANS LES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT ET D'ACCIDENT, ET QUI OUVRE LA VOIE AUX TESTS SUIVANTS EN VUE DE SA MISE EN SERVICE MI-2017.



Cette nouvelle étape marque la fin des programmes de conception et de construction de la centrale. « *Ce test hydrostatique à froid* (NDLR:

test CHT en initiales anglaises) *confirme que les composants critiques au sein du système de refroidissement du réacteur fonctionnent comme prévu*, a déclaré Jeff Benjamin, vice-président nouveaux réacteurs de Westinghouse, grands projets. *Le test a été effectué de manière sécurisée et sans incident, ce qui était un facteur important dans l'essai.* » Cette réussite ouvre la voie à deux jalons importants de la mise en service du réacteur: le test fonctionnel à chaud

et le chargement en combustible. L'unité 1 de la centrale d'Haiyang, dans la province de Shandong, sera à son tour soumise à ce test dans les prochaines semaines. Les leçons et expériences acquises lors de la réalisation de chaque CHT seront appliquées aux tests des autres projets de construction de réacteurs AP 1000 dont Sanmen 2 et Haiyang 2 ainsi que quatre unités aux États-Unis, (Vogtle et V. C. Summer).

### SÛRETÉ 2E RAPPORT SUR LES LEÇONS DE FUKUSHIMA POUR LES CENTRALES AMÉRICAINES

La *National Academy of Sciences* (NAS) a publié la 2<sup>e</sup> partie de son rapport, commandé par le Congrès, sur les leçons à tirer de l'accident nucléaire de Fukushima pour les centrales américaines. La première partie du rapport, diffusée en juillet 2014, révélait que celles-ci étaient mal préparées en cas de catastrophes naturelles. Ce deuxième volet se concentre sur la sécurité et la sûreté des centrales. Il conclut sur la nécessité d'améliorer les infrastructures et les systèmes de sûreté, qui doivent être indépendants et redondants.

### ÉTATS-UNIS DU COMBUSTIBLE RUSSE POUR LES RÉACTEURS

TVEL, filiale de Rosatom dédiée à la fabrication de combustible, et *Global Nuclear Fuel - Americas* (GNF-A), filiale de GE Hitachi, ont signé un accord de collaboration. Cette alliance stratégique vise à permettre l'utilisation de combustible de conception russe dans les réacteurs à eau pressurisée américains. GNF-A aidera ainsi TVEL à obtenir la licence nécessaire de l'autorité de sûreté américaine (NRC). « *Les exploitants américains souhaitent avoir plus de choix pour leur combustible*, a indiqué Lance Hall, de GE Hitachi Nuclear Energy. *Nous sommes en discussion avec plusieurs d'entre eux.* »

## Australie

## Présélection d'un site pour le stockage de déchets radioactifs

LE SITE DE BARNDIOOTA EN AUSTRALIE MÉRIDIONALE VIENT D'ÊTRE RETENU PAR LE GOUVERNEMENT AUSTRALIEN COMME LIEU D'ACCUEIL POSSIBLE D'UN FUTUR CENTRE DE STOCKAGE DE DÉCHETS RADIOACTIFS DE FAIBLE ET MOYENNE ACTIVITÉ.

La Commission royale chargée d'étudier les possibilités industrielles liées au cycle du combustible a présenté son rapport au gouvernement le 6 mai dernier. Celui-ci étudie notamment les opportunités liées à l'entreposage et au stockage de déchets radioactifs. Dans la version préliminaire du document publiée en février dernier, ses auteurs estimaient qu'un site de stockage dans l'État d'Australie méridionale pourrait produire jusqu'à 100 milliards de dollars australiens (64 Mds d'euros) pendant les 120 ans que durerait son exploitation. Six sites possibles avaient alors été retenus pour une consultation de 120 jours, à l'issue de laquelle Barndioota a été sélectionné. Ce choix ne constitue

cependant pas une décision finale quant à la localisation de l'infrastructure. Les consultations doivent encore se poursuivre et la décision définitive sera prise d'ici un an.

### Pas de réacteur pour l'instant

La commission s'est également penchée sur les autres aspects du cycle nucléaire et notamment la production d'électricité. Si elle estime qu'il ne serait pas commercialement viable de développer un réacteur de puissance en Australie méridionale dans les conditions actuelles du marché, elle souligne que les décennies à venir verront un besoin croissant d'électricité décarbonée qui pourrait



être comblé par le nucléaire à condition que des mesures soient prises dès maintenant. C'est pourquoi elle demande que les dispositions législatives en cours en

Australie méridionale interdisant l'utilisation d'argent public pour le financement de telles installations soient levées.

## États-Unis

## Une redevance spécifique pour les petits réacteurs modulaires

ANTICIPANT LA RÉCEPTION PROCHAINE DE DEMANDES DE PERMIS POUR DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES (SMR) À EAU LÉGÈRE, L'AUTORITÉ DE RÉGULATION AMÉRICAINE DU NUCLÉAIRE (NRC) VIENT DE MODIFIER SA RÉGLEMENTATION POUR ÉTABLIR UNE STRUCTURE DE REDEVANCE SPÉCIFIQUE POUR CE TYPE DE RÉACTEUR.

La structure annuelle de la redevance d'un SMR, qui aurait sans cette modification été la même que celle d'un réacteur à eau légère de grande taille, est désormais basée sur la quantité d'électricité qu'il est autorisé à produire. Rappelons que les SMR sont de petits réacteurs nucléaires de 300 MWe ou moins.

La *Tennessee Valley Authority* (TVA) a transmis mi-mai à la NRC sa demande d'autorisation anticipée (ESP) pour la construction d'un SMR sur le site de Clinch River. C'est la première demande de ce type transmise à l'autorité de sûreté américaine. L'ESP est la première étape de la procédure

d'autorisation simplifiée et accélérée en vigueur aux États-Unis pour tous les types de réacteurs. Son instruction peut prendre entre trois et quatre ans. « *Les principaux objectifs du projet de Clinch River sont de démontrer que les SMR peuvent être utilisés pour répondre à la demande*

*en électricité de façon progressive tout en assurant la sécurité énergétique et en aidant les installations fédérales à remplir leurs objectifs de réduction d'émissions de CO<sub>2</sub>* », a souligné le *Nuclear Energy Institute* dans un communiqué.

## Moyen-Orient et Afrique du nord

Cap sur la **production électrique**

334 MILLIARDS DE DOLLARS, SOIT 292,6 MDS D'EUROS. C'EST LE MONTANT QUE LES PAYS DU MOYEN-ORIENT ET D'AFRIQUE DU NORD DEVRONT INVESTIR DANS LE SECTEUR ÉLECTRIQUE AU COURS DES CINQ PROCHAINES ANNÉES POUR RÉPONDRE À LA CROISSANCE DE LA DEMANDE, SELON UNE ÉTUDE PUBLIÉE PAR L'ARAB PETROLEUM INVESTMENTS CORPORATION (APICORP).

Sur ces 334 Mds\$ d'investissements nécessaires, 198 Mds\$ serviront à augmenter, d'ici à 2020, de 147 gigawatts (GW) la capacité de production d'électricité dans la région, actuellement de 315 GW. Le reste – 136 Mds\$ – sera consacré au développement des réseaux de transport et de distribution.

Sous l'effet de la croissance démographique, de l'industrialisation et de la baisse des prix des carburants, la demande en électricité dans la région va augmenter en moyenne de 8 % par an d'ici 2020 selon Apicorp. Les six monarchies pétrolières du Golfe disposent de 47 % de la capacité de production d'électricité de la région, soit 148 GW. Elles ont besoin d'investir 136 Mds\$ pour augmenter leur

capacité de 69 GW d'ici 2020, dont 71 Mds\$ pour la seule Arabie saoudite, et 63 Mds\$ pour l'Iran.

**Des défis à relever**

Confrontés à l'effondrement des cours du brut sur les marchés internationaux, les pays du Golfe exportateurs de pétrole ont dû réduire leurs dépenses publiques et reporter plusieurs projets de production d'électricité, dont le financement est devenu d'autant plus difficile après que les agences de notation ont abaissé la solvabilité de certains d'entre eux. « Il y a une prise de conscience claire de l'importance d'une restructuration du secteur de l'énergie et de la mise en place d'un cadre réglementaire pour stimuler une plus grande

participation du secteur privé », explique la banque de développement dans son étude. Certains pays tels la Syrie, l'Irak, le Yémen et la Libye continueront, eux, de souffrir à court et moyen termes d'instabilité politique ne permettant pas de débloquer les investissements nécessaires.



## À lire

Mauvais climat : du froid sur le **réchauffement**

Quelques années après la COP 21 de Paris, trois passionnés d'écologie et une journaliste se retrouvent plongés au cœur des problèmes soulevés par le réchauffement climatique. En suivant les aventures de ces personnages attachants et aux caractères bien trempés, le lecteur prend conscience des causes et des effets qu'engendrent les rejets excessifs de gaz à effet de serre et réalise les limites des moyens traditionnels pour contrer les désastres

qui s'annoncent. Une intrigue qui conjugue suspense, sérieux et moins sérieux, avec une bonne dose d'optimisme, pour démontrer que rien n'est écrit, que tout reste possible. Après une carrière internationale dans l'industrie, Jacques Masurel est devenu consultant. Président, puis président d'honneur du collectif d'associations Sauvons le Climat, il est l'auteur et le co-auteur de plusieurs ouvrages sur les questions climatiques.



**Mauvais climat : du froid sur le réchauffement**  
Feuillage, 16 €

ÉMIRATS ARABES UNIS  
**Eneec s'organise pour exploiter Barakah**

Le conseil d'administration d'Emirates Nuclear Energy Corporation (Eneec) a approuvé la création d'une filiale baptisée *Nawah Energy Company* pour exploiter et entretenir les unités 1 à 4 de la centrale de Barakah. Le management d'Eneec a été mandaté pour constituer l'entreprise et lui transférer les ressources nécessaires à sa fonction. La centrale nucléaire de Barakah sera équipée de quatre réacteurs APR 1400 actuellement en construction, dont le premier est achevé à près de 90 %.

Courrier  
des lecteurs

Vous avez un commentaire à faire sur la publication d'un article ?

Vous souhaitez apporter un complément d'information ? Demander des avis ?

Adressez vos courriers à [redaction@revuegeneralenuclaire.org](mailto:redaction@revuegeneralenuclaire.org) et connectez-vous sur [www.revuegeneralenuclaire.fr](http://www.revuegeneralenuclaire.fr)



Initiative

# FNPM porte la voix de l'équipe de France du **nucléaire à l'export**

ENCOURAGÉE PAR UN MARCHÉ INTERNATIONAL EN PLEINE MUTATION, LA FILIÈRE NUCLÉAIRE FRANÇAISE SE RESTRUCTURE, POUR PERMETTRE À TOUTES SES ENTREPRISES, QUELLE QUE SOIT LEUR TAILLE, DE S'ORGANISER POUR GAGNER ENSEMBLE DE NOUVEAUX MARCHÉS À L'EXPORT. LA DÉMARCHE *FRANCE NUCLEAR PERFORMANCE MODEL* (FNPM), LANCÉE SOUS L'ÉGIDE DU COMITÉ STRATÉGIQUE DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE, PORTE CETTE AMBITION.

Chaque année, le chiffre d'affaires des biens et services nucléaires français réalisé à l'international s'élève à environ 5 milliards d'euros, l'équivalent d'un mois de déficit commercial national. EDF est présent sur environ 20 % des réacteurs dans le monde; AREVA NP intervient sur plus de 300 réacteurs; et 70 % des 2500 entreprises du secteur nucléaire

français exportent leur savoir-faire au-delà des frontières de l'Hexagone. Grâce à son expertise reconnue sur l'ensemble du cycle d'une installation nucléaire, l'équipe de France du nucléaire dispose de nombreux atouts pour tirer son épingle du jeu sur le marché international. Il lui faut cependant identifier des synergies et faire en sorte que ses membres

soient solidaires pour gagner de nouveaux marchés dans un contexte très concurrentiel. C'est tout l'objet de la démarche *France Nuclear Performance Model* (FNPM), portée par les industriels au sein du Comité stratégique de la filière nucléaire (CSFN), avec le soutien des ministères et des institutionnels.

### Une démarche collaborative et solidaire

Lancé officiellement le 20 mai dernier lors d'un premier séminaire auquel ont participé plus de quarante entreprises, ce grand réseau rassemblera des entreprises de toute taille, avec pour ambition de couvrir l'ensemble des activités du cycle de vie d'une installation nucléaire.



Son objectif: créer des synergies et rendre plus lisible la diversité de l'offre française aux potentiels clients étrangers. Échanger sur les vraies problématiques, les analyser ensemble pour les résoudre et communiquer en toute franchise sont les trois caractéristiques principales de l'état d'esprit qui a animé ce rassemblement inaugural. Cette approche pragmatique génère déjà un grand enthousiasme et une dynamique positive bénéfique à l'ensemble des acteurs de la filière.

# Nuclear *global* Solutions



- health physics
- nuclear services
- nuclear measurement systems
- radioactive waste management
- dismantling
- melting facility
- decontamination
- bioshields
- engineering
- remediation
- design offices
- repository
- containers supply

[www.hps-ns.fr](http://www.hps-ns.fr) (tel. +33 3 86 66 60 75)

[www.groupe-seche.com](http://www.groupe-seche.com) (tel. +33 1 53 21 53 53)





LE PROJET CIGÉO,

## Stocker les déchets les plus radioactifs

LA LOI DU 30 DÉCEMBRE 1991 A CONFIE À L'ANDRA LA MISSION D'ÉVALUER LA POSSIBILITÉ D'UN STOCKAGE EN FORMATION GÉOLOGIQUE PROFONDE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES LES PLUS RADIOACTIFS. FIN 1998, LE SITE DE BURE DANS LA MEUSE EST RETENU POUR IMPLANTER LE LABORATOIRE « DÉMONSTRATEUR » DE LA FAISABILITÉ DE CIGÉO, CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE. QUEL STOCKAGE POUR QUELS DÉCHETS? À QUEL PRIX? COMMENT? QUEL HÉRITAGE POUR LES GÉNÉRATIONS FUTURES?... C'EST L'OBJET DE CE DOSSIER CONSACRÉ À CIGÉO.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

---

### Cigéo, stocker les déchets les plus radioactifs en profondeur

**12**

*par Isabelle Jouette, rédactrice en chef, RGN*

---

### L'Andra, acteur engagé en Meuse/Haute-Marne

**16**

*par Isabelle Jouette, rédactrice en chef, RGN*

---

### Cigéo en exploitation

**18**

*par Frédéric Launeau, directeur du projet Cigéo, Andra*

---

### Les matériaux du centre industriel de stockage géologique Cigéo

**23**

*par Stéphan Schumacher, Didier Crusset, Andra et Nadège Caron, CEA*

---

### Les (futurs) jalons du projet Cigéo

**28**

*par Frédéric Launeau, directeur du projet Cigéo, Andra*

---

### Cigéo : les enjeux de sûreté en exploitation et à long terme

**32**

*Entretien avec François Besnus, directeur des déchets et de la géosphère, IRSN*

---

### La réversibilité : un des piliers du projet Cigéo

**36**

*par Pascal Leverd, responsable des dossiers de demande d'autorisation de création de Cigéo*

---

### Dialogue, concertation, implication : le triptyque de la démarche d'ouverture à la société de l'Andra

**40**

*par Valérie Renaud, directrice de la communication et du dialogue avec la société, Andra*

---

### Le grand pouvoir des petits dessins

**44**

*Entretien avec Jean-Philippe Legrand (Aster), illustrateur indépendant*

---

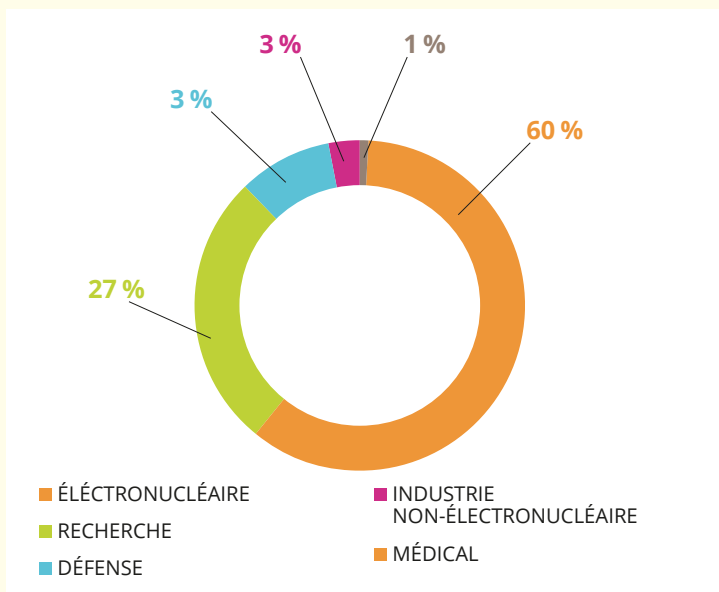
# Cigéo, stocker les déchets les plus radioactifs en profondeur

Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) est le projet français de stockage profond pour les déchets les plus radioactifs. Le principe du stockage profond a été retenu par la loi de 2006, après 15 ans de recherches menées par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), leur évaluation et un débat public. Cigéo apparaît comme la seule solution sûre pour gérer ce type de déchets à long terme sans en reporter la charge sur les générations futures. Quel stockage pour quels déchets ? À quel prix ? Comment ? ... Retour sur les questions que soulève ce projet.

## STOCKER LES DÉCHETS LES PLUS DANGEREUX EN TOUTE SÛRETÉ

Sur l'ensemble du volume des déchets radioactifs produits en France, 62 % sont issus de la production d'électricité et 38 % d'autres activités : recherche (biologie, archéologie), défense, médecine ou certaines activités industrielles particulières (conservation des aliments, contrôle des soudures, stérilisation du matériel médical, détection incendie...). Si 90 % des déchets radioactifs

produits chaque année en France disposent d'une filière de gestion en stockage ultime, les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) doivent faire l'objet d'une solution de gestion définitive, adaptée à leur dangerosité, sur le très long terme. Ces déchets HA et MA-VL représentent environ 3 % du volume des déchets radioactifs et concentrent plus de 99 % de la radioactivité. Ils sont issus de l'industrie nucléaire (traitement du combustible usé), des activités de recherche et, dans



une moindre part, des activités du CEA liées à la force de dissuasion et à la propulsion navale nucléaire. Les déchets MA-VL contiennent des quantités importantes de radionucléides à période radioactive longue. Leur niveau de radioactivité se situe en général, entre 1 million et 1 milliard de becquerels par gramme. La radioactivité des déchets HA est de plusieurs milliards à plusieurs dizaines de milliards de becquerels par gramme, et ils dégagent de la chaleur. Certains radionucléides ont des périodes très longues jusqu'à 2 millions d'années.

Cigéo devra prendre en charge tous les déchets HA et MA-VL produits et à produire par les installations nucléaires, y compris ceux que produiront l'EPR de Flamanville, ITER, ou encore le réacteur de recherche Jules Horowitz. Cigéo peut accueillir environ 10 000 m<sup>3</sup> de déchets HA et 75 000 m<sup>3</sup> de déchets MA-VL dont une grande partie sont déjà produits et entreposés sur les sites de production.

### LE CONCEPT DU STOCKAGE

Contrairement à ce qui est affirmé par les opposants au projet en particulier et au nucléaire en général, le stockage en profondeur n'est pas une « solution de facilité » mais une solution réfléchie sur plusieurs décennies, qui doit apporter une réponse aux questions essentielles

de la durée de vie et de la dangerosité de ces déchets.

En effet, la radiotoxicité de ces déchets est telle qu'un transfert de ces matières radioactives jusqu'à l'homme durant ces périodes très longues aurait des conséquences radiologiques néfastes. La question a donc été de savoir comment se protéger de ces déchets et les stocker de manière sûre pour des milliers d'années. En effet, leur dangerosité est évidente. En France, l'irradiation naturelle moyenne est de 2,4 mSv/an par individu. En comparaison, rester environ 1 seconde à un mètre d'un colis de déchets HA sans protection équivaut à 20 ans d'irradiation naturelle. 5 secondes à un mètre d'un colis MA-VL sans protection correspondent à une année d'irradiation naturelle.

La question de la durée de vie et de la dangerosité des déchets est importante pour au moins deux raisons.

D'une part, les possibilités de confinement technologique ont une viabilité limitée sur le très long terme et leur durée de vie est inférieure à celle des déchets. Ils auront beau être conditionnés, vitrifiés, enrobés, placés dans des colis étanches, l'érosion finira par libérer les radionucléides. Il faudrait

alors reprendre ces ouvrages après quelques centaines d'années et faire reposer cette charge aux générations futures, sans garantie qu'elles seront en mesure de le faire.

D'autre part, pendant tout ce temps, ces dépôts nécessiteront une surveillance institutionnelle constante, charge lourde pour les générations futures, qui suppose qu'elles soient capables de conserver la mémoire des sites de stockage et de les surveiller sur d'aussi longues durées. Mais comment miser sur la stabilité des institutions sociales à si long terme ? Pour garantir le confinement pour des milliers d'années, la solution se devait d'être plus robuste et durable que les matériaux de conditionnement disponibles, plus stable et moins imprévisible que le comportement des sociétés futures. Ce postulat a conduit à l'idée d'utiliser les capacités de confinement offertes par des formations géologiques connues pour leur grande stabilité. La formation géologique retenue pour Cigéo<sup>1</sup>, à 500 mètres de profondeur, résiste à l'épreuve du temps, tout en limitant le déplacement des radionucléides. Elle devient donc un piège isolant les déchets de l'environnement, une fois les colis détruits par l'érosion. Le concept de stockage géologique était né. L'exploitation de Cigéo devrait durer plus de 100 ans, avant que le site ne soit définitivement fermé après autorisation par la loi (selon le processus dans la loi de 2006). Les déchets resteraient ensuite enfouis pour une durée indéterminée de plusieurs centaines de millénaires.

### LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE RÉVERSIBLE : UNE SOLUTION EFFICACE...

La profondeur du stockage, sa conception, son implantation dans une roche argileuse imperméable et dans un environnement géologique stable sont autant d'éléments permettant d'isoler les déchets des activités humaines et des

<sup>1</sup>. Cette formation géologique est une argile du callovo-oxfordien vieille de 160 millions d'années

événements naturels de surface. Les substances radioactives seront confinées très longtemps. Une fois l'installation refermée, elle ne nécessite plus d'action humaine. De ce fait, la charge de la gestion des déchets n'est pas reportée sur les générations futures, et leur protection est assurée.

Les colis de déchets et les ouvrages souterrains de Cigéo se dégradent au contact de l'eau contenue dans la roche. Après plusieurs milliers d'années, certains radionucléides pourront se dissoudre. L'argile prendra alors le relais pour les retenir et freiner leur déplacement. Le stockage permet donc bien de confiner la radioactivité. Seuls certains radionucléides pourraient migrer hors de la couche d'argile, à l'échelle de la centaine de milliers d'années, ce qui atténuera considérablement leur concentration. Leur effet sur l'homme sera inférieur à celui de la radioactivité naturelle.

### ...QUI FAIT CONSENSUS INTERNATIONALEMENT

Le stockage géologique profond est retenu comme solution de gestion définitive et sûre à long terme des déchets les plus radioactifs par plusieurs États utilisant l'énergie nucléaire, les concepts et milieux géologiques choisis variant selon les pays<sup>2</sup>.

En 2015, la Finlande a obtenu l'autorisation de création du centre de stockage Onkalo. La Suède a déposé une demande d'autorisation en 2011. Le Canada, la Chine, la Belgique, la Suisse, l'Allemagne, le Royaume-Uni et le Japon travaillent aussi à des solutions de stockage.

Pour l'AIEA<sup>3</sup>, « la sûreté du stockage géologique est largement acceptée dans la communauté technique et de nombreux pays ont maintenant décidé d'aller de l'avant avec cette option »<sup>3</sup>. En 2011, une directive européenne<sup>4</sup> rappelle que le stockage géologique constitue la solution la plus sûre et la plus durable en tant

qu'étape finale de la gestion des déchets de haute activité.

En novembre 2015, le gouvernement finlandais a donné son feu vert pour la construction du centre de stockage de combustibles usés d'Olkiluoto (Onkalo). Posiva, gestionnaire du stockage, avait déposé la demande d'autorisation de construction en décembre 2012. Le projet avait reçu l'autorisation de l'autorité de sûreté finlandaise STUK en février 2015. La Finlande va donc stocker ses combustibles usés dans du granite.

### DES SOLUTIONS ABANDONNÉES

En France, dans le cadre de la loi de 1991<sup>5</sup>, d'autres options de gestion des déchets avaient été confiées au CEA : la séparation et la transmutation des radionucléides à vie longue présents dans les déchets et l'entreposage de longue durée.

La séparation et la transmutation des radionucléides, vise à réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs. Dans un premier temps, on sépare les radionucléides contenus dans les déchets. Puis on transforme les radionucléides à vie longue en radionucléides à vie plus courte, par une série de réactions nucléaires. Les résultats du CEA montrent que la séparation/transmutation ne supprime pas le recours à un stockage profond : elle n'est possible que pour les déchets futurs et ne serait applicable qu'à certains radionucléides de la famille de l'uranium, les actinides mineurs. D'autre part, les installations nucléaires nécessaires à cette technique produiraient des déchets d'exploitation qui devraient aussi être stockés en profondeur.

L'IRSN<sup>6</sup> considère que la séparation/transmutation n'est pas une alternative au stockage géologique. D'ailleurs, en dépit de l'avancée des recherches, il est vraisemblable que ces opérations ne seront pas réalisables à l'échelle industrielle dans un proche avenir. De plus, la

transmutation nécessite un parc de réacteurs de quatrième génération, dont la conception est encore à l'étude.

En termes de sûreté, de radioprotection et de gestion des matières et déchets radioactifs, le bilan entre gains et contraintes de la transmutation est très déséquilibré : les gains sont *a priori* faibles face aux contraintes induites sur le cycle du combustible. En effet, la transmutation des actinides mineurs nécessite de manipuler de grandes quantités de matières très radioactives, de développer de nouveaux procédés de fabrication et de traitement et de concevoir de nouveaux entreposages et installations. Ce qui conduirait à accroître sensiblement les sources de danger et les situations incidentelles et accidentelles à analyser, et à augmenter les doses reçues par les opérateurs, pour des gains modestes.

L'entreposage de longue durée, en surface ou à faible profondeur, dans des installations conçues pour environ 300 ans a les faveurs des associations environnementales antinucléaires. Toutefois, les travaux sur le sujet ont conclu que, si les concepts d'installations semblaient particulièrement robustes face aux aléas externes, techniques ou sociétaux, ils impliquent aussi de maintenir un contrôle de la part de la société et l'obligation pour les générations futures de reprendre les déchets. En effet, il resterait indispensable de reprendre les colis de déchets quand les entrepôts auront atteint leur fin de vie, pour éventuellement les reconconditionner, et construire de nouveaux entrepôts car la durée pendant laquelle ces déchets resteront dangereux est bien supérieure à 300 ans.

Sur ces deux problématiques – séparation/transmutation et entreposage de longue durée – l'ASN<sup>7</sup> estime d'une part que « la faisabilité technologique de la séparation et de la transmutation n'est pas acquise à ce jour. Une autre solution de référence est

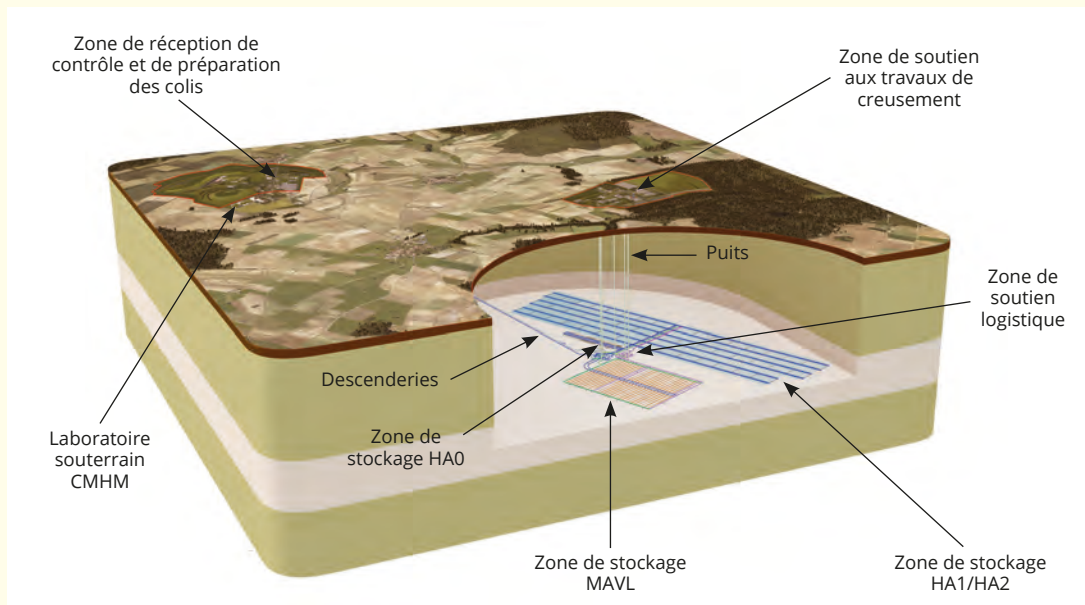
**AIEA**  
Agence internationale de l'énergie atomique

**IRSN**  
Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

**ASN**  
Autorité de sûreté nucléaire française

<sup>2</sup>. Voir RGN 2 (2016) <sup>3</sup>. *The long term storage of radioactive waste : safety and sustainability - A position Paper of International Experts*, AIEA 2003

<sup>4</sup>. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32011L0070> <sup>5</sup>. [www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000356548&categorieLien=id](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000356548&categorieLien=id)



Bloc diagramme 3D Cigéo

nécessaire »<sup>6</sup>. Et considère que « l'entreposage de longue durée ne peut pas constituer une solution définitive pour la gestion des déchets radioactifs de haute activité à vie longue ».

### CIGÉO, COMBIEN ÇA COÛTE ?

L'ensemble des phases du projet Cigéo, de la construction à l'exploitation sur plus d'un siècle, au démantèlement est fixée par le ministère de l'Environnement à 25 milliards d'euros, soit 300 millions par an. Comparé aux 15 Mds d'euros que coûte chaque année la gestion des ordures ménagères, le coût est loin d'être astronomique. Évaluer un coût sur plus d'un siècle comporte nécessairement des incertitudes. C'est pourquoi le coût sera réévalué régulièrement.

Pour fixer ce « coût objectif », le ministère a examiné les propositions de l'Andra, de l'ASN, d'EDF, AREVA et du CEA et tranché entre le devis de l'Andra (34 Mds) et celui des financeurs, les exploitants d'installations nucléaires (20 Mds).

Dans une note de synthèse, l'Andra souligne que, cumulées sur une centaine d'années, les différentes visions « peuvent conduire à des

différentiels de l'ordre de 30 % à la fin de la phase d'esquisse, soit un écart entre un chiffre d'environ 20 Mds € et un autre, d'environ 30 Mds € ». Ces différences sont essentiellement techniques comme des alvéoles permettant de stocker les déchets sur 3 niveaux au lieu de 2.

Reste que tous les acteurs sont mobilisés pour la réussite du projet. « Les points de vue se sont déjà fortement approchés au fil des réunions du groupe de travail "Coûts" mis en place par la DGEC » indique la CNE.

### UNE QUESTION DE PERSPECTIVE

En 2005, le coût complet du stockage profond avait été estimé entre 13,5 et 16,5 Mds € sur la base d'un inventaire de déchets correspondant à l'ensemble de la production du parc nucléaire sur 40 ans. « La nouvelle évaluation des coûts reste cohérente avec la précédente estimation compte tenu des nouvelles hypothèses prises en compte : durée d'exploitation des réacteurs de 50 ans, évolution du coût des matières premières, études plus approfondies » explique l'Andra.

L'allongement de la durée d'exploitation des réacteurs entraîne logiquement une hausse de la production des déchets à gérer, à mettre en perspective du très faible volume qu'elle représente face aux bénéfices que le pays tire de la production électronucléaire.

### LE FINANCEMENT EST ASSURÉ

Suite à la détermination du coût global du projet, les exploitants – qui consacrent des actifs sanctuarisés en cas de faillite de l'entreprise à la gestion des déchets – ont réévalué leurs provisions, de l'ordre de 800 M euros pour EDF. AREVA a indiqué faire dans ses comptes « un complément de provision de l'ordre de 250 M euros ». Chaque année, la provision des exploitants est augmentée et actualisée en fonction de l'avancée des technologies et des réglementations. Pour la Cour des comptes, l'impact de Cigéo sur le coût de production nucléaire s'établira entre 1 et 2 %, indolore pour le consommateur : le coût de production représente un tiers de la facture d'électricité, composée pour le reste de taxes et de coûts réseau.

**DGEC**  
Direction générale de l'énergie et du climat

6. Voir l'avis de l'ASN rendu lors du débat public Cigéo en 2013: <http://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-cigeo/docs/docs-complementaires/docs-avis-autorites-contrôle-évaluations/20130704-asn.pdf>

# L'Andra, acteur engagé en Meuse/Haute-Marne

par **Isabelle Jouette**, SFEN



## en substance...

En application de la loi du 30 décembre 1991, afin d'évaluer la faisabilité d'un stockage en formation géologique profonde pour prendre en charge en toute sûreté à très long terme les déchets les plus radioactifs, l'Andra a entrepris, entre 1994 et 1996, des études géologiques dans le Gard, la Vienne, la Meuse et la Haute-Marne. Fin 1998, le site de Bure dans la Meuse est retenu pour implanter un laboratoire souterrain de recherche.

L'Andra s'inscrit de plain-pied dans le développement du territoire dans lequel elle implante ses installations. Accompagnement économique, partenariats, soutien aux initiatives qui développent la vie locale, aménagements, infrastructures... l'Agence est aujourd'hui un des acteurs majeurs d'un territoire qui couvre les départements de la Meuse et de la Haute-Marne, représentant plus de 14 000 km<sup>2</sup> et comptant près de 400 000 habitants. Cette politique d'intégration est un des enjeux majeurs de l'arrivée de Cigéo.

### L'ANDRA EN MEUSE ET HAUTE-MARNE

L'Andra dispose aujourd'hui d'un laboratoire d'études et recherches sur le stockage profond à 490 mètres des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue situé sur la commune de Bure (Meuse), d'un Espace technologique sur la commune voisine de Saudron (Haute-Marne) où l'Agence expose des robots et démonstrateurs technologiques et d'une Écothèque (voir page 56), à Bure, où elle conserve des échantillons récoltés dans le cadre de l'Observatoire pérenne de l'environnement (voir encadré). Au total, l'Andra et ses prestataires permanents emploient plus de 350 personnes qui travaillent quotidiennement sur le site. 52 % d'entre eux résident à moins de

20 km, et 97 % à moins de 45 km. Les principaux cantons de résidence sont Montiers-sur-Saulx, Gondrecourt-le-Château, Joinville, Poissons et Ligny-en-Barrois.

L'Agence met en œuvre depuis plusieurs années une démarche d'insertion territoriale pour participer au développement économique, social et culturel de ses territoires d'implantation.

Parmi les actions entreprises, l'accompagnement des PME locales pour leur permettre d'accéder aux marchés de l'Agence, qui se traduit chaque année par près de 20 millions d'euros de contrats passés avec des entreprises proches de ses installations. La journée d'échange organisée annuellement par l'Andra avec Energic ST 52/55, est un moment de rencontre privilégiée entre l'Andra et ces entreprises.

Autre action notable d'intégration : le soutien que l'Andra apporte aux projets et initiatives qui participent au dynamisme de la vie culturelle, sociale et sportive locale. En 2015

plus de 150 000 euros ont été versés à des associations de Meuse et Haute-Marne.

### PRÉPARER L'ARRIVÉE DE CIGÉO

Tout en poursuivant ces actions d'insertion, l'Andra prépare déjà l'arrivée et l'implantation de Cigéo : l'aménagement des infrastructures (transport, eau, électricité, réseau numérique...), les emplois, l'accueil de nouvelles populations, le développement économique et l'attractivité sont autant de sujets qu'elle anticipe avec les acteurs du territoire.

Un contrat de développement du territoire, qui fera suite au schéma interdépartemental de développement du territoire présenté au débat public de 2013, sera élaboré, sous le pilotage du préfet coordinateur. Il aura vocation à définir, en cohérence avec les politiques de développement des acteurs du territoire (que ce soit au niveau des départements, des intercommunalités, ou



L'Andra en Meuse/Haute-Marne - Fresque environnementale d'Olivier Frimat



des communes), les grandes orientations d'aménagement, notamment, en vue d'accueillir Cigéo. L'Andra contribue à ce travail en fournissant au territoire les données d'entrée du projet à chacune de ses phases (construction initiale, exploitation, fermeture définitive/surveillance) pour préparer son accueil. Elle organise également des concertations avec les parties prenantes locales sur les sujets pour lesquels elle joue un rôle de

pilotage: préparation des entreprises locales, adaptation de l'offre de formation, insertion environnementale de Cigéo...

Dans le cadre de cette approche collective, l'Andra souhaite étudier une demande de label du type « Grand chantier » comme cela a été fait notamment pour la construction de l'EPR de Flamanville (Manche). ■



### ZOOM SUR...

En Espagne, quatorze communes se sont portées candidates pour accueillir le nouveau "centre temporaire centralisé", l'ATC, de stockage des déchets radioactifs des huit réacteurs nucléaires espagnols. Huit d'entre elles ont été retenues. L'ATC représente un investissement de 700 millions d'euros et une activité prévue pendant 60 ans. Deux arguments de poids pour ces municipalités de quelques centaines d'habitants.

## L'Observatoire pérenne de l'environnement

L'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) a été créé en 2007 pour décrire précisément l'environnement du futur Cigéo et suivre son évolution sur le long terme. L'OPE doit permettre d'établir sur 10 ans un état des lieux physique, chimique, biologique et radiologique de l'environnement du stockage et en conserver la mémoire. L'Observatoire prépare également un plan de surveillance environnemental du futur centre de stockage. Il doit comprendre les interactions entre les différents milieux environnementaux et suivre leur évolution pour évaluer précisément l'impact du stockage. Et définir l'origine de toute perturbation observée. L'OPE met en œuvre un programme d'observation pluridisciplinaire (eau, air, flore, faune et homme) sur une période d'au moins 100 ans. Ses équipes prélèvent des échantillons représentatifs des principaux écosystèmes présents sur le territoire observé : l'écosystème forestier, les prairies et cultures, l'écosystème aquatique et la chaîne alimentaire (jardins, vergers, exploitations laitières et fromagères). Chaque échantillon prélevé est décrit et géo-référencé. Les caractéristiques des échantillons, leurs localisations et les résultats d'analyses associées sont intégrés dans une base de données consultable. Voir le reportage sur l'Ecothèque de l'OPE (page 56)

# Cigéo en exploitation

par **Frédéric Launeau**,  
Directeur du projet Cigeo, Andra



## en substance...

Si la construction de Cigéo est autorisée, le centre de stockage sera une installation nucléaire de base (INB) composée de plusieurs ensembles : une installation souterraine, implantée à 500 mètres de profondeur, dans laquelle seront stockés les colis de déchets radioactifs et deux sites distincts, en surface, l'un pour réceptionner, contrôler et préparer les colis de déchets avant leur transfert dans l'installation souterraine et l'autre pour assurer la logistique des travaux souterrains.

Cigéo est conçu pour être exploité pendant une centaine d'années. L'installation se développera progressivement, au fur et à mesure des besoins. Les opérations y seront menées de manière automatique depuis une salle de conduite.

**C**onstruire et exploiter une installation nucléaire de base de la dimension de Cigéo, puis transporter les déchets radioactifs à 500 mètres sous terre, impliquent de concevoir un panel large de dispositifs techniques sûrs et durables, Cigéo devant être exploité pendant 100 ans. Depuis plusieurs décennies, les équipes de l'Andra<sup>1</sup> travaillent sur ces questions. Les connaissances sont arrivées à maturité et permettent aujourd'hui d'envisager avec sérénité les jalons à venir.

### LA CONSTRUCTION DE CIGÉO

Si le projet Cigéo est autorisé, sa construction se fera progressivement. Dans un premier temps, l'Andra construira les ouvrages nécessaires aux travaux souterrains et au démarrage de l'exploitation. Puis, dans un deuxième temps,

après la mise en service du procédé de stockage, l'Agence poursuivra la construction et l'équipement de nouvelles alvéoles.

Pour assurer la sûreté du stockage pendant son exploitation, les zones en construction seront physiquement séparées des zones en exploitation. Cette séparation sera aussi valable pour les circuits de ventilation : les galeries de transfert des colis disposeront d'une alimentation en air frais indépendante de celle des galeries de travaux.

Les déblais de roche excavés lors du creusement de l'installation souterraine (10 millions de mètres cubes environ sur plus de 100 ans)<sup>1</sup> feront l'objet de dispositions particulières pour permettre la réutilisation future d'une partie des déblais pour la fermeture de Cigéo (environ 40 % seront réutilisés pour remblayer les ouvrages souterrains).

### LES INSTALLATIONS DE SURFACE

Les installations de surface de Cigéo seront réparties sur deux sites distants de quelques kilomètres. Lune sera dédiée à la réception,

au contrôle et à la préparation des colis de déchets radioactifs avant leur mise en stockage et la seconde, en support aux travaux.

Plusieurs zones ont été identifiées par l'Andra pour étudier l'implantation des installations de surface de Cigéo. Ces zones prennent en compte les contraintes liées aux zones inondables, aux zones urbanisées, aux zones naturelles protégées, aux zones de survol aérien, etc.

La grande majorité des terrains nécessaires aux installations de surface de Cigéo a été acquise. Restent aujourd'hui à acquérir quelques petites parcelles d'ajustement de périmètre et pour les aménagements de la voie ferrée, les terrains pour implanter la liaison intersites (dont la solution technique n'a pas encore été arrêtée), ainsi que les terrains nécessaires à l'implantation du poste électrique.

Les installations disposeront d'équipements de secours et de sécurité (qui permettent de couvrir les zones en surface et les installations souterraines) : caserne de pompiers, poste de garde... (voir pages 32 à 35)

**Andra**  
Agence nationale de  
gestion des déchets  
radioactifs



Installations de surface du futur centre de stockage Cigéo

<sup>1</sup>. À titre de comparaison, le volume de déblais généré par le creusement de grands tunnels est du même ordre de grandeur mais pour des chantiers réalisés sur une dizaine d'années (environ 7 millions de mètres cubes pour le tunnel sous la Manche et 15 millions pour le futur tunnel ferroviaire Lyon-Turin).

### « Zone descenderies » : réception, contrôle et préparation des colis

La zone de réception, contrôle et préparation des colis est également appelée « zone descenderies » car elle accueille la tête de la descenderie, le tunnel permettant de transférer les colis de déchets de la surface vers les installations souterraines.

Cette zone est dédiée aux activités d'exploitation nucléaire. C'est dans cette installation que les colis de déchets expédiés par les producteurs de déchets sont réceptionnés puis contrôlés. Ils sont ensuite conditionnés en colis de stockage avant leur transfert vers l'installation souterraine. La zone s'étend sur 280 hectares, une superficie équivalente à celle du CEA Marcoule (250 ha), mais avec un nombre de bâtiments en surface moins important.

La « zone descenderies » comporte le bâtiment nucléaire (21 hectares dont 50 000 m<sup>2</sup> de bâti) et le terminal ferroviaire pour réceptionner les colis (5 ha).

### Le support aux travaux souterrains

La zone dite « puits » servira essentiellement aux travaux de creusement et de construction des ouvrages souterrains.

Elle sera composée d'un secteur dédié aux travaux souterrains, d'un secteur nucléaire qui regroupera les ateliers de maintenance et les différents puits dédiés au transfert du personnel, des matériaux et à la ventilation de l'installation souterraine, et des équipements nécessaires au fonctionnement des installations (postes électriques, bassins de récupération et traitement des eaux de pluie, station d'épuration...)

Les déblais issus du creusement de ces ouvrages seront stockés sur cette zone, dont près de 40 % seront réutilisés pour la fermeture du stockage.

Cette zone sera située à environ 5 kilomètres de la « zone descenderies » et à la verticale de l'installation souterraine. Les installations occuperont 90 ha et les verses 180 ha.

### UNE INSTALLATION SOUTERRAINE

À 500 mètres de profondeur dans l'installation souterraine, les déchets radioactifs seront répartis dans des tunnels horizontaux appelés « alvéoles ». L'installation comportera deux types d'alvéoles – un pour les déchets haute activité (HA) et l'autre pour les déchets de moyenne activité (MA-VL) à vie longue – dimensionnées à la dangerosité et la durée de vie des déchets. Des galeries de liaison et d'installations techniques permettront d'assurer l'exploitation quotidienne de l'installation. Au terme d'une centaine d'années d'exploitation, l'installation souterraine représentera une surface d'environ 15 km<sup>2</sup>.

Des moyens de manutention automatisés (chariots, navettes...) permettront de placer les colis de déchets dans des alvéoles, creusées au cœur de la couche d'argile. Les déchets HA seront stockés dans des alvéoles d'une centaine de mètres de long et d'environ 70 cm de diamètre revêtues d'un chemisage métallique. Les déchets MA-VL seront stockés dans des alvéoles de stockage horizontales de quelques centaines de mètres de long et d'une dizaine de mètres de diamètre. Les zones de stockage sont conçues de façon modulaire pour permettre la construction progressive des alvéoles dans lesquelles seront stockés les déchets.

### LES INFRASTRUCTURES DE LIAISON

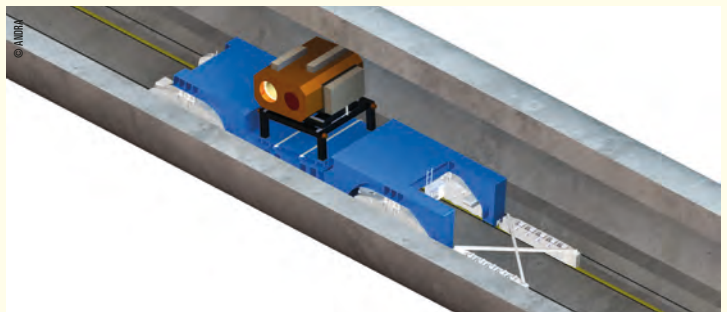
Deux types d'infrastructures relieront les installations de surface de Cigéo à l'installation souterraine. Les puits verticaux seront utilisés pour le transfert du personnel, des engins de chantier, des matériaux et la ventilation des ouvrages souterrains. Le transfert des colis de déchets se fera par une rampe d'accès (« descenderie »), au moyen d'un funiculaire.

### Les puits verticaux

Cinq puits verticaux relieront l'installation souterraine à la zone dédiée aux travaux. Deux puits permettront de transférer le personnel chargé de l'exploitation et d'acheminer de l'air frais dans l'installation



Descenderie vue globale



Transfert d'une hotte HA par funiculaire

souterraine. Les trois autres puits permettront de transférer le personnel chargé des travaux, d'apporter de l'air frais dans la zone travaux et de transférer des matériels et matériaux de construction.

Leur hauteur se situe entre 510 et 550 mètres. La section circulaire a un diamètre utile variant de 6 à 8 mètres selon le puits (en l'état actuel des études).

### Deux descenderies

Une première descenderie longue de 4,2 km, permettra le transfert des colis vers l'installation souterraine. Conçu pour des charges lourdes (130 tonnes), le funiculaire acheminera les colis de déchets à une profondeur de 500 m à la vitesse de 2,5 mètres par seconde – soit une durée de transport de 1 h 30 pour l'aller-retour, avec des arrêts en gare haute et en gare basse pour le chargement et le déchargement, sur une pente inclinée à 12 %.

Une seconde descenderie servira aux fonctions d'exploitation (évacuation/secours, maintenance et acheminement des matériaux/équipements).

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs



Vue générale de la zone de surface dédiée à la réception, au contrôle et à la préparation des colis, schéma de principe avec l'hypothèse d'un terminal ferroviaire implanté sur le site

### LES TRANSPORTS DE COLIS DE DÉCHETS

#### Les mesures prises par les producteurs de déchets

Le transport de déchets radioactifs est de la responsabilité des producteurs. Il est assuré par des sociétés spécialisées et agréées. L'expéditeur réalise la caractérisation complète des colis à transporter. Cela permet au transporteur de définir le type d'emballage à utiliser et de spécifier les conditions du transport. Les déchets sont transportés dans des emballages conçus pour être étanches et le rester même en cas d'accident (collision, incendie, immersion...). Ils sont composés de plusieurs types de matériaux qui permettent de réduire les niveaux d'irradiation pour les rendre inférieurs aux limites fixées par la réglementation. Celle-ci établit que la quantité de rayonnements reçue par une personne qui resterait à 2 mètres du véhicule pendant une heure n'excède pas la limite de 0,1 millisievert, quel que soit le type de déchets transporté. À l'issue des opérations de chargement, l'expéditeur vérifie la conformité de l'emballage à la réglementation.

#### Le transport entre les sites de production des déchets et Cigéo

Actuellement, les « producteurs de déchets », EDF, le CEA et AREVA prévoient de livrer en moyenne 300 emballages par an (avec un maximum de 600 sur la période 2050-2060 et une trentaine de colis par an à partir de 2100). Le transport ferroviaire est privilégié. Dans ce cas, cela représenterait au maximum une centaine de trains d'une dizaine de wagons par an, soit environ deux trains par semaine en période de forte activité, avec une moyenne de deux trains par mois sur la durée d'exploitation. Pour les colis de déchets provenant du site CEA de Valduc (Côte-d'Or), dont les flux sont limités, le CEA prévoit un transport par voie routière. Cigéo est dimensionné sur cette base pour assurer la mise en stockage des colis au fur et à mesure.

Les modalités d'acheminement des colis jusqu'à Cigéo sont étudiées par les producteurs de déchets. Le réseau ferré national permet d'acheminer les convois jusqu'à proximité de Cigéo. Des itinéraires sont étudiés depuis la Normandie (La Hague) et la vallée du Rhône (Cadarache, Marcoule, Bugey)

#### Une desserte ferroviaire pour Cigéo

Sur le plan technique, le raccordement depuis le réseau ferroviaire existant dans la vallée de l'Ornain est plus favorable qu'une desserte ferroviaire depuis la vallée de la Marne. Différentes options de raccordement à la voie ferrée existante ont été examinées entre Gondrecourt-le-Château et Houdelaincourt. Pour les études de conception, il a été retenu un tracé qui reprend en grande partie les emprises de l'ancienne voie ferrée reliant Gondrecourt-le-Château à Joinville.

Le projet de création de la desserte ferroviaire de Cigéo depuis Gondrecourt-le-Château est au stade de l'avant-projet avec un objectif de mise en service des installations dès le démarrage des travaux de creusement des descentes pour l'acheminement des matériaux, fournitures et équipements de construction.

Parallèlement à ce projet de desserte ferroviaire de Cigéo, SNCF Réseau étudie la réhabilitation de la ligne existante entre Nançois - Tronville et Gondrecourt-le-Château, d'une part pour permettre

la réouverture à la circulation de cette ligne et d'autre part pour répondre au besoin spécifique lié au transport des colis.

### L'EXPLOITATION DE CIGÉO

#### L'acceptation des colis de déchets dans Cigéo

Un colis ne pourra être accepté qu'après un processus permettant de s'assurer du respect des critères techniques définis par l'Andra pour la sûreté du stockage et approuvés par l'ASN<sup>1</sup>. Les producteurs de déchets devront ainsi soumettre à l'Andra une demande d'acceptation dans laquelle ils apporteront la démonstration que les colis de déchets respectent ces critères techniques. Après accord de l'Andra, les colis pourront ensuite être expédiés vers Cigéo.

#### Le stockage des colis de déchets

À leur réception sur le site, les emballages de transport seront accueillis dans des bâtiments où ils seront déchargés, puis les colis seront retirés des emballages et contrôlés (non-contamination, débit de dose...).

Les colis de déchets seront ensuite placés dans des conteneurs de stockage si nécessaire. Les colis de stockage ainsi constitués seront placés dans une hotte qui assurera une protection contre les rayonnements. Cette hotte sera chargée sur un funiculaire qui descendra les colis de stockage jusqu'aux alvéoles.

La mise en place des colis de stockage dans les alvéoles sera pilotée en automatique depuis une salle de conduite centralisée. La hotte de transfert commencera par accoster à la porte de l'alvéole de manière à assurer une étanchéité lors de son ouverture. Celle-ci ne pourra être ouverte qu'une fois cette opération effectuée. Dès lors, le dispositif de manutention prendra en charge le colis pour le stocker dans l'alvéole. Après mise en place du colis, la porte de l'alvéole sera refermée. La radioprotection sera ainsi assurée pendant toutes ces opérations.

#### La fermeture de Cigéo

Pour garantir son rôle et assurer le confinement des déchets sur de très longues périodes sans nécessiter d'actions humaines, les ouvrages de Cigéo devront ensuite être refermés. La fermeture du stockage se

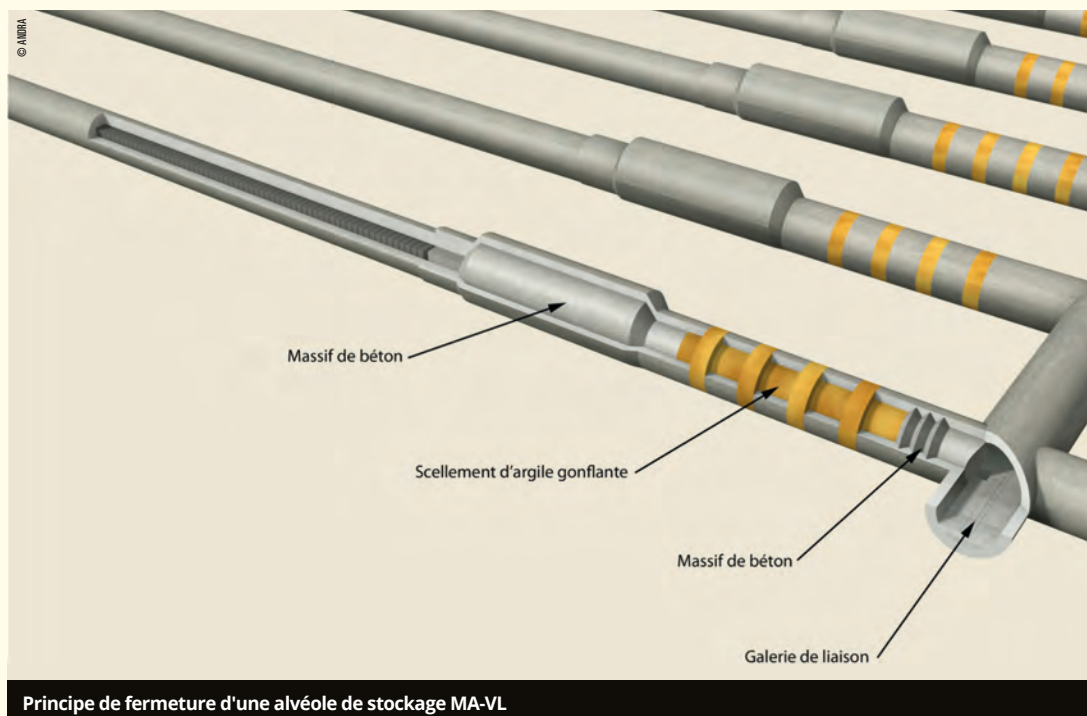
fera progressivement, et sa fermeture définitive devra faire l'objet d'une loi.

L'installation souterraine sera refermée zone par zone : obturation des alvéoles de stockage, construction de scellements (ouvrage en argile gonflante destiné à donner une bonne imperméabilité aux galeries remblayées) et remblaiement des galeries d'accès aux alvéoles puis des galeries principales, et remblaiement et scellement des puits et des descenderies.

Le remblaiement des ouvrages se fera grâce aux déblais argileux excavés au moment du creusement du stockage et conservés en surface. Les scellements seront constitués d'argile gonflante et de béton pour limiter les circulations d'eau à long terme dans les galeries et les liaisons surface-fond.

La profondeur de Cigéo, sa conception et son implantation dans une roche argileuse imperméable et dans un environnement géologique stable permettront de mettre les déchets à l'abri des activités humaines et des événements naturels de surface, et d'isoler les déchets radioactifs de l'homme et de l'environnement de manière définitive.

**ASN**  
Autorité  
de sûreté  
nucléaire

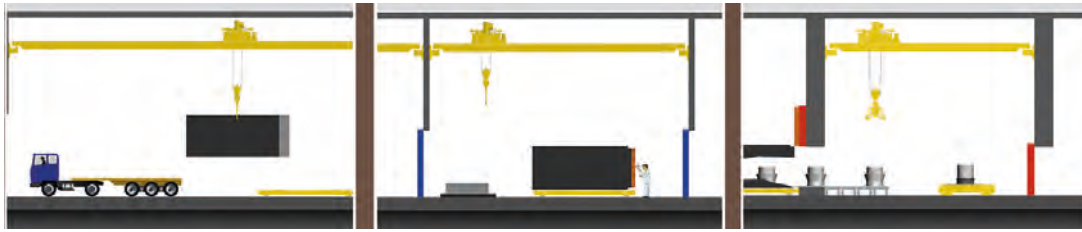


Principe de fermeture d'une alvéole de stockage MA-VL

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

### ITINÉRAIRE DES DÉCHETS HA ET MA-VL, DE LEUR ARRIVÉE JUSQU'À LEUR STOCKAGE



Exemple  
ci-contre :  
ligne MAVL

#### Étape 1 : Réception des colis

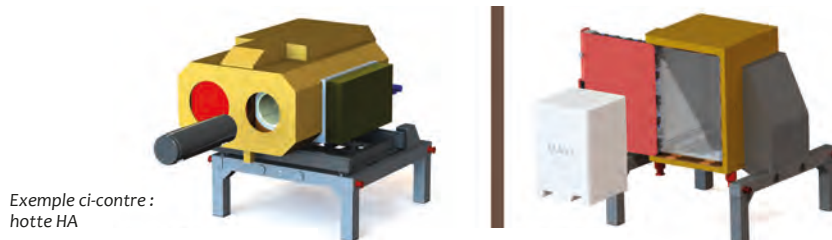
À leur réception, les colis de déchets seront accueillis dans des bâtiments où ils seront contrôlés une première fois et déchargés des emballages dans lesquels ils auront été transportés (majoritairement par voie ferroviaire et dans une moindre mesure par la route).



Exemple  
ci-contre :  
Ligne HA

#### Étape 2 : Contrôle et préparation des colis

Ils feront l'objet d'un second contrôle avant d'être placés, si besoin, dans des conteneurs de stockage



Exemple ci-contre :  
hotte HA

Exemple ci-contre :  
hotte MA-VL

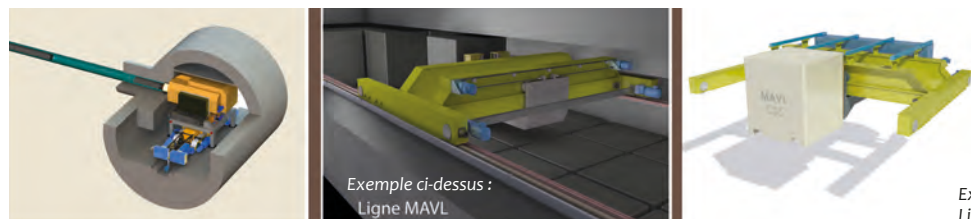
#### Étape 3 : Mise en place dans des hottes de transfert

pour permettre leur transfert au fond, les colis de stockage seront placés dans une hotte qui assurera une protection contre les rayonnements



#### Étape 4 : Transfert des colis vers l'installation souterraine

La hotte sera placée sur un funiculaire qui acheminera les colis de stockage jusqu'à l'installation souterraine par une rampe d'accès (descenderie)



Exemple ci-contre :  
Ligne HA

Exemple ci-dessus :  
Ligne MAVL

Exemple ci-contre :  
Ligne MAVL

#### Étape 5 : Stockage des colis de déchets

Les déchets seront stockés dans les alvéoles de stockage au moyen de dispositifs robotisés

# Les matériaux du centre industriel de stockage géologique Cigéo

Par **Stéphane Schumacher**, **Didier Crusset**, *Andra* et **Nadège Caron**, CEA

**C**igéo est le projet français de centre de stockage géologique profond dans la couche du Callovo-Oxfordien<sup>1</sup>. Il est destiné à stocker les déchets radioactifs de haute activité (HA), constitués principalement des déchets vitrifiés, ainsi que les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), comprenant des colis de boues bitumées, des déchets technologiques, des déchets activés... Si le projet Cigéo est autorisé, il sera exploité pendant environ une centaine d'années et de nombreux matériaux seront utilisés pour réaliser les différents composants de ce stockage, qu'il s'agisse des ouvrages ou des matrices de conditionnement des déchets. Les déchets vitrifiés HA seront conditionnés dans des surconteneurs métalliques puis disposés dans des tubes en acier (chemisage) dans des microtunnels de petit diamètre. Les déchets MA-VL seront conditionnés dans des colis en béton armé qui seront disposés dans des alvéoles de grandes dimensions comprenant un radier et des revêtements également en béton. La R&D associée à ces matériaux vise à répondre à trois objectifs : assurer la sûreté du stockage, optimiser sa conception et celle des colis de déchets, et disposer d'études prospectives pour de futures optimisations.

## ASSURER LA SÛRETÉ DU STOCKAGE

De par ses caractéristiques géométriques et physico-chimiques intrinsèques (profondeur au-delà

de 300 m, épaisseur supérieure à 130 m, faible perméabilité, capacité de rétention élevée, faibles coefficients de diffusion), la formation du Callovo-Oxfordien est le composant central pour assurer la sûreté passive après fermeture et à très long terme. Si les composants ouvragés jouent un rôle direct plus limité en regard de celui du Callovo-Oxfordien, ils contribuent néanmoins à la robustesse du système de stockage en limitant le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et leur migration hors des alvéoles. Il s'agit plus particulièrement des scellements des liaisons surface-fond de par leur position en sortie du stockage, ainsi que du surconteneur et de la matrice vitreuse.

## Le comportement à long terme des colis de déchets vitrifiés HA

La matrice vitreuse est la seule matrice spécifiquement développée pour qu'y soit incorporée une grande quantité de radionucléides et pour confiner ces radionucléides pendant de très longues durées. Il s'agit d'un confinement à l'échelle atomique et non d'un simple enrobage du déchet.

Lors de l'arrivée de l'eau après la rupture du surconteneur, l'altération des déchets vitrifiés s'effectue suivant trois étapes :

- › l'hydrolyse du réseau vitreux suivant une vitesse initiale appelée  $V_0$  ;
- › la formation d'un gel protecteur conduisant à une chute de vitesse ;



## en substance...

L'exploitation du centre de stockage Cigéo s'étendra sur une centaine d'années. Durant cette période et bien au-delà de celle-ci – sur plusieurs siècles –, la sûreté de l'installation devra être maintenue et la radioactivité confinée pour protéger l'homme et l'environnement. Des ouvrages aux matrices de conditionnement des déchets, les matériaux forment la clé de voûte du projet. Les travaux de R&D menés depuis plusieurs années par les équipes françaises ont permis de connaître les processus de corrosion des aciers et d'identifier les matériaux disposant des propriétés les plus robustes et les plus durables pour pallier ces difficultés. Si la conception de Cigéo repose aujourd'hui sur l'utilisation de matériaux éprouvés faisant l'objet d'un important retour d'expérience, la R&D doit se poursuivre, y compris pendant la phase d'exploitation de l'installation, pour optimiser la conception du stockage et des colis de déchets.

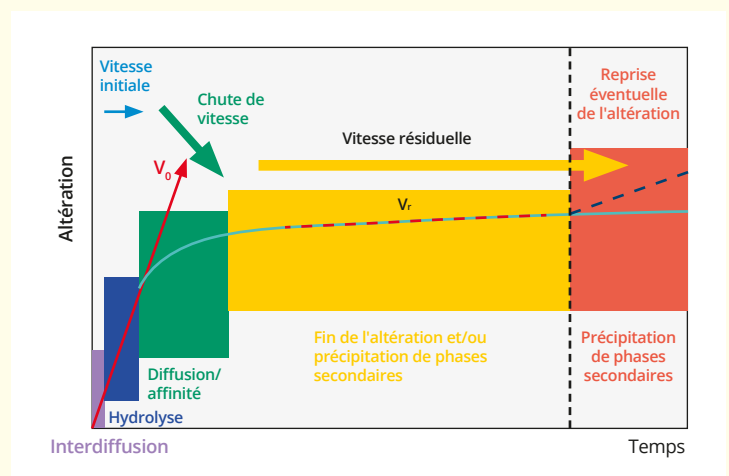


Figure 1 : représentation schématique des processus prépondérants et des cinétiques d'altération du verre.

<sup>1</sup>. L'argilite du Callovo-Oxfordien : cette couche de roche s'est déposée il y a environ 160 millions d'années. Épaisse d'environ 130 mètres, cette couche géologique est située entre 400 et 600 mètres de profondeur. Une profondeur suffisante pour ne pas être affectée par des phénomènes géologiques de surface : érosion, glaciation... tout en étant assez proche de la surface pour que la construction d'ouvrages souterrains soit possible.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

- la diffusion des radionucléides au sein du gel, la formation et la précipitation de phases secondaires en surface du verre conduisant à l'atteinte d'une vitesse d'altération résiduelle très faible (inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la vitesse initiale).

Le modèle de relâchement des radionucléides par les déchets vitrifiés prend en compte uniquement le régime de vitesse initiale et le régime de vitesse résiduelle. Le temps de passage en régime de vitesse résiduelle dépend des interactions du verre avec son environnement. Ces interactions sont de natures différentes : le magnésium présent dans l'eau provenant du milieu géologique peut conduire à la formation de silicates de magnésium qui entretiennent une altération plus importante du verre ; et les interactions entre le silicium provenant du verre et les produits de corrosion du surconteneur (sorption, co-précipitation) ont pour conséquence de retarder le passage en vitesse résiduelle. L'évaluation du comportement des déchets vitrifiés en stockage nécessite donc de bien comprendre la chimie en champs proche et de disposer de modèles couplant la chimie et le transport des espèces. Les simulations actuelles conduisent à une altération totale du colis de déchets vitrifiés après environ 300 000 ans.

### La corrosion des composants métalliques des alvéoles HA : surconteneur et chemisage

Le surconteneur des colis de déchets vitrifiés (figure 2) est un composant important de la sûreté du stockage. Il assure des fonctions à court terme (sûreté de la manipulation des colis primaires) et doit permettre un confinement total de la matrice de déchet vitrifié, pendant une phase d'activité thermique et de décroissance des radioéléments à vie courte et moyenne. Cette durée de confinement est de plusieurs siècles. Le chemisage métallique doit permettre la mise en place et le retrait éventuel des surconteneurs dans le cadre de la réversibilité (pour la récupérabilité des colis) (voir page 36).

Dans l'alvéole de stockage de déchets vitrifiés HA, les surconteneurs et le chemisage seront exposés à un environnement qui évoluera dans le temps, d'une atmosphère chaude et humide contenant de l'oxygène, jusqu'à un milieu anoxique saturé en eau à la température géothermale du Callovo-Oxfordien. Entre ces deux états, l'alvéole sera le siège de différents transitoires hydriques, thermiques et physico-chimiques.

Les processus de corrosion des aciers ont donc été étudiés pour différentes conditions d'environnement hydrauliques (eau liquide, eau vapeur), chimiques (milieu oxydant, anoxique, pressions partielles de CO<sub>2</sub>) et géochimiques (eaux argileuses, mélanges d'eau et d'argilite déstructurée, argilite compacte). La température, les rayonnements, les contraintes mécaniques et les micro-organismes ont été analysés comme paramètres d'influence dans ces différents environnements. Les connaissances acquises s'appuient sur de nombreux travaux de natures diverses : des expérimentations en laboratoires de surface dédiées à l'acquisition de mécanismes de corrosion, des expérimentations en laboratoire souterrain, l'apport d'analogues archéologiques ferreux et des modélisations.

L'ensemble de ces travaux permet de dégager de façon synthétique les résultats présentés ci-après ainsi que les évolutions de conception associées :

- de nombreux environnements (atmosphère humide, en conditions anoxiques au contact de matériaux argileux ou en eau argileuse) conduisent à des vitesses de corrosion généralisée faibles (inférieures à 10 µm/an) ;
- la présence d'oxygène pourrait conduire à un endommagement important en favorisant des vitesses de corrosion généralisée élevées (jusqu'à mm/an) et un risque de corrosion localisée. L'oxygène peut également oxyder les argilites en champ proche, favorisant des conditions chimiques transitoirement

acides et conduisant à des vitesses de corrosion élevées (250 µm/an). Ceci a contribué à retenir la mise en place d'un matériau de remplissage entre le chemisage et la roche (ciment-bentonitique). Celui-ci devra neutraliser l'acidité résiduelle pour l'ensemble de l'alvéole, limiter l'apport d'oxygène depuis la galerie ventilée en phase d'exploitation et favoriser l'obtention de vitesses de corrosion généralisée faibles dès la mise en place du chemisage.

- Le milieu argileux que constituent les argilites, peut conduire au développement d'une fissuration assistée par l'environnement (corrosion sous contrainte transgranulaire connue également dans le domaine pétrolier en milieu carbonaté). L'importance de la microstructure dans la résistance à l'amorçage et la propagation de fissures a été mise en évidence sur des aciers non optimisés. Des nuances d'aciers apportant les meilleures garanties de résistance à la fissuration assistée par l'environnement (corrosion sous contrainte, fragilisation par l'hydrogène) ont donc été sélectionnées. Le soudage du couvercle du surconteneur est également suivi d'un traitement de détensionnement pour éliminer les contraintes résiduelles internes à l'acier et limiter

le risque de corrosion sous contrainte sur cette zone ;

- la radiolyse de l'air humide ou de l'eau est susceptible de produire des espèces oxydantes comme H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ou des espèces chimiques acides comme HNO<sub>3</sub>. Ces espèces sont susceptibles de favoriser l'augmentation des cinétiques de corrosion généralisée ainsi qu'un risque de corrosion localisée. Néanmoins, les résultats acquis en atmosphère humide montrent peu d'influence de la radiolyse, pour des débits de doses inférieurs à 20 Gy/h en milieu anoxique. Au stade actuel, l'épaisseur du surconteneur a été dimensionnée de façon à ne pas dépasser un débit de dose supérieur à 10 Gy/h à sa surface externe.

### Les matériaux argileux gonflants des ouvrages de fermeture

La conception des ouvrages de fermeture repose sur un noyau à base d'argile gonflante (i. e. bentonite) dont la formulation doit répondre à plusieurs critères :

- posséder un potentiel de gonflement suffisant pour combler les vides technologiques,
- développer une pression de gonflement suffisante pour contribuer à assurer un contact hydraulique efficace et permanent aux interfaces avec les parois (revêtement



Figure 2 : schéma du surconteneur de déchets vitrifiés.

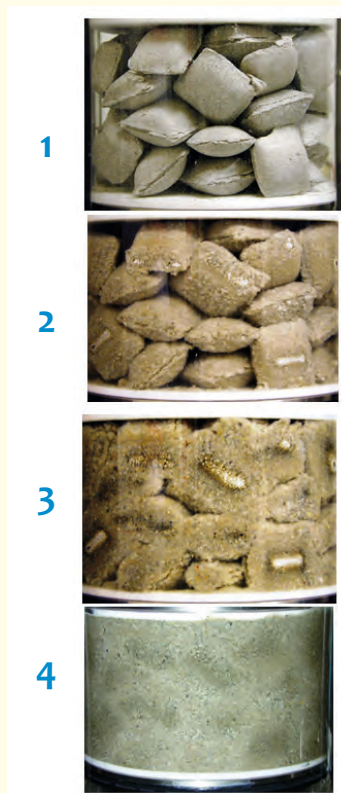


Figure 3 : évolution du noyau argileux à base de pellets lors de la saturation.

ou massif) afin d'y limiter les transferts,  
 > posséder une faible perméabilité à saturation.

Ce noyau est disposé entre des massifs d'appui en béton bas pH. Le noyau assure la fonction de limitation des écoulements d'eau du fait de la faible perméabilité à l'eau des bentonites. Les massifs d'appui ont quant à eux pour

fonction de maintenir le noyau à volume constant durant sa saturation malgré la pression de gonflement développée par les bentonites en présence d'eau. Le choix des bétons bas pH vise à limiter la perturbation alcaline sur le noyau et à préserver ses propriétés physico-chimiques qui fondent sa performance hydraulique.

La démonstration de la faisabilité industrielle des ouvrages de fermeture et la démonstration de leur performance en situation de stockage ont été réalisées à différentes échelles : en laboratoire à l'échelle des matériaux (bentonites) et à partir de démonstrateurs technologiques à l'échelle des ouvrages. Il existe aujourd'hui un important corpus de connaissances sur les ouvrages de fermeture :

- > d'un point de vue technologique : mise en forme et mise en œuvre ;
- > sur le comportement des argiles gonflantes : propriétés hydrauliques et hydromécaniques, comportement face à des perturbations (gaz, perturbation alcaline issue des composants cimentaires à proximité).

#### OPTIMISER LA CONCEPTION DU STOCKAGE ET DES COLIS DE DÉCHETS

La conception de Cigéo repose sur l'utilisation de matériaux éprouvés faisant l'objet d'un important retour d'expérience afin d'asseoir

la robustesse de la démonstration de sûreté. C'est notamment le cas des matériaux cimentaires CEM I et CEM V (utilisés pour les matrices et les conteneurs des déchets MA-VL ainsi que pour les revêtements/soutènements des alvéoles MA-VL), des aciers non alliés (utilisés pour les surconteneurs et les chemisages des microtunnels HA) et des argiles gonflantes (utilisées pour les ouvrages de fermetures). L'utilisation de matériaux plus récents vise à optimiser la conception du stockage mais nécessite de mener une R&D spécifique. C'est notamment le cas pour les nouvelles matrices cimentaires permettant de conditionner des déchets métalliques fortement réactifs, et des bétons bas pH utilisés dans les ouvrages de fermeture.

#### Les nouveaux liants aux potentialités prometteuses pour la cimentation des déchets réactifs

Le conditionnement de certains déchets nucléaires par cimentation peut poser des difficultés du fait de leur réactivité avec les matrices usuelles à base de ciments silico-calciques. Pour limiter les interactions, la stratégie consiste à convertir le(s) constituant(s) pénalisant(s) en une forme thermodynamiquement stable en milieu cimentaire. Une solution alternative pour éviter ce pré-traitement des déchets, qui augmente à la fois le coût et la complexité du procédé, pourrait être l'utilisation d'un liant de chimie différente de celle des ciments silico-calciques, présentant

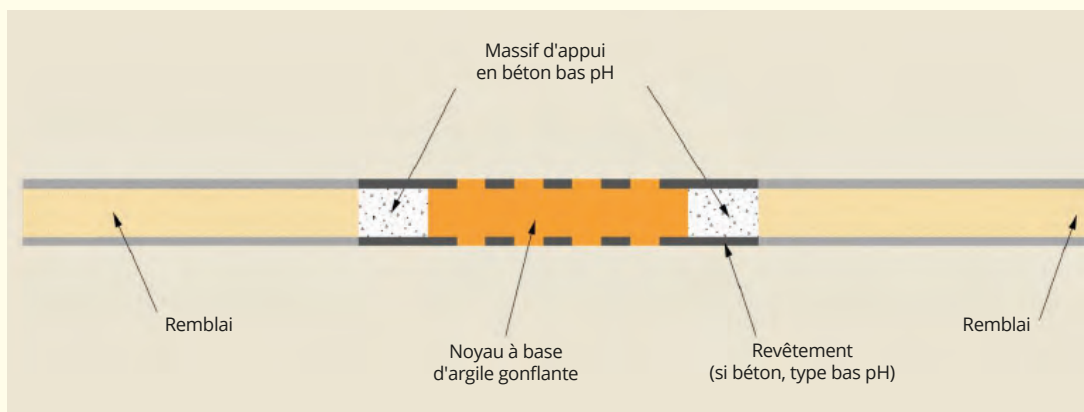


Figure 4 : schéma de principe pour les galeries de liaison.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

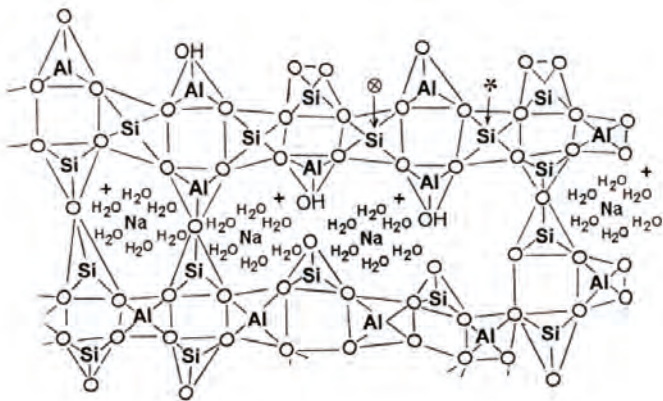


Figure 5 : structure d'un géopolymère proposé par Barbosa et al. (Int. J. Inorg. Mater., 2000).

une compatibilité chimique améliorée avec le déchet. Ainsi au cours des dernières années, d'autres liants minéraux ont émergé, présentant intrinsèquement une plus faible empreinte carbone ou basés sur des matières premières initiales peu utilisées par les cimenteries. Ces liants, pour certains d'entre eux déjà commercialement disponibles à des échelles industrielles, élargissent considérablement les potentialités offertes en termes de cimentation des déchets. Leur utilisation pourrait permettre d'améliorer les propriétés de l'enrobé tout en augmentant le taux d'incorporation du déchet ou d'élargir les spectres de déchets cimentables. Il s'agit de liants minéraux tels que les ciments sulfo-alumineux, les ciments phospho-magnésiens ou encore des liants alcali-activés comme les géopolymères. Ces derniers sont par exemple étudiés pour le conditionnement des déchets magnésiens.

Ce sont des matériaux constitués d'un réseau minéral amorphe aluminosilicaté, dont il est possible de contrôler les propriétés physico-chimiques en modulant le rapport aluminium/silicium initial, la nature et la concentration de l'activateur. Les formulations étudiées permettent de réduire significativement le relâchement de dihydrogène dû à la corrosion du magnésium dans la matrice cimentaire. La consolidation de ces nouvelles solutions techniques repose en particulier sur :

- l'acquisition et la compréhension du comportement intrinsèque de ces liants minéraux,
- la détermination de leur comportement en présence de déchets et des autres matériaux du stockage,
- la validation à l'échelle technologique de la mise en œuvre des matériaux et de leur conformité.

### Les spécificités des bétons des ouvrages de fermeture

Dans le domaine du stockage des déchets radioactifs, les exigences sur l'ensemble des matériaux qui seront mis en place sont très spécifiques à la fois du point de vue des propriétés requises et de la durabilité des matériaux et des ouvrages. Les ouvrages de fermeture dans le stockage (scelllements et bouchons

pour les alvéoles, les galeries ou les liaisons surface-fond) sont des éléments essentiels en matière de sûreté long terme. Il s'agit d'éléments mixtes, impliquant à la fois des matériaux argileux et cimentaires. Les études réalisées sur les interactions chimiques entre les matériaux cimentaires et argileux montrent une dégradation potentielle des argiles (minéralogie, propriétés physiques...) sous l'effet d'un panache alcalin. Pour prévenir de la dégradation des argiles au contact des matériaux cimentaires « classiques », un nouveau type de matériau spécifique a été développé : les bétons « bas pH à faible chaleur d'hydratation ».

Ces bétons sont apparus il y a une vingtaine d'années. La première formulation publiée avait déjà pour contexte la fermeture des ouvrages de stockage (essai TSX – *Tunnel Sealing eXperiment* – mené au Canada dans le laboratoire souterrain de l'*Atomic Energy Canada Limited*). Sur cette base, des travaux ont été repris pour cerner les domaines de composition (matières premières et mélanges) et de mise en œuvre permettant de valider ce type de formulations.

Tout au long de ces quinze dernières années, des études de caractérisations et d'optimisations ont été menées à différentes échelles, jusqu'à la réalisation d'un ouvrage à l'échelle 1, l'essai « *Full Scale Sealing* » (FSS) mené par l'Andra dans le cadre du projet européen DOPAS (*figure 6*).

À ce jour, l'Andra dispose de plusieurs formulations répondant à des problématiques d'approvisionnement (mélange ternaire clinker/fumée de silice/laitiers de hauts fourneaux ou cendres volantes) et de mise en œuvre (béton pompé, béton auto-plaçant, béton projeté). Les études menées sur les interactions de ces matériaux cimentaires avec les matériaux argileux mettent en évidence une très faible réactivité de part et d'autre de cette interface. Au cours de la même période, les modèles d'évolutions de ces matériaux ont aussi fait l'objet de travaux spécifiques pour rendre compte de leur comportement physique et chimique particulier. Il est ainsi actuellement possible de représenter l'évolution de ces bétons depuis leur mise en place jusqu'à très long terme, dans les conditions imposées par le milieu géologique.

### DISPOSER D'ÉTUDES PROSPECTIVES DANS UNE LOGIQUE D'OPTIMISATION FUTURE

Dans la version actuelle du plan directeur pour l'exploitation de Cigéo, la fermeture définitive est envisagée vers 2150. D'ici là, l'exploitation de Cigéo va suivre un développement incrémental et un déploiement progressif offrant notamment la possibilité aux générations futures d'intégrer les pistes d'optimisations qui seront rendues possibles par les progrès scientifiques et techniques et par le retour

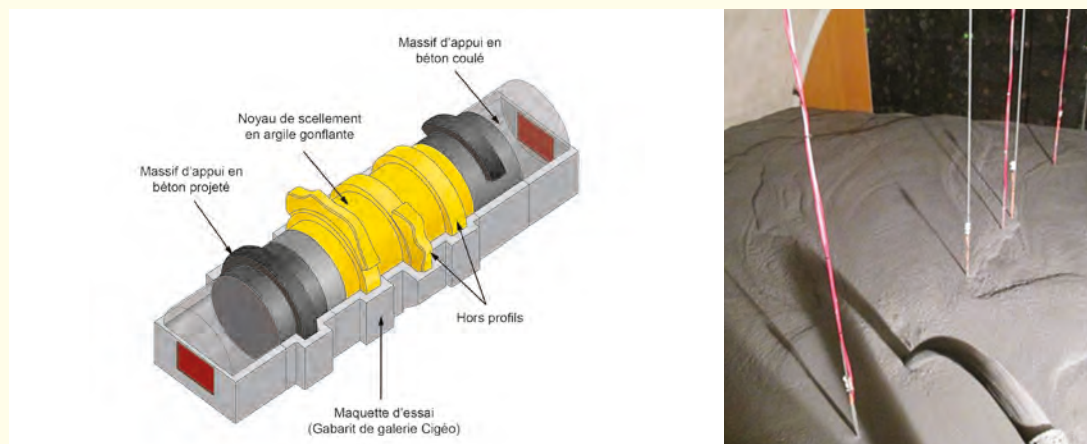


Figure 6 : Essai de scellement à l'échelle 1 (Full Scale Sealing - FSS) : schéma de l'expérimentation (à gauche) et mise en place du béton bas-pH auto-plaçant (à droite)

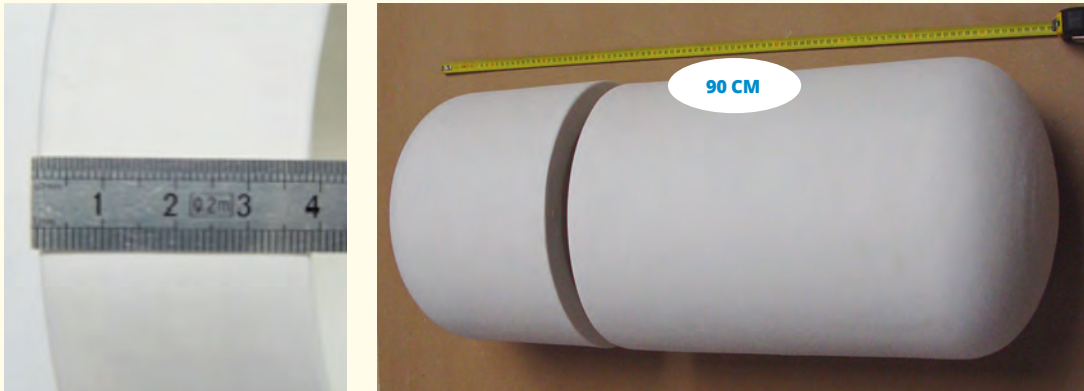


Figure 7 : conteneur céramique à l'échelle 1/2 et une épaisseur réelle de 4 cm.

d'expérience, dans le respect des objectifs de sûreté en exploitation et après fermeture. Dans le domaine des matériaux, les pistes prospectives d'optimisation visent notamment à remplacer les matériaux métalliques des microtunnels HA qui seront construits à partir de 2075 par des matériaux non métalliques, par exemple des céramiques.

### Les matériaux innovants pour le stockage

La corrosion anoxique des composants métalliques (surconteneur, chemisage) de l'alvéole HA conduit à la production d'hydrogène. Afin de limiter la production d'hydrogène et donc d'accroître la robustesse de la démonstration de sûreté, des études sont réalisées sur le développement de matériaux alternatifs aux matériaux métalliques. Ces matériaux doivent répondre aux mêmes exigences que celles requises pour le surconteneur actuellement défini et devront de plus être relativement inertes vis-à-vis de l'altération de la matrice de verre et de l'argilite du site.

Les travaux portent sur le développement et la caractérisation de céramiques alumino-silicatées ayant une résistance à la lixiviation et des propriétés mécaniques supérieures aux céramiques silicatées classiques. Les recherches menées ont abouti :

- › au développement d'une céramique de composition riche en alumine étanche et durable ;
- › au dimensionnement d'un conteneur HA adapté au

matériau céramique (épaisseur de 4 cm) ;

- › à la mise au point de procédés de coulage, séchage et frittage adaptés à des pièces céramiques d'épaisseur quatre fois plus importante que celle obtenue par les procédés traditionnels.

Ces développements ont permis de montrer la faisabilité du corps et du couvercle d'un conteneur de stockage échelle 1/2 et d'épaisseur 4 cm (figure 7) en porcelaine aluminosilicatée, ce qui constitue une réelle avancée par rapport à l'état de l'art industriel actuel. Le verrou technologique sur ces nouveaux conditionnements reste la fermeture d'un tel système. Le passage au développement d'un procédé de mise en forme d'un conteneur échelle 1 ne sera envisagé que si ce verrou est levé.

Les études actuelles se concentrent donc sur la fermeture d'un tel système, avec des contraintes en termes d'étanchéité, de tenue mécanique, de température d'élaboration, de caractérisation des défauts... Afin de préserver les propriétés de confinement de la matrice vitreuse des déchets (température maximum 450 °C), le procédé de scellement hermétique développé doit répondre à deux contraintes majeures :

- › une température maximale en surface du conteneur céramique de 600-700 °C,
- › une technologie de chauffage localisé à la zone de fermeture.

Le choix d'un verre chauffé par micro-ondes s'est progressivement imposé pour plusieurs raisons :

- › le chauffage micro-ondes peut être localisé autour de la soudure et éviter ainsi l'échauffement du colis primaire,
- › le verre peut apporter l'étanchéité du conteneur céramique avec une température de mise en œuvre compatible avec le cahier des charges.

Les premiers résultats ont permis de valider la technologie à l'échelle du laboratoire avec la réalisation d'assemblages céramique – verre à 700 °C. Les perspectives consistent à adapter la technologie micro-ondes à des pièces de plus grandes dimensions et à caractériser la durabilité des assemblages réalisés.

*Cet article a été rédigé à partir des résumés et des présentations préparés par les participants à la journée technique SFEN du 3 février 2016 dédiée aux « Matériaux pour le stockage géologique des déchets ».*

# Les (futurs) jalons du projet Cigéo

Par **Frédéric Launeau**, Directeur du projet Cigéo, Andra



## en substance...

Projet d'envergure à la dimension sociétale importante et aux défis techniques multiples, Cigéo s'inscrit dans le temps long. D'ores et déjà, de nombreuses étapes ont permis de faire avancer le projet. Actuellement dans sa phase de conception, il pourrait, s'il est autorisé, entamer la phase industrielle pilote dès 2025, puis passer en phase d'exploitation courante, sur une période de cent ans, dès 2034.

**D**e la phase pilote, au début des travaux en passant par l'exploitation de l'installation et sa fermeture, le projet Cigéo comporte de multiples phases, lesquelles s'étendent sur différentes échelles de temps. Certaines phases du projet ont d'ores et déjà été validées, nous nous intéressons ici aux jalons futurs, notamment ceux qui seraient engagés si le projet était autorisé.

## LA CONCEPTION INITIALE DE CIGÉO

### La phase actuelle

La phase de conception initiale est celles dans laquelle le projet se situe aujourd'hui. Elle s'articule autour de plusieurs étapes: les études d'esquisse, l'avant-projet sommaire, l'avant-projet définitif, les études projet et les études d'exécution. Elle permet de définir techniquement les ouvrages, bâtiments et procédés de Cigéo.

Ce travail de conception fait l'objet d'évaluations régulières de la part de l'ASN, de la Commission nationale d'évaluation, ainsi que des industriels impliqués dans sa réalisation.

### La demande d'autorisation de création (DAC)

La phase de conception initiale de Cigéo inclut le dépôt de la DAC qui marque le processus formel d'autorisation de l'installation. Pour obtenir l'autorisation de création de cette installation, l'Andra devra démontrer que les dispositions techniques ou d'organisation prises ou envisagées aux stades de sa conception, de sa construction et de son exploitation ainsi que les principes généraux proposés pour l'entretien et la surveillance après sa fermeture sont de nature à prévenir ou à limiter de manière suffisante, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, les risques ou inconvénients qu'elle présente pour la sécurité, la santé et la salubrité publiques ou la protection de la nature et de l'environnement. Par ailleurs, l'Andra devra démontrer que l'installation satisfait aux impératifs de réversibilité (voir page 36) qui seront fixés par une loi.

### SI LE PROJET EST AUTORISÉ

Sur la base des débats organisés par la CNDP<sup>1</sup> en 2013 et suite au travail du comité citoyen de 2014, quatre évolutions<sup>1</sup> ont été intégrées au projet Cigéo par l'Andra parmi lesquelles l'intégration d'une phase industrielle pilote et la mise en place d'un plan directeur pour l'exploitation du stockage régulièrement révisé.

### La phase industrielle pilote

L'intégration d'une phase industrielle pilote au démarrage de

l'installation doit permettre de réaliser des tests grandeur nature. Cette phase s'étend de 2025 à 2034. Les essais permettront d'étudier et de valider en conditions réelles l'ensemble des mesures et des dispositions techniques prises dans l'exploitation, la maintenance, la sûreté et la surveillance de l'installation. La phase pilote doit aussi permettre de tester la récupérabilité des colis de déchets, le scellement des alvéoles et d'étudier des pistes d'optimisation.

Dans l'installation souterraine, des ouvrages souterrains localisés dans une zone inactive, séparée des quartiers **MA-VL**<sup>1</sup> et **HA**<sup>1</sup> où seraient stockés les colis de déchets radioactifs permettraient de réaliser des démonstrateurs. Les démonstrateurs envisagés à ce stade sont :

- ▶ 1 alvéole HA,
- ▶ 1 alvéole MA-VL,
- ▶ 1 alvéole MA-VL de grande dimension,
- ▶ 1 scellement de descenderie,
- ▶ 1 scellement de galerie,
- ▶ 1 coupure hydraulique de galerie,
- ▶ 1 alvéole HA fermée.

Ces tests s'échelonnent en trois temps. D'abord, entre 2025 et 2028, des essais « inactifs », avec des colis factices sans radioactivité, seront réalisés.

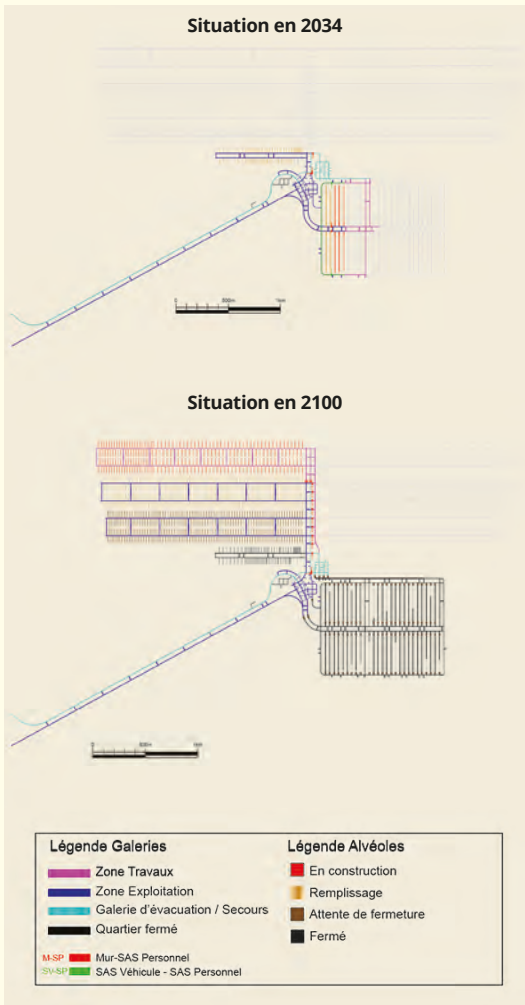
À partir de 2029, si l'autorisation de mise en service est accordée, des essais « actifs » débiteront avec un petit nombre de colis HA et MA-VL. Préalablement à la première mise en œuvre de substances radioactives,

**CNDP**  
Commission nationale  
du débat public

**HA**  
déchets radioactifs de  
haute activité

**MA-VL**  
déchets radioactifs  
de moyenne activité  
à vie longue

<sup>1</sup> Les quatre évolutions issues du débat public et du comité citoyen : l'intégration d'une phase industrielle pilote et la mise en place d'un plan directeur pour l'exploitation du stockage régulièrement révisé, l'aménagement du calendrier, et l'implication de la société civile dans le projet.



l'Andra devra obtenir l'autorisation de mise en service de l'installation auprès de l'ASN. Pour obtenir cette autorisation, l'Andra devra déposer un dossier comprenant notamment le rapport de sûreté de l'installation et une mise à jour de l'étude d'impact. Enfin, en 2034, si les essais sont concluants, la fin de la phase industrielle pilote permettrait une montée en puissance de l'exploitation et le passage en phase d'exploitation courante : portant le flux de mise en stockage de quelques centaines à quelques milliers de colis par an.

### Le plan directeur pour l'exploitation du stockage (PDE)

Tout au long de l'exploitation, l'Andra révisera régulièrement le PDE. Ce plan directeur vise à

décrire le processus de mise en place de Cigéo et sa flexibilité vis-à-vis d'évolutions futures, à identifier les jalons décisionnels et à expliciter comment l'expérience acquise à chaque étape peut nourrir les décisions concernant la suivante.

Le PDE définit : les différentes étapes d'exploitation du stockage, le rythme et l'ordre de stockage des différents colis de déchets, les flexibilités prises en compte pour le stockage éventuel de déchets autres que ceux prévus par le décret d'autorisation (combustibles usés au cas où ils deviendraient des déchets) et un planning prévisionnel de fermeture progressive des alvéoles de stockage et des galeries souterraines<sup>2</sup>. Le PDE préfigure un outil tenu à jour durant l'exploitation de Cigéo, en support à sa gouvernance.

### La phase de construction initiale

La durée séculaire de construction et d'exploitation conduit à un déploiement graduel de la construction des ouvrages souterrains. Cette logique de construction par tranches offre une plus grande flexibilité. À mesure de l'avancée des connaissances, des retours d'expérience, et des évolutions technologiques, elle permet de s'adapter.

La phase de construction initiale de Cigéo, pendant laquelle une première partie de l'installation est réalisée, porte principalement sur la construction des bâtiments de surface liés à l'exploitation de l'installation nucléaire de surface, les liaisons surface-fond, ainsi que les ouvrages souterrains permettant de stocker de premiers colis de déchets.

### La phase d'exploitation

La phase d'exploitation se déroule pendant une centaine d'années, au cours de laquelle ont lieu simultanément des opérations de réception et de mise en stockage de colis et des travaux d'extension de l'installation souterraine, par tranches successives. L'exploitation démarre après

l'autorisation de mise en service délivrée par l'ASN. L'exploitation comporte également, sous réserve d'autorisation, des travaux de fermeture partielle (obturation d'alvéoles et de zones de stockage). De plus, des travaux de construction, d'adaptation et de jouvence des bâtiments en surface sont engagés. Pendant l'exploitation de Cigéo, les études sont poursuivies pour améliorer sa conception, notamment pour l'optimisation des tranches successives.

Comme pour toute INB<sup>3</sup>, l'ASN continuera de contrôler l'installation durant toute la phase d'exploitation. L'Autorité de sûreté pourra aussi compléter le cas échéant les prescriptions qui s'appliquent à l'installation et veillera, par des inspections régulières, à ce que l'installation soit en conformité avec les exigences applicables et notamment son décret d'autorisation de création.

Enfin, tous les dix ans, l'Andra devra procéder au réexamen périodique de son installation en prenant en compte les meilleures pratiques internationales. Ce réexamen, instruit par l'ASN, devra permettre d'apprécier la situation de l'installation au regard des règles qui lui sont applicables et d'actualiser l'appréciation des risques ou inconvénients que l'installation présente, en tenant compte notamment de l'état de l'installation, de l'expérience acquise au cours de l'exploitation, de l'évolution des connaissances et des règles applicables aux installations similaires.

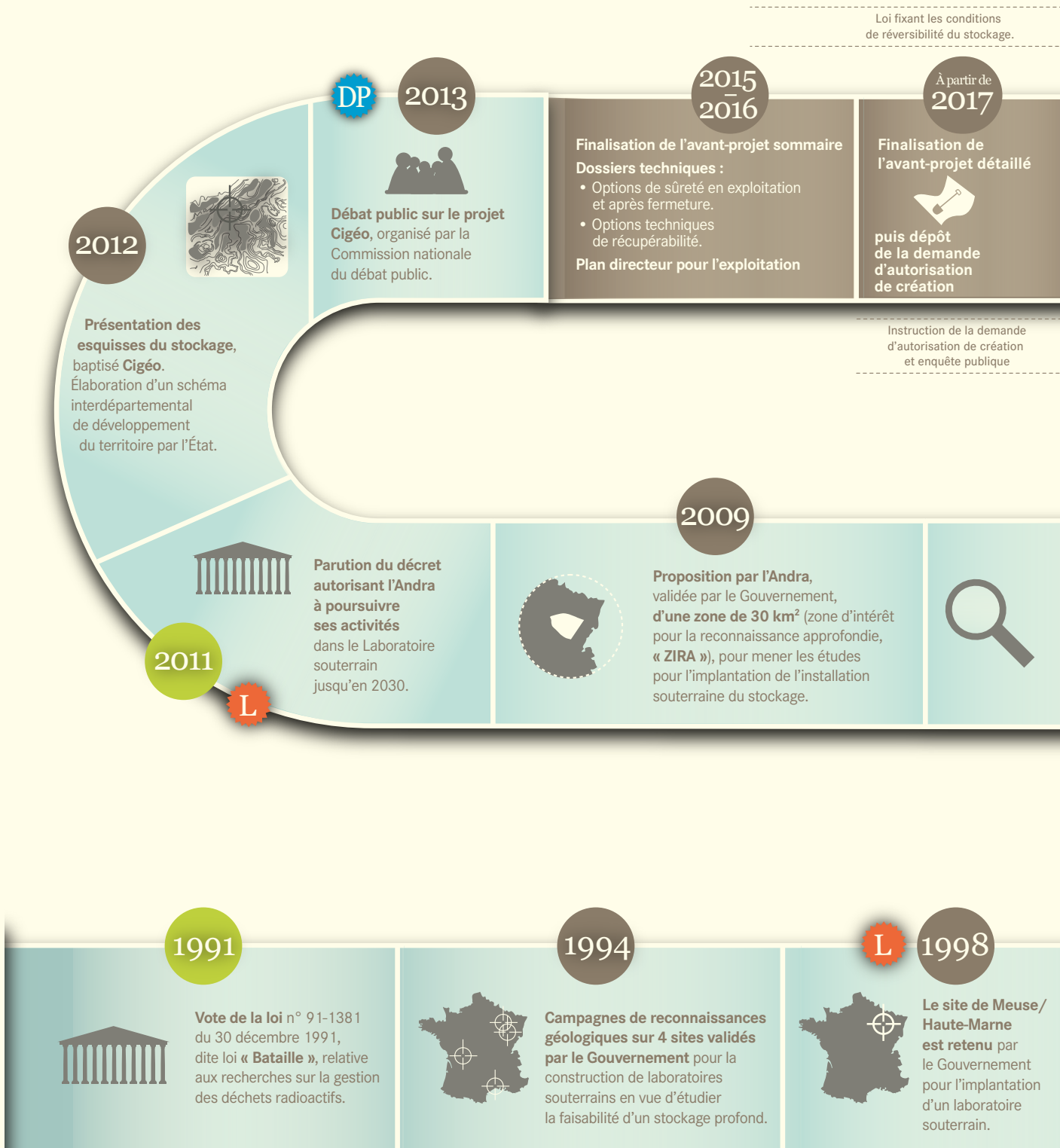
Par ailleurs, en cas d'une éventuelle demande de modification substantielle de l'installation, une nouvelle procédure d'autorisation complète devrait être réalisée<sup>3</sup>.

**INB**  
Installation  
nucléaire de base

**2.** Seule une loi peut décider de la fermeture définitive de Cigéo. **3.** Article L.593-14 du code de l'environnement

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs





LOI ou  
DÉCRET



LABORATOIRE  
SOUTERRAIN



DÉBAT  
PUBLIC

Si Cigéo est autorisé...

2021



Décret  
d'autorisation  
de création

Début des travaux  
de construction  
des installations  
de Cigéo  
(hors travaux  
préparatoires).



2025



Démarrage de  
l'installation par  
une phase  
industrielle pilote  
et des essais en  
inactif.

2030

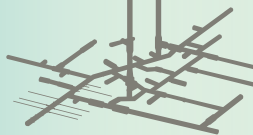
Poursuite de la phase  
industrielle pilote avec  
des colis de déchets  
radioactifs à stocker  
dans Cigéo, après auto-  
risation de mise en  
service par l'ASN

2007

Mise en place de l'Observatoire  
pérenne de l'environnement  
qui vise à décrire l'environnement  
du stockage avant sa construction  
et à suivre son évolution pendant  
toute la durée d'exploitation  
du Centre, si celui-ci est autorisé.

L

2006



Les études  
se poursuivent  
au sein du Laboratoire  
souterrain pour  
affiner la conception  
du stockage.

2006



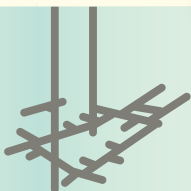
Débat au Parlement puis vote  
de la loi de programme n°2006-739  
du 28 juin 2006 qui retient le stockage  
réversible profond comme solution de  
référence pour la gestion à long terme pour  
les déchets HA et MA-VL.

Débat public  
sur la gestion des déchets  
radioactifs organisé  
par la Commission nationale  
du débat public.

DP

L

2000



Début de la  
construction du  
Laboratoire souterrain  
de Meuse/Haute-Marne

2005



Remise du Dossier 2005 au Gouvernement  
dans lequel l'Andra conclut à la faisabilité et à la  
sûreté du stockage profond dans un périmètre  
de 250 km<sup>2</sup> autour du Laboratoire souterrain.  
Évaluation et validation du dossier  
par la CNE<sup>1</sup>, l'ASN<sup>2</sup>, l'OPECST<sup>3</sup>  
et un groupe international  
d'experts.

<sup>1</sup> Commission nationale d'évaluation

<sup>2</sup> Autorité de sûreté nucléaire

<sup>3</sup> Office parlementaire d'évaluation des  
choix scientifiques et technologiques

# Cigéo : les enjeux de sûreté en exploitation et à long terme

Entretien avec **François Besnus**, directeur des déchets et de la géosphère, IRSN  
Propos recueillis par **Boris Le Ngoc**, RGN



## en substance...

L'avancée des connaissances laisse penser qu'un concept satisfaisant aux objectifs de sûreté est atteignable et que les études seront suffisamment avancées pour donner un avis scientifiquement fondé sur les dimensionnements proposés à l'horizon de la demande d'autorisation de création de Cigéo (« DAC »). Des attentes subsistent sur quelques grands points de démonstration pouvant induire des inflexions fortes de conception : maîtrise des endommagements, performances des scellements, maîtrise d'un incendie, gestion d'un accident entraînant la dispersion d'éléments radioactifs, critères de récupérabilité... La phase pilote sera indispensable pour confirmer certains dimensionnements du concept de référence et juger du bien-fondé des optimisations.



**L**es déchets radioactifs contiennent des substances dangereuses qui peuvent irradier une personne à proximité ou contaminer l'homme et l'environnement si elles sont dispersées. L'objectif fondamental de Cigéo est de protéger l'homme et l'environnement des déchets les plus radioactifs sur de très longues échelles de temps. Pour cela, les experts développent depuis plusieurs années les outils visant à garantir un haut niveau de sûreté. S'il existe un consensus international sur la capacité de certaines formations géologiques à assurer le confinement de la radioactivité et de limiter les transferts de

radionucléides<sup>1</sup> contenus dans les déchets vers la biosphère – au moins pendant une période pluri-millénaire permettant une décroissance significative de leur activité – des travaux complémentaires doivent être menés pour savoir comment maintenir la sûreté de l'installation lors de son exploitation. Depuis plusieurs décennies, l'IRSN<sup>▼</sup> mène un travail d'expertise sur la sûreté du projet Cigéo, en exploitation et lorsque le centre de stockage sera fermé. Tout en soulignant l'avancée des connaissances sur les aspects sûreté du projet, François Besnus, Directeur des déchets et de la Géosphère à l'Institut, nous éclaire sur les défis techniques qui restent à relever.

**RGN – L'IRSN plaide pour la mise en place d'une phase pilote avant la construction de Cigéo. Qu'apporte cette étape dans l'amélioration de la sûreté ?**

**François Besnus :** La phase pilote doit permettre de tester des expériences en grandeur nature et de valider un certain nombre de jalons. Plusieurs questions se posent. La première porte sur les techniques de creusement : peut-on creuser l'ensemble des galeries avec un tunnelier comme prévu aujourd'hui ? Quelles conséquences ce choix a-t-il sur l'aménagement du chantier, les tunneliers étant d'imposantes machines ? *Quid* des vibrations, du risque de coincer le tunnelier ? Répondre à ces

1. Un radionucléide, ou radioisotope, est un isotope radioactif d'un élément.

interrogations doit permettre d'identifier les techniques qui permettent de préserver au mieux les propriétés de la roche. Le creusement ayant nécessairement des impacts sur l'argile, il s'agit de faire au mieux pour en limiter les effets.

La phase pilote doit aussi permettre de qualifier les tailles d'ouvrages et leur soutènement. Autrement dit, il s'agit de réaliser les ouvrages à l'échelle 1 pour tester l'ensemble et regarder si l'endommagement est bien maîtrisé. Si les tests ne sont pas concluants, il faudra peut-être revenir à des ouvrages plus petits, par exemple de la taille de ceux qui ont été étudiés en laboratoire.

Une fois que ces ouvrages sont qualifiés, il faut tester les méthodes d'exploitation et les dispositifs utilisés pour acheminer les déchets nucléaires jusqu'au centre de stockage. Cela suppose de tester les automatismes, la sûreté de l'accostage, et la robustesse des méthodes de manutention. La qualification des procédés de manutention se fait en deux temps. D'abord à froid, sans déchet radioactif, pour tester les procédés. Puis à chaud, avec quelques déchets, pour tester les équipements de surveillance et avoir un retour d'expérience sur la gestion de vrais colis (maîtrise des gaz de radiolyse, surveillance de la température...). Cette phase doit être clairement définie. Si les résultats sont concluants, ils marqueraient un jalon fort vers le passage à l'exploitation courante de Cigéo. Autre point important à qualifier lors de la phase pilote : le scellement des ouvrages de stockage et des accès à l'installation. Il faut garantir l'étanchéité du dispositif ce qui nécessite des essais, là aussi en vraie grandeur, sur une durée longue.

La phase pilote doit permettre d'apporter des réponses à toutes ces questions. C'est un enjeu important qui nécessitera une période d'observation dont la durée est difficile à apprécier précisément aujourd'hui. Je pense qu'au moins une dizaine d'années sera vraisemblablement nécessaire.

### Quelles sont les différences entre la phase pilote et le laboratoire de Bure ?

**FB :** Grâce au laboratoire de Bure<sup>2</sup>, l'Andra dispose aujourd'hui de plus d'une dizaine d'années de retour d'expérience dans la formation géologique pressentie pour implanter le futur centre de stockage Cigéo. À travers des études géologiques, des observations *in situ*, l'installation a permis de constituer un *corpus* solide de connaissances permettant de caractériser les propriétés de confinement à long terme de la roche. De ce point de vue, il me semble que les éléments rassemblés sont suffisants pour pouvoir prendre une décision techniquement fondée en vue de la création de Cigéo.

Le laboratoire a également permis des avancées significatives dans la connaissance des lois de comportement du stockage qui sont essentielles pour bâtir l'avant-projet qui fera l'objet de la demande d'autorisation de création. Pour autant, le laboratoire ne permettra pas de « qualifier » l'ensemble des concepts et des procédés, c'est-à-dire de vérifier la conformité des caractéristiques et des performances des dispositifs à l'attendu...

Par exemple, les modèles relatifs au comportement mécanique de la roche donneront une estimation de l'endommagement des ouvrages de stockage, beaucoup plus grands que ceux testés en laboratoire, mais il faudra confirmer cette estimation et ceci ne peut se faire que par l'observation en vraie grandeur de l'ouvrage. C'est dans cet objectif de qualification qu'une phase pilote doit impérativement être prévue avant que le stockage soit autorisé à être exploité.

### Peut-on utiliser le laboratoire existant pour réaliser la phase pilote ?

**FB :** Pour mener la phase pilote et réaliser des tests en vraie grandeur, il faudrait réaménager le laboratoire qui a été conçu pour être un instrument de recherche et non un prototype du futur stockage. Ceci ne paraît pas réaliste.

### À quel moment l'IRSN a-t-il commencé à travailler sur la sûreté du centre de stockage géologique des déchets radioactifs ?

**FB :** Le concept de stockage géologique des déchets de haute activité et les notions qui lui sont associées – profondeur, imperméabilité de la roche, stabilité de l'environnement géologique – ont été développés au début des années 1980, notamment avec la publication du rapport de la commission présidée par le Professeur Goguel.

À cette époque, la France étudiait quatre types de formation géologique, disponibles en abondance sur son territoire : l'argile, le sel, le granite et les schistes. Des campagnes de prospection ont été menées jusqu'à la fin des années 1980 pour confirmer les propriétés des roches sans qu'il n'y ait à l'époque de projet précis de créer un centre de stockage ni de processus d'accompagnement politique.

En 1989, l'IPSN<sup>3</sup> fait l'acquisition d'un ancien tunnel ferroviaire situé dans l'Aveyron, dans le village de Tournemire. L'acquisition de cette installation était une véritable opportunité pour l'Institut pour être en mesure d'étudier une roche à l'époque méconnue du point de vue de ses capacités de confinement : l'argile. Trois ans plus tard, en 1991, la loi Bataille prévoit qu'il y ait 15 ans de recherches pour étudier la faisabilité d'un stockage géologique. L'Andra est alors choisie pour mener les recherches sur cette question. Depuis, nous sommes entrés dans un processus continu d'acquisition de connaissances et des installations ont été mises en place pour évaluer la sûreté d'un tel projet.

### Comment s'organise la recherche sur la sûreté de Cigéo à l'IRSN ?

**FB :** L'IRSN mène une recherche finalisée, c'est-à-dire centrée sur les grands enjeux de sûreté. Notre mission est d'évaluer la sûreté et d'acquies les connaissances nécessaires en support à notre évaluation.

<sup>2</sup>. Le laboratoire de Bure, ou laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, est un réseau de galeries souterraines localisé sous le territoire des communes de Bure et Saudron en France. Creusé à partir de 2000, il permet à son exploitant, l'Andra, d'observer et de mesurer *in situ* des propriétés des argiles du Callovo-Oxfordien âgées de 160 millions d'années et la mise au point de techniques d'ingénierie (creusement – soutènement). <sup>3</sup>. En 2002, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) et l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) fusionnent pour créer l'IRSN.

Nous disposons de plusieurs outils pour mener notre mission. Le premier est le laboratoire de Tournemire. Situé dans une formation géologique semblable à celle de Bure, il nous permet de recueillir des informations clés sur le comportement de la roche et de mener des expériences pour évaluer le comportement des matériaux sur le long terme et d'étudier les endommagements mécaniques. L'IRSN a par ailleurs développé des modèles pour chaque grand domaine : géologique, physique, géomécanique, chimique, etc. L'institut développe également son propre code « Mélodie », pour simuler le transfert de radioéléments à très long terme dans l'environnement. L'IRSN s'inscrit pleinement dans la recherche française et internationale et, dans ce cadre, noue des partenariats. L'institut mène une politique volontariste pour s'inscrire dans les projets de l'ANR<sup>4</sup> ou européens. Il travaille notamment avec le CEA, le CNRS, le monde universitaire, et, dans des cadres très précis, avec des industriels. Ces collaborations viennent nourrir les connaissances de l'IRSN sur la sûreté de Cigéo.

### Comment cette recherche s'articule-t-elle avec les travaux de l'Andra ?

**FB :** L'un des axes importants de notre recherche est de ne pas dupliquer les recherches de l'Andra. Nous essayons plutôt d'explorer d'autres aspects pour enrichir notre connaissance. Comme je le dis souvent : pour faire de la bonne recherche, il ne faut pas regarder sous le même lampadaire ! Nous testons la solidité des lois d'ensemble de comportement du stockage géologique étudiées par l'Andra. Notre apport est plus riche que si nous faisons la même chose au même endroit.

Par exemple, nous étudions le comportement mécanique de la roche. Pour cela, nous menons nos propres expériences à Tournemire. Même si l'installation est située dans un environnement différent de celui que l'on trouve en Meuse/ Haute-Marne, la roche argileuse de Tournemire présente une forte analogie avec celle de Bure. Or, les études ont permis d'observer des différences

de comportement mécanique en comparaison de résultats obtenus à Bure. S'agit-il de phénomènes non pris en compte dans les lois de comportement ou sont-elles le fait de l'environnement ? On voit bien que ces questionnements conduisent à enrichir la robustesse des arguments scientifiques développés.

### L'intégration de la notion de réversibilité a-t-elle un impact sur la sûreté de Cigéo ?

**FB :** La réversibilité est un processus décisionnel qui doit permettre de revenir en arrière en se donnant des grands rendez-vous. Concrètement, cette notion est fondée sur la capacité de récupérer les colis. Dès lors, la question qui se pose est comment ces colis et les ouvrages vont-ils évoluer dans le temps ? À partir des évolutions attendues, il faut étudier la possibilité de récupérer les colis dans de bonnes conditions de sûreté.

Au cours de l'exploitation, certaines alvéoles auront été partiellement obstruées. Dans ce cas, sera-t-il possible de retirer les colis stockés dans des conditions sûres ? Des tests sur la robustesse et le vieillissement des colis, ainsi que des tests sur la surveillance et les outils de maintenance doivent être menés. C'est pour cela que la phase pilote est essentielle.

Cependant, il ne sera certainement pas possible de revenir en arrière *ad vitam aeternam*. Lorsque Cigéo sera refermé, considérer comme étant un niveau de réversibilité le creusement d'une mine pour aller chercher les déchets n'est pas satisfaisant. Une fois que l'ouvrage est fermé, il est condamné. D'autant que sur le plan de la sûreté, aller chercher des colis depuis la surface me semble fort dangereux : les techniques de creusement ne sont pas aussi précises.

Il y a donc un stade au-delà duquel la récupérabilité n'est plus possible. Les recherches doivent se poursuivre pour déterminer ce

moment car cette question nécessite encore d'apporter des éléments de démonstration. À mon sens, il faut préserver la possibilité d'agir tant qu'il n'y a pas une période d'observation suffisante qui permettra à tous les acteurs, y compris la société civile, de dire « *on a suffisamment confiance dans ce qui a été fait pour passer à un stade de fermeture* ». Autrement dit, il ne s'agit pas seulement d'un enjeu technique, la question relève tout autant de la gouvernance.

### Pour la récupérabilité, étudiez-vous la sûreté en cas d'accident lors de la phase d'exploitation ?

**FB :** Effectivement, la récupérabilité c'est aussi préserver la possibilité d'aller chercher un colis en cas de pépin : une élévation de température non prévue, une chute de colis dans un ouvrage... Que faut-il prévoir dans ce genre de situation ? Le colis ne peut pas être abandonné dans une alvéole qui resterait partiellement remplie sauf à fragiliser l'ouvrage dans son ensemble. Les récents accidents nous enseignent qu'il faut, dès la conception, prévoir les modalités de l'intervention. Sans cela, on se retrouve le plus souvent dans l'impossibilité de faire des choix d'action après.

À la différence d'une installation nucléaire classique, où il est possible d'arrêter l'installation, Cigéo est un ouvrage unique, le seul exutoire pour tous les déchets de haute activité de l'industrie nucléaire française. Est-ce qu'on peut se permettre de contaminer toute l'installation et de l'arrêter complètement et de condamner toute l'installation ? Au WIPP<sup>4</sup>, il y a eu un incident de contamination qui va contraindre de reprendre l'exploitation dans un environnement contaminé. Ceci me semble typiquement une situation qu'il faut éviter en anticipant ce qu'il peut arriver et les moyens d'y remédier.

<sup>4</sup> Le WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) est le centre de stockage de déchets radioactifs américain situé au Nouveau-Mexique. Il est conçu pour accueillir, dans des cavités creusées dans du sel à environ 660 mètres de profondeur, 176 000 m<sup>3</sup> de déchets dits transuraniens (contenant notamment de l'américium et du plutonium), issus d'activités nucléaires de défense (recherches militaires et production d'armes nucléaires). Le WIPP est en exploitation depuis mars 1999.

### Étudiez-vous les mesures de sûreté prises dans d'autres secteurs ?

**FB :** Nous étudions les secteurs qui sont spécifiques au secteur géologique comme le secteur minier, dont l'expérience dans la construction d'ouvrages et la sécurisation des descentes peut nous inspirer. En milieu souterrain, les équipements peuvent se corroder

rapidement, il est donc important de pouvoir intervenir pour les remplacer. Cette donnée pose la question de la maintenance à long terme des équipements.

Pour les techniques de creusement, le soutènement des ouvrages, les questions de travaux souterrains et la prévention des risques incendie<sup>5</sup>, d'autres secteurs peuvent nous aider à développer nos

connaissances. Pour les travaux souterrains, nous évaluons par exemple le retour d'expérience de la SNCF. Et, en matière de risque incendie, nous travaillons avec des spécialistes sur l'évacuation de la fumée ou encore la sécurisation des accès. En cela, le retour d'expérience d'accidents, comme celui du tunnel du Mont-Blanc en 1999, est riche d'enseignements.



© LUDOVIC BALPH

## Le rôle de l'ASN pour Cigéo

En tant qu'exploitant, l'Andra est responsable de la sûreté de Cigéo. Les objectifs de sûreté sont des exigences prioritaires pour le projet.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et ses appuis techniques, l'IRSN et le groupe permanent d'experts pour les déchets évaluent régulièrement les travaux de l'Andra en matière de sûreté. En phase de construction, puis d'exploitation, Cigéo sera soumis au contrôle de l'ASN comme toutes les installations nucléaires de base (INB). L'ASN effectue déjà régulièrement des inspections (plusieurs par an, dont certaines inopinées) sur les installations de l'Andra, dont le laboratoire de Bure, et peut imposer des prescriptions supplémentaires si elle considère qu'un risque n'est pas maîtrisé correctement, voire mettre à l'arrêt l'installation.

**5.** Une première mesure de prévention consiste à limiter la quantité de produits combustibles ou inflammables dans les équipements de manutention du stockage. Contrairement au cas des tunnels routiers où les véhicules constituent des sources de combustibles importantes, il ne devrait pas y avoir de véhicule à moteur thermique en zone nucléaire de Cigéo. Des dispositifs de détection d'incendie et des systèmes automatiques de lutte contre l'incendie doivent être répartis dans les installations pour détecter, localiser et éteindre rapidement tout départ de feu. Malgré toutes ces dispositions, une situation d'incendie doit quand même être considérée par prudence. Des systèmes de compartimentage et de ventilation sont alors prévus pour limiter la propagation du feu et ses conséquences. L'architecture souterraine doit aussi permettre aux secours d'intervenir dans des galeries à l'abri des fumées et faciliter l'évacuation du personnel. Dans les alvéoles de stockage, la filtration doit permettre de limiter la dispersion dans l'environnement de substances qui pourraient avoir été relâchées lors d'un incendie.

# La réversibilité : un des piliers du projet Cigéo

Par **Pascal Leverd**, responsable des dossiers de demande d'autorisation de création de Cigéo



## en substance...

Comment gérer les déchets hautement radioactifs et ceux dont la durée de vie excède les milliers d'années ? Plus que d'autres sujets, la gestion des déchets nucléaires pose la question fondamentale du legs aux générations futures, à une échelle incommensurable. Progressivement, les experts, les institutions et une majorité de l'opinion publique ont retenu le stockage géologique en profondeur comme la solution de référence. L'affirmation de ce soutien va de pair avec la demande de réversibilité, perçue comme un moyen de laisser toutes les options ouvertes à nos descendants. Sur les plans de la technique, de la gouvernance et de la sûreté, la réversibilité pose des défis qu'il faudra relever. Il s'agit là d'une nécessité, la réversibilité s'étant progressivement imposée comme l'un des piliers du projet Cigéo.

### LA GENÈSE DU CONCEPT DE « RÉVERSIBILITÉ »

Jusque dans les années 1980, la question du stockage définitif des déchets nucléaires hautement radioactifs intéressait peu l'opinion publique. Les polémiques autour des pratiques d'immersion de déchets en mer dans les années 1960<sup>1</sup> n'avaient jamais atteint une véritable visibilité nationale. C'est à partir de 1987, avec la vaste campagne géologique de l'Andra dans quatre départements français (Ain, Aisne, Maine et Loire, Deux-Sèvres) pour y réaliser des prospections dans l'optique d'identifier un site d'enfouissement, que la question du

stockage des déchets s'est installée dans la sphère publique. À l'époque, les prospections suscitent de vives controverses dans les territoires concernés et contraignent l'Agence à abandonner les recherches sur ces sites. Cette controverse interpelle le politique qui décide de s'emparer du sujet. Le 9 février 1990, Michel Rocard décide d'un moratoire<sup>2</sup> d'un an qui suspend les prospections. Le Premier ministre saisit ensuite le Parlement qui fait appel à l'OPECST<sup>3</sup> et confie au député Christian Bataille la mission de revoir l'intégralité du dispositif. Un an plus tard, l'élu du Nord mène un projet de loi qui portera son nom<sup>3</sup>. C'est à l'occasion des débats parlementaires sur ledit projet de loi que la question de l'irréversibilité de ce mode de stockage est pour la première fois soulevée. Dans un souci de consensus, la loi intègre le thème de la « réversibilité ». En 1998, ce concept s'impose : le Gouvernement annonce par un communiqué que la politique de gestion des déchets nucléaires s'inscrit désormais clairement dans une logique de réversibilité, rappelant au passage que « la condition de l'acceptabilité des décisions tient à leur réversibilité » et qu'il est « capital que les générations futures ne soient pas liées par les décisions déjà prises et puissent changer de stratégie au vu des évolutions techniques et sociologiques intervenues »<sup>4</sup>.

Quelques années plus tard, en 2006, le Parlement vote une loi dans laquelle il retient le stockage profond comme solution de gestion à long terme pour les déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL) en exigeant que ce stockage s'effectue « dans le respect du principe de réversibilité »<sup>5</sup>.

Cette redéfinition de la politique de gestion des déchets nucléaires signifie-t-elle l'abandon du stockage géologique, le projet étant initialement conçu pour permettre un isolement définitif des déchets interdisant par définition toute possibilité ultérieure de reprise ? Loin de mettre fin au projet, la notion de réversibilité a crédibilisé encore davantage le stockage en profondeur, considéré par les acteurs institutionnels – Parlement, OPECST et CNE<sup>5</sup> – comme la solution technique de référence. Cette réorientation conduit les ingénieurs et les scientifiques de l'Andra à une évolution du projet permettant de garantir la réversibilité.

Souvent perçue comme une contrainte, la réversibilité pénalise-t-elle vraiment le projet ? À y regarder de plus près, cette notion revêt d'une certaine foi en la science, comme en témoigne ce qu'écrivait la CNE dans son premier rapport (1998) : « En tenant compte de la jeunesse de la science nucléaire, du caractère incertain des

**OPECST**  
Office parlementaire  
d'évaluation des  
choix scientifiques et  
technologiques

**CNE**  
Commission nationale  
d'évaluation

**1.** L'immersion des déchets radioactifs était une pratique mise en œuvre par de nombreux pays pendant plus de quatre décennies, à partir de 1946. En 1967 et 1969, la France a procédé à des immersions dans le Pacifique pour évacuer certains déchets induits par les activités liées aux essais nucléaires en Polynésie. **2.** Un moratoire est un terme de droit qui désigne une décision d'accorder un délai ou une suspension volontaire d'une action. **3.** La loi Bataille de 1991 est la première loi à avoir fixé les grandes orientations relatives aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue. **4.** Relevé de conclusions de la réunion interministérielle du 9 décembre 1998 sur les questions nucléaires (aval du cycle et transparence nucléaire). **5.** La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 aborde trois grands sujets : définition d'une politique de gestion des matières et déchets radioactifs, renforcement de la transparence, dispositions de financement et d'accompagnement économique.



Démonstrateur à l'échelle 1 d'un robot de récupération des colis en alvéole HA

*évolutions futures, la seule attitude responsable est l'application du principe de réversibilité, à la fois dans les choix techniques et dans les décisions ».*

### DU CONCEPT À LA RÉALITÉ

#### Définition de la réversibilité

Qu'appelle-t-on réversibilité? Le Larousse la définit comme « la capacité de revenir en arrière ». Dans son dialogue permanent avec la société civile et en s'appuyant sur des travaux menés avec des experts et homologues internationaux, l'Andra a progressivement affiné cette définition pour qu'elle corresponde au mieux aux exigences du projet Cigéo.

D'abord envisagée sous le prisme technico-économique de la récupérabilité, la réversibilité a progressivement été abordée sous l'angle décisionnel: des exigences opérationnelles ont donc été ajoutées pour permettre aux générations futures de « marquer une pause dans la mise en œuvre de Cigéo ou de revenir en arrière ».

Plus récemment, la réversibilité a recouvert une dimension politico-morale englobant la récupérabilité,

la possibilité de continuer, de s'arrêter ou de tout reprendre à zéro et même de mettre à disposition des générations futures une palette de choix élargie.

À l'issue du débat public organisé en 2013, l'Andra a retenu une définition de la réversibilité: « la réversibilité est la capacité à offrir à la génération suivante des choix sur la gestion à long terme des déchets radioactifs, incluant notamment le scellement d'ouvrages de stockage ou la récupération de colis de déchets; cette capacité est notamment assurée par un développement progressif et flexible du stockage ».

#### Le développement incrémental de Cigéo

Si le stockage géologique est conçu pour être fermé à terme – confinant ainsi la radioactivité des colis et ne nécessitant plus d'actions humaines – sa réversibilité implique qu'il doit être flexible aux évolutions futures (changement de cap dans la politique énergétique, découverte scientifique, avancées technologiques...) pendant son exploitation. Sur le plan technique, la réversibilité repose sur trois grandes

fonctionnalités: la capacité de retrait des colis, la capacité d'action sur le processus de stockage et la capacité d'évolution de la conception. Les deux dernières fonctionnalités sont notamment liées à l'architecture souterraine, à sa modularité et à son mode de développement incrémental. L'occupation progressive de l'espace est pensée de manière à préserver la capacité d'action, qu'il s'agisse du développement de nouvelles zones de stockage, du prolongement des faisceaux de liaison, de modifications de dimensions des alvéoles ou modules, ou d'évolutions des techniques de creusement des ouvrages. Cette flexibilité devrait permettre aux générations futures d'avoir le choix de continuer d'exploiter l'installation comme prévu initialement, de la faire évoluer ou de revenir en arrière. Possible aussi pour elles d'accélérer ou d'en ralentir la construction. Possible encore d'anticiper ou reporter la fermeture définitive de Cigéo. Les plans initiaux pourront aussi être modifiés pour s'adapter à de nouveaux types de colis de déchets, à des moyens de creusement plus performants, ou encore intégrer les nouvelles connaissances acquises.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

Dans la même logique, une phase industrielle pilote au début de l'exploitation permet de commencer prudemment et progressivement les activités de stockage et de vérifier en conditions réelles les conditions complètes de maîtrise de l'installation.

Tout au long de l'exploitation (prévue sur quatre générations, soit environ 120 ans), des moyens techniques rendront le centre flexible. Sur le plan de la récupérabilité, des mesures faciliteront le retrait éventuel de colis de déchets: robots pour retirer les colis, capteurs pour suivre leur évolution, revêtements spécifiques pour empêcher la déformation des alvéoles... Le suivi du stockage permettra d'évaluer son comportement et de prolonger ou non la durée de récupérabilité.

### Les expériences de réversibilité

La réversibilité est-elle impossible à réaliser? Des exemples existent-ils ailleurs dans le monde? Dans la chimie sur les sites d'Herfa Neurode (Allemagne)<sup>6</sup> et de Stocamine (Alsace)<sup>7</sup> comme dans le nucléaire au WIPP<sup>8</sup> (États-Unis), l'expérience a montré qu'une récupérabilité des déchets était toujours possible.

Outre-Atlantique, une opération de retrait avait été réalisée au WIPP entre 2007 et 2008 pour des colis qui n'avaient pas été caractérisés. L'opération a été réalisée avec succès. *A contrario*, l'expérience allemande dans la mine d'Asse montre que l'absence de prise en compte de la réversibilité dans la conception initiale de l'installation complexifie le retrait des colis si cette opération est décidée.

### Les défis

La réversibilité donne la possibilité de faire évoluer le mode de gestion et de s'adapter aux évolutions des connaissances et de l'attente de la société. Tout ceci concourt à une meilleure acceptabilité du projet. Toutefois, l'intégration de cette notion pose des défis, lesquels ne sont pas uniquement techniques.

Dispositif hybride, respectant la réversibilité sur le court terme mais privilégiant l'irréversibilité sur le long terme, il tient sa force dans sa capacité à articuler ces deux principes originellement opposés.

De plus, cette possibilité de revenir en arrière et de récupérer les déchets, est non seulement limitée dans le temps mais elle est aussi, dégressive: plus le temps va passer, moins cette récupération sera possible pour finir par être quasiment impossible et très coûteuse (*voir ci-contre*).

### Le coût de la mesure

Les choix de conception justifiés par la réversibilité ont un impact sur le coût total du projet Cigéo. Toutefois, cette mesure imposée par la loi est difficile à estimer spécifiquement, tant les dispositions participant à la réversibilité sont intégrées dans la conception. Des réflexions sont en cours sur la méthodologie applicable.

Les générations actuelles provisionnent l'ensemble des coûts nécessaires pour permettre la mise en sécurité définitive des déchets radioactifs qu'elles produisent, ainsi que des déchets anciens produits depuis les années 1960. Ces provisions couvrent les propositions techniques retenues pour assurer la réversibilité de Cigéo pendant le siècle d'exploitation. Si les générations suivantes décidaient de faire évoluer leur politique de gestion des déchets radioactifs, par exemple si elles souhaitaient récupérer des colis, elles en assureraient le financement. La prise en compte de la réversibilité dès la conception du stockage permet de limiter cette charge potentielle.

## ET APRÈS ?

### La fermeture de Cigéo

Pour mettre en sécurité de manière définitive les déchets radioactifs, Cigéo devra être refermé après son exploitation. Les générations futures décideront des opérations de fermeture. L'Andra conçoit Cigéo pour

qu'il puisse être refermé de manière progressive. Plusieurs options sont ouvertes, comme fermer rapidement les alvéoles lorsque les colis de déchets sont stockés ou, au contraire, temporiser cette étape. Le planning de fermeture pourra être réexaminé à chaque étape du projet. À chacune de ces étapes, il sera possible d'ajouter des dispositifs de sûreté passive. Néanmoins, à mesure que le temps s'écoulera et que des systèmes de sûretés seront ajoutés, le retrait éventuel des colis stockés deviendra plus complexe. L'Andra propose donc que le franchissement de chaque nouvelle étape de fermeture, notamment le scellement des alvéoles de stockage, fasse l'objet d'une autorisation spécifique. Concernant la fermeture définitive du stockage, le Parlement a décidé que seule une loi pourrait l'autoriser.

### Un principe de gouvernance

La société civile, partie prenante du projet depuis son origine, continuera d'être impliquée. Pour ce faire, l'Andra propose une gouvernance participative: avant chaque étape clé, l'ensemble des acteurs concernés (riverains, collectivités, évaluateurs, État...) se réunirait pour faire le bilan de l'exploitation du stockage, discuter des perspectives à venir, faire un point sur l'avancement des recherches en France et à l'étranger sur la gestion des déchets radioactifs et réexaminer les conditions de réversibilité. Les décisions prises lors de ces rendez-vous s'appuieraient sur les résultats des réexamens périodiques de sûreté de l'ASN<sup>\*</sup>, le retour d'expérience de l'exploitation du stockage et de sa surveillance, ainsi que par les progrès scientifiques et technologiques. L'Andra propose que le premier de ces rendez-vous se tienne cinq ans après la mise en service de Cigéo.

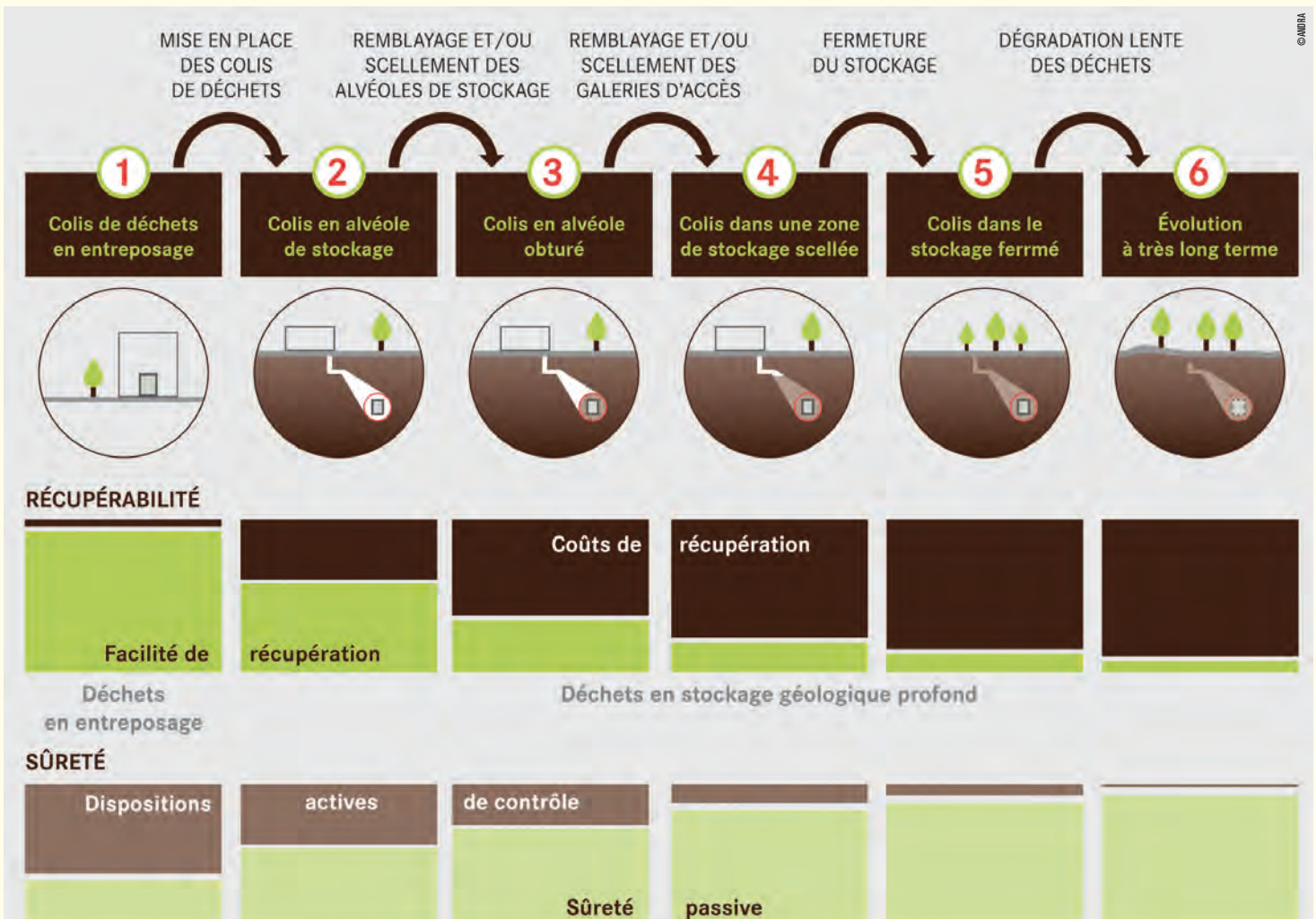
### Maintenir la sûreté de l'installation doit rester la priorité

L'objectif fondamental du stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde est de

**ASN**  
Autorité  
de sûreté  
nucléaire

**6.** Située en Allemagne, Herfa-Neurode est la plus grande décharge souterraine de déchets industriels dangereux au monde.

**7.** Dans l'ancienne mine de potasse Joseph-Else, creusée dans le sous-sol de Wittelsheim (Haut-Rhin), StocaMine stocke 44 000 tonnes de déchets chimiques. **8.** Le *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP) est un centre de stockage de déchets radioactifs situé au Nouveau-Mexique (États-Unis).



protéger les personnes et l'environnement des risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques<sup>11</sup>. La mise en sécurité définitive des déchets radioactifs vise aussi à prévenir ou limiter les charges qui seront supportées par les générations futures<sup>12</sup>. Comme toute installation nucléaire, Cigéo érige la sûreté au premier rang de ses priorités. Il est donc essentiel que l'intégration de la réversibilité ne compromette pas la sûreté lors de l'exploitation et la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage. Cigéo est conçu de manière à être fermé à terme et à garantir la protection des personnes et de

l'environnement par des dispositions passives. Cette sûreté passive constitue la différence fondamentale de fonctionnement avec un entreposage. La sûreté après fermeture reposera pour l'essentiel sur la conception du stockage et sur le milieu géologique, qui sert de barrière naturelle à très long terme, mais ne dépendra d'aucune action humaine. Toutefois, une surveillance sera maintenue après la fermeture du stockage aussi longtemps que la société le souhaitera et des actions seront menées pour conserver et transmettre sa mémoire. La réversibilité impose un travail d'anticipation le plus exhaustif possible : que

pourraient souhaiter les générations futures ? Et qu'est ce qui serait techniquement nécessaire ? Depuis plusieurs années, les ingénieurs de l'Andra travaillent au développement et à la réalisation de la réversibilité. Des recherches et l'acquisition de connaissances sont encore nécessaires afin de répondre encore plus précisément aux questions soulevées par la réversibilité. Les essais qui seront menés en condition réelle lors de la phase industrielle pilote de Cigéo marqueront une étape essentielle vers la réalisation concrète de la réversibilité, l'un des piliers du projet.

11. Guide de sûreté de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN, 2008). 12. Article 2 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006

# Dialogue, concertation, implication : le triptyque de la démarche d'ouverture à la société de l'Andra

Par **Valérie Renaud**, directrice de la communication  
et du dialogue avec la société, Andra



## en substance...

L'Andra est en pleine mutation. D'abord, parce que le projet Cigéo arrive à maturité et que les jalons qui conduisent à sa réalisation constituent un enjeu en matière de débat public. Ensuite, parce que les attentes de la société évoluent : les citoyens ont à cœur de s'impliquer dans les projets d'envergure comme Cigéo. Convaincue que la réussite de ce projet réside dans sa capacité à interpeller et réunir le plus grand nombre autour de ce sujet de société majeur, l'Andra fait évoluer sa démarche de dialogue, plus que jamais articulée autour du triptyque dialogue, concertation, implication.

**D**ès son origine, l'Andra a inscrit son action dans une démarche de transparence et de dialogue avec l'ensemble des parties prenantes de ses activités et en particulier les riverains de ses installations. Elle a également été l'acteur majeur deux débats publics nationaux d'envergure, démontrant par là son attachement à la démocratie participative : en 2005 sur la politique française en matière de gestion des déchets, et en 2013 sur le projet Cigéo.

En plus de ces contacts directs avec les différents publics, l'Andra est présente sur Internet. Animateur de plusieurs sites, l'Agence tient à s'adresser à tous les publics de façon adaptée, quel que soit leur niveau de connaissance, et souhaite aborder tous les sujets. Les citoyens, notamment les plus jeunes, étant très présents sur les réseaux sociaux, l'Andra anime des débats et rend compte de son actualité sur Twitter, LinkedIn, Youtube, etc.

Grâce à ses actions, l'Andra s'est progressivement imposée comme l'acteur incontournable de la diffusion des connaissances et de la culture scientifique sur la gestion des déchets radioactifs.

La dimension de Cigéo et les enjeux éthiques qu'il soulève en font un projet qui dépasse le cadre local et le seul secteur nucléaire : Cigéo est un projet d'intérêt général. C'est pourquoi l'Andra innove et invente en matière de dialogue et de concertation pour faire de la gestion des déchets radioactifs, un sujet pris en charge par l'ensemble de la société.

## LA SOCIÉTÉ ET LES NOUVEAUX MODES DE DÉBAT

### Une société en mouvement

À l'heure d'Internet, des réseaux sociaux et des nouveaux médias qui bouleversent les pratiques d'information et d'expression, les citoyens souhaitent de plus en plus participer directement aux décisions publiques. Les réseaux sociaux inventent de nouveaux référentiels d'information, de partage et de décision. Cette demande de participation s'exprime d'autant plus fortement que les Français portent un regard sceptique, voire sévère sur le modèle politique actuel : défiance à l'égard des institutions, de la parole publique, des industriels, et par voie de conséquence, défiance à l'égard du débat public encadré par la loi, parfois même rejet du débat de la part de certains.

Ils plébiscitent par ailleurs de nouvelles formes de participation et d'accompagnement. Celles-ci doivent être garantes d'efficacité : si les citoyens expriment leur point de vue, ils veulent être sûrs que leur mobilisation ne sera pas vaine mais qu'elle sera prise en compte dans le processus de décision. La diffusion à grande échelle des nouvelles technologies a permis de matérialiser ces attentes en faisant émerger des bulles nouvelles de concertation et de dialogue. C'est ainsi que de nouvelles formes de concertation sont apparues qui rénovent les mécanismes participatifs : forum ouvert, conférence citoyenne, débat numérique...



Chaque année, l'Andra accueille plus de 20 000 personnes sur ses sites



Réunion publique organisée par la CNDP sur le projet Cigéo (2013)

La conférence de citoyens de 2014 (organisée dans le cadre du débat public de Cigéo en 2013) a apporté la démonstration que des personnes qui n'ont aucune compétence particulière en matière de gestion des déchets radioactifs peuvent exprimer sur des sujets très complexes un avis pertinent et argumenté.

Un autre facteur récent caractérise cette société en mouvement : l'organisation d'une opposition aux grands projets au nom de la protection de l'environnement, ou encore d'une opposition qui s'exprime au nom du bien commun mais qui n'est pas forcément représentative de l'ensemble de l'opinion.

Alors que le projet Cigéo arrive à maturité, c'est l'ensemble de ce diagnostic des aspirations des Français qui permet de guider l'action de l'Andra vers encore plus de dialogue et de concertation avec les acteurs de la société civile.

## DÉBATTRE POUR AGIR

### La philosophie de l'Andra

L'expérience montre qu'un débat, même mené en temps utile et entouré de garanties de transparence, n'efface pas les divergences d'appréciation, pas plus que la concertation ne supprime toute contestation.

Néanmoins, pour l'Andra, la participation et la concertation sont les seuls moyens de trouver des points de convergences et des synergies entre un projet qui répond à un enjeu national, comme Cigéo, et

les citoyens même opposés au-dit projet. Selon l'adage « l'union fait la force », ces échanges permettent non seulement de mieux anticiper les conflits, mais également d'enrichir et co-construire le projet. Dialogue, débat et concertation sont essentiels pour que toutes les sensibilités, les opinions et les positions s'expriment et permettent de faire émerger des arbitrages fondés en conscience

La démarche d'ouverture élaborée par l'Andra s'inscrit pleinement dans les principes fondateurs de la démocratie environnementale (*voir encadré*). L'Agence fait également siens les principes de la Convention d'Aarhus (relative à l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement) et de la Charte de l'environnement de 2005 : « *La meilleure façon de traiter les questions d'environnement est d'assurer la participation de tous les citoyens concernés.* »

### Les débats publics nationaux et les évaluations techniques ont enrichi le projet

A la demande des autorités, la CNDP a organisé deux débats publics nationaux sur les déchets radioactifs qui ont chacun apporté de nouvelles pierres permettant de faire avancer le projet Cigéo en introduisant des réponses aux demandes du public (la réversibilité, la phase industrielle pilote, etc.).

En 2005, un premier débat public national s'est tenu sur la base des 15 premières années de recherche. Les réunions publiques ont fait émerger la nécessité de procéder à un choix éthique entre deux options : l'entreposage et le stockage géologique. Lors du débat, la question de la réversibilité a également été posée (*voir page 36*). En 2006, l'ASN<sup>1</sup> a souligné que des résultats majeurs relatifs à la faisabilité et à la sûreté d'un stockage ont été acquis sur le site du Laboratoire de Bure<sup>1</sup>. Sur la base de ce débat et des évaluations, la loi de 2006 fait le choix du stockage géologique et pose une exigence de réversibilité d'au moins 100 ans. En 2013, un deuxième débat public national est organisé sur le projet Cigéo lui-même, sur la base de ces données d'esquisse. Après l'intervention d'associations hostiles au projet, les réunions publiques sont annulées. La CNDP<sup>2</sup> déporte le débat sur Internet. La participation est un succès : 150 cahiers d'acteurs déposés, 1500 questions posées, 500 avis exprimés<sup>2</sup>, 9 débats contradictoires organisés et plus 9000 connexions. En fin d'année, une « conférence citoyenne » est organisée. Les citoyens concluent notamment que les générations actuelles « *n'ont pas le droit de laisser aux générations futures la charge de gérer les déchets résultant de la production [d'électricité nucléaire]* ».

**ASN**  
Autorité de sûreté nucléaire

**CNDP**  
Commission nationale du débat public

<sup>1</sup>. Le laboratoire étudie la faisabilité d'un stockage en profondeur comme Cigéo.  
<sup>2</sup>. 25 % des avis exprimés viennent de la Meuse et de la Haute-Marne.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

Parmi les suites données par l'Andra au débat public en réponse aux avis et attentes exprimés, l'Agence a décidé d'apporter des évolutions au projet Cigéo, en particulier une plus forte implication de la société civile et l'intégration d'une phase industrielle pilote au démarrage de l'installation, comme l'avait suggéré la conférence de citoyens.

### Information et dialogue dans les gènes de l'Andra

L'Andra est responsable vis-à-vis de la société. Parce qu'elle assume un rôle public, au service de l'environnement et des citoyens, et donc d'intérêt général, l'Agence travaille en toute transparence et met à disposition du plus grand nombre une information diversifiée et accessible sur tous ses sujets.

Ces dernières années, elle a développé une palette d'outils adaptés à tous types de publics pour permettre à ceux qui s'intéressent au sujet d'y accéder aisément : visites de sites (près de 20 000 visiteurs chaque année), éditions techniques et pédagogiques, journaux (diffusés tous les trimestres à plus de 200 000 exemplaires), sites internet, conférences, journées portes ouvertes. Elle dispose également de chaînes sur YouTube et Dailymotion qui lui permettent de montrer en image ses activités, etc.

Elle publie tous les ans un point sur la nature, les volumes et la

localisation des déchets radioactifs en France, à travers l'inventaire national ([www.inventaire.andra.fr](http://www.inventaire.andra.fr)).

En matière de dialogue, elle a développé depuis de nombreuses années une proximité avec ses riverains à travers des rencontres régulières. Elle a également créé des espaces de dialogue en ligne sur ses sites et participe à des discussions sur le web à travers des forums, des blogs et des médias en ligne.

Pour aller au-delà de ces actions

et répondre à sa volonté de donner un accès encore plus large au sujet, l'Andra a mis en place en 2015 une démarche d'ouverture à la société qui s'appuie sur deux piliers : le déploiement du dialogue et la concertation.

### Dialogue : inclure de plus en plus de Français

Premier volet de la démarche de l'Andra : déployer le dialogue pour toucher un maximum de citoyens. L'Agence souhaite élargir le champ de ses interlocuteurs pour aller à

## Les piliers de la démocratie environnementale

La démarche d'ouverture élaborée par l'Andra s'inscrit pleinement dans les principes fondateurs de la démocratie environnementale.

- Informer et débattre : mettre à niveau les parties intéressées en expliquant l'objet du débat dans toutes ses composantes (techniques, scientifiques, économiques mais aussi éthiques...), être très clair sur le périmètre de la concertation (ce sur quoi on discute : les marges de manœuvre, ce sur quoi on ne revient pas : les décisions déjà prises).
- Accepter de confronter les points de vue pour faire émerger des consensus ou mieux comprendre des dissensions.
- Associer : se donner les moyens de mettre autour de la table toutes les parties prenantes ou intéressées.
- Rendre compte et progresser : inscrire le dispositif de dialogue dans le calendrier de conception du projet, conserver et partager la mémoire des échanges, faire savoir ce qui a été retenu, ce qui ne l'a pas été.



Débats contradictoires interactifs retransmis en direct sur le site [www.debatpublic-cigeo.org](http://www.debatpublic-cigeo.org)

la rencontre de celles et ceux qui, à première vue, ne font pas partie de son écosystème. L'Andra ne peut pas être le seul porte-parole du sujet des déchets radioactifs. D'autres acteurs doivent pouvoir s'exprimer : des courants de pensée, des artistes, des associations environnementales, scientifiques ou industrielles... et surtout les jeunes, incarnation des générations futures, celles à qui le projet Cigéo s'adresse.

L'Andra a lancé plusieurs actions pour créer de nouvelles modalités d'expression : un concours de court-métrage, un atelier lors du festival du graphisme de Chaumont ou encore le lancement d'un média numérique sur les générations futures (« *Les Arpenteurs* », voir encadré).

### Déployer la concertation et l'implication

Le deuxième volet de la démarche de l'Andra porte sur la concertation et l'implication. Il s'inscrit dans la continuité des concertations menées en 2009 pour la définition de la Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (Zira) du projet Cigéo, et en 2014 dans le cadre de la démarche APPRIOS-Eau (concernant le suivi de la qualité des milieux aquatiques du territoire de l'OPE).

Concertation permet d'alimenter une réflexion en utilisant des méthodes



Chaque jour, l'Andra répond aux interrogations des internautes

de débats adaptées aux attentes de la société. L'implication va encore plus loin, car elle vise à associer de façon pérenne les parties intéressées au projet, à travers un système de gouvernance et des instances participatives durables.

Différents sujets, à l'échelle nationale et des territoires où sont implantés les Centres de l'Agence ont été identifiés comme comportant des enjeux forts de concertation et d'implication. Pour Cigéo par exemple, en amont du dépôt de la demande d'autorisation de création prévue en 2018, l'Andra associera un certain nombre de parties

prenantes et de citoyens à la rédaction du Plan directeur d'exploitation de Cigéo qui définira les grandes étapes du projet et ses règles de gouvernance (voir page 28).

Pour les centres de stockage de la Manche et de l'Aube, elle souhaite améliorer l'information en matière de suivi environnemental et sanitaire en consultant les populations locales sur leurs attentes en la matière.

Pour chacun de ces chantiers, il s'agira de mettre en œuvre un dispositif sur mesure et innovant tout en évaluant de façon continue la démarche d'ouverture.

## Les Arpenteurs : un média numérique pour les générations futures

À l'été 2015, l'Andra et le magazine *Usbek & Rica* ont lancé en partenariat un magazine numérique dédié à l'actualité des générations futures : *Les Arpenteurs* ([www.lesarpenteurs.fr](http://www.lesarpenteurs.fr)).

Fruit de la rencontre entre l'Agence nationale en charge de la gestion des déchets radioactifs et le magazine qui explore le futur, *Les Arpenteurs* veulent mettre en lumière la façon dont le mode de vie et les décisions de nos générations ont un impact positif ou négatif sur nos descendants. De reportages en analyses, d'entretiens en récits long format, *Les Arpenteurs* parlent d'éthique, de technologie, de changement climatique, d'innovation, d'urbanisme, d'exploration spatiale... et de déchets radioactifs – car tous ces domaines, tous ces enjeux engagent les sociétés d'aujourd'hui, vis-à-vis de celles de demain.

## DOSSIER

LE PROJET CIGÉO,  
pour stocker les déchets  
les plus radioactifs

# Le grand pouvoir des petits dessins

Entretien avec **Jean-Philippe Legrand (Aster)**, illustrateur indépendant



### en substance...

De 2009 à 2015, Aster a fait la une du *Journal de l'Andra*. Sécurité, expertises, réversibilité, surveillance, mémoire des sites, coût du stockage... tous les sujets liés à l'activité de l'Andra s'y sont illustrés. Rencontre avec ce jeune talentueux dessinateur belge.



**RGN : comment vous êtes-vous retrouvé à la une d'un journal destiné aux riverains des sites de stockage de l'Andra ?**

**Aster :** L'initiative ne vient pas de moi mais de l'agence de communication Rouge Vif Éditorial qui a proposé à l'Andra de publier un Journal d'information avec une forte identité Presse. Leur idée était de publier un dessin à la une, à la manière d'un quotidien. C'était un pari audacieux et on peut effectivement s'étonner de voir un illustrateur de presse se mettre aux côtés de ceux dont la mission est d'assurer la gestion des déchets radioactifs. Et quoi ? Ces gens-là valent-ils moins que les autres ? N'ont-ils pas une responsabilité bien pesante qui mérite aussi d'être (modestement) soutenue et égayée ? Pour certains, c'est assez extravagant d'associer des petits dessins à un sujet aussi sérieux mais cela fait partie des



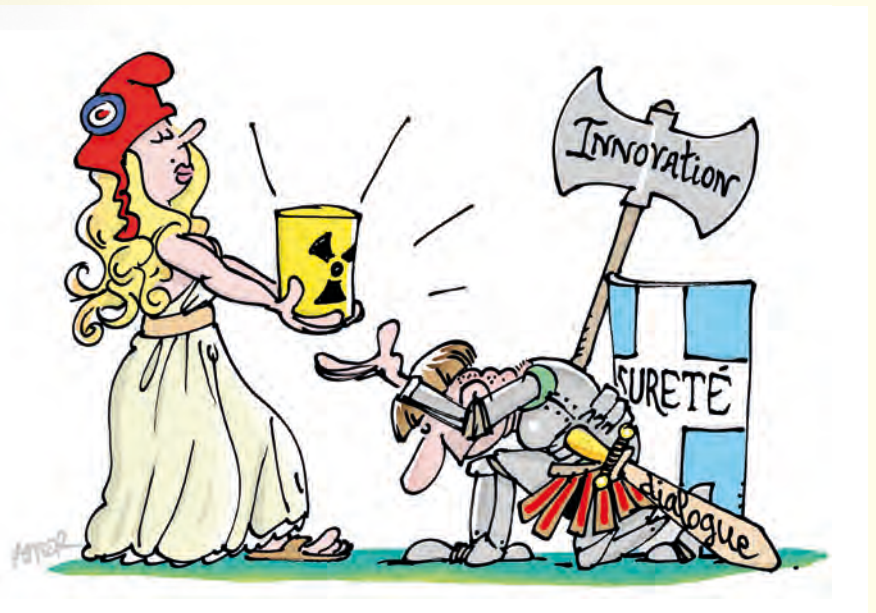
choses qui m'ont séduit. L'équipe était sympa et attentive, le client ouvert et respectueux, alors j'ai accepté la collaboration.

**Quel regard portez-vous sur cette collaboration ?**

**Aster :** Les déchets radioactifs sont le résultat d'un choix de société que je ne partage pas forcément mais où nous sommes aujourd'hui tous impliqués, quelquefois sans le savoir. Et maintenant qu'ils sont là,

« Le gouvernement français a confié à l'Andra la mission d'organiser le traitement et le stockage des déchets radioactifs dans les conditions les plus sûres qui soient. Pour la mener à son terme, les moyens technologiques et la quantité de matière grise sont impressionnants. Je dédie mes dessins à ces hommes et à ces femmes qui font de leur mieux pour trouver des solutions alors que le nucléaire, dont nous bénéficions tous, est de plus en plus décrié. Nous sommes nombreux à espérer que ce n'est que transitoire en attendant que d'autres solutions, plus satisfaisantes, voient le jour dans le futur. J'espère que les lecteurs sentiront que, derrière la caricature forcément réductrice, la réalité est complexe et qu'il est bon de s'informer correctement afin de se forger une bonne opinion du problème »

Aster





Quand un bon petit dessin vaut mieux qu'un long discours



Miser sur la capacité d'autodérision de chacun des acteurs

il faut s'en occuper! Autant le faire avec le sourire. Je tiens à saluer la capacité d'autodérision, la réelle sensibilité et la volonté de transparence de l'Andra, sans rien ôter du sens des responsabilités qui a présidé au choix des dessins à publier dans le journal. Si certains ont bien donné lieu à des controverses et quantité d'ajustements, jamais l'idée n'a été imposée par l'Andra. Sans quoi, je n'aurais pas signé!

#### Comment définiriez-vous votre métier ?

**Aster :** Totalement indépendant et sans étiquette, orienté « entreprises », j'envisage le *cartoon* comme un vecteur d'information capable d'aller plus loin que l'objectivité journalistique. Un article de presse doit observer des critères de véracité, d'objectivité, de pondération. Une photo doit montrer la réalité sinon c'est un trucage. En revanche, on tolère qu'un dessin de presse soit une caricature,

une représentation imaginaire, un point de vue subjectif, plus engagé, voire plus subversif. L'humour quant à lui permet d'adoucir les débats. Provoquer un rire ou un sourire, c'est créer un état de bien-être, d'attention et de réceptivité particulière. On peut alors espérer toucher les consciences dans une dynamique positive. Le dessin attire le regard, frappe les esprits, demeure en mémoire, suscite une réflexion, un sentiment, des commentaires. Personnellement, je ne cherche certainement pas à échauffer les esprits, ni « caricaturer » sur tout ce qui bouge, encore moins promouvoir mes opinions personnelles. Le dessin bête et méchant, c'est pas mon truc!

**Aster**

## Angleterre - Suisse : itinéraire des résidus vitrifiés



L'itinéraire est étudié selon les flux de transport et les risques.



Les sociétés de transport font l'objet de qualifications rigoureuses (équipement des véhicules, formation des chauffeurs).



Les navires utilisés sont équipés de dispositifs redondants.



Des contrôles systématiques sont effectués à chaque étape de chargement (débit de dose, étanchéité...). À tout moment, le chargement peut être inspecté par l'ASN.



### Les emballages de transports

Ils sont soumis à de nombreux tests (chute de 9m, tenue au feu à 800°C...) et sont agréés par les autorités des pays traversés.



### Le centre opérationnel de suivi

Il assure le suivi du chargement tout au long du parcours. Des équipes d'astreinte et une cellule mobile d'intervention sont mobilisables 24h/24.



### Le centre de gestion de crise

Il réunit le poste de commandement, la cellule technique et la cellule de communication.



### Jour J Sellafield

Départ en camion de l'usine de retraitement.

### Jour +1 Barrow

Au port, le container est chargé sur un bateau. Direction Cherbourg.

### Jour +4 Cherbourg

Arrivée le matin au port. Un point presse est organisé sur place. Le container est chargé sur un camion et convoyé jusqu'au terminal ferroviaire de Valognes.



### Jour +5 Valognes

Inspection de l'Autorité de sûreté nucléaire et du HCTISN\*. Le container est ensuite chargé sur un train pour rejoindre Chalon.

### Jour +6 Chalon

Le train reste stationné 22h à cause de mauvaises conditions météo. Dans la soirée, il est autorisé à repartir pour la Suisse.

### Zwilag Jour +7

Arrivée en gare de Wurenlignen. Les derniers km jusqu'au centre de stockage de Zwilag sont effectués en camion.



Durant tout le transport, le chargement est suivi en temps réel par satellite.

# Transports sous surveillance

ENVIRON 770 000 TRANSPORTS DE MATIÈRES RADIOACTIVES À USAGE CIVIL ONT LIEU CHAQUE ANNÉE EN FRANCE, REPRÉSENTANT MOINS DE 3 % DE L'ENSEMBLE DES TRANSPORTS DE MATIÈRES DANGEREUSES. LES COLIS TRANSPORTÉS SONT TRÈS DIVERS : DE QUELQUES GRAMMES POUR DES COLIS PHARMACEUTIQUES À FAIBLE ACTIVITÉ À PLUSIEURS TONNES POUR LES COMBUSTIBLES IRRADIÉS. QUELLES RÈGLES ENCADRENT CETTE ACTIVITÉ ? QUI TRANSPORTE QUOI ? QUELS SONT LES RISQUES ET LES PARADES ? DÉCRYPTAGE

Par **Isabelle Jouette**, SFEN

**L**es matières radioactives sont utilisées dans de nombreuses activités humaines et depuis longtemps. Ainsi, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'uranium (oxyde d'urane) était déjà employé dans la fabrication d'émaux, de porcelaines et de verreries pour leur donner une belle couleur jaune orangé ! Si l'on n'utilise plus d'uranium pour illuminer les verres en cristal de Bohême, une dizaine de millions de colis de matières radioactives sont désormais transportés chaque année dans le monde. Du site d'extraction de l'uranium au site de stockage de déchets radioactifs, le développement de l'industrie nucléaire, du secteur médical et de la recherche ont contribué à ces mouvements internationaux de matières radioactives.

## 15 % DES TRANSPORTS DE MATIÈRES RADIOACTIVES

L'industrie nucléaire ne représente aujourd'hui que 15 % des transports de matières radioactives liées aux différentes étapes du cycle du combustible (conversion, enrichissement, fabrication, utilisation, retraitement, stockage). La médecine – 20 % des transports – est également concernée avec l'approvisionnement des hôpitaux en produits radiopharmaceutiques pour le diagnostic médical et en sources pour la radiothérapie. 65 % des transports relèvent d'activités de contrôles techniques et de recherche : transport d'appareils de détection de plomb pour les diagnostics immobiliers, de gammagraphes pour la radiographie industrielle, de sources radioactives pour la



Transport nucléaire entre le terminal ferroviaire de Valognes (Manche) et l'usine de retraitement AREVA de La Hague

recherche, l'archéologie, la stérilisation, l'alimentation en énergie des satellites<sup>1</sup>...

Chaque année en France, sur 770 000 transports de substances radioactives correspondant à environ 980 000 colis, 114 000 sont générés directement par l'industrie nucléaire<sup>2</sup> et notamment par les activités liées au cycle du combustible : transports de combustible neuf et usé, d'hexafluorure d'uranium<sup>3</sup>, de plutonium, d'uranium naturel... dans des colis allant de quelques grammes à une centaine de tonnes.

Environ 2 000 transports (58 000 colis) sont en provenance ou à destination de l'étranger, couvrant l'ensemble du cycle du combustible. On dénombre 400 transports de combustible neuf à base d'uranium et une cinquantaine de combustible

MOX (à base d'uranium et de plutonium). 200 transports sont organisés pour envoyer les combustibles usés des 19 sites nucléaires d'EDF vers l'usine de La Hague dans la Manche. 250 autres permettent de convoier de l'UF<sub>6</sub> de et vers l'étranger.

L'uranium naturel, bien que faiblement radioactif, entre également dans la catégorie des matières dangereuses et doit être transporté comme tel.

## LE CHOIX DU MODE DE TRANSPORT

Les risques liés au transport de matières radioactives sont, peu ou prou, les mêmes que ceux rencontrés sur les sites nucléaires : contamination interne ou externe des personnes ou de l'environnement, criticité<sup>4</sup>, risque chimique notamment pour l'UF<sub>6</sub>.

**1.** Voir Tim Tinsley *De l'énergie nucléaire pour les vaisseaux spatiaux européens* - voir RGN4 (2015).

**2.** Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2015.

**3.** L'hexafluorure d'uranium (UF<sub>6</sub>) est un composé de l'uranium utilisé dans les procédés d'enrichissement - voir RGN2 (2016). **4.** La criticité est le démarrage intempestif d'une réaction neutronique en chaîne.



Transports associés au cycle du combustible en France ©ASN

Mais un autre risque est pris en compte : celui du vol ou du détournement du colis.

Le mode de transport est donc adapté au colis et aux risques. L'itinéraire relève du choix du transporteur et doit, le cas échéant, être validé par le Haut fonctionnaire de défense et de sécurité.

Pour les convois de grande masse comme les colis de combustible usé et pour de longs trajets, le rail est privilégié. En l'occurrence, les « châteaux » de combustible usés envoyés à l'usine de retraitement de La Hague empruntent la voie ferrée jusqu'au terminal ferroviaire de Valognes (Manche), avant de prendre la route pour une trentaine de kilomètres.

La route est préférée pour les moyennes et courtes distances. C'est d'ailleurs le moyen privilégié pour les produits pharmaceutiques

et les sources médicales livrées aux hôpitaux. Toutefois, le transport par route de marchandises dangereuses est soumis à des règles de circulation et de stationnement.

4 % des transports de matières radioactives liées au cycle du combustible empruntent les voies maritimes, dont les transports de MOX vers le Japon et d'uranium naturel entre les pays miniers (Australie, Canada, Niger...) et la France. Pour le fret de MOX et de déchets de haute activité notamment, les navires doivent répondre aux prescriptions de l'Organisation maritime internationale<sup>5</sup> et être dotés, entre autres dispositifs redondants, d'une double-coque, de systèmes de détection et d'extinction d'incendie, de radars anti-collision.

L'avion est utilisé essentiellement pour envoyer au loin des colis urgents, comme des produits radiopharmaceutiques à durée de vie courte, ou des échantillons de diverses matières.

Mais quel que soit le mode de transport, les colis les plus sensibles sont géolocalisés en permanence par satellite.

## UNE RÉGLEMENTATION INTERNATIONALE

La réglementation des transports, compte tenu du caractère international de l'activité, a été élaborée sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Chaque pays décline ces dispositions dans son droit national. En France, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), aidée de l'expertise technique de l'Institut de radioprotection et de sécurité nucléaire (IRSN), est chargée du contrôle de la sûreté des transports de matières à usage civil.

Les transports pour les activités de défense sont sous l'autorité du Délégué à la sûreté et la radioprotection des installations et activités intéressant la défense (DSND).

Les responsabilités sont établies : l'expéditeur est responsable de la sûreté du colis, le transporteur et le commissionnaire chargés de l'organisation et du bon déroulement de l'acheminement. Mais le concepteur, le fabricant et le propriétaire des emballages ont également un rôle important en matière de sûreté.

Selon les risques liés au colis transporté, les moyens adaptés pour protéger l'environnement et les populations sont mis en œuvre. Les emballages doivent évidemment garantir le confinement des matières radioactives : le débit de dose à la surface du colis, et à la surface du véhicule ne peut dépasser la limite réglementaire de 2mSv/h (colis et véhicule) et de 0,1 mSv/h à 2 mètres du véhicule. Des dispositions applicables à tous les acteurs de la chaîne du transport sont prises pour limiter l'exposition du public en deçà de 1 mSv<sup>6</sup>.

Les emballages des contenus les plus dangereux doivent – entre

<sup>5</sup>. Voir le code maritime international des marchandises dangereuses (Code IMDG). <sup>6</sup>. Pour mémoire, le sievert est l'unité de mesure des effets biologiques des radiations. 1 millisievert (mSv) est un millième de sievert, 1 microsievert (µSv) est un millionième de sievert. La radioactivité naturelle moyenne en France est de 2,4 mSv par an, une radiographie des poumons correspond à environ 0,1mSv.

autres – pouvoir résister à une chute de 9 mètres sur une surface indéformable, tenir à un feu de 800 °C pendant 30 minutes ou encore résister à l’immersion jusqu’à 200 mètres. Ils doivent également avoir reçu l’agrément de l’Autorité de sûreté, processus qui peut prendre jusqu’à 5 ans, entre la conception et les tests, pour un nouvel emballage.

De plus, pour parer à toute éventualité, les acteurs du transport de matières radioactives se préparent à gérer les conséquences d’un éventuel accident. Ainsi, des plans de gestion des accidents et incidents sont rédigés par les industriels (expéditeurs et transporteurs) pour se préparer à la gestion d’une crise : organisation mise en place, moyens matériels et humains, formation, exercices... De fait, cette préparation à la crise est particulièrement utile lors des régulières manifestations, plus ou moins « musclées », d’opposants, comme les mouvements « Stop Castor<sup>7</sup> » très présents à proximité de la gare de triage de Drancy (Seine-Saint-Denis) qui voit passer environ 15 000 wagons de matières dangereuses (mais pas seulement nucléaires) par an.

### DES TRANSPORTS SÛRS

Tout événement survenant lors d’un transport de matière radioactive doit impérativement être déclaré dans les deux jours à l’ASN, qu’il y ait eu ou non des conséquences radiologiques. Depuis 1999, une centaine d’événements, dont des non-conformités mineures, sont déclarés chaque année en France soit un pour 10 000 colis transportés.

En 2015, 66 événements ont été déclarés, dont 56 de niveau 0. Plus de la moitié concerne EDF et AREVA quand un cinquième est relatif aux produits pharmaceutiques radioactifs. Les causes d’événements ont été le dépassement des limites réglementaires de contamination des colis, le mauvais arrimage, la perte de produits

pharmaceutiques, l’erreur d’étiquetage... Mais depuis le début des années 2000, le nombre d’événements transport ayant eu des conséquences radiologiques significatives est en baisse constante.

Le seul événement de niveau 2 déclaré en 2015 relevait du non-respect des prescriptions de sûreté lors du transport d’un gammagraphe. Cet instrument qui permet de réaliser la radiographie de matériels, n’avait pas été rangé correctement pour son transport.

Plus largement, les transports maritimes de combustible MOX – plus de 170 pour plus de 2 000 colis depuis les années 1960 – n’ont jamais connu d’incident ayant des conséquences radiologiques.

### AILLEURS AUSSI, DES TRANSPORTS SONS HAUTE SURVEILLANCE

L’ASN participe aux travaux de l’association européenne des autorités compétentes pour le transport de substances radioactives fondée en 2008, afin d’harmoniser les pratiques en la matière. Elle collabore aussi avec les régulateurs suisses, allemands, belges et britanniques. Un accord a même été conclu entre l’ASN et l’Office for nuclear regulation (ONR) anglais sur la reconnaissance mutuelle des certificats d’agrément attestant de la sûreté du transport.

D’autres industries, comme l’armement, sécurisent aussi leurs transports. En matière de transports de fonds (billets, papier servant à l’impression des billets, monnaie métallique), il s’agit principalement de gérer le risque sécurité, en l’occurrence, les attaques de distributeurs automatiques de billets et les agressions, parfois mortelles, de convoyeurs de fonds. Si les entreprises prennent des mesures, la réglementation en la matière a été particulièrement durcie en 2013. Ainsi, des dispositions claires encadrent les pratiques. Par exemple, au-delà de 100 000 euros, les bijoux doivent, dans certains cas, être transportés en véhicule blindé avec trois hommes armés ou en véhicule banalisé doté d’équipements de sécurité. Une commission nationale de la sécurité du transport de fonds, consultative, a été créée pour étudier les problèmes spécifiques des entreprises du secteur et émettre des propositions pour améliorer leur sécurité.

Autre matière particulièrement surveillée lorsqu’elle sort de son écrin : les bijoux. Les stars qui foulaient il y a peu le tapis rouge du Festival de Cannes arboraient des parures qui pour certaines valent des millions d’euros. Une entreprise spécialisée dans la joaillerie

a assuré la plupart des convoyages selon deux techniques. Soit le « cargo » : des convoyeurs armés récupèrent les bijoux dans les coffres du joaillier pour les embarquer dans les soutes d’un avion. Soit le « porteur » : un convoyeur remet les bijoux (dans une valise scellée) à un employé qui prend l’avion et confie la valise à une équipe de convoyeurs à son arrivée sur la Riviera. Et sur place les moyens de protection des bijoux sont au niveau maximum : lieux de stockage ultra-sécurisés, procédures strictes, surveillance renforcée... Dans le même esprit, quand un maroquinier de luxe exporte un conteneur de sacs à main fort coûteux à l’autre bout du monde, il va de soi que le transport est géolocalisé et supervisé en permanence. Chaînon indispensable de la production d’électricité, les acteurs du transport de matières radioactives ont su mettre en place des procédures et dispositifs robustes, efficaces à terre et en mer. Représentant une très faible proportion des mouvements du fret mondial, les matières transportées font l’objet de la plus grande vigilance. ■

## AREVA TN International, acteur historique du transport nucléaire

Depuis plus de quarante ans, AREVA TN anime un réseau international spécialisé dans les solutions de transport et d’emballages adaptés. C’est notamment le concepteur des « châteaux » destinés au transport des combustibles usés. Avec sa filiale LMC, AREVA TN assure le commissionnement du transport routier. L’entreprise dispose également de wagons de fret spécifiques pour le transport des emballages de plus de cent tonnes. Actionnaire de la Pacific Nuclear Transport Limited (PNTL), le spécialiste du transport nucléaire dispose d’une flotte agréée de 3 navires dédiés au transport de matières nucléaires de l’aval du cycle (MOX et résidus vitrifiés notamment).



Colis de déchets vitrifiés à Cherbourg en septembre 2015

7. Le « castor » est le conteneur transportant les déchets nucléaires.

# TerraPower, le réacteur de Bill Gates

Par **Joël GUIDEZ**, expert au CEA et auteur  
de Superphénix – les acquis techniques et scientifiques (Atlantis Press)



## en substance...

Depuis 2008, Bill Gates, fondateur de Microsoft, finance une start-up chargée de développer un réacteur initialement basé sur l'idée du « réacteur cigare », réacteur dans lequel la réaction nucléaire au sein d'une masse fissile<sup>1</sup> crée de la matière fissile au niveau du fertile<sup>2</sup> qui l'entoure. Ce fissile va prendre le relais quand la charge initiale sera épuisée, et ainsi de suite, jusqu'à la combustion de l'ensemble fertile + fissile.

Un point intéressant de ces études est que l'on aboutit finalement à un réacteur de plus en plus proche d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR Na) classique, avec des combustibles hexagonaux et une architecture générale très comparable en dehors de la configuration spécifique du cœur.

Il faut aussi noter que les problèmes techniques spécifiques au fonctionnement d'un cœur de ce type, à longue durée de vie, nécessitent des développements intéressants en cours, en particulier sur les matériaux.

Cet article est rédigé sur la base de l'analyse faite par l'auteur d'un certain nombre de publications citées en référence. Il ne représente aucun caractère contractuel et vise simplement à tenter de mieux faire connaître le projet TerraPower.

1. Un noyau ou matière fissile peut subir la fission par absorption de neutrons. En toute rigueur, ce n'est pas le noyau appelé fissile qui subit la fission mais le noyau composé formé suite à la capture d'un neutron. Les matières fissiles utilisées dans l'industrie nucléaire sont principalement l'uranium 235 et le plutonium 239. 2. Une matière fertile n'est pas fissile, mais peut être convertie en matière fissile, par bombardement neutronique. L'uranium 238 et le thorium 232 sont les deux principales matières fertiles.



Bill Gates présente la start-up TerraPower à la conférence TED en 2010

## LE PRINCIPE INITIAL : UN « RÉACTEUR CIGARE »

On part de l'idée évoquée dès 1958 du « *Traveling wave* » ou « *Burn and breed* », ou encore « réacteur cigare ». On initie une réaction avec un combustible fissile, entouré de matière fertile, souvent de l'uranium appauvri (voire du thorium). La création de plutonium dans l'uranium appauvri, par capture neutronique, permet peu à peu de transformer cette zone fertile en une zone potentiellement fissile. À l'épuisement de la première zone, la zone devenue fissile prendra le relais, et ainsi de suite. Au bout d'une durée qui dépend de la quantité initiale de matières, il y a eu évolution continue de la zone fissile, et derrière il ne reste que les « cendres » de la combustion. D'où l'image du cigare. Il n'y a alors pas de retraitement, et tout ce qui a été brûlé est considéré comme déchet final. Le réacteur est alors présenté comme fonctionnant à l'uranium appauvri,

de manière continue et sans rechargement pendant au moins 40 ans, non proliférant et ne nécessitant pas de retraitement et de cycle du combustible.

Deux familles de réacteurs de ce type ont été étudiées depuis 1958: ceux dans lesquels on ne bouge pas les combustibles durant toute la vie du réacteur – les TWR – la zone fissile s'y déplaçant comme une vague (« *Traveling Wave* »), comme le réacteur CANDLE étudié au Japon et ceux, plus récents, dans lesquels, durant la vie du réacteur, on repositionne les assemblages et qui sont présentés comme la dernière version des TWR.

Tous ces réacteurs exigent un fort taux de surgénération, donc un spectre neutronique le plus dur possible, ce qui exclut l'utilisation des oxydes. Des combustibles métalliques sont généralement utilisés. C'est sur la base de cette idée que Bill Gates finance depuis 2008 des

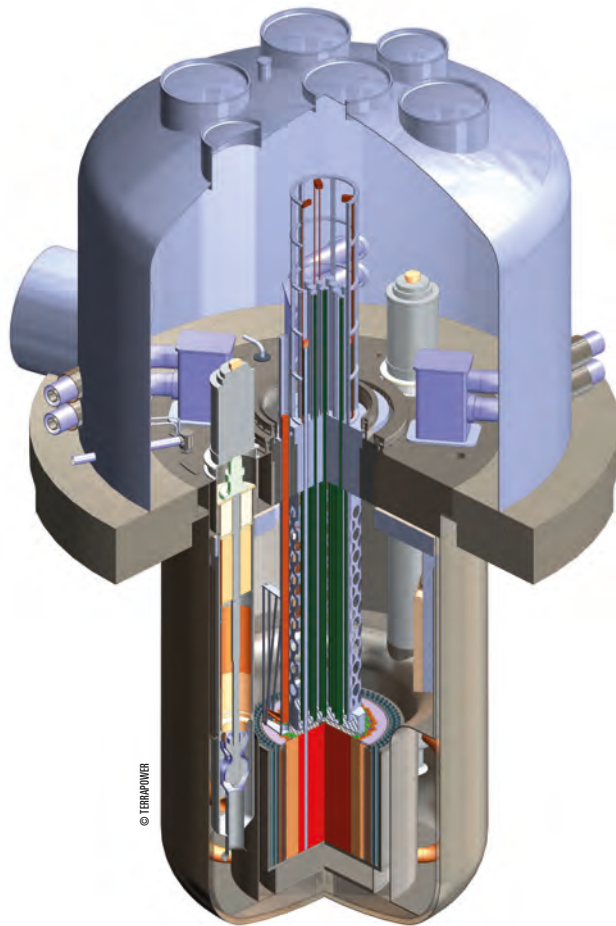


Figure 1 : vue en coupe d'un schéma de principe du réacteur TWR.

recherches pour développer ce type de réacteur, avec plusieurs dessins de TWR et plusieurs puissances.

### **TWR, LE PETIT FRÈRE DES RNR NA ?**

Des six concepts de réacteur de 4<sup>e</sup> génération (GEN IV) actuels, c'est le RNR sodium qui a le plus fort potentiel de surgénération. Donc, même si des études de TerraPower sont aussi parfois menées avec du plomb ou du sel fondu, les concepts présentés sont généralement des RNR sodium, avec un combustible fissile initial, entouré de fertiles. Contrairement aux versions initiales type CANDU, les dernières

versions de TWR ont un système de manutention permettant de « réarranger » périodiquement le cœur, jusqu'à épuisement de l'ensemble du combustible.

On a donc un réacteur qui, avec ses assemblages hexagonaux, ressemble comme un frère à un RNR sodium classique, sauf que son cœur est plus volumineux avec une densité moyenne de puissance beaucoup plus faible. Même si localement la densité de puissance peut être comparable.

Sur le TWR de 600 MWe présenté en 2013 au Symposium ICAPP [1] on trouvera les pompes primaires, les échangeurs intermédiaires, deux

circuits secondaires avec des générateurs de vapeur en hélice. Deux circuits type RUR à NaK<sup>1</sup> permettent l'évacuation de la puissance résiduelle. Sur tous ces points techniques et technologiques, le projet TerraPower semble considérer que cela est connu et validé et ne propose pas d'idée nouvelle.

Les efforts des chercheurs de Bill Gates portent essentiellement – au moins dans leurs publications [6] – sur la justification de fonctionnement neutronique de ce cœur complexe et sur la résolution des difficultés correspondantes, en particulier au niveau des matériaux [4]. En effet, et si on excepte la conception du cœur, tout le reste est donc potentiellement identique à un RNR sodium classique (figure 1).

### **FONCTIONNEMENT DU CŒUR**

La description du mode de fonctionnement du TWR a changé plusieurs fois. Initialement on retrouve souvent pour objectif le fait de brûler de l'uranium appauvri, pour une longue durée de fonctionnement sans rechargement (jusqu'à 40 ans). [1], [2], [3].

Ces objectifs semblent maintenant revus à la baisse, avec un cœur à changer tous les dix ans, et des manutentions à la fin de chaque cycle (environ 18 mois) pour reconfigurer le cœur dans une configuration réactive [7]. Le combustible est bien sûr métallique, car c'est celui qui permet le meilleur taux de surgénération.

Pour des raisons de principe (on part d'une situation sans retraitement et donc sans plutonium disponible), le cœur fissile de démarrage est composé d'uranium hautement enrichi (souvent 10 %)

Le fonctionnement neutronique de ce cœur est très complexe. Très volumineux, il a une densité moyenne de puissance faible (4 à 5 fois inférieure à un RNR classique) mais avec des pics de puissance locaux comparables. La stabilité est un objectif complexe à atteindre et il faut totalement privilégier la surgénération, avec des

<sup>1</sup>. Le NaK est un alliage de sodium (Na) et de potassium (K), liquide à température ambiante.

cœurs assez hauts pour éviter les fuites de neutrons. Même dans ces cas, le maintien de la puissance par reprise des fertiles reste un point délicat [3]. La thermohydraulique est complexe, les températures en sortie d'assemblages varient dans le temps et les débits sodium d'alimentation doivent être adaptés en conséquence, ce qui oblige à bouger les assemblages.

Aujourd'hui, les avantages potentiels par rapport à un RNR classique sont qu'il n'y a pas de rechargement de combustible pendant 10 ans, pas de nécessité d'une usine de retraitement et pas de risques de prolifération. Cela fait du TWR un concept séduisant à l'export. Enfin le dernier gain annoncé dans l'utilisation de l'uranium par rapport à un réacteur à eau pressurisée est donné aux environs d'un facteur trente.

Les inconvénients (outre la faisabilité qui n'est pas encore démontrée) sont un cœur plus gros et mobilisant plus de combustible au départ. À l'arrivée, les déchets finaux sont plus encombrants et dans un processus qui n'est pas nettement résolu. Ces déchets contiennent par ailleurs du plutonium d'excellente qualité en grande quantité, ce qui n'est pas forcément un avantage en termes de prolifération.

### LES DÉVELOPPEMENTS EN COURS

#### Bilan neutronique et faisabilité

Il s'agit du point le plus important à résoudre, car il remet en cause le concept lui-même.

Sur le réacteur Phénix, un fertile en périphérie directe du cœur fissile verrait sa teneur en plutonium augmenter dans le temps. Pour atteindre 20 % de plutonium, il faudrait une fluence de 5 à 7. 10<sup>23</sup> N/cm<sup>2</sup> et un fonctionnement pendant environ 6500 jours équivalent pleine puissance. En fait le cœur initial serait épuisé depuis longtemps! Ensuite la configuration

obtenue ne serait pas bonne vis-à-vis des barres de commande, des secteurs d'alimentation en sodium, etc. Seule une reconfiguration permettrait éventuellement de redevenir critique. Même si l'exemple n'est pas bon, parce que Phénix et son combustible ne sont pas optimisés pour ce genre de performance, l'opération sur un TWR semble cependant *a priori* difficile.

En fait les codes de calcul supposent généralement un équilibre entre production et disparition des neutrons. Ils donnent ainsi l'impression par une application directe que le réacteur reste critique dans une configuration évolutive. En fait la dispersion du plutonium créé et le poison des produits de fission qui s'accumulent semblent plutôt conduire à une extinction progressive du cœur. Des apports extérieurs périodiques en réactivité sembleraient nécessaires. Une présentation d'AREVA en 2011 [5] concluait aux erreurs dues aux mauvaises applications des codes et à l'impossibilité neutronique de maintien de criticité du *Traveling Wave* d'un point de vue physique. Depuis, la gestion des cœurs TWR a été changée, la version *Traveling Wave* statique a été abandonnée et la gestion du cœur inclut des réarrangements périodiques du cœur. Il reste donc des développements en cours, pour démontrer la faisabilité du système en termes de maintien de la réactivité, et proposer un mode de gestion correspondant du cœur.

#### Tenue des matériaux

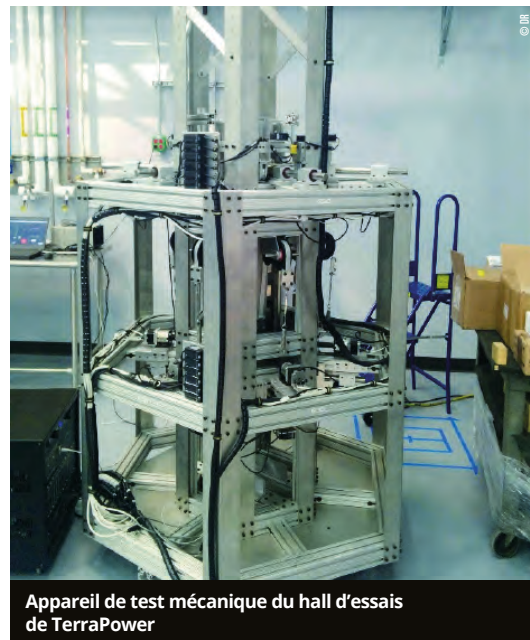
Pour que du combustible reste dix années – ou plus – dans un réacteur rapide, cela suppose des fluences énormes. TerraPower évoque le développement du matériau appelé HT9 pour supporter des doses pouvant viser environ 550 dpa. Actuellement les connaissances sur ce matériau, lors des essais effectués sur le réacteur rapide refroidi au sodium FFTF<sup>4</sup>, s'arrêtent avant

200 dpa [7]. Des développements et des essais sont en cours, en particulier sur le réacteur BOR60<sup>5</sup>, pour améliorer les performances de ce matériau, sous de fortes fluences. Pour les barres de commande des développements de barres « hafniées »<sup>6</sup>, à durée de vie plus longue que celles utilisant le carbure de bore (B4C), sont en cours au Japon [1].

#### Sûreté

Il faut éviter les fuites neutroniques. On est donc loin des cœurs, visant pour baisser les coefficients de vide à augmenter ces fuites par une géométrie dite galette (grand diamètre / faible hauteur) et avec des espaces vides dits *plenum*, au-dessus du cœur. Un cœur TerraPower sera donc plutôt un cœur de grande hauteur avec des fertiles au-dessus et en dessous. Le coefficient de vide global est alors positif, entre 8 à 10 \$ selon les publications. On est loin des cœurs tentant d'atteindre des coefficients de vide globalement nuls ou négatifs.

Ceci étant, l'emploi d'un combustible métallique froid permet de passer



Appareil de test mécanique du hall d'essais de TerraPower

4. Le NaK est un alliage de sodium (Na) et de potassium (K), liquide à température ambiante. 5. BOR60, réacteur expérimental à neutrons rapides russe, a fonctionné près de 265 000 heures depuis 1969. L'autorité de sûreté russe prévoit de prolonger son autorisation de fonctionnement jusqu'en 2020. Voir l'article paru en avril 2015 dans *Nuclear Engineering & Technology*. 6. Le hafnium est un métal au comportement chimique semblable à celui du zirconium utilisé pour la fabrication des assemblages de combustible. Les barres « hafniées » comportent une proportion notable d'uranium. 7. ULOF pour *Unprotected Loss Of Flow*, accident théorique « maximal », avec perte du débit refroidissement sodium, sans aucune chute de barres.



**Vue d'un assemblage de combustibles test pour le réacteur TWR**

correctement les incidents extrêmes type ULOF<sup>7</sup> qui se terminent à des températures de l'ordre de 700 °C, ce qui permet à TerraPower d'affirmer que le risque d'ébullition sodium n'est pas un problème et que la recherche d'un coefficient de vide faible n'est pas leur priorité.

#### **Autres points**

Les assemblages de combustibles sont de grande hauteur et les aiguilles de grand diamètre, ce qui augmente la perte de charge du cœur. Ils sont actuellement conçus dans le cadre d'un contrat avec AREVA.

TerraPower dispose d'un hall d'essais pour tester ses matériels, mais dispose surtout d'un développement contractuel avec une cinquantaine de partenaires, industriels ou académiques.

#### **CONCLUSION**

À partir du concept du réacteur cigare, on est finalement arrivé à un RNR sodium classique. On retrouve même les systèmes de maintenance nécessaires pour un réarrangement périodique du cœur et son remplacement tous les dix ans. TerraPower est dans le créneau d'un RNR sodium qui fonctionnerait sans avoir besoin d'une usine de retraitement. En dehors du cœur, on est apparemment dans des technologies classiques de RNR sodium, sans innovation particulière (du moins dans les publications disponibles). Peu de pays disposent de possibilités de retraitement. Ce concept permettrait aux États-Unis de bénéficier plus rapidement d'un certain

nombre d'avantages des réacteurs rapides sodium, comme l'utilisation en combustible d'uranium appauvri, avec un gain annoncé d'un facteur 30 par rapport aux réacteurs à eau sous pression dans l'utilisation de l'uranium. La technologie est présentée comme simple, facile d'exploitation, et moins proliférante, puisqu'il n'y a pas de retraitement. C'est donc un produit « politiquement correct » à l'export.

TerraPower est très actif en Asie pour tenter de vendre son concept (Corée, Chine, Japon...) et a signé récemment un protocole d'accord avec le *China Institute of Atomic Energy*. La stratégie actuelle semble de tenter d'obtenir une licence en Chine. Le projet dispose de moyens importants et aurait recruté des chercheurs qui ont travaillé sur les anciens réacteurs rapides refroidis au sodium américains, FFTF et EBR II (aujourd'hui fermés et démantelés).

Cependant, des difficultés techniques importantes demeurent. La faisabilité neutronique du concept n'est pas clairement démontrée, et le mode potentiel de gestion du cœur pas toujours précisément explicité. Un repositionnement périodique du combustible semble dorénavant *a minima* nécessaire. Le respect des critères de sûreté fixés pour les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération avec ce type de cœur reste à démontrer. Les matériaux capables de supporter ces flux ne semblent pas aujourd'hui disponibles. Tout cela nécessite une recherche, en cours de développement.

### **références**

- [1] ICAPP 2013 "TERRAPOWER, LLC Traveling Wave Reactor Development Program Overview" [2] ICAPP 2011 "Conceptual Design of a 500 MWe Traveling Wave Demonstration Reactor Plant" [3] ICAPP 2010 "Traveling Wave Reactors: a truly Sustainable and Full Scale Resource for Global Energy Needs." [4] Transactions of the American Nuclear Society - 2012 "Issues in modeling metallic fuel systems with HT9 clad" "HT9 development for the traveling wave reactor" [5] ICAPP 2011 "Some remarks about the neutron flux stability in a traveling wave reactor" Bernard Guesdon et Gilles Perrin - AREVA [6] ANS 2012 "Traveling wave reactor core design using massively parallel precomputation.", "Model biases in high-burnup fast reactor simulations" [7] PBNC 2016 " Using traveling wave reactor technology to provide globally scalable and sustainable, carbon-free energy"

# Abonnez-vous ! à la Revue Générale Nucléaire

Dossiers, reportages, décryptages... Tous les 2 mois, recevez toute l'information de référence sur le nucléaire en France et dans le monde.



Disponible sur  
smartphone  
et tablette

+



Une newsletter  
hebdo avec des  
articles exclusifs

+



Un accès à toutes  
les RGN depuis 1975

1 an = 6 numéros

# 106 €

~~120 €~~ à l'unité

Encore plus de réductions si  
vous êtes membre de la SFEN\* :

- enseignant ou professionnel, **90 € pour 6 numéros** ;
- étudiant ou retraité, **50 € pour 6 numéros**.

**-12%**

## REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE

LA REVUE D'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

**.48 DÉCRYPTAGE**

Comment cultiver  
la mémoire du nucléaire ?

**.68**

Clap de fin  
pour le nu



**.13 DOSSIER HORIZON 2050**

### La place du nu dans les scénarios énergétiques

\* La Société Française d'Énergie Nucléaire est le réseau des professionnels de l'industrie nucléaire en France et est responsable de l'édition de la RGN. Pour adhérer à la SFEN rendez-vous sur [www.sfen.org](http://www.sfen.org).

Pour vous abonner, rendez-vous sur [www.revuegeneralenucleaire.org](http://www.revuegeneralenucleaire.org)

ou retournez ce bulletin complété à l'adresse ci-dessous :

SFEN - 103 rue Réaumur, 75002 Paris - Tel : 01 53 58 32 20 - Mail : [abo-rgn@revuegeneralenucleaire.org](mailto:abo-rgn@revuegeneralenucleaire.org)

Civilité ..... Nom ..... Prénom ..... Organisme ou entreprise .....

Adresse .....

CP ..... Ville ..... Pays .....

Tél ..... E-mail .....

**Oui, je m'abonne à la RGN** (pour les 6 numéros de l'année 2016)

Je règle la somme de  France : 106 € TTC  UE : 126€\*  Hors UE : 128 € TTC

Par  Chèque bancaire ou postal  Virement bancaire  
à l'ordre de la SFEN SFEN : IBAN FR76 3000 4015 9400 0210 02 04 527

Date .....

Signature (cachet de l'entreprise)

Le prix de l'abonnement à la revue RGN est imputable au budget formation permanente de l'entreprise (Circulaire n° 471 du 17.08.1989).

\* pour bénéficier de ce tarif, veuillez indiquer votre N° d'identification de TVA.



## En route vers la COP22 avec Nuclear for Climate

PRÉSENTE EN DÉCEMBRE DERNIER POUR LA CONFÉRENCE DE PARIS SUR LE CLIMAT – LA COP21 – L'INITIATIVE *NUCLEAR FOR CLIMATE* FERA ENTENDRE SA VOIX AU PROCHAIN SOMMET CLIMATIQUE À MARRAKECH AU MAROC DU 7 AU 18 NOVEMBRE PROCHAIN.

Lancée en 2014 par la SFEN, l'American Nuclear Society, et l'European Nuclear Society, l'initiative *Nuclear for Climate* fédère aujourd'hui plus 150 associations scientifiques dans le monde. Plus que jamais, les centaines de milliers de professionnels du nucléaire – de la recherche à la production d'électricité ou la médecine – souhaitent s'engager pour lutter efficacement contre le changement climatique. À la COP22, il faudra aussi compter sur eux.

### 100 % bas carbone

À la COP21, les 195 États ont exprimé collectivement leur volonté de contenir le réchauffement entre 1,5 et 2 degrés d'ici 2050. Alors que les énergies fossiles fournissent 70 % de l'électricité mondiale et que les besoins énergétiques de l'humanité s'accroissent, les membres de *Nuclear for Climate* sont convaincus qu'il y a de la place pour toutes les technologies bas carbone.

Pour la COP22, *Nuclear for Climate* souhaite promouvoir un système énergétique alimenté exclusivement par des énergies bas carbone. À la différence des scénarios « 100 % renouvelables » qui trient les énergies, les membres de l'initiative sont convaincus que l'urgence climatique et les défis qu'elle implique obligent la société à mobiliser l'ensemble des technologies bas carbone connues. Surtout celles qui, comme le nucléaire, ont fait leurs preuves. Selon l'AIE<sup>1</sup>, l'atome a permis depuis 1971, à l'échelle mondiale, d'éviter l'équivalent de deux ans d'émissions de CO<sub>2</sub>. À ce jour, avec l'hydroélectricité, c'est l'énergie qui a le plus contribué à lutter contre les émissions de CO<sub>2</sub>!



Nuclear for Climate mobilise dans le monde entier, comme ici, au Royaume-Uni

### COP sur l'eau

Le prochain sommet climatique accordera une place centrale à l'eau. Quand selon l'UNICEF, 750 millions de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'eau potable, la COP22 proposera des solutions pour répondre aux questions : comment améliorer et faciliter l'accès et la distribution de l'eau au plus grand nombre ? Quelles technologies utiliser ? Comment dessaler l'eau de mer pour la rendre potable ?...

Connus pour leur capacité à produire de l'électricité, les réacteurs nucléaires peuvent aussi être des outils efficaces pour le dessalement de l'eau de mer. Le dessalement permet de convertir en eau douce

une quantité pratiquement illimitée d'eau de mer. Les différentes méthodes, par distillation ou osmose inversée, nécessitent de grandes quantités de chaleur. Aussi compétitives que les centrales thermiques utilisées à cet effet, les centrales nucléaires n'émettent pas de gaz à effet de serre. La COP22 sera l'occasion pour *Nuclear for Climate* de rappeler les avantages du nucléaire. Les membres de l'initiative rappelleront aussi ce qui est fait dans les centrales nucléaires pour préserver l'eau, en matière de prélèvement et de rejets d'effluents.

### Le porte-parole du nucléaire

Habituellement grande absente des conférences environnementales, l'énergie nucléaire, grâce à *Nuclear for Climate*, a trouvé sa place dans le débat sur le changement climatique. À Marrakech, ses membres rencontreront les délégations étrangères et créeront un dialogue constructif entre les acteurs des solutions bas carbone : éolien, hydraulique, biomasse, CSC<sup>2</sup>, solaire... ■

<sup>1</sup>World Energy Outlook, AIE (2014) <http://bit.ly/1u0ZIRS>. <sup>2</sup> Capture et stockage du carbone.



# L'Écothèque : une porte vers l'avenir

À QUOI RESSEMBLERA L'ENVIRONNEMENT DE BURE DANS 100 ANS ? LA FORÊT AURA-T-ELLE CHANGÉ ? L'AIR, LE SOL, LA CHAÎNE ALIMENTAIRE, SERONT-ILS LES MÊMES ? SI DES ÉVOLUTIONS SONT ENREGISTRÉES, SERONT-ELLES NATURELLES OU IMPUTABLES À CIGÉO ? C'EST POUR APPORTER DES RÉPONSES À CES QUESTIONS QUE L'ANDRA A CRÉÉ L'ÉCOTHÈQUE. FACE À SON LABORATOIRE SOUTERRAIN, L'AGENCE Y CONSERVE DES MILLIERS D'ÉCHANTILLONS DANS D'IMPORTANTES CUVES CRYOGÉNIQUES. CE BIJOU TECHNOLOGIQUE UNIQUE AU MONDE BÉNÉFICIERA AUX GÉNÉRATIONS FUTURES ET AU MONDE SCIENTIFIQUE DANS SON ENSEMBLE, BIEN AU-DELÀ DU PROJET CIGÉO.

### GARDIENNE DE LA MÉMOIRE

Au début des années 2000, soucieuse de connaître avec précision l'environnement qui entoure ses installations de Meuse/Haute-Marne (900 km<sup>2</sup><sup>1</sup> répartis sur 82 communes rurales), l'Andra a développé une expertise environnementale solide en partie incarnée par l'Écothèque.

Grâce à des technologies de pointe permettant de conserver des milliers d'échantillons sur plus d'un siècle – le temps de l'exploitation de Cigéo –, l'Écothèque conserve la mémoire de l'état initial de l'environnement autour du futur centre de stockage. À partir de ces éléments, les scientifiques actuels (et les générations futures) peuvent analyser les évolutions enregistrées dans l'environnement en distinguant celles liées à des phénomènes globaux (changement climatique), locaux (développement industriel régional) ou à Cigéo.

### UN PANEL D'ÉCHANTILLONS

Tous les échantillons prélevés et conservés dans l'Écothèque sont représentatifs du territoire. Ils proviennent de plusieurs matrices et sont issus de la chaîne alimentaire agricole locale (lait, fromage, légume, etc.), des écosystèmes forestiers (feuille, champignon,



Préparation des échantillons à la cryogénéisation

bois, gibier, etc.) et aquatiques (eau, poisson, moule, etc.).

Les échantillons sont prélevés de différentes manières : télédétection par satellite, réalisation d'échantillonnage sur le terrain, mesures physicochimiques et radiologiques... Les ingénieurs environnement de l'Andra passent les sols, l'atmosphère, la faune et la flore au peigne fin.

Une fois recueillis, les échantillons sont apportés à l'Écothèque pour être conditionnés, classés et étiquetés.

### UN DATA CENTER POUR LES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

Avec 1 000 m<sup>2</sup> dédiés à la conservation des échantillons, l'Écothèque dispose d'une capacité d'archivage des échantillons unique au monde. Chaque année, 85 000 données sont récoltées et partagées avec le réseau international des écothèques. Chaque échantillon fait l'objet d'un mode de conservation adapté. Trois modes existent : une atmosphère régulée autour de 18 °C pour les échantillons secs de sol et de céréales, une conservation à -80 °C pour les échantillons bruts (sols, eau, os, etc.), et la cryogénéisation pour les végétaux, les produits agricoles ou d'origine animale (viande, œufs, etc.) (voir ci-dessous).

### 42 CUVES CRYOGÉNIQUES

Loin des films de science-fiction où David Aames dans le film *Vanilla Sky* est simplement placé dans un caisson cryogénique pour préserver toute sa jeunesse, la technologie actuelle oblige à passer par plusieurs étapes pour conserver intactes les propriétés des échantillons cryogénisés.

D'abord, les échantillons sont refroidis à l'azote à -150 °C. Cryogénisés, ▶



Récupération pour analyses des supports de prélèvements hydriques dans la Saulx (rivière)

**1.** Au sein de cette zone, des études plus détaillées sont menées sur un secteur de référence d'environ 240 m<sup>2</sup> au pourtour immédiat de Cigéo.

## REPORTAGE

ils sont ensuite broyés une première fois manuellement à l'aide d'un mortier et d'un pilon en céramique avant d'être passés dans une machine pour être broyés plus finement.

Une fois ces trois étapes terminées, les échantillons (devenus des poudres) sont placés dans des flacons de 20 millilitres, puis plongés dans des cuves cryogéniques. La phase gazeuse de l'azote liquide permet alors de conserver les échantillons sans que leur intégrité ni leur composition ne soient altérées. Ce dispositif offre la possibilité aux scientifiques de revenir autant de fois qu'ils le souhaitent sur les échantillons pour mener de nouvelles analyses, parfois même des dizaines d'années plus tard.

### DES DONNÉES DÉJÀ EXPLOITÉES

Pour garantir l'indépendance des données conservées dans l'Écothèque, l'Andra a choisi de confier l'analyse des données à des laboratoires universitaires: le CNRS, l'INRA (Institut national de recherche agronomique), l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) ou encore le Muséum national d'histoire naturelle. Les données récoltées sont d'ores et déjà exploitées pour des recherches sur la biogéochimie, la biodiversité, les dynamiques des territoires (comme l'impact des activités agricoles sur l'environnement)... ■



### en chiffres...

**1 000m<sup>2</sup>**

d'installation

**85 000**

données récoltées chaque année et partagées avec le réseau international des écothèques.

**3**

modes de conservation des échantillons.

**60**

tonnes d'échantillons secs répartis dans les 1 728 mètres linéaires de la pédothèque.

**4**

tonnes d'échantillons cryogénisés, stockés dans 42 cuves.

**7**

tonnes d'échantillons conservés en surgélation dans 12 surgélateurs.



## Portrait

## « Conférencier », un métier au contact du public

SI VOUS SOUHAITEZ VISITER LE LABORATOIRE DE BURE À LA FRONTIÈRE DE LA MEUSE ET DE LA HAUTE-MARNE, VOUS SEREZ CERTAINEMENT ACCUEILLIS PAR FLORENCE ET JEAN-FRANÇOIS, CONFÉRENCIERS DU SITE. LEUR MISSION : ACCOMPAGNER LES CURIEUX ET LEUR FAIRE DÉCOUVRIR LES INSTALLATIONS DE L'ANDRA EN SURFACE ET LE LABORATOIRE À 500 MÈTRES SOUS TERRE.

La diffusion de la connaissance scientifique est l'une des missions de l'Andra qui met un point d'honneur à tisser un lien solide avec le public et toute personne intéressée par la question du stockage des déchets radioactifs.

Pour mener à bien cette mission, l'Agence est épaulée par la société Agora dans l'organisation des visites des installations de Bure. « *Le site est ouvert tous les jours de l'année, y compris le week-end. Au début des années 2000, l'Andra a fait appel à des prestataires pour assurer les visites le week-end. Rapidement, le nombre de visites a augmenté et on s'est rendu compte qu'il était nécessaire que nous intervenions également en semaine* » explique Florence, responsable des conférenciers d'Agora. « *Au début, le public venait essentiellement de la commune de Bure et de ses environs. Des visiteurs sont ensuite venus de la Haute-Marne et de la Meuse. Aujourd'hui, le bouche-à-oreille s'est étendu aux départements limitrophes, les Vosges, la Meurthe et Moselle, l'Aube, et*

*même d'Ile-de-France!* » s'enthousiasme Jean-François. La fréquentation augmente d'année en année : en 2015, 10 442 personnes ont découvert le site et 2 734 ont pu visiter le Laboratoire souterrain. À l'avenir, la fréquentation pourrait encore s'accroître avec l'organisation d'animations pour les enfants le mercredi, le dimanche et pendant les vacances. « *Cela permet de parler du projet avec les parents* » explique Florence. Cette offre séduira-t-elle les opposants ? Peu de chance. « *Ils viennent rarement nous voir pour suivre une visite. Ils restent à l'entrée du site* » s'amuse Jean-François. La beauté du métier de conférencier réside dans sa complexité : accueillir tous les publics, curieux, riverains, élus, délégations étrangères, étudiants, écoliers, faire des présentations en français et en anglais (les délégations étrangères représentent 5 % du trafic annuel). « *Il faut adapter son vocabulaire pour le rendre accessible à tous. Une journée, je peux expliquer la radioactivité à des enfants en primaire et le lendemain recevoir NUMO,*

*l'équivalent de l'Andra au Japon. Le public est toujours différent* » explique Florence. « *Il y a les questions généralistes qui reviennent régulièrement – la durée de vie de la radioactivité, les caractéristiques de l'argile... – et celles qui émergent en fonction de l'actualité : l'achat des terrains, les retombées économiques, etc.* » Comment être incollable sur l'ensemble des sujets : les déchets, la

radioactivité, la sûreté, les matériaux, les retours d'expérience, la maintenance... ? Précédemment enseignante en géologie, Florence dispose d'un bagage scientifique. « *C'est plus simple* » reconnaît-elle. Ce n'est pas le cas de Jean-François qui a suivi un parcours différent : passé par l'informatique, le marketing, le luxe, puis le tourisme, il était profane sur la question des déchets radioactifs il y a encore quatre ans : « *Le plus difficile dans ce métier est d'engranger une grande masse d'informations. Il a fallu beaucoup lire et ne pas avoir peur de poser des questions.* » Une fois cette base de connaissance acquise, les conférenciers suivent une formation continue et ont accès à tous les documents de l'Andra. Chaque semaine, ils se coordonnent avec le service communication du site et débriefent de la semaine écoulée. « *Cela permet de faire remonter les questions des visiteurs et d'enrichir nos messages. Le tout dans un seul but : participer à la diffusion de la connaissance scientifique.* » ■



Jean-François accompagne les visiteurs à 490 mètres sous terre

## Histoire : développement du nucléaire militaire et civil, « l'exception française »

QUATRE PUISSANCES ONT ŒUVRÉ AU DÉVELOPPEMENT DU NUCLÉAIRE EN TANT QUE SOURCE D'ÉNERGIE: LES ÉTATS-UNIS, L'URSS, LA GRANDE-BRETAGNE ET LA FRANCE. DANS CES PAYS, L'ÉPOPÉE DE L'ATOME DÉMARRA D'ABORD PAR LE DÉVELOPPEMENT DE LA BOMBE. ALORS QUE LA SECONDE GUERRE FAISAIT RAGE, NOMBREUX ÉTAIENT CEUX QUI ESPÉRAIENT L'ARRÊT DES COMBATS ET LA CHUTE DES RÉGIMES FASCISTES. LA DÉCOUVERTE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE ET SA DÉCLINAISON À DES FINS MILITAIRES ONT ÉTÉ PERÇUES ALORS COMME UN MOYEN DE PRÉCIPITER LA FIN DE LA GUERRE. DOMINIQUE GRENÊCHE REVIENT SUR CETTE HISTOIRE ET S'INTÉRESSE À LA TRAJECTOIRE PARTICULIÈRE DE LA FRANCE, L'HEXAGONE NE S'ÉTANT PAS ENGAGÉ INITIALEMENT DANS LA VOIE MILITAIRE DIRECTEMENT NI EXPLICITEMENT.

par **Dominique Grenèche**, Docteur en Physique nucléaire

**S**i la grande majorité des historiens s'accorde sur l'idée que le programme de développement de l'énergie nucléaire civile en France fut initié après celui destiné à mettre au point la bombe atomique, certains auteurs contestent cette version de l'histoire. C'est le cas de Robert Belot, Professeur

des universités et auteur d'un essai récent sur la question: *L'atome et la France*. Dans une interview accordée à la RGN, l'historien explique qu'il faut « déconstruire un mythe selon lequel le Général De Gaulle a créé le CEA pour développer le nucléaire militaire en France et doter l'Hexagone de la bombe atomique. C'est totalement faux ».

Alors, qu'en est-il vraiment ? Nous tentons ici d'apporter des éléments de réponse en évoquant d'abord quelques événements historiques fondateurs, puis en rappelant comment se sont enchaînées les idées et les réalisations dans les quatre grands pays pionniers: les États-Unis, l'URSS, la Grande-Bretagne et la France. On s'intéressera d'abord aux trois premiers, avant d'évoquer le cas de la France pour mieux situer sa place dans ce peloton de tête des pays acteurs de l'éclosion du nucléaire.

### LES FAITS HISTORIQUES

Peu après la découverte de la fission par l'équipe de chercheurs allemands menée par Otto Hahn en janvier 1939 (découverte manquée de très peu par l'équipe française dirigée par Frédéric et Irène Joliot-Curie), les scientifiques européens émigrés aux États-Unis – Léo Szilard, Niels Bohr et Enrico Fermi

notamment – comprirent qu'une réaction en chaîne était possible grâce à la libération de plus d'un neutron, lequel provoquait une nouvelle fission dans une masse d'uranium. Le phénomène était d'autant plus probable que des mesures réalisées presque simultanément, mais de façon indépendante, en mars 1939 par l'équipe de Joliot en France et par celle de Fermi aux États-Unis, établirent que ce nombre moyen de neutrons était au moins égal à 2 (la valeur estimée par l'équipe française était même de 3,5). Une telle réaction était alors susceptible de dégager une énorme quantité d'énergie en un temps infime, ce qui laissait présager la possibilité de réaliser une bombe d'une puissance colossale. À cette époque où les canons grondaient en Europe, une telle perspective suscitait les plus grandes craintes chez plusieurs scientifiques, d'autant que la fission avait été découverte en Allemagne! C'est ainsi que Leó Szilárd écrivit une lettre à Joliot le 2 février 1939 pour lui signifier que la réalisation de telles bombes était « extrêmement dangereuse, plus particulièrement entre les mains de certains gouvernements », et il demanda à Joliot de cesser toute publication ouverte sur ce sujet. Quelques jours plus tard, le 14 février, le physicien



Septembre 1945 : Robert Oppenheimer et Leslie Groves au point zéro de l'explosion de la première bombe atomique, champ de tir d'Alamogordo (Nouveau-Mexique)

français adressa au ministère de l'Armement une note secrète de cinq pages dans laquelle il expliqua comment réaliser un engin explosif sur la base d'une réaction en chaîne. Ce même Joliot, avec son équipe, déposa ses célèbres brevets début mai 1939, dont celui sur le « *perfectionnement des charges explosives* » classé secret défense.

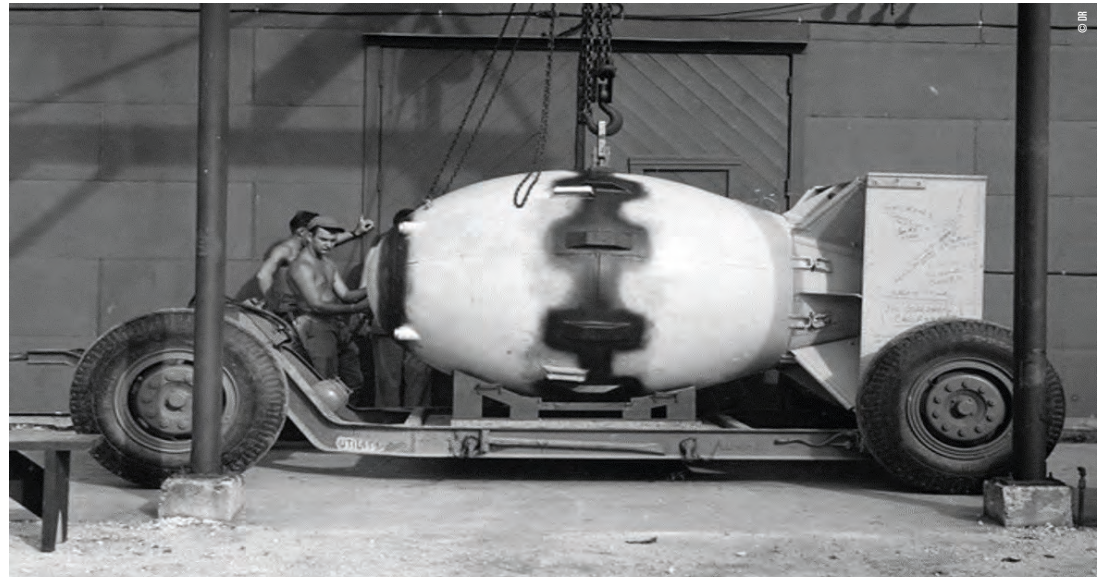
Avec l'extension de la guerre en Europe, les recherches nucléaires basculèrent presque entièrement aux États-Unis et la chape du secret se referma peu à peu sur tous les travaux liés à la fission. À cet égard, le tournant initial fut marqué par la fameuse lettre d'Albert Einstein (rédigée en partie par Szilárd), datée du 2 août 1939, adressée au Président des États-Unis, Franklin Delano Roosevelt, dans laquelle était mentionnée l'avance des recherches françaises mais qui soulignait surtout le potentiel destructeur énorme d'une bombe basée sur une réaction en chaîne.

### L'ÉCLOSION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AUX ÉTATS-UNIS, EN URSS ET EN GRANDE-BRETAGNE

#### Le projet Manhattan

Ce n'est qu'au début de l'année 1942 que les États-Unis initièrent un programme visant à développer l'arme atomique. Cette décision, notifiée par une instruction présidentielle<sup>1</sup>, fut prise peu après l'entrée en guerre du pays suite à l'attaque surprise de Pearl Harbour le 7 décembre 1941. L'engagement du gouvernement américain dans le développement de la bombe atomique se traduisit par le lancement le 16 août 1942 d'un vaste programme: le projet Manhattan. Les travaux menés dans ce cadre aboutirent à l'explosion du premier engin le 16 juillet 1945 dans le désert du Nouveau Mexique.

Le projet Manhattan permit aussi d'acquérir des connaissances dans le développement du nucléaire civil: la première réaction en chaîne auto-entretenue fut réalisée le 2 décembre 1942 (pile CP1 de Chicago) puis les gros réacteurs plutonigènes furent construits à Hanford (Washington). Il s'agissait alors de réacteurs modérés au



Transport de la bombe atomique « Fat man » au plutonium qui détruisit Nagasaki le 9 août 1945

graphite et refroidis avec de l'eau ordinaire (non pressurisée).

Munis des connaissances acquises dans le cadre de cette vaste entreprise militaire, quelques-uns des plus grands scientifiques de l'époque réfléchirent aux applications civiles de l'énergie nucléaire et imaginèrent différents concepts de réacteurs à partir d'avril 1944 au sein d'un groupe *ad hoc* baptisé le « *New Pile Committee* » (qui ne comprenait pas moins de trois prix Nobel de Physique). C'est ainsi que sont nées presque toutes les idées de base qui vont structurer la plupart des concepts de réacteurs à usage civil. Malgré cela, la quasi-totalité des efforts américains déployés dans le domaine nucléaire au cours des premières années d'après guerre seront consacrés aux armes nucléaires. Les moyens réservés aux développements de l'énergie nucléaire pour des applications civiles restèrent néanmoins suffisants pour explorer de multiples options et, curieusement, c'est un réacteur à neutrons rapides, EBR-1, qui pour la première fois produisit quelques centaines de watts d'électricité en 1951, dans le laboratoire national de l'Idaho situé en plein désert.

Mais c'est dans un tout autre domaine que le nucléaire civil industriel prit finalement naissance à partir du nucléaire militaire: celui de la propulsion sous-marine militaire.

En effet, ce sont les réacteurs à eau pressurisée (REP) qui se sont avérés les mieux adaptés pour cette application et qui se sont développés à partir de la fin des années 1940 sous la ferme impulsion de l'Amiral Hyman Rickover. Cette filière de réacteurs domine aujourd'hui très largement le parc nucléaire électrogène mondial<sup>2</sup>.

Ces faits historiques permettent de comprendre qu'Outre Atlantique, le nucléaire militaire a été à la genèse du développement du nucléaire, malgré l'intérêt porté aux réacteurs électrogènes.

#### L'œil de Moscou

En URSS, quelques recherches sur la fission et ses applications furent initiées pendant la deuxième guerre mondiale, notamment sous la conduite du physicien Kurchatov. Les moyens étaient cependant limités. À l'époque, l'Empire soviétique était engagé dans une guerre totale avec l'Allemagne nazie dont les troupes avançaient progressivement sur le sol russe. L'URSS était alors contrainte de déplacer ses installations de recherche nucléaires plus loin à l'est.

Si les avancées scientifiques furent peu nombreuses, l'ex-URSS excella

1. L'instruction du président Franklin Delano Roosevelt fut délivrée le 19 janvier 1942.

2. Voir *RGN 2* (2016).

dans l'espionnage des travaux menés en Occident, notamment ceux réalisés aux États-Unis. La moisson s'est révélée fructueuse puisqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, les Soviétiques sont parvenus à connaître dans le détail les principes de fonctionnement des bombes américaines à uranium enrichi, utilisées à Hiroshima, et au plutonium (Nagasaki). Muni de ces informations capitales et connaissant la réalité des impacts des armes nucléaires, Joseph Staline<sup>3</sup> lança dès la fin de la guerre un programme destiné à se doter de la bombe atomique. Le 29 août 1945, un organisme chargé de ces questions fut mis en place et une première explosion eut lieu le 29 août 1949. L'entreprise fut gigantesque et les efforts déployés (dans des condi-

et refroidissement à l'eau en circuit ouvert. De cette technologie sera dérivée celle des réacteurs électrogènes « RBMK », à graphite et eau bouillante (et uranium légèrement enrichi), dont le premier prototype de 6 MWe alimenta en électricité la ville d'Obninsk à partir de la fin de 1954. Il s'agissait alors d'une première mondiale!

Là encore, le nucléaire militaire précéda le nucléaire civil.

### **Outre-Manche, des réacteurs pour produire du plutonium**

En Grande-Bretagne, les recherches sur la fission et la réaction en chaîne furent essentiellement menées à Cambridge au début de la guerre. En juin 1940, l'équipe dirigée par John Cockcroft fut renforcée par les physiciens français Halban et Kowarski, venus se réfugier Outre-Manche avec dans leurs bagages 26 bidons d'eau lourde.

Les scientifiques britanniques qui coopéraient avec les Américains au début du conflit mondial, se retrouvèrent écartés des recherches menées aux États-Unis début 1942. Ce n'est qu'après les accords de Québec signés entre Roosevelt et Winston Churchill<sup>5</sup> en août 1943, qu'une certaine forme de collaboration fut rétablie dans ce domaine, mais selon des modalités très restrictives. Elle se traduisit essentiellement par le transfert de scientifiques installés sur le sol anglais (dont des Français) au laboratoire canadien de Montréal en relation avec les Américains. Dès la sortie de la guerre, le gouvernement britannique dirigé par Clément Attlee décida de se lancer dans la course à la bombe atomique et à cet effet, il développa son propre programme (sous la direction du physicien nucléaire John Douglas Cockcroft) puisque les Américains avaient décidé de verrouiller toutes les informations, y compris vis-à-vis de leur plus proche allié<sup>6</sup>.

Sans surprise, le cheminement scientifique et technique britannique

fut calqué sur celui des Américains : construction de gros réacteurs à graphite (mais refroidis par de l'air au lieu d'eau ordinaire) pour produire du plutonium. Les deux réacteurs construits à Sellafield divergèrent respectivement en octobre 1950 et en juin 1951, et permirent la production des quantités de plutonium nécessaires à la réalisation de la première bombe atomique. Celle-ci fut larguée sur une île australienne le 30 octobre 1952.

Après cela, le gouvernement britannique décida de lancer rapidement un programme nucléaire civil en créant en 1954 l'*Atomic Energy Authority*. Ce programme fut basé sur le développement de la filière Magnox, dérivée des réacteurs plutonigènes, utilisant un modérateur en graphite mais un refroidissement en CO<sub>2</sub> sous pression.

En Grande-Bretagne aussi, le nucléaire civil hérita du nucléaire militaire.

### **L'exception nucléaire française ?**

Nous avons vu combien les scientifiques français ont contribué aux découvertes de base sur la fission et la réaction en chaîne, domaine dans lequel ils avaient même pris une certaine avance sur leurs collègues étrangers au début de la seconde guerre mondiale. Toutes les recherches furent évidemment interrompues en France après l'invasion des troupes allemandes en mai 1940 et l'occupation de la capitale le 14 juin 1940. Seuls les quelques scientifiques français réfugiés en Grande-Bretagne, puis transférés au laboratoire de Montréal au Canada à partir de décembre 1942 réussirent à poursuivre leurs recherches. La guerre terminée, certains revinrent en France. Leurs connaissances permirent la réalisation du programme français.

Quelques années plus tard, le 11 juillet 1944 à Ottawa (Canada), dans une arrière-salle isolée du siège de la délégation de la France



Le premier réacteur de production de plutonium G1 à Marcoule (Gard) en 1958

tions parfois très difficiles dans ce pays ravagé par la guerre) furent largement à la mesure de ceux qui furent consentis pour le projet Manhattan. Mais les dommages environnementaux et humains furent bien supérieurs à ceux du programme américain.

C'est dans ce cadre que furent conçus et exploités les premiers grands réacteurs de puissance destinés à la production de plutonium dont le premier divergea<sup>4</sup> le 8 juin 1948. Ils étaient du même type que les réacteurs américains de Hanford : modération au graphite

**3.** Joseph Staline a été Secrétaire général du Parti communiste soviétique à partir de 1922, il dirige l'Union des républiques socialistes soviétiques (URSS) à partir de la fin des années 1920 jusqu'à sa mort en 1953. **4.** En physique nucléaire, on appelle divergence d'un réacteur le fait de commencer la réaction en chaîne de fission. **5.** Winston Churchill a été Premier ministre de Grande-Bretagne de 1940 à 1945, puis de 1951 à 1955. **6.** Loi McMahon du 1<sup>er</sup> août 1946.

libre, le français Jules Guéron, accompagné de deux autres compatriotes, Bertrand Goldschmidt et Pierre Auger, révélèrent au Général De Gaulle les perspectives de la fission et surtout les développements en cours aux États-Unis pour la mise au point d'une bombe atomique, dont ils estimaient le succès quasi certain. L'entretien dura seulement trois minutes. Le Général n'oubliera pas.

Le 18 octobre 1945, le Général De Gaulle signe l'ordonnance qui marqua la création du Commissariat à l'énergie atomique (CEA)<sup>7</sup>. Il est écrit dans l'exposé des motifs : « *de pressantes nécessités d'un ordre national et international obligent à prendre les mesures nécessaires pour que la France puisse tenir sa place dans les domaines des recherches concernant l'énergie atomique* ». Quelques jours auparavant, lors d'une conférence de presse, le Général déclara à propos de la bombe atomique que « *nous avons le temps* » mais que « *le gouvernement français ne perd pas de vue cette question* ». Ces propos laissent penser que dans l'esprit du Général, la création du CEA n'était pas destinée à mener des études sur la bombe atomique. Cependant, ils montrent aussi que cette finalité ne fut pas totalement exclue à plus ou moins brève échéance. D'ailleurs, pour ménager l'avenir, l'article 1<sup>er</sup> de l'ordonnance de création du CEA précisait bien que sa mission était de mener des « *recherches... en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale* ». Par ailleurs, l'instance suprême de gouvernance du CEA, le Comité de l'énergie atomique, comptait dans ses rangs un représentant des armées, le Général Dassault, qui, entre autres, était président du comité de coordination des études scientifiques des armées. L'une des raisons qui explique sans doute cette réserve concernant l'obtention de la bombe atomique par la France, est que le pays n'avait pas alors les moyens de s'engager dans ce « *travail d'apocalypse* »

(terme employé par De Gaulle dans ses « *Mémoires de guerre* »).

Certes, au cours des premières années de son existence, le CEA ne mena pas de recherches explicites dans ce sens, mais certaines actions ne furent pas très éloignées de cet objectif, comme l'isolation des premiers milligrammes de plutonium en novembre 1949 par Goldschmidt. Un autre élément qui étaye cette hypothèse est la révocation de Frédéric Joliot de son poste de Haut-Commissaire du CEA le 28 avril 1950, alors qu'il venait de signer « l'appel de Stockholm » prônant l'interdiction totale des armes atomiques, et en faisant une publicité très offensive en France.

Les autorités françaises finirent par engager le pays dans ces travaux de mise au point et de production de bombes atomiques. Les prémisses de cet engagement furent données par une loi programme de cinq ans concernant l'énergie atomique<sup>8</sup>. Elle prévoyait la construction de deux réacteurs de puissance permettant de produire du plutonium et l'exploitation d'une usine permettant de le séparer à partir des combustibles irradiés. À ce stade, rien ne fut officiellement dévoilé sur des travaux concernant la bombe atomique et ce plan quinquennal affichait même des ambitions exclusivement civiles. En réalité, l'entreprise militaire se décide réellement le 26 décembre 1954. À cette époque, Mendès-France, Premier ministre, convoque une réunion d'une quarantaine d'experts. À l'issue des échanges, la décision, tenue secrète, prévoit le lancement du programme de fabrication d'armes et de sous-marins nucléaires.

C'est aussi à cette période que la direction des études et recherche d'EDF, dirigée par Pierre Ailleret, décida d'explorer l'option nucléaire. Le polytechnicien suggéra au Comité de l'Énergie Atomique du 5 novembre 1953, de récupérer l'énergie produite par le premier prototype de réacteur plutonigène G1 alors en projet. Ce fut chose faite même si le rendement électrique du « *petit fourbi électrique* »



fut négatif! En effet, la production d'électricité était inférieure à celle nécessaire pour alimenter les soufflantes du réacteur. Quoi qu'il en soit, la construction et la mise en service réussie des grands réacteurs plutonigènes G2 et G3 à Marcoule (Gard), modérés au graphite et refroidis à l'air marqua une étape décisive dans le lancement d'une filière de réacteurs de puissance à usage purement civil. Une filière *made in France* appelée « UNGG », pour Uranium naturel graphite gaz, et finalement assez proche de la filière anglaise Magnox.

En conclusion, le nucléaire civil a bien hérité en grande partie du nucléaire militaire en France, même si notre pays ne s'est pas engagé initialement dans cette voie de façon directe et explicite, contrairement aux trois autres grands pays pionniers du nucléaire. C'est dans ce sens que nous parlons ici « d'exception nucléaire française ».

7. En 2010, le CEA est devenu le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives 8. Loi programme du 24 juillet 1952

## Fission sur les planches

DEPUIS SA DÉCOUVERTE, L'ATOME INSPIRE METTEURS EN SCÈNE ET COMÉDIENS. LEUR IMAGINATION EST PORTÉE PAR LA SCIENCE, ÉTONNANTE, COMPLEXE ET EXIGEANTE, ET PAR L'HISTOIRE DE CES FEMMES ET DE CES HOMMES, SCIENTIFIQUES DU SIÈCLE DERNIER, TIRAILLÉS ENTRE L'ENTHOUSIASME DE LA DÉCOUVERTE ET LEUR ENVIE D'INVENTER DES TECHNOLOGIES POUR UTILISER CETTE ÉNERGIE. C'EST CETTE HISTOIRE QUE RACONTENT JACQUES ET OLIVIER TREINER DANS LEUR DERNIÈRE PIÈCE: *FISSION*.

par **Boris Le Ngoc**, RGN

**A**u printemps 1945, à la faveur de la progression des Alliés en Allemagne, et notamment des troupes françaises, une mission dirigée par un physicien américain fut chargée de rechercher les principaux responsables scientifiques du projet de bombe nucléaire allemand. Dix physiciens de tout premier plan, membres du Club de l'uranium

d'Hitler, furent ainsi arrêtés, transférés dans un premier temps en France, puis en Belgique, et finalement en Angleterre où ils furent détenus au secret, dans un manoir situé près de Cambridge, à Farm Hall, de juillet à décembre 1945. Farm Hall était géré par les services de renseignement britanniques, et les pièces communes furent équipées de micros cachés qui permirent d'enregistrer les principales

conversations des détenus. Ce huis clos authentique constitue le cadre de la pièce *Fission*, écrite par le physicien Jacques Treiner et son fils Olivier, scénariste-réalisateur. Ils se sont servis des transcriptions des conversations qui permettent de suivre jour après jour, crise après crise, la métamorphose psychologique fascinante à laquelle se livre l'ensemble des détenus. Pourquoi ?



**UNE DOUBLE FISSION**

Le 6 août 1945, les prisonniers de Farm Hall apprennent en écoutant la BBC, qu'une bombe avait été larguée sur Hiroshima (Japon). « *Cela les met au désespoir* » explique Jacques Treiner, co-auteur de la pièce. « *Déjà vaincus en tant qu'Allemands, les voilà vaincus en tant que scientifiques, eux qui pensaient être en avance par rapport aux Alliés. Ils se retrouvent au fond du trou.* » Démoralisés, isolés du monde, sans idée du sort qui les attend, ils tentent de deviner de quoi l'avenir sera fait et d'imaginer comment s'y insérer.

*Fission* n'est pas une pièce sur la science mais sur le scientifique et sa conscience. « *Ce qui est intéressant du point de vue dramatique, et donc théâtral, c'est la diversité des réactions humaines dans ce contexte où ils ont tout perdu* » résume Jacques Treiner. Quand ils comprennent que les Alliés ont découvert la bombe, ces collaborateurs du nazisme s'arrangent avec leur passé. « *Chacun est poussé au bout de ce qu'il est, en tant qu'individu plongé dans une situation historique qui les dépasse tous.* » Trouveront-ils dans leur échec à construire la bombe de quoi s'affranchir de leur participation au régime nazi? Parviendront-ils à réinterpréter leur propre passé pour en faire un conte acceptable, pour eux d'abord, puis pour le monde entier? « *Ils vont transformer ce ratage en une position morale et proclamer: nous étions avec le diable (le nazisme) mais nous ne lui avons pas donné l'arme terrible qui aurait pu le faire gagner. Par contre, nos collègues exilés étaient du côté du bien mais ils ont fait cette arme terrible qu'ils ont envoyée sur des civils.* »

Pendant sa captivité à Farm Hall, en novembre 1945, Otto Hahn reçoit le prix Nobel de chimie pour la découverte de la fission, en 1938 à Berlin. Cette distinction lui avait été attribuée en 1944, mais mis en réserve, le régime nazi interdisant à ses ressortissants de recevoir cette distinction. L'attribution du Nobel à Otto Hahn pose néanmoins quelques questions. En effet, la découverte du phénomène de fission n'est pas

le fruit du travail solitaire de ce chimiste génial, mais résulte d'une collaboration soutenue entre Otto Hahn et Else (« Lise ») Meitner, physicienne autrichienne, considérée alors simplement comme assistante du chimiste... Viennoise, d'origine juive, devenue physicienne malgré le sexisme des milieux universitaires des années 1900, pacifiste indéfectible, surnommée par Albert Einstein la « *Marie Curie allemande* », Else Meitner doit fuir l'Allemagne en 1938 après l'*Anschluss* pour se réfugier en Suède, d'où elle continuera à correspondre, souvent secrètement, avec Otto Hahn. Trois fois pressentie pour le prix Nobel, elle ne l'obtint jamais, même si le prix Nobel de chimie fut attribué à Otto Hahn pour des travaux auxquels elle avait largement contribué – et qu'elle avait même initiés.

Ce personnage romanesque, Jacques et Olivier Treiner l'ont fait intervenir à plusieurs reprises dans la pièce: au début, au moment de la découverte de la fission, puis comme une voix dans la conscience d'Otto Hahn.

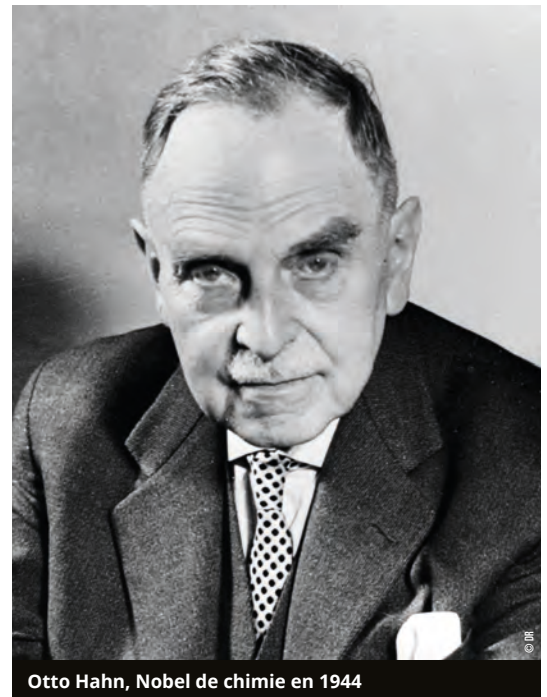
*Fission* dépeint une double fission: celle de la découverte de la fission de l'atome, accompagnée de la fission de la communauté des physiciens lors de l'arrivée au pouvoir d'Adolf Hitler, entre ceux qui sont restés en Allemagne par nationalisme ou engagement politique et ceux qui se sont exilés. On suit cette fission à travers deux couples de personnages, Lise Meitner et Otto Hahn d'une part, Carl Friedrich von Weizsäcker (un des détenus de Farm Hall) et Edward Teller d'autre part (« père » de la bombe à hydrogène utilisée à Nagasaki).

**ENTRE SCIENCE ET ÉTHIQUE**

78 ans après la découverte de la fission, 71 ans après Hiroshima, cette pièce est « *une réflexion sur la responsabilité morale et historique des scientifiques et sur l'engagement personnel face à un régime totalitaire* » explique Jacques Treiner. « *Avec la bombe, la science pose de nouvelles questions: fallait-il inventer un tel objet? Quelle différence entre découvrir la fission et inventer*



Lise Meitner, la Marie Curie allemande



Otto Hahn, Nobel de chimie en 1944

*la bombe? Cette question se pose encore aujourd'hui pour la biologie: certaines découvertes peuvent conduire à élaborer des armes bactériologiques... »*

Entre fascination et frisson, *Fission* est une expérience réussie. La pièce s'est jouée jusqu'au 22 juin au théâtre de la Reine Blanche à Paris.

RÉDACTEUR EN CHEF DU MAGAZINE *USBEK & RICA*, THIERRY KELLER « *EXPLORE LE FUTUR* », CONVAINCU QUE « *L'HUMANITÉ EST À LAUBE D'UNE NOUVELLE ÈRE FONDÉE SUR LE PARTAGE, LA CONNAISSANCE, LE MÉTISSAGE, LE FUN ET L'EMPATHIE* ». CET HYPERCONNECTÉ SE RÉCLAME D'UNE « *RÉVOLUTION COOL* » PERMISE PAR LES RÉSEAUX SOCIAUX. POUR LUI, DEMAIN EST PLEIN DE PROMESSES ET LES RAISONS D'ÊTRE OPTIMISTE SONT MULTIPLES. DANS CET AVENIR À LA FOIS PROCHE ET RADIEUX, QUELLE PLACE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ? RGN LUI A POSÉ LA QUESTION.



© BRUNNEN BOZAS

## En route vers le futur: le nucléaire vu à travers les lunettes d'un prospectiviste

### Thierry Keller

Rédacteur en chef du magazine *Usbek & Rica*

**Q**uadra, fan de foot et de l'OM en particulier, Thierry Keller a été formé à Sciences Po, puis à l'Université où il sera initié à la sociologie. Homme engagé et militant politique, il fait ses premières armes dans un courant du PS, la « gauche socialiste », où il côtoie Julien Dray, Jean-Luc Mélenchon, Marie-Noëlle Lienemann... Il rejoint ensuite Malek Boutih, son ami, défendre les combats de SOS Racisme. En 2010, il est recruté par Jérôme Ruskin, le fondateur du trimestriel, *Usbek & Rica*, un magazine qui « explore le futur de manière transdisciplinaire ». Du titre à l'esprit, le magazine s'inspire du roman de Montesquieu, les *Lettres persanes*, où deux Perses (*Usbek* et *Rica*) regardent la société française du XVIII<sup>e</sup> siècle avec un œil complètement étranger. « Dans notre magazine, c'est pareil. Nous voulons regarder les grands basculements d'aujourd'hui avec ce même regard étonné. Faire en

sorte de découvrir les sujets pour la première fois. »

« Le journal essaie de voir en quoi le progrès technique est aussi un progrès humain. » Pour Thierry, l'avenir repose en bonne partie sur la science. « C'est pour cela que l'on appelle l'anticipation, la "science-fiction". Toute œuvre de fiction qui s'intéresse au futur imagine un décor préalablement scientifique et technologique. » S'il regarde aujourd'hui la science avec bienveillance et humilité, cela n'a pas toujours été le cas : « Petit, je détestais les maths, la science, la physique et la chimie. » Il regrette aujourd'hui cette « posture snobinarde » par rapport à des matières qu'il ne comprenait pas à l'époque.

### Et le nucléaire dans tout ça ?

La première fois que Thierry visite une centrale nucléaire, c'est au Tricastin avec sa classe de 4<sup>e</sup>. « La professeur devait être antinucléaire car nous avions visité les locaux de la CRIIRAD. Je n'avais pas compris qu'ils étaient antinucléaires » s'amuse-t-il. Cette première expérience ne le convainc pas. « Je me méfie des dogmes, quels qu'ils soient. » C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il n'arrive

pas à se satisfaire des débats sur le nucléaire : « La question mériterait d'être plus pragmatique. La vision dogmatique empêche d'y réfléchir sérieusement. » Par contre, la visite du Tricastin fige dans sa mémoire une image du nucléaire, technologie futuriste, « avec des boutons lumineux dans tous les sens », et vintage à la fois, « des formes rectangulaires, des mecs en uniforme des années 1970. »

Côté sûreté, Thierry fait confiance à la filière française : « J'ai visité des centrales, l'usine de La Hague et les centres de l'Andra... j'ai pu discuter avec ceux qui y travaillent : je peux dire que je leur fais confiance. Les mecs sont à BAC +12 ! » Pour autant, il considère que malgré ses atouts environnementaux indéniables, l'atome reste « une énergie fossile dont la matière première [NDLR: l'uranium] se tarira un jour. L'avenir

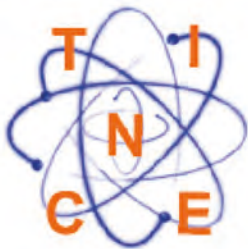
de l'humanité se trouve dans les renouvelables. Il faudrait réussir à mettre tout notre argent pour investir dans ces technologies ! » À quoi ressemblera demain ? Pour cet explorateur du futur, il faut regarder l'avenir avec optimisme : « aujourd'hui est mieux qu'hier, et demain est mieux qu'aujourd'hui. Je vois l'ancien monde s'effondrer et le nouveau monde apparaître de manière chaotique. Je veux participer à ce nouveau monde. J'ai envie de bénéficier de la pénicilline, des transports rapides, d'internet en haut débit partout quand je veux. Je veux que ça capte ! Je veux être connecté ! » Impatient de vivre ce futur, il s'inquiète du développement de l'intelligence artificielle et de l'« algorithmisation de notre existence » : « je veux que demain soit rock'n'roll. Je n'ai pas envie d'un futur aseptisé qui ressemblerait à un Apple Store ! »



### bio express

Thierry Keller est né en 1971. Diplômé de Sciences Po Strasbourg et après un DEA de sociologie, il s'engage à SOS racisme et à l'Unef. Il fait ses premiers pas de journaliste dans un petit canard, *Pote à Pote* !. De 2006 à 2007, il sera rédacteur en chef du magazine *TOC*, puis d'*Usbek & Rica* à partir de 2010. Passionné de prospective, de football et de littérature, il croit que le meilleur reste à venir, pour lui et pour l'humanité.

Conférence Internationale



TINCE  
2016

SAVE THE DATE

Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering

6 | 9 SEPTEMBRE  
À PARIS

## CAP SUR LES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DANS LE GENIE CIVIL NUCLÉAIRE

Le génie civil nucléaire est un métier stratégique et hors norme : conception de nouvelles centrales de production, menaces et risques émergents, augmentation de la durée de fonctionnement, exploitation et démantèlement des bâtiments existants... autant de défis en matière de

génie civil que l'industrie nucléaire doit relever. Plus que jamais les besoins en structures sécuritaires construites avec des méthodes, des techniques et des matériaux innovants se font pressants.

Depuis sa 1ère édition en 2013, la conférence interna-

tionale TINCE (Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering) promeut et partage avec 300 chercheurs et industriels du monde entier les dernières avancées technologiques pour trouver de nouvelles façons de construire les sites nucléaires.

**INSCRIVEZ-VOUS MAINTENANT !**

<https://fr.xing-events.com/TINCE-2016.html>



# DÉCOUVREZ LE NOUVEAU VISAGE DE L'ÉLECTRICITÉ BAS CARBONE.

L'électricité produite par EDF en France en 2013 a émis 9 fois moins de carbone que la moyenne européenne du secteur, grâce à un parc de production composé à 84 % de nucléaire et d'énergies renouvelables. Nous mettons en avant les femmes et les hommes qui innovent et font ensemble d'EDF le champion de l'électricité bas carbone\*.

Rejoignez nos équipes sur [edf.fr/edf-recrute](http://edf.fr/edf-recrute)



Centrale nucléaire de Penly.