

# REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE



L'INFORMATION DE RÉFÉRENCE SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

## .42 DÉCRYPTAGE

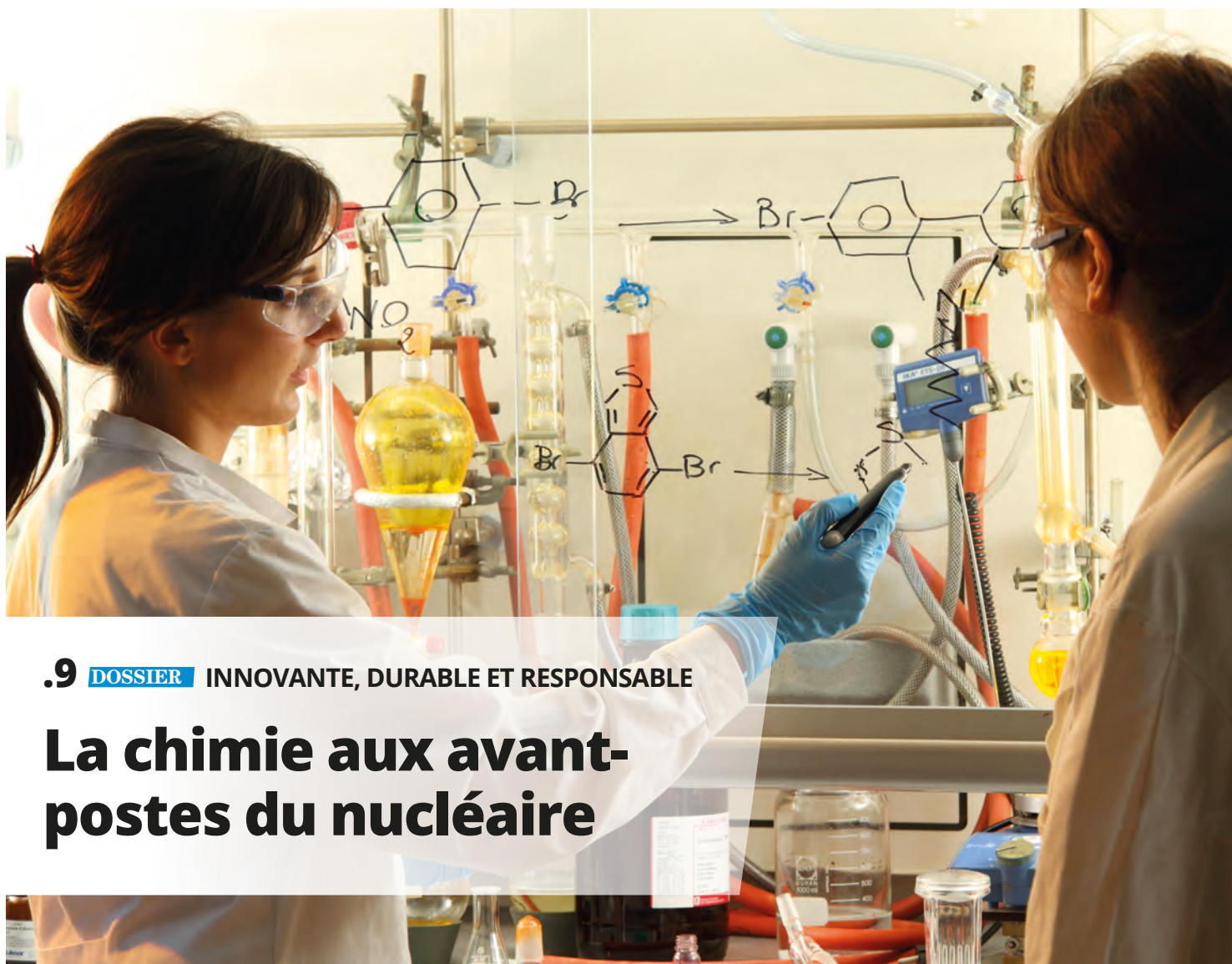
Les renouvelables créeraient-ils plus d'emplois que le nucléaire ?

## .46 SCIENCES ET TECHNIQUES

Russie : BN-800, le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium le plus puissant au monde

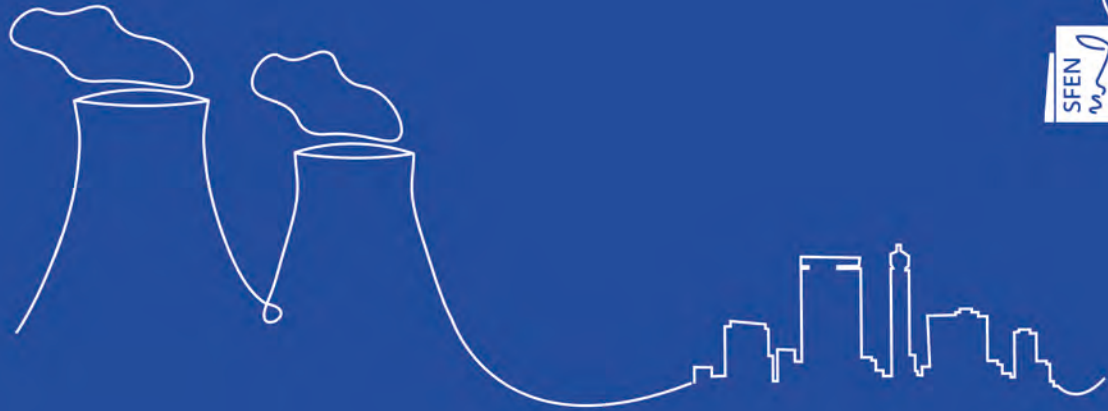
## .54 NUCLÉAIRE ET SOCIÉTÉ

Regards croisés sur un droit méconnu, le droit nucléaire



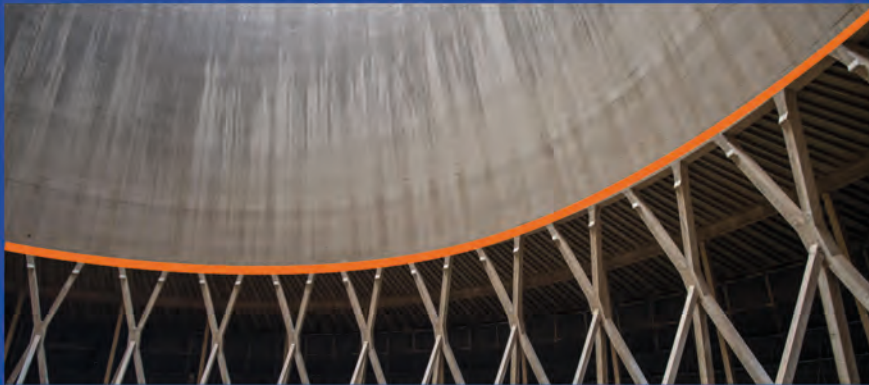
## .9 DOSSIER INNOVANTE, DURABLE ET RESPONSABLE

# La chimie aux avant-postes du nucléaire



## CALL FOR PAPERS !

LAST DAYS TO SUBMIT YOUR ABSTRACTS



### TINCE

28 - 31 AUGUST 2018  
PARIS-SACLAY, FRANCE

International Conference in Technological  
Innovations in Nuclear Civil Engineering

[www.SFEN-TINCE2018.org](http://www.SFEN-TINCE2018.org)



### NUWCEM

24 - 26 OCTOBER 2018  
AVIGNON, FRANCE

International Symposium on Cement-based  
Materials for Nuclear Wastes

[www.SFEN-NUWCEM2018.org](http://www.SFEN-NUWCEM2018.org)

# REVUE GÉNÉRALE NUCLEAIRE

## 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

## RÉDACTEUR EN CHEF Boris Le Ngoc

## RÉDACTION SFEN

Aurore Ernie Daigremont, Cécile Crampon,  
Alexandra Bender, Céline Cudéou,  
Sylvie Delaplace, Tristan Hurel

**CONCEPTION GRAPHIQUE,  
DATA DESIGN, MISE EN PAGES  
ET SÉCRÉTARIAT DE RÉDACTION**  
Rouge Vif Éditorial (Élodie Seghers,  
Dorothee Andrivon)  
www.grouperougevif.fr

## ABONNEMENT/ VENTE AU NUMÉRO

Tél. : 01 53 58 32 10  
www.revuegeneralenucleaire.org/  
abonnement

En 2017 et à titre exceptionnel,  
la cotation des membres SFEN inclura  
l'abonnement à la RGN

**Prix de l'abonnement (6 numéros)**  
+ archives en ligne  
France : 175€ ttc

**Prix du numéro**  
France : 25 € TTC

**PUBLICITÉ**  
Publicité en régie :  
sfen@sfen.org  
Tél. 01 53 58 32 23

**TIRAGE**  
3 000 exemplaires  
Impression : Galaxy  
© couverture : P. Avavian/CEA  
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 NUCLEAIRE  
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...



## .09 DOSSIER

INNOVANTE, DURABLE ET RESPONSABLE

## La chimie aux avant- postes du nucléaire

Discipline scientifique omniprésente, aussi bien  
dans les activités domestiques qu'industrielles,  
la chimie est incontournable dans le développement  
de la plupart des solutions technologiques de demain,  
notamment dans le nucléaire.

## .40 PARTENARIATS

La Suède, miroir scandinave du modèle vert français

## .42 DÉCRYPTAGE

Les renouvelables créeraient-ils plus d'emplois que le nucléaire ?

## .46 SCIENCES ET TECHNIQUES DU NUCLEAIRE

Russie : BN-800, le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium  
le plus puissant au monde

## .50 REPORTAGE

ConnexITY : le laboratoire d'innovations numériques de la filière nucléaire

## .54 NUCLEAIRE & SOCIÉTÉ

- Regards croisés sur un droit méconnu, le droit nucléaire
- Report de l'objectif de réduction de la part du nucléaire en 2025 :  
point de vue d'un juriste

## .62 REGARD SUR

Kara McCullough, Miss États-Unis 2017 et chimiste nucléaire



www.revuegeneralenucleaire.fr



## En 2018, participez !

2018 s'annonce comme une année importante pour la filière nucléaire française. Politiquement, d'abord, la nouvelle orientation du mix électrique sera décidée après un débat public organisé dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). À cette occasion, la SFEN lance dès le 5 février, en partenariat avec l'INSTN, un cours en ligne (MOOC) sur l'énergie nucléaire en France. En libre accès depuis la plateforme officielle de l'enseignement supérieur et de la recherche, FUN, il se déploiera sur six semaines et abordera trois grandes dimensions : économie, environnement, industrie. À raison de deux modules hebdomadaires, il vous permettra d'acquérir une culture générale sur la place de l'énergie nucléaire en France, de répondre aux questions que vous vous posez, de décrypter l'actualité et de compléter vos connaissances. La SFEN contribuera directement aux débats sur la PPE et publiera des notes, accessibles en ligne, sur les coûts du nucléaire du futur, le climat, l'équilibre du système électrique, etc., comme elle l'a déjà fait avec les coûts de production du parc nucléaire français. En 2018, la filière continue aussi sa nécessaire transformation pour être toujours plus compétitive et innovante. Celle-ci passe notamment par le digital et l'industrie du futur. La SFEN y contribuera en consacrant le 15 mars sa convention annuelle sur l'usine nucléaire du futur et en organisant les 26 et 27 juin, en marge du *World Nuclear Exhibition* (WNE), INDEX, événement international consacré à la transformation digitale nucléaire. Avec quatre autres conférences internationales organisées par la SFEN, l'année sera très active. Pour que la filière nucléaire continue d'œuvrer pour l'excellence industrielle et environnementale française, sa communauté, et en premier celle de la SFEN, doit s'informer et s'impliquer. L'année 2018 en donne une occasion unique.

**Valérie Faudon**

Déléguée générale de la SFEN

### International

## France et Russie accentuent leur coopération dans le nucléaire

LA FRANCE RENFORCE SA COOPÉRATION AVEC LA RUSSIE DANS LE STOCKAGE FINAL DES DÉCHETS RADIOACTIFS ET DANS LE DÉVELOPPEMENT DE RÉACTEURS DE 4<sup>e</sup> GÉNÉRATION.

### L'Andra partagera son expertise avec Rosatom

Rosatom, le géant nucléaire russe, et l'Andra ont signé un accord dans le but de développer une coopération dans la construction en Russie d'un système national pour la gestion des déchets radioactifs. Cet accord prévoit l'échange d'informations (scientifiques, techniques, sociales et juridiques) et le partage des résultats de R&D. Il fait suite à la signature en 2012 d'un protocole d'accord. Les deux entités organiseront des revues techniques et des visites pour des experts dans les sites d'entrepôts en Russie et en France. Début 2017, Denis Egorov, directeur général de l'Opérateur russe pour la gestion des déchets radioactifs (NO RAO), louait l'approche française et la création de l'Andra. À la

différence de l'Hexagone, qui privilégie un sol argileux pour Cigéo, la Russie prévoit d'utiliser un massif granitique, comme en Finlande, pour le stockage des déchets hautement radioactifs et à durée de vie longue.

### Le CEA testera ses technologies sodium en Russie

De son côté, le CEA a signé un contrat avec le *Research Institute of Atomic Reactors* (RIAR). Il lui permettra de réaliser des tests d'irradiation sur le réacteur à neutrons rapides BOR-60 exploité par le RIAR. Les tests doivent permettre de prouver l'efficacité et la conception des composants. Les résultats seront utilisés pour le réacteur de 4<sup>e</sup> génération refroidi au sodium Astrid.



Le réacteur de recherche BOR-60 est en exploitation depuis décembre 1969. À terme, il sera remplacé par le réacteur à haut flux MBIR (photo), en construction sur le même site depuis 2015

Environnement

# D'où provient le ruthénium-106 prélevé dans l'atmosphère ?

DU RUTHÉNIUM-106 A ÉTÉ DÉTECTÉ FIN SEPTEMBRE 2017 PAR PLUSIEURS RÉSEAUX EUROPÉENS DE SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ DANS L'ATMOSPHÈRE, À DES NIVEAUX DE L'ORDRE DE QUELQUES MILLIBECQUERELS PAR MÈTRE CUBE D'AIR. LES FAIBLES QUANTITÉS DE CET ISOTOPE RADIOACTIF PROVIENDRAIENT DE RUSSIE.

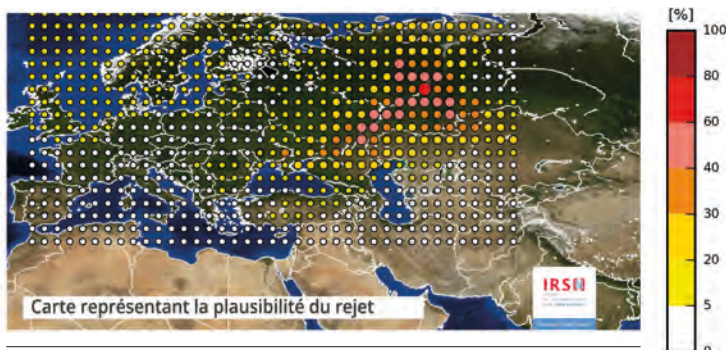


Figure 1: concentrations simulées et observées dans un facteur 2 en fonction du point de rejet (%)

Les experts russes de la commission d'enquête spéciale créée par Rosatom ont avancé début décembre une autre piste, celle de la rentrée dans l'atmosphère d'un satellite dont la désintégration aurait pu conduire au dégagement dans l'air de Ru-106. Cette piste est rejetée par l'IRSN. L'institut français, à l'origine de la découverte, avance l'hypothèse d'un rejet issu d'une installation liée au cycle du combustible nucléaire ou de fabrication de sources radioactives.

Détectée fin septembre par l'IRSN, la présence excessive de ruthénium-106 dans l'atmosphère européenne a donné cours à différentes hypothèses, dont celle d'un accident nucléaire entre la Volga et l'Oural. Dans un communiqué publié début décembre, Rosatom a précisé qu'aucun accident n'est à reporter dans

l'ensemble de ses installations. Selon les experts, cette présence excessive ne peut être à l'origine d'un accident de centrale, qui impliquerait la détection d'autres éléments, comme du césium. Le complexe nucléaire russe Maïak, pointé du doigt, ne serait donc pas à l'origine de cette présence selon la Russie.

La quantité de Ruthénium-106 relevée dans l'atmosphère était 100 à 1 000 fois moins élevée que les niveaux autorisés et n'a présenté aucun risque pour la santé des populations européennes.

## États-Unis : Dominion veut exploiter une autre centrale jusqu'à 80 ans

L'opérateur américain Dominion Energy a annoncé qu'il demanderait d'ici 2020 une demande d'autorisation auprès de la NRC pour faire fonctionner jusqu'à 80 ans les unités 1 et 2 de sa centrale de North Anna, en Virginie. En 2015, il avait déjà informé qu'il demanderait à la NRC une autorisation d'exploitation de vingt années de plus pour la centrale de Surry en Virginie, déjà autorisée à fonctionner jusqu'à 60 ans. Si la NRC autorise ces deux prolongations, les deux centrales fonctionneront respectivement jusqu'en 2060 et 2053.

## DES VILLES FINLANDAISES ÉTUDIENT LE POTENTIEL DES SMR POUR LE CHAUFFAGE URBAIN

Les villes d'Helsinki, d'Espoo et de Kirkkonummi ont lancé des études pour déterminer la possibilité de remplacer le chauffage urbain assuré aujourd'hui par du gaz et du charbon par des petits réacteurs modulaires (SMR).

La conduite de cette étude de faisabilité, soutenue par de nombreux acteurs locaux, fait notamment suite aux efforts de l'ONG éco-moderniste *Energy for Humanity* menés pour promouvoir cette solution de décarbonation. Si les études s'avèrent concluantes, elles pourraient permettre de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage en Finlande, en même temps que les importations de combustibles fossiles. En effet, plus de la moitié des émissions de gaz à effet de serre d'Helsinki provient du chauffage urbain.



Le nucléaire, ce n'est pas mauvais pour les émissions de CO<sub>2</sub>, c'est la manière la plus décarbonée de produire de l'électricité

Emmanuel Macron, président de la République (France 2)



Pays des Pharaons

# La Russie construira la **première centrale nucléaire** égyptienne



© VIA MEDIA COMMIS

APRÈS LES ÉMIRATS ARABES UNIS, DONT LE PREMIER RÉACTEUR DÉMARRERA EN 2018, L'ÉGYPTE DEVRAIT ÊTRE LE DEUXIÈME PAYS DU MONDE ARABE À DISPOSER DE LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE POUR ASSURER SES BESOINS EN ÉLECTRICITÉ.

La Russie et l'Égypte ont signé en décembre un accord de 30 milliards de dollars pour construire la première centrale nucléaire égyptienne. De cette somme, 85 % seront prêtés par la Russie. Si l'Égypte possède déjà deux réacteurs nucléaires, ils sont uniquement dédiés à la recherche et à la formation. L'entreprise russe Rosatom assurera la construction des quatre réacteurs VVER-1200. Localisée à El-Dabaa, à l'ouest d'Alexandrie, la première centrale

nucléaire égyptienne contribuera à assurer les besoins grandissants d'une population égyptienne en croissance. Surtout, une part importante de la puissance des réacteurs sera directement dédiée au dessalement de l'eau, si bien que la puissance électrique par unité sera réduite à 927 MWe. Au-delà de la construction des réacteurs, Rosatom fournira le combustible et assurera la maintenance des installations. La première unité est prévue pour entrer en service en 2026.

La centrale d'El-Dabaa alimentera notamment en eau potable les quatre millions d'habitants de la ville voisine d'Alexandrie

Sûreté

# Redémarrage de la centrale de **Tricastin**

APRÈS DEUX MOIS D'ARRÊT SUITE À UNE DEMANDE DE L'ASN, LA CENTRALE A RÉALISÉ DES TRAVAUX DE RENFORCEMENT DE LA DIGUE DU CANAL DE DONZÈRE-MONDRAGON DANS LA DRÔME. 85 500 TONNES DE MATÉRIAUX DE REMBLAI ONT SERVI À L'ÉLARGISSEMENT D'UNE PARTIE DE LA DIGUE POUR RENFORCER LA PROTECTION EN CAS DE SÉISME EXTRÊME.

Les réacteurs de la centrale nucléaire de Tricastin (Drôme) ont été autorisés par l'ASN à redémarrer début décembre. En septembre, l'Autorité de sûreté avait exigé leur arrêt en raison de la non tenue d'une digue protégeant le site du canal voisin en cas de séisme majoré de sécurité (SMS). Ce dernier correspond à un séisme cinq fois plus puissant que le plus puissant séisme enregistré au cours des milles dernières années dans la région du site. Les travaux de renforcement de la digue menés par EDF ont été jugés suffisants par l'Autorité de sûreté.



© EDF / CIVIL ENERGY

Noria de camions chargés de matériaux de remblai, destinés à recouvrir la première couche drainante de la digue

Climat

# La stratégie environnementale de New AREVA récompensée

EN MODERNISANT SES INSTALLATIONS ET EN PRIVILÉGIANT CERTAINES TECHNIQUES, NEW AREVA EST PARVENU À CONSIDÉRABLEMENT RÉDUIRE SES ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub> AINSI QUE SA CONSOMMATION D'EAU ET D'ÉNERGIE.



La mise en service de l'usine d'enrichissement George Besse II sur le site du Tricastin a considérablement baissé la consommation d'énergie et d'eau de New AREVA

Avec deux années d'avance, New AREVA est en passe d'atteindre son ambition de réduire de 80 % sa consommation d'énergie et de moitié ses émissions de CO<sub>2</sub> en 2020 par rapport à 2004. Au début des années 2000, New AREVA avait instauré un programme de réduction de son empreinte environnementale comprenant notamment des objectifs ambitieux de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre, de sa consommation d'énergie et d'eau. Cette stratégie ambitieuse a porté ses fruits : entre 2004 et 2016, les émissions de CO<sub>2</sub> ont baissé de 43 % et

les consommations d'énergie et d'eau respectivement de 87 % et 57 %.

### Des efforts tout au long de la chaîne de production

New AREVA est parvenu à réduire de 25 % les émissions de gaz à effet de serre par tonne d'uranium produite grâce à de nouveaux procédés industriels.

Dans la conversion de l'uranium, sur l'usine de Malvési, la mise en service de la nouvelle usine Comurhex II, la plus moderne au monde, a permis de réduire de 80 % les rejets de gaz à effet de serre de cette activité.

Au Tricastin (conversion et enrichissement de l'uranium), la mise en service de la nouvelle usine George Besse II a permis de réduire de 96 % la consommation d'électricité. La modification des installations de production de fluor, couplée à la mise en service de Comurhex II, a permis de réduire de 85 % les émissions de gaz à effet de serre pour cet usage. Enfin, à La Hague (recyclage des combustibles usés), l'utilisation privilégiée de l'électricité par rapport au fuel lourd dans l'élaboration de vapeur pour les besoins du site a permis de réduire de 42 % les émissions de CO<sub>2</sub>.

## L'« HORIZON » S'ÉCLAIRCIT POUR LES DEUX RÉACTEURS D'HITACHI



L'Office britannique de régulation nucléaire (ONR) a approuvé mi-décembre le design du réacteur bouillant (ABWR) pour la centrale de Wylfa Newydd (Pays de Galles). Via « Horizon Nuclear Power », Hitachi-GE prévoit la construction de deux réacteurs (2,7 GW). L'attention va maintenant se porter sur le financement du projet. Les autorités britanniques et japonaises envisageaient un financement public de Wylfa. Quatre réacteurs ABWR ont déjà été mis en service au Japon depuis 1996 et deux autres y sont en construction. Wylfa figure parmi les huit sites que le gouvernement britannique a retenu en 2010 pour abriter de nouvelles centrales nucléaires.



Retrouvez toute l'actualité de la filière nucléaire sur [revuegeneralenucleaire.fr](http://revuegeneralenucleaire.fr)

- Reportage Greenpeace : les centrales nucléaires sont-elles sûres ?
- D'ITER aux start-up, le rêve de la fusion se rapproche
- L'Allemagne, une menace pour le climat en Europe
  - Le digital, facteur de compétitivité et d'agilité pour l'industrie nucléaire



*The Nuclear Institute's*

*11th International Conference on the*

# Transport, Storage and Disposal of Radioactive Materials

The Nuclear Institute invites you to the **11th International Conference on the Transport, Storage and Disposal of Radioactive Materials**, which will take place from the evening of the 15 May to the 17 May 2018.

Held every three years the conference is dedicated to all aspects of packaging for the transport, storage and disposal of radioactive and nuclear materials.

This event will provide an international forum for designers, operators, research organisations and regulators from around the world share their expertise on successes and challenges, plus an excellent place to renew and develop professional and business contacts.

As with previous conferences in this series, the event will be complemented by an exhibition in which suppliers of relevant products and services are invited to participate.

## CONFERENCE CONTACT DETAILS

### Event Organiser

For any further details on the conference please contact the event organiser Amanda MacMillan, The Nuclear Institute

T: +44 (0) 203 475 4701

E: [events@nuclearinst.com](mailto:events@nuclearinst.com)

### Exhibition and Corporate Sponsorship Opportunities

For further information on the exhibition or corporate sponsorship opportunities please contact Lisa Jones Taylor, Nu-Tech Associates Ltd

T: +44 (0)1946-695554

E: [sales@nu-techassoc.co.uk](mailto:sales@nu-techassoc.co.uk)

## Official Partners



### Conference:

15-17 May 2018

Royal Institute of British Architects (RIBA),  
66 Portland Place London W1B 1AD

### Opening Reception:

# ARUP

Kindly hosted by Arup,  
8 Fitzroy Street London W1T 4BQ

### Conference Banquet:

Premium venue to be announced Summer 2017.



INNOVANTE, DURABLE ET RESPONSABLE

## La chimie aux avant-postes du nucléaire

DISCIPLINE SCIENTIFIQUE OMNIPRÉSENTE, AUSSI BIEN DANS LES ACTIVITÉS DOMESTIQUES QU'INDUSTRIELLES, LA CHIMIE EST INCONTOURNABLE DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA PLUPART DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DE DEMAIN, NOTAMMENT DANS LE DOMAINE ÉNERGÉTIQUE. DANS LE NUCLÉAIRE, LA CHIMIE INTERVIENT À DIFFÉRENTES ÉTAPES : DE L'EXPLOITATION À L'ÉLABORATION DU COMBUSTIBLE EN PASSANT PAR LES RÉACTEURS DE DEMAIN.

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable  
LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE

Le rôle indispensable de la chimie  
pour maîtriser les rejets **10**

Les procédés chimiques au service  
des sources froides **16**

La chimie de l'eau dans  
ses différentes phases d'exploitation **19**

La chimie, un levier  
pour l'avènement des réacteurs  
de quatrième génération **22**

Règlement REACH :  
quelles évolutions pour l'industrie  
nucléaire ? **31**

La chimie du recyclage des matières  
nucléaires, une expertise  
et un savoir-faire français inégalés **33**

Feu vert pour la construction  
et l'exploitation d'une unité  
de traitement des nitrates (TDN)  
à Malvésí **37**

# Le rôle indispensable de la chimie pour maîtriser les rejets

Par **Laure Viricel**, EDF/DIPNN/Ceidre



## en substance...

Pour produire de l'électricité, une centrale nucléaire utilise des substances chimiques qui protègent et traitent ses circuits. Ces substances sont choisies pour leur efficacité à assurer leur fonction, mais les choix prennent également en compte la santé des travailleurs et le moindre impact des substances sur la santé du public et sur l'environnement. Elles génèrent des effluents liquides et gazeux, radioactifs et chimiques, dont les rejets dans l'environnement font l'objet d'études d'impact montrant leur caractère négligeable. Ces rejets sont réglementés, et le programme de contrôle des effluents et de surveillance de l'environnement mis en œuvre sur chaque site permet de vérifier le respect du cadre de l'étude d'impact. Au-delà du respect des limites réglementaires de rejet, l'exploitant agit pour réduire les rejets issus de ses installations, autant que raisonnablement possible et à des coûts économiquement acceptables, en vertu du principe d'optimisation. Il communique annuellement à l'ASN et à la commission locale d'information ses prévisions de rejets et les rejets réalisés.

L'exploitation d'une centrale nucléaire requiert l'utilisation de produits chimiques dans l'objectif d'assurer le conditionnement optimal des circuits d'eau ou des circuits diphasiques eau-vapeur afin de contrôler la réactivité neutronique (enjeu sûreté), de maîtriser les phénomènes de corrosion et de déposition des produits de corrosion (enjeux sûreté, radioprotection et durée de fonctionnement), et de maîtriser les phénomènes d'entartrage et de développement de micro-organismes pathogènes des circuits de refroidissement (enjeux

performance et sanitaire). Ainsi, chaque substance chimique utilisée assure une fonction précise, soit en phase d'exploitation, soit lors d'opérations de maintenance telles que les nettoyages chimiques des générateurs de vapeur ou les actions de décontamination chimique de certains matériels ou circuits. Cette utilisation de produits chimiques s'inscrit dans le respect de la réglementation assurant la protection des travailleurs (Code du travail). Par ailleurs, elle donne lieu à des rejets dans l'environnement et place la chimie au cœur des enjeux associés à la maîtrise des impacts environnementaux et sanitaires.

Ces derniers sont réglementés en France par l'application :

- › des directives et règlements européens (par exemple la directive-cadre sur l'eau, les règlements REACh, CLP ou Biocides) ;
- › de nombreux textes réglementaires nationaux ou locaux (lois, ordonnances, décrets, arrêtés, décisions de l'Autorité de sûreté nucléaire), parmi lesquels le code de l'environnement, l'arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux Installations nucléaires de base (dit « arrêté INB »), la décision « Environnement » ou encore les décisions « Modalités » et « Limites » encadrant les rejets des INB.

Dans ce contexte, cet article présente les modalités de choix des substances chimiques utilisées, la nature des rejets en exploitation, hors conduite incidentelle et accidentelle des installations, ainsi que les actions de maîtrise et d'optimisation des rejets.

### CHOIX DES SUBSTANCES CHIMIQUES UTILISÉES

Les substances chimiques utilisées sont choisies pour leur efficacité à assurer leur fonction, mais les choix prennent également en compte la santé des travailleurs et le moindre impact des substances sur la santé du public et sur l'environnement. Ce dernier est évalué dans des études d'impact montrant le caractère négligeable de l'impact des rejets de ces substances.

Ainsi, les impacts environnementaux et sanitaires, en relation avec la chimie, sont systématiquement évalués dès les études de conception, en intégrant les exigences réglementaires et la sensibilité du milieu récepteur, et en se basant sur la nature des substances utilisées et rejetées, leurs produits de décomposition, leur toxicité, leur devenir dans les écosystèmes, la durée et l'importance de l'exposition à ces substances. Suivant la nocivité et les enjeux environnementaux et sanitaires d'une substance, les modalités de rejets de cette substance sont optimisées,

le plus souvent au travers d'une réduction des effluents à la source et/ou d'une destruction de la substance avant rejet. Dans les cas les plus contraignants, un produit alternatif peut être choisi.

Par exemple, toute conception ou toute évolution significative du circuit primaire fait l'objet d'une estimation de son impact sur les effluents et déchets, tant en quantité qu'en qualité (nature des radionucléides, consommations des filtres et résines échangeuses d'ions...).

“  
**LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES, EN RELATION AVEC LA CHIMIE, SONT SYSTÉMATIQUEMENT ÉVALUÉS DÈS LES ÉTUDES DE CONCEPTION.**  
 ”

Dans le circuit secondaire, les matériaux principalement utilisés sont les aciers au carbone, pour lesquels le mécanisme principal de dégradation est la corrosion-érosion. Limiter cette dernière permet de limiter la quantité de fer oxydé transporté vers les générateurs de vapeur (GV) et donc l'encrassement du faisceau tubulaire des GV et le risque de colmatage des plaques entretoises ; cela permet aussi, par voie de conséquence, de minimiser les nettoyages chimiques des GV. Dans ce circuit, la corrosion-érosion est limitée en mettant en œuvre un traitement de type « *All Volatile Treatment* » (AVT) visant un pH aussi élevé que possible, compatible avec les matériaux. Afin de limiter les rejets et les déchets en exploitation, les choix actuels faits en France conduisent à retenir un pH maximum à 25 °C d'environ 10 à l'alimentation des GV. L'obtention du pH requis se fait *via* l'ajout contrôlé d'amines volatiles :

l'ammoniaque, la morpholine ou l'éthanolamine. Le choix de ces amines et de leurs concentrations respectives tient compte de leurs actions intrinsèques vis-à-vis de l'encrassement et du colmatage des GV, ainsi que de leur impact environnemental et sanitaire ; il doit permettre de respecter les exigences réglementaires associées à la santé des travailleurs ainsi qu'aux rejets et de limiter les effluents et déchets issus des opérations de nettoyages chimiques des GV.

### NATURE DES REJETS

L'exploitation d'une centrale nucléaire entraîne la production d'effluents radioactifs, chimiques et thermiques dont les rejets dans l'environnement sont strictement réglementés. Dans la suite de l'article, seuls les rejets chimiques et radioactifs sont traités.

### Rejets chimiques

Les substances chimiques rejetées par une centrale nucléaire se classent en deux catégories :

- › les substances chimiques associées aux effluents radioactifs liquides issus du circuit primaire et des circuits auxiliaires nucléaires ;
- › les substances chimiques non radioactives provenant de la salle des machines (circuit dit « secondaire » comprenant le poste d'eau, les générateurs de vapeur, le groupe turbo-alternateur...), du circuit d'eau brute de refroidissement du condenseur (dit « circuit tertiaire »), de la fosse de neutralisation des effluents de la station de production d'eau déminéralisée, de la station d'épuration des eaux usées, des égouts collectant notamment les eaux de pluie.

Les rejets concernent donc :

- › les substances chimiques utilisées pour le contrôle de la réaction nucléaire (acide borique) ou pour le conditionnement chimique des circuits afin de les protéger de la corrosion (lithine, hydrazine, morpholine, ammoniaque, éthanolamine,

- phosphates...);
- › les substances chimiques issues du traitement antitartre des circuits de refroidissement (sulfates, chlorures, polyacrylates) et des sous-produits issus du traitement biocide (oxydants résiduels, nitrates, nitrites, AOX, THM pour les sites en bord de rivière; oxydants résiduels et substances organohalogénées-bromées pour les sites en bord de mer);
- › pour les centrales concernées, les rejets de cuivre et de zinc dus à l'usure des tubes en laiton des condenseurs.

### Rejets radioactifs

L'énergie produite par un réacteur nucléaire provient de la fission nucléaire. Le réacteur est le siège de la formation de substances radioactives (radionucléides) dont seule une infime partie se retrouve dans les effluents gazeux et/ou liquides. Parmi les substances radioactives susceptibles d'être présentes dans les effluents, on distingue :

- › les produits de fission (PF), créés dans le combustible par fission des atomes d'uranium ou de plutonium. Ce sont des radionucléides, tels que les iodes-131 et 133, les césiums-134 et 137, le krypton-85, le tritium, le carbone-14, le strontium-90. Ils restent en quasi-totalité confinés dans le combustible. Une faible quantité peut toutefois migrer dans l'eau du circuit primaire, en cas d'inétanchéité du gainage du combustible, et donc se retrouver dans les effluents;
- › les produits d'activation (PA), créés à l'extérieur du combustible par l'action des neutrons de fission sur les composants sous flux neutronique (cuve, tuyauteries, grappes de commande...) ainsi que

sur les éléments chimiques contenus dans l'eau du circuit primaire, tels que le bore, le lithium et les produits de corrosion relâchés par les surfaces en contact avec le fluide primaire. Les principaux produits d'activation sont les cobalts-58 et 60, le manganèse-54, l'antimoine-124, l'argent-110m, le tritium et le carbone-14;

- › les actinides, formés par capture de neutrons (américium-241, curium-242, plutonium-239...), qui restent confinés à l'intérieur de la gaine des crayons de combustible.

### MAÎTRISE ET OPTIMISATION DES REJETS

La maîtrise et l'optimisation des rejets constituent des principes fondamentaux de la conception et du fonctionnement des centrales nucléaires, consistant à mettre en œuvre, à un coût raisonnablement acceptable, les meilleures pratiques d'exploitation et les meilleurs procédés de traitement et de rejet des effluents.

La gestion optimisée des effluents et des rejets consiste à :

- › réduire à la source la production d'effluents;
- › collecter les divers effluents afin de traiter chacun d'eux le plus efficacement possible, voire dans certains cas les recycler, en maintenant un équilibre entre la production d'effluents et de déchets;
- › entreposer et contrôler les effluents pour garantir le respect des exigences réglementaires.

### Rôle de la chimie dans la réduction des effluents à la source

L'optimisation du conditionnement chimique des circuits permet de limiter les rejets de substances chimiques au strict nécessaire, tout en préservant l'efficacité attendue de ces traitements. Ainsi, le choix de la concentration et/ou du niveau d'enrichissement des produits de conditionnement dans les différents circuits contribue à limiter la production d'effluents.

Par exemple, dans le circuit primaire :

- › la lithine utilisée est enrichie en lithium-7 (> 99,9%) pour éviter la formation de tritium par activation du lithium-6 présent dans le lithium naturel. En effet, contrairement au lithium-6, le lithium-7 ne produit pratiquement pas de radio-isotope par activation neutronique, limitant de fait les rejets radioactifs;
- › dans le cas de l'EPR, l'utilisation d'acide borique enrichi en bore-10 permettra de réduire les rejets de bore.



### LA MAÎTRISE ET L'OPTIMISATION DES REJETS CONSTITUENT DES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LA CONCEPTION ET DU FONCTIONNEMENT DES CENTRALES NUCLÉAIRES.



Jusqu'au milieu des années 1980, l'eau du circuit secondaire était chimiquement conditionnée à l'ammoniaque. Cette substance avait été choisie pour différentes raisons : mise en œuvre facile et peu coûteuse, produit courant bénéficiant d'un bon retour d'expérience. À partir des années 1983-1984, l'ammoniaque a été progressivement remplacée par la morpholine pour traiter plus efficacement les phénomènes de corrosion-érosion rencontrés sur les structures en acier au carbone du poste d'eau et les phénomènes de corrosion généralisée; ce remplacement a alors permis de limiter les rejets azotés. Depuis le début des années 2010, le basculement de toutes les unités du parc d'EDF à l'éthanolamine est en cours, en remplacement de la morpholine, afin de limiter les phénomènes de corrosion-érosion en tout point du poste d'eau et d'obtenir le meilleur



Station de production d'eau déminéralisée d'un site EDF

compromis entre la protection des matériels et les rejets. En effet, grâce à sa plus forte basicité, les quantités nécessaires d'éthanolamine sont plus faibles que celles de morpholine pour maintenir le pH de moindre corrosion; l'éthanolamine génère donc moins de rejets. Par ailleurs, l'éthanolamine est plus biodégradable que la morpholine. L'hydrazine est utilisée dans le circuit secondaire en fonctionnement ou à l'arrêt pour maintenir un milieu réducteur et limiter les phénomènes de corrosion. Dans l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de substitut efficace à l'hydrazine qui est classée **CMR**<sup>1</sup>. Ainsi, afin de réduire les quantités d'hydrazine utilisées et les rejets associés, les moyens de dégazage

physique de l'oxygène dissous dans le poste d'eau sont optimisés et les exigences relatives à la teneur en oxygène admissible sont adaptées à chaque état de tranche. Par ailleurs, l'optimisation des quantités d'hydrazine utilisées pour la conservation humide des générateurs de vapeur et le recours préférentiel à une conservation à sec des matériels du poste d'eau ont également permis de réduire significativement les rejets d'hydrazine.

Le conditionnement chimique des circuits de refroidissement fermés doit permettre de minimiser la corrosion des matériaux et les appoints-rejets à mettre en œuvre pour conserver une chimie optimale. Dans le cas d'un conditionnement basique, le dioxyde

de carbone présent dans l'air va entraîner la carbonatation du fluide et une réduction du pH alcalin de moindre corrosion. Lorsque la carbonatation est trop marquée, des appoints-rejets suivis d'un reconditionnement chimique sont nécessaires pour rétablir les conditions requises. Il peut donc être nécessaire de prendre des dispositions pour limiter les entrées d'air dans certains circuits afin de minimiser la carbonatation et l'occurrence des purges générant des effluents.

Le traitement contre les micro-organismes pathogènes par injection de monochloramine est réalisé, dans les circuits de refroidissement tertiaire des sites concernés, selon des modalités réglementaires. Ces traitements ont fait l'objet d'essais afin d'optimiser les rejets chimiques sans pour autant diminuer leur efficacité. Ainsi, des essais de traitement séquentiel ont été réalisés à partir de 2005 sur un site; ils ont consisté à alterner les phases d'injection de monochloramine avec des phases d'arrêt d'injection. Les quantités de réactifs et les rejets azotés ont alors diminué de 30 % environ (nitrates principalement), tout en maintenant une bonne efficacité du traitement. Ce type de traitement a été étendu progressivement à d'autres sites.

La station de production d'eau déminéralisée d'un site doit permettre de produire les quantités d'eau nécessaires à l'exploitation des tranches du site concerné dans le respect des autorisations réglementaires, tout en optimisant sa propre consommation d'eau et sa consommation en réactifs chimiques pour limiter la nature et la quantité des effluents et déchets produits.

L'utilisation de combustibles à très basse teneur en soufre a produit une diminution des rejets d'oxydes de soufre associés aux gaz d'échappement des groupes électrogènes de secours.

Dans chacun des circuits, le bon fonctionnement des dispositifs d'épuration (filtres et résines échangeuses d'ions) joue un rôle important pour la prévention des pollutions. En permettant la rétention des différents polluants, ils contribuent à la maîtrise de la

<sup>1</sup> **CMR**  
Cancérogène,  
mutagène et  
reprotoxique.

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable  
LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE

sûreté, de la radioprotection, des risques conventionnels, des rejets et des déchets.

### Rôle de la chimie dans la collecte, le traitement et le recyclage des effluents

Les centrales nucléaires sont conçues pour permettre une collecte sélective des effluents et une maîtrise de leur gestion depuis leur production jusqu'à leur rejet dans l'environnement. En effet, la collecte sélective permet de séparer les effluents à la source, selon leur origine, leur nature chimique et radiochimique ainsi que leur composition, afin d'adapter le mode de traitement à leurs caractéristiques. Elle s'accompagne de divers moyens de traitement permettant de couvrir l'ensemble des produits et spéciations chimiques pouvant être rencontrés dans le cadre de l'exploitation normale des réacteurs, mais également de manière ponctuelle comme lors d'opérations de maintenance exceptionnelle.

Ainsi, parmi les principaux moyens mis en œuvre pour optimiser le traitement des effluents, le suivi chimique et radiochimique, permet d'orienter les effluents vers les moyens de traitement les mieux adaptés à leurs caractéristiques et à leurs spécificités. L'efficacité des traitements est également vérifiée par la surveillance des effluents traités, à plusieurs étapes (notamment dans les réservoirs intermédiaires et/ou les réservoirs d'entreposage avant rejet).

Après collecte et traitement éventuel, les effluents sont analysés avant d'être rejetés dans l'environnement selon des règles définies par la réglementation.

Les effluents radioactifs gazeux sont majoritairement traités sur filtres THE (Très haute efficacité) pour la rétention des aérosols, et/ou sur pièges à iode (charbon actif). Le contrôle et le suivi réguliers de l'efficacité de ces systèmes de traitement, ainsi que la possibilité de laisser décroître les effluents à période courte, ont permis de réduire fortement les rejets d'iodes, d'aérosols et de gaz rares. Dans les effluents radioactifs liquides, les produits de fission (PF) et d'activation (PA)

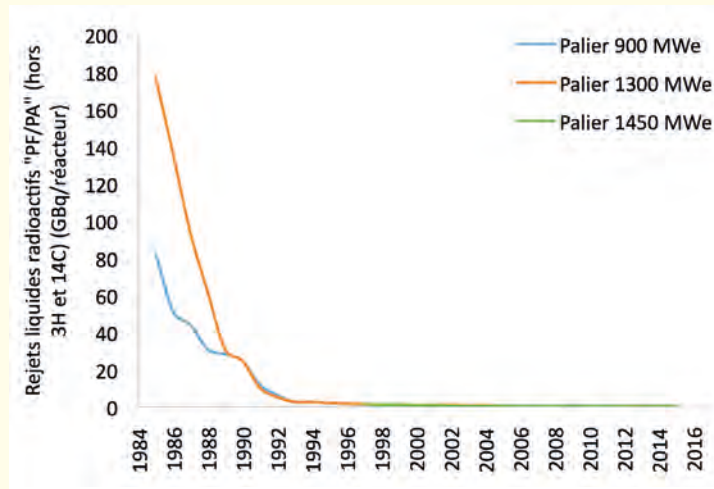


Figure 1 : évolution des rejets radioactifs liquides entre 1984 et 2015.

sont éliminés en grande partie par les systèmes de traitement. À titre d'exemple, les effluents radioactifs peu chargés chimiquement subissent une filtration-déminéralisation qui piège la quasi-totalité de la radioactivité. En revanche, les effluents chimiques, renfermant des substances telles que les phosphates, le bore, des matières en suspension, sont impropres à un traitement sur déminéralisateurs et sont donc traités par évaporation. Ce type de traitement produit des concentrats (boues) qui sont conditionnés en tant que déchets radioactifs dits de procédé.

Hors tritium et carbone-14, les rejets d'activité des PF et PA liquides ont diminué d'un facteur 100 depuis 1985 (figure 1). Les améliorations apportées aux circuits de collecte et de traitement et les efforts réalisés en exploitation pour réduire à la source la production d'effluents, expliquent ce résultat. Les cobalts-58 et 60, l'argent-110m et le nickel-63 sont prépondérants dans ces rejets qui représentent en moyenne moins de 1 GBq par an et par réacteur. Cette réduction des rejets d'activité n'a pas entraîné de surproduction de déchets liés au traitement (filtres, résines, concentrats d'évaporation). Le volume de déchets de procédé a au contraire diminué sensiblement grâce aux efforts réalisés pour réduire à la source la production d'effluents.

Les rejets d'hydrazine ont diminué d'un facteur 20 depuis 2004,

grâce à la réduction à la source des effluents, mais également à la mise en œuvre préférentielle du *cracking* thermique de l'hydrazine résiduelle issue du conditionnement humide des générateurs de vapeur à l'arrêt (la montée en température au redémarrage du réacteur permet la décomposition thermique de l'hydrazine dans les GV) (figure 2). Par ailleurs, en parallèle de la veille active pour la substitution de l'hydrazine, des moyens de destruction de l'hydrazine dans les bâches de rejet sont mis en œuvre afin de limiter les quantités émises dans l'environnement. La destruction de l'hydrazine dans les réservoirs d'entreposage des effluents avant rejet s'effectue par réaction chimique entre l'hydrazine et l'oxygène de l'air et produit de l'azote et de l'eau; cette

réaction est favorisée par la mise en brassage de l'effluent et, pour les réservoirs équipés, par le bulage d'air comprimé accompagné de l'injection de sulfate de cuivre pour catalyser la réaction. Aujourd'hui, les rejets d'hydrazine sont faibles, de l'ordre de quelques centaines de grammes par an et par réacteur en moyenne.

La conception et l'exploitation des circuits sont réalisées en recherchant un optimum vis-à-vis du recyclage du fluide (qui doit garantir les enjeux de sûreté, de radioprotection, de maîtrise des risques de corrosion et de maîtrise des coûts en prenant en compte les phénomènes de concentration des impuretés lors du recyclage) et de la production de déchets et de rejets. Ainsi, les effluents radioactifs borés issus du circuit primaire peuvent être recyclés, après traitement. Ils sont alors réutilisés à l'appoint du circuit primaire. Ce recyclage, prévu de conception, permet d'éviter le rejet d'une grande quantité d'acide borique.

Par ailleurs, la surveillance des caractéristiques chimiques des circuits se fait *via* de nombreuses lignes d'échantillonnage; afin de limiter les effluents, le recyclage des échantillons non pollués est privilégié.

### Contrôle physico-chimique des rejets et de l'environnement

Des dizaines de milliers de mesures sont réalisées chaque année par l'exploitant afin de contrôler les

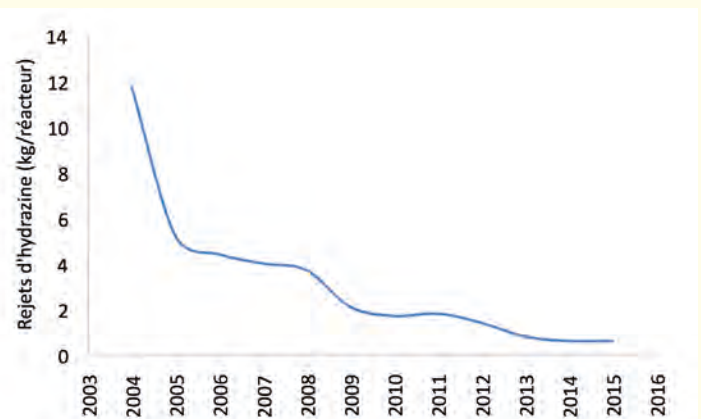


Figure 2 : évolution des rejets liquides d'hydrazine entre 2004 et 2015.



Tout autour des installations nucléaires, des prélèvements sont réalisés dans l'environnement : sols, air, eau et même aliments.

prélèvements d'eau et les rejets d'effluents, ainsi que pour surveiller l'environnement autour d'un site. Il s'agit aussi bien de mesures de radioactivité que de mesures physiques (température, débit), chimiques, biologiques ou microbiologiques. Toutes ces mesures font partie des prescriptions réglementaires que l'exploitant se doit de respecter en toutes circonstances. À cet égard, la réglementation exige notamment que :

- › l'exploitant dispose de deux laboratoires (l'un pour les mesures sur les effluents radioactifs, l'autre pour les mesures de radioactivité dans l'environnement) et du personnel compétent ;
- › les appareils de mesure des laboratoires fassent l'objet de vérifications régulières ainsi que d'une maintenance périodique appropriée ;
- › certains dispositifs de prélèvement et appareils de mesure en continu soient doublés et que leur alimentation électrique soit sécurisée.

Ces mesures ont une double finalité.

“  
**LES RÉSULTATS  
 OBTENUS  
 CONTRIBUENT AINSI  
 À FOURNIR  
 À L'ADMINISTRATION  
 ET AU PUBLIC  
 DES INFORMATIONS  
 CRÉDIBLES  
 SUR LES REJETS ET  
 SUR L'ENVIRONNEMENT.**  
 ”

Elles font partie de la surveillance de la radioactivité dans l'environnement dans le cadre du Réseau national de mesures dont les données sont accessibles au public *via* le site Internet [www.mesure-radioactivite.fr](http://www.mesure-radioactivite.fr). Elles sont aussi utilisées pour évaluer l'impact des prélèvements d'eau et des rejets sur l'environnement et sur le public afin de s'assurer qu'il demeure toujours inférieur aux estimations présentées dans les dossiers de demande d'autorisation.

La qualité de l'échantillonnage et des analyses, dont dépend la fiabilité des résultats des mesures, passe par la mise en œuvre de méthodes analytiques normalisées – lorsqu'elles existent – ou dûment éprouvées. Elle implique aussi du personnel compétent et formé tant au fonctionnement des automates de mesure qu'aux techniques de laboratoire. Dans ces conditions, les résultats obtenus peuvent être valablement comparés ou avec les mesures réalisées par les services de l'administration ou d'autres organismes indépendants de l'exploitant (intercomparaisons). Ils contribuent ainsi à fournir à l'administration et au public des informations crédibles sur les rejets et sur l'environnement.

Les mesures de radioactivité sur les effluents radioactifs liquides et gazeux et dans l'environnement concernent :

- › la détection des radionucléides émetteurs de rayonnements « bêta » et « bêta/gamma » ;
- › la vérification de l'absence de radionucléides d'origine artificielle émettant des rayonnements alpha.

Les contrôles effectués sur les effluents chimiques par l'exploitant découlent des exigences réglementaires qui fixent notamment :

- › la localisation, la nature, la technique de mesure, la périodicité ;
- › les règles de comptabilisation des rejets ;
- › les limites à ne pas dépasser ;
- › les modalités de transmission des résultats de mesure à l'administration et au public.

Ces contrôles portent tant sur les concentrations des substances dans l'effluent que sur les débits de rejet (contrôle des flux de rejet). La nature et la fréquence des contrôles tiennent compte des enjeux environnementaux en termes de quantité rejetée et de toxicité de la substance. Lorsqu'il n'est pas possible de mesurer les substances chimiques dans l'effluent car les concentrations y sont trop faibles, le rejet est déterminé à partir des quantités de produits injectés dans les circuits et de la connaissance des produits formés par réaction chimique. Cette pratique est notamment utilisée pour les rejets de substances issues de la station de production d'eau déminéralisée (sodium, chlorures, sulfates) ou pour certains rejets des traitements antitartre et biocides. Des contrôles sont également effectués dans le milieu aquatique en aval du rejet principal :

- › périodiquement sur des substances faisant l'objet de limites à ne pas dépasser ;
- › en continu par la station multiparamètres aval (pH, O<sub>2</sub> dissous, conductivité, T°). ■

# Les procédés chimiques au service des sources froides

Par **Claire Dupont**, EDF-CEIDRE



## en substance...

Les exploitants de réacteurs nucléaires sont de grands utilisateurs de sources froides, dont la fonction est d'extraire la chaleur d'un procédé ou d'un matériel. Pour les circuits ouverts, le transfert thermique est obtenu par l'échauffement de l'eau de refroidissement directement dans un échangeur. Dans le cas des circuits fermés, le refroidissement est accompli par l'évaporation d'une partie de l'eau dans une tour aéroréfrigérante. Le fonctionnement de ces systèmes à recirculation nécessite la prise en compte de différentes problématiques (consommation d'eau, corrosion et encrassement) et la maîtrise du risque sanitaire (développement potentiel de micro-organismes pathogènes). L'industrie nucléaire a développé un spectre de solutions adaptées pour y faire face. Panorama.

**P**ar l'intermédiaire des substances dissoutes et des matières en suspension qu'elle contient, l'eau utilisée en appoint des réacteurs nucléaires est susceptible de générer de l'entartrage et/ou de l'embouement au sein de l'installation et d'altérer la performance ainsi que la durée d'exploitation du patrimoine. De plus, de par leurs caractéristiques de fonctionnement, ces circuits favorisent la prolifération de la charge biologique présente naturellement dans l'eau, dont une part peut être pathogène. En effet, l'augmentation de température, l'importance des surfaces d'échange, l'oxygénation du circuit ainsi que l'apport régulier de matières organiques par le cours d'eau représentent des conditions propices au développement biologique. La prise en compte de l'ensemble des contraintes est nécessaire dès la conception d'une installation, au risque de ne jamais atteindre les performances escomptées. Pour cela, un large panel de solutions de

traitements d'eaux peut être mis en œuvre. Ces solutions sont toutefois à adapter selon les conditions du système : puissance et nature du procédé, architecture, mode de fonctionnement et conditions propres au site.

## UNE STRATÉGIE DE CONCEPTION RESPONSABLE

La situation des circuits de refroidissement (circuit dit « tertiaire ») des centrales nucléaires EDF, dont le rôle est de permettre la condensation de la vapeur du circuit secondaire, est un cas industriel spécifique de par la puissance thermique installée et donc les débits d'eau de refroidissement au condenseur mis en œuvre (environ 40 m<sup>3</sup>/s). Que l'installation soit située en bord de mer ou de rivière, ces circuits sont en lien direct avec l'environnement, la prise d'eau et son rejet se réalisant dans le milieu naturel (rivière, fleuve ou mer).

“  
**POUR RÉDUIRE À LA SOURCE LE BESOIN DE TRAITEMENT CHIMIQUE, DES DISPOSITIFS PERMETTANT DE LIMITER L'ENCRASSEMENT ET LA CORROSION DES MATÉRIAUX ONT ÉTÉ MIS EN PLACE.**  
 ”

En conséquence, EDF a opté pour une stratégie de conception évitant au maximum les besoins en traitement et les rejets associés (en rapport avec les dimensions

exceptionnelles des circuits), et privilégiant les systèmes de traitement physique n'émettant pas de substances chimiques. Cette stratégie permet, par une approche intégrée de l'architecture globale de la source froide, de limiter au maximum les incidences environnementales des circuits de refroidissement.

Ainsi, en vue de réduire à la source le besoin de traitement chimique, des dispositions ont été mises en œuvre à la conception pour maintenir en bon état de propreté les circuits et assurer les échanges de chaleur attendus. Des choix de configuration ont été retenus limitant l'encrassement et la corrosion par :

- › l'utilisation de matériaux et matériels peu sensibles à ces risques ;
- › des vitesses de circulation dans les tubes de condenseurs suffisamment importantes ;
- › la limitation des zones stagnantes au sein du circuit ;
- › le recours à des systèmes de traitement physique contre l'encrassement, n'émettant pas de substances chimiques tels que les systèmes de dégrillages mis en œuvre à la prise d'eau et le système de nettoyage en marche des tubes de condenseurs.

Au cours de l'exploitation de ces circuits, l'évolution du risque d'encrassement (embouement, entartrage, bio-salissures) et de colmatage, a conduit à la mise en place de traitements chimiques choisis selon la problématique rencontrée (acide fort ou dispersant). Pour la gestion de ces phénomènes, une démarche d'optimisation de ces traitements est mise en œuvre par une injection automatique et un pilotage en fonction des résultats constatés (performance, propreté). ▶



Station de pompage de l'EPR de Flamanville : vis d'Archimède, d'une longueur de 16 m et d'un poids de 6 tonnes, elle assure la remontée de l'eau collectée dans l'ouvrage de pré rejet avant qu'elle ne retourne à la mer

© EDF / STEPHANE JURET

### LA PRÉVENTION DU RISQUE SANITAIRE MICROBIOLOGIQUE

Enfin, la prise en compte du risque biologique et des évolutions réglementaires ciblant les micro-organismes pathogènes a entraîné le besoin de solutions de conditionnement permettant la gestion microbiologique sur ces installations. Les deux micro-organismes concernés sont les *Legionella pneumophila* et les amibes *Naegleria fowleri*. Dans le cas des légionelles, ce sont les bactéries responsables de la légionellose dite « maladie du légionnaire » (pneumonie) et de la fièvre de Pontiac (syndrome grippal). La voie d'exposition est liée à la formation d'aérosols fins contenant la bactérie. Les circuits susceptibles de produire ces aérosols contaminés sont les systèmes de refroidissement équipés d'aéroréfrigérants, c'est pourquoi, au niveau français, l'ensemble de ces installations fait l'objet de réglementations à cet égard (de la tour de climatisation à la tour industrielle). Les amibes de l'espèce *Naegleria fowleri* sont des protozoaires (animaux unicellulaires) qui peuvent être à l'origine de méningo-encéphalite amibienne primitive (MEAP), maladie très rare mais généralement mortelle. La voie d'exposition connue est liée à l'inhalation d'eau lors d'activités aquatiques. Aucune personne, en France métropolitaine, n'a jamais contracté cette maladie. La réglementation applicable aux circuits fermés des centrales nucléaires EDF pour la maîtrise de ce pathogène est une spécificité ; en effet, il n'existe pas de réglementation similaire applicable à d'autres installations, que ce soit à l'échelle de la France, de l'Europe ou du monde. Qu'il s'agisse de légionellose ou d'amibiase, il convient de souligner qu'aucune pathologie imputable aux circuits de refroidissement des centrales nucléaires n'a jamais été rencontrée.

Dès la conception, un certain nombre de systèmes sont mis en place pour prévenir le risque sanitaire microbiologique, comme les séparateurs de gouttes, qui limitent l'entraînement vésiculaire des gouttelettes dans le panache au niveau

de la tour aéroréfrigérante, ainsi que les systèmes de filtration et nettoyage. De plus, des dispositions d'exploitation sont mises en œuvre pour limiter au maximum l'encrassement, l'entartrage et la formation de biofilm, qui sont des facteurs susceptibles de favoriser les proliférations biologiques par l'intermédiaire, entre autres, de la surveillance du bon fonctionnement des dispositifs précités.

### LA MONOCHLORAMINE : UN CHOIX DE TRAITEMENT CHIMIQUE BIOCIDE ADAPTÉ

Des études technico-économiques avec des essais sur pilote ont été menées sur de nombreuses solutions potentielles industriellement disponibles (la chloration, le traitement à l'ozone ou au dioxyde de chlore par exemple). Celles-ci ont permis de déterminer que l'utilisation de la monochloramine, comme traitement chimique biocide préventif, représente un optimum compte tenu des contraintes techniques et des exigences de respect de l'environnement, dans une logique de minimisation et de maîtrise du risque sanitaire. L'application de ce traitement préventif présente des avantages par rapport à la solution la plus répandue au niveau des circuits industriels, la chloration. En effet, pour atteindre le niveau de traitement visé, la quantité de substance active à injecter est peu influencée par les évolutions de qualités d'eau ; de plus, en dépit d'être un oxydant plus faible que le chlore, la monochloramine formée est plus stable, ce qui permet de limiter la formation de substances organo-halogénées (AOX). Enfin, l'effet biocide est obtenu sur les phases fixées, c'est-à-dire qu'en plus d'agir sur les micro-organismes présents dans l'eau de circulation, la monochloramine pénètre dans le biofilm pour y atteindre les pathogènes ciblés. A court terme, il est prévu la mise en œuvre progressive de traitement préventif à la monochloramine sur l'ensemble des circuits concernés du parc nucléaire d'EDF (la majorité des sites étant déjà équipés). En exploitation, les émissions chimiques issues de ce traitement sont réduites autant que possible

par une démarche optimisée (injection régulée par une mesure en ligne du résiduel et conditionnement mis en œuvre en fonction des résultats biologiques).



**QU'IL S'AGISSE  
DE LÉGIIONELLOSE  
OU D'AMIBIASE,  
AUCUNE PATHOLOGIE  
IMPUTABLE  
AUX CIRCUITS  
DE REFROIDISSEMENT  
DES CENTRALES  
NUCLÉAIRES N'A JAMAIS  
ÉTÉ RENCONTRÉE.**



Ainsi, afin de retenir la meilleure solution disponible lors de la sélection du traitement, une veille technologique et des évaluations en laboratoires ou sur des boucles pilotes sont réalisées de manière régulière, que ce soit pour les réacteurs en exploitation ou ceux du futur. Celles-ci permettent d'évaluer, de manière graduée, les procédés de traitements industriellement disponibles, qu'ils soient à visée encrassement ou à visée biologique, pour en déterminer leur applicabilité sur les installations nucléaires : après une évaluation technique de premier niveau sur les procédés prometteurs, une faisabilité technique et industrielle est réalisée afin de dimensionner le traitement, de juger de son efficacité, et d'évaluer ses rejets et l'impact environnemental et sanitaire associé.

# La chimie de l'eau dans ses différentes phases d'exploitation

Par **Olga Ramos**, (EDF/DIPNN/CEIDRE) et **Marie Helène Clignard**, (AREVA NP)



## en substance...

Les principales missions qui reviennent à la chimie pour assurer le meilleur fonctionnement du réacteur en toute sûreté touchent le contrôle de la réactivité, le maintien de la performance et de l'intégrité des matériels, la durée d'exploitation de l'installation, la radioprotection et le respect de l'environnement. Les conditionnements chimiques mis en œuvre définissent principalement la pureté, le pH et le potentiel d'oxydo-réduction souhaitables pour maintenir les fonctions et les performances, éviter les dégradations et maîtriser l'impact sur l'environnement, tout en tenant compte de contraintes de plus en plus fortes apportées par l'évolution des réglementations dans ce domaine. Le programme de surveillance des paramètres chimiques doit ainsi être adapté afin de pouvoir maîtriser les enjeux cités précédemment. Enfin, la prise en compte de la chimie dès le stade de la conception des nouveaux réacteurs permet de garantir le meilleur compromis pour assurer un fonctionnement de l'installation à l'optimum tout en limitant l'impact environnemental.

**L'** exploitation durable dans des conditions de sûreté optimales et maîtrisées des réacteurs nucléaires à eau sous pression actuellement utilisés dans le parc nucléaire français nécessite, entre autres, de veiller au maintien de l'intégrité de leurs composants, de contrôler les rejets dans l'environnement et de réduire autant que possible la contamination radioactive dans les circuits. Contrôler et comprendre la chimie de l'eau dans ces différentes phases d'exploitation constitue l'un des outils essentiels pour contribuer à maîtriser ces enjeux. Le parc nucléaire français compte 58 réacteurs nucléaires de type

réacteurs à eau pressurisée (REP), de puissance électrique allant de 900 à 1450 MWe. Un réacteur REP dispose de trois principaux circuits d'eau indépendants, l'eau étant utilisée comme modérateur de la réaction nucléaire et comme fluide caloporteur. La chaleur produite au niveau du cœur du réacteur est extraite par l'eau du circuit primaire et maintenue liquide par l'action du pressuriseur. Cette chaleur est transmise au circuit secondaire par échange thermique au niveau des générateurs de vapeur ; l'eau passe alors sous forme vapeur, actionnant ainsi la turbine qui entraîne l'alternateur créant du courant électrique. Enfin, cette vapeur qui a perdu une grande partie de son énergie est condensée par l'échange thermique avec la source d'eau externe (fleuve ou mer) du circuit de refroidissement.

## PRINCIPES DU CONDITIONNEMENT CHIMIQUE

L'eau de chaque circuit est conditionnée chimiquement afin de limiter la corrosion des matériels métalliques par l'eau circulante, à température élevée, exposée ou non à un rayonnement ionisant. Les effets directs de cette corrosion peuvent être la perte d'épaisseur, la fissuration et la fragilisation des composants. Les effets indirects sont les produits de corrosion libérés responsables de dépôts dans des zones sensibles, de la radioactivité déposée dans le circuit primaire, et de l'encrassement et du colmatage des générateurs de vapeur côté secondaire.

Enfin, le circuit de refroidissement peut subir l'apparition d'entartrage, d'embouement et de développement biologique comme principaux phénomènes.



**LA QUALITÉ DE LA CHIMIE DES FLUIDES CIRCULANTS DANS UN REP CONTRIBUE SIGNIFICATIVEMENT AU MAINTIEN DE LEUR INTÉGRITÉ.**



La diversité des matériaux utilisés et des conditions de fonctionnement nécessite de définir un compromis qui permet de répondre au mieux à la gestion des multiples phénomènes cités ci-dessus. Par ailleurs, la surveillance du conditionnement chimique mais aussi des pollutions est fondamentale et doit être proportionnée aux enjeux portés par chaque paramètre chimique et par chaque circuit.

## LES TROIS CIRCUITS PRINCIPAUX DU REP

**La chimie du circuit primaire**  
Dans le circuit primaire, l'eau monophasique liquide ultrapure est chauffée dans le cœur du réacteur par l'énergie issue de la fission nucléaire. L'eau se trouve à une température moyenne d'environ 300 °C et maintenue à une pression de 155 bars. Elle joue le rôle de fluide caloporteur mais

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable  
LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE



Vue d'ensemble de la salle des machines de la centrale nucléaire de Tricastin, groupe turbo-alternateur et groupe sécheur surchauffeur

permet aussi le contrôle de la réaction neutronique grâce à l'addition de bore sous forme d'acide borique. Le bore-10 permet de modérer la réaction en chaîne par absorption des neutrons excédentaires de la fission nucléaire qui n'ont pas été absorbés par d'autres éléments neutrophages contenus dans des barres de contrôle et situés dans le réacteur. La concentration en bore est ajustée pendant le cycle en fonction de l'épuisement progressif du combustible et neutralisée par la lithine afin de garantir un pH alcalin tout au long du cycle. En complément, le milieu est maintenu réducteur par l'addition d'hydrogène et sa qualité est garantie par une concentration en polluants très limitée.

Le circuit primaire est composé de matériaux très résistants à la corrosion (alliages base nickel, aciers inoxydables et alliages de zirconium). À ce titre, bien que la corrosion généralisée soit extrêmement

faible, elle génère des produits de corrosion (oxydes métalliques) qui, lors du passage par le cœur et sous l'effet des neutrons, peuvent s'activer et ensuite se déposer hors du cœur (tuyauteries, pompes...). Ce phénomène revêt une grande importance pour l'exploitation du réacteur car il détermine la contamination des composants et donc la dose que vont recevoir les intervenants chargés de la maintenance. Au-delà de l'impact sur la radioprotection, la corrosion primaire joue aussi un rôle sur la sûreté. En effet, les produits de corrosion peuvent se déposer sur la gaine du combustible et ainsi modifier le flux neutronique. La chimie du circuit primaire (composition, pH, potentiel d'oxydo-réduction), son suivi, et sa propreté associée à des pratiques de purification optimisées, vise donc pour l'essentiel à contrôler la réactivité, limiter les dépôts sur le combustible, minimiser la contamination radioactive des

circuits et garantir l'intégrité des composants en ralentissant certains phénomènes de corrosion spécifiques (corrosion sous contrainte). Enfin, certains réacteurs du Parc EDF complètent le conditionnement chimique par ajout de zinc, qui permet de réduire la dosimétrie et de limiter l'amorçage de la corrosion sous contrainte et les déformations de flux neutronique. Cette pratique, courante dans les centrales étrangères et particulièrement américaines, a débuté en France en 2008 sur un panel de réacteurs. Le retour d'expérience montre que les bénéfices de l'injection de zinc sont d'autant plus significatifs pour les circuits ou composants neufs.

### La chimie du circuit secondaire

Le circuit secondaire convertit l'énergie thermique produite par la chaudière nucléaire en énergie mécanique.

La vapeur formée dans les générateurs de vapeur est admise dans la turbine qui entraîne l'alternateur. Suivant les sites nucléaires, le condenseur est équipé de tubes en laiton, en acier inoxydable ou en titane. Le circuit est en grande partie constitué d'aciers non ou faiblement alliés offrant des surfaces de contact importantes avec le fluide secondaire. Enfin, les tubes des générateurs de vapeur sont constitués d'alliage de nickel.

Le conditionnement chimique du circuit est un compromis entre la maîtrise de la corrosion des différents matériaux et la maîtrise des rejets dans l'environnement. De ce fait, le milieu est modérément alcalin, imposé par un ou plusieurs agents alcalinisants (éthanolamine, morpholine ou ammoniacque) ; il est également réducteur, avec l'ajout d'hydrazine, et sa qualité est garantie par une teneur en impuretés limitée. Bien que d'autres phénomènes de corrosion soient susceptibles

d'apparaître, tels que la corrosion localisée, la corrosion sous contrainte ou la corrosion ammoniacale, la principale source de produits de corrosion est la corrosion-érosion des aciers peu alliés du circuit. Il s'agit d'une forme de corrosion généralisée, accélérée par la vitesse d'écoulement du fluide. Les produits de corrosion peuvent donner naissance à des dépôts dans divers composants du circuit, impactant la performance et la disponibilité de l'installation. L'un des dommages principaux est la dégradation de la performance des générateurs de vapeur par l'encrassement et le colmatage. L'encrassement est le dépôt généralisé d'oxydes sur la surface libre des tubes et le colmatage correspond à l'obturation des trous qui permettent le passage de l'eau à travers les plaques entretoises de maintien des tubes. La stratégie de maintenance repose notamment sur un programme de surveillance du taux d'encrassement et de colmatage des générateurs de vapeur par des examens télévisuels (ou par courants de Foucault), le lançage de la plaque à tubes et le nettoyage chimique.

### La chimie du circuit de refroidissement

Le circuit tertiaire, ou circuit de refroidissement, fait le lien avec la source froide (fleuve ou mer) qui permet la condensation de la vapeur du circuit secondaire. Il présente la particularité d'être ouvert sur l'environnement. Pour les centrales de type « bord de mer », il est en cycle ouvert avec rejet et prise d'eau en mer. Pour les centrales en bord de rivière, il peut être en cycle ouvert ou en cycle semi-fermé. Dans ce dernier cas, le circuit possède un rejet et une prise d'eau en rivière, et il est refroidi par des aéroréfrigérants dans lesquels la chaleur est extraite par vaporisation de l'eau. Les aéroréfrigérants constituent un point sensible du circuit tertiaire car la chimie est largement imposée par la nature de l'eau d'appoint provenant de la rivière. L'apport continu de substances dissoutes dans l'eau brute est susceptible, en fonction des conditions de

température, de générer de l'entartrage, de l'embouement, des développements biologiques ou des développements de micro-organismes pathogènes.

Pour répondre à ces contraintes, un large panel de solutions de traitements des eaux peut être mis en œuvre, sous réserve de respecter les autorisations de rejets réglementaires. La situation des circuits de refroidissement des sites nucléaires est un cas industriel spécifique de par la puissance thermique installée et donc les débits d'eau de refroidissement au condenseur mis en œuvre (environ 40 m<sup>3</sup>/s). En conséquence, EDF a opté pour une stratégie de conception évitant, au maximum, les besoins en traitements chimiques et les rejets associés (en rapport avec les dimensions exceptionnelles des circuits), et privilégie, lorsque possible, les systèmes de traitement physique n'émettant pas de substances chimiques. L'évolution du risque d'encrassement (embouement, entartrage, bio-salissures), a mené à la mise en place de traitements choisis selon la problématique rencontrée (injection d'un acide fort dans le circuit pour contrôle du pH et/ou injection de dispersant). Enfin, la prise en compte du risque biologique et des évolutions réglementaires ciblant les micro-organismes pathogènes (*Legionella pneumophila* et *Naegleria Fowleri*) a entraîné la mise en œuvre progressive de traitements préventifs à la monochloramine sur l'ensemble des circuits concernés.

### La chimie dès la conception des réacteurs

Les nouvelles générations de REP doivent répondre à des exigences élevées en termes de sûreté, de disponibilité et de durée d'exploitation. Pour contribuer à atteindre ces objectifs, la chimie a été très tôt intégrée aux études de conception. Ainsi la qualité de la chimie des fluides circulants dans les circuits d'un REP contribue significativement au maintien de leur intégrité, et représente donc une condition nécessaire à l'atteinte des objectifs cités précédemment. Il importe

donc que les exigences directement et indirectement liées à la chimie en exploitation soient intégrées dès le stade de la conception d'un nouveau modèle de REP.

Parmi les réflexions et les études réalisées qui ont porté sur la maîtrise du terme source dans un but de minimisation de la contamination du circuit primaire, on peut citer :

- ▶ l'étude de l'optimisation du conditionnement chimique de la procédure de passivation du circuit primaire qui sera mise en œuvre lors des essais à chaud avant le premier démarrage. Cette phase correspond à la première mise en eau du réacteur et va permettre la formation d'une couche d'oxyde protectrice sur les surfaces du circuit primaire. Le relâchement des produits de corrosion sera ainsi minimisé, contribuant à diminuer la contamination de la tranche ;
- ▶ la maîtrise du conditionnement du fluide primaire, lorsque le réacteur est en exploitation. Elle se traduit notamment par le maintien d'un pH du fluide primaire à une valeur constante grâce à l'utilisation de bore enrichi en isotope neutrophage, et par l'injection volontaire de zinc dans le fluide primaire dès le début de l'exploitation du réacteur ;
- ▶ l'optimisation de la conception des postes de purification des systèmes auxiliaires du fluide primaire.

L'optimisation du conditionnement chimique du fluide secondaire a également fait l'objet d'études, dont l'objectif principal est une minimisation du phénomène de corrosion-érosion décrit précédemment. Cette optimisation se traduit par le choix d'un agent alcalinisant adapté tout en prenant en compte les impositions liées aux limitations réglementaires de rejet chimique. Les phases de démarrage après arrêt sont des phases essentielles pour limiter la présence d'impuretés dans les générateurs de vapeur, ainsi sur l'EPR de Flamanville un système spécifique sera disponible pour la purification de l'eau alimentaire des générateurs de vapeurs pendant ces phases.

La surveillance des paramètres chimiques des différents circuits est également fondamentale et participe à certaines fonctions de sûreté. Des dispositions de conception particulières ont été retenues en matière d'échantillonnage chimique et radiochimique particulièrement pour les systèmes de l'îlot nucléaire.

### LA R&D EN CHIMIE

Afin de répondre au mieux aux enjeux de sûreté, de radioprotection, d'environnement et d'intégrité des matériels, EDF, le CEA et AREVA réalisent des études de recherche et de développement par simulation numérique ou par l'exploitation de moyens d'essais représentatifs des circuits des réacteurs à échelle réduite. Les technologies mises en œuvre permettent la compréhension des phénomènes et l'optimisation des traitements chimiques des circuits des réacteurs afin de répondre en permanence aux enjeux cités ci-avant. Par exemple, parmi les différentes études engagées, nous pouvons citer pour le circuit primaire, les études de compréhension du phénomène de relâchement des tubes de générateur de vapeur, et du transport des produits de corrosion dans le circuit jusqu'à la déposition potentielle sur le combustible. Pour le circuit secondaire, nous pouvons signaler l'importance des études réalisées pour limiter l'encrassement et le colmatage des générateurs de vapeur, ou celle des logiciels prédictifs pour évaluer la corrosion-érosion du circuit selon le conditionnement chimique choisi. Enfin, pour le circuit tertiaire, les études d'optimisation du conditionnement chimique par l'utilisation des dispersants, de l'acide fort ou par un traitement biocide ont été décisives pour élaborer la meilleure stratégie de traitement pour la maîtrise du risque d'encrassement et du risque biologique, tout en s'assurant de l'absence d'impact environnemental et sanitaire de ces traitements. ■

# La chimie, un levier pour l'avènement des réacteurs de quatrième génération

Par **Joël Guidez**, CEA, responsable scientifique du segment GEN IV  
**Céline Cabet** et **Jean-Louis Courouau**, CEA, experts seniors matériaux,  
**Daniel Heuer**, **Elsa Merle-Lucotte**, **Michel Allibert** et **Axel Laureau**, CNRS



## en substance...

Les six types de réacteurs de quatrième génération ont la particularité d'utiliser des fluides caloporteurs différents de l'eau utilisée sur les réacteurs de deuxième ou troisième génération. Du point de vue de la chimie, cette utilisation pose alors deux défis. Le premier est la nécessité de trouver des matériaux de structure capables de fonctionner pendant soixante ans dans les gammes de température, pression et d'irradiation requis avec ce fluide. Le second est la nécessité de gérer la chimie du fluide lui-même, avec une mention spéciale pour les réacteurs à sels fondus où il faut gérer la chimie très complexe d'un cœur fondu dans un sel caloporteur. Apporter des réponses à ces défis est un axe de recherche très important en vue d'un développement futur de ce type de réacteurs.

**U**n réacteur se construit avec des matériaux éprouvés et utilise un fluide caloporteur dont on peut maîtriser la chimie en situation normale et accidentelle. La chimie est donc un élément important pour tous les réacteurs de quatrième génération qui utilisent des fluides caloporteurs innovants.

Les six technologies de réacteurs de quatrième génération à l'étude utilisent des fluides spécifiques :

- ▶ **Le sodium pour les RNR-Na<sup>1</sup>**. On notera que les premiers réacteurs de cette filière avaient utilisé un

eutectique<sup>2</sup> NaK qui présentait l'avantage d'être liquide à température ambiante. Ce produit a été rapidement abandonné à cause des risques de sûreté/sécurité posés par son inflammabilité et par la création possible de peroxydes instables.

- ▶ **Le plomb ou l'eutectique plomb/bismuth, pour les réacteurs au plomb**. Là aussi l'intérêt de l'eutectique est d'abaisser le point de fusion de 325 °C à 125 °C, ce qui permet de travailler dans des gammes de température plus intéressantes, en particulier pour la tenue des matériaux.
- ▶ **L'hélium pour les réacteurs à haute température (HTR<sup>†</sup> ou VHTR<sup>†</sup>)**. L'hélium a été choisi pour ses qualités d'échange thermique, sa bonne tenue à l'irradiation et son innocuité vis-à-vis des matériaux quelle que soit la température.
- ▶ **L'hélium est aussi le gaz retenu en première analyse pour les réacteurs à gaz rapides**.
- ▶ **Les réacteurs à sels fondus utilisent des sels à base de fluorures** qui présentent l'avantage d'un fonctionnement à basse pression réduisant fortement les contraintes sur les structures et permettent en variant la composition du sel combustible de concevoir des réacteurs thermiques voire rapides. La dissolution dans

ces sels des produits du cœur conduit à un liquide complexe qui permet d'ajuster les zones fissiles et fertiles du réacteur.

- ▶ **L'eau dans son état supercritique pour les réacteurs à eau supercritique**. Dans son état supercritique, l'eau possède des propriétés physiques et chimiques très différentes de celle à température et pression classiques qui bénéficient aux réacteurs à eau supercritique notamment pour la capacité d'échange calorifique favorable.

## LE PLOMB OU L'EUTECTIQUE PLOMB/BISMUTH, POUR LES RÉACTEURS AU PLOMB

### Les caractéristiques du fluide

Le plomb fond à 327 °C et se vaporise à 1749 °C. L'utilisation de l'eutectique plomb/bismuth (EPB – 55 % en masse de bismuth) permet d'abaisser la température de fusion aux environs de 125 °C tout en conservant une température de vaporisation très élevée (1654 °C). Ces métaux lourds utilisés à l'état liquide comme liquide caloporteur présentent une bonne conductivité thermique pour une faible viscosité, ce qui les fait entrer dans la catégorie particulière du point de vue des écoulements des fluides à nombre de Prandtl très faible ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$ ) [Réf 1]. Ils permettent une bonne protection dosimétrique grâce à leur forte densité (11,35). Par contre, un des

**1.** NB : La chimie des RNR-Na, très spécifique, ne sera pas étudiée dans cet article. Nous allons donc regarder ici pour les cinq autres filières les défis posés par la gestion de la chimie de ces fluides et par les matériaux disponibles pour fonctionner dans les gammes recherchées de température, pression et irradiation. **2.** Un eutectique est un mélange de deux ou plusieurs corps purs qui fond et se solidifie à température constante de manière uniforme, contrairement aux mélanges habituels où le changement de température conduit à une variation de la proportion de solide par rapport à celle de liquide.

**HTR**  
High temperature  
reactor.

**VHTR**  
Very high  
temperature reactor.

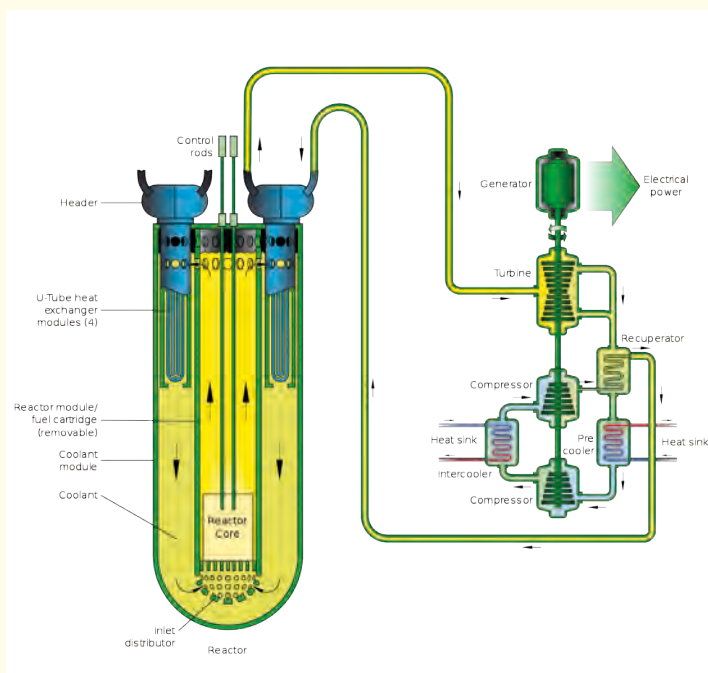


Figure 1 : schéma d'un réacteur rapide au plomb.

produits d'activation du bismuth de l'eutectique de plomb-bismuth, voire du bismuth présent en impureté dans le plomb, est le polonium-210, émetteur alpha très volatile. Ce produit d'activation impose une gestion particulière de cette contamination [Réf 2]. Le plomb et le bismuth sont peu réactifs avec l'oxygène, de sorte qu'ils ne brûlent pas dans l'air et ne réagissent que très peu chimiquement avec l'eau.

### La chimie du plomb

Le contrôle de la chimie est des plus complexes, car il s'agit d'éviter toutes accumulations d'impuretés solides pouvant conduire à une altération des échanges thermiques et des écoulements, mais aussi de maintenir la corrosion des structures sous contrôle. L'oxygène est l'impureté critique, que cela soit à travers les oxydes pouvant se former avec le caloporteur (PbO), mais aussi ceux pouvant se former aux interfaces des structures avec les éléments d'alliages (Fe, Cr). Cependant, les produits de corrosion (Fe, Cr, Ni) ou certains produits d'activation (Po-210), voire des produits de fission sont également à contrôler [Réf 3]. Le trait principal concernant l'oxygène est que sa solubilité est très faible dans tout le domaine de

température des réacteurs : ~0,003 ppm à 200 °C ~8 ppm à 500 °C [Réf 4]. La marge de fonctionnement pour éviter la précipitation des oxydes de plomb (PbO) est donc très faible. Il importe de s'assurer que les sources de pollution sont bien maîtrisées en fonctionnement pour éviter toutes accumulations, ce qui exige une capacité à mesurer en ligne la teneur en oxygène dissous au niveau de précision requis pour cette impureté présente à l'état de traces, mais aussi des moyens de purification pour limiter ou réduire toute pollution éventuelle. Dans le premier cas, il s'agit de sonde électrochimique mettant en œuvre une céramique comme conducteur ionique (Zircone). Dans le deuxième cas, il s'agit d'une combinaison de procédés et procédures de filtration et de réduction par l'hydrogène à haute température [Réf 4, 5 et 6]. Des procédés d'injection d'hydrogène finement dispersé ont notamment été proposés et testés à l'échelle des boucles de R&D pour à la fois remettre en solution les accumulations par un effet mécanique, et aussi par un effet chimique. Il est en effet nécessaire de réduire la couche de passivation à base d'oxydes de fer se formant sur les particules d'oxydes de plomb, qui empêche

l'équilibre d'oxydation / réduction en solution par le seul contrôle de l'oxygène dissous. Si les sondes de mesures de l'oxygène dissous sont aujourd'hui disponibles au niveau des laboratoires de recherche, les différents procédés de purification n'ont pas dépassé le stade des essais pilotes sur boucle d'essais.

La question de la mesure et du contrôle des autres impuretés reste ouverte : produits de corrosion, produits d'activation, voire produits de fissions, qui même présents à l'état de traces peuvent s'accumuler sur le long terme dans un système fermé. La phénoménologie du transfert de masse, de la formation des particules et des aérosols dans les systèmes plomb représente un point qui exige une description complète, notamment vis-à-vis des interactions éventuelles avec certains produits d'activation volatile comme le Po-210, particulièrement en cas de rupture de confinement [réf. 1]. Pour le suivi en ligne de ces impuretés, une instrumentation spécifique reste aussi à développer en complément de système de prélèvement. Des techniques nouvelles comme l'APIMS (*Atmospheric pressure ionization mass spectrometry*) ou la LIBS (*Laser-induced breakdown spectroscopy*) pourraient apporter une solution pour les impuretés en solution et/ou les particules/aérosols [réf 6].

Actuellement, pour les réacteurs en projet, il est prévu un contrôle qui s'effectue par prélèvements discontinus pour analyse hors réacteur de la chimie (impuretés chimiques et produits actifs), par mesure en continu des teneurs en oxygène avec des sondes, par écrémage des impuretés flottant en surface ou par filtration du métal liquide, voire par réduction par l'hydrogène à haute température des oxydes en excès.

### Les matériaux

Les alliages de plomb se révèlent très corrosifs vis-à-vis des alliages métalliques de type ferrito-martensitiques pour les gaines de combustibles et échangeurs et austénitiques pour les structures hors flux. Ils dissolvent en proportion importante d'abord le nickel, mais aussi les autres éléments des alliages. Selon le matériau,

la température et la vitesse des écoulements, la perte de matière des structures peut être si importante que le percement est possible, et dans une étape intermédiaire, une perturbation, voire un bouchage total des écoulements par transfert de matière et re-déposition en zone plus froide des produits de corrosion. C'est pourquoi il est notamment nécessaire de diminuer les températures pour limiter ces phénomènes de dissolution qui sont thermiquement activés (< 400-500 °C), mais aussi de sélectionner les matériaux selon leurs cinétiques de corrosion dans ces conditions de dissolution. Si une teneur en oxygène suffisante est maintenue en permanence dans le système, une couche d'oxyde stable peut se développer à l'interface et réduire les cinétiques de dissolution des aciers riches en Cr [réf 1]. Cette méthode de contrôle de la corrosion a été beaucoup étudiée aussi bien au niveau des mécanismes élémentaires de croissance des couches d'oxydes et de leur stabilité dans cet environnement, notamment face à la vitesse de circulation du plomb, que des procédés de contrôle de la teneur en oxygène dissous. Ces derniers ont été développés à l'échelle pilote en lien avec des modélisations des boucles de circulation pour rendre compte des phénomènes de couplage entre la chimie de l'oxygène présent à l'état de traces et les surfaces des structures le consommant. Si de nombreuses recherches ont été effectuées, une démonstration de cette maîtrise de la chimie sur des volumes importants en régime permanent et lors des transitoires isothermes pouvant redistribuer les impuretés dans le système, ainsi que sur le long terme reste à démontrer. La disparition de cette couche d'oxydes protectrice si la vitesse du plomb est trop forte reste un défi important, limitatif au niveau des gânes et non résolu au niveau des pompes et de leurs rouets, où l'utilisation de matériaux type céramique s'impose. L'autre solution étudiée est une protection par déposition d'alumine (*coating*) qui apporte des améliorations nettes mais reste délicate dans un contexte nucléaire, où il sera toujours difficile d'argumenter sur

les conséquences d'un défaut local de *coating*.

Enfin, certains nouveaux matériaux plus chargés en Si et surtout en Al pourraient ouvrir des voies prometteuses de résistance améliorée à cette corrosion.

### Les points à retenir

Le plomb présente certaines caractéristiques de transfert thermique intéressantes.

- ▶ Par contre, le suivi en fonctionnement de sa composition chimique ainsi que les modalités de purification ne sont pas totalement résolus.
- ▶ La corrosion sur les matériaux connus est importante, ce qui impose, à la conception, des limitations fortes en température et en vitesse d'écoulement.
- ▶ Même dans ces conditions, il reste délicat d'assurer sur le long terme une protection correcte des matériaux par le seul maintien d'un régime d'oxydation assuré par un contrôle fin de la chimie du métal liquide en tout point du système et dans tous les régimes de démarrage et de fonctionnement.

### L'HÉLIUM POUR LES RÉACTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE

#### Les caractéristiques du fluide

L'hélium est le gaz retenu pour les projets HTR ou VHTR. Pour un gaz, il présente une bonne conductivité thermique. Son principal attrait réside dans la température très élevée à laquelle le caloporteur, qui ne présente pas de changement d'état, peut fonctionner. Cette température influe directement sur le rendement du système de conversion d'énergie. De plus, avec des températures visées jusqu'à 950 °C les VHTR ouvrent la voie vers des applications non-électrogènes, en premier lieu la production massive d'hydrogène. Toutefois, le transfert thermique solide-gaz étant médiocre,

le caloporteur doit travailler à fort débit et sous forte pression, typiquement 4 à 8 MPa, et la puissance volumique du cœur s'en trouve limitée. On notera aussi qu'en termes de sûreté une forte baisse de pression lui fait perdre ses capacités de caloporteur. La capture neutronique dans le gaz est très faible. Son pouvoir modérateur est inexistant, et il est compatible avec un spectre thermique ou rapide (*voir le paragraphe sur les réacteurs rapides à gaz*). Par ailleurs, la transparence du milieu facilite grandement l'inspectabilité. L'hélium est chimiquement inerte quelle que soit la température.

#### La chimie du fluide

Comme mentionné, l'hélium est chimiquement inerte et ne corrode donc pas les matériaux des réacteurs. Toutefois, le caloporteur primaire d'un réacteur à gaz est inévitablement contaminé par des polluants résiduels issus du dégazage des espèces adsorbées<sup>3</sup> sur les éléments combustibles et les composants fixes (isolation, cœur et réflecteurs en graphite), des entrées massives d'air lors du rechargement du cœur et des phases de maintenance et d'éventuelles entrées incidentelles d'air [réf 9]. Le retour d'expérience des réacteurs à caloporteur hélium qui ont fonctionné des années 1960 à 1980 indique que la pollution est plus importante au départ, puis décroît progressivement pour atteindre un niveau stationnaire, très bas, imposé par l'équilibre dynamique entre les sources d'impureté, les réactions sur le graphite chaud et l'efficacité des

unités de purification/chimie [réf 10]. Le caloporteur est alors chargé de très faibles quantités d'espèces à l'état gazeux : CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>... Le tableau 1 donne les teneurs en impuretés mesurées dans certains réacteurs expérimentaux. On notera que le caloporteur est totalement vierge de dioxygène qui réagit très rapidement et quantitativement avec le graphite chaud.

Les évolutions technologiques vers un VHTR de quatrième génération devraient modifier le spectre des impuretés comme suit :

- ▶ une meilleure étanchéité de la circuiterie, la substitution des circulateurs lubrifiés avec des hydrocarbures par des paliers magnétiques, l'efficacité optimale des systèmes de purification/chimie (plus l'utilisation éventuelle d'un système de conversion à gaz en remplacement de générateur de vapeur (GV)) devrait abaisser le niveau global de contamination ;
- ▶ le fonctionnement à plus haute température favorise CO versus CO<sub>2</sub> et déstabilise CH<sub>4</sub> par rapport à H<sub>2</sub>.

Finalement, l'hélium VHTR devrait contenir de quelques Pa à quelques dizaines de Pa de H<sub>2</sub>(g), CO(g), CO<sub>2</sub>(g), CH<sub>4</sub>(g), N<sub>2</sub>(g) et de l'ordre du dixième de Pa de vapeur d'eau. On n'attend pas d'O<sub>2</sub>(g) résiduel. Les niveaux de pureté atteints dépendent de l'efficacité des processus d'épuration. De manière générique, une fraction du flux d'hélium est dérivée vers une unité

	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
<b>DRAGON, UK</b>	2	0,1	0,04	1	0,3	1,2	0
<b>AVR, Allemagne</b>	30	3	10	30	-		0
<b>Peach Bottom, USA</b>	20	<1	-	1	1,5	1,5	0

Tableau 1 : pressions partielles en impuretés (en Pa) analysées dans le caloporteur de réacteurs expérimentaux refroidis à l'hélium [réf 11].

3. En chimie, l'adsorption est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant) depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide.

de purification où les impuretés gazeuses sont adsorbées sur différents types de milieux à température contrôlée [réf 12]. Comme  $H_2$  et  $CO$  sont mal retenus sur les absorbants une étape d'oxydation est généralement nécessaire pour les convertir en  $H_2O$  et  $CO_2$ . Les colonnes de tamis moléculaires sont efficaces à température ambiante pour retenir tous les polluants oxydés. Une étape de piégeage cryogénique sur charbon actif permet d'éliminer les traces de gaz résiduels en sortie des tamis. Les éléments adsorbants doivent être régulièrement régénérés pour conserver leur capacité de purification.

Les radiocontaminants tels que les produits de fission et les produits d'activation (Xe; Kr; I; Ag; Cs; Co...) sont une autre source d'impuretés à considérer. Les résultats des nombreuses irradiations de combustibles à particules réalisées dans des réacteurs de recherche et des prototypes Dragon au Royaume-Uni, AVR en Allemagne et Fort-Saint-Vrain aux États-Unis ont confirmé la bonne tenue sous irradiation et la capacité de rétention des produits de fission pour des taux de combustion allant jusqu'à 75 % (FIMA) et des températures comprises entre 1000 °C et 1400 °C. Le comportement thermomécanique a également été satisfaisant avec très peu de fissurations des couches de revêtement des noyaux [réf 13]. Pour limiter l'activation de poussières de graphite créées notamment par les frottements entre composants et convoyées par le flux d'hélium, il conviendra d'utiliser des graphites avec des teneurs très faibles en impuretés activables. Il faut également filtrer les poussières éventuelles.

### Les matériaux

Le graphite chaud est très sensible à la présence d'espèces oxydantes dans l'hélium [réf 14]. L'oxydation du graphite produit des espèces gazeuses ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ...) fonction des polluants oxydants, et s'accompagne d'une dégradation du matériau qui, dans des cas extrêmes, pourrait avoir un impact sur la sûreté

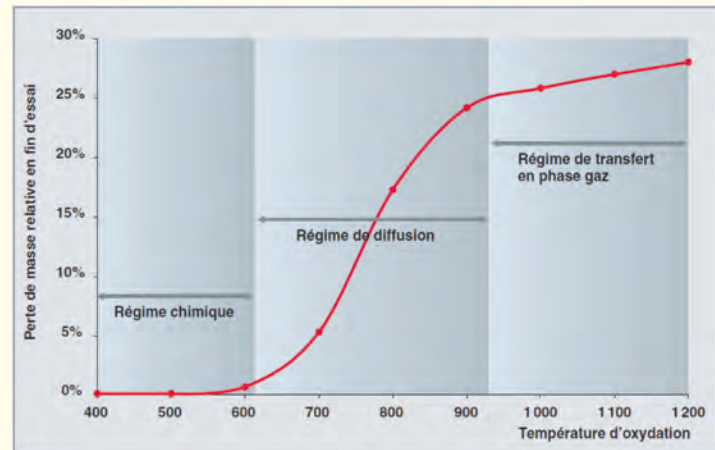


Figure 2: cinétique d'oxydation du graphite en thermogravimétrie (perte de masse relative après quatre heures d'oxydation en air sec), en fonction de la température d'oxydation (°C) (d'après J.C. Robin).

de l'installation. Le comportement du graphite en présence d'espèces oxydantes a été étudié, que ce soit en fonctionnement normal ou en situation accidentelle conduisant à une entrée massive d'air dans le circuit primaire. En pratique, l'oxydation du graphite par l'air est contrôlée par des processus différents selon la température.

► Aux températures basses, jusqu'aux environs de 500 °C - 600 °C, l'oxydation du graphite est contrôlée par la réaction chimique entre l'oxygène et le graphite. L'oxydation est

alors lente, mais uniforme dans tout le volume de la pièce en graphite, ce qui peut conduire à une dégradation importante des propriétés mécaniques. Dans ces conditions, la présence de certaines impuretés telles que fer, vanadium ou plomb, joue le rôle de catalyseur de la réaction d'oxydation et en accélère la cinétique.

► Si la température augmente, depuis 500 °C - 600 °C jusqu'à 900 °C - 1000 °C, l'étape limitante devient la diffusion des espèces gazeuses dans la

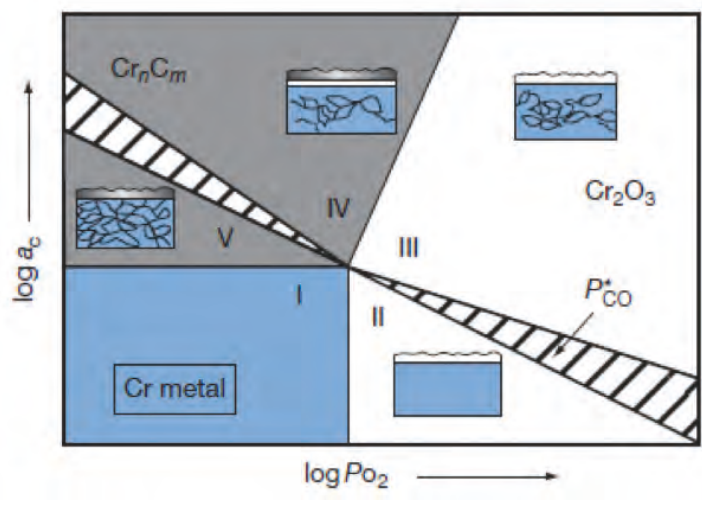


Figure 3: représentation graphique des modes de corrosion des alliages de nickel riches en Cr à haute température par un diagramme de stabilité du chrome modifié; la zone III du diagramme doit être recherchée puisqu'elle permet la formation d'une couche d'oxyde de chrome protectrice contre la corrosion (d'après J.W. Quadackers).

porosité du graphite. La vitesse d'oxydation augmente, mais celle-ci se produit moins en profondeur dans le solide.

Le paramètre important d'un point de vue cinétique est ici la porosité du graphite, qui va contrôler l'accès du gaz oxydant à l'intérieur du graphite.

- Au-delà de 1 000 °C, l'oxydation du graphite est contrôlée par l'apport de gaz à la surface de l'échantillon, parce que la vitesse de transport des espèces oxydantes à travers le milieu poreux croît moins vite avec la température que celle de la réaction entre oxygène et graphite. L'oxydation, plus rapide, progresse depuis l'extérieur de l'échantillon; les propriétés mécaniques sont donc peu affectées directement, sinon par la diminution de la taille externe de l'échantillon.

Le graphite est original en ce que la nature du coke utilisé et la technique de mise en forme retenues déterminent fortement les caractéristiques du matériau obtenu, à commencer par sa densité, son isotropie, ses propriétés mécaniques. On parle de nuances de graphite. Les nuances nucléaires sont denses et isotropes avec de très faibles quantités d'impuretés absorbantes ou activables. L'expérience montre qu'il est très délicat d'extrapoler les mesures effectuées sur une nuance de graphite dans des conditions données à l'oxydation des graphites dans toutes les conditions, compte tenu du nombre de facteurs intrinsèques au matériau et liés à l'atmosphère gazeuse. L'analyse du comportement des graphites les plus prometteurs en atmosphère oxydante, couplée à leur caractérisation mécanique, doit finalement contribuer au choix des nuances acceptables dans un réacteur, notamment du point de vue de la sûreté.

De même que le graphite chaud, les matériaux métalliques d'un HTR/VHTR sont susceptibles de réagir avec les impuretés contenues dans l'hélium. Vu les niveaux de température développés, le choix

pour les structures du circuit primaire s'oriente vers des alliages avec une très haute résistance au fluage. Les aciers austénitiques inoxydables sont pertinents jusque vers 600 °C, l'Alliage 800 est codifié par l'ASME dans la section « *Boiler and Pressure Vessel* » pour une utilisation jusqu'à 750 °C et les analyses sont en cours pour porter cette limite à 850 °C [réf 15], au-delà les seuls alliages commerciaux avec une tenue au fluage suffisante sont les alliages à base de nickel à forte teneur en chrome et renforcés en solution solide par du Mo ou du W de type Inconel-617 ou Hastelloy-230. On mentionnera ici qu'aucun matériau n'est qualifié pour les composants de la turbine d'un VHTR en cycle direct, ni pour l'échangeur intermédiaire d'un VHTR qui développerait des températures de l'ordre de 1 000 °C gamme pour laquelle seules des céramiques seraient envisageables. Si la question de la corrosion ne se pose pas pour les températures des réacteurs HTR ni pour la cuve en acier de la famille des 9 % Cr qui fonctionne à 490 °C maximum, les températures extrêmement élevées visées pour certains concepts de VHTR activent des réactions particulières entre impuretés gazeuses et surface métallique des composants du circuit primaire.

La nature et les proportions relatives des impuretés telles que présentées dans le tableau 1 sont importantes car elles définissent le type de corrosion que va subir le circuit. Les alliages de structure présents, Haynes-230 et Inconel-617, sont chromino-formeurs c'est-à-dire qu'ils tirent leur résistance à l'oxydation de la croissance lente d'une couche superficielle de chromine qui les protège des interactions directes avec l'environnement. L'enjeu pour l'application VHTR, notamment pour l'échangeur de chaleur intermédiaire IHX, est de garantir que l'oxyde de chrome peut se former dans les conditions de service [réf 16]. Des études de corrosion en atmosphères représentatives ont permis d'établir une corrélation quantitative entre température maximum de stabilité de l'oxyde de chrome et teneur en CO dans l'hélium caloporteur [réf 17]. À température élevée

quand l'atmosphère est raréfiée en CO, une réaction de carbo-réduction est activée et conduit à la destruction de la couche d'oxyde. La surface de l'alliage, non protégée, peut alors interagir avec les impuretés du caloporteur provoquant des transferts de carbone. Deux modes de corrosion catastrophiques se produisent: la carburation ou la décarburation, également délétère à très court terme pour la tenue du composant. Par contre, pour des atmosphères avec une pression partielle suffisante en CO (typiquement de l'ordre de 5 Pa selon la teneur en Cr de l'alliage), l'oxyde protecteur est stable même au-delà de 950 °C. L'alliage peut fonctionner dans un régime d'oxydation lente qui laisse envisager une utilisation prolongée. La durée de vie du matériau en corrosion sera alors imposée par la cinétique d'oxydation [Réf. 18]. La durabilité dans ce régime sur le très long terme est à valider pour des composants minces telles les parois entre canaux dans un échangeur intermédiaire compact. En outre, les systèmes de purification/chimie du réacteur devront donc être dimensionnés pour que l'environnement d'hélium impur stabilise en toutes circonstances la couche de chromine superficielle.

### Les points à retenir

- **La filière HTR dispose de matériaux éprouvés.**
- 🔍 **Les recherches portent davantage sur des optimisations industrielles.**
- **L'hélium étant chimiquement inerte, il constitue un caloporteur d'une parfaite innocuité vis-à-vis des matériaux. C'est ainsi que les HTR/VHTR peuvent fonctionner aux températures les plus hautes de tous les systèmes considérés pour la 4<sup>e</sup> génération.**
- **Pourtant aux températures les plus élevées envisagées dans les VHTR, les impuretés, inévitables dans un circuit industriel, peuvent interagir avec les structures.**
- **La nature des impuretés est connue et imposée par les sources de pollution d'une**

part et les réactions à la surface du graphite chaud d'autre part.

- › L'oxydation du graphite est à maîtriser de même que, pour les températures extrêmes de certains concepts, la corrosion des alliages de nickel des circuits.
- › Le contrôle de la chimie du caloporteur est un élément essentiel pour garantir que l'oxydation reste dans un régime acceptable et dont la cinétique est prévisible par la modélisation.

### L'HÉLIUM POUR LES RÉACTEURS À GAZ RAPIDES

#### Les caractéristiques du fluide

Les caractéristiques de l'hélium ont été rappelées au paragraphe HTR/VHTR avec la propriété essentielle que l'hélium est chimiquement neutre. Dans un réacteur rapide à gaz qui ne vise pas la production massive d'hydrogène la température du gaz chaud en sortie cœur serait au maximum de 850 °C sous des pressions de l'ordre de 5 MPa.

#### La chimie du fluide

On ne dispose d'aucun REX sur la chimie possible de l'hélium caloporteur d'un réacteur rapide à gaz. Néanmoins, sur la base des connaissances développées pour les HTR/VHTR on peut supposer que les unités de purification développées pour ces derniers seront bien adaptées pour le contrôle et la maîtrise des impuretés résiduelles du circuit primaire. Par ailleurs, le remplacement de structures massives en graphite par des éléments en composite de type carbone/carbone ou SiC/SiC pourrait modifier les fractions en impuretés gazeuses telles que données dans le tableau 1 mais ne devrait pas en changer la nature.

#### Les matériaux

Pour le RNR-gaz, on peut s'appuyer sur un tronc commun de R&D avec les HTR/VHTR qui comprend les matériaux métalliques de chaudière (cuve, structures internes,



Figure 4: représentation schématique du prototype de réacteur à gaz rapide (GFR) Allegro.

circuits de gaz) et de turbine, ainsi que la maîtrise du comportement des aciers avancés et des alliages à base nickel dans des conditions de sollicitations mécaniques et d'environnement comparables. Les températures moindres des réacteurs rapides à gaz, 850 °C maximum, sont un élément très favorable pour l'intégrité des structures métalliques vis-à-vis de la corrosion. Le régime devrait être celui d'une oxydation contrôlée.

Les matériaux constitutifs du cœur des réacteurs rapides à gaz (enveloppes et gaines de combustibles, barrières de confinement des produits de fission, structures internes...) sont les points critiques de ces systèmes. Ils devront résister à une irradiation neutronique intense et à la haute température (en fonctionnement normal), voire la très haute température (en cas d'accident). Ils doivent en outre être transparents aux neutrons, afin de

ne pas dénaturer le spectre d'énergie des neutrons rapides et s'activer peu. Enfin, ils doivent posséder une conductivité thermique élevée et une faible perméabilité aux produits de fission. Ces exigences plus sévères à certains égards que celles qui s'appliquent aux autres réacteurs du Forum Génération IV orientent le choix des matériaux vers les céramiques de type carbure de silicium à bon comportement sous irradiation et conductivité thermique acceptable. La résistance mécanique des gaines sera apportée par l'architecture du composant, constituée d'un tissage de fibres SiC pour le renfort structural noyées dans une matrice de SiC. L'étanchéité repose sur le liner réfractaire intercalé entre combustible et composite dans un design dit « en sandwich ». Les propriétés en oxydation de matériaux à base de carbure de silicium, SiC monolithique assimilables à la matrice, et fibres de SiC stoechiométriques

de type Tyranno SA3 ou Hi Nicalon S, ont été examinées sous atmosphères raréfiées en oxydants et à très hautes températures pour les situations accidentelles [Réf. 19 et 20]. Selon les pressions partielles en oxydants, oxygène mais aussi vapeur d'eau, le SiC carbure de silicium s'oxyde de manière passive ou active. En régime passif (favorable), une couche de silice ou d'alumino-silicate extrêmement protectrice se forme en surface d'avec des cinétiques de croissance très lentes, deux ordres de grandeurs plus faibles que la chromine par exemple. Dans le régime actif, aux plus hautes températures sous atmosphère très appauvrie en oxydants, la couche n'est plus stable ouvrant la voie à une volatilisation de composés à base de silicium tel SiO. La cinétique de ces transformations dans des scénarios réalistes d'accident sera à établir. De plus, des revêtements à base de SiC ou des traitements de surface sont envisageables pour améliorer les propriétés de surface d'une gaine en composite; basés sur les mêmes procédés en phase vapeur que l'imprégnation de la matrice en SiC, ils apparaissent relativement faciles à mettre en œuvre dans la gamme de fabrication.

#### MSFR

Molten salt fast reactor.

#### MSRE

Molten Salt Reactor Experiment.



#### Les points à retenir

- ▶ Les réacteurs rapides à gaz bénéficient des développements réalisés pour les réacteurs à gaz de type HTR/VHTR. Les technologies de gestion du caloporteur hélium et les matériaux de structure devraient être les mêmes.
- ▶ La principale différence réside dans le cœur avec un recours aux composites à base de carbure de silicium.
- ▶ Les propriétés des architectures fibrées dépendent largement de la méthode de fabrication du composite.
- ▶ La tenue à l'oxydation sera à vérifier sur les composants prototypiques. Il s'agira en particulier de valider que le composite se maintient dans un régime d'oxydation passive qui fait du carbure

**de silicium un matériau extrêmement résistant à son environnement à hautes températures.**

#### LES SELS À BASE DE FLUORURES POUR LES RÉACTEURS À SELS FONDUS

##### Les caractéristiques du fluide

Les sels disponibles peuvent être des chlorures, ou des fluorures. On regardera surtout ici des mélanges de sels à base de fluorures utilisés dans le projet MSFR à l'étude au CNRS, qui permet de concevoir un réacteur à spectre rapide, fonctionnant dans des gammes de températures 650/750 °C pour le fluide [Réf. 21]. Le combustible va être dissous dans ces sels, c'est-à-dire du plutonium (PuF<sub>3</sub>), de l'uranium (UF<sub>3</sub>/PuF<sub>3</sub>) et des fluorures d'actinides mineurs. Il faut en dissoudre suffisamment pour devenir critique, mais par contre on peut être limité par le taux de solubilité, pour le Pu et les actinides mineurs, dans certaines configurations. Du thorium pourra aussi être utilisé pour initier des cycles basés peu à peu sur l'U-233 [Réf. 21]. Durant la vie du réacteur, la composition de ce fluide va évoluer, et ce de manière notable, avec création continue de nouveaux produits. Le contrôle de cette composition constitue, au niveau de la chimie, un des challenges des MSR.

##### La chimie du fluide

La composition du fluide est modifiée de façon continue par les réactions de fission dans le sel combustible. Le rôle du retraitement sur site est d'éviter les dépôts d'éléments non solubles dans le circuit combustible, de garder le contrôle de la corrosion, et d'éliminer certains produits de fission neutrophages qui étoufferaient peu à peu le réacteur. Le traitement du sel se fait, d'une part par un bullage de gaz directement en cœur, et d'autre part par un retraitement sur site.

Dans un réacteur à combustible solide, les produits de fission gazeux ou solides restent dans la gaine du combustible. Ici, il faut récupérer ces produits afin d'éviter qu'ils ne s'accumulent au niveau de la surface libre du circuit pour les produits de fissions gazeux, ou qu'ils ne se déposent sur les surfaces d'échange plus froides pour les métaux nobles. Le procédé expérimenté dans les années 1970 sur le prototype américain MSRE est une injection de gaz (hélium) en continu, qui entraîne les PF gazeux et certains métaux nobles volatils. L'hélium injecté est ensuite récupéré par un séparateur. Les métaux nobles sont alors récupérés par filtration sur un métal liquide pour éviter leur dépôt dans le circuit combustible comme constaté initialement

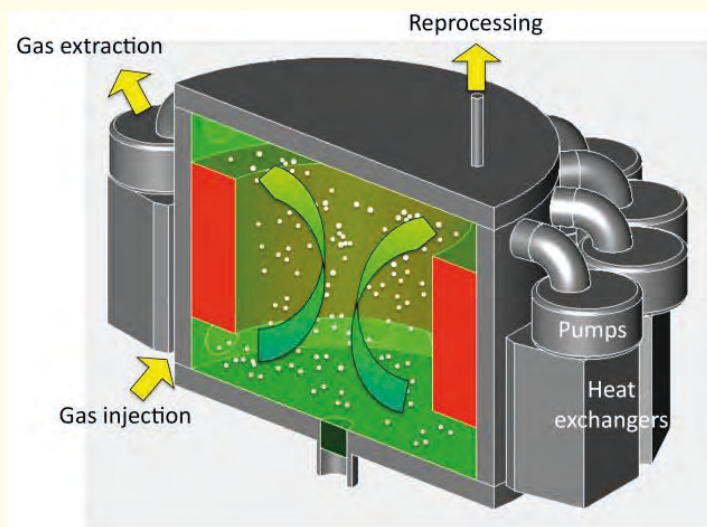


Figure 5: coupe schématique du cœur d'un réacteur à sels fondus.

dans le MSRE. Les gaz de fission sont traités séparément.

Ensuite, et c'est l'un des intérêts de cette filière, un retraitement du combustible s'effectue sur site, sans nécessiter l'arrêt du réacteur, par ponction régulière d'une petite fraction de sel combustible, pour extraction des produits de fission dont l'accumulation conduirait, peu à peu, à l'étouffement du cœur. Cette opération permet aussi un ajustement de la matière fissile. Il a été montré que le concept de MSFR est très peu sensible, du point de vue neutronique, à ce retraitement chimique du fait de son spectre de neutrons rapides.

Le procédé pyro-métallurgique retenu *a priori*, comporte plusieurs étapes :

- › fluoration (U, Pu, Np) ;
- › extraction réductrice des actinides (Pa, Am, Cm) ;
- › extraction des produits de fission, principalement les lanthanides neutrophages qui dégradent le bilan neutronique du réacteur.

Des essais récents montrent un certain nombre de verrous qui doivent être étudiés :

- › la fluoration de l'U. Même si ce procédé a été longtemps étudié par l'*Oak Ridge National Laboratory* et bénéficie également d'une application industrielle dans le cycle du combustible nucléaire, sa mise en œuvre dans le MSRE a mis en évidence une corrosion par des fluorures métalliques tels  $FeF_2/FeF_3$ ,  $NiF_2$  et  $CrF_2/CrF_3$ . La mise au point d'un système à paroi refroidie sera certainement nécessaire pour limiter cette corrosion ;
- › la volatilisation du Pu est possible mais difficile à maîtriser du fait de l'instabilité du  $PuF_6$  volatil, qui a tendance à se décomposer en  $PuF_4 + F_2$ , rendant difficile la gestion de la criticité dans l'installation ;
- › l'efficacité de l'étape d'extraction des lanthanides

n'est à ce jour pas démontrée dans le bain de référence.

Le sel contient un grand nombre de constituants initiaux différents (U, Pu, actinides mineurs, thorium, etc.) dont les compositions varient notablement dans le temps avec la création continue de nouveaux produits.

### Les matériaux

La corrosion des matériaux est fortement liée à la présence dans le sel combustible, de l'uranium dissous, d'oxydants et de produits de fission comme le tellure. Par ailleurs, les structures de cœur seront soumises à de fortes doses d'irradiations (jusqu'à 7,5 dpa/an sur des parois de circuit primaire). On notera que dans le MSRE la masse critique était contenue dans des canaux en graphite, ce qui limitait les flux sur les parois métalliques.

Sur les prototypes américains opérés dans les années 1950 et 1960 ARE et MSRE, un matériau avait été développé : l'Hastelloy N

Ce matériau avait donné une relative satisfaction avec les réserves suivantes :

- › une production d'hélium provenant des réactions nucléaires du Ni et du B contenus dans l'alliage du matériau de structure. L'accumulation d'He aux joints de grains de l'Hastelloy N a été observée dans le MSRE (durcissement de l'alliage) ;
- › une corrosion identifiée dans le MSRE due au tellure, un produit de fission qui induit une corrosion inter-granulaire ;
- › une corrosion acceptable si on ne dépasse pas 700 °C dans un sel au redox contrôlé.

Actuellement, aucun matériau de structure n'est totalement validé dans la gamme de température de fonctionnement du MSFR. On voit que le changement de la composition du sel et l'augmentation de la plage de température de fonctionnement, font que le REX du premier prototype MSRE n'est que partiellement applicable aux MSFR actuellement à l'étude.

Des espoirs sont placés dans des alliages nouveaux contenant du

tungstène en cours de tests en France et en Russie, et qui pourraient être utilisés jusqu'à 750 °C. La Chine (au SINAP), en collaboration avec l'Australie, développe un programme de conception et de validation de matériaux en alliages base Nickel pour les RSF.

“

**DES ESPOIRS SONT PLACÉS DANS DES ALLIAGES NOUVEAUX CONTENANT DU TUNGSTÈNE EN COURS DE TESTS EN FRANCE ET EN RUSSIE, ET QUI POURRAIENT ÊTRE UTILISÉS JUSQU'À 750°C.**

”

### Les points à retenir

- › Dans cette filière, les défis liés à la chimie sont très complexes : contrôle de la chimie du fluide, extraction sur site de certains produits de fission, corrosion des matériaux de structure.
- › Le défi de l'extraction des produits de fission existe pour toutes les filières. Les MSR sont les seuls à pouvoir potentiellement l'effectuer sur site durant le fonctionnement du réacteur.

## L'EAU POUR LES RÉACTEURS À EAU SUPERCRITIQUE

### Les caractéristiques du fluide

À une pression de l'ordre de 250 bars et une température d'environ 374 °C, l'eau est dans une phase supercritique, ou sa masse volumique diminue alors que sa capacité calorifique est multipliée par six. Ceci présente un certain nombre d'avantages potentiels pour la conception du réacteur, mais également quelques problèmes de chimie spécifiques.

### La chimie du fluide

Le traitement de l'eau lui-même ne présente pas de problèmes spécifiques particuliers, vis-à-vis de la chimie de l'eau classique pour réacteurs.

### Les matériaux

Dans cette phase supercritique, la corrosion des matériaux de structure vient de ce que l'eau supercritique possède une très grande agressivité. Ce fluide est utilisé industriellement comme un très bon solvant. De plus, il existe des effets de radiolyse très différents de ceux des réacteurs à eau conventionnels dans un système fonctionnant avec une pression et une température plus élevées.

Ceci étant, et pour la partie classique du réacteur, c'est-à-dire les parties qui ne sont pas sous irradiation, il existe l'expérience des centrales modernes à charbon, ▶

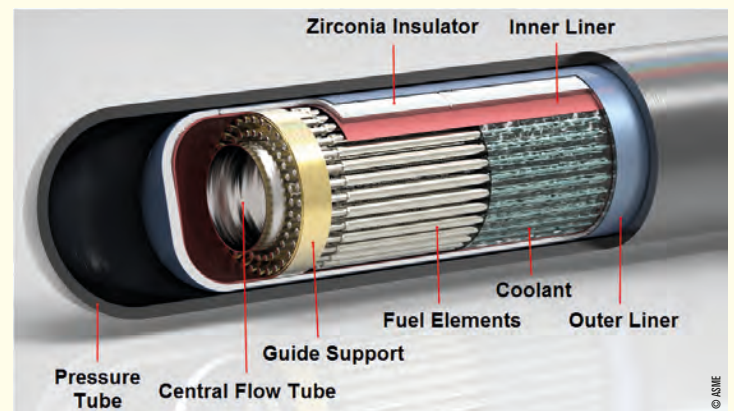


Figure 6: coupe d'un design de réacteur à eau supercritique (Canadian SCWR).

utilisant l'eau supercritique de manière assez courante.

Deux options sont actuellement à l'étude. Des options avec cuve, où la pression conduit à des épaisseurs importantes et des difficultés en termes de fabrication et de soudage, et l'option CANDU où le fluide reste confiné dans les tubes de force, ce qui simplifie la conception et le dimensionnement.

Pour les parties sous flux, des validations des matériaux sont à effectuer. On notera que vu la pression très importante, on est obligé d'abandonner les gaines en zircaloy et de revenir à des gaines de combustible en acier inoxydable seules capables de supporter cette pression. Ceci conduit alors à une pénalité neutronique due à l'absorption des neutrons par la gaine. Le flux sera plus rapide que sur un REP, à cause de la diminution importante

du volume d'eau. Dans le cadre de l'option CANDU les matériaux de la gaine et de l'isolant thermique autour de l'assemblage sont actuellement en irradiation sur réacteur pour validation de leur tenue sous flux.

### Les points à retenir

- › Les réacteurs à eau supercritique ne sont pas confrontés à des défis chimiques majeurs.
- › La filière eau supercritique peut bénéficier de l'expérience en chimie apportée par l'utilisation de ce fluide sur les centrales à charbon. Seules les parties sous flux demandent des validations spécifiques des matériaux concernés.
- › Les défis de cette filière portent davantage sur la neutronique et la sûreté.

## références

- [1] *Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies* - édition 2015, OECD/NEA n°07268 (<https://www.oecd-neo.org/science/pubs/2015/7268-lead-bismuth-2015.pdf>). [2] Papovyants, A.K. et al. (1998), "Purifying Lead-bismuth Coolant from Solid Impurities by Filtration", *Proceedings of the Conference of the Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Obninsk, Russian Federation*, 5-9 October, pp. 675-682 (in Russian). [3] J. Buongiorno, N. E. Todreas, et al., *Keys features of an integrated Pb-Bi cooled reactor based on water/liquid-metal direct heat transfer*, *Transaction of the ANS Winter Meeting*, Long Beach, USA, 1999. [4] ZZ : Martynov, P.N., Gulevich, A.V., Orlov, Y.I., Gulevsky, V.A., 2005. *Water and hydrogen in heavy liquid metal coolant technology*. *Progress in Nuclear Energy* 47, 604-615. doi:10.1016/j.pnucene.2005.05.063. [5] Pramono, Y., Takahashi, M., Sofue, H., Matsumoto, M., Huang, F., 2016. 7 MPa Commissioning of Two-phase Flow Loop for Pb-Bi Cooled Direct Contact Boiling Water Small Fast Reactor. *Indonesian Journal of Physics* 16, 7-12. [6] Maury, C., Sirven, J.-B., Tabarant, M., LHermite, D., Courouau, J.-L., Gallou, C., Caron, N., Moutiers, G., Cabuil, V., 2013. *Analysis of liquid sodium purity by laser-induced breakdown spectroscopy. Modeling and correction of signal fluctuation prior to quantitation of trace elements*. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 82, 28-35. doi:10.1016/j.sab.2012.12.005. [7] Malkow, T., Steiner, H., Muscher, H., Konys, J., 2004. *Mass transfer of iron impurities in LBE loops under non-isothermal flow conditions*. *Journal of Nuclear Materials, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Materials for Hybrid Reactors and Related Technologies* 335, 199-203. doi:10.1016/j.jnucmat.2004.07.021. [8] FF : Weisenburger, A., Mansani, L., Schumacher, G., Müller, G., 2014. *Oxygen for protective oxide scale formation on pins and structural material surfaces in lead-alloy cooled reactors*. *Nuclear Engineering and Design* 273, 584-594. doi:10.1016/j.nucengdes.2014.03.043. [9] L.W. Graham et al., *Proceedings of a symposium on Gas-cooled reactors with emphasis on advanced systems*, Vol. I, IAEA 190-203, 1976. [10] N. Sakaba et Y. Hirayama, *Proceedings of GLOBAL 2005*, No. 263, 2005. [11] K. Krompholtz et al., *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Int. Congress on Metallic Corrosion*, Vol. II, Dechema publ., 1613-1621, 1981. [12] O. Gastaldi et al., *Proceedings of HTR2006*, D00000091, 2006. [13] C. Moreau et al., *Proceedings of a AIEA Symposium*, CN 36/270, 1977. [14] J.P. Bonal et J.C. Robin, Monographie DEN, *Les réacteurs nucléaires à caloporteur gaz*, 27-32, 2007. [15] J. Wright et al., *Proceedings of PVP2013*, PVP 2013-98045, 2013. [16] C. Cabet et F. Rouillard, *J. Nucl. Mater.*, 392, 235-242, 2009. [17] F. Rouillard et al., *Oxid. Met.*, 68, 133-148, 2007. [18] C. Cabet et B. Duprey, *Proceedings of HTR 2010*, paper 54, 2010. [19] N. Jacobson et al., *Journal of the American Ceramic Society*, 29(3), 193-198, 2012. [20] C. Cabet, *In Materials Issues for Generation IV Systems: status, open questions and challenges*, NATO Science for Peace and Security Series B - Physics and Biophysics, 351-366, 2008. [21] D. Heuer, E. Merle-Lucotte et al., "Towards the Thorium Fuel Cycle with Molten Salt Fast Reactors", *Annals of Nuclear Energy* 64, 421-429 (2014) [22] Allibert M., Auffero M., Brovchenko M., Delpech S., Ghetta V., Heuer D., Laureau A., Merle-Lucotte E., "Chapter 7 - Molten Salt Fast Reactors", *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, Woodhead Publishing Series in Energy, pages 157-188 (2015)

# Règlement REACH : quelles évolutions pour l'industrie nucléaire ?

Par **Magali Boize**, Ingénieur expert produits chimiques - EDF / UNIE  
et **Richard Ivens**, Directeur des affaires publiques - FORATOM



## en substance...

En adoptant la directive REACH, l'Union européenne a renforcé l'encadrement de l'usage des produits chimiques catégorisés comme dangereux pour l'homme et l'environnement. L'industrie nucléaire, bien qu'utilisatrice marginale de produits chimiques en volume, n'en demeure pas moins potentiellement impactée. Ces dernières années, le débat s'est notamment porté sur l'utilisation du bore dans les centrales. Modérateur de la réaction nucléaire, le bore, sans substitut, est en effet indispensable au bon fonctionnement des centrales nucléaires. Si pour le moment la molécule n'est pas soumise à autorisation, cet exemple montre l'importance d'avoir une vision globale et anticipatrice de la réglementation concernant les produits chimiques utilisés dans l'industrie nucléaire, et ce dès la phase de conception.

**L**e règlement européen REACH (règlement CE n° 1907/2006) a été adopté pour améliorer la protection de la santé humaine et de l'environnement face aux risques que présentent les substances chimiques. REACH signifie *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals* (enregistrement, évaluation, autorisation des substances chimiques ainsi que les restrictions applicables à ces substances). Ce règlement, entré en vigueur le 1<sup>er</sup> juin 2007, a renouvelé l'action européenne en matière de prévention et de gestion des risques liés aux produits chimiques en renforçant les exigences pour les sociétés qui fabriquent, commercialisent ou utilisent des produits chimiques dans l'Union européenne et en accroissant la disponibilité de l'information et les échanges dans les chaînes d'approvisionnement. Les sociétés doivent

apporter la preuve de l'utilisation des substances en toute sécurité à l'agence mandatée créée par le règlement REACH, l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) située à Helsinki. Pour les substances dont les risques sont jugés plus importants, substances dites extrêmement préoccupantes, les États membres et la Commission européenne (CE) peuvent décider d'interdire de manière ciblée des utilisations (procédure de restriction) ou de subordonner les utilisations à l'obtention d'une autorisation d'usage (procédure d'autorisation). Pour ces substances soumises à autorisation, le règlement REACH prône leur substitution lorsque cela est possible.

L'industrie nucléaire étant un utilisateur de produits chimiques divers et variés, nécessaires à son fonctionnement, elle est soumise au sein de l'UE aux exigences du règlement REACH. Si REACH a indéniablement fait progresser la connaissance sur les substances chimiques et la sécurité des utilisateurs, il s'agit d'un règlement complexe qui suscite également des inquiétudes dans l'industrie.

Des substances non substituables à ce jour et nécessaires au bon fonctionnement de l'industrie nucléaire tels que l'hydrazine ou les borates sont candidates à l'autorisation d'usage.


## EXEMPLE DE L'ACIDE BORIQUE

Suite à proposition de l'Allemagne et de la Slovénie, l'acide borique a été inclus en juin 2010, sur la liste des substances candidates à l'autorisation d'usage en raison de son caractère reprotoxique.

L'ECHA propose au moins tous les deux ans une liste de substances

de la liste candidate à soumettre à l'autorisation. Elles sont priorisées sur la base de leurs propriétés de danger, des volumes d'utilisation et du caractère dispersif des usages. L'acide borique est utilisé dans de nombreux secteurs dont ceux du verre et de la céramique, des engrais, des détergents ou encore de l'automobile. Il a ainsi été priorisé en raison du volume d'utilisation et des usages dispersifs et a été inclus par l'ECHA sur sa 6<sup>e</sup> recommandation de substances à soumettre à autorisation. Cette recommandation a été soumise à consultation publique en septembre 2014 et de nombreuses parties prenantes dont Foratom, EDF, AREVA ou le CEA ont répondu à la consultation, mettant en avant le caractère essentiel des usages et l'absence de substitution.

Cette entrée de l'acide borique dans le processus d'autorisation du règlement REACH a fait l'objet de nombreux échanges dans le secteur nucléaire, avec la chaîne d'approvisionnement et les différents secteurs d'utilisation, la majorité des utilisateurs étant préoccupés par la disparition d'une substance jugée stratégique pour l'UE.

L'acide borique est utilisé dans toutes les centrales nucléaires à eau du monde. Utilisé principalement dans le circuit primaire principal, en liaison directe avec le réacteur nucléaire, l'isotope 10 du bore de l'acide borique permet de contrôler les réactions de fission du combustible, en ajustant la réactivité en fonction de l'épuisement du combustible entre le début et la fin du cycle. Ainsi, son usage est indispensable au fonctionnement 

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable

LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE

des centrales nucléaires pour permettre la maîtrise de la réaction nucléaire et assurer la sûreté des installations.

L'utilisation de l'acide borique dans l'industrie nucléaire représente cependant une faible part du marché, environ 0,5 % de toutes les utilisations dans l'UE, et aucun autre composé chimique ne présente les caractéristiques nécessaires pour remplacer l'acide borique pour cet usage. De nombreuses recherches de substitutions ont pourtant été engagées et partagées dans l'industrie nucléaire depuis de nombreuses années, jusqu'à maintenant sans succès.

En décembre 2016, la CE décide de ne pas inscrire l'acide borique à l'annexe du règlement REACH des substances soumises à autorisation (annexe XIV) : « *L'acide borique, le tétraborate disodique (anhydre), le trioxyde de dibore et l'heptaoxyde de tétraborate et de disodium (hydrate) répondent aux critères de classification comme substances toxiques pour la reproduction (catégorie 1B) selon le règlement (CE) n° 1272/2008 et satisfont dès lors aux critères d'inclusion dans l'annexe XIV du règlement (CE) n° 1907/2006 exposés à l'article 57, lettre c) de ce règlement. La recommandation de l'agence du 1<sup>er</sup> juillet 2015, conformément à l'article 58 du règlement (CE) n° 1907/2006, les a également identifiés et inclus dans la liste visée à l'article 59 de ce règlement en vue d'une inclusion à terme dans l'annexe XIV de ce même règlement. D'autre part, les utilisations de ces substances sont très diverses et touchent une large gamme d'industries de fabrication différentes, ce qui devrait conduire à des demandes d'autorisation hautement complexes. Étant donné que l'expérience actuelle dans le traitement des demandes d'autorisation couvrant une large gamme d'utilisations est encore limitée, il convient de surseoir à la décision concernant l'inclusion de ces substances dans l'annexe XIV pour le moment.* »

Pour le moment, l'acide borique

n'est pas soumis à autorisation d'usage.

### RESTER EN VEILLE

L'inscription de substances sur la liste européenne des substances préoccupantes candidates à l'autorisation font peser sur ces substances des incertitudes sur leur devenir. Les industries, utilisatrices ou fabricantes, les formulateurs cherchent des substituts, mais dans certains cas, trouver des solutions alternatives n'est pas toujours possible en gardant le même niveau d'efficacité, de qualité et de sécurité. Lorsque ces substances sont déjà réglementées et dont le caractère très dangereux est déjà connu comme les substances cancérigènes ou reprotoxiques, elles ont déjà été substituées ou des recherches de substitution ont souvent été menées bien en amont de l'identification de leur caractère préoccupant par le règlement REACH. Ces recherches permettent aux industriels de justifier l'impossibilité de substitution ou les délais nécessaires pour remplacer les substances. Cependant, les justifications doivent également prendre en compte le changement de paradigme introduit par REACH qui pousse à une recherche des alternatives considérant la fonctionnalité des produits et non plus la seule substance à remplacer.

Pour certaines substances, l'industrie découvre leur caractère préoccupant lors de leur entrée dans le processus d'autorisation. C'est par exemple le cas des perturbateurs endocriniens (exemple des nonylphénols). Les délais accordés par le règlement pour substituer sont courts, trop courts, surtout lorsque les procédés nécessitent des qualifications ou des homologations. Les industriels doivent alors justifier leur besoin de ces substances, lancer la recherche d'alternatives disponibles et déposer un dossier de demande d'autorisation auprès de l'ECHA, dossier lourd et coûteux ; tout cela dans des délais jugés limités.

Les coûts de constitution des dossiers, les incertitudes sur la viabilité des substances, la crainte de perdre des marchés, peuvent par ailleurs décider les acteurs de la

chaîne d'approvisionnement à abandonner la production ou l'utilisation de substances efficaces au profit d'alternatives, pas toujours plus durables ou performantes. Contraindre ou restreindre réglementairement l'utilisation de substances conduit inévitablement à la réduction du marché et à l'augmentation des prix.

Le risque de disparition d'une substance est d'autant plus grand pour un utilisateur en aval comme l'industrie nucléaire que son usage est spécifique, que sa chaîne d'approvisionnement est longue et qu'il représente une part négligeable du marché.

“  
IL EST PRIMORDIAL  
D'ASSURER UNE VEILLE  
CONSTANTE SUR LES  
ÉVOLUTIONS DES LISTES  
RÉGLEMENTAIRES,  
LES MARCHÉS  
ET D'ACCROÎTRE  
LA COMMUNICATION.  
”

Il est en effet difficile, lorsque les chaînes d'approvisionnement sont longues ou complexes d'anticiper les impacts de la réglementation REACH sur les produits ou matériaux utilisés et d'obtenir les informations pour assurer une gestion efficace des risques dans les délais requis, les intérêts des acteurs pouvant s'avérer divergents.

Les entreprises subissent parfois des changements de composition des produits qu'ils utilisent sans même en avoir été informés et sans que les conséquences puissent avoir été analysées ou le respect des spécifications requises vérifié.

Dans l'industrie nucléaire, le respect des prescriptions pour certaines catégories de produits revêt un caractère essentiel pour la sûreté des installations. Les exigences pour l'utilisation de certains produits dans les centrales nucléaires sont élaborées en fonction des enjeux de sûreté, des particularités de chaque produit et des gammes de

fabrication. Toute modification de formulation peut engendrer des conséquences non négligeables, voire critique pour les installations. Il est donc primordial d'assurer une veille constante sur les évolutions des listes réglementaires, les marchés et d'accroître la communication et le partage avec les parties prenantes, notamment pour la substitution.

### SUBSTITUER

La substitution effective d'un produit lié au process dans le nucléaire peut conduire à des dépenses de l'ordre de la dizaine de millions d'euros sur une dizaine d'années et les études de substitution qui ne débouchent pas toujours sur l'identification d'une substitution possible sont associées à des dépenses de R&D qui peuvent atteindre le million d'euros sur une dizaine d'années.

Pour un utilisateur aval, la problématique industrielle pose la question de la sécurité d'approvisionnement pour des produits stratégiques pour les activités, notamment pour des utilisations non standards, comme c'est le cas pour l'acide borique. Le processus d'autorisation du règlement REACH accélère des processus d'obsolescence qui nécessitent une veille, une anticipation de la part des utilisateurs aval. La chronologie imposée par REACH sur les substances préoccupantes permet encore la gestion des risques et la mise en œuvre de recherches d'alternatives en lien avec la chaîne amont. Il est cependant à craindre qu'une augmentation brutale du nombre de substances à regarder pour la substitution ne puisse être absorbée par les entreprises au regard des ressources disponibles et dans un contexte économique encore difficile. Les obligations actuelles en termes d'étude de substitution à réaliser et des substitutions effectives mobilisent des ressources humaines et financières à un niveau d'engagement qu'il semble difficile d'augmenter. Le risque est de devoir traiter davantage de produits et d'avoir des délais de traitement effectifs qui augmenteront de manière significative, au détriment d'une bonne gestion des risques pour l'homme et l'environnement. ■

# La chimie du recyclage des matières nucléaires, une expertise et un savoir-faire français inégalés

Par **Christophe Poinssot**, chef du Département de recherche sur les procédés pour la mine et le recyclage du combustible (DMRC) - CEA, et **Stéphane Grandjean**, chef du Service d'études des procédés de dissolution et séparation (DMRC/SPDS) - CEA

## en substance...

Processus hautement complexe, le recyclage des matières nucléaires issues des combustibles usés fait partie intégrante de la stratégie française de fermeture du cycle nucléaire. Cette maîtrise technologique, inégalée à ce jour dans le monde, fait l'objet d'innovations constantes, notamment pour simplifier les procédés de traitement. Grâce à ce savoir-faire, la France est en mesure de diminuer ses déchets nucléaires tout en créant du combustible neuf, le Mox, qui permet de recycler le plutonium dans certains réacteurs à eau sous pression. Convoitée par la Chine, qui pourrait signer prochainement un accord avec la France, cette expertise permettra de produire le combustible des réacteurs de 4<sup>e</sup> génération.



**D**epuis plus de 25 ans, la France traite et recycle ses combustibles nucléaires usés à l'échelle industrielle au sein des usines de La Hague et MELOX exploitées par New AREVA. Plus de 34 000 tonnes de combustibles usés ont ainsi été traitées, et le plutonium récupéré réutilisé pour fabriquer des combustibles MOX qui alimentent aujourd'hui 22 réacteurs français. Cette stratégie présente de nombreux avantages qui font la force du nucléaire français :

- › elle permet de mieux utiliser la ressource naturelle uranium en permettant le recyclage des matières énergétiques uranium (U) et plutonium (Pu) ;
- › elle évite l'accumulation en entreposage de grandes quantités de combustibles nucléaires usés qui devraient

sinon être surveillés et protégés dans l'attente de décision sur leur devenir ultime ;

- › elle diminue également de façon significative le volume et la toxicité des déchets ultimes tout en réduisant l'empreinte environnementale globale du cycle électronucléaire<sup>1</sup> (Poinssot et al., 2014). Grâce à ces technologies, la France dispose d'une expertise et d'un savoir-faire inégalé à ce jour sur les procédés industriels de recyclage des matières nucléaires.

Ce choix stratégique trouve toute sa pertinence dans la perspective du développement des cycles électro-nucléaires de 4<sup>e</sup> génération qui permettront à l'avenir de multi-recycler les matières nucléaires sans limitation. Cet article vise à donner un aperçu des procédés et savoir-faire industriels et des perspectives de développement de procédés innovants pour l'avenir.

## LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS ACTUELS DE RECYCLAGE

### Le traitement du combustible

Le recyclage des combustibles nucléaires est un processus complexe (figure 1) qui nécessite d'abord d'accéder à la matière nucléaire contenue dans le gainage nucléaire des combustibles, ce qui est fait en cisailant l'ensemble de l'assemblage en tronçons centimétriques. Les tronçons de gaine sont alors immergés dans une solution d'acide nitrique concentrée qui va dissoudre la pastille combustible qui contient U, Pu et les produits de fission tout en évitant d'attaquer la gaine métallique qui constitue un déchet solide. Cette étape de dissolution est cruciale dans la mesure où elle doit garantir la mise en solution de l'ensemble de la matière nucléaire et gérer la libération des éléments gazeux présents dans le combustible tout en évitant d'éventuelles accumulations et ▶

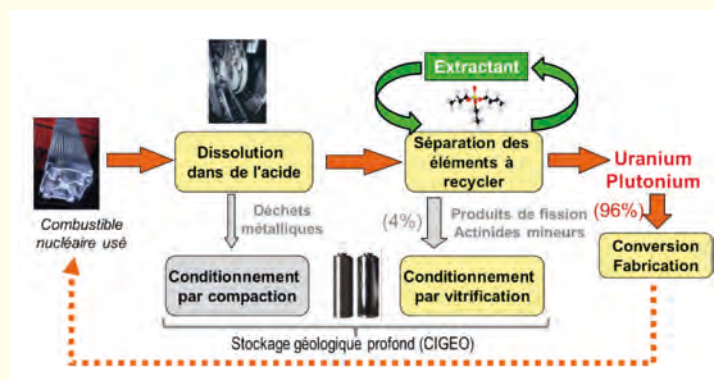


Figure 1: représentation schématique des procédés de recyclage des matières nucléaires.

1. Poinssot et al., 2014

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable  
LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE

entraînements de matières fissiles dans les déchets solides à conditionner. Elles se déroulent de plus dans des conditions physico-chimiques très complexes et agressives (forte acidité – >5M –, forte radioactivité liée à la présence de l'ensemble des radioéléments) et nécessitent des protections biologiques importantes et des équipements très résistants. La solution acide contenant le combustible dissous est ensuite mise en contact avec une huile organique contenant notamment une molécule extractante qui extrait sélectivement U et Pu en phase organique. Le procédé PUREX actuel utilise le Tributylphosphate découvert en 1947 par les équipes du *Glen Seaborg's Metallurgical Laboratory*. Une fois les deux phases séparées par



**AUJOURD'HUI,  
LES RÉACTIONS  
CHIMIQUES PEUVENT  
ÊTRE CARACTÉRISÉES  
PAR LA SIMULATION.**



décantation, la partition de Pu et U est aujourd'hui réalisée en introduisant un réducteur qui va transformer Pu(IV) en Pu(III) qui, n'étant pas extractible, va revenir sélectivement en phase acide. U est ensuite récupéré en augmentant la température et réduisant l'acidité de la solution. Ces procédés, ne permettant pas d'atteindre les performances requises en une seule étape, sont répétés de nombreuses fois conduisant à une usine complexe.

Enfin, le Pu purifié est alors converti en oxyde PuO<sub>2</sub> grâce à deux étapes successives, la première de précipitation réalisée avec un acide organique, l'acide oxalique, la seconde de calcination du précipité dans un four. Une poudre de PuO<sub>2</sub> est ainsi produite, aux propriétés parfaitement contrôlées et compatibles avec la fabrication ultérieure de pastilles de combustible MOX. L'ensemble de ces procédés permet aujourd'hui de récupérer 99,9 % du Pu initial avec un facteur de décontamination

supérieure à 10 000 000, ce qui constitue une véritable prouesse chimique. Ces procédés développés de longue date par le CEA constituent le cœur de l'activité industrielle des usines de La Hague et ils ont fait la preuve de leur efficacité depuis le démarrage de l'usine au début des années 1980.

### La fabrication du combustible MOX

Le combustible MOX, qui contient de l'ordre de 8-10 % de Pu provenant du traitement, est fabriqué dans l'usine MELOX (Gard). Ces opérations sont réalisées en boîte à gants par métallurgie des poudres. Elles consistent à mélanger les poudres de PuO<sub>2</sub> avec des poudres d'oxyde d'uranium pour obtenir un premier mélange primaire qui va être ensuite dilué à nouveau avec de l'oxyde d'uranium pour constituer un mélange secondaire. Ce mélange est alors introduit dans des moules et pressé pour former des pastilles crues qui sont ensuite frittées à haute température. Les pastilles ainsi obtenues sont rectifiées pour qu'elles respectent strictement les spécifications dimensionnelles du combustible. Ces procédés ont permis de fabriquer à ce jour plus de 2 600 t de combustibles MOX pour les électriciens français et étrangers. Ces combustibles alimentent aujourd'hui 43 réacteurs dans le monde, dont 22 en France qui fournissent à ce jour environ 10 % de l'électricité française.

### LES SPÉCIFICITÉS DU SAVOIR-FAIRE FRANÇAIS SUR LE RECYCLAGE NUCLÉAIRE

#### De la recherche à l'industrie

La France possède aujourd'hui un savoir-faire inégalé dans le domaine du recyclage nucléaire, tant d'un point de vue industriel avec le savoir-faire de New AREVA qui exploite aujourd'hui les usines les plus performantes au monde, que scientifiquement avec le CEA qui a développé une expertise unique au service de la filière. L'efficacité et la sûreté des procédés mis en œuvre reposent sur une compréhension intime des réactions chimiques intervenant dans ces procédés et sur la capacité à concevoir et optimiser



Figure 2 : méthodologie de développement technologique d'un procédé.

Figure 3 : tableau de Mendeleïev montrant la grande similarité entre les éléments chimiques présents dans les combustibles nucléaires utilisés (en vert), et les métaux stratégiques critiques à l'échelle européenne (en bleu) ou mondiale (en rouge).

des équipements permettant de les mettre en œuvre et de les maîtriser. Le CEA couvre ainsi l'ensemble des différents niveaux de maturité technologique (souvent décrite par son acronyme anglo-saxon TRL), qui s'échelonnent depuis la recherche exploratoire ou de compréhension jusqu'à la conception de l'atelier industriel, en passant par les étapes successives de recherche de réactifs chimiques pertinents et performants, de développement du procédé à proprement parler, de développement des modèles physico-chimiques permettant de simuler le procédé, de qualification du procédé à une échelle représentative d'abord sur de la matière inactive puis sur de la matière nucléaire réelle, et enfin de développement des équipements industriels adaptés aux spécificités de ce procédé (figure 2).

C'est ainsi que les usines actuelles de La Hague sont le fruit des

développements réalisés par les équipes de Marcoule dans les années 1980 et 1990. Fort de son expérience, le CEA apporte également son soutien à l'exploitant industriel ce qui lui permet en retour de conforter et nourrir son expertise pour le bénéfice de l'ensemble de la filière.

Fidèle à sa devise d'aller de la recherche à l'industrie, le CEA a ainsi développé dans ces domaines des approches intégrées et robustes qui font aujourd'hui école dans d'autres secteurs industriels, notamment celui de l'économie circulaire et du recyclage des métaux stratégiques. Aller chercher avec une grande efficacité des éléments présents à faible teneur, développer des procédés robustes, sûrs, efficaces et produisant peu de déchets secondaires sont des savoir-faire qui intéressent bien au-delà du nucléaire. Ceci est d'autant plus pertinent que

les métaux stratégiques qui constituent le moteur des technologies *high-tech* d'aujourd'hui sont pour beaucoup également présents dans les combustibles nucléaires usés et sont donc bien connus dans l'industrie nucléaire (figure 3)

Les savoir-faire nucléaires ont donc une vocation duale évidente et contribuent au développement de procédés performants de recyclage de batteries ou d'aimants permanents par exemple.

### De l'atome à l'usine

Comme indiqué précédemment, la modélisation et la simulation jouent un rôle important dans la conception de procédés performants et sûrs, notamment parce que cela permet d'explorer des champs paramétriques beaucoup plus vastes que la seule expérience. Historiquement, les modèles utilisés étaient essentiellement développés à partir de très nombreuses mesures expérimentales, d'abord en réalisant des interpolations entre les points expérimentaux (simple abaque) puis en identifiant et caractérisant les réactions chimiques (modèles physico-chimiques). De plus en plus, le développement des connaissances en chimie théorique et des puissances de calcul des ordinateurs permet d'identifier et caractériser les réactions chimiques par la

simulation des phénomènes intervenant aux plus petites échelles de la matière. Si on reste sur l'exemple de la chimie séparative, on commence à être capable de comprendre ce qui se passe quand un atome de U ou de Pu s'approche d'une goutte d'extractant et par quel mécanisme il est entraîné dans la phase organique comme le montre la figure 4. Ces progrès laissent entrevoir la possibilité de concevoir et d'optimiser des procédés de manière moins empirique, et notamment de pouvoir estimer les paramètres thermodynamiques ou cinétiques intervenant dans les modèles en rationalisant le recours à l'expérimentation en haute-activité qui reste complexe, longue et onéreuse. Cela laisse également présager des modèles plus robustes car s'appuyant sur une description physico-chimique des mécanismes aux échelles atomiques et moléculaires qui sont invariants dans le temps. Tout cela est évidemment un gage de sûreté renforcée et de robustesse industrielle.

### LES PERSPECTIVES POUR LES PROCÉDÉS FUTURS DE RECYCLAGE

Grâce au savoir-faire scientifique et industriel acquis et développé depuis les années 1960, la France est en position favorable pour proposer des procédés innovants pour les systèmes nucléaires de nouvelle génération. L'objectif est multiple :

- ▶ adapter les procédés d'abord aux spécificités des combustibles des cycles futurs qui avec le multi-recyclage du plutonium seront sans aucun doute plus riches en plutonium et avec des compositions isotopiques plus exigeantes ;
- ▶ simplifier les procédés pour les rendre plus performants économiquement et plus robustes en termes de fiabilité industrielle. Avec le déploiement du multi-recyclage du plutonium, les réacteurs seront alimentés de manière plus importante par les produits du recyclage, et il convient de garantir une disponibilité et une fiabilité

pour ne pas fragiliser la production électronucléaire ;

- ▶ élargir les procédés pour, le cas échéant, être à même de proposer un recyclage qui aille au-delà des seuls U et Pu ;
- ▶ améliorer l'empreinte environnementale des procédés pour améliorer la durabilité du nucléaire (Serp et al., 2017).

Dans ce contexte, les équipes françaises développent aujourd'hui des procédés innovants qui s'inscrivent dans cette perspective. Seuls trois exemples sont présentés brièvement à titre d'illustration dans les paragraphes ci-dessous.

### Améliorer les capacités de traitement des usines actuelles

Les usines actuelles ont été conçues pour traiter des combustibles UOX. Le traitement en grande quantité de combustibles MOX **REL** ou **RNR** ou de combustibles de réacteurs de recherche peut vite s'avérer problématique au niveau de la tête d'usine, notamment si ces combustibles sont plus réfractaires à la dissolution. En effet, au-delà d'une certaine teneur en Pu (~40-50 %), l'oxyde (U,Pu)O<sub>2</sub> devient cinétiquement résistant à la corrosion par l'acide nitrique. Pour garantir un taux de récupération du Pu qui reste > 99,9 %, il convient donc d'adapter les procédés de dissolution. C'est ainsi que les équipes du CEA développent en partenariat avec AREVA d'élargir son offre de service offerte aux exploitants de réacteurs et d'étendre les possibilités du recyclage. Cela préfigure les concepts qui pourraient être mis en œuvre à plus long terme.

**REL**  
Réacteur  
à eau légère.

**RNR**  
Réacteur  
à neutrons rapides.

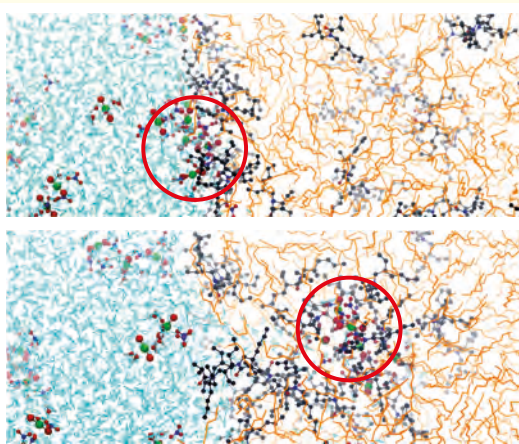


Figure 4: modélisation en dynamique moléculaire d'une interface eau (en bleu) / phase organique (solvant en orange, molécule extractante en noir) dans laquelle on est capable de décrire le passage des atomes d'uranium (en vert) d'une phase à l'autre (les deux images sont espacées de quelques milliardièmes de secondes). Les molécules d'uranium extraites sont entourées en rouge avant et après leur extraction en phase organique.

## DOSSIER

Innovante, durable  
et responsable  
LA CHIMIE AUX AVANT-POSTES  
DU NUCLÉAIRE



Fours de frittage des pastilles. AREVA, MELOX, Bagnols-sur-Cèze, France

### Élargir le recyclage au-delà des seuls actinides pour des applications industrielles

Comme indiqué dans la figure 3, le combustible irradié contient un grand nombre d'éléments chimiques qui présentent un intérêt industriel et économique certain. Au-delà des seuls U et Pu, il peut donc être intéressant d'envisager la récupération d'autres éléments pour d'autres applications industrielles. En l'absence de seuils de libération en France, la réutilisation de ces matières devra, le cas échéant, faire l'objet d'un strict contrôle et serait sans doute limitée à une réutilisation au sein de l'industrie nucléaire. Il a ainsi été montré dans une étude récente du CEA (Bourg et Poinssot, 2017), que parmi l'ensemble des éléments présents dans le combustible usé, les platinoïdes (ruthénium Ru, Rhodium Rh et Palladium Pd) étaient sans aucun doute ceux qui présentaient le plus d'intérêt :

- › la quantité susceptible d'être récupérée annuellement par le traitement des combustibles nucléaires français représente une part importante de la production annuelle mondiale ;
- › à l'exception du Pd, ils décroissent suffisamment rapidement pour envisager

leur réutilisation à l'issue d'une période d'entreposage comme le montre le tableau 1.

Il convient de noter qu'outre ces éléments, il pourrait également être envisagé de récupérer des éléments

radioactifs d'intérêt comme sources industrielles (Am, Cs, Sr) ou comme radio-isotope médical (radiothérapie). Des recherches sont aujourd'hui en cours pour développer des procédés susceptibles de séparer et purifier certains de ces différents éléments avec l'efficacité requise.

### Simplifier les futurs procédés de traitement

La séparation et purification du Pu telle que réalisée de nos jours à La Hague nécessite la mise en œuvre de plusieurs cycles de séparation pour atteindre la purification requise, ce qui représente des investissements et des coûts d'exploitation importants. Ceci est notamment lié aux limitations intrinsèques du procédé PUREX. Afin de réduire les coûts d'investissements et de fonctionnement mais aussi de permettre une utilisation plus aisée pour des combustibles plus riches en plutonium, le CEA développe des nouveaux procédés susceptibles de séparer et purifier avec l'efficacité requise le Pu en une seule étape. Ces procédés sont basés sur de nouvelles molécules extractantes plus performantes et qui permettent en outre de s'affranchir des réactions d'oxydo-réduction sources

de complexité et de consommation accrue de réactifs chimiques. Des essais ont ainsi été déjà réalisés dans l'installation Atalante avec des extractants de la famille des monoamides et ont permis de confirmer le fort intérêt de ces extractants pour développer des procédés plus performants.

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La France dispose d'une expertise scientifique et technologique, et d'un savoir-faire industriel inégalé concernant le recyclage des matières nucléaires présentes au sein des combustibles nucléaires usés. Ces compétences ont permis le développement de l'industrie française de l'aval du cycle, et à la France de prendre le *leadership* international dans ce domaine. Cela lui a ainsi permis de vendre sa technologie à l'étranger, au Japon dans les années 1990, sans doute en Chine prochainement. Cette richesse est aussi le fruit d'un développement harmonieux entre les équipes de R&D du CEA et celles de l'industriel AREVA qui ont su développer un partenariat de long terme qui est un atout certain pour la France : il garantit tant la pertinence des nouvelles solutions technologiques développées, que la performance des usines actuelles. Ces procédés de recyclage sont aussi une brique essentielle au développement d'un nucléaire durable soucieux de la bonne utilisation des ressources naturelles, d'une gestion raisonnée des déchets ultimes et qui garantit une empreinte environnementale réduite. Il permet à la France d'être à la pointe de l'innovation pour développer des systèmes nucléaires de 4<sup>e</sup> génération performants, sûrs et acceptés. ■

	Ru	Rh	Pd
<b>Flux annuel potentiel</b>	24 t	5t	16t
<b>% production mondiale</b>	21%	3.5%	1.2%
<b>Nombre d'années nécessaires pour atteindre une radioactivité &lt; 1000 Bq/g</b>	25 ans	40 ans	>> siècle

Tableau 1 : éléments d'intérêts susceptibles d'être recyclés à partir du combustible usé (Bourg & Poinssot, 2017).

### références

- [1] Poinssot Ch, Bourg S., Ouvrier N., Combemou N., Rostaing C., Vargas-Gonzales M., Bruno J. (2017), Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles, *Energy*, 69, 199-211. [2] Bourg S., Poinssot Ch., (2017), Could spent nuclear fuel be considered as a non-conventional mine of critical raw materials?, *Progress in Nuclear Energy*, 94, 222-228. [3] Serp J., Poinssot Ch., Bourg S. (2017), Assessment of the anticipated environmental footprint of future nuclear energy systems. Evidence of the beneficial effect of extensive recycling, *Energies*, 10, 1445.

# Feu vert pour la construction et l'exploitation d'une unité de traitement des nitrates (TDN) à Malvésí

Par **Nathalie Bonnefoy** et **Cécile Crampon**, Direction de la communication - New AREVA



## en substance...

Le site New AREVA de Malvésí, situé dans l'Aude, a pour activité la première étape de la conversion de l'uranium naturel, qui se situe entre l'extraction des minerais en provenance des différents sites miniers et l'enrichissement de l'uranium. Il est aujourd'hui le seul site de conversion de l'uranium dans le monde à avoir investi massivement dans un nouvel outil industriel aux plus hauts standards de sûreté et de sécurité, mais également à avoir lancé un programme d'engorgement de gestion durable de son cycle de vie industriel. Après 50 ans de fonctionnement, 500 millions d'euros ont ainsi été investis en 10 ans pour renouveler l'équipement industriel et réduire l'empreinte environnementale du site. Le projet de traitement des nitrates (TDN), objet d'une autorisation administrative de mise en œuvre en novembre 2017, en est un exemple concret.

**F**abriquer un combustible nucléaire comprend plusieurs étapes: extraction de l'uranium dans les mines, conversion de l'uranium en tétrafluorure d'uranium (UF<sub>4</sub>) puis en hexafluorure d'uranium (UF<sub>6</sub>), enrichissement de l'uranium et fabrication de combustible. Située dans le département de l'Aude, près de Narbonne, l'usine AREVA Malvésí réceptionne les concentrés de minerai d'uranium afin de les purifier et de réaliser la première étape de leur transformation, appelée conversion. Cette étape, réalisée avec un outil industriel entièrement modernisé, est suivie d'une deuxième, sur la plateforme industrielle de New AREVA au Tricastin. Dans le cadre de son activité de transformation de l'uranium,

AREVA Malvésí génère des effluents liquides nitrates issus du procédé. Ces derniers sont transférés après contrôle vers un ensemble de bassins de décantation et d'évaporation. 350 000 m<sup>3</sup> d'effluents se sont ainsi accumulés en 50 ans d'exploitation, soit l'équivalent de 90 piscines olympiques.

Afin de résorber ces volumes d'effluents nitrates, AREVA a lancé dans les années 1990 des études pour définir les traitements envisageables.

*disposer d'un déchet stable, compatible avec la filière autorisée, il faut supprimer les nitrates présents dans les effluents. Aujourd'hui le procédé TDN est le seul qui permet de répondre à cet impératif. En sortie de procédé, les gaz seront séparés, filtrés et contrôlés. La poudre cimentaire, exempte de nitrate, contenant les métaux et traces de radionucléides sera collectée et constituera le déchet final qui sera coulé dans une matrice solide. »*



**POUR DISPOSER D'UN DÉCHET STABLE, COMPATIBLE AVEC LA FILIÈRE AUTORISÉE, IL FAUT SUPPRIMER LES NITRATES PRÉSENTS DANS LES EFFLUENTS. AUJOURD'HUI LE PROCÉDÉ TDN EST LE SEUL QUI PERMET DE RÉPONDRE À CET IMPÉRATIF**



Les enjeux étaient là: traiter ces effluents et supprimer à terme les bassins d'évaporation, d'une part; supprimer d'autre part les nitrates présents dans les effluents liquides pour disposer d'un déchet solide compatible avec le centre de stockage final de l'Andra, seule filière autorisée.

Comment? Stephan Jolivet, directeur de l'établissement New AREVA de Malvésí explique: « Pour

## TECHNIQUEMENT, EN QUOI CONSISTERA L'ATELIER TDN ?

Les effluents présents dans les bassins d'évaporation sont des effluents aqueux concentrés en sels, essentiellement en nitrates (nitrate de calcium, de sodium...) et renfermant des traces de radionucléides. La teneur en nitrates est de 80 à 800 grammes par litre.

Le procédé de traitement retenu dans le futur atelier TDN consistera en un traitement thermique et chimique de l'effluent en milieu réducteur, qui permettra de détruire les nitrates (transformation en azote moléculaire), de vaporiser l'eau contenue et de fixer les métaux et les traces de radionucléides dans une matrice minérale. Le procédé (THOR<sup>®</sup>) a été mis au point par la société Suédoise Studsvik, notamment dans le Colorado aux États-Unis.

Ce traitement est fait en haute température grâce à de la vapeur injectée à 575 °C, en présence de charbon et d'argile, dans un réacteur à lit fluidisé. En sortie du réacteur sont récupérés d'une part, les produits solides et d'autre part, les



## La gestion du cycle de l'eau sur le site de Malvési

L'eau est nécessaire pour le procédé. Elle est prélevée soit dans l'environnement, soit au niveau du réseau d'alimentation d'eau potable en entrée de site. Les eaux industrielles font ensuite l'objet d'une collecte et d'un traitement avant rejet. Toutes les eaux de ruissellement font l'objet également de contrôles. Exemples d'investissements et d'innovations mis en œuvre :

- 1. Mise en place d'une boucle fermée en eau** dans le nouveau procédé COMURHEX II, permettant de réduire de manière significative les prélèvements dans l'environnement (mise en place de trois tours aéroréfrigérantes).
- 2. Mise en place d'un disconnecteur du réseau d'eau potable** à l'entrée du site en lien avec le gestionnaire du réseau (seule entrée d'eau potable du site), garantissant une absence de tout retour vers le réseau public grâce à un système de clapet anti-retour.
- 3. Amélioration de la gestion des eaux de surface** : le site a remis à neuf l'ensemble de son réseau d'eaux pluviales depuis 2006 (dont les bassins d'orage) permettant de collecter et contrôler l'ensemble des eaux de pluies de la plateforme.
- 4.** Si des nitrates sont détectés, les eaux de pluie sont purifiées avec **l'atelier d'osmose inverse** avant rejet. Des obturateurs ont également été mis en place à chacun des exutoires du site empêchant tout rejet non contrôlé dans l'environnement.
- 5. Amélioration de la qualité des eaux de la nappe** : le site a réalisé ces dernières années **un confortement environnemental**. Une partie de la zone lagunaire dans le sens d'écoulement de la nappe a ainsi été ceinturée avec une paroi enterrée de 8 à 10 mètres de profondeur permettant de surveiller, contrôler et traiter les eaux de nappe.
- 6. Le projet TDN**, prochaine action qui permettra de solder le dernier impact potentiel sur les eaux de surface.



*population, elles sont légitimes et nous devons y répondre en tant qu'exploitant responsable* », souligne Stephan Jolivet, directeur de l'établissement de Malvési.

« Il a donc été décidé de lancer une nouvelle campagne d'information sur le bassin de Narbonne », poursuit Cécile Lemierre, responsable communication d'AREVA Malvési. « Un publi-reportage a été diffusé en deux volets sur deux jours consécutifs mi-novembre, dans la presse locale dans les éditions Narbonne de l'Indépendant et de Midi Libre. Cette lettre d'information, à vocation pédagogique, a

été également distribuée dans les boîtes aux lettres des habitants de l'agglomération de Narbonne. » Outre la description du projet TDN, le publi-reportage revient sur les questions posées de manière récurrente par les parties prenantes locales : quels rejets de NOx ? Y aura-t-il des rejets de dioxine ? TDN (THOR®), est-ce un procédé expérimental ? Avez-vous procédé à une étude d'impact notamment concernant le tourisme et l'agriculture ? etc.

De même, la Commission de suivi de site portée par la **DREAL**, réunissant acteurs institutionnels et représentants de la société civile,

qui se réunira dans les prochains mois, sera l'opportunité pour la direction New AREVA de Malvési de rendre compte de l'avancement et de la mise en œuvre du projet. Autre action envisagée en matière d'information, l'organisation au printemps 2018 de journées portes ouvertes de ses installations, permettant aux habitants de la région de découvrir concrètement les installations et mieux comprendre ses activités.

**TFA**

Très faible activité

**ICPE**

Installation classée pour la protection de l'environnement

**DREAL**

Direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement

# La Suède, miroir scandinave du modèle vert français

VÉRITABLE MODÈLE DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, LE MIX ÉLECTRIQUE SUÉDOIS EST ÉQUILIBRÉ ENTRE NUCLÉAIRE ET ÉNERGIES RENOUVELABLES. IL N'A PAS D'ÉQUIVALENT AU NORD DE L'UNION EUROPÉENNE. COMME EN FRANCE, LE NUCLÉAIRE A POURTANT PÂTI D'UN MANQUE DE RECONNAISSANCE. MAIS, LÀ-BAS AUSSI, LES CHOSES ÉVOLUENT.



Centrale de Ringhals, au sud-ouest de la Suède. À partir de 2007, l'amélioration des performances des générateurs de vapeur de plusieurs réacteurs suédois a permis d'augmenter la capacité nucléaire installée de 1 062 MWe sans construire de nouveau réacteur

Avec 42,2 % de la production d'électricité en 2016, juste devant l'hydroélectricité (41,6 %), et loin devant l'éolien (7,3 %) et la biomasse, le nucléaire occupe une place centrale en Suède, assurée par huit réacteurs répartis dans trois centrales. Ce mix électrique, décarboné à plus de 90 %, se rapproche dans l'Union européenne de celui de la France, et en Europe de celui de la Suisse (33 % de nucléaire et 59 % d'hydraulique). Sans posséder le formidable potentiel hydroélectrique de son voisin norvégien, ce pays de dix millions d'habitants figure ainsi parmi les pays les plus vertueux au monde d'un point de vue environnemental et climatique.

## Harmonie entre développement et environnement

Un temps éclipsé par le mirage de la transition énergétique allemande,

le modèle climatique du voisin suédois revient au grand jour, avec des enseignements riches à la clef. Une récente publication<sup>1</sup> de l'ONG *Environmental Progress* explique et compare le succès de la décarbonisation du pays nordique. Sur les périodes de onze ans retenues dans la décarbonation d'un panel de pays, la Suède occupe la première position. Entre 1976 et 1986, période marquée par le démarrage de ses réacteurs nucléaires, le pays a apporté sept fois plus d'électricité décarbonée que l'Allemagne avec le solaire et l'éolien entre 2004 et 2014.

## Taxes et défiances politiques

Pourtant, le nucléaire suédois a rapidement été confronté à un manque de soutien, voire une hostilité politique. Jusqu'en 2009, la Suède avait d'ailleurs dans sa politique l'objectif d'arrêter le nucléaire à l'horizon

2010<sup>2</sup>. Dès la fin des années 1990, le gouvernement imposait également une taxe sur la capacité nucléaire, augmentée à plusieurs reprises jusqu'en 2015. À son pic, elle représentait un quart des coûts d'exploitation des centrales suédoises. En 2016, l'opérateur Vattenfall estimait en conséquence qu'aucun de ses réacteurs n'était rentable. Cette même année, un accord entre le gouvernement et les industriels a décidé de la fin de la taxe pour 2019. En corollaire, le gouvernement a affiché l'ambition d'un mix 100 % renouvelables à l'horizon 2040<sup>3</sup>. Malgré cette réorientation politique, le mal était fait. Faute de rentabilité, le réacteur Oskarshamn 2 n'a pas été modernisé et a été définitivement fermé en 2015 et Oskarshamn 1 a délivré son dernier kWh en juin 2017. Pour la même raison, la fermeture des réacteurs Ringhals 1 et 2 a été décidée pour 2019 et 2020.

## Rien n'est encore déterminé

Début décembre 2017, l'opérateur du réseau électrique suédois, Svenska Kraftnat, a estimé que l'arrêt des réacteurs nucléaires faisait courir à terme un risque de *black-out* pour le pays, dans un contexte d'augmentation de la demande. Un risque renforcé à partir de 2040, quand la quasi-totalité des réacteurs cesseront d'être exploités. En effet, la Suède a la particularité d'avoir une production électrique géographiquement marquée : au nord l'hydroélectricité, au sud le nucléaire. Si une partie du problème peut être résolue par la mise en service dans les années 2020 de l'interconnexion Hansa PowerBridge de 700 MW avec l'Allemagne, celle-ci aura pour conséquence d'augmenter mécaniquement le bilan carbone de la Suède, le mix électrique allemand étant l'un des plus pollués d'Europe. Une autre solution viendrait aussi d'un approvisionnement croissant avec la Finlande voisine, dont la part nucléaire va, à l'inverse, significativement croître dans les prochaines années. La fermeture progressive des réacteurs suédois pourrait également avoir des conséquences sur la Norvège voisine, laquelle compte sur l'approvisionnement électrique de son voisin quand son hydroélectricité ne suffit plus.

La solution, qui reste ouverte, serait de construire de nouveaux réacteurs, comme la loi le permet depuis 2010<sup>4</sup>, sous condition qu'ils remplacent ceux arrêtés et sur les mêmes sites. ■

1. « The Power to Decarbonize, Characterizing the Impact of Hydroelectricity, Nuclear, Solar, and Wind on the Carbon Intensity of Energy ». *Environmental Progress*. 2. « Sweden reverses its nuclear phase out. » février 2009. *World Nuclear News*. 3. <http://nordic.businessinsider.com/sweden-is-to-use-100-renewable-energy-by-2040—but-no-expiration-date-has-been-set-for-nuclear-energy-2016-6/>. 4. <https://sweden.se/society/energy-use-in-sweden/>

# Mobile Water Services



## WATER TECHNOLOGIES

Au travers de ses unités mobiles de production d'eau ultra-pure, Veolia est partenaire de l'industrie nucléaire française depuis plus de 12 ans.

Filtration, ultra-filtration osmose inverse (eau douce et eau de mer), déminéralisateurs, polisseurs, pompage, rétention de morpholine, autant de services que Mobile Water Services a su dispenser tout au long de ces années.

Seule flotte d'unités mobiles basée en France, disposant du seul centre de régénération en Europe continentale, Veolia Mobile Water Services est le référent du nucléaire pour :

- > Les interventions en urgence
- > Les interventions planifiées
- > Les locations long terme

Veolia – F. 91320 WISSOUS – Tel +33 (0)1 69 75 25 75  
ou en Urgence : +33 (0)6 10 15 37 70  
[veoliawatersti.com](http://veoliawatersti.com) / [mobilewaterservices@veolia.com](mailto:mobilewaterservices@veolia.com)

# Le nucléaire en France : une filière intégrée, des emplois qualifiés et non délocalisables

**3<sup>e</sup>**  
**FILIERE INDUSTRIELLE  
FRANÇAISE** avec  
**220 000**  
**EMPLOIS DIRECTS  
ET INDIRECTS\***  
non délocalisables

**1€** INVESTI DANS  
**LE NUCLÉAIRE** crée jusqu'à

**3** FOIS PLUS D'EMPLOIS  
que le même investissement  
dans une autre filière  
de production d'électricité  
(gaz, éolien, photovoltaïque, etc.)\*\*

**+ DE 2 500**  
**ENTREPRISES**  
Start-up, PME, ETI  
réparties sur l'ensemble  
du territoire

**8 000**  
**RECRUTEMENTS  
PAR AN**  
d'ici 2020

Recherche  
et développement



Ingénierie



Construction



Fabrication  
de combustible



Conception  
de réacteurs



Exploitation  
des centrales



**2/3**  
**D'EMPLOIS QUALIFIÉS**  
(cadres, techniciens  
ou agents de maîtrise)  
soit **2 fois plus**  
que la moyenne  
de l'industrie

**UN RÉACTEUR EPR,**  
**C'EST : 8 350 EMPLOIS**

**PENDANT 7 ANS** pour les phases  
d'étude et de construction puis

**1 650 EMPLOIS**  
**PENDANT LES 60 ANS**  
que dure son exploitation\*\*

Maintenance



Traitement  
des déchets



Démantèlement



Recyclage des  
combustibles usés



Gestion  
des déchets



\* À titre de comparaison, la filière éolienne représentait 3 700 emplois en France en 2014 selon l'Ademe et 10 870 emplois pour la filière photovoltaïque. \*\* Source : PWC.

# Les renouvelables créeraient-ils plus d'emplois que le nucléaire ?

AUJOURD'HUI, EN FRANCE, LA QUESTION DES EMPLOIS EST AU CŒUR DES PRÉOCCUPATIONS. À PLUSIEURS REPRISES PENDANT LA CAMPAGNE PRÉSIDENTIELLE, CERTAINS CANDIDATS ONT ÉVOQUÉ LE FAIT QUE LES RENOUEVELABLES CRÉERAIENT « SIX FOIS PLUS<sup>1</sup> » D'EMPLOIS QUE LE NUCLÉAIRE. DANS QUELLES CONDITIONS EST-CE EXACT ET SUR QUELLE BASE D'ESTIMATION ? QUE DISENT LES ANALYSES ÉCONOMIQUES DISPONIBLES ?

Par la rédaction

Nous reprenons ci-après les résultats d'une revue d'études publiées par la section technique « Économie et stratégie énergétique »



de la SFEN. Celle-ci est téléchargeable sur [www.sfen.org](http://www.sfen.org)

## AU NIVEAU MICROÉCONOMIQUE, ÉVALUER LE CONTENU EN EMPLOIS DE CHAQUE FILIÈRE

Certains discours de la campagne présidentielle s'appuyaient principalement sur une étude américaine de 2010<sup>2</sup> sur le « contenu en emplois directs » de chaque filière. Ce contenu est rapporté soit à la capacité installée (ratio emplois/MW) soit à la production effective (ratio emplois x années/GWh). Dans cette étude le facteur 6 n'apparaît en fait qu'avec le solaire photovoltaïque pour le ratio emplois x années/GWh ; mais les valeurs recueillies sur le solaire photovoltaïque sont très dispersées, avec en particulier une valeur très élevée provenant d'une étude européenne. Une fois celle-ci retirée le facteur est réduit à 4. De même, la valeur la plus élevée recueillie pour l'éolien provient d'Europe.

Pour l'Europe, on dispose notamment de la revue extensive publiée en 2014 par CEPS<sup>3</sup>, qui rassemble des données d'emplois directs

en Europe en 2011 dans chaque filière énergétique : elle en déduit les ratios emplois/MW. C'est donc une photographie en 2011, année où l'on construisait beaucoup de capacités neuves d'éolien terrestre et de photovoltaïque, et pas de nucléaire, dont les emplois étaient essentiellement liés à l'exploitation et à la maintenance des unités en fonctionnement.

Les valeurs des ratios de chacune des deux études sont reportées dans le tableau 1. Les valeurs

représentatives de facteur de charge pour chaque filière sont également reportées. Quand on passe des MW installés aux GWh produits, il est clair que les facteurs de charge très différents vont accentuer les écarts : un MW de nucléaire produit 4 à 6 fois plus qu'un MW de photovoltaïque en un an. Et le nombre d'emplois par GWh produit baisse quand le facteur de charge augmente. Quand on compare les résultats des deux études en emplois/MW, on

constate des valeurs plus élevées en Europe qu'aux États-Unis pour l'éolien, ainsi que pour les filières où la part combustible est importante : biomasse, charbon et gaz. Elles sont voisines en revanche pour le nucléaire, le solaire et la petite hydroélectricité.

Quelles que soient les incertitudes qui pèsent sur ces résultats, ils suggèrent deux conclusions :

- Le contenu en emplois directs de l'éolien ne semble pas ▶

	Job-years/GWh average, according to Wei et al. (US, 2010)	Idem Excluding European values	Factor	CapacityJobs/MW according to Wei et al. (US, 2010)	Jobs/MW according to CEPS (EU, 2011)
<b>Biomass</b>	0.21		0.85	1.42 - 1.64	8.22
<b>Small hydro</b>	0.27		0.55	1.28	1.08
<b>Solar PV</b>	0.87	0.6	0.2	1.41 - 2.48	2.35
<b>Wind</b>	0.17	0.15	0.25	0.29 - 0.8	1.45
<b>Nuclear</b>	0.14		0.9	1.08	0.95
<b>Coal</b>	0.11		0.8	0.8	1.47- 2.11
<b>Gas</b>	0.11		0.85	0.8	1.21- 1.69
<b>Ratio Solar/Nuclear</b>	<b>6</b>	<b>4</b>		<b>1.9</b>	<b>2.4</b>
<b>Ratio Wind/Nuclear</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>		<b>0.5</b>	<b>1.5</b>

Tableau 1 : ratios de contenus en emplois des filières de production d'électricité mesurés aux États-Unis et en Europe, par unité de production ou de capacité installée.

1. Benoît Hamon : « À production d'énergie équivalente, les énergies renouvelables créent six fois plus d'emplois que le nucléaire » 2. Wei et al. , « Putting renewables and energy efficiency to work », in *Energy Policy*, 2010. 3. « Impact of the Decarbonisation of the Energy System on Employment in Europe » by Arno Behrens, Caroline Coulie, Fabio Genoese, Monica Alessi, Julian Wieczorkiewicz and Christian Egenhofer No. 82 / February 2014

	Capacité installée	Emplois directs /MW	Directs et indirects /MW	Dont Exploitation et Maintenance
<b>Nucléaire France 2009</b>	63 GW	2,0	3,8	20%
<b>Eolien Allemagne 2013</b>	34 GW	2,1 (*)	3,5	1.28
<b>Photovoltaïque Allemagne 2013</b>	36 GW	1,0 (*)	1,5	1.41 - 2.48
<b>Photovoltaïque France 2023 (**)</b>	20 GW	0,7	1,0	25%

Tableau 2: ratios de contenus en emplois évalués récemment en Allemagne et en France.

(\*) Les parts des emplois directs sont estimées ici d'après les données incomplètes de la source (*Clean Energy Wire Factsheet*, 2015) qui donne le total (directs + indirects)  
 (\*\*) non pas constatée mais projetée par ENERPLAN dans le scénario de la PPE

significativement différent de celui du nucléaire (*dernière ligne du tableau 1*).

Le contenu en emplois du photovoltaïque est en revanche plus élevé; deux fois plus des deux côtés de l'Atlantique s'il est rapporté aux capacités installées, et jusqu'à 6 fois plus aux États-Unis et 10 fois plus en Europe s'il est rapporté à la production (*avant-dernière ligne du tableau 1*).

Ces conclusions recourent assez bien la comparaison des coûts de production tels qu'ils étaient en 2011: proches entre nucléaire et éolien terrestre, nettement plus élevés pour le solaire. Plus d'emplois nécessaires à la production d'un

kilowattheure signifiaient aussi un coût plus élevé.

En outre, la compétitivité gagnée par le solaire depuis cinq ans est liée en grande partie à une diminution du contenu en emplois. Rappelons cependant qu'à coût de production égal du kWh fourni au réseau, la valeur économique de chaque filière dépend aussi de sa capacité à répondre à la demande et des coûts qu'elle engendre sur les réseaux (connections, équilibrage, *back-up*...) pour assurer la fourniture fiable d'électricité à tout instant. Ces évaluations, qui restent tributaires de phénomènes dynamiques, incitent à tenter une comparaison entre systèmes de production arrivés à maturation et non plus en

phase initiale de déploiement. La « maturation » signifie ici que le parc en opération est devenu dominant par rapport au parc en construction, avec un contenu en emplois plus stable. On obtient le tableau 2.

Il se confirmerait ainsi que nucléaire et éolien ont des contenus en emplois similaires dès lors que le pays développe une capacité industrielle propre à subvenir à ses besoins et à exporter.

Il se confirmerait aussi que le contenu en emplois serait inférieur pour le photovoltaïque arrivé à maturité et devenu compétitif. Ceci est la résultante du cumul de deux effets: d'une part, le coût du

photovoltaïque baisse fortement, et donc la valeur ajoutée (VA) baisse. D'autre part, cette VA (qui est constituée en majeure partie d'emplois) est d'autant plus faible que la part nationale est plus faible (les importations sont fortes dans le photovoltaïque).

Dans une période de déploiement intense telle que visée par une politique volontariste d'investissement, les emplois par MW sont temporairement plus élevés dans ces filières où la phase de construction emploie beaucoup plus que l'exploitation. Rapporter l'ensemble des emplois à la durée de fonctionnement de l'installation permet de neutraliser ce biais. On peut le voir sur deux exemples:

► « *Le poids socio-économique de l'électro-nucléaire en France* » PWC (2011): la construction d'un EPR de 1 650 MW en France occupe en moyenne 2 700 emplois directs pendant 7 ans, puis va générer 500 emplois directs pendant 60 ans. Si l'on raisonne en valeur moyenne sur 60 ans on compte au total l'équivalent de 0,5 emploi direct par MW en moyenne sur 60 ans dont 60 % pour l'exploitation et la maintenance.

► Dans le photovoltaïque, 6 200 emplois directs seraient créés entre 2016 et 2023 en installant 13 GW, dont 4 600 dans la construction et 1 600 en exploitation et maintenance. Mais en moyenne sur une durée de vie de 20 ans d'une installation, en comptant 2 ans de construction, on obtient:  $(4600 \times 2 / 20 + 1600) / 13000 = 0,17$  emploi direct par MW en moyenne sur 20 ans, dont 75 % pour l'exploitation et la maintenance.

On constate de nouveau sur ces deux évaluations des emplois directs en France un facteur 3 entre nucléaire et photovoltaïque à capacité installée égale. Si l'on veut maintenant rapporter les emplois à la production effective, sachant qu'un MW photovoltaïque produit en France environ 6 fois moins de GWh par an qu'un MW nucléaire, on pourrait en conclure qu'il faut 2 fois plus d'emplois (et non 6 fois plus)



Fabrication de l'éolienne offshore à l'usine Général Electric de Saint-Nazaire

pour le photovoltaïque que pour le nucléaire à production égale<sup>4</sup>.

## COMMENT EN DÉDUIRE LES BILANS EN EMPLOIS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ? NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE MACROÉCONOMIQUE

Investir dans une filière de production en substitution d'une autre va créer des emplois nouveaux et en détruire d'autres. Cependant, il faut veiller à distinguer la création d'emplois directs et indirects liés à l'installation et l'exploitation de nouvelles capacités de renouvelables et le résultat global net en emplois pour le pays, intégrant les impacts négatifs ou positifs sur les emplois dans les autres secteurs d'activité. Seul un modèle macroéconomique peut évaluer cet impact. En 2006, l'Allemagne a réalisé cette étude au travers du rapport « *Renewable Energies: employment effects* ».

Le rapport comparait le scénario volontariste (objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>) à un scénario tendanciel. Il évaluait à +150 000 emplois (directs et indirects) l'effet brut (emplois créés par les installations des énergies renouvelables) en 2020 par rapport à 2004 (année pour laquelle on évaluait déjà à 150 000 les emplois liés aux renouvelables), et avec un effet net réduit à +70 000 une fois pris en compte les effets macroéconomiques.

En France, une approche macroéconomique avait aussi été tentée en 2012 pour le dossier *Énergies 2050*, où l'on avait regardé trois scénarios à l'horizon 2030 :

- a. part du nucléaire maintenue à 70 % de l'électricité avec un modèle macroéconomique,
- b. part du nucléaire réduite à 50 %,
- c. part du nucléaire réduite à 20 %.

Il en ressortait que dans un premier temps jusque vers 2025 les investissements supplémentaires nécessaires au remplacement du nucléaire par les renouvelables



Bâtiment de sauvegarde de l'EPR : les futurs exploitants se forment à la prise en main de la salle de commande

avaient un effet positif sur l'économie et sur l'emploi national dans les deux scénarios b et c, mais qu'en 2030 les effets négatifs du coût de l'énergie en termes d'impacts sur le pouvoir d'achat et sur la compétitivité l'emportaient, avec une diminution du PIB de 0,9 % et en résultat net 140 000 (scénario b) à 200 000 (scénario c) emplois en moins par rapport au scénario a.

Cependant dans le secteur électrique lui-même le bilan en emplois était neutre par effet de compensation entre renouvelables et nucléaire. Mais d'autres études concluaient à une création nette et durable d'emplois.

Les évaluations des scénarios Négawatt (qui supposent une division de la consommation énergétique finale par 2 en 2050, et la sortie du nucléaire en 2035) prennent en compte à la fois les créations d'emplois et certains impacts macroéconomiques, pour conclure à un gain national net en emplois de 400 000 en 2030. Toutefois, ces modèles sont très partiels, au sens où l'ensemble des bouclages macroéconomiques n'est

pas intégré, notamment les phénomènes dus à la compétitivité et aux effets prix.

Enfin, il faut citer l'évaluation macroéconomique publiée en juin 2016 par l'ADEME (avec l'OFCE) du scénario « *Mix électrique 100 % renouvelable à 2050* ». La transition énergétique y apparaît avant tout comme un programme keynésien de relance par l'investissement public (jusqu'à +50 Mds/an après 2030 par rapport au tendanciel) qui va rehausser le PIB et donc les emplois, lesquels emplois supplémentaires se situeraient surtout dans les services (+600 000), et ensuite dans la construction (+100 000). Un aspect frappant de ce programme est qu'il demande un investissement plus fort dans la production électrique alors que la consommation d'électricité diminue de 25 % par rapport au tendanciel : 34 Mtep au lieu de 46 en 2050. Or les effets vertueux de la transition (diminution de la facture énergétique et des émissions carbone, augmentation des emplois) se produisent en dehors du système électrique. Ce type de scénario revient à mener une transformation rapide et coûteuse du secteur électrique sans réel bénéfice environnemental (l'électricité française est déjà

la plus décarbonée d'Europe avec celle de la Norvège) en l'intégrant dans un programme plus vaste d'efficacité et de sobriété énergétique induisant une réduction des consommations de pétrole et de gaz dans les autres secteurs, transports et chauffage.

## CONCLUSION

L'investissement dans les énergies renouvelables crée des emplois en France. Une partie de ces emplois sera durable : dans l'exploitation et la maintenance des installations en France, et dans l'exportation de services et d'équipements développés pour ces filières, s'ils sont compétitifs. Cependant, dès lors qu'on vise une substitution de la filière nucléaire par l'éolien et le solaire, l'impact sur l'emploi peut actuellement être positif à court terme (pendant le début de la phase d'investissements), mais pas à moyen terme. Ces résultats changeront surtout si les coûts des énergies renouvelables baissent encore fortement et si les coûts de système qu'elles entraînent (principalement du fait de leur variabilité) diminuent eux aussi. Cette question devra être réexaminée régulièrement avec des modèles testés et validés par la communauté des économistes. ■

<sup>4</sup> Une telle comparaison sur les GWh suppose que le photovoltaïque remplacerait totalement la production nucléaire, ce qui impliquerait par ailleurs des moyens de stockage d'énergie appropriés à grande échelle

# Russie : BN-800, le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium le plus puissant au monde

Par **Remy Dupraz**, chef de projet, AREVA NP  
et **Joel Guidez**, expert international, direction de l'énergie du CEA

## en substance...

En août 2016, le réacteur BN-800 a atteint sa puissance nominale, soit 880 MWe, ce qui en fait le plus puissant réacteur à neutrons rapides en exploitation aujourd'hui<sup>1</sup>. Il est situé sur le site de Beloyarsk, près de Sverdlovsk, dans l'Oural (Russie), là où est exploité depuis 1980 son aîné du même type, le réacteur BN-600. En 2014, le chantier a été suspendu après que des assemblages se soient désolidarisés de leur pied d'alimentation lors des essais de montée en puissance. La centaine d'assemblages retirés et les travaux de réparation achevés, la montée en puissance a repris en 2015. Aujourd'hui, BN-800 est raccordé au réseau.

Le réacteur BN-800 est un réacteur rapide refroidi au sodium, dans la lignée de ce type de réacteur développé en Russie depuis les années 1950, avec le premier réacteur expérimental BR-5/10.

En 2017, le réacteur d'essais BOR-60, démarré en 1969, est toujours en fonctionnement. Il sera remplacé vers 2020 par le réacteur MBIR en cours de construction sur le même site de Dimitrovgrad (Volga).

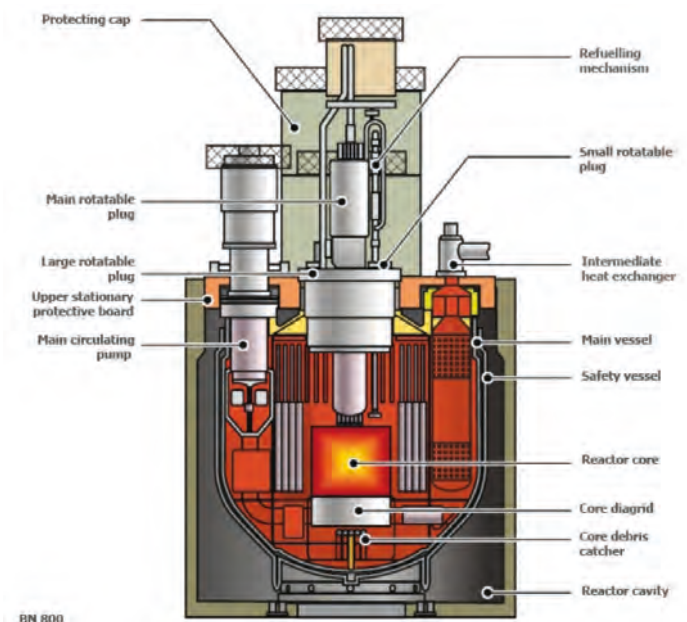
Le réacteur BN-350 a fonctionné de 1973 à 1999, puis a été démantelé. Le réacteur BN-600 est toujours en exploitation aujourd'hui, avec d'excellents taux de charge, supérieurs à 75 %. Sa conception a beaucoup inspiré celle de BN-800.

Enfin, le projet de réacteur BN-1200 est à l'étude. Sa construction dépendra de plusieurs facteurs : le retour d'expérience de l'exploitation de BN-800, les besoins en électricité de la région de Sverdlovsk et l'arrêt de BN-600 (prévu à l'horizon 2025).

## LA FICHE TECHNIQUE DE BN-800

Le réacteur BN-800 est un réacteur rapide sodium, de type intégré (figure 1). Sa puissance électrique est de 880 MWe pour une puissance thermique de 2100 MWth, soit un rendement d'environ 40 %.

Dans le circuit primaire, la température d'entrée cœur est de 354 °C pour une température de sortie de 547 °C. Trois pompes primaires et six échangeurs intermédiaires



1. Le réacteur le plus puissant jamais opéré restant Superphénix (Isère) avec ses 1240 MWe, qui a été mis à l'arrêt en 1997.

Figure 1 : schéma simplifié du circuit primaire de BN-800



Figure 2 : vue des trois circuits secondaires sortant du bloc réacteur en direction des générateurs de vapeur

assurent respectivement la circulation du sodium primaire et l'extraction de la puissance thermique. On reconnaît certaines spécificités de la filière russe avec les cuves principales et de sécurité posées et non pendues comme dans la conception française et une grande compacité générale du circuit primaire.

Trois boucles secondaires transportent la puissance thermique des échangeurs intermédiaires du primaire vers les trois générateurs de vapeur qui fournissent la vapeur alimentant la turbine (figure 2).

diminue en dessous de 50 % du nominal (figure 4).

**La diminution du coefficient de vide**

D'importants efforts de diminution du coefficient de vide ont été effectués lors de la conception du cœur du réacteur. Celui-ci est annoncé dans les présentations russes avec un coefficient de vide global négatif. En particulier, un plenum a été prévu en sortie cœur, qui permet une fuite neutronique importante dans cette zone la plus chaude du cœur.

Le bâtiment réacteur contient l'ensemble du circuit primaire et des boucles secondaires. Le bâtiment des générateurs de vapeur est situé sur un des côtés du bâtiment réacteur en liaison avec la salle des machines abritant la turbine et l'alternateur (figure 3).

**L'évacuation de la puissance résiduelle**

Sur BN-600, l'évacuation de la puissance résiduelle nécessite la disponibilité des circuits secondaires et des circuits d'alimentation d'eau. Lors des travaux menés pour sa prolongation de fonctionnement dans les années 2000, un circuit d'évacuation de la puissance résiduelle par échangeur sodium-air a été ajouté au niveau des circuits secondaires, donc indépendamment des circuits eau vapeur.

**LES AVANCÉES EN MATIÈRE DE SÛRETÉ**

Par rapport à BN-600, la conception de BN-800 intègre de réelles avancées en matière de sûreté.

Sur BN-800, l'évacuation de la puissance résiduelle est possible en convection naturelle indépendamment des circuits d'eau par des échangeurs sodium air disposés en dérivation sur les boucles secondaires (figure 5). Leurs trois cheminées sont visibles. La quatrième cheminée visible sur la figure est la cheminée du circuit de ventilation général.

**La maîtrise de la réactivité**

**Les barres de commande passives**

Aux deux systèmes de barres de commande diversifiés, il a été ajouté un troisième système de barres de commande passif. Ce sont trois barres maintenues en position haute par le débit primaire, et qui chutent si le débit sodium primaire

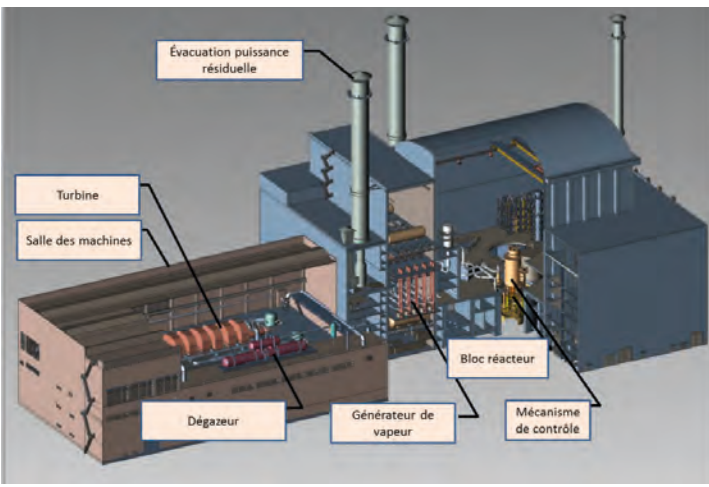


Figure 3 : configuration générale des bâtiments de BN-800

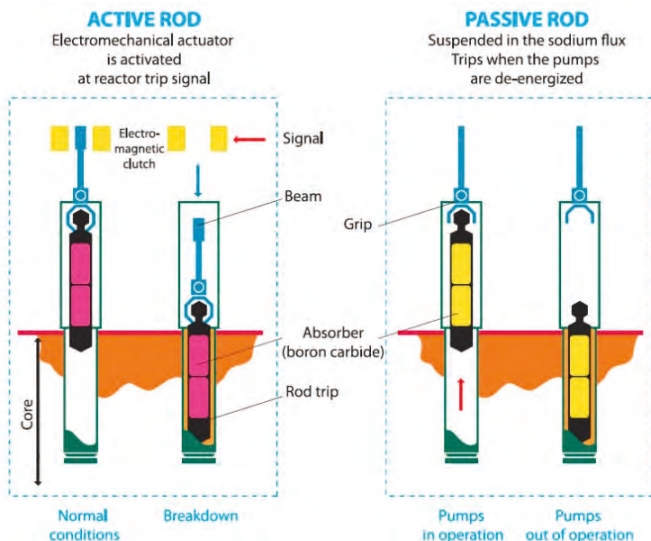


Figure 4 : schéma de principe des barres de commande active et passive de BN-800

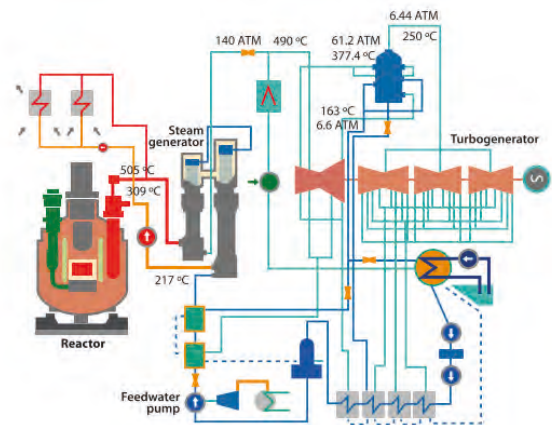


Figure 5 : schéma de principe des circuits de BN-800

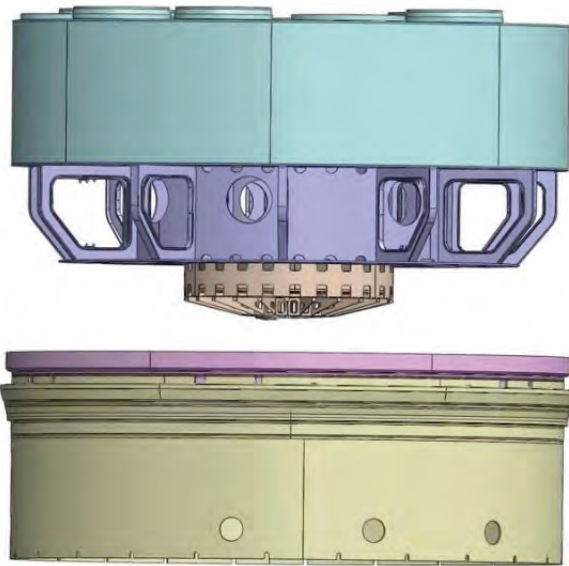


Figure 6 : vue du récupérateur de corium, au centre, sous le sommier

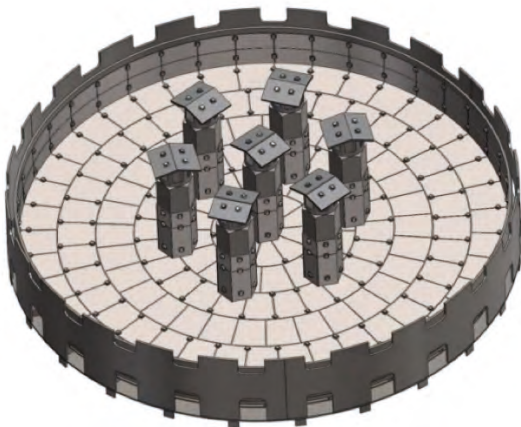


Figure 7 : vue d'ensemble du récupérateur

### Le confinement

À la différence de BN-600, BN-800 dispose d'une réelle enceinte de confinement secondaire.

En outre, le réacteur dispose d'un récupérateur de corium sous son sommier (figure 6).

Ce récupérateur est majoritairement constitué de deux pièces principales. La pièce inférieure permet une circulation du sodium qui vient refroidir le fond de la pièce supérieure contenant le corium fondu. Cette pièce supérieure est tapissée de molybdène, un matériau compatible avec le sodium et

qui a une température de fusion très élevée (2623 °C), ainsi qu'une excellente conductivité.

Après assemblage, des cheminées également protégées par du molybdène sont installées pour permettre une bonne circulation en convection naturelle du sodium venant refroidir la partie inférieure du dispositif, pour en extraire la puissance résiduelle (figure 7).

En conclusion, ce réacteur présente par rapport à BN-600 de réelles avancées en termes de sûreté.

À cela s'ajoute une prise en compte plus poussée des agressions externes comme les séismes, allant dans le sens des exigences post-Fukushima.

On notera cependant que la conception « ancienne » du réacteur fait qu'il ne peut pas être dans un strict respect des critères de quatrième génération établis postérieurement à sa conception. Par exemple l'enceinte du réacteur n'est pas en dépression et n'est pas dimensionnée comme une barrière de confinement.

### LE COMBUSTIBLE

Alors que BN-600 fonctionne avec un combustible à l'uranium 235 enrichi, BN-800 a démarré avec un mélange d'assemblages à l'uranium 235 enrichi représentant 75 % de la charge totale du cœur et d'assemblages composés d'oxyde mixte uranium naturel et plutonium dit MOX représentant les 25 % restants de la charge du cœur. Ceci rentre également dans un cadre où la Russie s'est engagée à brûler le plutonium militaire dans ses réacteurs.

Deux techniques de fabrication du combustible MOX ont été mises en œuvre pour BN-800, l'une sur la base de pastilles frittées (technique utilisée en France), et l'autre basée sur une technique de vibrocompactage, spécialité du RIAR de Dimitrovgrad, mais à une échelle limitée.

À noter que la Russie a dû concevoir et mettre au point une nouvelle usine de fabrication de combustible dédiée au combustible MOX, en parallèle de la construction de BN-800 et devient ainsi le deuxième

fabricant au monde de combustible MOX après la France. À terme, l'usine sera dans la capacité de fournir les charges complètes de cœur en combustible MOX.

### LA CONSTRUCTION ET LES ESSAIS DE MISE EN SERVICE

La conception de BN-800 avait démarré en 1983, puis été révisée en 1987 après Tchernobyl. Les travaux

#### BN-800 en date :

- › **2006** : premier béton du bâtiment réacteur
- › **2010** : début du montage des cuves du bloc réacteur
- › **2012** : test en pression des cuves du bloc réacteur
- › **Janvier 2013** : arrivée du sodium sur le site
- › **Décembre 2013** : mise en chauffe et remplissage du bloc réacteur en sodium
- › **Février 2014** : chargement du premier assemblage
- › **Juin 2014** : première divergence
- › **septembre 2014 - juin 2015** : arrêt pour intervention sur le combustible
- › **juillet 2015** : divergence, après réparation du combustible
- › **décembre 2015** : premier couplage
- › **août 2016** : pleine puissance atteinte
- › **octobre 2016** : mise en service industrielle

On peut effectuer un parallèle entre les durées de construction et la mise en service des réacteurs Superphénix et BN-800. Les durées entre le premier béton et la première divergence sont de 106 mois pour le réacteur français et de 96 mois pour le russe, puis jusqu'à la pleine puissance respectivement de 121 mois et de 122 mois.

d'aménagement du site furent interrompus en 1988 et ne reprirent, avec une conception encore modifiée, que lorsque le financement du projet fut assuré en 2005.

Dès lors, la construction et les essais de mise en service de BN-800 ont été effectués dans un délai relativement court, compte tenu du contexte de ce type de réacteur, à savoir l'absence de réalisation récente et la spécificité du *process* sodium.

### L'INCIDENT DE 2014

#### Le déroulement des faits

En 2014, après divergence du réacteur, des variations de réactivité anormales sont apparues au début des essais de montée en puissance. Un système de palpation au-dessus du cœur a permis de détecter trois assemblages dépassant du plan supérieur de cœur et responsables des trois transitoires de réactivité observés. Deux ont été extraits normalement, la partie basse du pied du troisième est restée en place lors de la manutention de l'assemblage et a nécessité un outillage spécial pour être retirée.

#### La conception des assemblages

Les assemblages hexagonaux des réacteurs rapides sodium ont un pied inférieur cylindrique qui s'insère dans une chandelle du sommier. Ce sommier est à la pression de refoulement des pompes primaires et des diaphragmes installés dans les chandelles et le pied vont permettre de régler le débit sodium circulant dans l'assemblage.

#### L'explication probable

Par similitude à BN-600 (*figure 8*), la conception du pied des assemblages de BN-800 présente un emmanchement entre le tube hexagonal et le pied où il est ensuite serti par serrage et des soudures par pointage viennent compléter cette fixation.

L'origine de l'incident est sans doute une mauvaise conception du diaphragme entraînant des vibrations anormales du pied lors de la montée en débit vers le régime nominal



Figure 8 : vue du pied d'un assemblage BN-600

des pompes primaires. Ces vibrations ont conduit à la désolidarisation progressive du pied et du tube hexagonal. Celui-ci s'est alors soulevé avec la poussée hydraulique du sodium dans l'assemblage.

#### La réparation

Un lot de plus de 100 assemblages a été affecté par ce défaut de conception des déprimogènes. En outre, il semblerait que seuls les assemblages à uranium enrichis aient été affectés et que les 79 assemblages MOX n'aient pas eu ce problème. Tous les assemblages du lot concerné ont été déchargés et lavés à la vapeur. Leur contamination était très faible car le réacteur n'avait pas encore réellement été opéré et était resté froid.

Un nouveau déprimogène a été conçu et testé en eau, pour vérifier l'absence de vibrations.

Tous les pieds de ces assemblages ont alors été remplacés par des pieds contenant ces nouveaux déprimogènes. Cette réparation a été effectuée sur site par une équipe du fabricant des assemblages.

L'ensemble de la réparation a duré moins d'un an et a permis la reprise des essais de montée en puissance. Ce type d'incident n'était jamais survenu sur un réacteur à neutrons rapides au sodium et permet d'enrichir le retour d'expérience de ce type de réacteurs. Il montre tout

l'intérêt d'une validation préalable de tous les systèmes hydrauliques afin de vérifier par des essais en eau appropriés l'absence de vibrations gênantes. Un parallèle pourrait être fait avec le réacteur Superphénix et la découverte des problèmes de vibration d'une virole du bloc réacteur lors de ses essais de mise en service.

#### Conclusion

La durée de construction maîtrisée d'environ 100 mois entre le premier béton et la première divergence est un élément positif pour cette filière. Pour des réacteurs prototypes, la phase d'essais de mise en service est toujours une phase importante de vérification du bon comportement des matériels et la découverte de ces phénomènes de vibrations indésirables a retardé la phase de montée en puissance d'une dizaine de mois. Le réacteur BN-800 est maintenant en opération commerciale avec des objectifs de taux de charge au moins équivalents aux excellents taux de charge atteints par BN-600. Des développements sont également prévus au niveau du combustible et de son cycle.

Un bon fonctionnement de BN-800 sera un élément important pour le lancement de la réalisation du réacteur BN-1200 (1 200 MWe), qui intégrera les enseignements tirés de ce fonctionnement. ■



Inauguration du laboratoire à EDF Lab Paris-Saclay le 29 novembre 2017

# ConnexITY : le laboratoire d'innovations numériques de la filière nucléaire

FIN NOVEMBRE, LA FILIÈRE NUCLÉAIRE A INAUGURÉ SON LABORATOIRE DÉDIÉ À L'INNOVATION NUMÉRIQUE: CONNEXITY. C'EST SUR LE PLATEAU DE SACLAY, DANS LES LOCAUX ULTRAMODERNES D'EDF R&D QUE NEUF INDUSTRIELS ONT DÉCIDÉ DE MUTUALISER LEURS EFFORTS DE RECHERCHE POUR DÉVELOPPER DES BRIQUES TECHNOLOGIQUES ESSENTIELLES À L'EXPLOITATION ET À LA CONCEPTION DES CENTRALES NUCLÉAIRES.

### TESTER, DÉVELOPPER ET RENFORCER L'INTEROPÉRABILITÉ DES BRIQUES TECHNOLOGIQUES

L'initiative ConnexITy s'inscrit dans la démarche « Initiatives Usine nucléaire du futur » lancée en 2016 par l'Institut tripartite<sup>1</sup>. ConnexITy fédère actuellement neuf<sup>2</sup> entreprises porteuses d'innovations dans la filière nucléaire, qui ont décidé de mutualiser leurs efforts de R&D. Ce programme de recherche collaborative vise trois objectifs : tester de nouveaux concepts d'exploitation, développer des jumeaux numériques et renforcer l'interopérabilité des briques technologiques<sup>3</sup> conçues par les partenaires. Ces deux prochaines années, plusieurs concepts seront testés dans des environnements réalistes, puis feront l'objet d'une première étude de faisabilité technique avant industrialisation par les partenaires.

### LE FINANCEMENT DE L'INITIATIVE

Tous les dix-huit mois, les partenaires de l'initiative organisent des séances de *brainstorming* pour faire émerger les idées qui deviendront demain réalité. Dès que trois partenaires décident d'investir, le développement de la brique peut commencer.

Particularité de cette initiative unique au monde, ConnexITy est financée uniquement sur fonds propres (la contribution des partenaires), aucun argent public n'est engagé.

### UNE CULTURE DE L'INNOVATION « OUVERTE » ET « COLLABORATIVE »

Tous les partenaires ont un accès permanent au lab de ConnexITy. Sur plus de 300 m<sup>2</sup> segmentés en quatre espaces projet<sup>4</sup>, le laboratoire dispose de trois membres permanents et d'un investissement des partenaires à hauteur de 50 000 heures pour réaliser et tester les six premiers concepts, faire tourner les



Les concepts vont de la préparation en immersif des chantiers jusqu'au simulateur d'entraînement pour l'agent de terrain (photo) pour qu'il répète les gestes de manière coordonnée avec la salle de commande, mais aussi le jumeau numérique qui va aller mettre en sécurité telle ou telle machine



Un démonstrateur de chantier école pour la maintenance : l'objectif est de mettre en place un dispositif de gestion intégrée des risques chantiers et de suivi opérationnel des activités. Il offre la possibilité à tout intervenant de disposer sur le terrain des informations en perception augmentée des risques ambiants et des éléments de décision pour la réalisation de l'intervention. Parallèlement, la vision intégrée facilite la gestion d'aléas et le maintien en configuration de la maquette numérique

simulateurs et évaluer les solutions sous l'angle facteurs humains organisationnels avec les intervenants métiers concernés.

En effet, la transformation numérique ne concerne pas seulement

les évolutions techniques mais également les modes de travail qui évoluent grâce à la dématérialisation progressive des processus métiers et de nouveaux usages qui peuvent émerger.

**1.** L'Institut tripartite rassemble EDF, AREVA NP et le CEA. **2.** EDF, AREVA, TechnicAtome, ATOS Worldgrid, ANSYS / Esterel, CEGELEC CSS, CORYS, SPIE Nucléaire, AFNET et prochainement ASSYSTEM, CODRA et Siemens. **3.** Parmi les briques technologiques : « moyens de conduite du futur », « réacteur numérique » et « maquettes numériques de l'installation ». **4.** Les quatre espaces de ConnexITy : planification et suivi des chantiers, espace immersif, espace salle de commande, et ateliers jumeaux numériques.



Un atelier de conception d'interfaces de conduite et de surveillance pour permettre aux exploitants de partager une description la plus fiable possible de la situation courante de la tranche nucléaire, et de renseigner différentes informations sur plusieurs dispositifs d'interaction en fonction de leur périmètre de responsabilité : en salle commande, en local, au bureau de consignation, depuis le plateau Tranche en Marche, etc.



Le prototypage rapide de salle de commande pour permettre aux différents corps de métier d'explorer et de valider les grands principes de conduite (démarrage, variation de charge, arrêt, reprise normale, etc.) et la performance des équipes de conduite (organisation du travail, niveau d'automatisation et de guidage, systèmes de conduite)

### Les étapes du projet

9  
juin 2017  
lancement du programme

30  
juillet 2017  
accord de consortium  
ConnexITy

29  
novembre 2017  
inauguration du laboratoire à  
EDF Lab Paris-Saclay

15  
décembre 2018  
évaluation des six premiers  
démonstrateurs et  
identification de nouveaux  
axes de recherche



© PHILIPPE BRAMAN / TOGA

## Portrait

## « La passion des systèmes complexes » Catherine Devic, Leader du projet ConnexITy

À 46 ANS, CATHERINE DEVIC EST AUX AVANT-POSTES DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE. CETTE INGÉNIEURE FORMÉE SUR LES BANCs DE SUP TELECOM BRETAGNE SEMBLAIT PRÉDESTINÉE À PILOTER UN PROJET D'ENVERGURE COMME CELUI DE CONNEXITY.

Après plusieurs projets d'industrialisation d'infrastructures et de services à l'échelle nationale et européenne réussis, Catherine Devic s'oriente aux débuts des années 2000 vers la recherche appliquée dans le domaine de la téléphonie mobile, des réseaux de capteurs sans fil en environnement industriel et du contrôle-commande. « Pendant plus de huit ans, j'ai piloté un groupe de recherche d'une trentaine de personnes dans le domaine du contrôle commande de centrales électriques et de la sûreté de fonctionnement des systèmes programmés. »

C'est à cette époque qu'elle se passionne pour l'ingénierie des systèmes complexes. « Cela m'intéresse de développer les techniques et solutions permettant de maîtriser dans la durée les

systèmes complexes et de faciliter l'intégration des nouvelles technologies pour une exploitation plus performante ». Elle s'est d'ailleurs investie plusieurs années dans l'Association française d'ingénierie système en tant que vice-présidente.

C'est donc tout naturellement qu'en juin 2011, elle se voit proposer la responsabilité de la programmation des activités de recherche d'EDF R&D dans le domaine de l'ingénierie des systèmes complexes. « À cette époque, j'ai piloté, en collaboration de la Direction générale des entreprises, l'un des plus gros projets de R&D dans le domaine des systèmes embarqués: le cluster Connexion<sup>1</sup> ». Ce projet dédié à l'innovation dans le contrôle-commande nucléaire s'est

1. <https://www.cluster-connexion.fr/>

achevé en 2016 et est à l'origine du projet filière ConnexITy qu'elle dirige aujourd'hui. « Connexion a permis de lever une dizaine de verrous scientifiques. Des produits ont ensuite été commercialisés par les partenaires. Nous avons également eu des retombées en matière de démarche outillée dans le contrôle-commande. Surtout, nous avons démontré qu'il était possible de faire rimer « complexité », « agilité » et « simplicité ». Nous pouvons travailler plus efficacement dès lors que l'ensemble des acteurs est impliqué en amont du projet. Le numérique offre des outils précieux pour fluidifier et simplifier les interfaces. » Animée par le sens du collectif, Catherine Devic est convaincue que les grandes innovations du nucléaire sont nées d'une

symbiose entre tous les partenaires de la filière. « Le succès du cluster Connexion a inscrit la nouvelle initiative, ConnexITy, dans une formidable dynamique: la R&D de la filière se fédère sur les innovations numériques et il est aujourd'hui plus simple d'intégrer les briques technologiques des uns et des autres ».

Pour Catherine Devic, la filière nucléaire est caractérisée par sa complexité et l'impérieuse nécessité de délivrer un travail de qualité tout en respectant de fortes exigences. Reste que d'autres secteurs peuvent inspirer de nouvelles méthodes. Catherine Devic regarde ainsi de près l'aéronautique: « La qualification d'un avion se fait à 80 % au sol. La filière dispose d'un atelier intégré avec le cockpit d'avion qui commence en numérique à piloter les simulations multiphysiques, puis, au fur et à mesure de l'avancée du projet, chaque modèle numérique est remplacé par son vrai équipement physique ». Une source d'inspiration pour la filière nucléaire ?



© PHILIPPE BRAMAN / TOGA

# Regards croisés sur un droit méconnu, le droit nucléaire

LES CONDITIONS D'ÉLABORATION D'UNE BRANCHE DU DROIT SONT PARTICULIÈREMENT ÉCLAIRANTES SUR SON CONTENU ET SA PHILOSOPHIE. S'AGISSANT DU DROIT NUCLÉAIRE, LE DOMAINE TECHNOLOGIQUE A, PENDANT LONGTEMPS, ÉCHAPPÉ AU DROIT COMMUN. CETTE SITUATION A FINI PAR TRANSFORMER « LA CONTESTATION DU RECOURS À L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN QUERELLE DE LÉGITIMITÉ DE CE DROIT SOUVENT (MAL) RÉDIGÉ PAR DES NON JURISTES PAR AJOUTS SUCCESSIFS » (P. REYNERS). PUIS « NUCLÉAIRE » ET « DROIT » SONT, AU FIL DU TEMPS, DEVENUES DES NOTIONS ÉTROITEMENT LIÉES L'UNE À L'AUTRE.

Par **Hervé Arbousset**, Maître de conférences en droit public – HDR, Directeur du CERDACC, **Marie-Béatrice Lahorgue**, Maître de conférences en droit privé – HDR, **Muriel Rambour**, Maître de conférences en droit public et **Thomas Schellenberger**, Maître de conférences en droit public

## UNE PETITE HISTOIRE DU DROIT NUCLÉAIRE, DU DÉCRET DE 1963 À LA LOI DITE « TRANSITION ÉNERGÉTIQUE » : LE VERDISSEMENT DU DROIT NUCLÉAIRE

Les conditions d'élaboration d'une branche du droit sont particulièrement éclairantes sur son contenu et sa philosophie. Nucléaire et droit sont, au fil du temps, devenues des notions étroitement liées l'une à l'autre car, même si le droit « *n'est pas la clef permettant de réconcilier tous les Français avec le nucléaire... il est le passage obligé des inévitables conflits qui se produisent...* » (J.-M. Pontier).

Née sous le signe d'Hiroshima, l'énergie nucléaire « *implique l'existence de risques. Le seul fait que Tchernobyl ait existé nous interdit de le nier* » (R. Carle). Elle a pendant longtemps échappé au droit commun à la faveur de la création d'une réglementation spécifique voulue plus adaptée au risque qu'elle avait vocation à encadrer. L'origine militaire de l'atome explique aussi le traitement différencié de son approche normative. L'atome a en effet d'abord été « *un fait essentiellement scientifique puis militaire*

[...] *Le droit est venu ensuite; mais très vite* » (H. Lavaill).

S'agissant du droit nucléaire, son étude met en évidence sa contribution à l'établissement d'une « *dialectique constructive* » entre l'éthique et la science (P. Strohl). Élaboré au fur et à mesure de l'évolution de la technique, il est un exemple unique pour lequel l'élaboration d'un droit a anticipé les applications industrielles de la technique considérée et leurs dangers éventuels. Le pragmatisme a été aux sources du droit nucléaire (P. Baleynaud).

Pourtant, contrairement aux États-Unis qui se sont dotés très tôt de la loi Mac Mahon (1<sup>er</sup> août 1946 modifiée en 1954 par *The Atomic Energy Act*), la France ne s'est dotée que tardivement d'une loi atomique. Le décret du 11 décembre 1963 a constitué pendant 40 ans l'unique cadre procédural aux installations nucléaires de base. Contenant des avancées certes majeures (principe de l'autorisation de création d'une installation nucléaire de base – INB – par voie de décret), il était silencieux en matière de sûreté nucléaire et de protection de l'environnement.

Il faut dire que l'écologie n'est pas alors une donnée fondamentale de la vie politique française. C'est le premier choc pétrolier qui fera de l'énergie nucléaire la première « cible » des associations écologistes et antinucléaires contraignant les gouvernements successifs à faire évoluer la réglementation.

À la fin des années 1990, de nombreuses pressions politiques et associatives s'exercent en faveur de l'émergence de nouveaux paradigmes éthiques appliqués au secteur nucléaire. La catastrophe de Tchernobyl sera le catalyseur qui

## Trilogie nucléaire

- Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire dite « TSN ».
- Loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.
- Loi n°2006-786 du 5 juillet 2006 autorisant l'approbation d'accords internationaux sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire.

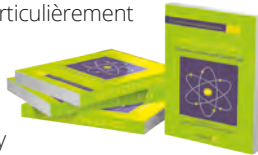


**ZOOM SUR...**

## RENDONS À CÉSAR CE QUI EST À CÉSAR

À sa manière – et sous la pression du droit et de l'opinion publique – l'industrie nucléaire a joué un rôle important dans l'évolution de règles particulièrement novatrices de protection sanitaire et environnementale.

Historiquement, le droit nucléaire a précédé l'émergence du droit de l'environnement et la formulation de ses principes fondamentaux. Ainsi, le principe ALARA (« As Low As Reasonably Achievable » ; qui se traduirait en français par « Aussi bas que raisonnablement possible ») utilisé en droit de la radioprotection a largement anticipé la formulation et l'application tardives du principe de précaution en droit de l'environnement.



fera définitivement passer le risque nucléaire du stade de « concept virtuel » au « concept juridique ». Il n'existe à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, ni code de droit nucléaire, ni code de l'environnement. La relation entre les deux domaines juridiques date du début du XXI<sup>e</sup> siècle, période à laquelle la doctrine se déchaîne autour de la nécessaire complémentarité des droits nucléaire et de l'environnement. Diverses hypothèses sont formulées : créer un code nucléaire ou codifier à droit constant la matière aux codes de l'énergie ou de l'environnement.

En réalité, la « faille » du dispositif normatif nucléaire réside dans l'adoption (trop) tardive d'une législation nucléaire, en 2006, avec l'adoption de trois lois (*voir encadrer trilogie nucléaire*) qui initie le « verdissement » du droit nucléaire.

La loi du 13 juin 2006 dite TSN a par ailleurs fait de la France – au moment de son adoption – l'unique pays au monde doté d'un cadre légal sur la transparence nucléaire, secteur traditionnellement recouvert du sceau du secret-défense (J.-Y. Le Deault). Elle traduit aussi la perte de spécificité du droit nucléaire avec son entrée officielle dans la sphère du code de l'environnement (M. Leger - L. Grammatico).

La loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (dite TECV) s'inscrit dans sa continuité en renforçant les exigences en matière de sûreté et de transparence.

### NUCLÉAIRE : UN DROIT HORS NORMES ? ILLUSTRATIONS À PARTIR DU PROJET DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE DÉCHETS RADIOACTIFS

L'encadrement juridique du projet de stockage géologique de déchets radioactifs de haute activité et à vie longue, dénommé Cigéo, illustre bien les particularités du droit nucléaire. Ainsi qu'évoqué précédemment, celui-ci se singularise surtout par son pragmatisme. Globalement, c'est le droit qui s'adapte à ce projet, et non l'inverse. Or, ce pragmatisme est à la fois la force et la faiblesse du droit nucléaire. Sa force, parce que ce droit sur mesure est bien adapté aux enjeux techniques du nucléaire. Sa faiblesse, parce que ce droit pragmatique va parfois à l'encontre de certains principes (idéaux ?) démocratiques.

#### Un droit sur mesure

Afin de relever les défis techniques du projet Cigéo, plusieurs innovations juridiques remarquables ont été instaurées qui portent sur les risques à long terme, grande inconnue du projet, et offrent une protection juridique aux générations futures.

On pense en premier lieu aux instruments financiers imposant aux producteurs de déchets radioactifs de prendre en charge les coûts futurs du stockage géologique<sup>1</sup>.

Ces outils consacrent « une ouverture de l'imaginaire juridique [...] à la perspective transgénérationnelle et témoigne[nt] de la progression d'un nouveau paradigme juridique » (E. Gaillard). Le principe pollueur-payeur devient ainsi transgénérationnel.

On songe en second lieu à l'existence de « seuils de sécurité » imposés à long terme au futur site Cigéo<sup>2</sup>. L'objectif est que les générations futures bénéficient du même niveau de protection contre la radioactivité des déchets que les générations présentes. Même si Cigéo reste entouré d'incertitudes sur les risques à long terme, il est tout à fait novateur qu'il fasse d'ores et déjà l'objet de normes visant des générations humaines à venir (Th. Schellenberger). On peut ainsi dire que le droit nucléaire ambitionne d'appréhender de manière novatrice les « durées méta-humaines » (T. Soleilhac) induites par le stockage géologique de déchets.

#### Un droit à l'ancrage démocratique fragile

Ce qui fait la faiblesse du droit nucléaire, c'est la fragilité de ses bases démocratiques. Il représente plus souvent la transcription des besoins techniques des acteurs de la filière que le résultat de débats politiques ouverts. Le droit du stockage géologique de déchets radioactifs en fournit quelques illustrations.

Premièrement, le Parlement a une place assez marginale dans sa construction. Le secteur nucléaire n'a donné lieu à un débat parlementaire qu'en 1991<sup>3</sup> essentiellement limité à l'élimination des déchets en aval, et non sur leur prévention en amont, restreignant ainsi les réflexions de fond. Ce risque de faux débat a été relevé par certains parlementaires et universitaires<sup>4</sup>. Par la suite, l'une des

**1.** Deux fonds gérés par l'Andra et alimentés par des taxes et des obligations Articles L542-12-1 et s. et L594-1 C. env. **2.** Guide de sûreté art. 4.2 <http://www.asn.fr>. **3.** Adoption de la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. **4.** Assemblée Nationale, compte-rendu intégral des débats, 2<sup>e</sup> séance du 25/06/1991, JF du 26/06/1991, p. 3628 et M. Prieur.



Le niveau de radioactivité est contrôlé en permanence sur les sites nucléaires. Le principe ALARA, utilisé en droit de la radioprotection, est antérieur au principe de précaution.

dispositions fondamentales de la loi de 1991 n'a pas été respectée<sup>5</sup>. Ceci a fragilisé l'assise démocratique du projet. Bien qu'un seul laboratoire ait finalement vu le jour, la poursuite d'un stockage y a tout de même été approuvée en 2006 malgré l'absence d'alternative comparable<sup>6</sup>.

Deuxièmement, les débats parlementaires ont été plusieurs fois évités, et ce encore récemment, lorsqu'il s'est agi d'autoriser le lancement même du projet. D'abord, un projet de loi en 2014 avait prévu « en catimini » que Cigéo puisse être autorisé non par la loi mais par voie de décret<sup>7</sup>. Après cette tentative finalement avortée, les mêmes dispositions ont été introduites dans le projet de loi du 10 juillet 2015 pour la croissance, l'activité et l'égalité des chances

économiques<sup>8</sup> et ce dans le cadre de l'art. 49.3 de la Constitution. Le Conseil constitutionnel a par la suite annulé ces dispositions. Une loi nouvelle a finalement été adoptée le 25 juillet 2016 dans des conditions une fois encore assez discutables<sup>9</sup>.

Le droit nucléaire est donc un droit pragmatique remarquablement adaptable, ce qui lui confère une incontestable efficacité. En tant que droit, il doit cependant s'inscrire dans un ordre juridique d'ensemble relevant de certains idéaux, sources (incontournables?) de légitimité politique.

### DROIT NUCLÉAIRE ET NOUVELLES MENACES

Dans un contexte international troublé, la déclinaison nucléaire

du terrorisme pourrait prendre divers aspects, du sabotage interne à l'agression extérieure de centres de recherche, de production ou de stockages de déchets. Ces menaces, terrestres voire aériennes, soulignent les ramifications du droit nucléaire dans la réflexion sur les enjeux actuels de sécurité industrielle et de prévention des actes malveillants.

En tant que secteur d'activité d'importance vitale, les installations nucléaires bénéficient d'une protection particulière<sup>10</sup>. En dépit de ces dispositifs, les dernières décennies ont été marquées par une multiplication d'intrusions. Si plusieurs articles du Code pénal assurent la protection des matières nucléaires et de leur exploitation, aucune mesure ne visait spécifiquement les effractions

**5.** Réalisation de deux laboratoires souterrains afin de pouvoir comparer plusieurs options. **6.** Fait relevé par le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire au rapport préalable au débat public sur le projet Cigéo, 28/03/2013, p. 10. **7.** Projet de loi de programmation pour la transition énergétique, art. 35. **8.** Art. 201 et s. **9.** Au cœur de l'été, à la suite d'un débat de quatre heures à l'Assemblée nationale, sur la base d'un rapport parlementaire rédigé par le député Christophe Bouillon à la suite de sa nomination comme président du conseil d'administration de l'Andra – exploitant de Cigéo. **10.** Loi n°2005-1550 du 12 décembre 2005.

sur sites, contraignant les magistrats à ne pouvoir sanctionner que la violation de domicile. Devant ces enjeux aigus de sécurité, de nouvelles dispositions viennent conforter la protection des sites. Ainsi, le Code général des collectivités territoriales donne désormais compétence aux préfets de département pour réglementer les conditions de circulation et de stationnement des véhicules autour des locaux ou terrains abritant des matières nucléaires. La loi n°2015-588 du 2 juin 2015 inscrit au code de la défense de nouveaux délits, selon qu'il s'agit d'une intrusion simple dans une installation faisant usage de matières nucléaires ou d'une effraction avec armes ou en bande organisée.

Outre les intrusions terrestres, le cadre législatif s'efforce de garantir la sécurité des installations nucléaires de base face aux menaces aériennes. Le code des transports interdit le survol des installations dans un périmètre de 5 km et à une altitude inférieure à 1000 m; il sanctionne le fait de laisser circuler un aéronef dans des conditions d'utilisation non conformes aux règles de sécurité. La loi n° 2016-1428 du 24 octobre 2016 sur le renforcement de la sécurité de l'usage des drones civils rend désormais passible d'amendes et d'emprisonnement le survol d'une zone interdite.

Pour donner une consistance aux dispositifs de protection externe des installations, le décret n° 2017-588 du 20 avril 2017 a institué sous l'autorité conjointe des ministres de l'Énergie et de l'Intérieur un Commandement spécialisé pour la sécurité nucléaire (COSSEN) dont les compétences couvrent notamment la protection des sites et matières nucléaires, y compris pendant le transport. En lien avec les ministères concernés, l'ASN et les opérateurs, le COSSEN exploite les renseignements relatifs aux menaces à la sécurité nucléaire, instruit les enquêtes liées aux procédures administratives de recrutement et d'habilitation des personnels.

La voie entre sûreté et sécurité nucléaires est bel et bien étroite, illustrant à quel point le droit nucléaire se comprend à l'aune

de préoccupations environnementales, sanitaires et aujourd'hui sécuritaires.

**DROIT NUCLÉAIRE  
ET INDEMNISATION  
DES VICTIMES DES ESSAIS :  
ENTRE ESPOIR, DÉCEPTION  
ET QUESTIONS**

Alors que le premier essai nucléaire français remonte au 13 février 1960, près de Reggane (en Algérie française), 209 autres tirs se succéderont, d'abord en Algérie même après l'indépendance (3 essais aériens et 13 essais souterrains) puis en Polynésie française (193 essais) jusqu'au 27 janvier 1996, date à laquelle la France a été en capacité d'effectuer des essais en laboratoire. Contrairement aux allégations des autorités politiques et militaires de l'époque, certaines de ces expérimentations ont provoqué des accidents; des retombées radioactives ayant eu un impact sur la santé des populations, des personnels militaires et civils travaillant sur les sites d'essai (atteintes externes par exposition à des rayonnements ionisants et atteintes internes du fait de la consommation d'eau irradiée).

Les pathologies radio-induites ne sont pas déclarées immédiatement,

les premiers symptômes étant apparus des années voire des dizaines d'années plus tard. Le droit n'apporta pas, jusqu'en 2010, de réponse spécifique à la souffrance des victimes qui devaient s'appuyer, selon leur situation au moment des faits, sur les codes des pensions civiles et militaires d'invalidité (militaires), de la sécurité sociale (civils) ou le régime de prévoyance sociale polynésien (habitants). Elles pouvaient tenter aussi de faire reconnaître la responsabilité de l'État devant les juridictions administratives. Démontrer une faute, un préjudice et un lien de causalité entre le fait générateur et le dommage était très difficile du fait que plus le temps s'écoulait, et plus le lien de causalité se distendait, pour parfois disparaître rendant alors impossible toute réparation du préjudice pourtant subi.

Il a fallu attendre le projet de loi de 2009 relatif à la réparation des conséquences sanitaires des essais nucléaires<sup>11</sup> pour faciliter l'indemnisation et « faire bénéficier les personnes ayant participé aux essais et les populations d'un régime identique... dans un souci de rigueur et de justice », tels étaient les piliers de ce projet.

Un travail législatif conséquent a abouti à la loi n°2010-2 du 5 janvier 2010 relative à la reconnaissance et à l'indemnisation des victimes des essais nucléaires français. L'utilité de celle-ci était indéniable d'abord par son intitulé, par la réponse unifiée dont désormais bénéficiaient toutes les victimes souffrant de maladies radio-induites et enfin par le mécanisme présomptif consacré (présomption de causalité au bénéfice du demandeur « à moins qu'au regard de la nature de la maladie et des conditions de son exposition le risque attribuable aux essais nucléaires puisse être considéré comme négligeable »). Juristes et associations d'aide aux victimes ont fait part de leur scepticisme face à cette loi soulignant ses imperfections (un champ géographique et temporel limité en ce qui concernait la Polynésie française, l'exclusion des victimes par ricochet, une liste de maladies radio-induites trop restrictive, un comité d'indemnisation des victimes (CIVEN) mal dénommé puisqu'il ne faisait que proposer une indemnisation au ministre de la Défense). Or, si l'histoire d'une loi ne s'achève pas le jour de sa publication, la mise en œuvre de celle-ci n'a pas permis de rassurer les potentiels ▶

**Le CERDACC, qu'est-ce que c'est ?**

[www.cerdacc.uha.fr](http://www.cerdacc.uha.fr)

Les auteurs de cet article sont enseignants-chercheurs au CERDACC (Centre européen de recherche sur le risque, le droit des accidents collectifs et des catastrophes), centre de recherche de l'Université de Haute-Alsace créé en 1995 au lendemain de la catastrophe du Mont Ste Odile.

Ce centre avait pour objet initial d'étudier les dispositifs de toute nature mis en place après la survenance de catastrophes et d'accidents collectifs. Il a peu à peu élargi son spectre de recherche, pour y intégrer les thématiques du Risque.

Il diffuse deux revues numériques :

- Le Journal des Accidents et des Catastrophes,
- Risques, Études et Observations.

<sup>11</sup>. AN, n°1696, 27 mai 2009.

bénéficiaires, le nombre d'indemnisation étant bien faible<sup>12</sup>.

L'extension de la liste des maladies radio-induites n'ayant pas suffi, le législateur a, trois ans plus tard, adapté le processus d'indemnisation dans un sens plus favorable aux demandeurs<sup>13</sup>. L'indemnisation relève désormais du seul CIVEN érigé en Autorité administrative indépendante (AAI). C'est la première fois qu'une AAI est reconnue compétente pour assurer l'indemnisation de victimes. Par ailleurs, tout le territoire de la Polynésie française est désormais couvert par le régime d'indemnisation.

En dépit de ces avancées, l'indemnisation des victimes continue à être faible<sup>14</sup>. Les victimes insatisfaites de la position du ministre de la Défense puis du CIVEN ont alors multiplié les recours devant les juridictions administratives obtenant parfois gain de cause<sup>15</sup>.

En 2017 le législateur a, une nouvelle fois, modifié la loi mais en allant beaucoup plus loin puisqu'il a supprimé la faculté pour le CIVEN de démontrer qu'au regard de la nature de la maladie et des conditions de l'exposition, le risque attribuable aux essais nucléaires est négligeable<sup>16</sup>.

Désormais, les demandeurs doivent justifier de leur présence sur les lieux et aux périodes fixées par la loi et du développement d'une maladie radio-induite.

Lorsqu'une demande a été rejetée par le passé par le ministre alors compétent (ou depuis 2013 par le CIVEN), avant l'entrée en vigueur de la nouvelle loi, ce dernier doit la réexaminer s'il estime que l'application de la nouvelle loi peut justifier une solution plus favorable pour la victime alors que le demandeur (ou ses ayants droit lorsqu'il est décédé) peut présenter une demande en ce sens.

Ainsi, l'indemnisation des victimes des essais nucléaires souligne à la fois les errements de l'État dans la mise en œuvre d'un choix politique jugé vital pour l'indépendance de la nation mais aux risques sanitaires ignorés et (ou) minimisés, les hésitations nombreuses du législateur ayant parfois tendance à sombrer dans l'autosatisfaction et, le rôle *in fine* incontournable des juridictions administratives chargées de combler les imperfections et silences des textes de lois s'imposant à elles.

### références

- R. Carle, Le développement nucléaire dans l'Europe de demain, *Revue Générale Nucléaire*, n°1, janvier-février 1993, p.15.
- P. Strohl, L'originalité du droit nucléaire, *Le courrier du CNRS : les Sciences du droit*, avril 1990, n°75, p.18.
- G. Timsit, *Thèmes et systèmes de droit*, PUF, Paris, 1986, p.153.
- H. Lavaill, *Droit nucléaire*, Collection du CEA, Série Synthèses, Ed. Eyrolles, Paris, 1979.
- P. Baleynaud, *Le régime juridique de la politique électro-nucléaire de la France*, Thèse pour le doctorat en droit, Poitiers, 1982.
- Ch. Raetzke, Le droit nucléaire et le droit de l'environnement dans les procédures d'autorisation des installations nucléaires, *Bulletin de Droit Nucléaire, OCDE*, n°92/Vol. 2013/2, pp.65-99.
- J-Y Le Deaut, OPECST, *Revue Contrôle*, n°200, avril 2016, p.5
- M. Leger, L. Grammatico, La loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire : quelles évolutions pour le droit nucléaire français ? *Bulletin de Droit Nucléaire, OCDE*, n°77, Vol 2006/1, pp.7-25/
- J.-M. Pontier, *Droit nucléaire. Le contentieux du nucléaire*, Présentation, PUAM, 2011.
- P. Reyners, Le droit nucléaire confronté au droit de l'environnement – Autonomie ou complémentarité ? *Revue Québécoise de Droit International, HS*, 2005, pp.149 et s.
- M. Rambour, La sécurité nucléaire en France. Un état des dispositifs de lutte contre les intrusions terrestres et les nouvelles menaces aériennes, *Cahiers de la sécurité et de la justice*, 2016/35-36, p. 206-213.
- M. Rambour, Création du Commandement spécialisé pour la sécurité nucléaire (COSEN), *Journal des Accidents Collectifs* n° 167, mai 2017 – Ed. CERDACC.
- M. moliner-dubost, *Démocratie environnementale et participation des citoyens*, AJDA 2011, p. 259.
- *Revue Générale Nucléaire*, Dossier « Stocker les déchets les plus radioactifs », mai-juin 2016, n°3, p. 11 et suivantes.
- E. Gaillard, *Génération futures et droit privé*, LGDJ, coll. Bibliothèque de droit privé, T. 527, 2011, p. 191.
- M. Prieur, Les déchets radioactifs, une loi de circonstance pour un problème de société, *R.J.E.* 1992, n° 1
- T. Schellenberger, *Le droit public des utilisations du sous-sol : réflexions sur le régime juridique des stockages géologiques de déchets*, Thèse, 2014, Aix-Marseille Université, p. 527 et suivantes.
- T. Soleilhac, *Le temps et le droit de l'environnement*, Thèse, Lyon 3, 2006, p. 1291

**12.** Décembre 2012 : 9 sur 786 dossiers déposés. **13.** Loi n°2013-1168 du 18 décembre 2013 relative à la programmation militaire pour les années 2014-2019 et portant diverses dispositions concernant la défense nationale et la sécurité nationale. **14.** 17 pour la période 2010-2015, 13 pour 2015-2016. **15.** Mars 2015-décembre 2016 : 28 décisions de justice favorables aux victimes. **16.** Loi n°2017-256, 28 février 2017 relative à la programmation relative à l'égalité réelle outre-mer.

# Report de l'objectif de réduction de la part du nucléaire en 2025 : point de vue d'un juriste

S'IL APPARAÎT NÉCESSAIRE, PAR SOUCI DE SÉCURITÉ JURIDIQUE, DE MODIFIER L'OBJECTIF DE 2025, IL EST POSSIBLE D'ATTENDRE FIN 2018 POUR PROCÉDER À CETTE RÉVISION. SI POLITIQUEMENT, CELA N'ÉTAIT PAS JUGÉ OPPORTUN, AVANCER EN FAISANT MINE DE RESPECTER L'OBJECTIF DÉSAVOUÉ, EN SACHANT QU'IL NE SERA PAS TENU, CONSTITUERAIT UNE STRATÉGIE RISQUÉE, PRINCIPALEMENT POUR EDF.

Par **Marc Léger**, président de la Section technique Droit et assurance de la SFEN

**L**e 7 novembre dernier, Nicolas Hulot, ministre de la Transition écologique et solidaire, a annoncé à l'issue du Conseil des ministres qu'il serait « difficile » de tenir l'objectif de réduction de 75 % à 50 % de la part du nucléaire dans la production d'électricité à l'horizon 2025 fixé par la loi dite de transition énergétique et estimé qu'il serait plutôt atteignable en 2030, voire en 2035.

Comme on pouvait s'y attendre, cette annonce a été, d'un côté, saluée par les milieux pro-nucléaires qui se sont félicités que le ministre ait pris une décision « raisonnable » et « pragmatique » et, de l'autre, violemment critiquée par les opposants au nucléaire qui ont accusé le ministre de violer la loi.

Laissons de côté les réactions politiques qu'a suscitées cette annonce et intéressons-nous à la (seule) question juridique qu'elle soulève : le constat de l'impossibilité d'atteindre l'objectif de 2025 nécessite-t-il de modifier la loi ?

## Que dit la loi de transition énergétique ?

L'article 1<sup>er</sup> de la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique

pour la croissance verte<sup>1</sup> introduit dans le code de l'énergie plusieurs articles nouveaux relatifs à la politique énergétique, en particulier un article L. 100-4.I, lequel énonce : « La politique énergétique nationale a pour objectifs : [...] 5° De réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % à l'horizon 2025 ».

Quand le ministre en charge de l'énergie annonce qu'il sera(it) difficile d'atteindre cet objectif et qu'il ne pourrait être atteint que 5 ou 10 ans plus tard, il reconnaît certes, ou estime, qu'une disposition du Code de l'énergie ne pourra pas être respectée. Mais ce faisant, il ne la viole pas *stricto sensu*, la non-atteinte de l'objectif ne pouvant logiquement être constatée qu'à la date indiquée ; il prépare à sa non-application.

La question de droit qui est posée en l'occurrence est celle de la portée normative d'un objectif de politique gouvernementale. La question ne se poserait pas de la même manière si cet objectif n'avait pas été fixé par une loi (au surplus codifiée). Comme dans de

nombreuses lois de programme ou de programmation analogues à la loi dite Grenelle I<sup>2</sup>, qui formalise les 268 engagements du Grenelle de l'environnement, l'énoncé d'objectifs ressort de la compétence législative, ou plutôt peut y entrer quand le législateur s'en empare. La logique voudrait qu'on modifie l'objectif, reconnu comme non atteignable, par un vecteur de la même nature que celle de l'outil d'énonciation. Mais, en droit, il en est évidemment autrement pour ce qui concerne l'énoncé d'un objectif : aucune sanction ne saurait frapper le gouvernement s'il ne respecte pas cet objectif, que ce soit silencieusement ou avec force publique, hors évidemment l'engagement de sa responsabilité politique – que l'on peut difficilement voir se réaliser dans le contexte actuel. On peut d'ailleurs observer que nos lois sont de vrais cimetières d'objectifs déçus, sans que le législateur ait senti le besoin de remettre en chantier leur énoncé pour le corriger.

La seule différence pour ce qui concerne la loi de transition énergétique vient de ce que l'objectif

1. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015. 2. Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.

de 2025 ne peut être lu séparément de son contexte, et que dans le même texte, on ne compte pas moins de sept articles pour lesquels cet objectif induit potentiellement des conséquences, si bien que le modifier conduit en réalité à changer des dispositions de fond portant application de la loi.

Dans l'ordre des articles de la loi :

- › L'article 40 prévoit une « stratégie pour le développement de la mobilité propre », qui ne sera, évidemment, pas rythmée de la même manière selon que des calendriers énergétiques pourrout ou pas être tenus. L'impact est ici potentiel et partiel.
- › L'article 64 prévoit l'adoption d'un « plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques », qui ne sera pas élaboré de la même manière s'il doit y avoir réduction immédiate de la part du nucléaire ou si du temps supplémentaire est donné à la transition du charbon à d'autres sources énergétiques alternatives au nucléaire.
- › L'article 175 prévoit l'adoption d'une « stratégie nationale de mobilisation de la biomasse », qui, nécessairement, pourrait être étalée sur une plus longue durée tant que les centrales nucléaires demeurent les fournisseurs essentiels d'électricité.
- › L'article 176 prévoit l'adoption d'une « programmation pluriannuelle de l'énergie » (PPE), fixée par décret<sup>3</sup>, afin d'atteindre, sur deux périodes successives, les objectifs définis notamment à l'article L. 100-4 du code de l'énergie. Il est clair que cette programmation ne pourra pas être la même selon que l'objectif contesté pourra ou pas être respecté, son contenu étant logiquement impacté par une plus grande urgence s'il devait ou pouvait l'être.
- › L'article 187 prévoit l'obligation pour EDF d'établir un « plan stratégique », présentant les actions qu'il s'engage à mettre en œuvre pour respecter les objectifs de

sécurité d'approvisionnement et de diversification de la production d'électricité fixés dans la première période de la PPE. En application de cette disposition, l'article 12 du décret précité relatif à la PPE dispose que « conformément à l'article L.311-5-7 du code de l'énergie, dans un délai maximal de six mois à compter de la publication du présent décret, Électricité de France établit un plan stratégique compatible avec les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie qui fixe l'objectif de réduire la part du nucléaire à 50 % de la production d'électricité à l'horizon 2025. »



### LE REPORT DE CET OBJECTIF INDUIT DES CONSÉQUENCES POUR SEPT ARTICLES DE LA LOI SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



Ce plan stratégique serait évidemment profondément différent si l'objectif de 2025 ne figurait plus dans la PPE, puisque EDF pourrait sans difficulté étaler dans le temps ses obligations comptables de provisionnement et ses prévisions d'investissement alternatif.

- › Accessoirement, seraient également concernés mais dans une moindre mesure : l'article 182 qui prévoit la mise en place d'un « plan de programmation de l'emploi et des compétences » tenant compte des orientations fixées par la PPE, et l'article 183 obligeant les ministres chargés de l'énergie et de la recherche à arrêter et rendre publique une « stratégie nationale de la recherche énergétique » fondée sur les objectifs définis par la loi.

### Dès lors, faut-il modifier la loi ? Et quand ?

Compte tenu des liens existant entre l'objectif de 2025 et d'autres dispositions clairement normatives, il serait non seulement logique, mais aussi inévitable juridiquement de modifier la loi. Modifier seulement le décret de 2016 relatif à la PPE (en supprimant la fin de phrase de l'article 12, « qui fixe l'objectif de réduire la part du nucléaire à 50 % de la production d'électricité à l'horizon 2025 ») pour permettre à EDF d'adapter son plan stratégique, alors que ce plan doit être compatible avec les orientations de la PPE, dont la version pour 2016-2018 fixe clairement l'objectif de réduction de la part du nucléaire à 50 % en 2025, risquerait d'offrir une occasion de contentieux à ceux qui ont mal reçu l'annonce ministérielle.

En fait, la loi de transition énergétique prévoit elle-même une procédure de révision. Le II de l'article L. 100-4 dispose en effet que « L'atteinte des objectifs définis au I [dont celui de la réduction de la part du nucléaire en 2025] fait l'objet d'un rapport au Parlement déposé dans les six mois précédant l'échéance d'une période de la programmation pluriannuelle de l'énergie [...] ». Il ajoute que « le rapport et l'évaluation des politiques publiques engagées en application du présent titre peuvent conduire à la révision des objectifs de long terme définis au I [...] ». La première période de la première PPE s'achevant en 2018, conformément à l'article L.141-3 du code de l'énergie, on peut donc envisager de ne pas modifier la loi immédiatement, mais de le faire avant la seconde période, soit avant fin 2018, ou au pire – au prix d'une réécriture rapide début 2019 de ce plan stratégique – au premier trimestre 2019.

On remarquera toutefois, sur le plan juridique, que cette modification, pour inévitable qu'elle puisse paraître, pourrait se voir reprocher

3. Aujourd'hui, le décret n° 2016-1442 du 27 octobre 2016 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie.



En 2015, Ségolène Royal fait voter la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, laquelle prévoit une réduction de la part du nucléaire en 2025. Deux ans après, son successeur, Nicolas Hulot, annonce que cet objectif est inatteignable et reporte l'échéance

de violer le principe de non-régression<sup>4</sup>, figurant désormais parmi les principes généraux du droit de l'environnement. Il est vrai que celui-ci n'a qu'une valeur législative et que ce qu'a fait une loi peut être défait par une autre... Sauf si le Conseil constitutionnel, qui sera sans doute saisi par un biais ou un autre, qualifiait ce principe de principe ayant valeur constitutionnelle.

#### La modification de l'objectif de 2025 aurait-elle d'autres conséquences ?

S'il apparaît logique et nécessaire de modifier l'objectif de 2025,

cette modification ne saurait toutefois entraîner la remise en cause de l'objectif de 23 % de la part des énergies renouvelables à l'horizon 2020, qui figure également à l'article L. 100-4.I du code de l'énergie, lequel prévoit, parmi les objectifs de la politique énergétique : « *de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030; à cette date, pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables doivent représenter 40 % de la production d'électricité, 38 % de la consommation finale*

*de chaleur, 15 % de la consommation finale de carburant et 10 % de la consommation de gaz* ».

Cet objectif est imposé à la France par la directive 2009/28 du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (Annexe I.A)<sup>5</sup>. Il est clair qu'il est donc contraignant puisqu'il constitue un engagement de la France vis-à-vis des autres membres de l'Union européenne et que, malgré les difficultés de configuration qu'il présenterait, un contentieux pourrait être initié avec des chances de succès.

<sup>4</sup>. Principe introduit dans l'article L. 110-1 du code de l'environnement par la loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, selon lequel : « la protection de l'environnement, assurée par les dispositions législatives et réglementaires relatives à l'environnement, ne peut faire l'objet que d'une amélioration constante, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment ». <sup>5</sup>. Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE.

COURONNÉE EN MAI 2017 MISS USA, KARA DEIDRA MCCULLOUGH, 26 ANS, N'EST PAS UNE MISS COMME LES AUTRES. DIPLÔMÉE EN 2013 D'UN BACHELOR EN RADIOCHIMIE, ELLE INTÈGRE LA MÊME ANNÉE LA *NUCLEAR REGULATION COMMISSION* (NRC), L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE AMÉRICAINE. RÉSOLUMENT TOURNÉE VERS L'AVENIR, KARA VEUT FAVORISER L'INTÉGRATION DES FEMMES AU SEIN DES MÉTIERS SCIENTIFIQUES, PARTICULIÈREMENT CEUX DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE, ET PROMOUVOIR LA SCIENCE AUPRÈS DE LA JEUNESSE. PORTRAIT.

## De la chimie nucléaire à Miss USA

### Kara McCullough

Miss États-Unis 2017 et chimiste nucléaire

**N**ée à Naples (Italie) d'un couple de parents militaires, Kara McCullough a grandi à Virginia Beach, dans l'État de Virginie, au bord de la baie de Chesapeake et de l'océan Atlantique. Le lycée terminé, elle se tourne vers des études scientifiques à l'Université d'État de Caroline du Sud, d'où elle obtiendra un *Bachelor* en chimie, spécialité radiochimie, en 2013.

Passionnée par le secteur nucléaire, elle adhère dès ses études à plusieurs associations scientifiques, dont l'*American Nuclear Society*, avant de rejoindre la *Nuclear Regulation Commission* (NRC), l'autorité de sûreté américaine. Jusqu'à sa victoire au concours de Miss USA en mai 2017 – soit pendant quatre ans – elle travaille dans l'agence fédérale en tant que spécialiste de la préparation aux urgences au sein du bureau de la sécurité

nucléaire et de la réponse aux incidents (*Office of Nuclear Security and Incident Response*). Une mission qui l'amène notamment à « vérifier les plans d'urgence des centrales nucléaires afin de déterminer s'ils sont conformes aux standards de la NRC. » Un rôle loin d'être anodin : « si quelque chose tourne mal dans une centrale, je serais présente au centre d'opération de l'agence », explique-t-elle. « J'aime la science », affirme fièrement Kara. La scientifique est d'ailleurs très engagée dans sa promotion. Avant de concourir en tant que *Miss District of Columbia*, la chimiste nucléaire avait lancé son propre programme de sensibilisation intitulé *Science Exploration for Kids*, dédié à la promotion de l'éducation scientifique pour les enfants du primaire et du secondaire. « Je veux pouvoir inspirer les jeunes à poursuivre

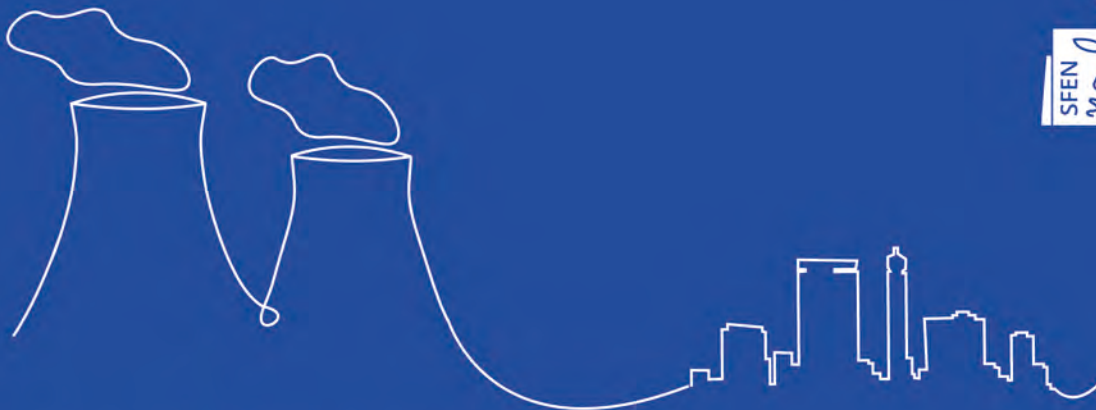


bio express

Née en 1991 en Italie d'un père militaire dans la marine américaine, Kara McCullough a suivi ses parents dans le monde entier (Corée du Sud, Japon, Hawaï) avant de grandir en Virginie. Après des études de chimie nucléaire, elle rejoint l'autorité de sûreté nucléaire américaine (NRC) tout en concourant à différents concours de Miss, jusqu'à décrocher la couronne de Miss USA en 2017.

des études dans les domaines scientifiques. » Cet enjeu de l'accès à la science qu'elle a fait sien dépasse d'ailleurs le cadre de la jeunesse. Fervente défenseuse du rôle et de l'accès des femmes dans les domaines de la science, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques, Miss USA 2017 veut aussi promouvoir l'accès aux métiers scientifiques aux femmes, encore sous-représentées dans ces secteurs. « Aux États-Unis, le ratio homme/femme dans l'industrie nucléaire est de 24 pour 1, cela témoigne de l'importance des inégalités de genre » [...]. « Je veux voir plus de femmes prendre des positions de direction au sein des agences scientifiques publiques et privées,

notamment dans l'énergie. » Désormais Miss USA, elle bénéficie de la notoriété pour sensibiliser un grand nombre d'américaines et d'américains à son combat. Ayant échoué à décrocher la couronne de Miss Univers en novembre 2017, l'avenir professionnel de Kara est en suspens, et elle-même n'a pas encore tranché sur ce qu'elle allait faire par la suite : revenir à la NRC, qui a publiquement affiché sa fierté de la voir couronnée, ou se tourner vers autre chose, par exemple se consacrer à plein temps à la promotion de la science, ou encore travailler dans la médecine nucléaire, comme elle l'avait un temps envisagé pendant ses études. **To be continued...** ■



## PRE REGISTRATION ONLINE

Go to the event website!



### INDEX

25-26 [+27] JUNE 2018  
PARIS, FRANCE

#### International Nuclear Digital Experience

SFEN organizes, in partners with WNE, the first international conference on digital transformation in nuclear

[www.SFEN-INDEX2018.org](http://www.SFEN-INDEX2018.org)



### FONTEVRAUD 9

17 - 20 SEPTEMBER 2018  
AVIGNON, FRANCE

International Symposium on Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to Light Water NPPs' Safety, Performance and Reliability

[www.SFEN-FONTEVRAUD 9.org](http://www.SFEN-FONTEVRAUD 9.org)



### DEM

22- 24 OCTOBER 2018  
AVIGNON, FRANCE

International Conference in Dismantling Challenges: Industrial Reality, Prospects and Feedback Experience

[www.SFEN-DEM2018.org](http://www.SFEN-DEM2018.org)

**CONVENTION SFEN**

15 MARS 2018



La Chesnaie  
du Roy

INSCRIPTIONS  
OUVERTES !

# L'USINE NUCLÉAIRE DU FUTUR

La recherche et l'innovation au service du  
parc nucléaire d'aujourd'hui et de demain

**150318R15**

Profitez de **15% de réduction**  
en indiquant ce code promotion-  
nel lors de votre inscription avant  
le 31/01/18. (Hors tarif préférentiel  
étudiant, enseignant et retraité)

**SFEN-Convention2018.org**

