



L'électricité nucléaire

Questions ouvertes et points de vue

La Société Française de Physique nourrit le débat sur le nucléaire

L'énergie et l'environnement sont au cœur des débats actuels : les menaces d'un changement climatique et d'épuisement des ressources fossiles provoquent des problèmes de société auxquels les physiciens ne sauraient rester indifférents. La Société Française de Physique (SFP) et la communauté des scientifiques en général ont vocation à éclairer ces débats.

La commission « Énergie et Environnement » de la SFP est historiquement un lieu d'échange dont les synthèses régulières, argumentées et chiffrées, au caractère très factuel et solide, fournissent des outils pour la prise de décision de la société et des politiques.

La SFP et la Société Chimique de France ont ainsi récemment appelé le gouvernement et le Parlement à mettre en place une instance d'évaluation scientifique de la politique énergétique, et exprimé leur point de vue dans un cahier d'acteur mis en ligne [1] dans le cadre du débat public sur la révision de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Le nucléaire ne saurait être exclu de cette réflexion sur les énergies et leur futur, avec ses spécificités propres : il s'agit sans doute de l'un des domaines scientifiques et techniques où les controverses furent parmi les plus passionnées tout au long de la deuxième moitié du siècle dernier et le demeurent aujourd'hui. Le caractère très vif et contradictoire des débats, y compris au sein de la SFP, est révélateur de la nécessité de prendre en compte une multitude de données afin de se construire une idée aussi exacte et objective que possible dans un environnement excessivement complexe.

L'esprit de ce numéro spécial de *Reflets de la physique* est d'adopter une attitude éditoriale apaisée, mettant en avant les arguments d'un débat contradictoire de manière extrêmement factuelle sur un grand nombre (bien que limité) de sujets, afin que le lecteur puisse se forger sa propre opinion. Cette ligne éditoriale est une marque de fabrique de la revue de la SFP qui a publié par le passé plusieurs articles très détaillés autour du nucléaire et de son avenir.

La communauté des physiciens, et des scientifiques en général, est de plus en plus sensibilisée à la portée politique, sociétale et morale de ses travaux professionnels. C'est pourquoi l'élaboration d'un document de référence se voulant accessible à un très grand public passe également par l'ouverture à des auteurs non scientifiques. Nous leur avons donc aussi donné la parole pour apporter un éclairage original et particulier que le scientifique néglige parfois, alors que son impact sur la prise de conscience collective est évident.

Un autre numéro de *Reflets de la physique*, en cours de préparation avec la commission « Énergie et Environnement », sera prochainement consacré aux énergies en général afin d'étendre et enrichir la réflexion.

Dans les années 1990, sous la présidence de René Turlay, la SFP avait déjà publié une étude sur les déchets nucléaires qui avait fait référence [2], mais c'est la première fois que nous entrons dans le débat autour du nucléaire avec un travail aussi vaste et complet, renvoyant à une abondante bibliographie, et aspirant à une cohérence d'ensemble pour toucher un lectorat plus large que celui des passionnés de sciences.

Avec ce numéro spécial illustrant notre volonté d'éclairer les débats, nous espérons présenter un état des lieux des connaissances et des controverses qui manque souvent aux citoyens pour se forger une opinion. En espérant que ce but sera atteint, nous vous souhaitons une excellente lecture !

Catherine Langlais

Présidente de la Société Française de Physique

Références

1. <https://ppe.debatpublic.fr/cahier-dacteur-ndeg30-societe-francaise-physique>
2. Société Française de Physique (sous la direction de R. Turlay), *Les déchets nucléaires, un dossier scientifique*, EDP Sciences (1997).



Comité de rédaction

Président : Stefano Matthias PANEBIANCO

Membres : Michel BELAKHOVSKY -
Nadia BOULOUFUFA - Alain BRAVO -
Jean-Marie BROM - David CÉBRON -
Françoise COMBES - Nicolas DELERUE -
Titaina GIBERT - François GRANER -
Étienne GUYON - Jean-Pierre HULIN -
François JULIEN - Michèle LEDUC -
Arnaud LE PADELLEC - Charles de NOVION -
Marios PETROPOULOS - Patricia PINEAU -
Laurence RAMOS - Sophie REMY -
Pascale ROUBIN - Christiane VILAIN

Ce numéro a été préparé avec la participation
de l'Institut de Physique du CNRS.

Directeur de la publication : Jean-Paul DURAUD

Rédacteur en chef : Charles de NOVION

Conception : Lætitia MORIN - Keith VILLEMEUR

Réalisation graphique : Lætitia MORIN

laetitiamorin-graphiste.fr

Suivi de rédaction : Agathe CYMER

Service publicité : publicite@edpsciences.org

Dépôt légal : 4^e trimestre 2018

ISSN : 1953-793X - e-ISSN : 2102-6777

© SFP - Édité à 3500 exemplaires

Imprimerie Jouve

11, bd de Sébastopol, 75036 Paris Cedex 01

Tél. : 01 44 76 54 40

Société Française de Physique

33, rue Croulebarbe, 75013 Paris

Tél. : 01 44 08 67 10 - Fax : 01 44 08 67 19

e-mail : contact@sfpnet.fr -

Serveur : www.sfpnet.fr

SFP Bulletin, Institut Henri-Poincaré,

11, rue Pierre-et-Marie Curie, 75005 Paris

e-mail : sfp-bulletin@ihp.fr

Serveur : www.refletsdelaphysique.fr

• Éditorial

• **2 La Société Française de Physique nourrit le débat sur le nucléaire**
Catherine Langlais

• **4 Comment aborder les multiples facettes du débat ?**
François Graner et Stefano Matthias Panebianco

• La filière du nucléaire civil français

• **8 La technologie électronucléaire en France aujourd'hui**
Henri Safa

• **13 Gestion des déchets radioactifs**
Jean-Yves Le Déaut

• **14 Démantèlement des installations nucléaires**
Barbara Romagnan

• Les problématiques du nucléaire

• **18 En préambule aux deux entretiens croisés sur l'impact du nucléaire**
François Graner et Stefano Matthias Panebianco

• **19 Impact du nucléaire sur la santé et l'environnement en situation non accidentelle**
Entretien croisé avec Claude Stéphan et Pierre Barbey

• **22 Le risque d'accident nucléaire : prévention et gestion**
Entretien croisé avec Jean-Christophe Gariel et Sophia Majnoni d'Intignano

• **24 Radioactivité dans l'environnement : le rôle des associations de contrôle**
David Boilley

• **27 Sous-traitance et qualité dans une centrale nucléaire**
Entretien avec Gilles Reynaud

• **29 Le cout de production de l'électricité nucléaire**
Anne-Sophie Dessillons

• Le nucléaire et la société française

• **34 Les choix techniques du nucléaire français : le lien historique civil-militaire**
Hervé Bercegol

• **37 Nucléaires civil et militaire : des recherches liées**
Jacques Bordé et Michèle Leduc

• **39 Participer au débat sur le nucléaire**
Françoise Lafaye

• **41 La presse et le nucléaire, couple infernal**
Sylvestre Huet

• Quel futur pour le nucléaire français ?

• **46 Le nucléaire dans les scénarios mondiaux de transition énergétique**
Sandra Bouneau

• **49 Envisager le futur énergétique : des aspirations sociétales aux enjeux techniques**
Nadia Maïzi et François Briens

• **52 La distribution de l'électricité : atouts et contraintes liés au réseau européen**
Jacques Percebois

• **55 Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires**
Annick Billebaud

• **58 Quelques questions ouvertes et points critiques**
François Graner et Stefano Matthias Panebianco

• **62 Pour aller plus loin...**

Comment aborder les multiples facettes du débat ?

François Graner, physicien, CNRS, et Stefano Matthias Panebianco, physicien, CEA
Éditeurs du dossier

Un sujet qui divise

L'histoire de ce numéro spécial de *Reflète de la physique* est longue et semée de rebondissements. Le point de départ a été le constat que le nucléaire est probablement le sujet qui divise le plus la communauté des physiciens. D'où dans un premier temps l'idée, à vrai dire assez peu originale, de proposer aux lecteurs de *Reflète* un article de quelques pages sur le nucléaire civil en France, en donnant la parole à des scientifiques ayant des positions opposées sur le sujet. Ce désir de débat, concrétisé par un texte synthétique et exhaustif à la fois, s'est vite heurté au constat sans appel qu'il est impossible de traiter sérieusement en quelques pages d'un sujet aussi complexe et présentant autant de facettes différentes.

Convaincu de l'intérêt de présenter le débat actuel autour du nucléaire civil dans la diversité de ses aspects et implications, le comité de rédaction de la revue nous a donc donné mandat pour coordonner l'édition d'un numéro spécial totalement dédié à ce sujet, en le centrant sur la production d'électricité par fission, en France, de nos jours. Deux ans de travail des auteurs et éditeurs ont été nécessaires. Plusieurs considérations et impératifs méthodologiques ont guidé notre approche.

Que trouverez-vous dans ce dossier ?

Tout d'abord, quels sujets traiter ? Il est évident que les enjeux sociétaux autour des sources de production d'énergie animent, en France comme dans le reste du monde, un débat intense dans l'opinion publique, où s'entremêlent la physique, l'environnement, l'économie, la politique. Toute décision individuelle ou collective nécessite de pondérer les différentes considérations ; et chacun peut mettre en avant tel ou tel élément qui lui semble particulièrement important. Il a semblé évident dès le départ qu'il fallait associer aux sujets les plus techniques, un éclairage sur des aspects plus inattendus dans une revue de physique.

En effet, les scientifiques, et les physiciens tout particulièrement, sont invités dans ce débat, parfois un peu de force, souvent avec des considérations qui dépassent leur domaine d'expertise. Cependant, les scientifiques sont d'abord des citoyens, des habitants de la planète et, à ce titre, participent aux choix énergétiques qui ont un impact sur celle-ci. Dans ce cadre, les physiciens peuvent peut-être apporter leur méthode de travail, basée sur l'analyse critique et argumentée de positions exprimées dans le cadre d'un débat contradictoire.

C'est la raison pour laquelle vous trouverez dans ce numéro quatre types de contributions. D'une part (p. 6), des articles plutôt factuels sur la filière uranium et le parc nucléaire français, les déchets et le démantèlement des centrales. D'autre part (p. 16), pour planter le cadre du débat, deux entretiens croisés sur l'impact environnemental (au sens large) du nucléaire en fonctionnement normal, et sur le risque d'accidents, suivis d'un éclairage original sur le rôle des associations de contrôle de la radioactivité, de la sous-traitance et sur les coûts du nucléaire. Ensuite (p. 32), pour permettre une mise en contexte encore plus large de la thématique du nucléaire, des articles sur l'histoire du nucléaire civil en France et de ses relations avec ses origines de nature militaire, ainsi que des analyses sur la relation entre le nucléaire et la société, et sur le traitement que la presse a réservé et réserve encore aujourd'hui à ce débat public. Enfin (p. 44), des articles de prospective : quels scénarios peut-on envisager à l'échelle mondiale, en lien avec le climat, ou nationale, en lien avec des choix de société ; ainsi que les choix techniques ou politiques concernant les réseaux de distribution de l'énergie électrique et les pistes de recherche.

LA FILIÈRE DU NUCLÉAIRE CIVIL FRANÇAIS



.....

Il faut maîtriser les éléments radioactifs tout au long des étapes de la chaîne du combustible nucléaire, afin qu'ils ne puissent entraîner aucune conséquence ni sur l'être humain ni sur l'environnement.

Henri Safa

La technologie électronucléaire en France aujourd'hui

page 8

.....

.....

En matière d'énergie, il faut que la décision politique, qui s'inscrit dans un temps bref, celui du mandat électoral, puisse prendre en compte des décisions sur un temps long.

Jean-Yves Le Déaut

Gestion des déchets radioactifs :
la nécessité d'une vision politique à long terme

page 13

.....

.....

On observe ainsi selon les types de réacteurs des disparités dans les savoir-faire qui ne permettent pas d'estimer acquise la faisabilité technique du démantèlement.

Barbara Romagnan

Démantèlement des installations nucléaires :
une faisabilité technique pas tout à fait acquise

page 14

.....

La technologie électronucléaire en France aujourd'hui

Henri Safa, physicien, CEA

L'actuel parc nucléaire français est constitué de réacteurs à eau pressurisée. Avant d'être mise en réacteur, la matière combustible, constituée d'uranium, résulte d'un long processus qui démarre à la mine et passe par des phases d'enrichissement et de préparation des crayons combustibles. Après irradiation en réacteur, les combustibles usés sont séparés et conditionnés pour être mis aux déchets. En France, une partie de ces combustibles fait l'objet d'un retraitement qui permet l'utilisation du plutonium, ce qui ajoute des étapes cruciales et stratégiques pour l'ensemble de la filière.

Le combustible nucléaire

La densité d'énergie du combustible nucléaire

La fission de l'atome d'uranium dégage une quantité d'énergie très importante par unité de masse de combustible, cent mille fois plus que pour la plus concentrée des énergies fossiles. Ainsi, une pastille de quelques grammes d'uranium enrichi peut fournir dans nos réacteurs nucléaires actuels autant d'énergie thermique que cinq barils de pétrole^(a) (fig. 1). Cela explique deux avantages du nucléaire : il a recours à de faibles quantités en ressources naturelles, et par là-même est peu dépendant des fluctuations de leur cours.

Cependant, tandis que la combustion à l'air des hydrocarbures est relativement simple, l'usage du nucléaire requiert une technicité et des compétences élaborées. Il faut maîtriser les éléments radioactifs tout au long des étapes de la chaîne du

combustible nucléaire, afin qu'ils ne puissent entraîner aucune conséquence ni sur l'être humain, ni sur l'environnement. Les précautions sont particulièrement nécessaires lorsque le combustible nucléaire est déchargé du réacteur, à cause de la présence d'éléments hautement radioactifs, même s'ils sont produits en faible quantité.

La matière première uranium

L'uranium est un élément chimique dit « lourd », c'est-à-dire que son noyau est gros. Il est relativement abondant dans la croûte terrestre, autant que l'étain^(b). On le trouve partout. Certains gisements sont très riches et offrent des teneurs dépassant les 20%, à l'instar de Cigar Lake au Canada. L'uranium est obtenu dans les mines (fig. 2) en utilisant des techniques d'extraction comparables à celles d'autres métaux, à la différence notable d'une présence de radioactivité due à l'exhalation



1. Image de la dimension d'une pastille d'oxyde d'uranium enrichi pour la fabrication du combustible nucléaire d'un réacteur à eau pressurisée. Pour une même quantité d'énergie produite, l'énergie nucléaire utilise 100 000 fois moins de matière que les combustibles fossiles : pétrole, gaz ou charbon.



2. Pâte jaune ("yellowcake") obtenue en sortie de mine, après concentration du minerai d'uranium.

du radon dans l'air. La part actuelle du nucléaire dans l'électricité et plus généralement dans l'énergie mondiale étant limitée, l'uranium ne pose pas encore actuellement de problème significatif d'approvisionnement^(c). La quantité d'uranium extraite du sol terrestre, typiquement soixante mille tonnes par an, est faible comparativement aux autres minerais ou ressources énergétiques qui se chiffrent habituellement en milliards de tonnes.

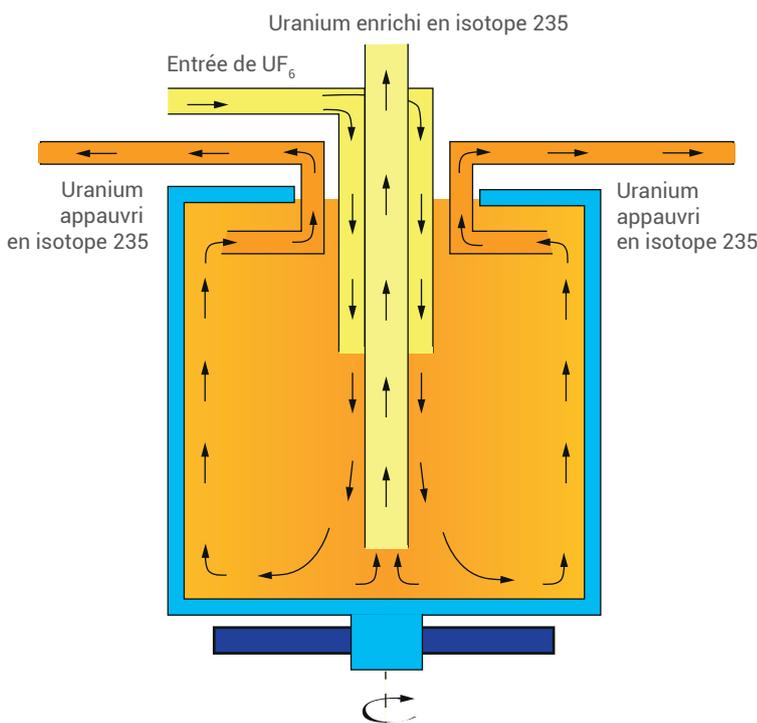
En théorie, on pourrait extraire du français la totalité du minerai nécessaire pour alimenter annuellement les réacteurs en France^(d). On pourrait même l'extraire de l'eau de mer, les limitations pratiques étant le coût économique et énergétique que cela représente. Dans les mines en activité actuellement dans le monde, l'uranium est peu cher (moins de 100 € le kg), ce qui pèse pour moins de 3% dans le coût du MWh nucléaire^(e). Ainsi,

contrairement aux combustibles fossiles, ce qui définit l'indépendance énergétique n'est pas l'accès à la matière première : c'est plutôt l'accès aux technologies spécifiques (réacteurs et usines du parc) qui permettent son exploitation.

**L'amont du réacteur
(conversion, enrichissement,
fabrication du combustible)**

L'uranium naturel se compose de trois isotopes : l'uranium 234, ultra-minoritaire, l'uranium 235, présent naturellement à 0,7%, et l'uranium 238, très majoritaire^(f). Cependant, seul l'isotope ²³⁵U est fissile, c'est-à-dire qu'il peut se scinder en deux parties suite à l'absorption par le noyau atomique d'un neutron en libérant de l'énergie. C'est d'ailleurs le seul atome fissile existant sur notre planète ; bien que radioactif, son existence a perduré depuis la formation de la Terre grâce à sa longue demi-vie de 700 millions d'années^(g). On dit que l'uranium est « enrichi » quand on augmente sa teneur en atomes fissiles. Il faut atteindre 4% d'atomes fissiles dans le combustible pour pouvoir maintenir la réaction en chaîne dans le cœur d'un réacteur à eau légère.

Pour ce faire, l'uranium doit être d'abord transformé en hexafluorure d'uranium (UF₆), composé qui possède l'avantage de devenir facilement gazeux : il passe directement de l'état solide à l'état gazeux dès que sa température dépasse 56,4 °C. Cette étape de conversion par fluoration de l'uranium s'effectue dans les usines



3. Schéma d'une centrifugeuse pour l'enrichissement de l'uranium.



4. Assemblage de combustible nucléaire d'un réacteur à eau pressurisée comprenant une barre de contrôle. Les grilles assurent le maintien mécanique des 264 crayons combustibles en place.

>>>

Comurhex sur les sites de Malvesi (Aude) puis du Tricastin (Drôme).

Une fois l'uranium mis sous forme gazeuse d'hexafluorure, on peut procéder à l'étape de l'enrichissement par ultracentrifugation^(h). Ce procédé utilise l'action de la force centrifuge agissant sur un gaz contenu dans un récipient tournant à grande vitesse autour d'un axe (fig. 3). L'intensité de la force centrifuge étant proportionnelle à la masse des corps, les atomes d'uranium 238, légèrement plus lourds, sont projetés vers la périphérie. Le gaz au centre du récipient s'enrichit alors en isotope uranium 235, tandis que le gaz près de la paroi est appauvri. Un prélèvement du gaz au centre du récipient fournit un coefficient d'enrichissement suffisant pour qu'une dizaine de centrifugeuses mises en cascade permettent d'atteindre les 4% souhaités⁽ⁱ⁾. Compte tenu des pertes, il faut typiquement 8 kg d'uranium naturel pour obtenir 1 kg d'uranium enrichi.

Une fois enrichi, le gaz est retransformé en poudre solide d'oxyde d'uranium dans un four rotatif avec de la vapeur d'eau à environ 800 °C (pyrohydrolyse). La poudre est ensuite compactée, concassée puis compressée pour prendre la forme géométrique d'une pastille cylindrique pleine d'environ 1 cm de diamètre pour 1,3 cm de hauteur (fig. 1). Un frittage^(j) sous hydrogène à 1 750 °C achève la fabrication en garantissant la porosité nécessaire. Ces pastilles sont ensuite insérées les unes au-dessus des autres dans un long tube, une gaine en alliage de zirconium de 4 mètres de long, scellé à ses extrémités, appelé « crayon combustible », qui contient environ 300 pastilles. Un assemblage comprend 264 crayons combustibles agencés en un carré de 17 par 17 (fig. 4), avec 25 emplacements libres pour guider 24 crayons absorbants assurant le contrôle de la réaction en chaîne (et un tube guide pour l'instrumentation). Le cœur d'un réacteur à eau pressurisée (REP) de 1 300 MW est composé de 193 assemblages de ce type, le réacteur pressurisé européen (EPR) en construction à Flamanville de 241 assemblages.

Le passage en réacteur

Un assemblage séjourne environ quatre années dans le cœur du réacteur, temps pendant lequel les noyaux d'uranium 235 fissionnent sous l'action d'un flux neutronique intense produit par la fission nucléaire. En effet, la fission d'un noyau d'uranium produit en moyenne trois neutrons. Ceux-ci induisent la fission d'autres noyaux, et ainsi la réaction diverge exponentiellement : c'est une réaction en chaîne.

La chaleur dégagée par les réactions nucléaires est emportée par un fluide dit « caloporteur », qui circule en circuit fermé : c'est le circuit primaire, dont le fluide devient radioactif. Pour éviter la contamination, ce liquide passe à travers un échangeur de chaleur, appelé « générateur de vapeur », qui permet de transférer la chaleur à un deuxième liquide : c'est le circuit secondaire. Selon le même principe que dans une centrale thermique classique, grâce à la différence de température entre le générateur de vapeur et la source froide (l'eau d'une rivière, ou l'air dans les tours de refroidissement), ce liquide entraîne une turbine qui produit de l'électricité. Au final, comme pour une centrale thermique, environ un tiers de

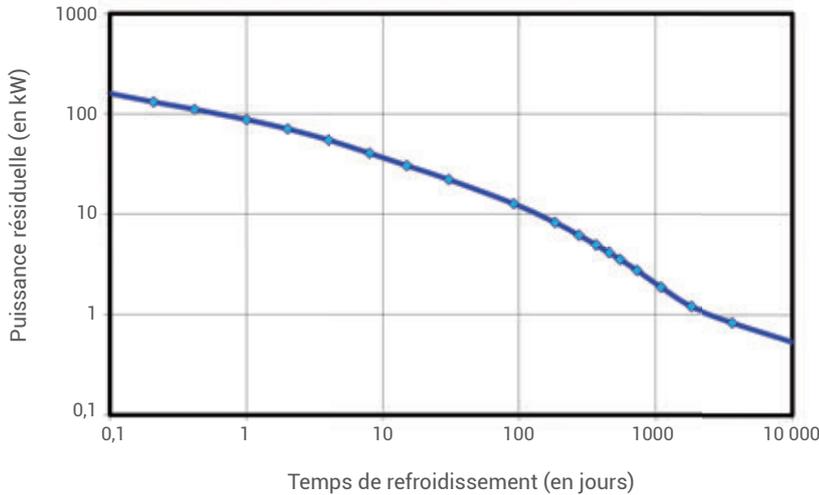
l'énergie de réaction est réellement convertie en électricité ; les deux tiers restant chauffent l'environnement.

Pour la production d'électricité, il faut contrôler la réaction en chaîne pour ne pas qu'elle diverge. Pour cela, il faut s'assurer qu'un seul des neutrons produits est en mesure de déclencher une autre fission. Le cœur du réacteur est alors dit « critique », terme à connotation positive indiquant que son régime de fonctionnement est exactement à la limite souhaitée : ni trop faible, ni trop fort, il peut continuer égal à lui-même tant qu'il subsiste du combustible.

Ce contrôle est assuré grâce à un dosage fin d'éléments absorbants neutroniques : soit du bore dans l'eau du circuit primaire ; soit du cadmium dans les barres de commande ; soit du gadolinium dans le combustible. L'ajustement mécanique des barres de contrôle sert au pilotage du réacteur afin d'atteindre la puissance souhaitée par l'opérateur, tout en s'assurant d'une bonne répartition spatiale de la puissance dans le cœur, et de l'absence d'endroits où la température locale serait trop élevée, entraînant une possible ébullition. Certaines barres restent en position haute, afin que leur chute permette un étouffement de la réaction en chaîne en cas d'arrêt d'urgence.

Au fur et à mesure du fonctionnement du réacteur, l'uranium 235 fissile disparaît progressivement. Dans le même temps, subissant une irradiation neutronique forte et continue, une faible fraction de l'uranium 238, majoritaire, se transforme par capture neutronique en plutonium 239, isotope qui possède une haute valeur énergétique puisqu'il est également fissile. Au déchargement du réacteur, le combustible utilisé ne contient plus que 0,85% d'uranium 235 alors qu'il comporte désormais plus de 1% d'atomes de plutonium.

La concentration importante de matières nucléaires dans le cœur d'un réacteur (plus de 100 tonnes de combustible) requiert une gestion du risque spécifique lors de son opération. En effet, le risque le plus couramment envisagé de la filière nucléaire est celui de l'accident majeur sur un réacteur en fonctionnement^(k). L'occurrence d'une éventuelle fusion de cœur, bien que conforme aux estimations faites lors de la conception à 10^{-4} /an/réacteur, apparaît à l'usage comme non négligeable sur les réacteurs de seconde génération : trois accidents majeurs dans



5. Décroissance avec le temps de la chaleur dégagée par les produits de fission et les actinides dans un assemblage combustible (ici un oxyde d'uranium enrichi à 4% irradié à 45 GWj/t).

le monde en 60 ans, dont deux ont causé un relâchement de radionucléides dans l'environnement. Ce qui, dans les années 1970, était considéré par les promoteurs du nucléaire civil comme un accident industriel impossible ou au mieux acceptable, ne l'est plus aujourd'hui.

L'amélioration de la sûreté se fait également par l'apprentissage. L'accident de Fukushima nous enseigne que la perte de tout système de refroidissement et celle de l'alimentation électrique externe peuvent dans certaines circonstances survenir simultanément sur une même installation. Auparavant, on se prémunissait contre l'un de ces deux événements séparément. Aujourd'hui, tous les opérateurs

dans le monde doivent envisager l'éventualité combinée de ces deux risques.

Aussi, les concepteurs du réacteur pressurisé européen (EPR) se sont-ils focalisés sur l'amélioration de la sûreté en réduisant la probabilité de fusion du cœur d'au minimum deux ordres de grandeur, au prix d'un doublement du coût de construction (passant de 1 500 €/kW à 3 500 €/kW). Si tout le parc mondial actuel était constitué de tels réacteurs, on passerait d'une probabilité d'un accident majeur tous les 20 ans à un tous les 2000 ans, voire davantage. Et si par malheur l'accident survient quand même, la radioactivité devrait rester confinée dans l'enceinte quoi qu'il arrive, pour ne pas imposer l'évacuation de la population avoisinante.

Le combustible utilisé

La fission nucléaire et l'irradiation neutronique engendrent à l'intérieur du combustible une variété d'éléments radioactifs, appelés « produits de fission », ayant des demi-vies très différentes. Aussi, lorsqu'un assemblage est déchargé du cœur d'un réacteur, il est fortement radioactif. Par conséquent, même retiré du cœur du réacteur, le combustible continue d'être chauffé par la puissance résiduelle dégagée par cette radioactivité. Cette chaleur doit être évacuée, sous peine de fusion. L'assemblage est déposé dans une piscine remplie d'eau pour le laisser se refroidir pendant quelques années. Au bout de 2 à 3 ans, la puissance résiduelle de l'assemblage a suffisamment décro (fig. 5) pour qu'il puisse être

transporté vers l'usine de La Hague afin d'y être retraité.

Dans l'usine de retraitement, le combustible utilisé est dissous dans de l'acide nitrique. Les matières nucléaires valorisables comme l'uranium et le plutonium, qui forment l'essentiel du contenu, sont extraites de la solution, tandis que les produits de fission, considérés comme les déchets ultimes de la fission nucléaire, sont vitrifiés et conditionnés dans des colis (fig. 6).

Le retraitement d'environ 70% du combustible utilisé en France entraîne la fabrication annuelle d'environ 650 colis de haute activité (HA) comprenant des déchets vitrifiés (voir p. 21). Ces déchets vitrifiés renferment 98% de la radioactivité totale des déchets nucléaires, mais ne représentent que 0,2% de leur volume total⁽¹⁾. Les déchets de structures (coques, grilles, embouts d'assemblage) sont compactés dans des colis de conteneur similaires et répertoriés comme déchets de moyenne activité à vie longue. Ils représentent quasiment le reste de la radioactivité (2%). Tous les autres déchets sont peu radioactifs (moins de 0,03% de la radioactivité totale).

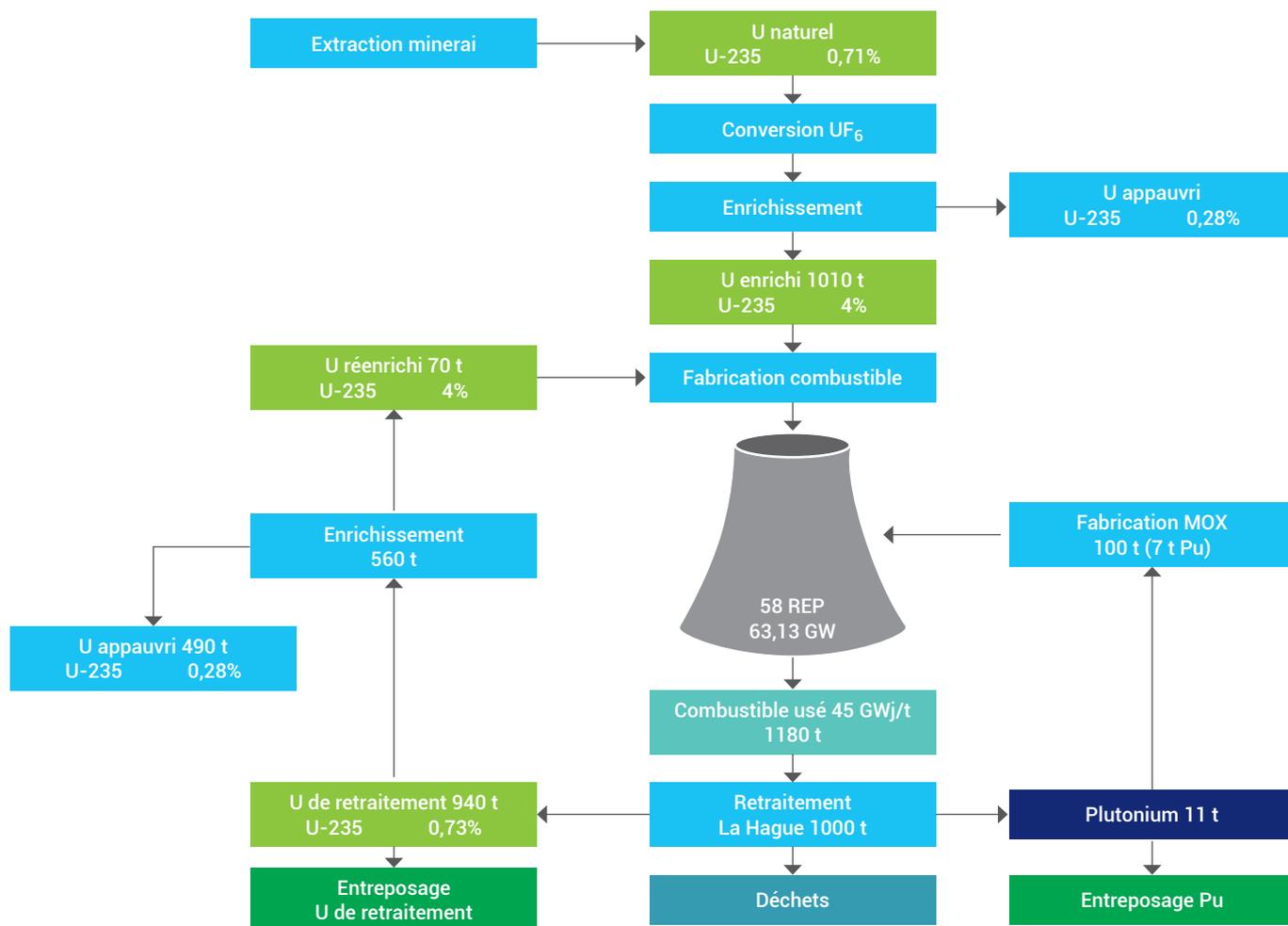
Le flux des matières nucléaires

Le parc français est composé de 58 réacteurs à eau pressurisée (REP) (voir dans ce dossier la carte p. 42), alimentés chaque année par environ 1 000 tonnes de combustible uranium enrichi à 4%. Le plutonium récupéré dans les combustibles retraités peut être utilisé comme élément fissile en lieu et place de l'uranium 235. Il est alors combiné à de l'uranium appauvri pour constituer le combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium). Depuis quelques années, la totalité des onze tonnes de plutonium produits chaque année sont ainsi intégralement recyclés sous forme de combustible MOX^(m). Quant à l'uranium récupéré à La Hague, dit uranium de retraitement (URT), qui contient encore à peu près autant d'atomes fissiles que l'uranium naturel, il peut donc être enrichi à nouveau pour fabriquer un combustible, l'uranium de retraitement réenrichi (URE), qui alimente les quatre réacteurs de Cruas, en Ardèche⁽ⁿ⁾. Le flux général des matières nucléaires est schématisé sur la figure 7.



6. Colis de déchets nucléaires. Le conteneur est en acier inox de hauteur 1,35 m et de diamètre 0,43 m. Il contient environ 400 kg de verre borosilicaté emprisonnant les déchets. Le colis pèse au total près de 500 kg.





7. Flux annuel des matières nucléaires alimentant l'ensemble du parc français, en prenant comme exemple l'année 2013. En sus des 1000 tonnes de combustible sous forme d'oxyde d'uranium (UOX), la récupération du plutonium permet de fabriquer 100 tonnes de combustibles MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) et celle de l'uranium 70 tonnes de combustible réenrichi (URE).

- a. La densité énergétique du noyau atomique est un milliard de Wh/kg. Une pastille de 7,5 g d'uranium enrichi à 4% peut fournir jusqu'à 9 MWh d'énergie thermique, l'équivalent de 5 barils de pétrole ou d'une tonne de charbon.
- b. L'uranium est présent sur Terre à 2 à 3 parties par millions (ppm), avec parfois une concentration supérieure à 1 000 ppm dans des zones granitiques ou sédimentaires. C'est 15 fois moins abondant que le cuivre, autant que l'étain (mais pour une production annuelle 5 fois plus faible), 30 fois plus que l'argent, et 600 fois plus que l'or.
- c. Pour la question du futur de l'approvisionnement, voir dans ce dossier l'article de S. Bouneau (p. 46).
- d. Jusqu'en 2001, l'uranium était encore exploité en France. Cependant, son coût de production n'est pas compétitif sur le marché mondial car les mines françaises sont à faible teneur en uranium (moins de 1%).
- e. Voir dans ce dossier l'article de A.-S. Dessillons (p. 29). Sur les 40 dernières années, le coût du kg d'uranium a fluctué entre 5 et 200 dollars ; en 2018, il est de l'ordre de 40 à 50 dollars par kg.
- f. Proportions naturelles : uranium 234 à 0,005%, uranium 235 à 0,711% et uranium 238 à 99,283%.
- g. Durée après laquelle la quantité initiale a été divisée par deux. Il faut attendre au moins une dizaine de demi-vies pour que la radioactivité diminue de façon très significative.
- h. Jusqu'en 2011, l'enrichissement était réalisé dans l'usine d'EURODIF à Pierrelatte, par diffusion gazeuse, procédé très énergivore désormais abandonné : trois des quatre réacteurs du Tricastin étaient exclusivement dédiés à l'alimentation électrique de l'usine d'enrichissement. L'ultra-centrifugation, nécessitant 40 fois moins d'énergie que la diffusion gazeuse, est aujourd'hui adoptée comme la technologie de référence.
- i. Une centrifugeuse enrichit environ 1,2 fois. Donc dix centrifugeuses en cascade enrichissent d'un facteur 1,2 à la puissance 10, c'est-à-dire 6 fois. La proportion d'uranium 235, initialement de 0,7%, passe ainsi à 6 x 0,7%, c'est-à-dire environ 4%.
- j. Chauffage de la poudre pour que les grains se soudent entre eux (sans toutefois fondre complètement), comme par exemple lors de la cuisson des poteries.
- k. L'amont du cycle, le transport de matières et celui des déchets nucléaires n'ont pour l'instant pas donné lieu à des accidents de très grande ampleur, sauf celui du complexe nucléaire Maïak près de Kychtym (U.R.S.S.) en 1957 dont on sait peu de choses.
- l. L'inventaire 2015 de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) donnait fin 2013 les volumes suivants : 3200 m³ de haute activité (HA) ; 44 000 m³ de moyenne activité à vie longue (MAVL) ; 91 000 m³ de faible activité à vie longue (FAVL) ; 880 000 m³ de faible ou moyenne activité à vie courte (FMAVC) ; 440 000 m³ de très faible activité (TFA).
- m. Auparavant, une partie du plutonium était réservée pour la fabrication du combustible de réacteurs à neutrons rapides, existants ou à venir.
- n. Les évolutions récentes concernent l'augmentation de la production de combustibles MOX (124 tonnes en 2016) et la réduction du combustible URE à 20 tonnes en 2016, compensé par une augmentation du combustible UOX à 1 070 tonnes. ■

En savoir plus
 • Présentation du "Cycle du combustible" français en 2018, Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (2018), www.hctisn.fr



Gestion des déchets radioactifs

La nécessité d'une vision politique à long terme

Jean-Yves Le Déaut, député (1986-2017), Président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (2014-2017)

La gestion à long terme des déchets radioactifs produits dans les centrales nucléaires françaises relève d'un choix politique qui a suscité de nombreuses années de débats. Le Parlement a voté, depuis la fin des années 1980, trois lois permettant de fixer une stratégie nationale.

Le Parlement a abordé la question de la gestion des déchets dès la fin des années 1980. Le gouvernement avait autorisé une campagne d'exploration pour rechercher une zone géologique propice au stockage en profondeur des déchets. La population des départements concernés (Ain, Aisne, Maine-et-Loire, Deux-Sèvres) a réagi très vivement face à cette initiative, dont elle se sentait tenue à l'écart.

Le Premier ministre de l'époque, Michel Rocard, a mis fin à la campagne d'exploration, et a laissé au Parlement le soin d'engager une concertation approfondie pour trouver une solution. C'est ainsi que le député Christian Bataille s'est trouvé investi de la tâche de rendre, en 1990, au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), un rapport sur la stratégie de gestion des déchets radioactifs.

Ce rapport a présenté un ensemble de dispositions pour remettre à plat la manière d'aborder ce dossier, qui était à l'époque dans une impasse. Ces dispositions ont formé ensuite la structure d'une première loi française sur la gestion des déchets, celle du 30 décembre 1991, qui a notamment fixé les lignes directrices de la recherche scientifique sur les déchets radioactifs^(a).

Depuis le début des années 1990, le dossier de la gestion des déchets radioactifs a été mené avec une remarquable continuité politique, aussi bien par les gouvernements successifs que par les majorités successives au Parlement, avec l'appui de l'opposition.

Ainsi, la loi de 1991 susmentionnée a-t-elle été votée à l'unanimité à l'Assemblée nationale, sous un gouvernement de gauche. Quinze ans plus tard, la première loi sur les déchets radioactifs, celle du 28 juin 2006, relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, a été votée sous un gouvernement de droite, également à l'unanimité^(b). Cette loi s'inscrit d'ailleurs dans le calendrier défini en 1991 qui prévoyait, après quinze ans, une évaluation des résultats des recherches sur les déchets radioactifs préalable à un nouveau vote au Parlement.

Dix ans plus tard, conformément aux dispositions de la loi de 2006, la loi du 25 juillet 2016 définit la réversibilité et précise les conditions de réalisation du futur stockage géologique profond à Bure-Saudron (Meuse/Haute-Marne)^(c). Elle fait suite au dépôt, à l'Assemblée nationale et au Sénat, de propositions de loi similaires, par des parlementaires de tendances politiques distinctes (Gérard Longuet, Christian Namy, Jean-Yves Le Déaut, Christian Bataille). Elle a également été votée, dans les deux chambres du Parlement, à une très large majorité, à l'exception de quelques opposants à l'industrie nucléaire.

Des candidats à l'élection présidentielle de 2017 ont proposé de stopper le projet de centre industriel de stockage géologique, et d'entreposer les déchets avant qu'une solution définitive soit trouvée. Or l'entreposage pourrait accroître les risques en termes de sûreté et de sécurité,

et retarderait la recherche d'une solution définitive. Que l'on soit pour ou contre le nucléaire, les déchets nucléaires existent et ne rien faire aujourd'hui reviendrait à laisser aux générations futures le soin de trouver une solution^(d).

En matière d'énergie, il faut que la décision politique, qui s'inscrit dans un temps bref, celui du mandat électoral, puisse prendre en compte des décisions sur un temps long, l'unité de temps dans ce domaine étant de l'ordre du demi-siècle^(e). Ainsi la future installation de stockage géologique profond est-elle prévue vers 2035, près de 50 ans après que le Parlement s'est saisi de cette question, et sa durée d'exploitation sera d'au moins 100 ans. La poursuite de cette aventure industrielle et scientifique nécessitera que les décideurs politiques réapprennent à concilier impératifs de court et de long terme. ■

a. Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, dite loi Bataille.

b. Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

c. Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue.

d. Sur la question des déchets, voir plusieurs articles dans ce dossier, en particulier celui de B. Romagnan (p. 14), et l'entretien croisé avec C. Stéphan et P. Barbey (p. 19).

e. Sur la question de la politique à l'échelle des décennies, en particulier en lien avec le réchauffement climatique, voir l'article de S. Bouneau (p. 46), et celui de N. Maïzi et F. Briens (p. 49).

Démantèlement des installations nucléaires : une faisabilité technique pas tout à fait acquise

Barbara Romagnan, députée (2012-2017)

Le choix de procéder au démantèlement des installations nucléaires après leur arrêt devrait permettre de réutiliser les espaces libérés. Cependant, la faisabilité technique des opérations de déconstruction et décontamination n'a pas encore été démontrée sur la diversité du parc français.

En savoir plus

- *Rapport sur le démantèlement des installations nucléaires de base*, Conseil supérieur de la sûreté et de l'information nucléaires (CSSIN), 16 mai 2007.
- *Faisabilité technique et financière du démantèlement des infrastructures nucléaires*, rapport de la Mission d'information parlementaire (M. Julien Aubert, président, Mme Barbara Romagnan, rapporteure), 1^{er} février 2017, www.assemblee-nationale.fr/14/rap-info/i4428.asp

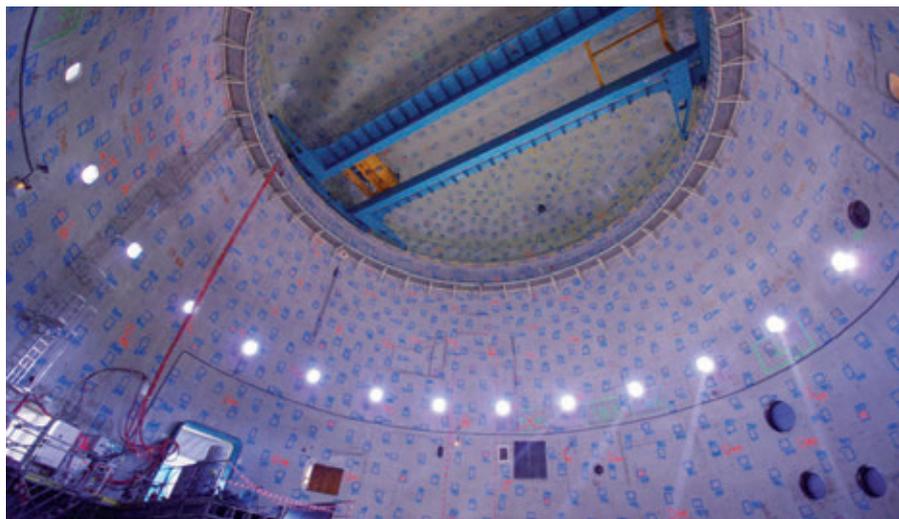
En matière de démantèlement nucléaire, la France se trouve actuellement dans une situation intermédiaire qui appelle à la plus grande vigilance compte tenu de l'ampleur des travaux qui restent à réaliser. Un démantèlement consiste en la déconstruction d'un réacteur nucléaire, la décontamination des bâtiments d'exploitation et l'assainissement des sols qui auraient pu être contaminés. En théorie et dans les cas les plus favorables, le démantèlement doit permettre la réutilisation sans contrainte des espaces libérés et entièrement décontaminés. On parle alors de « retour à l'herbe » ou de « champ vert », l'image évoquant un retour à l'état de nature. Mais la réalité est plus complexe : la décontamination totale étant particulièrement onéreuse, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) peut accepter, dans certains cas et à la demande de l'exploitant que le démantèlement n'inclue pas cette contrainte. Aux États-Unis il est même admis que certains vestiges radioactifs puissent être laissés sur place recouverts d'un sarcophage ; dans d'autres cas, les combustibles usagés peuvent être stockés sur des sites de réacteurs démantelés dans des silos étanches. Les Américains parlent alors d'une manière imagée de « champ marron », adapté à une utilisation industrielle.

La France a opté pour le principe du démantèlement immédiat des installations après leur arrêt. Mais toutes les questions ne sont pas réglées concernant l'avancée des techniques de démantèlement et du retour d'expérience. À cet égard, il convient de faire observer deux points principaux : d'une part, les retours d'expérience sont inégaux selon les parcs ; d'autre part, la gestion des déchets issus des démantèlements pose encore question.

Des retours d'expériences inégaux selon les parcs

La spécificité du parc nucléaire français réside notamment dans l'existence d'un double parc : un premier parc ancien, à l'arrêt, constitué des réacteurs de première génération, dits « uranium naturel graphite gaz » (UNGG), et un second parc, plus récent, encore en activité, formé par les réacteurs à eau pressurisée (REP). EDF affirme connaître des difficultés concernant le premier parc UNGG qui devait initialement être démantelé « sous eau », et ces complications techniques ont amené EDF à reconsidérer sa stratégie. Alors que l'eau devait servir à limiter la libération de la radioactivité lors du retrait des couches de graphite, les principaux réacteurs voient leurs délais de démantèlement très largement repoussés. Ainsi, le réacteur de Bugey dont le démantèlement a débuté en 1994 devrait n'être démoli qu'en 2037, et celui de Chinon en 2041. L'ASN a cependant appris courant 2016 la décision d'EDF de procéder à un démantèlement sous air, sans que les justifications apportées par l'opérateur lui aient semblé satisfaisantes. En conséquence, EDF souhaite expérimenter sa nouvelle technique sur un réacteur test d'ici à 2060, et démanteler les réacteurs suivants d'ici à 2100.

Concernant le parc REP, il apparaît que la faisabilité technique est davantage assurée. Pour autant, dans les faits, aucun REP n'a été démantelé à ce jour dans le monde ; les surprises – mauvaises – en ce domaine étant jusque-là la règle, il convient d'être prudents. EDF compte 58 réacteurs à eau pressurisée actuellement en fonctionnement et neuf réacteurs à l'arrêt : Brennilis, réacteur à eau lourde,



Réacteur expérimental Siloé (Grenoble), exploité de 1963 à 1997.

Les phases d'assainissement et de démantèlement ont duré de 1998 à 2011.

Superphénix fonctionnant au sodium, six réacteurs de première génération ayant fonctionné au graphite gaz, et le réacteur enterré de Chooz A, le plus ancien REP français. Sur ce parc, la difficulté tient davantage au projet d'EDF de reconstruire des réacteurs sur les sites actuellement utilisés. De ce fait, l'opérateur ne parle pas pour ces réacteurs de « démantèlement » mais de simple « déconstruction ». Autrement dit, EDF ne prévoit pas d'échéancier global et précis de leurs démantèlements. À cela s'ajoutent les difficultés ponctuelles de taille que constituent les réacteurs particuliers tels que Superphénix et Brennilis. Entré en service en 1985 et arrêté en 1996, Superphénix devrait être démantelé selon EDF à l'horizon 2028, soit plus de 30 ans après son arrêt définitif. En termes de mémoire de lieux, ce délai pose problème, de même qu'il ne respecte pas le principe du démantèlement immédiat. Brennilis, quant à lui, a été arrêté en 1985 et ne devrait pas être démantelé avant 2032 – soit 47 ans après sa mise à l'arrêt – compte tenu des difficultés rencontrées par EDF. Or ces difficultés ont un réel impact financier : la Cour des comptes estime que les coûts pourraient être multipliés par vingt, atteignant près de 482 milliards d'euros^(a). La faisabilité technique du démantèlement est donc aussi une question financière.

On observe ainsi selon les types de réacteurs des disparités dans les savoir-faire qui ne permettent pas d'estimer acquise la faisabilité technique du démantèlement. Au-delà de la question des sites se pose celle de la gestion des combustibles usagés, condition essentielle pour le bon achèvement du démantèlement.

La gestion des déchets pose encore question

Là encore, la situation ne permet pas d'affirmer que les questions techniques sont en passe d'être réglées^(b). Si les déchets issus des démantèlements représentent à l'horizon 2030 près de 60% du volume des déchets à traiter, 40% seront issus de l'exploitation des réacteurs, dans un contexte de saturation de certains centres en fonction de la catégorie de déchets à traiter. Selon leur degré de radioactivité, tous les déchets ne subissent pas le même mode de retraitement et de stockage : 60% d'entre eux présentent une très faible activité (TFA), mais le centre de stockage de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) situé dans l'Aube arrivera à saturation en 2025.

La problématique du stockage pose, plus généralement, la question de la pertinence d'instaurer un seuil de libération pour les déchets issus du nucléaire. Actuellement, tout ce qui sort d'une centrale doit être stocké dans des centres spécialisés ; or certains déchets n'ont pas été contaminés et saturent donc les centres peut-être inutilement. L'ANDRA estime à cet égard que 30 à 50 % des déchets ne présentent pas ou très peu de radioactivité. Il s'agirait donc d'une piste à étudier pour répondre au problème très prochain de la saturation de nos capacités de stockage.

L'autre motif d'inquiétude relative au stockage concerne ses modalités, et particulièrement le stockage en couches géologiques profondes. Le projet Cigéo situé à Bure dans la Meuse prévoit d'enfouir pour des centaines de milliers d'années

les déchets les plus radioactifs de l'industrie nucléaire. Au vu de leurs conséquences à long terme et du caractère irréversible en pratique de ce choix^(c), le principe même de l'enfouissement est éminemment questionnable, alors même qu'il est possible de stocker ces déchets en sous-surface et de poursuivre les recherches en parallèle pour espérer un jour pouvoir les recycler de manière satisfaisante. L'exemple d'une ancienne mine de sel en Basse-Saxe a montré les limites du stockage souterrain : les couloirs d'accès ne demeurent pas rectilignes à l'échelle d'une vie humaine ; comment espérer garantir la sécurité sur des milliers d'années ? Toutes ces questions peuvent faire l'objet de choix stratégiques différents, mais encore faut-il ne pas prendre de décision irréversible, car le stockage des déchets, tout comme le démantèlement des réacteurs, constitue une étape décisive pour la réussite du démantèlement des infrastructures nucléaires. Force est de constater que là aussi, les perspectives actuelles sont insatisfaisantes. ■

a. Cour des comptes, *Le coût de production de l'électricité nucléaire*, actualisation mai 2014, www.ccomptes.fr. Voir aussi dans ce dossier l'article de A.-S. Dessillons (p. 29).

b. Sur cette question, voir plusieurs articles dans ce dossier, en particulier celui de J.-Y. Le Déaut (p. 13), et l'entretien croisé avec C. Stéphane et P. Barbey (p. 19).

c. La loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 requiert en théorie une réversibilité, définie comme « la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion [...] Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés. » [NdE].

LES PROBLÉMATIQUES DU NUCLÉAIRE

VOUS AUSSI DITES
OUI
AU NUCLÉAIRE

POUR PERMETTRE LA RÉMISSION DES TUMEURS NEURO-ENDOCRINES AVANCÉES, L'INSTITUT BORDET A ÉTÉ LE 1^{er} CENTRE HOSPITALIER BELGE À PRODUIRE, EN 2012, UN NOUVEAU TRACEUR RADIOACTIF CIBLANT LES CELLULES CANCÉREUSES. POUR DE NOMBREUX PATIENTS BELGES ATTEINTS D'UN CANCER, ÇA A CHANGÉ LA DONNE.

UN TEMPS D'AVANCE SUR LE CANCER
www.amis-bordet.be

AB Les Amis
de l'Institut
Bordet est



.....

En fonctionnement non accidentel, l'impact d'une centrale nucléaire sur l'environnement est essentiellement lié aux rejets thermiques, chimiques et radioactifs, qui exposent les travailleurs du nucléaire et le public.

Entretien croisé avec Claude Stéphan et Pierre Barbey

Impact du nucléaire sur la santé et l'environnement en situation non accidentelle

page 19

.....

.....

En s'impliquant dans les mesures, les citoyens ont transformé un sujet purement technique en un sujet politique.

David Boilley

Radioactivité dans l'environnement : le rôle des associations de contrôle

page 24

.....

.....

La Cour des comptes a estimé le cout moyen de production pour la période 2011-2025 pour une durée de vie de 50 ans à 61,6 €/MWh.

Anne-Sophie Dessillons

Le cout de production de l'électricité nucléaire

page 29

.....

.....

Certains accidents peuvent nécessiter une réaction très rapide. Des rejets importants et de courte durée peuvent conduire à demander aux habitants de se mettre à l'abri dans des bâtiments.

Entretien croisé avec Jean-Christophe Gariel et Sophia Majnoni d'Intignano

Le risque d'accident nucléaire : prévention et gestion

page 22

.....

.....

Le lien étroit qui doit exister entre exploitant et sous-traitants, détérioré par les facteurs économiques, devrait être restauré.

Entretien avec Gilles Reynaud

Sous-traitance et qualité dans une centrale nucléaire

page 27

.....

En préambule aux deux entretiens croisés sur l'impact du nucléaire

François Graner, physicien, CNRS, et Stefano Matthias Panebianco, physicien, CEA
Éditeurs du dossier

L'idée que l'opinion publique se fait du nucléaire civil et l'évolution de cette appréciation au gré des incidents, plus ou moins graves, et des articles de presse, est à l'image de la variété des positions, pour la plupart contradictoires, qui traversent la communauté scientifique, les politiques et de manière générale tous les acteurs de la société. Cette polarisation des avis est une caractéristique constante du débat sur le nucléaire. Pour autant, les opposants comme les partisans du nucléaire proposent des arguments qui méritent d'être présentés, analysés de façon critique, et évalués.

Comme pour toute activité humaine technologique de grande échelle, complexe et diversifiée, l'évaluation de l'impact environnemental du nucléaire civil doit prendre en compte toutes les phases concernées par les nombreux procédés industriels qui caractérisent la filière. Les risques envisageables sont de nature très différente, sur des territoires variés, d'autant que malgré les dispositions prises lors de la conception et de l'exploitation des installations, un accident, qu'il soit lié à un évènement naturel, une faute humaine ou une malveillance, ne peut pas être exclu. Dans le cas du nucléaire, les différents aspects liés à la production d'énergie vont des conditions d'extraction minière du combustible jusqu'au devenir des combustibles usés, avec des spécificités qui sont au centre des débats sur cette technologie : possibilités d'irradiation, de contamination, de pollution chimique ou d'explosion.

Dans cet état d'esprit, nous avons voulu interroger des scientifiques partisans et opposés au nucléaire civil sur l'impact environnemental et sanitaire de la filière nucléaire civile, en situation non accidentelle^(a). Pour cela, nous avons sollicité Claude Stéphan, physicien nucléaire qui a beaucoup écrit sur la filière nucléaire civile et qui en est plutôt un partisan, et Pierre Barbey, biologiste de l'Université de Caen, directeur des Installations de Mise en Oeuvre et de Gestion des Radioéléments (IMOGERE), qui a pris des positions critiques sur les émissions des centrales. Dans le même état d'esprit, nous avons sollicité Jean-Christophe Gariel de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et la juriste Sophia Majnoni d'Intignano, anciennement très active au sein de Greenpeace, pour commenter la prévention et la gestion d'un éventuel accident^(b).

Dans chacun des deux cas, les auteurs sollicités ont développé des arguments importants et complémentaires. Nous vous en proposons une sélection certes arbitraire, la plus synthétique possible. Les deux articles qui vont suivre n'engagent que notre responsabilité et non celles des personnes interrogées. Ils constituent un exemple du débat qui traverse le milieu scientifique et la société toute entière, débat où les domaines considérés sont aussi variés que la physique et l'ingénierie nucléaire, l'économie, la santé, et qui va jusqu'à des considérations sociologiques et morales.

Pour illustrer plus en détail ce large éventail de sujets, ces deux entretiens croisés sont suivis d'autres textes plus spécialisés traitant du rôle des associations et de la sous-traitance dans le milieu du nucléaire, ainsi que des coûts d'exploitation de la filière. ■

a. Voir page 19
l'entretien croisé
avec C. Stéphan
et P. Barbey.

b. Voir page 22
l'entretien croisé
avec J.-C. Gariel et
S. Majnoni d'Intignano.

Impact du nucléaire sur la santé et l'environnement en situation non accidentelle

Entretien croisé^(a) avec **Claude Stéphan**, physicien, CNRS, et **Pierre Barbey**, biologiste, Université de Caen



Quel est l'impact du fonctionnement d'une centrale nucléaire sur l'environnement, les terres et les populations avoisinantes ? Quelles sont les phases industrielles de la filière, de l'extraction du minerai à l'exploitation des centrales, qui comportent les effets sensibles les plus controversés ?

Deux chercheurs répondent à nos questions en exprimant des points de vue opposés.

De l'extraction du minerai au réacteur

Lorsqu'on pense à l'impact sur l'environnement de l'exploitation de la filière nucléaire civile, on pense tout de suite au réacteur, ses rejets et à son éventuelle dangerosité sur les populations voisines. Cependant, il est important de considérer aussi la question en amont et de se pencher sur la vie du combustible nucléaire avant qu'il ne soit inséré dans un réacteur. En effet, bien que quelques milliers de tonnes^(b) d'uranium naturel suffisent pour alimenter tous les réacteurs du parc français pendant un an, les procédures d'extraction du minerai comportent des contraintes et ce n'est pas sans conséquence sur l'environnement et les populations.

Le premier impact est de nature radiologique : en effet, l'uranium est légèrement radioactif et la décroissance de sa radioactivité conduit entre autres à la formation de radon, un gaz radioactif présent en quantité dans les mines : une mine d'uranium a dix à cent fois la radioactivité

naturelle^(c). Le principe de l'extraction de l'uranium reposant sur une action mécanique (concassage et broyage) suivie d'un traitement chimique, toutes ces substances radioactives sont également libérées de la texture minérale qui les confinait et deviennent facilement mobilisables avec le passage de l'eau.

L'extraction de l'uranium sur le territoire français, commencée en 1949 et essentiellement terminée dans les années 1990, a vu l'exploitation d'environ 250 sites, répartis dans 27 départements, qui ont amené à la production de 76 000 tonnes d'uranium. Si la totalité de l'uranium utilisé pour la consommation française est aujourd'hui importée (principalement du Niger, du Canada, d'Australie et du Kazakhstan), il n'en a pas toujours été ainsi et l'impact n'en est pas pour autant amoindri. D'une part, le choix d'importer la matière première de pays étrangers ne fait que déplacer hors du territoire français l'impact de l'industrie minière. D'autre part, même dans les mines françaises aujourd'hui fermées, il subsiste quelques activités de contrôle^(d).

Claude Stéphan reconnaît que les conditions du développement des premières mines et les pratiques d'exploitation à l'époque ont alimenté l'opinion défavorable sur l'extraction d'uranium. La perception du public est largement fondée sur les impacts sanitaires et environnementaux découlant de pratiques appliquées à une époque révolue où il n'y avait pas vraiment de réglementation. Effectivement, dans les débuts, les travailleurs étaient exposés à des niveaux de rayonnement aujourd'hui considérés comme dangereux, pouvant provoquer, en particulier, des cancers du poumon.

C'est principalement, après la fermeture de la plupart des sites miniers français, la mobilisation d'associations relative à des situations de pollution radioactive ou de gestion des déchets miniers et des terrils qui ont conduit les pouvoirs publics à réagir. D'une part, en engageant un important travail d'expertise pluraliste entre 2006 et 2010 et en instituant localement des « Comités de suivi des anciens sites miniers », mais aussi en renforçant l'encadrement réglementaire concernant la gestion de ces anciens sites.

>>>



Les conditions de gestion d'un site d'extraction sont aujourd'hui réglementées, avec l'introduction d'un régime d'inspections et de contrôles réglementaires et administratifs effectués sous l'autorité des préfets par les Directions Régionales de l'Environnement. Ce dispositif permet de réduire la possibilité que des objectifs politiques ou économiques influencent les décisions réglementaires. On est donc passé d'une planification pratiquement inexistante à des procédés de traitement des effluents à plusieurs étapes et des systèmes de gestion conçus spécialement pour la filière.

Si l'impact radiologique semble donc aujourd'hui plutôt maîtrisé dans les anciens sites miniers français, aujourd'hui fermés, Pierre Barbey rappelle que l'impact sur l'environnement est également de nature chimique. À commencer par l'uranium lui-même qui, s'il est certes un élément radioactif, est tout d'abord un élément chimique très toxique. C'est d'ailleurs sur la base de sa toxicité chimique que l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a fixé une limite en concentration en uranium de 15 µg/l pour les eaux potables. Il faut noter cependant que l'établissement de limites et recommandations basées sur la toxicité n'est pas une affaire facile. Une des difficultés de cet exercice, s'agissant des anciens sites de mines d'uranium, est que les substances toxiques extraites ou produites sont d'origine naturelle et que l'action anthropique s'ajoute à un bruit de fond naturel, lui-même fluctuant. Pour apprécier l'impact dosimétrique et aider à la fixation de limites, l'OMS a choisi d'estimer les transferts des polluants toxiques dans l'environnement et de prendre en compte l'ensemble des voies d'atteinte de l'homme selon des scénarios d'exposition s'appuyant sur des modes de vie.

Un dernier élément important à souligner quant à l'impact environnemental des sites miniers est que leur réhabilitation après le démantèlement des installations est une activité industrielle à part entière mais complexe. L'État français a confié à Areva (désormais Orano) la gestion et la surveillance des anciens sites miniers français, y compris ceux qu'il n'a pas exploités. Le réaménagement des sites vise en priorité à limiter l'impact résiduel des activités passées : sécuriser les installations pour le public, assurer la surveillance

radiologique et environnementale, assurer le traitement des eaux pour les sites qui le nécessitent. Une centaine de spécialistes sont ainsi mobilisés chaque année pour réaliser près de 7 000 analyses environnementales, géologiques, radiologiques et sanitaires.

Après l'extraction de l'uranium, vient la problématique de son transport. Les difficultés principales liées au transport de substances radioactives sont le risque d'inhalation ou d'ingestion de particules radioactives, le risque d'irradiation externe, et la contamination de l'environnement. Environ 10% des colis nucléaires transportés en France sont en lien avec l'industrie électronucléaire et cela représente environ 19 000 transports annuels, pour 114 000 colis^(e). Les déplacements des marchandises dangereuses par transport routier, ferroviaire ou maritime sont réglementés par les autorités nationales. Le colis doit apporter par lui-même une protection suffisante pour éviter les conséquences d'un accident sur la population et l'environnement. La substance radioactive est enfermée dans des futs en acier étanches chargés dans des conteneurs certifiés par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) avec le marquage et la signalisation appropriée. Par conséquent, en situation non accidentelle, le transport des matières nucléaires ne semble pas présenter un impact spécifique sur l'environnement et les populations.

Du réacteur jusqu'aux déchets

En fonctionnement non accidentel, l'impact d'une centrale nucléaire sur l'environnement est essentiellement lié aux rejets thermiques, chimiques et radioactifs qui exposent les travailleurs du nucléaire et le public. Les rejets industriels liés à la filière nucléaire ne sont pas très différents de ceux produits par toute autre centrale thermique. Pour autant, l'après-Tchernobyl a vu la création, sous la pression de l'opinion publique, d'instances de contrôle indépendantes, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), dans le but de gérer l'ensemble des risques nucléaires (électronucléaire, médecine, etc.). L'ASN participe à l'élaboration de règles relatives à l'énergie nucléaire, et surveille leur bonne exécution, alors que l'IRSN coordonne

des recherches en liaison avec la sûreté nucléaire et garde mémoire des retours d'expérience effectués dans les centrales. Avec l'exploitant, ces deux institutions participent ainsi aux visites décennales destinées à évaluer si une centrale peut ou non continuer à être exploitée, à effectuer des contrôles et à confirmer le niveau de sûreté de l'installation. Enfin, l'ASN définit les limites réglementaires concernant tous les rejets qu'une centrale nucléaire est autorisée à émettre en exploitation.

En particulier, l'exploitation des centrales nucléaires entraîne notamment une production d'eaux et de gaz usés et de chaleur. En France, il existe des limites réglementaires pour éviter un réchauffement local trop important de la source froide (fleuve, rivière, mer) car l'eau prélevée est restituée à une température légèrement supérieure à sa température de prélèvement. En conséquence, la production doit être diminuée ou suspendue si l'eau restituée est trop chaude par rapport au débit de la source froide (effet de dilution).

Pour ce qui est des rejets radioactifs, Claude Stéphan rappelle qu'au cours des vingt dernières années, le parc nucléaire d'EDF a divisé par un facteur supérieur à 100 l'activité de ses rejets radioactifs hors gaz rares, tritium et carbone 14. Dans ce dernier cas, l'émission dans l'environnement de cet isotope est extrêmement faible et, comme en outre elle se fait essentiellement sous une forme (le méthane) qui n'est pas assimilable par les végétaux, elle ne constitue qu'environ 1% du bruit de fond moyen mesuré. L'impact épidémiologique sur les populations vivant à proximité des centrales nucléaires françaises est considéré comme non significatif. Cependant, de nombreuses associations de riverains surveillent avec attention et inquiétude l'évolution des niveaux de radioactivité dans les sols et les eaux des nappes phréatiques^(f).

La dose annuelle d'irradiation maximale autorisée pour les travailleurs du nucléaire est de 20 millisievert^(g), soit un peu plus de quatre fois la dose d'irradiation naturelle. Dans les faits, le niveau de radiation subi est bien inférieur et le nombre de dépassements de ce seuil se réduit chaque année. Cette dose d'irradiation est-elle dangereuse ? La question reste ouverte.

Les études disponibles ne décèlent aucun effet pour des doses inférieures à 100 millisievert, soit qu'il n'en existe pas, soit que la puissance statistique des enquêtes ait été insuffisante pour les détecter^(h). Le public au voisinage immédiat d'une centrale nucléaire en reçoit dix mille fois moins, soit 0,002 millisievert par an, ce qui est négligeable par rapport à ce qu'elle reçoit par la radioactivité naturelle (notamment celle du radon) et suite aux examens radiologiques.

Le cas du plutonium, et plus généralement de l'option de retraitement de combustibles usés issus de la filière d'EDF mais aussi de clients étrangers, est plus controversé. Pierre Barbey souligne que, comparativement aux autres activités de la filière, le retraitement est une étape particulièrement polluante. Les travaux d'inventaire menés dans la seconde moitié des années 1990 par un groupe d'experts pluraliste, le Groupe Radioécologie Nord-Cotentin (GRNC), ont conduit à identifier 73 éléments radioactifs (hors éléments de courte demi-vie) issus des opérations de retraitement, soit le double des radioéléments déclarés par l'opérateur à cette époque. Le site de La Hague dispose actuellement d'autorisations de rejets de polluants radioactifs et chimiques dans l'environnement délivrées par l'ASN en tant qu'autorité compétente. Mises en service en 1966, les installations de retraitement de La Hague ont engendré des rejets qui n'ont cessé de croître, du fait de la montée en activité, jusqu'au milieu des années 1980. C'est à ce moment que l'exploitant a mis en place une nouvelle gestion des effluents et, depuis, une baisse progressive de ces rejets est observée. Pour autant, ce nouveau système ne concerne pas certains radioéléments non retenus (tritium, gaz rares...) qui continuent à progresser corrélativement au tonnage retraité. À noter que, contrairement aux centrales nucléaires, le carbone 14 est ici principalement rejeté sous forme de CO₂, assimilable par les végétaux, et qu'il est le principal contributeur à la dose reçue par les populations.

La fin de vie du combustible usé, et donc la gestion des déchets produits, est aujourd'hui un sujet qui n'a pas de solution simple⁽ⁱ⁾. Claude Stéphan rappelle d'abord que les fragments de fission représentent presque toute la radioactivité produite et l'immense majorité

d'entre eux a une demi-vie qui n'excède pas 30 ans. Ce type de déchets est entreposé au Centre de Stockage de l'Aube (CSA), dont est chargée l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), dans des fûts métalliques contenus à leur tour dans des surconteneurs en béton. La radioactivité de ces matières, dites de faible et moyenne activité à vie courte, sera réduite d'un facteur 1 000 après environ 300 ans, et leur entreposage en surface est considéré aujourd'hui comme une solution limitant sensiblement l'impact sur l'environnement.

En revanche, le reste du combustible usé, qui constitue les déchets ultimes (autres produits de fission, et actinides mineurs tels que l'americium, le neptunium, ...), de moyenne ou haute activité à vie longue, pose des défis technologiques plus importants. Ces déchets sont aujourd'hui vitrifiés, c'est-à-dire mélangés à une matrice de verre, matière connue pour sa bonne tenue à la chaleur et aux radiations, et entreposés en attente d'une décision sur le stockage de long terme. La solution aujourd'hui à l'étude en France prévoit le stockage en couche profonde, de l'ordre de 500 m, dans le centre industriel de stockage géologique (CIGEO), objet d'un débat actuel, qui requiert une stabilité géologique et sismique à l'échelle des dizaines de milliers d'années.

Pierre Barbey fait observer que cette filière d'élimination des déchets, comme d'autres, n'existe aujourd'hui qu'à l'état de projet. Actuellement il n'existe que deux centres de stockage de surface : outre celui de l'Aube, le premier centre de stockage historique est celui de la Manche (CSM), objet de nombreuses polémiques, du fait de sa situation en zone marécageuse et régulièrement inondable ; le confinement de sa radioactivité est critiqué par des associations^(j), et il est en phase de fermeture. Le Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage (CIRES), également dans l'Aube et géré par l'ANDRA, est dédié aux déchets de très faible activité.

En résumé, l'impact des mines d'uranium en France semble largement diminué par l'arrêt de leur exploitation, sans supprimer le besoin d'un contrôle constant de la pollution qui en a résulté, tout en déplaçant les impacts dans les

pays actuellement producteurs. Le transport des matières fissiles semble sous contrôle. Les rejets par les centrales en activité sont considérés comme non significatifs. La pollution liée au retraitement des combustibles est en diminution mais reste mesurable. Quant au stockage des déchets radioactifs de moyenne ou haute activité à vie longue, c'est un problème d'importance majeure qui est encore débattu. ■

a. Voir dans ce dossier, le préambule aux entretiens croisés, par F. Graner et S. M. Panebianco (p. 18).

b. À titre de comparaison, cette masse équivaut à seulement quelques pourcents du chargement d'un seul superpétrolier.

c. L'uranium 238 lui-même est présent depuis la formation de la Terre et sa demi-vie est de l'ordre de 4,5 milliards d'années, l'uranium 235 de 700 millions d'années, ce qui veut dire que leur activité naturelle est faible. Certains descendants sont de courte demi-vie : les principaux radioéléments problématiques pour l'homme et l'environnement sont le radium 226, le polonium 210 et le plomb 210. À titre de comparaison, l'ordre de grandeur de la radioactivité naturelle est de 100 Bq/kg pour des roches basaltiques ou sédimentaires, 1 000 Bq/kg pour des roches granitiques. La radioactivité des roches résiduelles (dites « stériles ») de mines d'uranium est typiquement de 10 000 Bq/kg, celle des résidus de traitement des minerais d'uranium est de 500 000 Bq/kg, ce qui étonnamment est comparable aux résidus des centrales électriques à lignite en service en Allemagne ou en Pologne. Les minerais d'uranium eux-mêmes ont une activité typique de 1 000 000 Bq/kg.

d. Une mine n'étant pas considérée comme une installation nucléaire de base (INB), elle n'est pas soumise à une procédure de démantèlement.

e. Les autres colis nucléaires sont essentiellement des sources nucléaires à usage industriel, comme la stérilisation des aliments (60%), ou à usage médical (30%). Au total, ces colis nucléaires représentent quelques pourcents de l'ensemble des colis de matières dangereuses. Source : ASN.

f. Voir dans ce dossier l'article de D. Boilley (p. 24).

g. Sievert : unité évaluant l'impact des rayonnements sur l'humain.

h. De très petites doses peuvent certes endommager un brin d'ADN, mais pas les deux, et dans ce cas la cellule peut le réparer correctement. Une dose plus forte a statistiquement plus de probabilité de couper les deux brins, elle a donc des effets bien plus importants.

i. Sur la question des déchets, voir plusieurs articles dans ce dossier, en particulier ceux de J.-Y. Le Déaut (p. 13) et de B. Romagnan (p. 14).

j. Voir les critiques portées par le réseau « Sortir du nucléaire », l'ACRO ou Greenpeace : par exemple le rapport ACRO de 2006 révisé en 2009, www.acro.eu.org/Archives/CSM_GP09.pdf

Le risque d'accident nucléaire : prévention et gestion

Entretien croisé^(a) avec **Jean-Christophe Gariel**, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, et **Sophia Majnoni d'Intignano**, juriste, ancienne chargée de mission nucléaire à Greenpeace France

Estimer le risque d'un accident nucléaire, et s'y préparer, comporte de grandes difficultés et des hypothèses qui sont rarement consensuelles. Quant à la gestion d'un éventuel accident, l'Histoire a montré que les décisions et choix opérationnels dépendent de la structure politique et sociale des territoires concernés. Regards croisés de deux experts du domaine.

Avant la catastrophe de Tchernobyl, l'évaluation de la gravité des accidents nucléaires était laissée à l'appréciation de l'exploitant. Après Tchernobyl, une échelle internationale des événements nucléaires, appelée INES, a été créée pour définir et classer les incidents et accidents nucléaires. L'accident concerne les réacteurs, les piscines de combustibles, ainsi que les centres de stockage de déchets (comme celui de Maïak à Kychtym, en Russie, également centre de production de plutonium, et siège en 1957 d'un important accident peu connu du grand public).

Les principaux risques identifiés sur les installations nucléaires civiles françaises sont liés notamment aux piscines de la Hague, très remplies ; au vieillissement des équipements de production ; et au risque d'attentat sur un point de la chaîne. En outre, pour les transports (rendus plus nombreux par le choix du retraitement), la France a fait le choix du camion : cela permet à EDF de traiter entièrement le transport en interne, avec donc un meilleur contrôle de sécurité de toute la chaîne, mais les risques d'accident de camion sont plus élevés que ceux du train.

La prise en compte des risques

Les risques rares et importants sont délicats à évaluer, et ils sont également difficiles à prendre en compte lors des prises de décision, tant pour les experts que pour l'opinion publique. De plus, dans le cas du nucléaire, les effets des

radiations à faible dose ne sont pas visibles à l'œil nu ni directement inclus dans notre intuition quotidienne. Enfin, le débat sur le risque est entaché par le manque de consensus sur l'effet de l'exposition à des faibles doses de radioactivité, et le lien par exemple avec les maladies professionnelles des travailleurs du nucléaire. Cela concerne toute la chaîne, y compris hors accident, pour les étapes en amont telle que l'extraction minière, ou autour des centres de stockage.

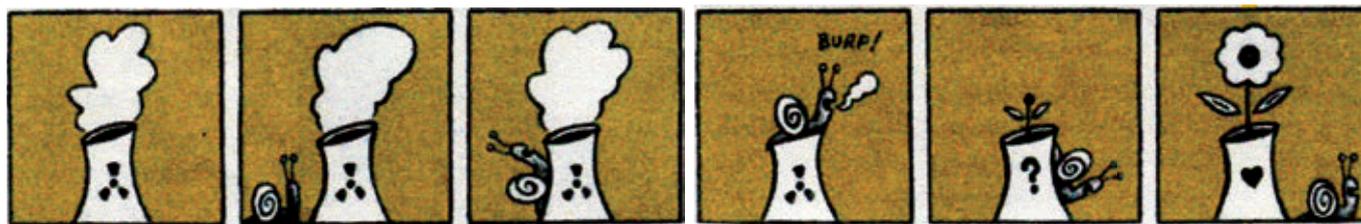
Les décisions politiques et la préparation aux accidents nécessitent de prendre en compte correctement le risque. Or l'approche probabiliste, développée pour les événements répétitifs et assurables, est moins consensuelle quand elle s'applique aux risques extrêmes et rares ; elle suscite depuis longtemps un désaccord profond entre les militants antinucléaires et les autorités de contrôle. L'exemple par excellence est le risque de chute d'avion. En outre, un accident niveau 7 de l'échelle INES au milieu d'un désert pourrait être plus acceptable politiquement et socialement, mais pas écologiquement, qu'un accident niveau 6 à la centrale d'Indian Point à moins de 40 kilomètres de la ville de New York. Un système international d'assurance du risque a été mis en place ; il oblige chaque réacteur à être assuré à hauteur de 750 millions d'euros et les États à prendre la relève jusqu'à 1,5 milliard. C'est à comparer au coût d'une catastrophe du type de celle de Fukushima, estimé par la Cour des comptes à plusieurs centaines de milliards d'euros^(b).

La prévention des risques

La prévention des risques fait débat sur plusieurs points. Ainsi, l'accident de Fukushima a montré que les dispositifs de confinement, bien que redondants, pouvaient être mis en défaut. Le choix de stocker sous terre des déchets de haute activité à demi-vie de plusieurs milliers d'années soulève de difficiles questions d'anticipation, en particulier des risques sismiques ou politiques. Sophia Majnoni d'Intignano souligne que cela pose des problèmes moraux vis-à-vis des générations futures ; vaut-il mieux éviter de signaler le centre de stockage, voire miser délibérément sur l'oubli, ou bien tenter de leur communiquer (comment ?) son existence et les dangers associés^(c) ?

Il est nécessaire de maintenir des travailleurs compétents, et ceci sur des décennies ou même plus (cela vaut aussi bien pour la maintenance et le démantèlement, que pour la préparation à un éventuel accident). Or, les différents éléments de l'industrie nucléaire sont imbriqués ; toute décision, même partielle, peut avoir des répercussions à long terme sur l'ensemble. Par exemple, même s'il y a d'importants désaccords sur la date, il faudra bien un jour fermer les 15 réacteurs anciens, de 900 MW. Comme ce sont les seuls qui utilisent le combustible « Mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium » (MOX), leur fermeture aura un impact sur l'usine Melox de Marcoule qui le fabrique et sur l'usine de retraitement de La Hague qui en fournit le plutonium ; et plus généralement sur leur industrie, leurs 5 000 emplois, et le savoir-faire de la filière.

Pour Sophia Majnoni d'Intignano, la solution réside peut-être dans l'approche des Allemands, dont le comité d'éthique intègre une projection dans le long terme : on peut donner une valeur morale, intellectuelle ou sociétale au fait de gérer le passif du nucléaire, au bénéfice des



générations futures. C'est une manière, alternative ou complémentaire au développement de nouveaux programmes nucléaires, de garder à long terme une dynamique positive et d'attirer les personnes compétentes, pour la décontamination et le démantèlement (qui nécessiteront aussi des capacités de financement et des réserves d'énergie).

La préparation à un éventuel accident

Des dispositions sont préparées aux niveaux local, national, voire international pour être mises en œuvre en vue de faire face aux situations d'accident. Au Japon le risque et sa gestion sont des sujets très importants, notamment en raison de la fréquence des tremblements de terre, et les écoliers y sont tous sensibilisés ; après Fukushima, la cohésion sociale du Japon a permis une évacuation de la zone contaminée qui ne se serait peut-être pas aussi bien déroulée dans un autre groupe social.

Pour limiter la panique en cas d'accident, il est important de former les collectivités (pour le transport des habitants, l'hébergement temporaire ou l'information), les pompiers, les pharmacies, etc. Jean-Christophe Gariel souligne que les dispositions de protection des personnes du public visent à limiter leur exposition radiologique à un niveau aussi faible que raisonnablement possible. La prise d'iode stable est utile en cas de rejet contenant de l'iode radioactif (ce qui peut être le cas pour un accident de réacteur nucléaire par exemple). Elle vise, par une saturation précoce de la glande thyroïde, à limiter la fixation d'iode radioactif dans cette glande. En France, actuellement, ce sont les personnes habitant à moins de 15 km d'un réacteur nucléaire (zone dite « périmètre particulier d'intervention ») qui sont spécifiquement informées sur le risque nucléaire, qui participent à un exercice nucléaire et qui peuvent trouver

dans leur pharmacie des comprimés d'iodure de potassium. Il pourrait être utile d'étendre ces zones, sachant que 75% des Français de métropole habitent à moins de 75 km d'un réacteur nucléaire ; pour eux, la distribution d'iode est réalisable à partir des stocks départementaux.

Certains accidents peuvent nécessiter une réaction très rapide. Des rejets importants et de courte durée peuvent conduire à demander aux habitants de se mettre à l'abri dans des bâtiments ; Jean-Christophe Gariel rappelle que cela réduit à la fois l'irradiation externe et le risque d'inhaler un air contaminé. Ce type de mesure peut être envisagé pendant une douzaine d'heures ; voire pendant plusieurs jours si elle a été préparée dans de bonnes conditions, mais l'air risque alors d'être aussi contaminé à l'intérieur des bâtiments. On peut cependant s'interroger sur le degré d'obéissance des personnes concernées : par exemple, qui accepterait de laisser ses enfants confinés à l'école ?

Les actions de protection à prendre en urgence sont définies à l'avance et dépendent de la situation. La décision de prise d'iode stable est diffusée par les médias, en précisant quand et comment la prendre, quelles sont les personnes concernées et celles qui sont prioritaires (enfants et femmes enceintes en particulier). En parallèle, des actions de sécurité publique (par exemple une restriction de circulation sur les voies publiques) et de maintien de l'ordre sont mises en œuvre. Le préfet peut décider de restreindre la consommation de certaines denrées ou certaines activités particulières. Enfin, l'évacuation de la zone peut être décidée, auquel cas les pouvoirs publics devront prendre en charge les personnes non autonomes.

a. Voir dans ce dossier le préambule aux entretiens croisés, par F. Graner et S. M. Panebianco (p. 18).

b. Voir dans ce dossier l'article d'A.-S. Dessillons (p. 29).

c. Olivier Le Naire, « Enfouissement des déchets nucléaires : comment alerter nos descendants ? », *l'express.fr*, 8 novembre 2014, www.l'express.fr/actualite/sciences/enfouissement-des-dechets-nucleaires-comment-alerter-nos-descendants_1619017.html

La phase postaccidentelle

Dans la phase postaccidentelle, les questions touchant à la qualité de l'environnement, à la santé des populations, à la continuité de la vie sociale et économique ainsi qu'aux relations internationales sont des sujets majeurs. Ils concernent cette fois le niveau national, et la prise de décision peut associer étroitement les différentes parties prenantes, en premier lieu les habitants des zones touchées. Comment définir la taille des périmètres restreints, voire complètement interdits ? Vaut-il mieux laisser une population vivre au contact de doses de radioactivité supérieures aux normes (et jusqu'où), ou bien fermer la zone en dispersant les familles et en arrêtant toute activité ?

Le débat sur l'effet des faibles doses d'irradiation a alors des conséquences pratiques de grande ampleur. Il y a des territoires faiblement contaminés qu'on souhaite habiter pour des raisons sociales, humaines, économiques. Or au-dessous d'une certaine dose, on ne sait pas évaluer des effets statistiques significatifs, et ce n'est pas non plus fiable d'extrapoler aux faibles doses ce que l'on sait sur les effets des doses moyennes et fortes. Si on renonce à définir un seuil, le principe qui guide l'action politique revient à minimiser, quoi qu'il arrive, la dose de radioactivité que l'on permet d'ajouter à la dose ambiante, en agissant sur les comportements (alimentation, horaires) et en favorisant les mesures de radioactivité par les habitants concernés eux-mêmes. Le politique doit arbitrer les différentes mesures en pesant tous les risques et impacts : environnemental, social et économique. ■

Radioactivité dans l'environnement

Le rôle des associations de contrôle

David Boilley, physicien, président de l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO)

Depuis la catastrophe de Tchernobyl, l'opinion publique s'est mobilisée pour demander plus de transparence dans l'établissement de l'impact des accidents nucléaires sur les populations et l'environnement. Dans ce cadre, plusieurs associations participent au contrôle de l'exploitation des centrales nucléaires, en particulier par des mesures de radioactivité, aussi bien en France qu'à l'étranger.

Tchernobyl et l'émergence de la mesure associative

L'accès aux résultats de mesure de la radioactivité dans l'environnement a longtemps été réservé aux seuls spécialistes. Suite à la catastrophe de Tchernobyl en 1986, qui a entraîné une contamination de toute l'Europe à des niveaux divers, les Européens ont découvert qu'ils pouvaient tous être potentiellement exposés à des rejets radioactifs. En France, les autorités ont déclenché une grave crise de confiance en niant l'impact sur le territoire national.

En réponse, des scientifiques et des profanes se sont regroupés pour créer des laboratoires associatifs, afin de contrôler la radioactivité par eux-mêmes. Ainsi sont nés l'Umweltinstitut à Munich [1], la Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité (CRIIRad) à Valence [2] et l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO) à Caen [3]. Au début, il leur a fallu démontrer aux autorités que les mesures effectuées par les associations sont de même qualité que les mesures institutionnelles. Pour cela, ils ont dû mettre en place un système d'assurance qualité et se soumettre à des essais inter-laboratoires. Ce n'est qu'en 1997 que les deux laboratoires associatifs français ont été agréés. Leurs capacités de mesure se sont aussi étendues et incluent les analyses par spectrométrie gamma, la mesure du tritium dans l'eau, ainsi que celle du radon dans les bâtiments. Le

Umweltinstitut, quant à lui, s'intéresse en plus aux OGM et aux champs électromagnétiques. Le présent article se focalise sur l'ACRO, dont l'auteur est président [4].

Les rejets

À la fin des années 1990, les travaux du Groupe Radioécologie Nord-Cotentin (développé sous l'égide de l'ASN et géré par l'IRSN, et auquel l'ACRO participe) ont marqué une étape importante dans la reconnaissance de la surveillance citoyenne de la radioactivité dans l'environnement. Pour la première fois, une cinquantaine d'experts de tous horizons ont travaillé ensemble pour tenter de répondre aux inquiétudes suscitées par une étude épidémiologique qui avait mis en évidence une augmentation du nombre de leucémies chez les jeunes dans un rayon de 10 km autour de l'usine de retraitement de La Hague. Les mesures associatives (dont celles de l'ACRO) ne représentaient qu'une faible part des résultats compilés, mais concernaient des échantillons ou des lieux peu, voire jamais étudiés par ailleurs. Les experts associatifs y ont acquis de nouvelles compétences en radioécologie, modélisation... qui dépassaient la simple mesure de la radioactivité.

En s'impliquant dans les mesures, les citoyens ont transformé un sujet purement technique en un sujet politique. Ils ont ainsi contribué à plus de transparence et à une meilleure surveillance de l'impact des rejets. Depuis 2010, le Réseau

National de Mesure [5] (mis en place par les ministères chargés de la santé et de l'environnement) collecte et met à la disposition de tous les résultats des mesures réglementaires de radioactivité dans l'environnement, ainsi que ceux d'autres acteurs, dont l'ACRO. Cette évolution s'inscrit dans un cadre plus général de démocratisation des choix ayant un impact sur l'environnement, facilitée par l'émergence d'Internet et marquée par deux textes emblématiques qui sont la Convention d'Aarhus (1998) [6] et la charte de l'environnement adossée à la constitution française en 2005. La consultation du public sur des sujets techniques est d'autant plus pertinente que des experts peuvent apporter une analyse pointue. À ce titre, l'ACRO participe à plusieurs groupes de travail institutionnels : cela lui permet de mieux connaître les dossiers et de faire remonter les préoccupations citoyennes.

Toutes les installations nucléaires, y compris les centres de stockage, engendrent des rejets radioactifs dans l'environnement à des niveaux divers. Les incidents ou accidents peuvent entraîner des rejets beaucoup plus importants. Globalement, ce sont les essais nucléaires atmosphériques des années 1950-1960 qui ont été à l'origine des rejets radioactifs les plus élevés de l'histoire. On trouve encore dans l'environnement de nombreux radioéléments artificiels résultant de ces essais, tels le césium 137, le strontium 90, les isotopes du plutonium...



Prélèvement d'algues réalisé par l'ACRO.

En fonctionnement normal, parmi les installations françaises, c'est l'usine de retraitement d'Orano (ex-Areva) à La Hague qui a les rejets dans l'environnement les plus élevés. Pour certains radioéléments, comme le krypton 85 (un gaz rare) ou le tritium, la séparation et le stockage sont complexes. Pour d'autres, comme l'iode 129, qui a une demi-vie de 16 millions d'années, c'est un choix de gestion de ce déchet que de le rejeter en mer. On peut le détecter dans les algues tout le long du littoral de La Manche et de la Mer du Nord à des niveaux, par kilogramme d'algue sèche, de quelques becquerels^(a), jusqu'à quelques dizaines de becquerels près de l'émissaire de l'usine de La Hague. Pour le tritium, on mesure une dizaine de becquerels par litre d'eau de mer.

Fukushima et les préleveurs volontaires

En 30 ans, les associations ont du s'adapter pour rester pertinentes. L'ACRO effectue une surveillance de la radioactivité dans l'environnement grâce à un réseau de préleveurs volontaires, dans le but de répondre aux questions des personnes concernées. Cette action vise à compléter la surveillance officielle de l'environnement.

En 2011, quand le « nuage radioactif » est arrivé de Fukushima et a suscité une forte inquiétude, l'ACRO a lancé une cartographie des retombées sur tout le

territoire national, basée sur des prélèvements de végétaux. Elle a permis de confirmer que l'impact de l'accident était très faible, mais néanmoins détectable. Cette démarche était complémentaire de celle de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), basée sur un réseau de balises performantes et sur la modélisation.

Plus récemment, en 2016, à l'occasion des 30 ans de la catastrophe de Tchernobyl [7] (30 ans est une durée symbolique car c'est la demi-vie du césium 137), les cartographies de la pollution rémanente ont été à nouveau complétées : l'ACRO a privilégié une démarche ascendante en laissant l'initiative aux préleveurs sur les choix des échantillons et des lieux de prélèvement, et en nouant des partenariats avec des associations locales comme les sociétés de cueillette de champignons. L'IRSN est allé étudier les zones où les dépôts étaient les plus élevés.

Les mesures effectuées par l'ACRO ont montré que l'ensemble des échantillons de sol présente une contamination par le césium 137, due à la fois aux retombées des essais nucléaires atmosphériques et à la catastrophe de Tchernobyl, à des niveaux très variables. Par kilogramme de sol sec, cela va de quelques becquerels jusqu'à 68 000 becquerels au col de Restefond dans les Alpes françaises. En ce qui concerne les denrées alimentaires, ce

sont, sans surprise, les champignons qui restent le plus contaminés, à des niveaux très variables allant jusqu'à 4 000 becquerels par kilogramme pour des pieds de mouton prélevés au Luxembourg. Bien évidemment, en Ukraine et en Biélorussie, ou à proximité de la centrale de Fukushima, les niveaux de contamination sont bien plus élevés et justifient le maintien d'ordre d'exclusion.

Le Japon, suite à la catastrophe de la centrale de Fukushima, a vu l'émergence de la mesure citoyenne [8]. Localement, ce sont les habitants qui ont tracé les cartes de la contamination avec, parfois, l'aide des autorités locales. Ils ont trouvé rapidement des points chauds qui avaient échappé à la surveillance officielle. Des centaines de stations de mesure ont été créées par les producteurs, les vendeurs et les consommateurs pour contrôler l'alimentation. La multiplication des contrôles fait qu'il n'y a plus de scandale et que la contamination interne des habitants *via* l'alimentation est très faible, voire indétectable. Cette situation est très différente de celle qui prévaut dans les territoires contaminés par la catastrophe de Tchernobyl, où la contamination interne (alimentaire) est le principal contributeur à la dose reçue.

L'ACRO a soutenu la création au Japon d'un laboratoire à son image, Chikurin-sha [9], en lui fournissant deux chaînes de mesure par spectrométrie gamma et en formant les scientifiques.





Cela a été rendu possible grâce à une souscription et un soutien de la région Ile-de-France. Ce laboratoire s'est rapidement mis en réseau avec une trentaine de stations de mesure équipées d'un matériel moins performant mais plus simple d'utilisation, qui est pertinent en situation postaccidentelle (voir encadré). Ensemble, ils ont développé un système d'intercomparaison et une base de données en ligne [10].

De la crise de la mesure aux mesures de crise

Disposer d'un laboratoire qualifié et reconnu, associé à un réseau de préleveurs formés, est essentiel pour exercer un rôle de vigie et réagir vite en cas d'incident. Le cas le plus emblématique date de 2001, suite à un incident à l'usine de retraitement de La Hague. Dès le rejet atmosphérique connu, des riverains étaient sur le terrain pour faire des prélèvements et il est apparu que le dépôt, dominé par le couple ruthénium/rhodium 106, était supérieur à la quantité émise annoncée. Un modèle de dispersion atmosphérique a permis de démontrer que l'exploitant avait sous-estimé d'un facteur 1 000 la quantité rejetée. Seule l'ACRO a découvert ce dysfonctionnement dû à un problème de détection qui existait depuis longtemps. Plus récemment, c'est une pollution au plutonium qui a été mise en évidence par l'association, à proximité de cette usine, à des niveaux suffisamment préoccupants pour que l'exploitant s'engage à reprendre les terres contaminées.

En cas d'accident nucléaire, l'impact des rejets radioactifs est d'une toute autre ampleur. Il peut justifier l'évacuation durable de plus de 100 000 personnes, comme ce fut le cas à Tchernobyl et à Fukushima. De plus, les personnes vivant en territoire contaminé doivent pouvoir contrôler la radioactivité pour adapter leur vie quotidienne. L'accès à la mesure devient donc primordial. Les laboratoires et experts indépendants peuvent compléter les autorités et fournir aux citoyens des réponses adaptées à leurs problèmes.

Les autorités françaises reconnaissent désormais l'intérêt d'une surveillance associative de la radioactivité dans l'environnement, même en temps normal. Après un éventuel accident grave, elles comptent sur la prise en charge, par la population, d'une partie de la surveillance. L'IRSN, par exemple, a soutenu la création

La mesure de la radioactivité

Les petits appareils de terrain mesurent le niveau ambiant de radiations, qui inclut la radioactivité naturelle et éventuellement une contribution artificielle. Certains ne prennent en compte que le rayonnement gamma et d'autres les rayonnements gamma et bêta. Ils sont surtout pertinents en cas d'accident grave, avec des niveaux de pollution suffisamment élevés, qui induisent une augmentation du rayonnement ambiant détectable par rapport aux variations du bruit de fond naturel. Ils ne permettent pas de détecter l'impact des rejets de routine des installations nucléaires.

Pour distinguer la radioactivité artificielle de la radioactivité naturelle dans des échantillons prélevés dans l'environnement, il faut séparer les rayonnements en fonction de leur énergie à l'aide d'un spectromètre. Les rayonnements gamma peuvent être détectés par différents types d'appareils. Les plus simples, basés sur un cristal de NaI à température ambiante, ont un pouvoir de résolution assez limité et une limite de détection d'une dizaine de becquerels par kilogramme. Ils sont pertinents après un accident nucléaire entraînant des niveaux significatifs d'un nombre limité de radioéléments rémanents. Pour obtenir les meilleures performances, on utilise généralement un cristal semi-conducteur au germanium refroidi à l'azote liquide. Ce type de détecteur, plus onéreux et complexe d'utilisation, a une résolution suffisante pour distinguer de nombreux radioéléments et une limite de détection inférieure au becquerel par kilogramme. Il est donc pertinent pour détecter l'impact des rejets en routine.

Pour les émetteurs bêta purs, comme le tritium, leur identification est plus compliquée, car l'énergie de l'électron n'est pas unique. Il faut donc faire une séparation chimique préalable afin de pouvoir distinguer les polluants éventuels.

d'un réseau qui consiste en un déploiement de compteurs Geiger couplés à des smartphones, avec une application et une cartographie dynamique pour recueillir, partager et valoriser les données.

Si les autorités japonaises peinent encore à reconnaître l'importance de ces dispositifs de mesure citoyenne, il est indéniable qu'ils ont contribué à un meilleur diagnostic de l'impact des rejets. Accéder aux données permet aux personnes concernées d'avoir une réponse partielle à leurs questions, mais cela ne suffit pas. Il manque au Japon, par exemple, une stratégie de compilation et d'analyse afin d'en extraire des informations supplémentaires.

La mesure citoyenne de la radioactivité a encore de longs jours devant elle et devrait être étendue à d'autres types de polluants. La publication du rapport Houllier [11] sur les sciences et recherches participatives en France a montré l'intérêt et la richesse de cette démarche. Si, pour ce qui concerne la radioactivité dans l'environnement, les associations ont forcé l'ouverture de l'expertise, il y a encore des progrès à faire pour rendre les recherches plus participatives dans ce domaine. ■

Références

1. www.umweltinstitut.org/english.html
2. www.criirad.org/
3. <http://acro.eu.org/>
4. D. Boilley et M. Josset, « La surveillance de l'environnement exercée par une association : l'observatoire citoyen de la radioactivité dans l'environnement », *Contrôle*, **188** (2010) 79.
5. Réseau National de Mesures de la Radioactivité de l'environnement : www.mesure-radioactivite.fr/
6. Convention sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement, adoptée à Aarhus le 25 juin 1998 : www.unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43f.pdf
7. Campagne « Tchernobyl, 30 ans après ? » : <http://tchernobyl30.eu.org/>
8. Suivi de la catastrophe de Fukushima : <http://fukushima.eu.org>
9. <http://chikurin.org>
10. <http://en.minnanods.net/>
11. www.sciences-participatives.com/Rapport

a. Becquerel : nombre de désintégrations radioactives par seconde dans une certaine quantité de matière.

Sous-traitance et qualité dans une centrale nucléaire

Entretien avec Gilles Reynaud, président et de l'association « Ma zone contrôlée »



Comme dans la plupart des activités industrielles, l'industrie nucléaire a recours à la sous-traitance pour assurer l'exploitation de sa filière. Cependant, le rôle des salariés non statutaires a beaucoup évolué et comporte des spécificités qui peuvent avoir un impact sur la sûreté d'une centrale. Entretien avec un sous-traitant.

Quelle est l'importance de la sous-traitance dans les centrales nucléaires ?

Les grandes entreprises du secteur nucléaire (les « donneurs d'ordre ») font réaliser des tâches similaires soit par leurs propres salariés statutaires, soit par des salariés d'autres entreprises (les « sous-traitants »). À leur tour, celles-ci peuvent sous-traiter à des entreprises encore plus petites (sous-traitance « en cascade »). Les 160 000 salariés des entreprises sous-traitantes jouent ainsi un rôle invisible mais capital dans la production d'électricité, exécutant 80% des activités dans différents domaines : assainissement, maintenance, logistique, radioprotection, traitement de déchets, démantèlement.

Comment évolue le domaine ?

Le vieillissement des installations nous préoccupe ; la situation économique des grands donneurs d'ordres aussi, car cela conditionne directement la durée d'attribution des marchés aux entreprises extérieures. Cette durée se situe actuellement entre 1 et 6 ans, ce qui selon nous est trop court pour des recrutements stables : cela encourage un recours massif et savamment organisé à la sous-traitance.

Notre travail réel est proche du secteur de la métallurgie ou du bâtiment-travaux publics ; or on nous applique de plus en plus la convention collective dite « Syntec » du secteur bureau d'étude-ingénierie ; elle est inappropriée, mais 30% moins onéreuse pour l'exploitant^(a). De même, les salariés réalisant des opérations d'assainissement se voient appliquer la convention collective du nettoyage, moins coûteuse. Ainsi, le recours aux entreprises socialement moins-disantes vise souvent à contourner les avantages sociaux des salariés statutaires des grands donneurs d'ordre.

Non seulement c'est illicite (cela s'appelle du « prêt de main d'œuvre »), mais en outre nous percevons le contrecoup direct sur le terrain de ce choix purement économique. Les salariés, renouvelés rapidement, sont démotivés et la qualité finale du travail réalisé nous semble baisser.

>>>



Comment la sous-traitance et la qualité sont-elles liées ?

Tout d'abord, nous mettons en avant le fait que, depuis plusieurs années, les donneurs d'ordre ne surveillent pas assez l'organisation de leurs sous-traitants. Ensuite, à force de sous-traiter et de ne pas avoir suffisamment anticipé les départs à la retraite de plusieurs cœurs de métiers clés, l'exploitant perd peu à peu, mais irrémédiablement, la maîtrise de l'outil de production. Enfin, en fonction des sites où nous intervenons, des formations ou recyclages spécifiques sont dispensés aux futurs intervenants ; ainsi, auparavant, des questions essentielles portant sur la radioprotection, la sûreté, la sécurité, la qualité, étaient éliminatoires : pourquoi sont-elles désormais supprimées ?

Un comité a fait un très gros travail^(b) pour recenser la grande variété d'incidents, les classer, analyser leurs causes (liées à l'organisation, à la technique ou à l'humain), et proposer des améliorations. Sur le plan positif, selon l'ASN, il n'y a quasiment pas de travailleurs détachés en zone contrôlée, ni de dépassement de dose. En revanche, faute d'une bonne préparation des interventions, et suite au manque de moyens humains, les règles élémentaires sont parfois bafouées. Il y a une augmentation des incidents lors d'opérations de maintenance, des contaminations internes, des sous-traitants qui atteignent la dose limite et sont ensuite envoyés dans d'autres secteurs.

Quelles leçons ont été tirées de Fukushima ?

Le retour d'expérience de l'accident a prouvé l'importance des connaissances des salariés sous-traitants d'un autre site, Fukushima daini, à 40 km de Fukushima daiichi. Ce site, également en bord de mer, avait lui aussi perdu la source d'alimentation électrique des circuits de sauvegarde. Les équipes d'intervention d'urgence de l'entreprise TEPCO étaient dans l'incapacité de réalimenter en électricité le site. Les sous-traitants, qui avaient la connaissance des installations, ont su connecter les câbles correctement.

Suite à l'accident de Fukushima, des évaluations de sûreté ont été menées sur l'ensemble du parc français. Elles ont intégré le facteur humain et la sous-traitance. Elles ont abouti en 2012 à une nouveauté, le Cahier des Charges Social qui oblige les entreprises reprenant un marché à en reprendre aussi les salariés. Malgré cette protection, l'entreprise reprenneuse n'est pas obligée de garder les acquis des salariés (ancienneté, qualification, convention collective). En pratique, les salariés se voient moins bien payés, moins couverts, moins reconnus dans leurs compétences et leurs expositions professionnelles, ce qui induit leur démotivation.

Que proposez-vous ?

Le lien étroit qui doit exister entre exploitant et sous-traitants, détérioré par les facteurs économiques, devrait être restauré. Par exemple, nous estimons nécessaire que les salariés sédentaires des entreprises sous-traitantes intègrent, sur la base du volontariat, les équipes des Plans d'Urgence Interne des divers exploitants. Ils sauront faire preuve de responsabilité professionnelle et d'engagement citoyen, y compris en faisant remonter à temps les alertes, et en se mobilisant lors d'un éventuel accident.

Nous demandons l'instauration, au niveau national, d'un statut spécifique et protecteur pour tous les salariés qui font le même travail. La prolongation éventuelle de durée de vie des centrales, les futurs démantèlements, dans cette filière en pleine réorganisation, ne pourront se faire qu'avec ces salariés enfin reconnus socialement. ■

a. [NdE] Dans une note publiée le 31 juillet 2018, EDF indique (p. 12) que selon ses calculs, le changement de convention collective représente une baisse de 12% pour les salaires les plus élevés, voire une hausse de 1,2% pour les salaires les plus bas. Dans la même note (p. 4, p. 5 et p. 14), EDF indique que le nombre de niveaux de sous-traitance est limité à 3, et que les « Événements significatifs sûreté » sont en baisse (600 par an dont 50 imputables à des sous-traitants). Source : www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/Notes%20d%27info/note_info_pompili.pdf

b. *La sous-traitance en situation de fonctionnement normal : organisation et conditions d'intervention*, Comité sur les facteurs sociaux, organisationnels et humains (COFSOH), janvier 2017.



En savoir plus

- C. Dubout, *Je suis décontamineur dans le nucléaire*, Ed. Paulo Ramand (2010).
- G. Reynaud, dans *Nucléaire et territoire*, livre blanc de l'ANCLLI, janvier 2017, p. 26.
- Voir aussi le site de l'association, www.ma-zone-controlee.com
Son objet : informer afin de favoriser l'échange entre les salariés, statutaires ou majoritairement sous-traitants, des industries à risques (nucléaire, chimique, pétrochimique) pour améliorer la sécurité des interventions et la sûreté des installations, pour le respect des générations futures et celui de l'environnement.

Le cout de production de l'électricité nucléaire

Anne-Sophie Dessillons, rapporteure de la Cour des comptes



Le cout de production d'un mégawatt-heure (MWh) d'électricité nucléaire est un paramètre essentiel dans l'évaluation de l'intérêt économique de la filière. La Cour des comptes a produit un rapport très détaillé qui a fait débat, et dont les éléments chiffrés permettent de se faire une idée plus claire sur les couts d'exploitation (hors recherche et développement) du nucléaire actuel et sur leur évolution dans le futur.

Dans le contexte actuel de craintes croissantes sur la sûreté du nucléaire (post-Fukushima, difficultés sur le chantier de Flamanville, fermetures préventives de réacteurs à l'automne 2016...) et de montée en puissance des énergies renouvelables affichant des baisses de cout importantes, le cout du nucléaire est plus que jamais au centre des débats. Il l'est d'autant plus que des incertitudes pèsent sur son évolution avec les investissements de grand carénage ou encore le financement des réacteurs de 3^e génération. La Cour des comptes a eu l'occasion de se pencher sur la question à deux reprises, en 2012 [1] puis en 2014 [2] : ses analyses guideront les propos suivants.

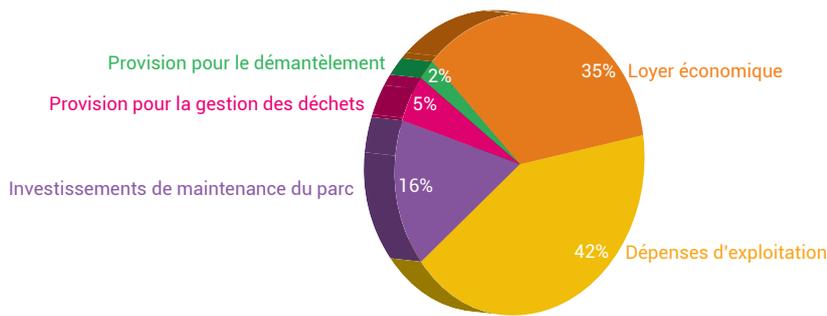
Un cout de production avoisinant les 60€/MWh, en forte augmentation

La Cour des comptes a estimé le cout de production du parc nucléaire existant à 60€/MWh en 2013 contre 50€/MWh en 2010^(a). Cette augmentation de 20% en trois ans trouve une explication dans trois facteurs.

Tout d'abord, les investissements de maintenance constituent le poste de dépenses ayant le plus augmenté : leur progression explique la moitié de la hausse du cout de production. Cette progression est due à trois facteurs :

- un rattrapage du niveau d'investissements « normaux » (21% des investissements de

»»»



1. Part des différentes contributions au coût de production de l'électricité nucléaire française.



- maintenance), la faiblesse de ces derniers au début des années 2000 ayant eu des répercussions négatives sur l'exploitation et la production ;
- la nécessité de rénovation ou de remplacement de certains gros composants dont la durée de vie est inférieure à 40 ans (29% des investissements de maintenance) : il s'agit notamment des générateurs de vapeur, des alternateurs, des condenseurs ou des éléments des tours réfrigérantes ;
 - la forte augmentation des investissements de sûreté (50% des investissements de maintenance) dans un contexte post-Fukushima et pour permettre l'allongement de la durée d'exploitation des réacteurs, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) ayant conditionné cette dernière à une amélioration de la sûreté pour les amener au niveau des objectifs de sûreté des réacteurs de 3^e génération.

Ensuite, la forte progression des dépenses d'exploitation (+31% en euros courants à périmètre constant) explique quant à elle un quart de la hausse du coût de production. Cette hausse des dépenses d'exploitation trouve une part d'explication dans la hausse des dépenses d'achats et de logistique induite par la progression des investissements de maintenance précédemment évoquée, ainsi que dans une forte évolution des effectifs, pour renouveler les compétences et accélérer le programme de maintenance.

Enfin, des changements dans les paramètres de calcul expliquent l'augmentation restante : baisse de la production annuelle, changement de taux d'actualisation^(b) pour les dépenses futures de démantèlement et de gestion des déchets, changement de taux de rémunération du capital, inflation...

Ce coût de production n'est pas directement comparable aux coûts de référence évalués dans différentes études, notamment de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), sur les

énergies renouvelables. En effet, ces derniers sont calculés pour un investisseur qui rentrerait aujourd'hui sur le marché avec de nouvelles centrales (qui auraient besoin d'être amorties financièrement, mais dont le coût de maintenance serait moindre) dont l'équivalent pour le nucléaire serait actuellement l'EPR, qui sera abordé plus loin. De la même manière, ce niveau de coût de production ne peut servir à dicter le choix entre la poursuite de l'exploitation en prolongeant la durée de vie des centrales ou leur remplacement à court terme par des centrales plus modernes, voire par d'autres sources d'énergie^(c).

Sensibilité aux coûts d'exploitation et d'investissements

Le coût de production du nucléaire tel qu'indiqué plus haut est ce qu'on appelle le « coût courant économique ». Il inclut les dépenses d'exploitation, les investissements de maintenance, les provisions pour couvrir les dépenses futures (démantèlement et gestion des déchets et du combustible usé). Il inclut aussi un loyer économique tenant compte des investissements initiaux et de leur rémunération sur la totalité de la durée de fonctionnement envisagée. Ce coût est dominé aux trois quarts par les dépenses d'exploitation et les coûts d'utilisation des actifs nucléaires (respectivement 42% et 35%, voir figure 1). Ce coût courant économique exclut en revanche la recherche et développement, ainsi que la sûreté/sécurité, financés sur fonds publics. Par ailleurs, il ne tient pas compte de l'historique du parc, et du fait que les investissements initiaux ont déjà largement été amortis. Ce coût de production diffère du coût réel actuel d'EDF qui est moindre, et qui doit être couvert par les tarifs.

Le coût de production est très sensible à l'évolution des dépenses d'exploitation et des investissements de maintenance (16%). Même si le projet industriel d'EDF repose sur l'hypothèse de « charges d'exploitation maîtrisées », les charges d'exploitation devraient progresser de 1,4%/an en euros constants d'ici à 2025. Les investissements de maintenance, quant à eux, devraient continuer à augmenter pour atteindre un niveau moyen, supérieur de 16% au niveau d'investissement pris en compte dans le coût de 2013. Ce niveau d'investissements de maintenance ne se justifie toutefois que dans une perspective de l'allongement de la durée de vie des centrales. Ainsi, si les décisions politiques rendaient impossible ou trop incertaine cette prolongation, EDF devrait réviser son projet industriel : en effet, il paraît économiquement irrationnel d'engager de très fortes rénovations de gros composants autour de 30/35 ans de durée de vie, si la durée restante de fonctionnement n'excède pas dix ans. De même, réaliser des investissements visant à élever le niveau de sûreté à celui de la 3^e génération n'aurait alors pas de sens.

En revanche, en raison de l'actualisation, les calculs sont peu sensibles aux évolutions des charges futures provisionnées. De cette manière, les incertitudes qui pèsent actuellement sur l'évaluation de ces charges n'ont en réalité qu'un impact très faible sur le coût de production, tel qu'il est calculé par la Cour. Une baisse (ou inversement une hausse) du taux d'actualisation conduit à faire évoluer le coût de production de +0,8% (ou -0,6%). Si le devis de démantèlement augmentait de 50%, le coût de production progresserait seulement de 2,5%.

L'impact de l'allongement de la durée de vie des centrales sur le coût de production

La durée de fonctionnement des centrales est une hypothèse stratégique. Si le coût courant économique, et donc celui de production tel qu'il est calculé par la Cour, n'est pas très sensible à la durée d'exploitation des installations, cette durée est déterminante dans l'appréciation de la rentabilité des actifs nucléaires.

L'effet sur les coûts de la prolongation de la durée de fonctionnement des centrales ne peut pas être mesuré à partir d'un simple calcul de sensibilité. En effet, cette

prolongation aurait plusieurs impacts sur le cout de production :

- un impact à la baisse sur le loyer économique (impact cependant limité à 2 ou 3% pour un allongement de dix ans de la durée d'exploitation) ;
- un impact à la hausse sur les investissements de maintenance nécessaires à cette prolongation ;
- un impact à la baisse sur les provisions des dépenses futures compte tenu du décalage du calendrier de démantèlement.

En tenant compte de ces différents éléments et des hypothèses de hausse des dépenses d'exploitation citées plus haut, la Cour des comptes a estimé le cout moyen de production pour la période 2011-2025 pour une durée de vie de 50 ans à 61,6 €/MWh. En cas de non prolongation de la durée de vie des centrales, il existe alors une incertitude sur le niveau d'investissements de maintenance à retenir, et les calculs du cout moyen de production sur la même période deviennent très incertains. EDF serait d'ailleurs peut-être amenée à conclure qu'il est, dans ce cas, économiquement rentable de fermer des centrales avant leurs 40 ans afin de ne pas engager de rénovations trop lourdes qui ne pourraient être amorties.

Il convient par ailleurs de noter que ce cout fait l'hypothèse que l'ensemble du parc sera prolongé au-delà de 40 ans pour une durée de 10 ans, alors qu'il est plus probable que les décisions seront plus hétérogènes (certains réacteurs fermant à 40 ans et d'autres étant prolongés jusqu'à 60 ans), compte tenu des différences de performance entre les différents réacteurs et pour répondre aux enjeux politiques de diversification du mix énergétique.

L'incertitude du cout du nouveau nucléaire

Quelle que soit leur durée de fonctionnement, les réacteurs actuels ne pourront être remplacés, à terme, que par des réacteurs de « 3^e génération », dont les conditions de sécurité sont supérieures à celles des réacteurs actuels. Les couts de production futurs à moyen/long terme de l'électricité nucléaire seront donc ceux de l'EPR, qui sont difficiles à appréhender finement aujourd'hui. L'EPR de Flamanville ne peut en effet servir de base à un calcul de cout de production moyen de l'EPR. Ce chantier, qui subit d'importants délais et surcouts,

pâtit en effet de l'effet « tête de série » et de la remise en ordre de marche de la filière qui a perdu l'habitude de construire des réacteurs sur le sol français.

Toutefois, au regard de l'importance des couts de construction par rapport à ceux des réacteurs de 2^e génération, et même si les EPR sont censés avoir des couts de fonctionnement moindres, il est probable que les couts de production seront sensiblement supérieurs à ceux du parc actuel. C'est la conclusion que l'on peut également tirer de l'accord passé en octobre 2013 entre EDF et le gouvernement britannique, avec un prix de vente de 92,5£/MWh (environ 106 €/MWh), même s'il y a de nombreuses différences entre l'EPR de Flamanville et ceux d'Hinkley Point (spécificité du site, normes britanniques, entreposage des déchets, prix du terrain...) et que le calcul du prix est sensible au choix fait pour le taux d'actualisation.

On peut également, pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de ces couts futurs, regarder les hypothèses faites notamment par l'ADEME dans l'établissement de différents scénarios de mix énergétique à l'horizon 2050 : le cout de production du nouveau nucléaire est alors estimé à 80 €/MWh.

Le cout d'un éventuel accident

Un système international d'assurance du risque s'est mis en place, obligeant chaque réacteur à être assuré à hauteur de 750 millions d'euros et les États à prendre la relève jusqu'à 1,5 milliard. De son côté, la Cour des comptes a tenté, avec prudence, d'extrapoler le retour d'expérience de Fukushima. L'ordre de grandeur retenu pour le cout total d'un accident qui surviendrait en France est estimé entre 120 et 585 milliards d'euros. Cette fourchette est largement basée sur les travaux de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) [3] qui visent à inclure tous les types de couts, même ceux que l'on ne sait pas chiffrer avec précision et indépendamment de ce qui est ou non indemnisable : depuis la réhabilitation du site et le contrôle radiologique, jusqu'aux effets sanitaires et psychologiques, en passant par la modification de la production d'électricité, ainsi que les conséquences en termes d'image sur le tourisme, l'activité agricole et les exportations.

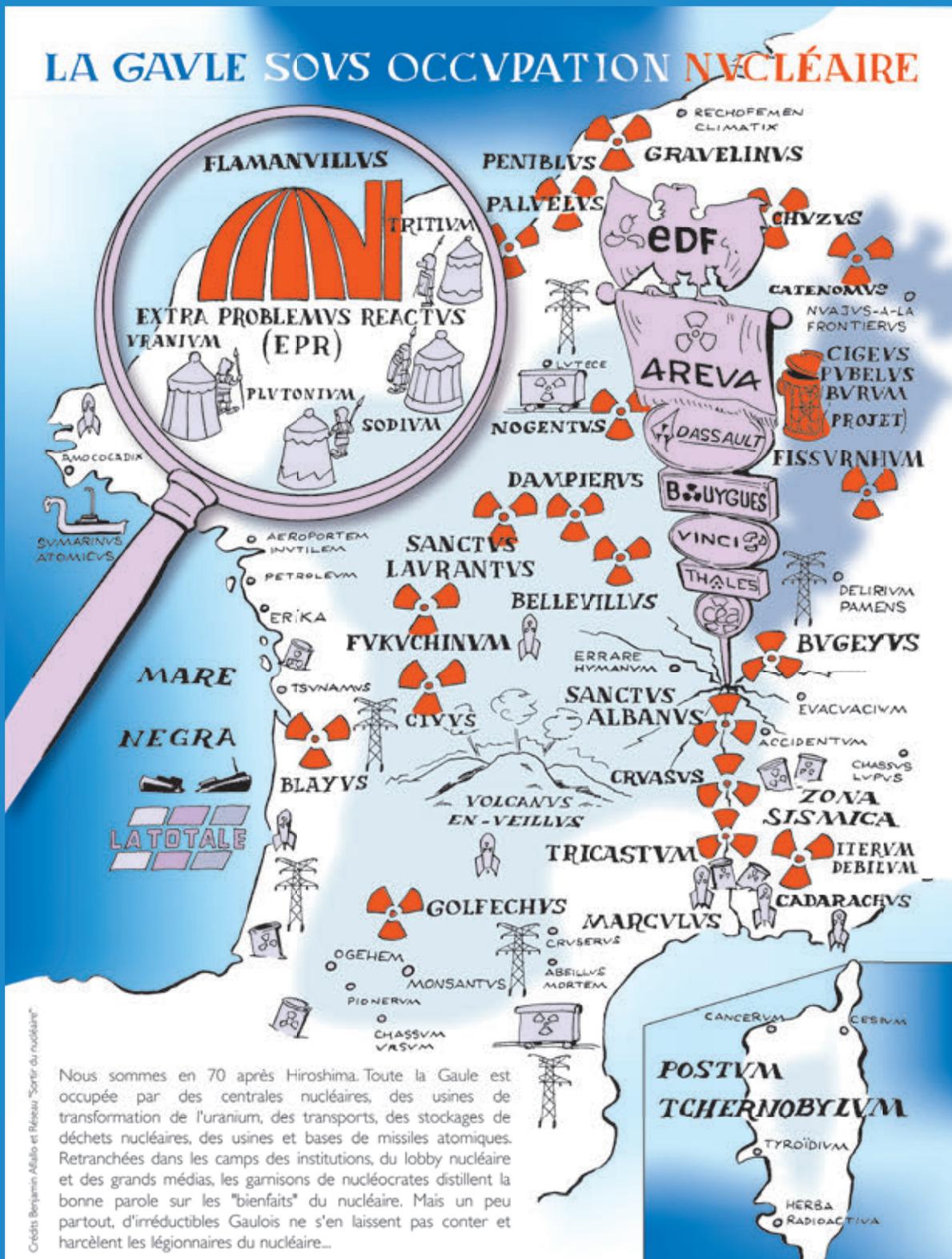
En résumé, si on essaie de tirer une idée directrice de ces calculs à paramètres multiples, les investissements lourds de rénovation ne peuvent être viables que dans la perspective d'une durée de fonctionnement suffisamment longue. Si on prolonge les centrales anciennes, il faut s'attendre à une augmentation de 40-50% du cout de production de l'électricité ; et plus ou moins du même ordre avec les centrales EPR. Si les incertitudes liées au cout du démantèlement ont peu d'impact sur le cout global, il y a des incertitudes bien plus importantes liées aux conditions financières, à la décision éventuelle de ne pas prolonger les centrales, et surtout au risque d'accident. Enfin, la Cour des comptes rappelle que le cout n'est pas le seul critère de prise de décision, et que de nombreux indicateurs pertinents pour les comparaisons ne sont simplement pas quantifiables sous forme financière. ■

Références

1. Cour des comptes, *Les coûts de la filière électronucléaire*, La Documentation française, 31 janvier 2012, www.ccomptes.fr/fr/publications/les-couts-de-la-filiere-electro-nucleaire
2. Cour des comptes, *Le coût de production de l'électricité nucléaire*, Communication à la commission d'enquête de l'Assemblée nationale, Actualisation, 27 mai 2014, www.ccomptes.fr/fr/publications/le-cout-de-production-de-lelectricite-nucleaire-actualisation-2014
3. IRSN, *Coût économique des accidents nucléaires*, avril 2013. *Estimation des coûts d'accidents nucléaires en France : Méthodologie appliquée par l'IRSN*, 14 avril 2014 www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20140414_Estimation-couts-accidents-nucleaires-France-Methodologie-IRSN.aspx

- a. Rappelons que 50 €/MWh équivaut à 5 ct/kWh, à comparer au prix public de vente de l'électricité qui se situe vers 13 à 17 ct/kWh en 2018. Et un cout similaire si on achète la même quantité d'énergie sous forme de carburant à la pompe à essence.
- b. Le taux d'actualisation est un paramètre qui permet l'aide à la décision, en comparant des couts actuels et futurs. Une plus grande importance accordée aux générations futures entraîne une augmentation des couts prévus.
- c. Voir dans ce dossier l'article de S. Huet (p. 41).

LE NUCLÉAIRE ET LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE



.....

Au contraire de l'image qui a longtemps prévalu d'un projet de dissuasion porté uniquement par de Gaulle et le gaullisme, ce sont bien les dirigeants de la 4^e République qui décident de 1950 à 1958 du développement nucléaire militaire, tout en poursuivant l'objectif énergétique.

Hervé Bercegol

Les choix techniques du nucléaire français :
le lien historique civil-militaire
page 34
.....

.....

Le système dual de financement de la recherche ne se justifie que si l'on veut développer un armement nucléaire, ce qui est un choix politique.

Jacques Bordé et Michèle Leduc

Nucléaires civil et militaire : des recherches liées
page 37
.....

.....

Les habitants énoncent deux discours distincts, tenus par deux groupes de locuteurs socialement différents : les « Déçus » et les « Entrepreneurs ».

Françoise Lafaye

Participer au débat sur le nucléaire
page 39
.....

.....

Le débat public sur l'économie ou le bilan des avantages et inconvénients du choix nucléaire pour la France est toujours grevé par une ignorance entretenue.

Sylvestre Huet

La presse et le nucléaire, couple infernal
page 41
.....

Les choix techniques du nucléaire français : le lien historique civil-militaire

Hervé Bercegol, physicien, CEA

Durant le second conflit mondial, un effort de guerre intense conduit la recherche scientifique à conquérir une nouvelle forme d'énergie, démontrée de façon radicale et cataclysmique par les bombardements nucléaires américains. L'énergie de l'atome vient au monde marquée du sceau de la géopolitique, du militaire et de la science. Le développement de l'énergie nucléaire qui s'ensuit en France n'échappera pas à ces trois déterminants : tout au long des années 1945 à 1970, le lien civil-militaire est manifeste dans les technologies de réacteurs développées par les deux grandes institutions françaises en charge de cette énergie, le CEA en premier lieu et EDF dès le milieu des années 1950.

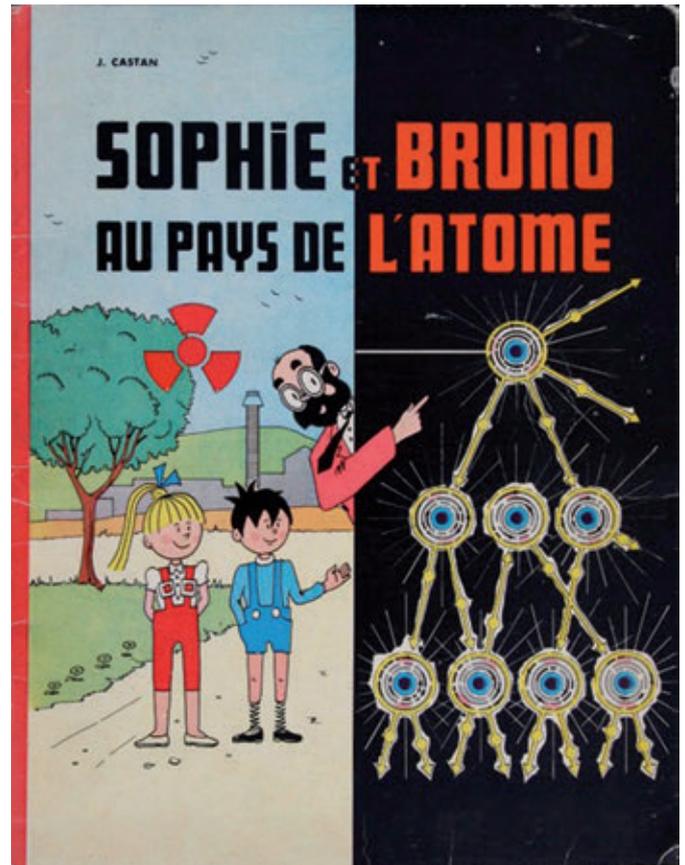
En octobre 1945, le gouvernement provisoire crée par ordonnance le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) « pour que la France puisse tenir sa place dans le domaine des recherches concernant l'énergie atomique » [1]. Deux mois avant, les États-Unis d'Amérique ont utilisé les bombes atomiques et se sont ainsi situés en position de puissance dans le camp des vainqueurs de la Seconde Guerre mondiale. Le projet *Manhattan* a mobilisé entre 1940 et 1945 jusqu'à 130 000 employés [2]. Les savants atomistes français, très actifs dans l'entre-deux-guerres et parmi les premiers à commencer en 1939 l'étude secrète d'une arme nucléaire, ont été tenus à l'écart du projet.

À la découverte de la fission, il est apparu très vite que la libération de l'énergie de liaison nucléaire dans une réaction en chaîne donne la possibilité d'une « combustion nucléaire » auto-entretenue, pour faire tourner un générateur d'électricité ou un moteur si la combustion est maîtrisée, ou pour déclencher une explosion. Pour obtenir les isotopes fissiles de l'essai *Trinity* et des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki, il a fallu concevoir et maîtriser des réacteurs nucléaires de plusieurs centaines de mégawatts et des procédés industriels de séparation isotopique ou chimique. Les connaissances acquises par les Anglo-saxons étant protégées par un secret très strict [3], il s'agit alors pour le gouvernement français de lancer des recherches scientifiques multidisciplinaires de grande envergure, dont l'ordonnance de 1945 ne précise ni la nature civile ou militaire ni la finalité^(a).

Le CEA est créé avec une structure hybride, à la fois institution scientifique et agence de réalisation technique et industrielle. Cette dualité s'exprime d'abord par une direction bicéphale, les décisions scientifiques relevant du poste de haut-commissaire à l'énergie atomique, confié à Frédéric Joliot-Curie, et l'organisation

administrative et financière à un administrateur général, Raoul Dautry, ministre de la reconstruction et de l'urbanisme dans le gouvernement provisoire. Sans que l'option militaire ne soit exclue, elle semble secondaire dans la France de la reconstruction, qui manque cruellement de capacités techniques et de ressources énergétiques. Moins bien doté en charbon que ses principaux concurrents européens, le pays peut cependant disposer des ressources d'uranium de ses colonies d'Afrique et de Madagascar, et, bientôt, des mines découvertes en métropole. La recherche nucléaire porte alors des espoirs importants en termes d'énergie, de renouveau technique et de modernité, objectifs auxquels adhèrent les principales composantes politiques du pays.

En 1949 la guerre froide se durcit, avec la formation de l'alliance OTAN et l'explosion de la première bombe atomique soviétique. Dès lors, la menace nucléaire et la nécessité d'y répondre par des armements similaires deviennent une préoccupation de tous les gouvernements occidentaux. En France, plusieurs forces politiques dont les communistes renforcent leur opposition à l'utilisation militaire de l'atome. Les communistes ou sympathisants sont progressivement écartés du programme nucléaire, à commencer par Joliot-Curie en avril 1950. Alors que Francis Perrin n'a pas encore remplacé ce dernier comme haut-commissaire, le CEA se réorganise début 1951 en concentrant les pouvoirs de décision sur le poste d'administrateur général [4]. Dautry décédé, son successeur Pierre Guillaumat construit un programme poursuivant de concert les objectifs d'énergie et de défense. En 1952, le Parlement approuve le développement des réacteurs à combustible Uranium Naturel, modérateur Graphite et caloporteur Gaz (CO₂), dits UNGG. L'UNGG est un réacteur de première génération qui a l'avantage de pouvoir fonctionner avec des



matières premières accessibles à l'époque. Il ne nécessite pas l'usage d'eau lourde^(b) dont la séparation d'avec l'eau normale est très coûteuse en énergie, ni celui de combustibles enrichis en uranium 235, isotope fissile de l'uranium, que l'on ne sait alors produire en France qu'en faible quantité. Une caractéristique cruciale des UNGG est la possibilité de leur faire produire du plutonium 239 : cet isotope intéresse aussi bien l'utilisation militaire que la perspective des réacteurs surgénérateurs, considérés à l'époque comme la voie énergétique la plus prometteuse.

À partir de 1953, le CEA construit à Marcoule les réacteurs G1, G2 et G3, ainsi qu'une usine d'extraction chimique du plutonium. Outre le plutonium, les trois réacteurs fournissent également dès le début du courant électrique en collaboration avec EDF, l'objectif du plutonium militaire restant confidentiel jusqu'en 1958^(c) [4]. Entretemps, le pouvoir exécutif prend des décisions successives en direction de l'armement nucléaire. Fin 1954, peu de temps après le rejet par l'Assemblée nationale de la Communauté Européenne de Défense, Pierre Mendès-France crée une branche défense spécifique au CEA, le Bureau d'études générales qui devient en 1958 la Direction des applications militaires, et un Comité des explosifs nucléaires.

En décembre 1954, Mendès-France demande également au CEA de développer un réacteur pour sous-marin. Le *Nautilus*, sous-marin américain, vient d'être inauguré : un peu plus tard, en 1958, il réussit la prouesse d'atteindre le Pôle Nord sous la banquise arctique. Directement inspiré de la chaudière nucléaire du *Nautilus*, le Prototype-à-terre du CEA à Cadarache est un réacteur de deuxième génération fonctionnant à eau légère pressurisée et à uranium enrichi en uranium 235. En 1957, une promesse est obtenue des Américains pour la fourniture du

combustible du Prototype-à-terre ; cette année-là, le Parlement français vote aussi les crédits pour une usine de séparation isotopique, qui est installée à Pierrelatte. L'uranium enrichi, crucial pour les armes thermonucléaires et pour la propulsion navale, est, comme le plutonium, un objectif stratégique.

Au contraire de l'image qui a longtemps prévalu d'un projet de dissuasion porté uniquement par de Gaulle et le gaullisme, ce sont bien les dirigeants de la 4^e République qui décident de 1950 à 1958 du développement nucléaire militaire^(d) [3], tout en poursuivant l'objectif énergétique [4]. Les dernières années de la 4^e République voient les projets nucléaires militaires s'intensifier, et se développer dans une démarche tripartite avec l'Allemagne fédérale et l'Italie [3]. En avril 1958, Félix Gaillard, président du Conseil, décide de l'expérimentation d'une bombe française. De Gaulle confirme la décision de fabriquer et tester la bombe ainsi que le développement des sous-marins nucléaires « lanceurs d'engins » ; stoppant la coopération nucléaire militaire programmée avec l'Italie et l'Allemagne fédérale, il poursuit une diplomatie de liens bilatéraux avec les alliés européens. Mais la France et ses voisins sont dorénavant associés dans la collaboration civile européenne *Euratom*, dont l'activité se concentre dès 1958 sur le développement et l'implantation en Europe de la technologie à eau légère et uranium enrichi appelée à l'époque réacteur à eau légère (en anglais, LWR) et actuellement réacteur à eau pressurisée (REP). Elle est directement inspirée des chaudières de sous-marins, de même que le réacteur américain de Shippingport. Ce dernier est un prototype de réacteur pour l'énergie construit par Westinghouse, inauguré par le président Eisenhower en 1954 et devenu le fer de lance de sa politique *Atoms for peace*.





Sous la 5^e République, le CEA continue le développement des UNGG à Marcoule, pour le plutonium 239 et l'énergie, ainsi que des REP et de l'enrichissement de l'uranium pour la propulsion navale^(e). EDF, associé au CEA depuis le début des années 1950, développe ses propres UNGG à Chinon puis Saint-Laurent des Eaux, et ses REP dans la collaboration européenne *Euratom* tout d'abord.

À la fin des années soixante, la France choisit pour l'énergie électrique entre ces deux technologies de réacteurs, toutes deux conçues et développées avec un objectif premier militaire, pour l'arme ou la propulsion nucléaire. Beaucoup a été dit et écrit sur la désormais fameuse « Guerre des Filières », qui fut aussi un long combat entre EDF et le CEA, ainsi qu'à l'intérieur de ces deux institutions [4,5]. La supériorité économique des REP sur les UNGG, argument principal de leur victoire à la fin 1969, a été remise en cause depuis [6]. Mais, comme la propulsion navale est probablement une application beaucoup plus exigeante que la production de plutonium, les REP bénéficient d'efforts majeurs de mise au point et d'amélioration^(f). La propulsion navale est d'ailleurs toujours une utilisation très répandue de l'énergie nucléaire : c'est en effet en mer – essentiellement dans les navires de guerre, de surface ou sous-marins – et non sur terre que l'on compte jusqu'à la fin de la guerre froide le plus grand nombre de réacteurs nucléaires [7]. Quand la crise du pétrole survient en 1973, les justifications techniques du choix de 1969 restent valides : le REP est le choix unique de réacteur du plan Messmer [5].

Ainsi, conçus et construits au moment où la France s'est dotée de l'arme nucléaire et de sous-marins nucléaires, les réacteurs français pour l'énergie sont marqués par la dualité civil-militaire. Les réacteurs de première génération ont tout d'abord été optimisés pour la production du plutonium militaire ; ceux de seconde génération ont eu pour objectif premier la propulsion navale. Cette dualité est toujours présente dans le parc actuel composé de REP proches des chaudières de la marine. ■

- a. Si ce n'est qu'il « poursuit les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale » [1].
- b. L'eau lourde D₂O est le modérateur utilisé dans la première « pile atomique » française, ZOE, qui a fonctionné de 1948 à 1976 dans le centre de Fontenay-aux-Roses du CEA.
- c. G1, refroidi à l'air, puis G2, refroidi au CO₂ sous pression et donc premier du type UNGG, sont prêts pour fournir le plutonium 239 du premier essai nucléaire français à Reggane en 1960.
- d. Certains parlent même de tabou, à droite comme à gauche, portant sur les décisions de la 4^e République concernant le nucléaire militaire [3]. Les gaullistes voudraient magnifier le rôle du Général, et la gauche non communiste cacher son rôle initiateur. Ce tabou serait préservé par la fermeture des archives gouvernementales.
- e. Pendant toute la période considérée, le CEA regroupe toutes les activités nucléaires, scientifiques ou industrielles, découlant de ses programmes. Ce n'est que dans les années 1970 que les activités du CEA sont filialisées ou séparées. De son côté EDF travaille à la conception et la construction des centrales électriques UNGG avec le CEA, et des REP avec la Franco-Américaine de Constructions Atomiques (Framatome), filiale commune entre Westinghouse, Schneider et Merlin-Gérin.
- f. Voir aussi dans ce dossier l'article de J. Bordé et M. Leduc (p. 37).



Références

1. Ordonnance n° 45-2563 du 30 octobre 1945 instituant un commissariat à l'énergie atomique, *Journal officiel de la République française. Lois et Décrets*. 31.10.1945, 256 ; 77^e année. Paris: Imprimerie nationale. Texte accessible sur internet. L'ordonnance est parfois datée du 18 octobre 1945.
2. B. C. Reed, "The Manhattan Project", *Phys. Scr.* **89** (2014) 108003 [article en accès libre] et *Atomic Bomb: The Story of the Manhattan Project*, Morgan & Claypool (2015).
3. D. Mongin, « Aux origines du programme atomique militaire français », *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, **31** (1993), www.persee.fr/doc/mat_0769-3206_1993_num_31_1_404097
D. Mongin, *La Bombe atomique française 1945-1958*, Bruylant (1997).
4. G. Hecht, *Le rayonnement de la France : Énergie nucléaire et identité nationale après la Seconde Guerre mondiale*, La Découverte (2004, rééd. 2014) ; ou la version originale *The Radiance of France: Nuclear Power and National Identity after World War II*, MIT Press (1998, rééd. 2008).
5. M. Boiteux, *Haute Tension*, Éditions Odile Jacob (1993).
6. R. Cowan, "Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in", *The Journal of Economic History* **50** (1990) 541-567.
7. Nuclear Notebook, "Nuclear Weapons at Sea", *Bulletin of the Atomic Scientists* (septembre 1990).

Nucléaires civil et militaire : des recherches liées

Jacques Bordé, physicien, retraité du CNRS, et Michèle Leduc, physicienne, CNRS



Le développement du nucléaire en France est le fruit de choix politiques qui ont établi un lien étroit entre la recherche militaire et celle sur les applications civiles.

Les conséquences de ce lien sont multiples et ont conduit les physiciens à s'interroger sur leur rôle.

Le développement du nucléaire civil et celui du nucléaire militaire en France sont intimement liés. Dès l'origine, en particulier à travers toute l'histoire du CEA, l'étude de la physique nucléaire s'est développée dans l'interaction constante entre la recherche fondamentale et les applications industrielles, civiles et militaires^(a). Encore aujourd'hui, une partie de la recherche nucléaire civile s'attaque à des problèmes fondamentaux dont la solution intéresse les militaires pour améliorer, diversifier et mieux contrôler leur arsenal nucléaire. De même, la recherche militaire sur l'armement nucléaire est considérée comme duale par les décideurs politiques, c'est-à-dire qu'elle devrait avoir des retombées pour la recherche civile, pas seulement nucléaire, et pour l'industrie en général (surtout de l'armement, mais pas seulement). À ce titre, l'État donne un budget conséquent aux militaires, justifié devant les citoyens en affirmant qu'une partie sert à la recherche civile, et tire notre industrie vers le haut avec une technologie d'excellence^(b). C'est le sens de deux rapports parlementaires récents [1, 2].

Des croisements multiples

Outre la connaissance approfondie des noyaux et des réactions nucléaires, de nombreux domaines de recherche sont communs au nucléaire militaire et au nucléaire civil. Citons par exemple la séparation isotopique, le traitement des déchets et le démantèlement des équipements, les questions de sécurité et de cyber-sécurité, la pérennisation de l'approvisionnement en combustibles, la miniaturisation des composants, la compréhension de la sismologie, etc... La médecine nucléaire a longtemps bénéficié des équipements militaires mieux dotés, notamment pour la fourniture en produits radioactifs à partir d'uranium enrichi de qualité militaire. De même, les militaires ont bénéficié de l'expertise des médecins nucléaires pour la radioprotection des soldats et la santé publique dans les zones d'essais nucléaires. Aujourd'hui il y a une justification à la coopération dans ce domaine médical, à cause de l'impact des bombes dites sales et des armes à uranium appauvri.

>>>



Il y a toujours eu des croisements de connaissances et des allers-retours d'innovation entre les applications civiles et militaires du nucléaire. Ainsi, il est probable que le quasi-doublement du budget (de 3,5 à 6 milliards d'euros par an) en discussion pour la dissuasion nucléaire, à cause du démantèlement et de la modernisation des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), aura des retombées sur la recherche et l'industrie civile. Le rapport parlementaire de 2016 [1] détaille bien la dualité industrielle dans de nombreux secteurs, par exemple pour la balistique, avec le parallèle entre le programme Ariane et le missile M51.

L'exemple du programme « Simulation »

Pour illustrer la dualité avec le monde de la recherche universitaire, prenons l'exemple du programme « Simulation ». Depuis que la France s'est engagée à ne plus provoquer d'explosions nucléaires en signant le traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICEN), elle met au point l'amélioration de ses équipements par la simulation^(c). Elle s'est dotée de calculateurs de puissance, le Tera 100, codéveloppé avec la Direction des applications militaires du CEA (DAM) en 2010, puis le Tera 1000 en 2017 et encore plus en 2023, pour tester et vérifier numériquement certaines théories qui entrent dans le fonctionnement des bombes nucléaires et des missiles. Le programme « Simulation », géré par la DAM, repose sur les données prises lors des explosions passées. Il repose aussi sur de nouvelles données prises à l'aide d'un laser de très grande puissance, le laser mégajoule (LMJ) construit récemment à Bordeaux. Celui-ci apporte sur une cible de quelques millimètres, en quelques milliardièmes de seconde, une énergie lumineuse supérieure à un million de joules, afin de mettre la matière dans un état comparable à ce qui se passe dans une bombe atomique.

De même que ses homologues américains et britanniques, respectivement le National Ignition Facility (NIF) et l'Atomic Weapons Establishment (AWE) avec son laser Orion, le centre de Bordeaux (CESTA) est ouvert à la recherche académique. Il dispose d'un laser annexe entièrement civil, PETAL, qui a coûté 54 millions d'euros, contre 3 milliards d'euros sur 15 ans pour le LMJ. Son intérêt est

d'acquérir notamment des connaissances sur l'interaction laser-matière et sur les plasmas, pour des recherches liées à l'astrophysique, comme les plasmas stellaires, ou à l'énergie civile par fusion. D'après les responsables de la coopération universitaire au NIF et à l'AWE qui ont davantage de recul qu'au LMJ, cette coopération est mutuellement avantageuse [3] : les militaires profitent de regards extérieurs et d'idées nouvelles sur leur installation et sur une petite partie de leur activité, le reste étant « secret défense » ; les universitaires peuvent utiliser, mais seulement pour environ 10% du temps, les équipements lasers du centre militaire de Bordeaux, qui viennent compléter les lasers de puissance du laboratoire de l'École polytechnique (le LULI) à Palaiseau.

Quel besoin d'une arme nucléaire ?

On peut s'interroger sur la pertinence des technologies duales pour le nucléaire. Ne serait-il pas bien plus efficace de financer directement les besoins de la recherche civile et de l'industrie dans les domaines du nucléaire (comme c'est le cas par exemple en Allemagne ou au Japon, qui n'ont pas d'armes nucléaires), sans devoir faire appel à des miettes du financement militaire ? En outre le nucléaire militaire peut s'arrêter : déjà le rapport du Sénat de 2012 sur « l'avenir des forces nucléaires françaises » [4] disait : « S'il nous fallait dessiner aujourd'hui un format d'armées partant de zéro, il est fort probable que la nécessité d'acquérir une force de frappe nucléaire [...] ne ferait pas partie de nos ambitions de défense. » Le système dual de financement de la recherche ne se justifie que si l'on veut développer un armement nucléaire, ce qui est un choix politique. Or, justement, des raisons politiques militent pour la décroissance et à terme l'arrêt des financements pour l'armement nucléaire, au vu du récent Traité d'interdiction des armes nucléaires ouvert par l'ONU à la signature des États en juillet 2017.

Certains scientifiques, dont nous faisons partie avec le mouvement mondial Pugwash [5], ne souhaitent pas que la recherche nucléaire civile contribue directement à des applications militaires. Ils pensent de plus, avec la Campagne internationale pour l'abolition des armes

nucléaires (ICAN), prix Nobel de la Paix 2017, que la dissuasion nucléaire n'est pas une solution durable pour la paix mondiale. Ils sont conscients des risques associés au développement de ces armes, accrus par le risque de prolifération, le piratage informatique, les accidents de maintenance ou de déclenchement de guerre nucléaire par méprise [6], par la production de petites bombes dites « sales » à partir de matériaux radioactifs, etc. Sans même mentionner l'immoralité et l'horreur que représenterait une guerre nucléaire, même limitée ! ■

Références

1. « Les enjeux industriels et technologiques du renouvellement des deux composantes de la dissuasion », Rapport Assemblée Nationale N°4301 (décembre 2016).
2. « La nécessaire modernisation de la dissuasion nucléaire », Rapport Sénat N°560 (mai 2017).
3. Voir des exemples de coopérations dans : « Bilan 2015 des publications et de la vie scientifique de la Direction des applications militaires », *Chocs Avancés*, 10 (juin 2016).
4. « Rapport d'information sur l'avenir des forces nucléaires françaises », Rapport Sénat N°668 (juillet 2012).
5. J. Bordé, N. Delerue, A. Suzor-Weiner, « Pugwash : les physiciens, l'arme nucléaire, la responsabilité des scientifiques », *Reflète de la Physique* 43 (2015) 51-53.
6. Sur les très nombreux accidents technologiques passés ayant impliqué des armements nucléaires et les fausses alertes qui ont failli déclencher des guerres nucléaires, voir, par exemple : J. Villain, *Le livre noir du nucléaire militaire*, Fayard (2014).

a. Voir dans ce dossier l'article de H. Bercegol (p. 34).

b. Notons que le domaine militaire pousse à développer des systèmes avec des exigences techniques supérieures mais souvent inutiles pour les besoins civils (on n'a pas les mêmes besoins pour la Formule 1 et pour la voiture de tout le monde).

c. On peut lire dans les rapports parlementaires cités en référence que « si la France dispose d'une filière de calcul à haute performance, c'est bien grâce à la dissuasion ».

Participer au débat sur le nucléaire

Françoise Lafaye, ethnologue, École Nationale des Travaux Publics de l'État

Participer au débat sur le nucléaire peut se faire de plusieurs façons : de la mobilisation à la participation à des dispositifs qui lui sont dédiés, en passant par le simple accueil d'un équipement sur son territoire. Les sciences humaines et sociales (SHS) se sont longtemps intéressées aux mouvements de contestation du nucléaire pour progressivement analyser d'autres aspects sociaux et politiques de cette manière de produire de l'électricité. Qu'ils étudient des habitants qui vont devoir intégrer cette mono-industrie particulière à leur univers quotidien ou les différents acteurs qui prennent part au débat public, les chercheurs mettent alors en exergue une multitude de conceptions du nucléaire qui poussent les premiers à agir ou à s'affronter dans l'espace public, dans le cas des seconds.

Développer une production énergétique contestée

Comme toute science et technique, le nucléaire et sa mise en œuvre en appellent à des dimensions qui dépassent celle de la simple technique. C'est de ces dimensions : du social au politique, en passant par le culturel et l'économique, que s'emparent les chercheurs en SHS. Ces chercheurs envisagent alors le nucléaire à différentes périodes de son histoire et à des échelles qui peuvent aller du global au local, intégrant des éléments de contextes nationaux ou internationaux qui supposent des politiques spécifiques à l'égard du nucléaire, mais aussi des cadres législatifs et institutionnels particuliers.

Ainsi, alors que l'Allemagne planifie l'arrêt de sa production civile d'électricité en 2022, la France en fait un fleuron de son industrie et défend cet élément fort de son rayonnement et de son identité nationale. Gabrielle Hecht [1] a montré comment la fusion des choix politique et technologique, sous les auspices du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et d'Électricité de France (EDF), a conduit à cette exception technologique française^(a). Dans cet article, nous montrerons comment différentes conceptions du nucléaire continuent de s'opposer dans l'espace public, mais s'incarnent aussi dans une multitude de discours et de manières d'agir.

En France, les représentations du nucléaire ont changé au fil du temps. Il a d'abord été considéré comme une source positive et valorisée de soins : des rayons X utilisés à la fin du XIX^e siècle dans les premiers services de radiologie au radium mobilisé pour soigner les infections cutanées. Les publicités du début du XX^e siècle vantent les bienfaits pour la santé de crèmes régénératrices au radium, d'eaux minérales radioactives ou de « sodas atomiques ».

Puis l'image du nucléaire va être ternie par son utilisation militaire : l'explosion de deux bombes atomiques au-dessus des villes d'Hiroshima et de Nagasaki, en 1945, et la crainte d'un nouveau conflit mondial qui, cette fois, détruirait l'humanité.

Progressivement il est devenu objet de polémique dans les années 1970. Les dangers liés au combustible utilisé dans les centrales nucléaires ont été dénoncés au travers de mobilisations sur les sites concernés par ce type de projets. Les opposants ont développé différents arguments : de la remise en cause d'une décision politique jugée antidémocratique (le « tout nucléaire » en 1974) à la question des déchets produits par les installations et de leur traitement. Enfin, les accidents de Tchernobyl, en 1986, et de Fukushima, en 2011, ont largement relancé les débats sur les dangers de la radioactivité et ont donné corps à la possibilité de survenue d'un accident nucléaire.

D'une mobilisation à l'autre

Parmi les mobilisations qui voient le jour dans l'après mai-68 (revendications régionalistes, féministes, autogestionnaires, etc.), le mouvement antinucléaire occupe une place spécifique. Rapidement, les chercheurs en SHS l'appréhenderont comme un « nouveau mouvement social », considérant que les conflits sociaux n'opposent plus les travailleurs à leurs patrons, mais des collectifs à des appareils. Ils y verront les prémisses d'une nouvelle pratique de la démocratie propre à la société postindustrielle ou un élément fondateur d'un mouvement écologiste, proche de l'écologie politique.

Cette opposition au nucléaire a évolué. Les formes d'actions militantes se sont transformées, passant des occupations de sites à l'utilisation des médias. À l'heure de la globalisation, les militants peinent à engager une action transnationale, en raison de leur attachement à leurs contextes politiques nationaux respectifs et de leur adhésion à des organisations plus ou moins institutionnalisées [2]. Cependant, un certain nombre de questions continuent d'être discutées, notamment celle de la gestion à long terme des déchets qui renvoie à des échelles de temps inhabituelles, un temps long qui implique les générations futures. Dans cette perspective, le site d'enfouissement des déchets à vie longue, en couche

>>>



géologique profonde, de Bure en Meuse et Haute-Marne, continue d'animer le débat, de par la contestation qu'il suscite mais aussi en raison des politiques publiques qui voient le jour dans un contexte de grande incertitude technique^(b). Le vieillissement des centrales et la fermeture de certains sites nucléaires alimentent également la polémique.

Ces mobilisations ont souvent mis en exergue un monde du nucléaire scindé en deux camps inconciliables : ceux qui sont favorables au nucléaire et ceux qui s'y opposent. Or, les acteurs concernés par cette source d'énergie sont multiples : experts des institutions et des organisations nucléaires, techniciens responsables de sa mise en œuvre ou militants, acteurs engagés, citoyens, etc. Chacun à sa manière participe de la situation du nucléaire en France.

Vivre à proximité d'une centrale

Au niveau local, l'accueil des implantations nucléaires s'est déroulé de manière contrastée selon des contextes socio-historiques spécifiques. À Plogoff^(c), les revendications et les actions portées par de nombreux habitants du village (alliés à d'autres) ont fait de ce site un symbole de la lutte antinucléaire. À Golfech, l'une des centrales les plus récentes, cette lutte s'est déroulée plus sereinement. Mais le refus ou l'acceptation d'un tel projet ne rendent pas compte de la diversité des conceptions. Les propos recueillis montrent que la mobilisation n'est pas la seule manière d'exprimer son refus, que ce refus peut se limiter au périmètre communal, que les conséquences d'une installation de ce type dépassent le simple aspect technique ou les dangers débattus, etc.

L'absence de discours sur le nucléaire et ses dangers est la seule constante présente sur les différents sites. Ce silence des populations^(d) a été interprété différemment selon les équipements considérés et les préoccupations des auteurs. Françoise Zonabend [3] a enquêté à La Hague (Manche), où se situe une usine de retraitement des déchets. Cette anthropologue s'est attachée à analyser les stratégies et tactiques langagières utilisées quotidiennement à la Hague pour mettre à distance ce qu'elle définit comme : « une menace admise et connue par tous » et voit dans ce silence une marque de déni entourant la peur du nucléaire.

On retrouve ce silence chez les habitants de Braud-et-Saint-Louis [4], village d'implantation de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde). Ils identifient cette implantation non à celle d'un équipement à la technologie sophistiquée et controversée, mais à celle d'une mono-industrie en milieu rural, causant des changements dans leur environnement familial ; le risque nucléaire est hiérarchisé parmi d'autres. Les habitants énoncent deux discours distincts, tenus par deux groupes de locuteurs socialement différents. Les « Déçus » sont des agriculteurs, sans grand avenir professionnel dans le secteur. Ils expriment leur frustration relative, considérant qu'ils n'ont pas tiré de cette implantation des avantages qui compenseraient les bouleversements survenus dans leur quotidien. Les « Entrepreneurs », eux, sont conseillers municipaux et disposent d'exploitations viables. Ils soulignent la splendeur nouvelle de la commune et mettent en avant les réalisations (piscine, salle polyvalente, courts de tennis, etc.) permises par cette implantation et la manne financière qui l'accompagne. Ces deux discours relèvent de revendications territoriales et de processus identitaires différents. Les « Déçus » revendiquent cette appartenance qui, même négativement connotée^(e), leur confère une identité (la seule dont ils disposent) et leur octroie un droit sur le territoire. Les « Entrepreneurs » tentent par tous les moyens d'échapper à l'image initialement dévalorisée de celui-ci – constitué en partie de marais généralement jugés répulsifs et insalubres –, et utilisent les nouvelles réalisations communales, dont ils sont les instigateurs, pour accéder à une reconnaissance sociale dont ils ont été privés jusque-là.

Jeux d'acteurs dans la concertation

Cette disparité dans les manières de concevoir une implantation nucléaire et la méconnaissance que nous en avons pour la plupart des sites nucléaires en France, expliquent en partie les difficultés rencontrées lorsqu'il s'agit pour les organismes qui en ont la charge (Autorité de sûreté nucléaire, Commission locale d'information, etc.) de dispenser de l'information nucléaire, dont s'empareront les populations, ou de mettre en œuvre de la concertation. Les populations y sont conçues comme un auditoire homogène

et cette conception ignore la diversité des points de vue [5]. Ces instances souhaitent esquiver la dichotomie « pro » / « anti ». Deux arguments sont évoqués par leurs dirigeants pour expliquer cette difficulté de dialogue : le manque de connaissance technique des populations et leur désintérêt total pour la question du nucléaire. On comprend mieux alors pourquoi, dans les différentes procédures de débat public [6], le public est cantonné à un simple rôle d'auditoire [7] et pourquoi dans les instances de concertation, les nouveaux entrants : associatifs, experts indépendants et représentants des territoires, se voient rarement accorder une place centrale en matière de gestion de la sûreté [8]. ■

Références

1. G. Hecht, *Le rayonnement de la France*, La Découverte, Paris (2004).
2. E. Rivat, *La transnationalisation de la cause antinucléaire en Europe*, thèse de doctorat, Univ. de Bordeaux IV (2013).
3. F. Zonabend, *La presque île au nucléaire. Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima... et après ?*, La Découverte, Paris (2014).
4. F. Lafaye, *Une centrale pas très... nucléaire*, thèse de doctorat, Univ. de Paris X-Nanterre (1994).
5. F. Lafaye, dans M.-G. Suraud, M.-P. Blin et G. de Tersac (eds.), *Risques industriels : quelle ouverture publique ?*, Octarès Editions, Le travail en débat, (2009).
6. www.debatpublic.fr
7. E. Ballan et al., dans M. Revel, et al. (dir.), *Le débat public : une expérience française de démocratie participative*, La Découverte, Recherches (2007).
8. G. Grandazzi dans Suraud et al., op. cit.

a. Voir dans ce dossier l'article de H. Bercegol (p. 34).

b. Les avis des experts divergent sur la solution retenue, ce qui fera dire à l'ex-ministre Nicolas Hulot qu'elle est « la moins mauvaise solution ».

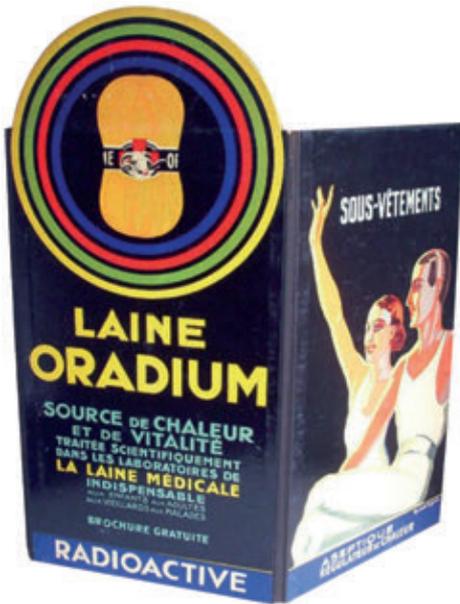
c. Ce projet de centrale a été abandonné en 1981.

d. Analyser un silence constitue un véritable défi pour les ethnologues.

e. La commune de Braud-et-Saint Louis se caractérise par un écosystème constitué de deux biotopes complémentaires, le marais et la « terre ferme », une histoire marquée par une grande opération capitaliste (l'assèchement du marais au XVII^e siècle) et par une identité sociale de ses habitants, fortement dépendante d'une immigration originelle qui fait des habitants, des Gabayes, des étrangers en terre gasconne.

La presse et le nucléaire, couple infernal

Sylvestre Huet, journaliste, auteur du blog {sciences?}



L'information des citoyens, tout comme le rôle de contrôle et de contre-pouvoir que la presse incarne, ou devrait incarner, trouve dans le nucléaire une dimension supplémentaire. En effet, la technicité de la matière oblige à un effort d'explication et de médiation scientifique pour aider les citoyens à former leur opinion. Pour autant, l'Histoire a montré que dans le domaine du nucléaire la presse a joué ce rôle avec difficulté, jusqu'à arriver à des cas avérés de désinformation.

L'électronucléaire incarne jusqu'à la symboliser l'ambivalence de la technologie. Sa puissance lui permet de rendre d'immenses services, sa perte de contrôle peut déboucher sur des dégâts inacceptables. Y recourir ou s'en priver ne pose donc pas seulement la question de la capacité à y accéder, à le maîtriser, ou simplement son utilité, mais également celle de son acceptation sociale. En régime politique démocratique, celui souhaité par la population française, elle doit donc également satisfaire à la volonté populaire, exprimée par le suffrage universel lors du choix des législateurs et gouvernants.

Cette exigence semble simple mais se heurte à plusieurs difficultés dont celle de la qualité de l'information des citoyens. Pour que la démocratie ne soit pas un leurre, les choix doivent être opérés « en connaissance de cause ». Ce prérequis démocratique, en ce cas, ne peut se limiter à la forme souvent caricaturale des « professions de foi », sur une page recto-verso, distribuées peu avant l'élection des représentants du peuple. La presse, censée apporter une contribution décisive au débat démocratique, joue-t-elle son rôle dans celui lié à l'électronucléaire ?

Asservissement des populations

L'histoire de cette interrogation dépasse le demi-siècle, avec des précédents peu encourageants. La découverte et les premières applications de la radioactivité entraînent la publication d'articles vantant les « bienfaits » de cette dernière... dans l'eau de boisson. Au début des années 1950, la « promesse technologique » domine. Répercutant sans esprit critique un discours publicitaire, revues et journalistes annoncent voitures et fusées nucléaires, diffusent l'illusion d'une électricité sans limites et quasi gratuite. Puis, le propos se divise en deux postures opposées. Lors du démarrage du programme nucléaire français de 1974, il est présenté comme la panacée capable de résoudre tous les problèmes économiques du pays... ou à l'inverse comme devant nécessairement entraîner l'asservissement des populations dans une société policière, soumise au secret et détruisant les libertés individuelles et collectives.

Bourdes et désinformations

Les années récentes ne font guère mieux. L'accident de Fukushima en mars 2011 a donné lieu à de multiples bourdes et désinformations susceptibles d'intéresser les sociologues des médias. *Le Figaro* annonce en mars 2016 des cancers de la thyroïde chez les enfants, dus à la contamination radioactive, alors qu'il s'agit d'une confusion entre incidence épidémiologique et dépistage systématique^(a). Une confusion relevée dans la majorité des articles sur le sujet, malgré l'avertissement clair des spécialistes : « *ce n'est que si l'incidence annuelle du cancer de la thyroïde chez l'enfant augmente à partir de la période 2016-2018 (ou au cours des périodes suivantes) qu'un lien avec l'accident de Fukushima pourra être évoqué* », explique en effet l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) dans un document destiné aux journalistes et au public.

Le Nouvel Observateur, en août 2012, sonne le tocsin : « *C'est une petite piscine – et un désastre planétaire en puissance. Un cube en béton de onze mètres de profondeur, rempli d'eau et bourré de combustibles*

>>>



Le nucléaire civil et militaire dans la France de Sarkozy, vu par Cabu. Les réacteurs de recherche, tels que l'Institut Laue-Langevin situé dans la ville de Grenoble, ne sont pas mentionnés.

nucléaires usagés : 264 tonnes de barres très radioactives ! Depuis un an et demi, ce bassin dit de "désactivation" repose à trente mètres du sol sur le bâtiment ébranlé du réacteur numéro 4 de la centrale de Fukushima-Daiichi. Il n'est plus protégé ni par un toit solide ni par des murs, mais par une simple bâche de plastique blanche. » Au moment où *Le Nouvel Observateur* publie cet article alarmiste, la piscine est recouverte d'une structure métallique lourde de 60 tonnes et non d'une bâche en plastique. Elle sera ensuite entièrement vidée de ses combustibles nucléaires. Parmi les errements de la presse à propos de l'accident de Fukushima, l'attribution des 20 000 morts du tsunami de mars 2011... à l'accident nucléaire par *l'Humanité* lors de l'anniversaire de l'évènement, en 2016.

Avec un tel traitement, comment s'étonner de ce que, selon l'enquête sociologique annuelle de l'IRSN^(b), une majorité de Français considèrent l'accident japonais comme « plus effrayant » que celui de Tchernobyl, dont le bilan sanitaire est pourtant bien plus grave ?

Éléments rationnels

L'anomalie de fabrication survenue sur le fond et le couvercle de la cuve de l'EPR en construction à Flamanville a provoqué la parution de centaines d'articles. La plupart d'entre eux ont précédé le travail d'analyse des conséquences de cette anomalie sur la capacité de la cuve à remplir sa fonction. Et d'annoncer ou de suggérer que la cuve ne pouvait

certainement pas être utilisée... ce qui s'est révélé, *in fine*, une « information » médiocre. Après l'autorisation donnée par l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN) pour cette cuve, il ne restait plus que l'accusation de collusion avec les industriels contrôlés pour justifier les articles publiés auparavant.

Le débat public sur l'économie ou le bilan des avantages et inconvénients du choix nucléaire pour la France est toujours grevé par une ignorance entretenue. Lorsque la Cour des comptes fait le bilan très complet des coûts du nucléaire depuis son origine^(c), la presse aligne les milliards... mais sans les mettre en comparaison avec d'autres sources possibles d'électricité. Les anciens « prélèvements sur les bénéfiques » puis les milliards de



dividendes versés à l'État depuis 2006 par EDF, dont l'origine se situe pour l'essentiel dans la production nucléaire, sont ignorés. Un calcul simple, comme celui consistant à comparer le coût du « grand carénage » et des mesures post-Fukushima à celui d'un investissement identique en capacités de production assurant la continuité de l'approvisionnement n'est jamais fait (voir encadré, NdE).

Du coup, *Le Monde* en vient à titrer sur une mystérieuse « *Obsession française* » pour expliquer le choix d'un socle nucléaire majoritaire pour l'électricité, opéré depuis 1974 par tous les gouvernements et majorités parlementaires. Voire à évoquer le nucléaire militaire comme source de cette *obsession*. Pourtant, l'économie, le coût de l'électricité pour les entreprises et les ménages comme la volonté initiale de desserrer l'étau de la contrainte extérieure – financière et d'approvisionnement alors en pétrole – suffisent à expliquer ce choix par des éléments discutables mais rationnels.

À ces éléments s'ajoute, depuis que la communauté internationale a pris conscience du problème climatique, l'avantage crucial d'une source d'électricité décarbonée. Mais l'enquête sociologique annuelle de l'IRSN indique que près de la moitié des Français persistent à croire que les centrales nucléaires contribuent « *beaucoup ou assez* » à ce changement climatique. Si la presse n'est pas la seule responsable de cette incompréhension massive, comment l'exonérer totalement de cet état piteux de la diffusion des connaissances de base sur ce sujet crucial ?

Conversation citoyenne

Pourquoi la presse fait-elle si mal son travail sur ce sujet^(d) ? Les raisons en sont multiples, des choix idéologiques à l'incompétence, en passant par la difficulté objective du sujet qui exige un investissement en temps rarement disponible pour les journalistes. Elles sont accentuées par le total désintérêt pour la technologie, et souvent même pour l'appareil productif, de la plupart des rédactions en chef. Est-elle pour autant la seule responsable de l'état du débat démocratique sur le sujet ?

Ce serait là une conclusion beaucoup trop indulgente pour les industriels. Ces derniers ont en effet usé et abusé du discours publicitaire cachant les difficultés réelles, comme cette présentation récurrente des déchets nucléaires réduits au volume « *d'une piscine olympique* ». Au regard des dimensions du projet CIGEO d'enfouissement de ces déchets – des galeries souterraines de plusieurs dizaines de kilomètres, des alvéoles de plusieurs centaines, des installations de surface de taille industrielle – la volonté de duper est patente. Si la loi et les règles obligent les industriels à déclarer chaque incident aux autorités, le discours tenu vise systématiquement à minimiser les risques. À chaque incident ou problème technique rencontré les industriels privilégient des « éléments de langage » typiques d'une démarche publicitaire ou propagandiste au détriment d'une information détaillée et honnête. D'expérience personnelle, nombre de dirigeants d'EDF estiment les Français (voire les journalistes) trop « bêtes » pour comprendre la technologie qu'ils utilisent. D'où le recours aux ficelles publicitaires plutôt qu'à l'exposé rationnel. Si les industriels apparaissent

toujours réagir à des informations diffusées par l'ASN et l'IRSN, c'est qu'ils ne prennent jamais l'initiative de faire part des difficultés rencontrées et encore moins de leurs erreurs ou fautes, comme on a pu le constater dans l'affaire des falsifications de documents relatifs à la fabrication de composants lourds à l'usine de Creusot Forge, avant et après son acquisition par Areva.

Cette attitude s'oppose à celle de l'ASN et de l'IRSN qui constituent à l'inverse de précieuses sources d'informations fiables pour les journalistes. Lors de l'accident de Fukushima, les propos lénifiants des directions d'Areva et d'EDF tranchaient abruptement avec ceux de l'ASN, réalistes sur la dimension de la catastrophe. Soulignons toutefois un paradoxe : il n'est pas interdit de voir dans la sévérité et la capacité à « parler vrai » de l'ASN (autorité administrative indépendante depuis 2006) et de l'IRSN un effet positif de l'exigence de sûreté très forte de la population française dont témoigne, avec ses défauts, la couverture médiatique du risque nucléaire. ■

a. Le dépistage systématique montre une incidence de 11 cancers de la thyroïde pour 100 000 enfants et par an dans la préfecture du Fukushima contre 23 à 130 dans trois autres préfectures (Aomori, Hiroshima et Yamanashi) indemnes de contamination pour la période 2011/2014.

b. <http://barometre.irsns.fr/barometre2017/#page=1>

c. Voir dans ce dossier l'article d'A.-S. Dessillons (p. 29).

d. NdE : voir en fin de dossier (p. 62) quelques exemples de travaux de presse, y compris critiques du nucléaire, réalisés de façon compétente.

e. Voir dans ce dossier l'article de J. Percebois (p. 52).

f. Voir dans ce dossier l'article de N. Maïzi et F. Briens (p. 49).

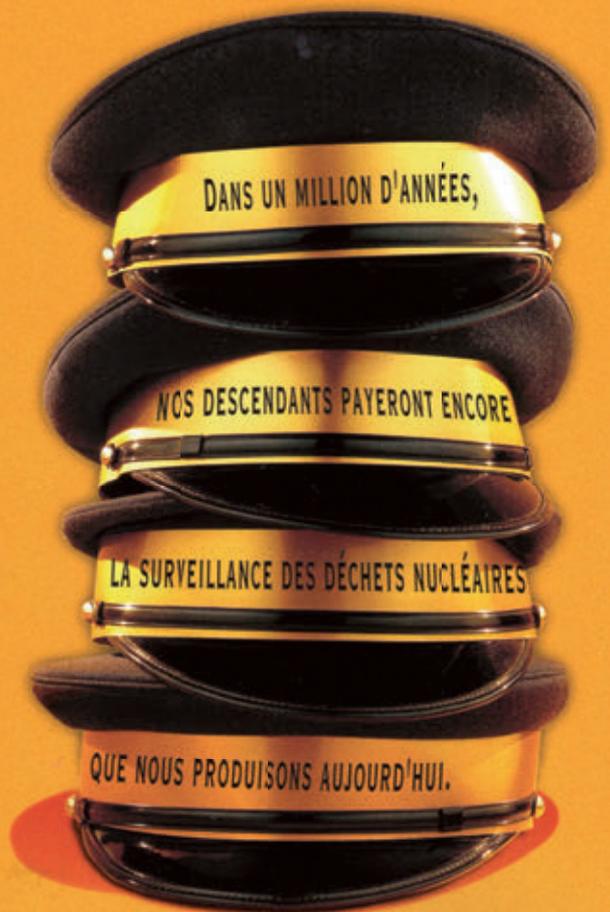
Éléments pour le calcul proposé par Sylvestre Huet

La Cour des comptes estime à 100 milliards d'euros le « grand carénage » (75 en investissement + 25 en exploitation) d'ici 2025, soit approximativement 1,7 milliards d'euros par réacteur. Or d'ici 2025, 34 réacteurs vont atteindre la limite des 40 ans, ce qui représente 31,6 GW installés, à remplacer s'ils ne sont pas renouvelés. Il faudrait pour cela construire environ 20 EPR de 1,6 GW. En supposant qu'en production régulière le coût d'un EPR tombe à 5,6 milliards d'euros (soit 3500 euros/kW installé), le coût total serait de l'ordre de 112 milliards d'euros.

Les deux coûts estimés, bien qu'ils ne constituent qu'un ordre de grandeur approximatif, sont donc comparables. Mais construire, dans ces sept années, une vingtaine d'EPR apparaît comme une mission impossible. Si on construit plutôt de l'éolien ou du photovoltaïque, il faut inclure dans le calcul les coûts des installations supplémentaires au gaz naturel pour compenser l'intermittence, et le redimensionnement du réseau pour tenir compte des pics de production à absorber pour ne pas perdre l'électricité produite^(e). L'autre solution étant de diminuer la consommation d'électricité^(f).

Remerciements à Roland Lehoucq, NdE.

QUEL FUTUR POUR LE NUCLÉAIRE FRANÇAIS ?



.....

Le scénario est souvent relégué au statut d'instrument destiné à asseoir et avaliser des choix déjà définis.

Sandra Bouneau

Le nucléaire dans les scénarios mondiaux de transition énergétique
page 46
.....

.....

Le développement des énergies renouvelables intermittentes (solaire et éolien) ne réglerait pas la question, car ces énergies ne sont pas nécessairement disponibles aux heures de pointe.

Jacques Percebois

La distribution de l'électricité : atouts et contraintes liés au réseau européen
page 52
.....

.....

Le passage aux scénarios plus sobres en émissions de gaz à effet de serre entraîne, par rapport au scénario croissance verte, un surcoût de 16% pour le cas d'une croissance verte renouvelable et une diminution de coût de 4,5% dans le scénario de décroissance.

Nadia Maïzi et François Briens

Envisager le futur énergétique : des aspirations sociétales aux enjeux techniques
page 49
.....

.....

Il faut bien souvent plusieurs décennies de travail de recherche, de conception, de développement, d'expérimentation pour aboutir à un système prêt à passer à l'échelle industrielle.

Annick Billebaud

Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires
page 55
.....

Le nucléaire dans les scénarios mondiaux de transition énergétique

Sandra Bouneau, physicienne, Université Paris Sud

Les études de prospective sur la transition énergétique destinée notamment à réduire les émissions de gaz à effet de serre, reposent sur le développement de scénarios.

Conçus pour évaluer quantitativement les impacts d'une politique énergétique sur le climat, ils représentent de réels outils d'aide à la décision. Cependant, les scénarios sont à manier avec prudence car ils sont construits sur des modèles complexes et utilisent un grand nombre d'hypothèses peu explicitées, qui relèvent parfois davantage de considérations politiques que techniques ou scientifiques.

Pour endiguer le dérèglement climatique, la consommation des combustibles fossiles, qui représentent aujourd'hui 80% de l'énergie consommée dans le monde, devra décroître drastiquement. L'outil scientifique utilisé pour analyser la production et la consommation d'énergie dans le futur est le scénario. Alors que la plupart des scénarios mondiaux^(a) considèrent un déploiement massif des énergies renouvelables, la production d'énergie nucléaire peut s'arrêter d'ici 2050 ou bien être multipliée par un facteur 10 par rapport à aujourd'hui. Il s'agit donc de comprendre les raisons de la grande variabilité de la part du nucléaire dans les études prospectives.

Construction des scénarios mondiaux de transition énergétique

L'objectif d'un scénario est d'explorer les futurs énergétiques possibles en fournissant notamment une trajectoire de consommation et de production d'énergie jusqu'en 2050 ou au-delà. Le scénario se base sur un ensemble d'hypothèses et de grandeurs pour modéliser l'évolution socio-économique du monde (population, urbanisation, PIB, consommation...), elle-même couplée à des modèles décrivant l'évolution de la disponibilité des sources d'énergie, du coût des technologies et de leurs performances. De plus, une grandeur donnée – par

exemple l'évolution du PIB – est tantôt une hypothèse, tantôt un résultat de la modélisation.

Dans la plupart des scénarios, le système de production énergétique est optimisé pour satisfaire à tout instant la demande d'énergie au coût le plus bas. Le coût d'une technologie est donc une donnée d'entrée dont la valeur au cours du temps détermine sa part dans le mix énergétique. Un scénario visant un fort déploiement des nouvelles sources renouvelables électriques (éolien, photovoltaïque) fait l'hypothèse d'une réduction des coûts par rapport à aujourd'hui pouvant aller jusqu'à un facteur 10. À l'inverse, une technologie considérée comme peu souhaitable pour satisfaire la demande future, d'un point de vue sociétal ou climatique, a un coût artificiellement augmenté afin de ne pas émerger significativement dans le mix énergétique futur.

Sans objectif quantitatif préalablement fixé, les scénarios sont dits « tendanciels ». Selon les hypothèses et les paramètres choisis, la consommation d'énergie en 2050 peut être augmentée de 20% ou multipliée par un facteur 3 par rapport à celle d'aujourd'hui. Lorsqu'un objectif est fixé à un horizon donné, par exemple la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un facteur 2 dans le monde d'ici 2050, le scénario s'emploie à décrire une trajectoire pour l'atteindre sous l'effet de contraintes et d'hypothèses supplémentaires.

Il existe une multitude de scénarios dans la littérature scientifique, complexes à appréhender, ce qui rend leur analyse comparative difficile voire impossible. Un scénario n'a pas vocation à être prédictif mais à transcrire, au travers d'un ensemble d'hypothèses et de valeurs attribuées aux grandeurs économiques et technologiques, une trajectoire énergétique. S'il sert parfois à éclairer le débat et à alimenter la réflexion en amont des décisions, il est souvent relégué au statut d'instrument destiné à asseoir et avaliser des choix déjà définis.

Prise en compte de la contrainte climatique dans les scénarios mondiaux

En intégrant des modélisations du climat, certains scénarios peuvent également fournir des évolutions de concentration de GES jusqu'en 2100. Sur la base de plusieurs centaines de ces scénarios, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a défini quatre profils de référence d'évolution de concentration de GES (*Representative Concentration Pathway*, ou RCP). Ces profils donnent lieu à quatre valeurs de flux d'énergie supplémentaire reçu en moyenne par m² de surface de la Terre et causant son réchauffement (« forçage radiatif »). La valeur la plus basse, 2,6 W/m², induit



une augmentation moyenne de la température d'ici 2100 qui ne dépasse pas 2°C ; la plus haute, 8,5 W/m², conduit à une augmentation supérieure à 4°C. Ces profils fixent un cadre commun pour élaborer de nouveaux scénarios, dits « climatiques », visant à évaluer l'impact d'une politique énergétique sur le climat par rapport à des scénarios tendanciels.

Dans la plupart des scénarios tendanciels, les énergies fossiles restent la principale source d'énergie et les émissions de CO₂ associées donnent des forçages radiatifs supérieurs à 2,6 W/m². L'augmentation des besoins en énergie, qu'elle soit modérée ou forte, provient des populations d'Asie et, dans une moindre mesure, d'Afrique. Selon les hypothèses des scénarios sur la capacité des pays à maîtriser leur

consommation d'énergie dans l'avenir, et le niveau de développement des pays émergents et pauvres, la consommation d'énergie mondiale en 2050 varie du simple au triple (fig. 1, en bleu).

Sur la base des scénarios tendanciels utilisés comme référence, des hypothèses supplémentaires sur la consommation d'énergie et les progrès technologiques des sources non émettrices de CO₂ sont introduites. Ces hypothèses simulent des politiques plus volontaristes qu'elles ne le sont aujourd'hui pour réduire les émissions de GES, permettant ainsi d'atteindre des objectifs quantitatifs compatibles par exemple avec un RCP de 2,6 W/m². Dans la plupart des scénarios, fixer des objectifs ambitieux pour le climat s'accompagne d'une réduction significative

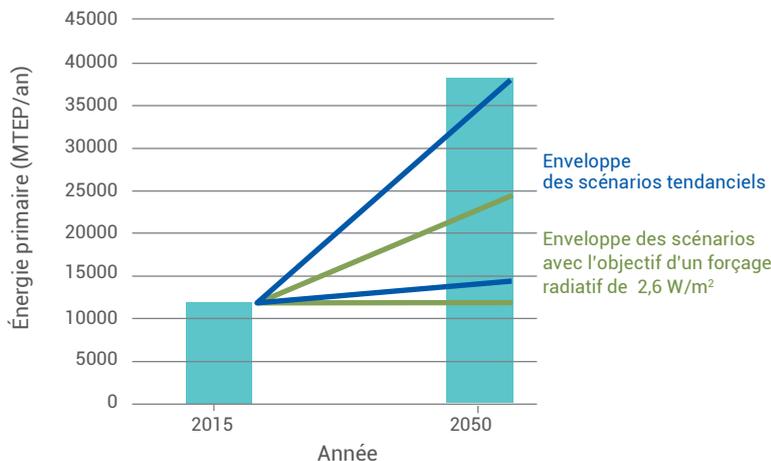
de la consommation d'énergie d'ici 2050 par rapport aux scénarios tendanciels (fig. 1, en vert).

Dans certains scénarios, cette sobriété est présentée comme souhaitée et reste compatible avec une croissance économique soutenue moyennant, par exemple, des hypothèses ambitieuses sur la capacité des sociétés à changer leurs modes de vie et à améliorer les performances des installations. Dans d'autres, la réduction de la consommation d'énergie est subie, puisqu'elle résulte d'une politique de réduction des émissions de GES très contraignante, comme la mise en place d'une taxe carbone élevée, et induit un ralentissement de la croissance économique.

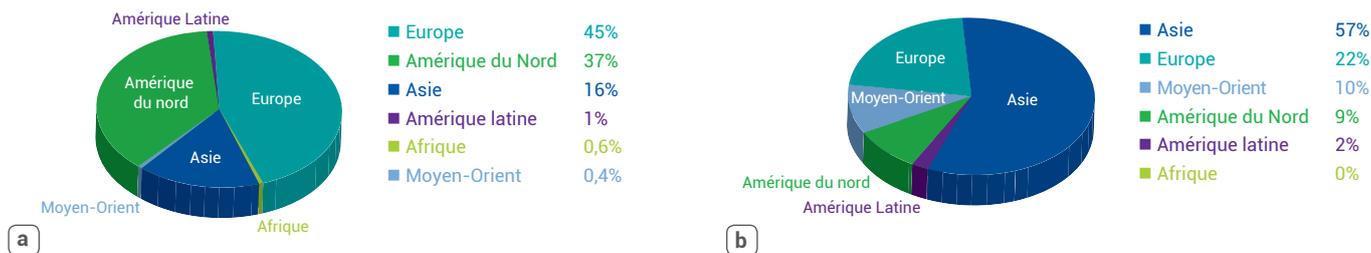
Les conditions d'une production d'énergie décarbonée

Selon les hypothèses des scénarios, la transition vers un monde décarboné est plus ou moins rapide et peut s'opérer selon plusieurs options : maintien de l'utilisation des combustibles fossiles en privilégiant la substitution du charbon et du pétrole par le gaz naturel avec un recours massif à la technologie de Capture et de Séquestration du CO₂ (en anglais, CCS), déploiement des énergies renouvelables incluant la biomasse (bois et biocarburants) ou du nucléaire.

Dans la plupart des scénarios mis en avant, la production d'électricité ou de



1. Consommation mondiale d'énergie, en mégatonnes d'équivalent pétrole par an, estimée dans les scénarios tendanciels (en bleu) ou climatiques (en vert).



2. Part des réacteurs nucléaires (a) actuels et (b) en construction dans le monde.

>>>

chaleur d'origine nucléaire, bien que compétitive, ne ressort pas comme un moyen efficace de fournir au monde l'énergie dont il a besoin sans émettre de CO₂. Les arguments sous-jacents sont rarement explicités. Parfois, est invoquée la difficulté de maîtriser cette technologie complexe tout en respectant les standards de sûreté occidentaux ; ou bien le fait que cette technologie ne serait pas acceptée par les sociétés futures. Ces arguments se traduisent par un surcoût artificiel attribué au nucléaire, qui la classe au dernier rang des énergies non émettrices de CO₂ dans le mix énergétique. La limitation du déploiement du nucléaire à l'échelle mondiale est donc souvent une hypothèse d'entrée du scénario plutôt qu'un résultat.

En revanche, dans les scénarios qui lèvent ces contraintes, la production nucléaire en 2050 est multipliée par un facteur variant de 2 à 10 par rapport à aujourd'hui, selon la demande d'énergie future.

Actuellement, on compte plus de 400 réacteurs nucléaires dans le monde, en majorité à eau sous pression, produisant 2,4 millions de GWh par an d'électricité pour une puissance installée de 350 GW, ce qui représente 10% de la production électrique totale, et dont la répartition géographique dans le monde est donnée dans la figure 2a. En outre, 68 réacteurs sont en cours de construction, dont plus de la moitié se situent en Asie, le reste étant réparti entre l'Europe, l'Amérique du Nord et le Moyen-Orient (fig. 2b).

Dans les années 2000, le nucléaire semblait connaître un renouveau mais l'accident de Fukushima lui a porté un coup d'arrêt, rendant hasardeux tout pronostic d'évolution vers un déploiement ou un déclin. Néanmoins, quelle que soit la décision des pays d'Europe vis-à-vis du nucléaire, son déploiement semble se poursuivre dans le reste du monde et se déroule aujourd'hui principalement en Asie.

Dans un scénario à forte croissance du nucléaire, la production nucléaire mondiale peut atteindre 20 millions de GWh par an en 2050. Avec l'hypothèse que les principales populations concernées se situeraient dans les villes (besoins concentrés) des pays déjà nucléarisés, plus particulièrement dans les pays d'Asie comme la Chine et l'Inde, environ 5 milliards d'humains en bénéficieraient. Sur la base de réacteurs de 1 GW fonctionnant à pleine puissance 85% du temps, le nombre total de réacteurs correspondant est d'environ 2300, soit environ 450 réacteurs pour un milliard d'habitants. Comparativement au cas de la France, qui a construit 60 réacteurs en 25 ans pour 60 millions d'habitants, ce type de déploiement mondial ne semble pas si irréaliste. Même si la capacité de l'industrie nucléaire occidentale à s'engager dans des programmes ambitieux de construction de réacteurs est remise en cause actuellement, l'Asie pourrait en avoir rapidement les moyens.

L'augmentation de la production nucléaire d'un facteur 10 sur le siècle à venir se heurterait à la question des ressources en uranium. Estimées aujourd'hui à environ 15 millions de tonnes, ces ressources sont incapables d'assurer une telle augmentation avec les filières actuelles qui consomment de 150 à 200 tonnes d'uranium pour une puissance de 1 GW délivrée pendant 1 an. De plus, la capacité de l'industrie minière à mettre à disposition ces ressources reste à démontrer. Enfin, les océans contiennent plusieurs milliards de tonnes d'uranium, mais les concentrations sont si faibles que le rendement énergétique lié à l'extraction et l'impact environnemental associé rendent l'exploitation de cette ressource difficilement envisageable aujourd'hui. Un tel scénario de déploiement ne semblerait donc possible que *via* une transition vers des filières régénératrices, permettant de réduire d'un facteur 200 la consommation d'uranium. La maîtrise et la mise en œuvre de centaines de réacteurs de 4^e génération dans le monde, répondant aux normes de

sûreté les plus élevées, représenteraient un défi technologique et industriel majeur.

Pour conclure, les scénarios misant sur une croissance soutenue du nucléaire pour répondre aux enjeux climatiques manquent de visibilité dans les sphères politique, technico-économique et médiatique. Un déploiement important au niveau mondial nécessiterait de faire des choix politiques forts engageant les générations futures et faisant du nucléaire un réel pari sur l'avenir. Mais l'analyse des scénarios montre que se passer du nucléaire est également un pari sur l'avenir. En effet, les scénarios correspondants misent sur la capacité des sociétés à réduire leur consommation d'énergie et à améliorer très fortement l'efficacité énergétique, et reposent sur des hypothèses très optimistes sur la technologie CCS ainsi que sur les moyens de gérer une production importante d'électricité intermittente. Si nous échouons à atteindre ces objectifs ambitieux, les combustibles fossiles resteront encore très longtemps la principale source d'énergie et nous aurons engagé le monde, de façon irréversible, sur une trajectoire de dérèglement climatique majeur. ■

En savoir plus

- Ce document s'appuie principalement sur les scénarios de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) réalisés dans le cadre des travaux du GIEC : <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>
- Les chiffres sur la production nucléaire sont issus de la base de données ENERDATA : www.enerdata.net/
- "Building future nuclear power fleets: The available uranium resources constraint", *Resources Policy* 38 (2013) 458-469.
- "The representative concentration Pathways: an overview", *Climatic Change* 109 (2011) 5-31.

a. Pour une étude de scénarios à l'échelle française, voir dans ce dossier l'article de N. Maïzi et F. Briens (p. 49).



Envisager le futur énergétique : des aspirations sociétales aux enjeux techniques

Nadia Maïzi, mathématicienne, Mines ParisTech, et François Briens, docteur en mathématiques appliquées

Arbitrant entre plusieurs stratégies, voire choix de société, les modèles permettent l'exploration de différents scénarios pour aider à prendre des décisions. Une famille de modèles permet de comparer en détail trois scénarios, respectivement basés sur une croissance dite « verte » de la consommation d'énergie, avec augmentation ou suppression progressive du nucléaire, et sur une décroissance de la consommation d'énergie.

En ce qui concerne les enjeux énergétiques de long terme, la question de la pertinence des orientations technologiques se pose. Les modèles issus de la famille TIMES (*The Integrated MARKAL-EFOM System*) [1] permettent de réaliser des exercices prospectifs dans ce cadre. Proposant une description détaillée des technologies disponibles, ces modèles, pilotés par un scénario d'évolution de la demande à l'horizon 2050, évaluent l'offre technologique de façon à minimiser le coût total actualisé du système énergétique sur l'horizon considéré.

Pour alimenter de tels modèles, il faut aborder la question suivante : *comment évoluera la demande énergétique au cours des 50 prochaines années ?* Question complexe, car les usages de l'énergie sont variés : se chauffer, se transporter, se distraire, produire... En outre, ils sont conditionnés à la fois par les infrastructures, les comportements, les choix de consommation, et plus largement par les modes de vie et le type d'organisation sociale^(a). Aussi, pour explorer les répercussions de différents choix de société (intégrant différentes options concernant le nucléaire) et de modes de vie sur la demande énergétique, nous avons développé un modèle de simulation macroéconomique [2] pour le périmètre français^(b).

Voyons comment la déclinaison de nos modèles permet l'éclairage de deux options préconisées comme alternatives

aux tendances actuelles (voir encadré, p. 51). La première s'inscrit dans la perspective d'une *croissance verte*. Elle se présente comme un pari technologique : innovation et progrès technique y jouent un rôle critique, à la fois moteurs et fruits de la croissance économique, et également sources espérées de solutions à l'épuisement des ressources naturelles. Traduite dans notre modèle macroéconomique [2], cette stratégie conduit à une diminution de la consommation d'électricité de 15% entre 2012 et 2050.

La deuxième option explorée vise à refléter la perspective d'acteurs des mouvements de la *décroissance*. Elle constitue plutôt un pari anthropologique : celui d'une révolution culturelle se traduisant par une évolution profonde des valeurs, normes, comportements, des modes de vie, de l'organisation sociale, et une mutation des systèmes de besoins vers une plus grande sobriété. Pour décrypter cette ambition, une série d'entretiens a été réalisée auprès d'acteurs proches des mouvements de la décroissance, chaque entretien étant ensuite traduit en scénario. Nous proposons ici d'analyser le scénario reflétant la plus volontariste des visions recueillies lors des entretiens. Notre modélisation macroéconomique [2] indique que ce scénario implique une diminution de la demande électrique de 56% entre 2012 et 2050.

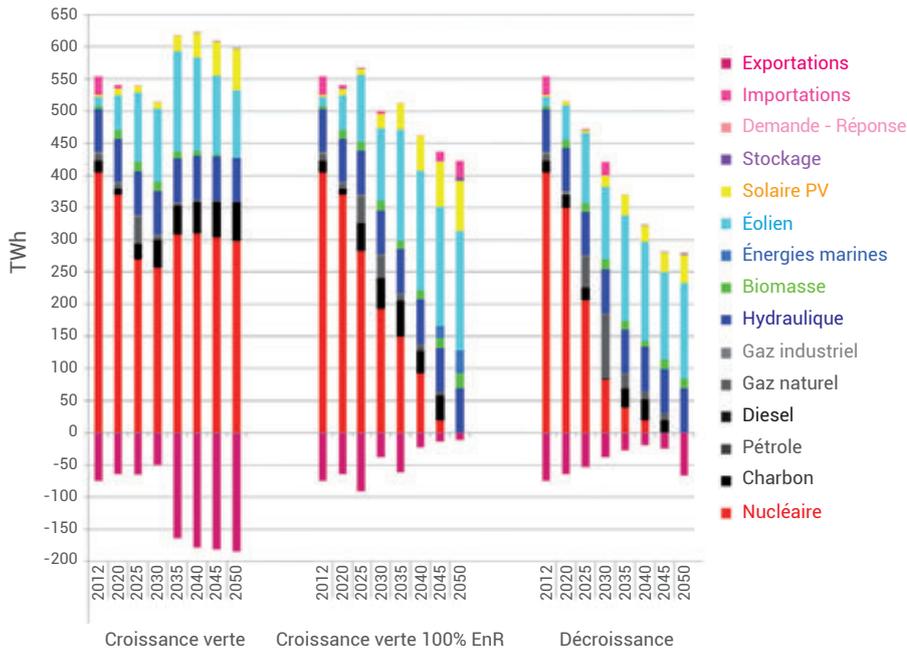
Ces deux scénarios de demande électrique, assortis de contraintes spécifiques, sont utilisés pour élaborer l'offre technologique du secteur électrique, optimale économiquement, jusqu'à l'horizon 2050.

Le scénario de croissance verte sera envisagé selon deux options : une première option ouvre la possibilité d'investir dans de nouvelles capacités nucléaires ; une seconde poursuit une politique de sortie du nucléaire et l'objectif d'atteindre un mix électrique 100% renouvelable en 2050. Dans ce dernier cas, le prolongement de 20 ans de la durée de vie des réacteurs existants, moyennant surcoût, est autorisée.

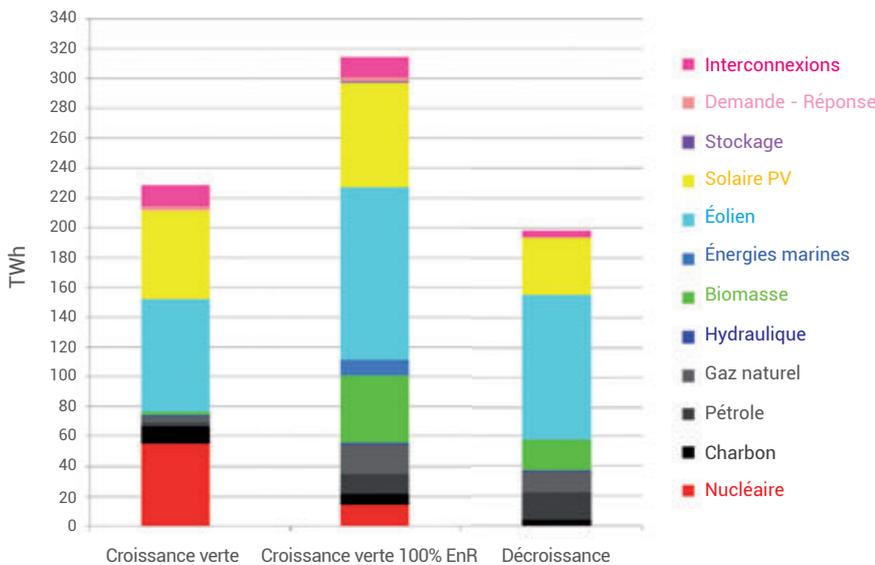
Le scénario de décroissance préconise une hypothèse de sortie du nucléaire sans possibilité de prolongement au-delà de la durée de vie des réacteurs (40 ans). Pour prolonger l'esprit de sobriété technologique sous-jacent, ni les technologies d'effacement, permettant de différer la demande de consommation électrique (comme les réseaux optimisés, dits *smartgrids*), ni les nouvelles technologies de stockage^(c) dédiées à la production d'électricité ne sont autorisées.

Le premier élément d'arbitrage mis en évidence par les résultats de notre modèle (fig. 1) est le niveau des exportations d'électricité qui décroît drastiquement dans les deux options « 100% renouvelable ». Si la part du nucléaire évolue selon les hypothèses retenues, les niveaux d'investissement en capacité de production





1. Différentes parts de la production électrique, en fonction du temps, dans les scénarios de croissance « verte » avec ou sans nucléaire, et de décroissance.



2. Capacités de production électrique installées d'ici 2050 selon les trois scénarios.

L'indicateur cinétique

Sous réserve que le synchronisme soit assuré à l'échelle du réseau [5, 6], cet indicateur correspond au temps d'épuisement de l'énergie cinétique^(d) embarquée dans le système électrique rapportée à la fluctuation maximale envisageable soit en consommation (écart au pic), soit en perte de génération. Il s'exprime comme

$$\frac{E_{cin}}{\max(\Sigma_k S_k P_{pic} - \Sigma_k S_k)}$$

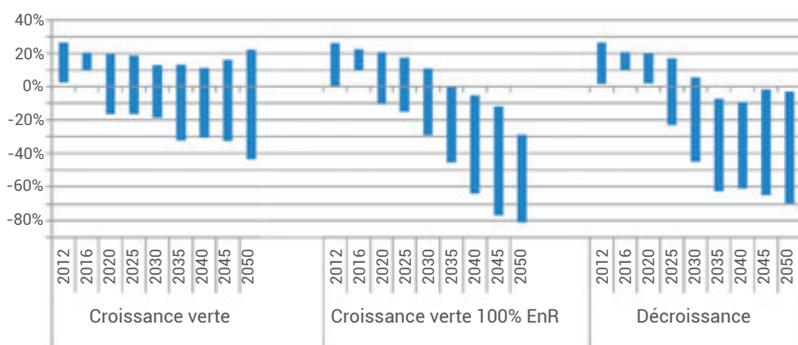
où E_{cin} est l'énergie cinétique répartie sur le réseau, $\Sigma_k S_k$ est la puissance apparente maximum fournie par les générateurs avant fluctuation, et P_{pic} le pic de la puissance appelée.



électrique sont contrastés : le scénario « croissance verte 100% renouvelable » arrive en tête pour le cumul de nouvelles capacités installées sur l'horizon d'étude (fig. 2). Les deux scénarios de sortie du nucléaire font appel à des technologies reposant sur l'usage de ressources fossiles. Ce résultat, récurrent dans nos études [3], indique qu'au-delà de la question du démantèlement, une sortie du nucléaire devra être accompagnée de façon volontariste pour limiter le recours à des technologies fortement émettrices. Les différences sensibles de niveaux d'investissement entre les scénarios se répercutent sur le coût total actualisé du système électrique : le passage aux scénarios plus sobres en émissions de gaz à effet de serre entraîne, par rapport au scénario croissance verte, un surcoût de 16% pour le cas d'une croissance verte 100% renouvelable et une diminution de coût de 4,5% dans le scénario de décroissance.

Tandis qu'un mix de production électrique donné semble satisfaire à des critères environnementaux, la question reste entière sur sa capacité à satisfaire aux opérations système, afin d'éviter une rupture de la fourniture d'électricité par déséquilibre entre approvisionnement et demande (*black-out*). Pour aborder ce problème qui met en jeu des phénomènes transitoires de l'ordre de la seconde voire de la milliseconde, nous avons élaboré un indicateur [4] qui permet d'estimer le temps nécessaire pour que le système recouvre un état de fonctionnement satisfaisant suite à une perturbation d'ampleur significative (voir ci-contre). Pour garantir la fiabilité du système électrique, un niveau minimum^(e) de cet indicateur doit être maintenu correspondant au temps de recours à la réserve primaire dont le rôle est de retrouver un équilibre entre production et consommation - en dehors de considérations de régime nominal ou d'optimum économique. Or on constate (fig. 3) que la valeur de l'indicateur se dégrade (par rapport à sa référence 2012) pour les deux scénarios à objectif « 100% renouvelables ». En effet, avec la pénétration du renouvelable variable, les technologies appelées ne disposent pas (photo-voltaïque) ou peu (éolien) d'inertie mécanique. La fiabilité du système électrique se trouve donc, dans ces deux scénarios, fortement dégradée.

Loin d'invalider les options analysées et leur vocation à limiter les émissions du système électrique, ces résultats incitent à



3. Indicateur cinétique en fonction du temps, dans les trois scénarios. Plus cet indicateur est haut, plus le réseau est stable par rapport aux fluctuations. La valeur indiquée est la valeur relative par rapport au minimum constaté en 2012.

réfléchir à la mise en adéquation des solutions prônées avec les exigences d'opération du système. À travers une étude du cas de l'île de la Réunion à l'horizon 2030, nous avons pu montrer qu'un design technologique répondant à la contrainte de maintien du niveau de l'indicateur cinétique, permet d'envisager un mix 100% renouvelable [6, 7] autorisant à la fois une pénétration de plus de 50% des ressources intermittentes et une diminution des nouvelles capacités installées.

Les outils de prospective que nous avons développés, illustrés à travers ces analyses, mettent en relief les conséquences possibles mais parfois éludées, de certains choix, qu'ils soient techniques, liés à des évolutions comportementales, à des modes de vie ou d'organisation sociale. En permettant ainsi un débat informé, ils offrent au politique « désireux d'une aventure calculée » [8], les moyens de sa réalisation. ■

- a. Dont les choix démographiques.
- b. Pour une étude de scénarios à l'échelle mondiale, voir dans ce dossier l'article de S. Bouneau (p. 46).
- c. Par exemple les batteries et super-condensateurs haute capacité, les stockages thermiques.
- d. Énergie cinétique due à la rotation des parties mécaniques.
- e. De l'ordre de quelques dizaines de secondes, ce temps est de 40 s en moyenne pour la France en 2013, et de 25 s pour une île comme La Réunion en 2008 : plus l'indicateur est élevé, plus le système peut faire face à des fluctuations importantes.
- f. Le taux annuel d'amélioration de l'efficacité énergétique est supposé deux fois supérieur au taux moyen observé en France pour chaque branche sur la période 1996-2012.
- g. Les gains marginaux d'efficacité énergétique sont supposés de plus en plus faibles et nuls après 2050.

Références

1. R. Loulou, G. Goldstein, K. Noble, "Documentation of the MARKAL family of models", Energy Technology Systems Analysis Program (2004).
2. F. Briens, « La Décroissance au prisme de la modélisation prospective : Exploration macroéconomique d'une alternative paradigmatique », Thèse de Mines ParisTech (2015).
3. N. Maïzi, E. Assoumou, "Future prospects for nuclear power in France", *Applied Energy* **136** (2014), 849-859, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.056>
4. M. Drouineau, N. Maïzi, V. Mazaauric, "Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators", *Applied Energy* **116** (2014) 333-343, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.069>
5. V. Krakowski, X. Li, V. Mazaauric, N. Maïzi, "Power system synchronism in planning exercise: From Kuramoto lattice model to kinetic energy aggregation", *Energy Procedia* **105** (2017) 2712-2717, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.921>
6. N. Maïzi, V. Mazaauric, E. Assoumou, S. Bouckaert, V. Krakowski, X. Li, P. Wang, "Maximizing intermittency in 100% renewable and reliable power systems: A holistic approach applied to Reunion Island in 2030", *Applied Energy* **227** (2018) 332-341, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.058>
7. S. Bouckaert, P. Wang, V. Mazaauric, N. Maïzi, "Expanding renewable energy by implementing dynamic support through storage technologies", *Energy Procedia* **61** (2014), 2000-2003, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.061>
8. P. Massé, *Le plan ou l'anti-hasard*, Gallimard (1965).

Croissance « verte » et décroissance

Croissance verte

La taille des ménages continue de décroître tendanciellement, la consommation finale augmente, la mobilité à longue distance continue de se développer, la mobilité locale se reporte partiellement sur les transports en commun, les véhicules électriques se diffusent rapidement, l'économie poursuit de façon modérée sa tertiarisation, le secteur résidentiel bénéficie d'un rythme de rénovation thermique élevé, et les hypothèses de progrès technique et d'amélioration de l'efficacité énergétique des processus de production et des équipements sont très fortes^(f).

Décroissance

La consommation des ménages change de composition et décroît significativement du fait de l'adoption progressive de modes de vie « frugaux » et du développement des pratiques de mise en commun, la mobilité longue distance diminue fortement, les déplacements se reportent en grande partie sur des modes plus doux (vélo, transports en commun, train, etc.), l'économie est relocalisée, l'agriculture devient essentiellement « biologique », les rénovations thermiques dans le secteur résidentiel sont limitées, et les hypothèses d'amélioration de l'efficacité énergétique des processus de production et des équipements des ménages sont très modestes^(g).

La distribution de l'électricité

Atouts et contraintes liés au réseau européen

Jacques Percebois, économiste, université de Montpellier.

Jusqu'à la fin des années 1990, ce sont des entreprises publiques ou privées dites « intégrées » qui produisaient, transportaient et distribuaient l'électricité dans les divers pays européens. Dans certains pays, comme l'Allemagne, il y avait plusieurs entreprises régionales ; dans d'autres pays une seule entreprise nationale en position de monopole, comme EDF en France. La Directive européenne de 1996 a mis fin aux monopoles de production et de fourniture d'électricité. Les réseaux de transport et de distribution, qui fonctionnent comme des « monopoles naturels », sont devenus des « infrastructures essentielles » ouvertes à tous les producteurs et fournisseurs, moyennant des péages d'accès fixés par une commission de régulation indépendante. Ces réseaux sont au cœur des débats actuels, dans un contexte où ils doivent absorber une part croissante d'énergies renouvelables et faire face au développement de l'autoconsommation.

L'électricité est un produit qui ne se stocke pas, du moins à grande échelle dans des conditions économiques. Il faut donc qu'à tout instant la quantité de kWh injectée en amont du réseau soit égale à la quantité de kWh soutirée en aval, aux pertes en ligne par effet Joule près. À défaut, on peut stocker l'eau dans des barrages, ou des stations de pompage aux heures creuses pour la turbiner aux heures de pointe ; mais il y a des limites techniques au pompage de l'eau des barrages, notamment pour les barrages à usages multiples (production d'électricité et irrigation). Certes, la mise sur le marché de batteries de plus en plus performantes permet de stocker un peu d'électricité sur des périodes courtes, et de gros progrès sont réalisés notamment pour en baisser le coût ; mais aujourd'hui l'opération n'est pas rentable à l'échelle d'un réseau national. Elle le sera peut-être demain grâce aux batteries des véhicules électriques^(a).

La principale difficulté concerne le stockage intersaisonnier. Le réseau européen d'électricité est un réseau fortement interconnecté, ce qui est un facteur de

sécurité et un moyen de construire un marché unique de l'électricité. Mais les différences entre les « mix » électriques nationaux, c'est-à-dire des structures des bilans électriques observées dans les divers pays européens, rend parfois difficile la convergence des prix de l'électricité pour le consommateur. Certains pays comme la France ont un mix électrique largement dominé par le nucléaire ; d'autres, comme l'Allemagne, ont un mix qui dépend fortement de centrales fonctionnant au charbon ou au lignite. Le développement des énergies renouvelables, comme les fermes solaires ou éoliennes, impose de renforcer les réseaux à l'échelle locale pour absorber cette production sur le réseau de distribution et la remonter parfois vers le réseau de transport : en effet, les lieux d'injection ne sont pas nécessairement situés à proximité du réseau, ce qui complique la tâche des gestionnaires de réseaux et peut accroître le coût pour le consommateur.

Un réseau maillé à l'échelle européenne

Le réseau d'électricité est aujourd'hui fortement maillé, mais ce ne fut pas toujours le cas. En France, ce sont les collectivités territoriales, les communes particulièrement, qui ont été à l'origine de la construction de petits réseaux. Cela explique que ces communes soient aujourd'hui encore propriétaires des réseaux de distribution, même si c'est Enedis (ex ERDF, Électricité Réseau de Distribution France) qui en est le concessionnaire, hormis lorsque subsistent des Entreprises Locales de Distribution (régies municipales ou sociétés d'économie mixte) [1]. C'est dans l'entre-deux guerres que l'État est intervenu pour inciter ou obliger les réseaux locaux à s'interconnecter, à la fois pour alimenter des régions peu électrifiées et pour garantir une meilleure sécurité de la fourniture. On observera que le maillage du réseau permet de profiter d'un effet de « foisonnement », la puissance installée à l'échelle nationale pouvant alors être bien inférieure à la somme des puissances



installées chez tous les consommateurs. Après la Seconde Guerre mondiale, et bien avant la signature du Traité de Rome en 1957, les électriciens européens ont compris la nécessité de développer des interconnexions transnationales, dans un souci de secours mutuel essentiellement. Ainsi l'« Europe de l'électricité » a précédé l'Europe économique.

La libéralisation du secteur de l'électricité qui a commencé avec l'adoption de la Première Directive européenne en 1996, oblige les États-membres à ouvrir à la concurrence l'activité de production et celle de fourniture d'électricité. L'entreprise publique EDF, qui avait obtenu un quasi-monopole de la production, de la distribution et de la commercialisation de l'électricité et un monopole total du transport depuis la loi de nationalisation de 1946, n'est plus le seul producteur ni le seul fournisseur en France.

Les réseaux demeurent toutefois des « monopoles naturels », ce qui s'explique par l'existence de coûts fixes élevés, mais ils doivent être « régulés » au terme de la loi, et le tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité (TURPE) est une

composante importante du prix de l'électricité (un tiers environ du prix TTC pour un consommateur domestique) [2]. En France métropolitaine, c'est Réseau de Transport de l'Électricité (RTE) qui se charge du transport, c'est-à-dire du réseau public à haute tension, au-dessus de 50 000 volts. Enedis gère la distribution, c'est-à-dire les lignes à moyenne et basse tension, de moins de 50 000 volts, jusqu'aux utilisateurs finaux. Ces deux sociétés sont aujourd'hui encore des filiales d'EDF, à 50% pour RTE et à 100% pour Enedis, mais elles doivent se comporter comme des gestionnaires de réseaux indépendants et ne pas favoriser l'opérateur historique EDF. Dans les autres pays européens, ces gestionnaires de réseaux sont la plupart du temps des sociétés privées qui ont coupé tout lien avec leur maison-mère. Pour permettre la création d'un véritable marché européen de l'électricité, la Commission européenne incite les États-membres à développer les interconnexions transnationales, cette fois non pas seulement pour des raisons de sécurité, mais pour faciliter les échanges commerciaux d'électricité et permettre

une relative convergence des prix du kWh pour le consommateur.

Les investissements dans les réseaux sont coûteux et des congestions demeurent en Europe ; c'est en particulier le cas entre la France et l'Italie ou entre la France et l'Espagne, pour des raisons à la fois historiques et géographiques (existence de massifs montagneux qui rendent coûteuse la construction de lignes à haute tension). Les interconnexions sont meilleures avec l'Allemagne, ce qui explique que les prix de l'électricité sur les marchés de gros (là où s'échangent les kWh produits) soient souvent les mêmes en France, en Allemagne et en Belgique. À noter que l'interconnexion avec l'Angleterre, *via* une ligne à haute tension sous-marine, se fait en courant continu et non en courant alternatif. Il faut transformer le courant alternatif en courant continu à la frontière française et faire l'inverse à l'entrée du territoire anglais. Cela signifie que le réseau britannique et le réseau continental ne sont pas synchrones^(b).





Divergence des mix électriques

Chaque pays est libre de choisir son mix électrique et les moyens de le produire. De ce fait la structure des mix électriques est très différente d'un pays européen à l'autre, pour des raisons qui tiennent à la fois à la géographie et à l'histoire. En Allemagne, la structure de la production d'électricité était en 2015 la suivante : 42% à base de charbon et de lignite, 34% à base de renouvelables (solaire, éolien, biomasse, hydraulique), 14% à base de nucléaire, 9% à base de gaz naturel et 1% à base de fioul. En France, la même année, la structure était la suivante : 76% à base de nucléaire, 17% à base de renouvelables, 3% à base de gaz naturel, 3% à base de charbon, et 1% à base de fioul.

Cela explique que le prix payé par le consommateur final puisse être très différent d'un pays à l'autre, car le coût de ces énergies est différent [3]. Comme les renouvelables sont largement subventionnées *via* des prix d'achat garantis et que le surcoût de ces renouvelables par rapport aux prix du marché de gros est financé *via* des taxes supportées par le consommateur final, le prix TTC du kWh allemand payé par un consommateur domestique est près de deux fois plus élevé que le prix TTC du kWh français, la part du renouvelable étant bien supérieure en Allemagne et les prix d'achat garantis plus élevés [4]. Avec la chute des coûts de production des renouvelables, les subventions ont toutefois tendance à baisser fortement.

Rappelons que le prix TTC du kWh domestique se décompose comme suit en France : 36% pour le coût de production et de commercialisation du kWh, 30% pour le transport et la distribution et 34% pour les taxes (qui comprennent notamment le surcoût lié aux subventions accordées aux renouvelables). Notons aussi que les interconnexions européennes conduisent parfois le réseau français à importer de l'électricité renouvelable allemande prioritaire, au détriment d'une production nationale qui peut être d'origine nucléaire. Les arbitrages se font sur le marché de gros européen en fonction des coûts marginaux croissants des énergies. Le nucléaire se trouve ainsi évincé par une électricité renouvelable excédentaire, injectée à un coût quasiment nul mais avec un prix de soutien hors marché très élevé.

Les interconnexions ne règlent pas tout

La priorité donnée en France à l'énergie nucléaire au moment des chocs pétroliers (le Plan Messmer de 1974) explique que le chauffage des bâtiments recourt beaucoup à l'électricité, ce qui rend la demande d'électricité très sensible à la température. L'augmentation de la demande d'électricité en Europe en période de grand froid est due à près de 50% à la demande française. Ainsi un degré Celsius en moins en hiver, c'est 2 400 MW de puissance de plus appelée sur le réseau français. Si la disponibilité du parc nucléaire est momentanément moindre, ce qui fut le cas fin 2016 ou début 2017 à la demande de l'Autorité de Sûreté Nucléaire pour des raisons techniques, les opérateurs craignent un délestage, le prix de l'électricité sur le marché de gros s'envole. Les interconnexions sont alors saturées, elles ne suffisent pas à enrayer cette hausse, et les prix français et allemands peuvent diverger. La capacité d'interconnexion disponible entre la France et l'Allemagne est de l'ordre de 5 GW, et de 4 GW entre la France et la Belgique, pour une demande de pointe qui est de l'ordre de 90 GW en moyenne en France (elle a même atteint le pic de 102 GW en 2012).

Le développement des énergies renouvelables intermittentes (solaire et éolien) ne réglerait pas la question, car ces énergies ne sont pas nécessairement disponibles aux heures de pointe (le matin vers 9 h ou le soir vers 19 h, particulièrement en hiver). Il faut donc prévoir des centrales de réserve ou envisager un stockage à grande échelle, *via* l'électrolyse de l'eau par exemple^(c). Le développement des renouvelables oblige aussi à renforcer le réseau pour absorber cette électricité produite parfois loin des réseaux, et ce renforcement est coûteux. Cela engendre aussi des contraintes sur l'équilibre du réseau, puisque l'injection de ces renouvelables n'est pas modulable : c'est particulièrement vrai pour l'éolien, dont l'injection est plus aléatoire que celle du solaire. Raccorder une multiplicité de petits sites est aussi plus coûteux que de raccorder des centrales de grande dimension, d'autant que le réseau maillé français est aujourd'hui largement amorti ; créer une ligne nouvelle coûte beaucoup plus cher que renforcer une ligne existante.

Coexistence et coordination

Les réseaux demeurent au cœur du marché européen de l'électricité, à la fois pour des raisons de secours et des motifs économiques. Il faudra demain compter de plus en plus avec la coexistence de deux types de réseaux : d'une part de grands réseaux interconnectés à la maille européenne ; et d'autre part de petits réseaux développés à la maille d'un centre commercial, d'un lotissement, d'un groupe d'immeubles ou d'un quartier nouveau si l'autoproduction se développe, en particulier l'autoproduction collective qui est encouragée par la loi. C'est la coordination de ces deux modèles qui est un enjeu pour les gestionnaires de réseaux. La politique visant à encourager l'autoconsommation de photovoltaïque est un moyen d'atténuer ces contraintes, puisque le producteur n'aura théoriquement plus besoin d'injecter et de soutirer de l'électricité du réseau de distribution en place. Mais cela ne règle pas tout, car le producteur-consommateur voudra parfois demeurer connecté au réseau national interconnecté pour faire face à la défaillance de son installation lorsqu'il n'y aura ni vent ni soleil, du moins tant que des moyens individuels de stockage performants et bon marché ne seront pas au point. ■

Références

1. C. Bouneau *et al.*, *Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle*, Timée Éditions (2007).
2. J.-P. Hansen *et al.*, *Énergie : économie et politiques*, Éditions de Boeck (2015).
3. J. Percebois *et al.*, « Coût complet lié à l'injection d'électricité renouvelable intermittente. Approche modélisée sur le marché français *day-ahead* », *Revue de l'Énergie*, **632** (2016) 287-306.
4. J.-P. Hansen *et al.*, *Transition(s) électrique(s) ; ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire*, Éditions Odile Jacob, (2017).

a. (NdE) Sur les conséquences qu'entraîne la multiplication des véhicules électriques, voir « Voiture électrique, une aubaine pour la Chine », *Le Monde Diplomatique*, n°773 (août 2018).

b. Voir dans ce dossier l'article de N. Maïzi et E. Briens (p. 49).

c. Avec de l'électricité, on obtient de l'hydrogène que l'on peut combiner à du CO₂ pour obtenir du méthane, et stocker ce méthane pour l'utiliser ensuite en période de pointe.



Les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires

Annick Billebaud, physicienne, CNRS

Les recherches sur des nouveaux types de réacteurs nucléaires pouvant succéder aux réacteurs actuels sont des travaux de longue haleine. De nombreux nouveaux concepts sont à l'étude mais, depuis 2000, un forum international incite la recherche à se concentrer sur quelques systèmes prometteurs vis-à-vis des nouveaux critères que devraient remplir des réacteurs de 4^e génération. En France, les systèmes étudiés dans ce cadre sont les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et les réacteurs à sels fondus. Les réacteurs pilotés par accélérateur, s'inscrivant dans une stratégie d'incinération de déchets dans des systèmes dédiés, font également l'objet d'études depuis vingt ans.

Pourquoi étudier de nouveaux systèmes ?

Dans un cœur de réacteur nucléaire, les réactions à l'œuvre conduisant finalement à la production d'énergie thermique, et en particulier les fissions, sont bien connues et communes à tous les réacteurs. Cependant, les façons d'exploiter la réaction en chaîne, de la contrôler, de consommer le combustible, ou d'extraire la chaleur du réacteur peuvent être réalisées de différentes manières satisfaisant divers critères prioritaires que nous verrons plus loin.

Or, un nouveau concept, différant de ceux qui ont existé ou sont en cours d'exploitation, prend du temps à être démontré et validé ; il nécessite des travaux de modélisation et, à un moment ou à un autre, des expériences sur maquette puis la construction de prototypes pour étayer sa faisabilité. Il faut bien souvent plusieurs décennies de travail de recherche, de conception, de développement, d'expérimentation pour aboutir à un système prêt à passer à l'échelle industrielle, ce qui dépasse souvent la durée de la carrière professionnelle d'un individu.

Cette échelle de temps est la raison principale pour laquelle les organismes de recherche scientifique et technologique tentent d'anticiper les besoins futurs. Dans le cas du nucléaire, cela implique de revisiter d'anciens concepts de réacteurs ou d'en proposer de nouveaux à la

lumière des dernières connaissances et avancées. La France est un pays qui a de fortes compétences dans les sciences nucléaires et les technologies associées aux réacteurs, et possède donc un creuset favorable à ce type de recherches. L'objectif est de pouvoir disposer, au-delà de 2030 (voire 2040 ou 2050 pour les plus innovantes), de solutions ayant démontré leur faisabilité. Cette recherche explore et prépare de possibles solutions dans son champ de compétences, et ne présage pas des choix futurs qui reviennent aux politiques et à la société. Néanmoins, pour les mêmes raisons d'inertie temporelle, les choix des axes de recherche engagent quelque peu l'avenir.

Qu'est-ce que la « génération IV » ?

Les réacteurs nucléaires en cours d'exploitation en France font partie de ce qui est appelé la deuxième génération. On considère que les versions améliorées en cours de construction, comme l'EPR, sont la troisième génération. Dans de nombreux pays, des recherches prospectives sont menées pour imaginer des réacteurs de quatrième génération tournés vers le futur. Sous l'impulsion du Département de l'Énergie des États-Unis, un forum international, le GIF (en anglais, *Generation IV International Forum*, regroupant une douzaine de pays dont la France) s'est formé en 2000. Son objectif

est d'encourager les recherches à l'échelle internationale sur quelques concepts de réacteurs qui rempliraient des critères spécifiques, et dont la mise en œuvre éventuelle se ferait à l'horizon 2030-2040. Ces critères sont définis comme des objectifs d'amélioration nécessaires sur les plans économique, environnemental et social, si l'énergie nucléaire devait contribuer notablement à répondre à la demande énergétique mondiale du vingt-et-unième siècle. Ils portent sur quatre domaines principaux.

- Durabilité : ce critère a pour but de pouvoir inscrire l'énergie nucléaire dans le temps, en optimisant à la fois les ressources en combustible et la production de déchets, et donc leur gestion à long terme. En effet, les systèmes actuels sont essentiellement basés sur l'utilisation de combustible enrichi en uranium 235, ce qui nécessite de traiter de grandes quantités d'uranium pour extraire cet isotope ; il faut environ 200 tonnes d'uranium chaque année pour faire fonctionner un cœur de réacteur à eau sous pression de 1 GW qui fera fissionner seulement une tonne de matière. Dans le futur, on souhaite pouvoir utiliser un système qui permette d'utiliser tout le potentiel du minerai extrait et d'envisager ainsi plusieurs siècles de production d'énergie à l'échelle mondiale.
- Sureté et fiabilité : il s'agit ici, d'une part, de minimiser les risques d'accidents





nucléaires conduisant entre autres à des catastrophes comme celles de Tchernobyl ou Fukushima, et d'autre part, dans l'éventualité où un accident se produirait, de minimiser l'impact sur les populations et l'environnement. Pour cela, l'accent est mis sur la sûreté passive des systèmes et en particulier l'évacuation de la puissance résiduelle en cas d'arrêt du cœur.

- Compétitivité économique : dans un marché de l'énergie libéralisé où les sources de production sont de plus en plus diverses, un nouveau système doit pouvoir être compétitif.
- Résistance à la prolifération et protection physique : le détournement des installations et des matières nucléaires civiles à des fins militaires est un risque depuis longtemps sous haute surveillance internationale. À ce risque s'ajoute aujourd'hui celui d'actes malveillants, voire terroristes. Par conséquent, il est proposé d'intégrer dès la conception des nouveaux systèmes une protection contre le vol de matières radioactives et les actes de sabotage qui pourraient intervenir dans les installations ou les transports de matière.

Quels systèmes pour répondre à ces critères ?

Un réacteur nucléaire se définit par rapport à ses trois composantes principales que sont : le **combustible**, non seulement sa nature mais aussi sa géométrie, sa composition, sa forme chimique ; le **modérateur**, matériau présent dans le cœur permettant d'optimiser l'utilisation du combustible en ralentissant plus ou moins les neutrons ; et le **caloporteur**, qui sert à transférer la puissance thermique du cœur vers les échangeurs pour la transformer en électricité. Pour la plupart des réacteurs actuels, l'eau joue à la fois le rôle de modérateur et de caloporteur. Il existe un nombre très élevé de combinaisons possibles à partir de ces trois éléments, et donc de nombreuses variantes de réacteurs nucléaires potentiels. Au cours de l'histoire du nucléaire, quelques centaines ont été étudiées sur le plan théorique mais, au total, moins d'une vingtaine ont fait l'objet d'une construction permettant la production de puissance. Pour répondre aux nouveaux critères les possibilités restent nombreuses. Le GIF a procédé à une sélection de six concepts jugés les plus prometteurs, sur lesquels concentrer les recherches.

Trois de ces concepts sont à neutrons dits « rapides », c'est-à-dire conservant autant que possible l'énergie des neutrons telle qu'à leur création. Ceci a plusieurs avantages vis-à-vis du critère de durabilité. En effet, afin d'optimiser l'utilisation du minerai d'uranium, il est possible d'envisager la régénération du combustible, en transformant les noyaux d'uranium 238 dits « fertiles » en noyaux de plutonium 239 « fissiles »^(a). Si chaque noyau d'uranium 238 produit un noyau de plutonium 239 par capture d'un neutron, on utilise ainsi tout le potentiel énergétique du minerai d'uranium, composé à 99,3% d'uranium 238. Les neutrons rapides permettent de minimiser les captures parasites de neutrons et ainsi de maintenir la criticité du système et la régénération du plutonium.

Ces réacteurs à neutrons rapides peuvent utiliser différents fluides modérateurs et caloporteurs ; les trois concepts étudiés sont le réacteur rapide au sodium (*Sodium Fast Reactor*, SFR), le réacteur rapide au plomb (*Lead Fast Reactor*, LFR) et le réacteur rapide à gaz (*Gas Fast Reactor*, GFR). Ils présentent tous une bonne efficacité thermique. Le sodium combine une température de fusion basse avec un point d'ébullition très élevé, ce qui offre une bonne inertie thermique au circuit primaire. Cependant, le SFR et le LFR doivent faire face aux propriétés chimiques d'un métal liquide : réactivité vis-à-vis de l'eau et de l'air pour le sodium, corrosion pour le plomb. Le troisième concept a l'avantage d'utiliser un gaz chimiquement inerte, l'hélium ; en revanche, il a de ce fait une assez faible inertie thermique en cas d'arrêt de la circulation forcée : cela n'est pas optimal pour la sûreté, et nécessite le développement d'un combustible très particulier.

Le concept de réacteur à très haute température (*Very High Temperature Reactor*, VHTR) fonctionne entre 800 et 1 000 °C. Il utilise des neutrons plus lents, dits « thermiques ». Il est lui aussi refroidi à l'hélium, mais modéré avec du graphite. Son avantage principal est que le gaz peut être directement utilisé dans une turbine sur le circuit primaire. La chaleur produite par ces systèmes peut également être utilisée de différentes manières sur le plan industriel, notamment pour la production d'hydrogène.

Un autre concept, revisitant celui des réacteurs à eau, est également étudié : le réacteur à eau supercritique (*SuperCritical*

Water cooled Reactor, SCWR) qui fonctionne avec une température et une pression situées au-dessus de celles du point critique de l'eau (374 °C, 221 bars), d'où son nom ; il peut être conçu pour des neutrons soit thermiques, soit rapides. La vapeur produite, extrêmement chaude, peut être envoyée directement dans la turbine et, après condensation, l'eau est renvoyée dans le cœur. Ce procédé bénéficie de la longue expérience des centrales thermiques à combustible fossile utilisant l'eau supercritique. Il a un avantage de rentabilité économique car son efficacité thermique peut s'élever jusqu'à 44%, à comparer aux 33% des réacteurs à eau sous pression actuels. Cependant, des défis technologiques restent à relever, comme : la modélisation des transferts de chaleur lors des accidents, en cas de dépressurisation et de perte des conditions supercritiques ; la qualification des matériaux aux hautes températures, et notamment des aciers pour les gaines du combustible ; et la démonstration de la sûreté passive du système.

Le sixième concept, un des plus innovants, utilise les sels fondus (*Molten Salt Reactor*, MSR) : il est est présenté plus loin.

Les systèmes de quatrième génération étudiés en France

Sur la base d'estimation de ressources limitées en uranium, et d'une utilisation importante du nucléaire au niveau mondial, la France avait imaginé dès les années 1960 une stratégie qui commençait par l'exploitation des réacteurs thermiques à uranium enrichi. L'idée était de constituer un stock de plutonium (noyaux produits pendant le fonctionnement), permettant ensuite d'alimenter des réacteurs à neutrons rapides surgénérateurs et d'assurer une production d'énergie pérenne. La France a ainsi très tôt concentré ses efforts de recherche sur les réacteurs à neutrons rapides, et a fait le choix technique du sodium liquide comme caloporteur, portant le concept jusqu'à sa réalisation. Cependant, seules deux unités au sodium liquide ont été construites à l'échelle industrielle en France : Phénix (1973-2010), puis Superphénix, arrêté prématurément en 1997 pour des raisons industrielles, économiques, et politiques, associées à un contexte post-Tchernobyl. Ce type de réacteur fait à nouveau l'objet



de recherches dans le cadre de la quatrième génération, en raison de ses qualités indéniables vis-à-vis des critères de ressources et de déchets, et avec l'avantage de reposer sur une technologie déjà mise en œuvre dans plusieurs pays. Ainsi le CEA, EDF et Framatome ont consacré d'importants efforts de recherche pour revisiter ce concept, avec notamment le projet d'un réacteur au sodium de démonstration, de 600 MW, ASTRID.

Le concept de réacteur à sels fondus (MSR) a été étudié aux États-Unis à partir des années 1950 puis abandonné dans les années 1970. Dans ce système, le combustible est dissous dans un sel fluoré liquide, qui joue ainsi aussi le rôle de caloporteur et peut circuler directement dans les échangeurs de chaleur. Réacteur modéré par du graphite dans ses premières versions, il a été revisité récemment comme un réacteur à neutrons rapides par des équipes de recherche académique françaises, notamment pour le rendre régénérateur avec un retraitement en ligne simplifié, en utilisant un combustible thorium et uranium. Le combustible sous forme de sels fondus présente de nombreux avantages : d'une part, grâce aux bonnes propriétés thermodynamiques du sel : température d'ébullition élevée, bonne capacité calorifique et conductivité thermique ; et d'autre part, parce que, en cas de dysfonctionnement du système, le sel liquide peut être reconfiguré de façon passive : par exemple dispersé dans un réseau de réservoirs dimensionnés pour tenir de hautes températures, permettant différentes options pour évacuer sa puissance résiduelle. La possibilité de retraiter le sel en ligne permet de maintenir dans le cœur un bilan neutronique favorable à l'utilisation de différents combustibles. En totale rupture technologique avec les réacteurs existants et bien éprouvés, il demande une relecture complète de l'approche de sûreté, et un considérable effort de recherche pour lever les verrous d'abord scientifiques, puis technologiques, pour tout ce qui a trait au sel et aux matériaux (corrosion, retraitement, physico-chimie, ...), et à la neutronique d'un combustible en mouvement (combustible-calporteur, pilotage de la criticité), autant d'étapes avant un prototype industriel. L'inertie naturelle des filières nucléaires est un frein au déploiement de ces technologies très innovantes, même si elles représentent potentiellement des solutions intéressantes pour le futur.

Les réacteurs pilotés par accélérateur

Sans faire partie des systèmes de quatrième génération étudiés par le GIF, les réacteurs pilotés par accélérateur (*Accelerator Driven System*, ADS) font également l'objet d'intenses études de faisabilité en raison de leur potentiel dans un scénario où l'on souhaiterait incinérer, dans des systèmes dédiés, certains déchets nucléaires produits par les filières actuelles : ceci permettrait de réduire leur radiotoxicité et leur chaleur résiduelle et par conséquent les surfaces de stockage. Ces réacteurs ont la particularité d'être « sous-critiques », c'est-à-dire que la réaction en chaîne ne peut ni démarrer ni s'entretenir spontanément sans l'apport de neutrons externes. Dans la plupart des concepts, un accélérateur fournit des protons de haute énergie, qui vont frapper une cible faite d'un métal lourd (par exemple du plomb) située au cœur du réacteur. Cela produit des réactions nucléaires qui libèrent un grand nombre de neutrons. Ceux-ci vont créer des fissions dans le cœur et ainsi générer une certaine puissance qui pourra devenir nulle sur commande, par l'arrêt de l'accélérateur. Ce contrôle de la puissance par l'accélérateur permet d'utiliser des combustibles un peu exotiques comme les actinides mineurs^(b) dont les propriétés ne permettent pas l'usage en réacteur critique. L'ADS est alors exploité en version rapide, avec du plomb liquide comme modérateur-calporteur. Le principal défi à relever pour la mise en œuvre de ces systèmes (en dehors de la chimie du plomb liquide, point commun avec le LFR) est d'atteindre un niveau de fiabilité du faisceau de particules encore jamais atteint. Ces réacteurs sont étudiés depuis plus de vingt ans, en particulier en Europe et en France, avec une intense R&D sur les accélérateurs linéaires. La construction en Belgique d'un démonstrateur d'environ 100 MW, MYRRHA, est désormais programmée en deux étapes : une pour l'accélérateur en 2026 et l'autre pour le réacteur en 2033.

Conclusion

Les recherches sur de nouveaux systèmes de production d'énergie nucléaire ne se limitent pas aujourd'hui à celles réalisées dans le cadre du GIF, dont l'initiative a eu le mérite de fixer des critères d'évolution des concepts toujours plus exigeants,

notamment vis-à-vis de la sûreté nucléaire et de la question des déchets, et de relancer une R&D concertée entre les pays ayant une industrie nucléaire. On peut apprécier que les réticences les plus fortes exprimées par la société envers le nucléaire aient été d'une certaine manière, prises en compte par la recherche. Cependant, développer de nouveaux réacteurs jusqu'au niveau industriel face aux progrès réalisés par les autres sources d'énergie, notamment renouvelables, ne peut s'affranchir des aspects économiques. C'est pourquoi, en dehors de ces nouveaux concepts, de gros efforts sont également mis, notamment par l'industrie française, sur l'étude de réacteurs de troisième génération basés sur l'optimisation des réacteurs à eau actuels.

En résumé, les options pour l'avenir du nucléaire sont nombreuses. Mais l'effort de recherche, qui doit être anticipé sur des décennies, ne peut être mené à force égale sur chaque système. L'enjeu est de mener une R&D pouvant aboutir à un système industriel sans s'interdire d'explorer des voies plus audacieuses pour le futur. ■

En savoir plus

- *Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium*, CEA, Monographie de la DEN, Éditions Le Moniteur (2014).
- *Les réacteurs nucléaires à caloporteur gaz*, CEA, Monographie de la DEN, Éditions Le Moniteur (2006).
- "Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems", Gen. IV International Forum, January 2014, NEA/OCDE.
- Gen. IV International Forum, www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public
- « Vers un cycle du combustible nucléaire durable : Évolution et tendances », NEA/OCDE (2012) N°6981. www.oecd-nea.org/ndd/reports/2012/6981-trends-sustainability-fuel-cycle-fr.pdf
- "Perspective on the use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle", NEA/OCDE (2015) N°7224. www.oecd-nea.org/science/pubs/2015/7224-thorium.pdf

a. Un noyau d'uranium 238 qui capture un neutron donne un noyau d'uranium 239, noyau radioactif, qui se désintègre en un noyau de plutonium 239.

b. Noyaux lourds très radiotoxiques créés par captures neutroniques dans les réacteurs.

Quelques questions ouvertes et points critiques

... qui n'ont pas été traités dans les articles précédents

François Graner, physicien, CNRS, et Stefano Matthias Panebianco, physicien, CEA
Éditeurs du dossier

Lectrice, lecteur, peut-être avez-vous en tête un point important qui mériterait de contribuer au débat sur le nucléaire civil (français ou international), mais qui ne figure pas dans les pages précédentes. C'est frustrant, mais inévitable ; les contraintes de taille d'un dossier comme celui-ci nous interdisent de traiter le sujet de manière exhaustive. Nous esquissons ici une liste de ces points non traités. Par ailleurs, des questions, selon nous, restent encore très ouvertes ; nous tentons d'en identifier les aspects les plus critiques.

Des choix qui engagent à long terme

Le nucléaire civil, peut-être plus que d'autres activités industrielles, engage les générations futures, au sens qu'elles devront longtemps être capables de mobiliser de l'énergie, de l'argent, du savoir-faire, de la main d'œuvre et des terrains pour traiter l'impact de nos centrales actuelles, qu'elles finissent leur activité avec ou sans incident. C'est un héritage de dettes alors qu'elles n'en auront même pas eu les bénéfices, à moins qu'à leur tour elles trouvent assez de matière et d'énergie à y consacrer. Mais alors, est-ce une chaîne sans fin, et comme telle est-elle destinée à finir dans une bulle qui éclate ?

Comment la société, dans sa diversité, peut-elle définir collectivement et intégrer de tels engagements et les enjeux

correspondants, moraux et pratiques, à très long terme ? Les décisions politiques nécessitent de peser globalement les inconvénients du nucléaire (avérés ou en tant que risques) par rapport aux dommages sur le climat, déjà avérés, apportés par toutes les sources d'énergie. Pour nourrir de telles décisions, il serait utile d'arriver à un consensus sur la rentabilité du nucléaire au sens énergétique^(a) ainsi que sur son bilan carbone complet, incluant toute la filière y compris le démantèlement, et de les comparer à ceux d'autres formes d'électricité ou d'énergie en général.

Le débat public est notoirement difficile, pour des raisons de fond (et pas seulement à cause du sectarisme dont chaque camp tend à accuser l'autre). D'une part parce qu'il s'agit de mettre en regard, en les

pondérant, des arguments de nature différente, dont beaucoup ne sont pas disponibles ou ne font pas consensus. Mais aussi parce que les décisions sont souvent prises dans un cadre national, alors que les conséquences, en termes d'utilisation de l'énergie ou de risque d'accident, se mesurent également aux échelles locales ou internationales.

Le nucléaire nécessite une stabilité des relations internationales, et en retour a des conséquences sur la géopolitique. Les accords entre l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) font l'objet de critiques de la part d'associations.

Rien que pour la filière nucléaire française, on peut relever : ses liens avec l'embargo sur l'Afrique du Sud à l'époque de l'apartheid ; le contentieux avec l'Iran autour d'Eurodif ; les relations avec les



régimes des pays producteurs comme le Kazakhstan ou le Niger ; pour ce dernier pays, les conséquences concrètes de l'extraction minière pour les habitants ; l'envoi de militaires français ou de sociétés militaires privées dans le Sahel ; la proposition française de vendre des centrales nucléaires à la Libye, suivie peu après d'une intervention militaire qui aboutit à la chute du gouvernement.

Des questions pratiques

Doit-on sortir du nucléaire, et le peut-on ? Selon les partisans du maintien, il est hasardeux de diminuer la production d'électricité nucléaire : qui peut prédire si l'équilibre industriel de la filière et la sûreté d'approvisionnement en énergie seront maintenus ? Ils mettent la question climatique, urgente, en priorité avant la

question des déchets, qui est à plus long terme. Les partisans de la sortie expliquent que le nucléaire a des impacts environnementaux élevés au regard du fait qu'il ne représente actuellement que 3% de l'énergie mondiale, qu'il est lui-même peu robuste au réchauffement^(b) et que sa suppression pourrait être compensée autrement, y compris par la décroissance de la consommation énergétique, ou en remplaçant là où c'est facile (par exemple pour le chauffage) l'électricité par des productions d'énergie à meilleur rendement. Les scénarios globaux et locaux peuvent nous aider à peser ces enjeux^(c), mais la décision finale est d'ordre plus politique que technique.

La fin éventuelle de l'exploitation de la filière nucléaire pourrait être largement déterminée par notre réaction à la limitation de la ressource en uranium, à

l'accumulation des déchets, à l'augmentation du nombre de centrales à démanteler. En octobre 2018, un rapport de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) [1] indiquait que « l'arrêt de réacteurs chargés de combustibles MOX peut induire une saturation à court terme des entreposages de combustibles usés. Toutefois, un scénario incluant l'arrêt de réacteurs chargés uniquement en combustibles à base d'uranium pourrait retarder voire empêcher la saturation de ces entreposages. » Cela pose la question des contraintes techniques et des conséquences qu'une éventuelle sortie du nucléaire comporterait.

Les techniques employées sont sujettes à des débats de natures très variées. Quels sont les avantages et inconvénients des réacteurs de troisième génération en construction, les EPR^(d) ? Faut-il inclure

>>>



dans la réflexion des combustibles différents de l'uranium : quelles perspectives offrent le plutonium (génération IV, sur-générateurs) ou le thorium (dont les réserves sont plus importantes que celles d'uranium) ? Que faut-il penser des prototypes de recherche sur la fusion (ITER), sur les réacteurs rapides (ASTRID) ou sur les sources à spallation (MYRRHA) dans une perspective d'incinération de certains déchets ? Resteront-ils des prototypes ou déboucheront-ils sur des applications réalistes ?

Les décisions françaises

Cette question des déchets suscite à son tour un débat sans fin⁽⁶⁾. La décision politique française a mis en avant le stockage en profondeur pour les déchets de haute activité à vie longue (HAVL). Or ce stockage n'est pas purement passif : le risque d'échauffement et le dégagement d'hydrogène imposent de ventiler les galeries, ce qui requiert que l'alimentation électrique soit maintenue (pas de coupure de plus d'une semaine) pendant des centaines d'années ; à son tour, cette maintenance requiert une stabilité politique et énergétique. Sans parler de la stabilité géologique, qui, elle, doit être préservée sur des dizaines ou centaines de milliers d'années. Les opposants à ce choix considèrent que le stockage profond serait largement irréversible, alors qu'il n'aura pas été testé au préalable en grandeur réelle, et sans possibilité fiable de communiquer avec les générations futures. Ils soulignent aussi que les plans actuels de stockage ne concernent que les déchets du parc actuel : si on continue à en produire, aura-t-on assez de matériaux (verre borosilicaté et acier), d'énergie et de place pour organiser leur stockage ?

Les mêmes décideurs politiques français ont considéré, lors du moratoire de la loi Bataille, que le stockage n'est pas la seule option. Ils ont préconisé de développer des systèmes nouveaux pour incinérer, recycler ou transmuter ces mêmes déchets de haute activité à vie longue. Contrairement au stockage, ces systèmes peuvent difficilement s'accommoder de ce que ces déchets restent mélangés à d'autres : il faut d'abord les séparer, ce qu'on sait faire techniquement, mais pas encore à échelle industrielle (sans parler de la rentabilité, qui ne fait pas partie des objectifs de l'opération). Comment la recherche sur les systèmes incinérateurs

s'articulerait-elle avec le stockage en profondeur ?

Des choix techniques portant sur l'ensemble de la filière ont été opérés par l'exécutif français, et ont été débattus, entre autres, au sein de l'Office Parlementaire de l'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST). Cependant, les choix politiques sur les questions de fond et de long terme n'ont pas encore été débattus, amendés et votés par le Parlement en tant que tels, à l'exception d'un dossier très visible, celui des déchets. L'importance des sujets politiques considérés requiert des procédures collectives démocratiques de débat et de décision, en toute transparence et en confiance, ce qui ne semble pas faire consensus actuellement au sein de la communauté française. Est-il envisageable d'améliorer le fonctionnement démocratique, et de mieux intégrer les retours d'expérience afin de procéder aux corrections *a posteriori* ? Et comment gère-t-on, politiquement et financièrement, des risques à la fois très rares et aux conséquences très importantes ?

La structure de la filière française

La transparence et la confiance doivent porter également sur les opérateurs et leurs vérificateurs, et là aussi le consensus semble loin d'être atteint. Le taux d'erreurs et d'incidents de la filière nucléaire française, clairement meilleur que dans beaucoup d'autres industries et activités humaines, pourrait toujours sembler trop élevé au regard des attentes de la communauté. C'est en particulier le débat soulevé par les questions de fissures et de fragilité de l'acier des cuves des réacteurs, y compris celle de l'EPR.

L'indépendance actuelle de l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN) et de l'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN) est soulignée dans les vérifications opérées au jour le jour, mais les critiques s'interrogent sur la capacité qu'aurait l'ASN d'imposer une remise en cause drastique de toute la filière si elle le jugeait nécessaire. Quelle est la sincérité des documents de vérification, et quel est l'impact concret du Haut comité pour la transparence [2] ? Pourquoi le secret-défense, qui est en lui-même un enjeu démocratique du fait qu'il protège les décideurs vis-à-vis de leurs concitoyens, est-il utilisé autant pour le nucléaire civil [3] que pour ce qui appartient réellement

au domaine militaire ? Les liens (notamment autour des ingénieurs du corps des Mines) entre les structures étatiques, les institutions de régulation et les opérateurs font-ils désormais partie du passé⁽⁷⁾ ?

Même si cela n'a pas de conséquence directe sur les futures décisions à prendre, il peut être utile de rappeler l'historique de la filière française, qui n'est traité que partiellement dans ce dossier. La création du CEA et du centre de Marcoule, le choix des réacteurs à eau pressurisée, le Plan Messmer de nucléaire civil décidé en 1974 à la suite du premier choc pétrolier, la construction et les difficultés des surgénérateurs et de l'EPR : en toile de fond se déroule la mise en place parallèle d'un secteur industriel complet et d'un mouvement qui le conteste. Il serait intéressant d'approfondir cet historique de la filière française, y compris au sein du contexte international.

La nécessité de raisonner à long terme soulève la question de la stabilité politique et financière des décideurs et opérateurs, qu'ils soient publics ou privés. L'un des premiers arguments politiques contre le nucléaire (ravivé [4]) était qu'il entraînait l'instauration d'un État centralisé et autoritaire. Gérer le nucléaire nécessite-t-il un certain type d'État ou d'institutions ? Quant aux opérateurs du nucléaire français désormais de droit privé, ils sont en pleine réorganisation, et engagés sur des dossiers internationaux lourds et délicats⁽⁸⁾. Faudrait-il les mettre à l'abri de la concurrence ?

Santé et environnement

Quelques pages sur l'impact du nucléaire sur la santé et l'environnement ne peuvent suffire à épuiser le débat. Les conséquences (qui ne sont pas nécessairement spécifiques au nucléaire) de l'exploitation des mines sur les pays producteurs et leurs travailleurs suscitent des oppositions, par exemple à Ganbaatar en Mongolie, à Faléa au Mali, ou à propos des droits des Aborigènes australiens [5].

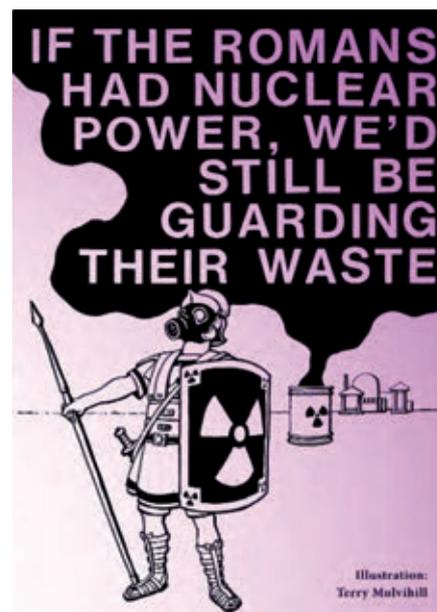
L'impact d'un accident, très peu évoqué dans ce dossier, peut apparaître différent selon qu'il s'envisage à l'échelle d'une semaine, d'un an, ou d'une génération. Les retours d'expérience ont été tirés des accidents de Windscale/Sellafield, Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima, en fonction des informations disponibles. La radioactivité en mer affecte la biodiversité marine et la pêche, celle dans l'air peut

toucher directement les individus et contaminer les sols, avec des effets sur l'alimentation. Si pour Windscale les conséquences ont surtout été en termes d'environnement, Tchernobyl et Fukushima ont aussi révélé (au-delà de profondes différences dans la capacité de réaction et de gestion des États et entreprises) l'impact sur les relations sociales, les liens familiaux, la psychologie personnelle, les activités économiques, la confiance dans les autorités et les médias, les animaux, qui ne peuvent être ramenés à un bilan uniquement financier^(h). Pour Tchernobyl, le nombre de personnes touchées, l'étendue des dommages sur leur santé et le nombre de morts restent controversés. Pour Fukushima, la densité d'habitation dans les zones affectées a mis en évidence, tant de la part des autorités que des personnes concernées, les difficultés des décisions d'évacuation ou de retour, ainsi que des actions de la vie courante : habiter, manger, jouer, respirer, travailler, se déplacer.

La probabilité d'un accident futur touchant un réacteur français est difficile à évaluer ; le parc a eu cinq accidents qui auraient pu devenir graves et qui ont été tous maîtrisés⁽ⁱ⁾. Outre les erreurs humaines, qui ne peuvent être exclues, et les événements naturels extrêmes, comment tenir compte de possibles intrusions volontaires, du type de pilote suicide ou terrorisme sur une centrale ou une piscine, dans une époque où les moyens d'attaque sont en évolution rapide ? Le débat sur la sûreté et la sécurité^(j) porte aussi sur le vieillissement du parc des centrales. En novembre 2017, la presse française s'est fait l'écho d'une part des risques sismiques et de la vétusté affectant l'unique centrale nucléaire arménienne, à Metsamor ; et d'autre part de la pollution au ruthénium 106 qui a ramené l'attention sur le complexe nucléaire Maiak, à Kychtym (Russie), déjà siège en 1957 d'un grave accident longtemps gardé secret. Toute extrapolation au parc français est délicate.

En guise de conclusion

Pour terminer sur des questions ouvertes, nous rappellerons celles qui ont été posées il y a tout juste 40 ans dans la préface d'un dossier spécial sur le nucléaire [6] : « De combien d'énergie avons-nous besoin ? Y a-t-il un rapport entre consommation d'énergie et niveau de vie, consommer plus et vivre mieux ? Qui manque d'énergie, qui en gaspille, et pourquoi ? De quelles énergies avons-nous besoin ? Laquelle, pour une utilisation donnée, constitue le meilleur choix du point de vue de la collectivité et des personnes ? Y a-t-il un rapport entre formes d'énergie et formes de société ? Sur quelles énergies pourrions-nous compter pour demain ou même pour tout de suite ? Dans quelle mesure l'énergie nucléaire nous est-elle indispensable ? Le programme électronucléaire français est-il réaliste ? Est-il réaliste de vouloir le stopper ? » ■



Traduction :
Si les Romains avaient eu l'énergie nucléaire, nous serions encore en train de surveiller leurs déchets.

- Le « retour sur investissement en énergie » (EROI) d'une filière est le rapport de l'énergie qu'elle fournit à la quantité d'énergie utilisée pour la production.
- Les centrales doivent être refroidies ; en période de canicule elles doivent parfois être arrêtées, et cela arrive même en Suède.
- Voir dans ce dossier l'article de S. Bouneau (p. 46), et celui de N. Maïzi et F. Briens (p. 49).
- La première génération de réacteurs nucléaires est celle, désormais terminée, à l'uranium naturel et au graphite-gaz (UNGG). Les réacteurs à eau pressurisée en cours d'exploitation en France font partie de ce qui est appelé la deuxième génération. On appelle « troisième génération » les réacteurs à eau pressurisée en cours de construction dont, entre autres, la sécurité a été améliorée, comme le réacteur pressurisé européen (EPR).
- Sur la question des déchets, voir plusieurs articles dans ce dossier, en particulier ceux de J.-Y. Le Déaut (p. 13) et de B. Romagnan (p. 14), et l'entretien croisé avec C. Stéphan et P. Barbey (p. 19).
- Greenpeace dénonce actuellement de tels liens au Conseil d'État (*Le Canard Enchaîné*, 3 octobre 2018).
- L'affaire Uramin (scandale financier impliquant Areva), les difficultés des chantiers EPR peuvent avoir des impacts significatifs sur ces opérateurs et leurs perspectives.
- Pour l'estimation du coût d'un accident, voir dans ce dossier l'article d'A.-S. Dessillons (p. 29).
- St-Laurent-des-Eaux les 17 octobre 1969 et 13 mars 1980, Le Bugey le 14 avril 1984, Civaux le 12 mai 1998, Le Blayais le 27 décembre 1999.
- Le rapport de la Commission d'enquête sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires, dit « Rapport Pompili » (28 juin 2018), a largement débordé le cadre de la sûreté pour aborder différents aspects de la filière. EDF y a répondu sur plusieurs dizaines de points : www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/Notes%20d'info/note_info_pompili.pdf. Barbara Pompili y a répondu à son tour : <https://barbarapompili.fr/reponse-a-edf-concernant-rapport-de-commission-denquete/>

Références

- Rapport de l'IRSN sur le cycle du combustible nucléaire en France, 24 octobre 2018, www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20181024_Publication-rapport-IRSN-sur-cycle-du-combustible-nucleaire-en-France.aspx
- www.htcism.fr
- M. Prieur, « Nucléaire, information et secret défense, Débat public - Caen, 14 novembre 2005 », *Revue juridique de l'Environnement* 3 (2006) 289-301, www.persee.fr/doc/rjenv_0397-0299_2006_num_31_3_4550
- <https://zad.nadir.org/spip.php?article6177>
- Voir par exemple : <http://falea.eu> ; <http://mcca-ain.org/index.php/cris-de-victimes> ; « Australie, colonie de l'uranium », *Revue Z*, 6 (2012) 72.
- M. Bosquet (ou A. Gorz, pseudonymes de G. Horst) ; « Au soleil de l'an 2000, peut-on stopper le nucléaire ? », *Que choisir ?*, N° spécial Énergie (février 1978).

Pour aller plus loin...

Quelques livres et recueils

Andra

Tout savoir sur la gestion des déchets radioactifs, 2017, téléchargeable gratuitement ici : www.andra.fr/sites/default/files/2017-12/3371.pdf

Vladimir Babenko

Après l'accident atomique, Tatamis, 2012

Bertrand Barré (Areva), Sophia Majnoni d'Intignano (Greenpeace). Médiateur : Claude Stéphan

Faut-il renoncer au nucléaire ?,

Coll. « Le choc des idées », Le Muscadier, 2013

Bruno Barrillot

Le complexe nucléaire : des liens entre l'atome civil et l'atome militaire, Sortir du Nucléaire, 2005

Bernard Bonin

Le nucléaire expliqué par des physiciens, EDP Sciences, 2012

Géraud Bournet

Franckushima, Lutopiquant, 2016

Clés du CEA

Les réacteurs nucléaires, 2016, téléchargeable gratuitement ici : www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/livrets/reacteurs-nucleaires.aspx

Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deléage, Daniel Hémy

Une histoire de l'énergie, Flammarion, 2013

Corinne Lepage

L'État nucléaire, Albin Michel, 2014

Philippe Guetat

Nucléaire : entre réalités et émotions,

2016, téléchargeable gratuitement ici : www.researchgate.net/publication/304037943_nucleaire_entre_realites_et_emotions_V4_ill

Estelle Iacona, Jean Taine, Bernard Tamain

Les enjeux de l'énergie – Après Fukushima, 2^e édition, Dunod, 2012

Hervé Nifenecker

Le nucléaire : un choix raisonnable ?, EDP Sciences, 2012

André Paris

Contaminations radioactives : atlas France et Europe, Yves Michel, 2016

Patrick Piro

Le nucléaire, une névrose française, Les Petits Matins, 2012

Henri Prévot

Avec le nucléaire. Un choix réfléchi et responsable, Seuil, 2012

Annie Thébaud-Mony

L'industrie nucléaire : sous-traitance et servitude, Inserm-EDK, 2000

Sezin Topçu

La France nucléaire. L'art de gouverner une technologie contestée, Seuil, 2013

Maurice Vaisse (Sous la direction de)

La France et l'atome : études d'histoire nucléaire, Bruylant, 1994

Dossiers, articles et rapports

« Nucléaire. C'est par où la sortie ? »

Les dossiers du Canard enchaîné, n°121, 2011

« Les centrales nucléaires »

P. Chambadal, Armand Colin, Paris, 1957

« Golfech - le nucléaire - implantation et résistances », Centre de Recherches sur l'Alternative Sociale (CRAS), Toulouse, 1999, téléchargeable gratuitement ici : https://cras31.info/IMG/pdf/golfech_le_nucleaire.pdf

« Rapport sur le démantèlement des installations nucléaires de base », Conseil supérieur de la sûreté et de l'information nucléaires, 2007,

téléchargeable gratuitement ici : www.asn.fr/Media/Files/Rapport-du-CSSIN-sur-le-demantelement-des-installations-nucleaires-de-base

« L'échéance des 40 ans pour le parc nucléaire français », Yves Marignac, WISE-Paris, 2014,

téléchargeable gratuitement ici : <https://cdn.greenpeace.fr/site/uploads/2017/02/greenpeace-rapport-echeance-40-ans.pdf>

