

REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE



LA REVUE D'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA SFEN

.04 EN DIRECT

Les actualités du nucléaire
en France et dans le monde

.52 DÉCRYPTAGE

Où en sont les Français
avec le changement climatique ?

.70 REPORTAGE

Jules Horowitz,
l'autre réacteur en chantier

.11 DOSSIER COP21

Nucléaire et climat





08:20

**LE PROGRÈS
C'EST
AVANCER
SANS FAIRE
DE BRUIT**

EN CHARGE
 78%



EDF ET SES FILIALES CONÇOIVENT LE FUTUR RÉSEAU DE RECHARGE AUTOMOBILE

Nous déployons des réseaux de bornes de recharge et nous concevons des batteries plus performantes pour circuler autrement. D'ici 2015, 5000 bornes de recharge électrique seront installées partout en France. En partenariat avec les constructeurs automobiles, nous faisons entrer le véhicule électrique dans la ville.

pulse.edf.com

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE

ÉDITEUR SFEN

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

DIRECTRICE DE LA PUBLICATION Valérie Faudon

RÉDACTRICE EN CHEF Isabelle Jouette

RÉDACTION SFEN Boris Le Ngoc, Sophie Prévot

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

ABONNEMENT

Tél. : 09 72 43 91 00 - Fax : 01 39 38 22 88
abo-rgn@grouperougevif.fr
Adhérents SFEN
Tél. : 01 53 58 32 10 - Fax : 01 53 58 32 11
Bimestriel - 6 numéros par an
Prix de l'abonnement (6 numéros)
France : 106 € ttc
Étranger (UE) - exonéré TVA : 126 €
Étranger (UE et hors UE) : 128 € ttc

VENTES AU NUMÉRO

Tél. : 09 72 43 91 00 - Fax : 01 39 38 22 88
Prix du numéro
France : 20 € TTC
Étranger (UE) - exonéré TVA : 23 €
Étranger (hors UE) : 25 € TTC

PUBLICITÉ

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

TIRAGE

2 500 exemplaires
Impression : Abelia

© couverture : EDF,
Vue sur la centrale de Penly

Numéro d'enregistrement à la
commission paritaire : 0719 G 808 91
ISSN 0335 5004

La Revue générale nucléaire
créée le 1^{er} février 1975 à l'initiative
de la Société française d'énergie
nucléaire - SFEN (membre de la
Société Européenne de l'énergie
nucléaire - SEEN) est destinée à la
publication d'articles scientifiques,
techniques et économiques et
d'informations sur l'énergie
nucléaire dans toutes ses
applications civiles.
Périodicité bimestrielle

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



.04 EN DIRECT

Les actualités du nucléaire, en France et dans le monde : économie, recherche, formation, filière, lectures... Et le courrier des lecteurs

.11 DOSSIER

COP21

Nucléaire et climat

À moins de 150 jours de la COP21, un dossier spécial consacré à l'importance que le nucléaire, énergie bas carbone, peut jouer dans la lutte contre le changement climatique.

.52 DÉCRYPTAGE

Où en sont les Français avec le changement climatique ?

.56 SCIENCES ET TECHNIQUES DU NUCLÉAIRE

- Le vieillissement des internes de cuves. Programme de recherche en support à la durée de fonctionnement des réacteurs REP
- La durée de fonctionnement des enceintes de confinement

.69 PARTENARIATS

La *Chinese Nuclear Society* : un partenaire de longue date

.70 REPORTAGE

Jules Horowitz, l'autre réacteur en chantier

.74 NUCLÉAIRE & SOCIÉTÉ

- Superhéros : des pouvoirs... atomiques
- L'énergie nucléaire et l'opinion publique globale depuis l'accident de Fukushima

.78 REGARD SUR

Stéphane Paoli, journaliste



éditorial

Dans un peu moins de 150 jours, Paris accueillera la COP21, la grande conférence qui doit voir 196 pays s'accorder sur le moyen de lutter efficacement contre le changement climatique.

L'accord qui sera signé à l'issue des négociations, sera applicable à tous les pays, pour maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2 °C.

En France comme ailleurs, tout le monde se prépare à cet événement. Chaque partie avance ses arguments, ses propositions, ses idées. Tout le monde insiste, à raison, pour développer les énergies bas carbone. Les articles, éditoriaux, reportages, notes de position, etc. ne cessent de rappeler qu'elles doivent être mobilisées. Toutes les énergies bas carbone? Non! Si l'éolien, la biomasse, le photovoltaïque, l'hydraulique, la biomasse, la géothermie et autres hydroliennes sont avantagement présentés comme bas carbone, il manque une énergie à cet éventail: le nucléaire.

Oubli? Pudeur? Ignorance? Anti-nucléarisme primaire? Qu'à cela ne tienne! Les faits sont têtus et indiscutables: l'énergie nucléaire est bas carbone, ne rejetant que 6 grammes de CO₂ par kWh produit, sur toute la durée du cycle de vie, de la mine au démantèlement, en passant par la construction de centrale et l'exploitation.

Faudrait-il, comme certains le laissent à croire, que « fossiles » et « nucléaire » soient mis dans le même panier? Faudrait-il, pour des raisons souvent plus idéologiques que scientifiques, que le nucléaire soit cloué au pilori et sacrifié sur l'autel de l'environnement? Faudrait-il que les pays en développement qui comptent sur cette énergie bas carbone pour maîtriser leurs émissions de gaz à effet de serre, ne soient pas accompagnés – y compris financièrement – dans cette voie?

Faudrait-il hurler avec les loups et juger que cette énergie est celle du passé?

Non, bien sûr que non. Le nucléaire est là, efficace, outil de développement, acteur indispensable de la lutte contre le changement climatique. Soyons fiers de dire que le nucléaire est, aujourd'hui et demain, une partie de la solution. C'est la voix que nous devons faire entendre à la COP21.

Isabelle Jouette
rédactrice en chef

Grand carénage

Paluel ouvre le bal

LE RÉACTEUR 2 DE LA CENTRALE DE PALUEL A ÉTÉ DÉCOUPLÉ DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE LE 16 MAI. PENDANT CET ARRÊT, D'IMPORTANTES MODIFICATIONS SERONT APPORTÉES POUR PROLONGER SON EXPLOITATION DE 10 ANS. CETTE 3^e VISITE DÉCENNALE (VD3) DONNE LE DÉPART D'UN PROGRAMME INDUSTRIEL D'ENVERGURE: LE GRAND CARÉNAGE.



Maintenance en salle des machines

Paluel est la première des centrales 1300 MWe à mettre en œuvre ces travaux. Ce programme de maintenance approfondie et de remplacement de gros composants déployé sur le parc nucléaire français a pour but de prolonger la durée d'exploitation des centrales au-delà de 40 ans.

Un chantier inédit

Au total, 20 000 activités sont planifiées pour cet arrêt d'environ huit mois. Au pic de l'activité, près de 3 500 professionnels travailleront chaque jour sur le site (contre environ 2 000 en temps normal). Pour les accueillir, de nouveaux espaces de restauration et de stationnement ont été construits.

Trois contrôles réglementaires sont réalisés à chaque visite décennale: l'inspection approfondie de la cuve du réacteur, l'épreuve hydraulique du circuit primaire durant laquelle le circuit est monté à 1,3 fois sa pression normale d'exploitation et l'épreuve enceinte du bâtiment réacteur soumise à cette occasion à 5 fois la pression atmosphérique.

Outre les travaux de maintenance courante et le remplacement d'un tiers du combustible, des opérations exceptionnelles sont prévues: remplacement des 4 générateurs de vapeur, rénovation du contrôle commande et des salles de commande, remplacement des 3 pôles

du transformateur principal, retubage intégral du condenseur, remplacement d'un tambour filtrant.

Sur les 106 chantiers de modernisation prévus pour le Grand carénage, 60 seront réalisés pour la première fois sur le parc. Depuis plus de 2 ans, les équipes de la centrale, des centres d'ingénierie, des unités d'appui d'EDF et des 75 entreprises partenaires préparent cet arrêt.

Des mesures post-Fukushima

Cette « VD3 » est aussi l'occasion de mettre en œuvre les améliorations issues du retour d'expérience de Fukushima. 3 mesures sont attendues: l'installation de diesels d'ultime secours, la diversification des sources froides et la mise en place d'un centre de crise local. Elles permettront d'améliorer la robustesse aux agressions externes (séisme majeur, grands chauds, vents extrêmes, explosion, inondation interne et externe) et à l'accident grave, tout en minimisant les conséquences radiologiques. Sans oublier l'implantation de la Force d'action rapide nucléaire. Pour Bertrand Riboulet, pilote stratégique du projet VD3 1300 d'EDF, « la 3^e visite décennale du palier 1300 intègre un réexamen de sûreté très ambitieux. En plus de l'important volume de modifications, l'ensemble doit être mis en œuvre dans un contexte croissant d'exigences, d'évolutions réglementaires et de contraintes économiques. »

Les unités de production 1, 3 et 4 de la centrale de Paluel connaîtront leur troisième visite décennale respectivement en 2016, 2017 et 2018.

Plus d'informations sur:
www.sfen.org/fr/le-blog-des-energies/3e-visite-decennale-paluel-ouvre-le-bal

Perspectives

Le démantèlement, gisement d'activité économique ?

CHACQUE ANNÉE, LE CEA FAIT AVANCER SES PROJETS DE DÉMANTÈLEMENT ET DÉMONTRE QU'IL EST POSSIBLE DE « BOUCLER » LE CYCLE DE FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION NUCLÉAIRE, EN RÉUSSISSANT CETTE ULTIME ÉTAPE. LE DÉMANTÈLEMENT EST UNE RÉALITÉ, UN SAVOIR-FAIRE TECHNIQUEMENT MAÎTRISÉ ET SÛR.

Dans les vingt années à venir, 300 à 400 réacteurs devront être arrêtés dans le monde. Le nombre de chantiers engagés devrait donc croître avec des perspectives d'activité très prometteuses pour les entreprises spécialisées de ce secteur. Les experts prévoient un marché mondial de 220 milliards d'euros jusqu'en 2030. En France, les exploitants chiffrent à 34,4 milliards d'euros le

démantèlement des installations civiles (*Rapport sur le coût de production de l'électricité nucléaire*, Cour des comptes 2014). Le pays comptait, en 2013, 125 installations nucléaires de base (INB), dont une trentaine en cours de démantèlement. Actuellement, 9 réacteurs de différentes générations sont en cours de déconstruction par EDF. Pour les INB déjà ou prochainement mises à l'arrêt, des programmes de

InfoDEM, voyage au cœur du démantèlement

Pour présenter les enjeux du démantèlement, le CEA a ouvert l'espace InfoDEM à Marcoule (Gard). Dans la nef du réacteur G1, premier réacteur électrogène français définitivement arrêté, 800 m² d'exposition sont consacrés à l'assainissement-démantèlement. Inauguré en septembre 2014, InfoDEM permet, grâce à des maquettes, robots, immersion 3D relief... de découvrir les grands enjeux, la stratégie, les programmes, les métiers, outils et technologies de cette activité. Le lieu est ouvert aux groupes constitués et au grand public.

Plus d'informations sur : www.marcoule-infodem.fr/



démantèlement courant sur plusieurs dizaines d'années sont en cours d'élaboration, principalement chez EDF, AREVA et au CEA.

Au CEA, chaque chantier est unique

La spécificité du CEA réside dans la grande variété d'installations qu'il exploite : réacteurs expérimentaux, laboratoires de chimie, stations de traitement d'effluents et de

déchets... Le démantèlement de chaque installation est un cas particulier. Il faut démonter les équipements et enlever la radioactivité présente sur les parois, dans des kilomètres de tuyauterie, dans des cuves, etc. Le tout est réalisé avec différents procédés chimiques, mécaniques, thermiques. Les opérations présentant un risque d'irradiation sont effectuées à distance au moyen d'engins robotisés, souvent développés par le CEA.

Innovation

Le palmarès du Prix EDF Pulse 2015

LE 4 JUIN, JEAN-BERNARD LEVY, PDG D'EDF, EN PRÉSENCE D'AXELLE LEMAIRE, SECRÉTAIRE D'ÉTAT CHARGÉE DU NUMÉRIQUE, A RÉCOMPENSÉ LES TROIS LAURÉATS DU PRIX EDF PULSE 2015.



Le programme EDF Pulse vise à soutenir l'innovation dans les domaines de la santé, de la science et des modes de vie. 220 start-up avaient déposé leur candidature pour cette deuxième édition. Les trois lauréats 2015 ont reçu un chèque de 100 000 euros et bénéficieront d'un accompagnement d'EDF.

Prix Smart Living : EnerBee générateur d'énergie malin

La start-up grenobloise EnerBee développe un générateur d'énergie utilisant les petits mouvements des objets connectés (montres, smartphones, télécommandes...) pour stocker, produire puis alimenter en énergie ces mêmes objets. Un moyen

de remplacer les piles et les batteries. Une présérie est en cours de préparation avant la commercialisation prévue pour fin 2016. www.enerbee.fr

Prix santé : Damae, un système d'imagerie médicale pour analyser et détecter des cellules cancéreuses

Destiné aux dermatologues, Damae détecte en profondeur et par simple contact la présence d'éventuelles cellules cancéreuses. Deux fois plus précise que les systèmes actuels, cette technologie de biopsie optique évite les cicatrices dues au prélèvement et diminue le temps d'attente pour l'obtention des résultats. Des essais précliniques sont prévus avant

la phase de pré-industrialisation et le processus de certification. www.damaemedical.fr

Prix science : Voss, le stockage d'énergie par volant d'inertie

Ce procédé développé par l'entreprise Energiestro associe volant d'inertie et béton ultra-performant. En faisant tourner le béton à une vitesse très élevée, il permet de stocker de grandes quantités d'énergie à un coût dix fois plus faible qu'avec les volants actuels... Le produit est en cours de test sur des sites pilotes avant son déploiement. www.energiestro.com

PLUS DE 150 RÉACTEURS EN PROJET DANS LE MONDE

L'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) a recensé au 31 décembre 2014 plus de 150 projets de construction de réacteur nucléaire à travers le monde, à différents stades de développement, dans sa publication annuelle « *Nuclear power reactors in the world* ». La Chine est de loin le premier marché du nucléaire (26 réacteurs en construction et 39 à l'étude). Elle est suivie par la Russie (9 réacteurs en construction et 22 planifiés) et l'Inde (6 en construction, et 4 en projet). Le groupe russe Rosatom capte une part importante de ce marché en participant activement à 17 chantiers et 25 projets dans le monde. Les différents groupes chinois ne sont pas en reste, avec 19 projets.

TEPCO PRÉVOIT DE VENDRE SES STOCKS D'URANIUM

Tokyo Electric Power Co. (TEPCO) aurait l'intention de vendre au cours de cette année fiscale (1^{er} avril 2015 - 31 mars 2016) une partie de ses réserves d'uranium, inutilisées depuis 2011 et l'arrêt des réacteurs. TEPCO voudrait réduire les coûts de leur gestion en revenant au niveau de stock d'avant mars 2011. Fin mars 2015, l'exploitant disposait de 17 570 tonnes d'uranium – contre 16 805 en mars 2011 –, l'équivalent de 10 ans d'exploitation de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa, la plus puissante au monde avec 8 212 MWe.



Le yellow cake, première étape de transformation de l'uranium

Japon

Les derniers obstacles au redémarrage du nucléaire sont levés

APRÈS DEUX ANS DE RÉFLEXION ET DE MULTIPLES INSPECTIONS, L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ JAPONAISE (NRA) DONNE SON FEU VERT AU REDÉMARRAGE DES DEUX RÉACTEURS DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE SENDAI. UNE DÉCISION QUI SIGNE LE RETOUR DE L'ATOME DANS LE MIX ÉLECTRIQUE DE L'ARCHIPEL.



Le régulateur estime que les réacteurs 1 et 2 de la centrale de Sendai, exploitée par Kyushu Electric Power (KEPCO), dans le sud-ouest du pays, respectent désormais totalement les standards de sécurité

édictees après Fukushima: relèvement de la magnitude des tremblements de terre possibles, installation d'un centre de commande capable de résister à des situations d'urgence et intégration de plans opérationnels pour faire face à une éventuelle fusion du cœur du réacteur.

Cette approbation est la dernière nécessaire pour redémarrer un réacteur. La centrale de Sendai est la première à voir tous ses dossiers approuvés par la NRA depuis le renforcement de la réglementation en 2013. Le combustible sera rechargé dans les réacteurs à partir de juillet. Une fois les inspections pré-opérationnelles sur site terminées, les deux réacteurs pourront redémarrer. KEPCO a déjà obtenu le feu vert de la municipalité de

Satsumasendai, qui abrite ses infrastructures, ainsi que l'accord des autorités de la préfecture de Kagoshima. L'opérateur pense donc pouvoir redémarrer la tranche 1 dans l'été, et le réacteur 2 à l'automne. Ce sera alors la première fois depuis septembre 2013 que de l'électricité d'origine nucléaire sera produite dans l'Archipel.

D'autres réacteurs pourraient redémarrer avant la fin de l'année: l'unité 3 de la centrale d'Ikata et les unités 3 et 4 de Takahama. Pour chaque redémarrage, la NRA étudie dans le détail les plans de la centrale, puis inspecte les installations sur le terrain avant de donner son accord définitif. L'exploitant de la centrale doit ensuite obtenir l'autorisation de sa commune et de sa préfecture.

États-Unis

Ouverture du marché du nucléaire américain

L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE AMÉRICAINE, LA NRC, RÉVISE LA RÉGLEMENTATION QUI EMPÊCHE UN GROUPE ÉTRANGER D'OBTENIR UNE LICENCE D'EXPLOITATION POUR UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE.

Mise en place pendant la guerre froide, cette réglementation est pointée du doigt par le NEI (*Nuclear Energy Institute*) et les industriels qui la trouvent peu adaptée à l'organisation d'un marché mondial et interconnecté. Cette réglementation – *Foreign ownership, control or domination* (FOCD) – empêche les investisseurs étrangers de s'implanter

sur le sol américain et freine le lancement de nouveaux projets aux États-Unis. Ces dernières décennies, seuls deux réacteurs ont reçu le feu vert de la NRC: les unités 3 et 4 de la centrale de Vogtle (Georgie).

Ce blocage de nouvelles tranches a notamment empêché EDF et sa filiale Unistar, de construire un réacteur EPR à Calvert Cliffs

dans le Maryland. Par deux fois, en 2012 et 2013, la NRC a repoussé sa demande de licence d'exploitation, arguant du fait qu'Unistar était contrôlée par une entreprise étrangère, elle-même contrôlée par un État étranger. La NRC va réfléchir à l'introduction de mesures graduées, selon le niveau d'implication d'un groupe étranger dans un projet, destinées à garantir la sécurité et la défense nationale, tout en permettant l'exploitation d'un réacteur. Cela pourrait prendre la forme de postes réservés dans le conseil d'administration à des citoyens américains ou l'obligation pour l'exploitant de prendre des parts dans un groupe américain qui participera aussi à l'exploitation du réacteur.

Japon

L'atome toujours compétitif

UNE ÉTUDE DU MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE A RÉACTUALISÉ LE COÛT DE PRODUCTION ÉLECTRONUCLÉAIRE AU JAPON, À LA LUMIÈRE DE L'ACCIDENT DE MARS 2011.

Cette étude compare le coût des moyens de productions d'électricité à l'horizon 2030. Elle confirme qu'avec un coût de production de 10,3 Yens/kWh, l'atome reste compétitif malgré l'intégration des mesures complémentaires de sûreté, la prise en compte des accidents graves et le réajustement des coûts de démantèlement. Ce coût a été revu à la hausse par rapport à un précédent rapport de 2011, qui l'évaluait à 8,9 yens/kWh. Bien qu'en augmentation, il reste plus compétitif que celui des autres énergies : charbon (12,9 Yen/kWh), gaz liquéfié (13,4 Yen/kWh), éolien (34,7 Yen/kWh) et photovoltaïque (16,4 Yen/kWh).

Importations records

Actuellement, le Japon, pauvre en ressources énergétiques, importe les combustibles fossiles dont il a besoin pour produire son électricité. La part des énergies fossiles a crû avec la mise à l'arrêt des 48 réacteurs nucléaires. Fossiles et renouvelables produisent désormais 85 % de l'électricité nipponne. Les émissions de CO₂ ont augmenté de 6 % en 2012 et le pays a dû se désengager des objectifs fixés par le protocole de Kyoto. La présentation de ce rapport intervient quelques mois avant la conférence sur le climat de Paris (COP21). Un atout pour le gouvernement japonais

qui souhaite le redémarrage partiel des centrales du pays. Shinzo Abe, premier ministre japonais, souhaite que le nucléaire reste une source significative de production d'énergie, à hauteur de 20 à 22 %. Une proportion qui permettrait d'accompagner le développement des énergies renouvelables tout en évitant le recours massif aux combustibles fossiles. Le gouvernement espère réduire les émissions de CO₂ de 26 % d'ici 2030.

Plus d'informations sur :

<http://www.sfen.org/fr/le-blog-des-energies/japon-latome-toujours-compétitif>



BRÉSIL : LE MARCHÉ DU NOUVEAU NUCLÉAIRE OUVERT AUX GROUPES ÉTRANGERS

À l'occasion d'une conférence sur l'énergie, Eduardo Braga, ministre de l'Énergie du Brésil, a indiqué vouloir étendre le rôle du secteur privé dans la production d'énergie nucléaire. Tout en rappelant que ce programme nucléaire annoncé depuis longtemps était « nécessaire, mais pas une priorité », M. Braga a indiqué qu'il pourrait être une solution pour compenser la baisse de la production hydraulique pendant la saison sèche.

Le gouvernement examine actuellement 21 sites sur lesquels pourraient être construits les quatre prochains réacteurs nucléaires du pays. M. Braga par ailleurs indiqué que le Brésil, l'un des pays les plus dotés en ressources d'uranium, pourrait devenir autosuffisant pour alimenter ses propres centrales en combustible.

Russie

Retards en série pour les nouveaux réacteurs russes

PLUSIEURS RÉACTEURS CONSTRUITS PAR ROSATOM VOIENT LEUR LIVRAISON REPORTÉE. LA DÉCISION, VALIDÉE PAR LE MINISTÈRE RUSSE DE L'ÉNERGIE, CONCERNE LES CHANTIERS DES DEUXIÈMES PHASES DES CENTRALES DE LENINGRAD (SAINT PETERSBOURG), NOVovoronezh (RUSSIE CENTRALE) ET SMOLENSK (OUEST DE LA RUSSIE).



Les réacteurs AES2006 de Novovoronezh (Russie)

Ces chantiers ont pris « un retard significatif » selon le ministre délégué à l'énergie. Rosatom avait annoncé ces retards en début d'année. Selon le ministre délégué, la baisse de la consommation d'électricité fait que « ces unités ne sont tout simplement pas nécessaires en ce moment, en raison des surplus actuels. »

Les sites concernés sont ceux de Leningrad II (2 réacteurs AES 2006 de 1200 MWe en construction depuis 2008 et 2009) qui démarrent en 2015 et 2017, Novovoronezh II (2 réacteurs AES 2006 commencés en 2008 et 2009) qui devraient produire à partir de 2015 et 2018 et Smolensk II (2 réacteurs VVER 1200) dont les travaux de construction ne débuteront pas avant 2022.

Courrier des lecteurs

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

Vous souhaitez apporter un complément d'information ?

Demander des avis ?

Adressez vos courriers

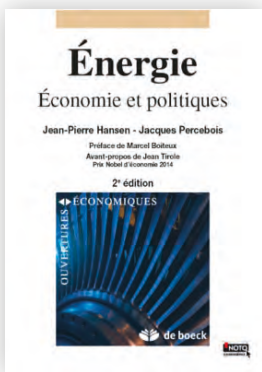
à contact@sfen.org

et connectez-vous sur <http://www.sfen.org>



ÉNERGIE, ÉCONOMIE ET POLITIQUES

En une vingtaine d'années, peu d'industries ont connu une mutation comparable à celle qui a « changé la donne » dans les différents secteurs de l'énergie. Comment les prix se forment-ils sur ces marchés ? Comment tenir compte des deux dimensions de l'énergie à la fois biens stratégiques et de service public ? Ce qui vaut pour une énergie est-il pertinent pour les autres ? Quels sont les liens entre énergie et environnement ? Voilà quelques questions auxquelles cet ouvrage – dans sa 2^e édition actualisée – apporte des réponses. Il dresse pour la première fois, un bilan de ces changements, basé sur une analyse rigoureuse des secteurs et du « bien-énergie » dans son ensemble. Il fournit également de nombreuses données chiffrées et institutionnelles présentées de manière synthétique et propose des analyses critiques des politiques menées en Europe et dans le monde. Cette analyse économique de Jacques Percebois et Jean-Pierre Hansen est destinée à un large public : étudiants (ingénieurs, économie ou sciences politiques), responsables ou observateurs de l'industrie de l'énergie.



Énergie, Économie et politiques

Jacques Percebois et Jean-Pierre Hansen
Éditions de Boeck, 56 euros

Décryptage

L'accident de Saint-Laurent

DÉBUT MAI, CANAL+ A DIFFUSÉ UN DOCUMENTAIRE SUR L'ACCIDENT SURVENU EN 1980 À LA CENTRALE DE SAINT-LAURENT-DES-EAUX (LOIR-ET-CHER). L'ÉVÉNEMENT, SANS CONSÉQUENCE SUR LES POPULATIONS ET L'ENVIRONNEMENT, S'EST PRODUIT SUR UNE TECHNOLOGIE DE RÉACTEURS AUJOURD'HUI ABANDONNÉE: LA FILIÈRE URANIUM NATUREL GRAPHITE GAZ (UNGG). QUE S'EST-IL PASSÉ? QUELLE EST LA SITUATION AUJOURD'HUI?



1980 : fusion du combustible

En mars 1980, le réacteur 2 de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux, près de Blois, a connu un accident, rétroactivement classé au niveau 4 de l'échelle internationale de sûreté INES, qui en compte 7. Suite à un problème de corrosion, une plaque métallique du réacteur s'est décrochée et a obstrué les canaux à combustible. Elle a ensuite gêné le refroidissement du cœur, entraînant la fusion de deux éléments de combustible (environ 20 kg d'uranium naturel enrichi à 0,7 %). La chute des barres est intervenue 12 secondes après le début de dépassement des compteurs de la DRG (Détection Rupture de Gaine). Les éléments de combustible 1 et 2 du canal FO5 M19 C14 ont fondu et ont été retenus en grande partie par la culasse de rétention. La quantité d'uranium disséminée dans le réacteur a été estimée à 2,6 kg. Les risques d'exposition à la radioactivité étaient accrus pour les travailleurs. Les équipes de la centrale, notamment les opérateurs, ont su gérer cette situation exceptionnelle. L'accident n'a eu aucune conséquence sur le personnel et l'environnement. Aucun rejet radioactif n'a été identifié à ce jour.

Trois ans et demi d'arrêt

Le réacteur a été arrêté trois ans et demi. Pendant deux ans, des

travaux de décontamination ont été menés pour le réhabiliter: décontamination, nettoyage du canal, récupération des débris, puis des poussières dans le caisson... Après de nombreux contrôles et vérifications par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) et le ministère chargé de la sûreté nucléaire de l'époque, le réacteur a été autorisé à fonctionner de nouveau en octobre 1983. En 1992, EDF, exploitant de la centrale, a décidé d'en arrêter définitivement l'exploitation. L'entreprise s'était déjà tournée vers une autre technologie: les réacteurs à eau pressurisée. Ce réacteur est aujourd'hui en cours de démantèlement.

Aucune conséquence sur les populations et l'environnement

En 1993 et en 2003, les études radioécologiques menées sur plusieurs années par l'IPSN puis l'IRSN, ont montré que les quantités de plutonium trouvées dans les sédiments et les végétaux aquatiques de la Loire sont comparables à celles mesurées autour des autres centrales nucléaires françaises. Dans une analyse publiée le 18 mai 2015, l'IRSN indique que les traces des rejets de 1980 ne sont plus perceptibles dans la Loire depuis 1994. Et précise que « les traces

de plutonium mesurées dans les sols dans le cadre de la surveillance à proximité des sites nucléaires d'EDF sont issues des retombées des essais nucléaires, sans influence discernable des rejets des centrales nucléaires. »

Les enseignements

Les premiers réacteurs nucléaires, construits en France entre 1958 et 1966, appartenaient à la filière UNGG. Actuellement les six réacteurs UNGG (Chinon A1, A2, A3, Saint-Laurent A1, A2, Bugey 1) sont arrêtés et en cours de démantèlement. Au-delà de l'aspect technique spécifique à ces réacteurs, l'accident de 1980 a confirmé l'importance de maintenir en permanence le refroidissement du cœur. Les réacteurs UNGG étaient tous différents, ce qui rendait difficile le retour d'expérience.

Une enquête administrative est en cours

Selon le reportage diffusé par Canal+, des effluents de plutonium auraient été rejetés dans la Loire en 1980, au moment de l'accident. Une enquête administrative a donc été ouverte par la ministre de l'Écologie, Ségolène Royal pour « faire toute la lumière sur les circonstances et sur l'information dont ont bénéficié, alors, les autorités de contrôle ».

Plus d'informations sur : www.sfen.org/fr/le-blog-des-energies/decryptage-laccident-de-saint-laurent



Formations

Deux nouveaux masters à la rentrée prochaine

À PARTIR DE SEPTEMBRE 2015, L'ESTP PARIS PROPOSE UN MASTER INTERNATIONAL EN GÉNIE CIVIL NUCLÉAIRE. L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE CRÉE QUANT À ELLE UN MASTER 2 PHYSIQUE DE L'ÉNERGIE ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, EN PARTENARIAT AVEC EDF.



Master international en génie civil nucléaire

D'une durée de 2 ans, le nouveau cursus de l'ESTP s'adresse aux étudiants français et étrangers, titulaires d'un diplôme Bac +3 en génie civil ou d'un Master en ingénierie. Il est adossé à la Chaire d'enseignement et de recherche en génie civil nucléaire de l'ESTP, créée en 2010, qui fait de l'école le partenaire académique privilégié des leaders mondiaux du nucléaire.

Au cours de leur formation, les étudiants vont acquérir les compétences techniques propres au génie civil nucléaire. Ils découvriront les dernières technologies et apprendront à repenser les méthodes de construction. Ils apprendront à

concevoir des centrales de nouvelle génération et à améliorer leur exploitation, à anticiper le démantèlement des ouvrages, maîtriser les opérations de fin de vie des installations, et à valoriser les déchets. En fin de cursus chaque étudiant réalisera un projet industriel de recherche, en lien étroit avec les entreprises et les laboratoires de recherche partenaires de l'ESTP.



Master Physique de l'énergie et de la transition énergétique

Créé en partenariat avec EDF, le nouveau Master professionnel de l'Université Paul Sabatier de Toulouse vise à former des ingénieurs pluridisciplinaires ayant les compétences spécifiques aux

métiers de la production et de la gestion de la distribution de l'énergie électrique. De nombreuses matières sont abordées : physique de la conversion d'énergie, matériaux, production et distribution d'électricité, conception et fonctionnement d'une centrale nucléaire, radioprotection et combustible nucléaire, automatismes, contrôle-commande et signal, sciences humaines et du management.

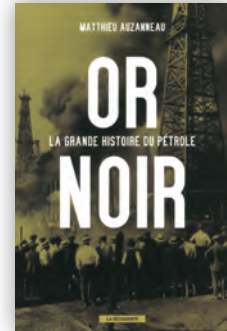
Ce Master accueille des étudiants de Master 1 ou d'écoles d'ingénieurs. La formation est aussi ouverte en contrat de professionnalisation, et accessible à des demandeurs d'emploi ou des salariés titulaires d'un diplôme dans ce domaine de niveau Bac +4 minimum ou équivalent.

Plus d'informations sur :

www.estp.fr

www.masterprophysiqueenergie.univ-tlse3.fr/

OR NOIR : LA GRANDE HISTOIRE DU PÉTROLE



Depuis les premiers puits désormais à sec jusqu'à la quête frénétique d'un après-pétrole, *Or noir* retrace l'irrésistible ascension d'une industrie parmi les plus puissantes. Dans cette fresque passionnante, on croise Churchill, Clémenceau, Roosevelt, Staline, Hitler, De Gaulle, Kissinger, les présidents Bush père et fils, mais aussi John Rockefeller et beaucoup de personnalités moins connues. Un éclairage inattendu des événements cruciaux – l'émergence de l'URSS, la crise de 1929, les deux guerres mondiales, les chocs pétroliers, les guerres d'Irak, la crise de 2008, etc. -, bousculant au passage beaucoup de fausses certitudes. Notre avenir dépend de celui que nous donnerons au pétrole, ou de celui qu'il nous imposera. Et nul ne peut dire où cette fin va nous conduire...

Matthieu Auzanneau est l'auteur du blog « Oil Man, chroniques du début de la fin du pétrole » publié par *Le Monde* depuis 2010. Journaliste spécialiste des questions à la croisée de l'économie et de l'écologie (*Le Monde*, *Arte*, « *Envoyé Spécial* », *Terra Eco*, etc.), il est en charge de la prospective au sein du *think-tank* de Jean-Marc Jancovici spécialisé dans la transition énergétique : le Shift Project.

Or noir, la grande histoire du pétrole

Matthieu Auzanneau

La Découverte, 26 euros

Publication

Le climat, à quel prix ?

Ce livre fournit au lecteur les clés pour comprendre les enjeux de la coopération internationale face aux dérèglements du climat. Critiques à l'égard des transitions énergétiques, ses auteurs appellent à un véritable changement qui passe par la tarification internationale du carbone. Pointant les difficultés pour y parvenir, ils montrent qu'on ne résoudra pas la question du climat si on ne l'inscrit pas au cœur des choix

économiques et sociaux qui conditionnent l'avenir de nos sociétés. Christian de Perthuis est professeur d'économie à l'université Paris-Dauphine, où il a fondé la chaire d'économie du climat. Raphaël Trotignon est spécialiste de la tarification du carbone.

Le Climat, à quel prix ?

Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon - Odile Jacob, 19,90 euros

Basse def





Abonnez-vous !

Toutes les énergies du nucléaire sont dans la RGN

Rencontrez les femmes et les hommes qui « font » le nucléaire au quotidien, découvrez les dernières innovations, revivez les grands événements de la SFEN, suivez l'avancée des technologies. Tous les 2 mois, la RGN vous ouvre les portes de l'énergie nucléaire et de toutes ses applications civiles. Dans chaque numéro, un dossier technique sur un sujet d'actualité, un reportage au cœur de l'énergie, un portrait, un décryptage, des articles sur les liens entre nucléaire et société et bien sûr, toutes les actualités de la filière, en France et dans le monde.

Pour vous abonner, retournez ce bulletin complété à l'adresse ci-dessous :

Groupe Rouge Vif - 6 Impasse de Toulouse - 78000 Versailles
 Fax : 01 39 38 22 88 - Mail : abo-rgn@grouperougevif.fr

Nom Prénom Organisme ou entreprise

Adresse :

CP Ville Pays

Tél Fax e-mail

Oui, je m'abonne à RGN (1 an - 6 numéros)

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

Par chèque bancaire ou postal à l'ordre de Rouge Vif Virement bancaire
 Rouge Vif : IBAN FR76 3005 6009 1309 1300 0233 153

Date.....

Signature et cachet de l'entreprise

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

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



Prélèvement d'eau dans le lac de la réserve naturelle de la centrale du Blayais (Gironde)

COP21

Nucléaire et climat

LE 30 NOVEMBRE S'OUVRIRA LA COP21 À PARIS. CETTE CONFÉRENCE DEVRA ABOUTIR À UN ACCORD INTERNATIONAL VISANT À LUTTER EFFICACEMENT CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE. À MOINS DE 150 JOURS DE CE RENDEZ-VOUS HISTORIQUE, IL N'EST PAS INUTILE DE DÉMONSTRER, UNE FOIS DE PLUS, QUE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EST UNE PARTIE DE LA SOLUTION, QUE CETTE ÉNERGIE BAS CARBONE A UN RÔLE MAJEUR À JOUER. ÉCONOMIE, FINANCEMENT, DÉVELOPPEMENT, EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE, CLIMAT... LES CLÉS ET LES ARGUMENTS SONT LÀ, PESÉS, VÉRIFIÉS. PARCE QUE LE MONDE A BESOIN DE TOUTES LES ÉNERGIES BAS CARBONE, LE NUCLÉAIRE EST L'ÉNERGIE D'AVENIR QUI PERMETTRA DE RÉSOUDRE L'ÉQUATION COMPLEXE DU DÉVELOPPEMENT ET DE LA MAÎTRISE DU DÉRÈGLEMENT CLIMATIQUE.

« Il est évident que le nucléaire fait partie des solutions »

Lors de la Convention SFEN 2015 consacrée au « Partenariat franco-britannique pour un futur bas-carbone », **Christian Masset**, Secrétaire général du ministère des Affaires étrangères et du Développement international (MAEDI), a présenté les enjeux de la COP21 qui se tiendra en décembre à Paris.



Le compte à rebours a commencé. Nous sommes à quelques mois de décisions dont l'enjeu sera de limiter l'élévation de la température à deux degrés et à quelques mois de ce qui sera la plus grande conférence diplomatique que la France aura jamais accueillie : 20 000 délégués, 20 000 représentants de l'industrie, de la société civile et des territoires, et 3 000 journalistes sont attendus. Laurent Fabius, ministre des Affaires étrangères sera le négociateur en chef de cet exercice, et présidera la conférence.

Il est évident que le nucléaire fait partie de la solution **12**

par Christian Masset, Secrétaire général du ministère des Affaires étrangères et du Développement international

L'énergie nucléaire fait partie de la solution **15**

contribution de la SFEN

Climat : les associations et forums nucléaires s'engagent **18**

contribution de la SFEN

Le changement climatique, un problème (aussi) économique **20**

par Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Jacques David, François Thais (CEA) et Boris Le Ngoc (SFEN)

Tarification mondiale du carbone, le mode d'emploi **24**

par Christian de Perthuis et Pierre-André Jowet

Nouvelles centrales nucléaires en Europe : comment surmonter les obstacles au financement ? **29**

par Didier Beutier (AREVA)

Chine : une révolution énergétique contrastée **33**

par François Morin, World Nuclear Association - Chine

Royaume-Uni : vers un mix énergétique bas carbone et compétitif **36**

par Sir Peter Ricketts

Adapter les centrales nucléaires au changement climatique : le retour d'expérience des canicules de 2003 et 2006 **39**

par Alain Vicaut, Directeur de l'environnement et de la prospective (EDF Production nucléaire) et Eric Jouen, Directeur de projets (EDF Ingénierie Nucléaire)

Le service climatique au cœur des nouveaux enjeux **45**

par Boris Le Ngoc (SFEN)

Le recyclage des combustibles nucléaires : une contribution efficace à la réduction de l'empreinte environnementale nucléaire **47**

par Christophe Poinssot, Chef du département de Radiochimie et des Procédés, Direction de l'Énergie Nucléaire - CEA Marcoule

LES ÉLÉMENTS POSITIFS

L'an dernier, la Conférence de Lima, la COP20, s'est bien déroulée. Nous avons eu un préaccord qui a permis un certain nombre d'avancées. Parmi celles-ci, il y a le fait que tous les pays devraient apporter leur contribution en matière d'atténuation ou d'adaptation, ce qui est un élément nouveau et tout à fait positif. Nous avons, grâce à la COP 20, une bonne base de travail.

À Genève en février dernier, il y a eu des négociations, toujours dans le cadre des Nations unies, pour travailler sur cet accord de Lima. Nous sommes parvenus à un projet d'accord soutenu par tous. Celui-ci intervient plus de six mois avant la conférence de Paris. Ce délai de six mois est essentiel, car la conférence de Paris n'aurait pas pu se déterminer sur un accord si nous n'avions pas respecté ce délai.

Une volonté politique se manifeste. Il y a eu les annonces de la Chine et des États-Unis fin 2014 et puis les engagements de l'Union européenne: l'objectif de -40 % d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030. Ce sont autant d'éléments qui lancent un mouvement.

Enfin, toujours parmi les éléments positifs: le « Fonds vert » a fait l'objet d'annonces de contributions. Nous avons un objectif de 10 milliards de dollars et nous l'avons un peu dépassé notamment grâce à la contribution substantielle de la France. Tout ceci peut laisser penser que nous allons dans la bonne direction.

Mais il ne faut pas se cacher que cela sera extrêmement difficile. Pourquoi? 195 pays doivent se mettre d'accord. Il y a beaucoup de sujets et beaucoup de différences sur ces sujets: qu'il s'agisse de la forme juridique que l'accord doit prendre, de l'atténuation, de l'adaptation, du financement, des technologies...

Pour le préaccord de Lima, nous avons 37 pages, pour le projet d'accord à Genève 86 pages... cela vient du fait que vous avez sur chacun des points, des quantités d'options. Et, sur chaque point, nous devons trouver des compromis... des compromis à 195.

LES PROCHAINES ÉTAPES

Nous aurons à Bonn, une nouvelle réunion de négociation sur le projet d'accord, qui sera précédée d'une quantité de rencontres informelles coprésidées par Laurent Fabius et le négociateur péruvien. Et à nouveau un rendez-vous en octobre, toujours pour parler de ce projet d'accord. Entre juin et octobre, beaucoup de discussions auront lieu au niveau politique, pour essayer de trouver ces compromis pour que 195 pays disent « oui » à la fin de la conférence de Paris.

C'est donc extrêmement compliqué: il faut lancer une dynamique et guider les négociations dans la bonne direction.

LES OBJECTIFS POUR PARIS

D'abord, aboutir à un accord juridiquement contraignant, universel (car il doit comprendre tous les grands émetteurs), différencié (pour prendre en compte de façon juste les circonstances nationales), et aussi ambitieux (pour assurer le respect de la limite des 2 °C). Deuxièmement, des engagements nationaux aussi ambitieux que possible. Tous les pays devraient apporter leur contribution, présenter des engagements en matière d'adaptation et d'atténuation. Notre sentiment est que pour Paris, une grande partie des pays auront apporté ces contributions. Le volet financier ensuite. Vous savez que l'engagement pris à Copenhague, c'est 100 milliards de dollars par an à partir de 2020. Il ne s'agit pas uniquement d'argent public. Il est donc essentiel de mobiliser. D'un côté, il y a l'argent public avec le Fonds vert. Il faut lui donner un effet de levier maximum. Il y a également l'argent des banques de développement qui se sont réunies en mars. Et puis, il y a tout l'investissement privé, qu'il s'agisse du verdissement de ces financements ou des financements innovants. L'idée est de canaliser, de pousser, d'orienter les flux financiers et les investissements vers les projets bas carbone. Un quatrième pilier de cet accord de Paris s'ajoute. Il est tout

à fait nouveau: il s'agit de conduire les acteurs non étatiques, c'est-à-dire les collectivités territoriales, les entreprises et les différents secteurs à prendre des engagements à leur niveau et à les présenter à Paris pour montrer un degré d'ambition encore plus élevé. Il est évident que de ce point de vue, le secteur électrique a tout son rôle à jouer.

C'est ce qu'on appelle « l'agenda des solutions ». Celui-ci permettra d'accueillir toutes les solutions. Il est évident que le nucléaire fait partie des solutions. C'est tout le sens du partenariat entre le Royaume-Uni et la France. C'est parce que nous sommes deux pays à l'avant-garde de la lutte contre le dérèglement climatique, parce que nous sommes deux pays mobilisés pour la société bas carbone que nous menons une coopération dans le domaine nucléaire.

Le défi de Paris est d'engager une immense transformation de l'économie sur le chemin du bas carbone.

Nous sommes deux pays qui avons mis dans notre mix énergétique une obligation sur le bas carbone. Qu'il s'agisse de la loi sur la transition énergétique qui doit être adoptée ou de *l'electricity market reform* (voir article « Royaume-Uni: vers un mix énergétique bas carbone et compétitif », pages 36 à 38), nos deux pays affirment une place pour le nucléaire dans le mix énergétique. Le partenariat entre ces deux pays les place comme moteur européen de ce qui doit être fait en matière d'énergie et de climat. Nous avons besoin d'une Europe ambitieuse dans ce domaine pour conclure un accord à Paris, pour réussir ces transformations, et pour mettre le monde sur le chemin du bas carbone.

Revivez l'intervention de Christian Masset sur

Youtube: www.youtube.com/watch?v=dAFoZaW7is0





ZOOM SUR...

QU'EST-CE QU'UNE « COP » ?

Lors du Sommet de la Terre à Rio (Brésil) en 1992, les Nations unies se sont dotées d'un cadre d'action permettant de lutter contre le changement climatique : la CCNUCC (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques). Universelle, cette convention réunit 195 États : les « Parties ». Tous les ans, leurs représentants se rassemblent lors de la « COP » (*Conference of the Parties*), pour faire le point sur l'application de la Convention, adopter des décisions et négocier de nouveaux engagements.

LES TRAVAUX DU GIEC : UNE BASE POUR LES NÉGOCIATIONS

Créé quelques années avant la CCNUCC, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est une instance des Nations unies dont le rôle est d'examiner et synthétiser la littérature scientifique sur la question climatique. Depuis sa création, le GIEC a publié cinq rapports, divisés en plusieurs volumes. Ces outils d'aide à la décision ne sont pas prescriptifs, on dit qu'ils sont « *policy relevant, but not policy prescriptive* ». Leur synthèse sert de base aux négociations sur le climat.

COP 21 : LA COP DE LA DERNIÈRE CHANCE ?

Alors que les experts du GIEC préviennent qu'un réchauffement global de 4 °C est possible, les États doivent aboutir à un accord international permettant de contenir le réchauffement en-deça de 2 °C. Pour y arriver, les Nations Unies préconisent une réduction des émissions de carbone de 50 % d'ici 2050 par rapport à 1990, et une émission nulle d'ici 2100. Les pays en développement ont accepté le principe d'adhérer à un accord mondial contre le changement climatique. Une première dans l'histoire des négociations climatiques, où les pays industrialisés étaient jusqu'alors les seuls à s'engager sur des trajectoires de réduction des émissions de CO₂. Pour obtenir l'adhésion des pays du Sud, les questions du développement et du financement demeurent centrales. Si un accord est trouvé à Paris fin 2015, cela ne signifie pas pour autant la fin du processus de négociation. L'accord pourra être complété par la suite, mais l'objectif est qu'il entre en vigueur dès 2020.

LA DIFFICILE QUESTION DU FINANCEMENT

En 2009 à Copenhague, les gouvernements des pays industrialisés se sont engagés à mobiliser 100 milliards de dollars par an à partir de 2020 pour financer l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Une partie de ces 100 milliards transitera par un Fonds vert dont la mise en place a été actée et qui a déjà été abondé par 32 pays à hauteur de 10,2 milliards de dollars. Si la somme est loin de l'objectif, la première capitalisation de ce fonds est considérée comme un signal fort adressé aux pays en développement. L'an dernier, la déclaration de Santa Cruz des pays du G77 (coalition de pays en développement) a réaffirmé que, « *vu leur responsabilité historique* », les pays développés doivent être à l'avant-garde des efforts et fournir aux pays en développement un appui financier et technologique.

en chiffres...

LES GRANDES COP

Depuis la création de la CCNUCC, les Conférences sont montées en puissance et certaines sont restées dans l'histoire :

COP3 EN 1997

Signature du protocole de Kyoto (Japon) qui fixe pour la première fois un objectif de réduction des émissions des gaz à effet de serre.
<http://unfccc.int/cop3/>

COP15 EN 2009

Validation à Copenhague (Danemark) d'un objectif commun visant à contenir le réchauffement climatique à 2 °C.
http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/session/6262.php

COP16 EN 2010

La Conférence de Cancun (Mexique) établit un mécanisme de financement pour lutter contre le changement climatique.
http://unfccc.int/meetings/cancun_nov_2010/session/6254.php

COP19 EN 2013

À Varsovie (Pologne), la Conférence oblige les États à communiquer leurs contributions en matière de réduction de gaz à effet de serre avant la Conférence de Paris.
http://unfccc.int/meetings/warsaw_nov_2013/session/7767.php
http://unfccc.int/meetings/cancun_nov_2010/session/6254.php

L'énergie nucléaire est une partie de la solution

Note de position de la SFEN



en substance...

Les pays signataires du Protocole de Kyoto (1997) se sont engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter à 2 °C la hausse de température moyenne du globe d'ici 2050, date au-delà de laquelle les impacts sur l'environnement et nos sociétés seraient dramatiques et irréversibles. Face à l'ampleur du défi, il est urgent de mobiliser toutes les énergies bas carbone, dont le nucléaire.

Association scientifique, la SFEN reconnaît les conclusions du GIEC pour qui les activités humaines et les émissions de gaz à effet de serre sont, à « 95 % de certitude »¹ responsables du changement climatique. Ces conclusions sont le fruit du travail collectif d'experts de 40 pays qui ont analysé et pesé 9 200 publications scientifiques.

La SFEN s'est également basée sur plusieurs éléments et rapports. Ainsi, le scénario 2DS de l'AIE (Agence internationale de l'énergie) décrit les options énergétiques permettant de limiter la hausse de température moyenne du globe à 2 °C. Un autre scénario de l'AIE – le 6DS – dessine la trajectoire énergétique si aucun effort visant à réduire les émissions de CO₂ n'est fait. Alors que le groupe de travail I du GIEC a évalué les changements climatiques, le groupe de travail III a évalué les options technologiques permettant d'atténuer le changement climatique en limitant ou empêchant les émissions de CO₂. Le GIEC a également défini un « budget carbone »², d'émissions de CO₂ cumulées qu'il ne faut pas dépasser pour contenir le réchauffement moyen à 2 °C. Il l'évalue à 2 900 milliards de tonnes depuis le début de l'ère préindustrielle jusqu'à 2050.



Les effets du réchauffement peuvent être irréversibles.

1. Rapport du Groupe I du GIEC : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf **2.** Carbon Brief d'après les données du GIEC : <http://www.carbonbrief.org/blog/2014/11/six-years-worth-of-current-emissions-would-blow-the-carbon-budget-for-1-point-5-degrees/>

LE MONDE A BESOIN DE TOUTES LES ÉNERGIES BAS CARBONE

Le défi est historique : dans 35 ans, 80 % de l'électricité devra être bas carbone³. Aujourd'hui, 70 % de l'électricité mondiale est tirée des énergies fossiles et constitue ainsi la principale source d'émission de CO₂. *A contrario*, les énergies bas carbone ne représentent que 30 % du mix électrique. Pour inverser la tendance, d'importants efforts sont nécessaires, d'autant que la part des énergies fossiles ne faiblit pas : depuis 2010, la croissance du charbon a été supérieure à celle de toutes les énergies non-fossiles combinées⁴. Depuis 1990, année de référence du protocole de Kyoto, les émissions de CO₂ n'ont cessé de croître (+ 60 %) ⁵. Si le mix électrique reste dominé par les énergies fossiles, la hausse de température moyenne du globe sera de 6 °C⁶. Et les conséquences seront irréversibles.

L'équation est complexe


Il faut à la fois diminuer les émissions de CO₂ et répondre aux besoins élémentaires de l'humanité. En 2050, la population mondiale comptera 9,6 milliards de personnes⁷. Même significatifs, les progrès en matière d'efficacité énergétique ne seront pas suffisants face à la hausse de la demande en électricité, plus rapide que la demande d'énergie. Les scénarios de l'AIE⁸, ambitieux en termes d'efficacité énergétique,

prévoient une augmentation de la demande d'électricité allant de 80 % si on limite le réchauffement à 2 °C, à 130 % si le réchauffement est de 6 °C, principalement portée par les économies émergentes.

La lutte contre le changement climatique ne doit pas compromettre le développement des pays émergents. 1,2 milliard⁹ de personnes, l'équivalent de la population de l'Inde ou de l'Afrique, n'a pas encore accès à l'électricité. Et 2,8 milliards utilisent le bois ou d'autres produits de la biomasse pour cuisiner et se chauffer, produisant une pollution nocive pour leur santé.

La Chine et l'Inde, principaux émetteurs de CO₂ sont aussi des pays émergents. Le charbon y représente respectivement 70 et 80 % de la production d'électricité. Maîtrisant déjà la technologie nucléaire, il leur semble de bon sens de développer leur parc nucléaire pour atteindre les objectifs climatiques, tout en offrant une meilleure qualité de vie à leurs populations.

Trois types d'électricité décarbonée

Le GIEC identifie trois types d'électricité bas carbone : les renouvelables, le nucléaire et la capture et séquestration du carbone (CCS). Le nucléaire est une énergie bas carbone car sur l'ensemble de son cycle (construction, exploitation, démantèlement), ses émissions sont comparables à celles des énergies 

3. Rapport du Groupe III du GIEC http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf **4.** *Energy Technology Perspectives 2014*, AIE http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives_ES.pdf **5.** *Carbon brief* <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/14/hl-compact.htm> **6.** *Energy Technology Perspectives 2014*, AIE http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives_ES.pdf **7.** Nations unies http://esa.un.org/wpp/documentation/pdf/wpp2012_press_release.pdf **8.** *Technology Roadmap 2014*, AIE <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-nuclear-energy-1.html> **9.** Banque Mondiale <http://documents.banquemonde.org/curated/fr/2013/01/17747859/global-tracking-framework-vol-1-3-resume-general>

renouvelables. L'énergie nucléaire émet en moyenne 15 g de CO₂/kWh¹⁰, soit trente fois moins que le gaz (400 g/kWh) et 50 fois moins que le charbon (700 g/kWh), au même niveau que l'éolien (11 g/kWh) et trois fois moins que le photovoltaïque (45 g/kWh).

En la matière, nucléaire et renouvelables ont démontré leur efficacité. Cependant, le développement de la capture et séquestration du carbone (CCS), technologie pourtant prometteuse, se développe assez peu. Pour l'AIE, cette lenteur est notamment imputable à des « *coûts élevés et [un] manque d'engagement politique et financier* ».

Électrifier les usages pour décarboner¹¹

L'électricité va se substituer aux énergies fossiles dans de nombreux secteurs, essentiellement l'habitat et le transport, diminuant d'autant les émissions de CO₂. Pour atteindre les objectifs climatiques, l'AIE préconise qu'en 2050 l'électricité représente 25 % du mix énergétique, contre 17 % aujourd'hui¹². Dans les transports, deuxième plus gros secteur émetteur de CO₂, le déploiement de la rail utilisant l'électricité bas carbone, réduit notablement la consommation de pétrole et de charbon, en attendant l'essor des véhicules électriques. Dans le bâtiment, développer les usages d'une électricité bas carbone permet aussi de réduire les émissions de CO₂.

LES ÉNERGIES BAS CARBONE DISPONIBLES TOUT DE SUITE

Sur les 2 900 milliards de tonnes d'émissions de CO₂ du « budget carbone¹³ » calculé par le GIEC, 2 000 milliards de tonnes ont déjà été relâchées dans l'atmosphère avec une forte accélération ces dernières années (1 000 milliards de tonnes depuis 40 ans). Il convient donc d'engager des efforts de

réduction immédiats, sans attendre les technologies futures, qui apporteront leur contribution à mesure de leur disponibilité.

70 % du budget carbone de la planète a déjà été consommé : il est temps d'agir. Une fois libéré, le CO₂ reste longtemps dans l'atmosphère.

Une solution industrielle, disponible, bas carbone et efficace

Avec 438 réacteurs nucléaires¹⁴ en exploitation, l'énergie nucléaire est présente dans 30 pays. Seuls six pays égalent ou dépassent les 80 % d'électricité bas carbone préconisés par le GIEC en matière de mix électrique. Parmi eux, quatre – la Suisse, la Suède, la France et le Brésil – ont un mix comprenant une part de nucléaire. 40 % de l'électricité helvète et suédoise provient du nucléaire, 77 % pour la France¹⁵. De son côté, le Brésil possède deux réacteurs nucléaires.

Dans les pays de l'OCDE, l'atome est la première source d'électricité bas carbone : il faut préserver cet atout. Aux États-Unis, le nucléaire représente les deux tiers de l'électricité bas carbone. 75 réacteurs, sur la centaine en exploitation, sont déjà autorisés à fonctionner 60 ans. Dans l'Union européenne, plus de la moitié de l'électricité bas carbone est nucléaire. La Finlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse ont également engagé des programmes de prolongation de la durée d'exploitation de leurs réacteurs. En France, EDF prévoit de mener à bien un projet de rénovation (le Grand carénage) de ses 58 réacteurs pour les exploiter en toute sûreté au-delà de 40 ans.

Prolonger la durée d'exploitation du parc nucléaire existant présente un intérêt indéniable en utilisant un outil industriel performant et amorti, et en concentrant les efforts de réduction des émissions de CO₂

sur la part de la consommation énergétique d'origine fossile.

Le Japon dispose encore de 48 réacteurs nucléaires. Leur mise à l'arrêt a conduit le pays à augmenter la part des énergies fossiles dans son mix électrique à 85 %. Les émissions de CO₂ nippones ont augmenté de 6 % en 2012 et le pays a dû se désengager du Protocole de Kyoto. Le redémarrage d'une partie des réacteurs pourrait lui permettre de diminuer ses émissions de CO₂.

Accompagner la croissance bas carbone des pays émergents

En 2050, les six plus grandes économies mondiales seront les États-Unis et les « BRICS » (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud). Tous exploitent des réacteurs nucléaires et développent des programmes nucléaires ambitieux. En Chine, plus de 20 réacteurs sont en construction¹⁶. Selon l'AIE¹⁷, pour tenir les objectifs climatiques, la Chine devrait représenter, à elle seule, un tiers du parc nucléaire mondial en 2050. Pour ces pays, le développement économique est essentiel. Pour que la croissance soit bas carbone, il convient de soutenir leur programme dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Toujours un atout pour réduire les émissions de CO₂

Selon l'AIE¹⁸, depuis 1971 l'énergie nucléaire a permis au monde d'éviter l'équivalent de deux ans d'émissions de CO₂. C'est la contribution la plus importante des énergies bas carbone¹⁹. D'ici 2040, l'équivalent de quatre années d'émissions de CO₂ pourrait encore être économisé. En Europe, chaque année les émissions de CO₂ évitées par le nucléaire sont équivalentes à celles générées par les trafics automobiles

¹⁰. NEEDS project, 2009. ¹¹. *Energy Technology Perspectives 2014*, AIE http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives_ES.pdf. ¹². Scénario 2DS de l'AIE. ¹³. *Carbon Brief* d'après les données du GIEC : <http://www.carbonbrief.org/blog/2014/11/six-years-worth-of-current-emissions-would-blow-the-carbon-budget-for-1-point-5-degrees/>. ¹⁴. AIEA, 2014 http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/GC58InfDocuments/English/gc58inf-6_en.pdf. ¹⁵. RTE, 2014 http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_electrique_2014.pdf. ¹⁶. AIEA, 2014 http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC58/GC58InfDocuments/English/gc58inf-6_en.pdf. ¹⁷. Scénario 2DS de l'AIE. ¹⁸. *World Energy Outlook*, AIE, 2014 <http://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2014/november/signs-of-stress-must-not-be-ignored-iea-warns-in-its-new-world-energy-outlook.html>. ¹⁹. *World Energy Outlook*, AIE, 2014 <http://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2014/november/signs-of-stress-must-not-be-ignored-iea-warns-in-its-new-world-energy-outlook.html>.

annuels de l'Allemagne, l'Espagne, la France, du Royaume-Uni et de l'Italie²⁰ cumulés.

DES TECHNOLOGIES BAS CARBONE POUR CHAQUE PAYS

Chaque pays doit pouvoir accéder à un portefeuille le plus large possible de technologies bas carbone. Les protocoles de la CCNUCC (Conférence des Nations unies contre le changement climatique) doivent permettre aux pays qui le souhaitent, de recourir à l'énergie nucléaire et d'avoir accès aux financements climatiques, comme pour toutes les autres énergies bas carbone.

Sans nucléaire, peu de chances de rester sous les 2 °C

Seuls huit scénarios, parmi les 1 200²¹ répertoriés et analysés par le GIEC, présentent de manière concomitante la limitation du réchauffement à 2 °C et une sortie du nucléaire. Dans une lettre ouverte²² fin 2013, quatre grands climatologues (James Hansen - NASA, Ken Caldeira - Carnegie Institution, Kerry Emanuel - Massachusetts Institute of Technology, Tom Wigley - université d'Adelaide en Australie) déclaraient : « *il n'y a pas de chemin crédible à la stabilisation du climat qui n'inclue pas un rôle important pour l'énergie nucléaire (on ne peut se permettre de tourner le dos à aucune technologie).* »

Dans son scénario 2DS, sa vision la plus efficace pour tenir l'objectif de 2 °C, l'AIE projette que la capacité brute nucléaire pourrait plus que doubler d'ici 2050, passant d'environ 400 GWe – son niveau actuel – à 930 GW. Soit une augmentation de 11 à 17 %²³ de la part du nucléaire dans le mix électrique mondial.

Intégrer les objectifs et spécificités des pays

Généralement, les politiques énergétiques poursuivent plusieurs objectifs : développement économique et

territorial, sécurité d'approvisionnement, efficacité énergétique, pouvoir d'achat, filière industrielle, etc. Chaque pays doit composer avec des contraintes variées en termes de ressources naturelles, d'infrastructures, de compétences, d'opinion publique, de réseaux de transports et de distribution et de demande d'électricité. Pour la COP21, chaque pays soumettra sa proposition de contribution à l'effort global de réduction des émissions. Pour réussir, les pays doivent avoir accès à un très large choix d'options bas carbone, leur offrant un maximum de souplesse pour répondre à leurs enjeux nationaux et contribuer à l'objectif global.

Les profils nucléaires et renouvelables se complètent

Le recours aux énergies renouvelables électriques, y compris l'hydraulique, est une solution selon les ressources des pays. Le nucléaire en est une autre pour les pays qui le peuvent et le souhaitent. Les moyens intermittents et les moyens « commandables » se complètent pour assurer l'optimisation et l'équilibre des systèmes électriques.

Les centrales nucléaires, l'hydraulique, la bioélectricité et la géo-électricité ont des taux de disponibilité très élevés. Elles offrent des services systèmes qui accommodent la variabilité des énergies solaires et éoliennes. Dans les zones tropicales et équatoriales, où la climatisation est développée, la production d'électricité solaire est maximale pendant les heures de demande de pointe, ce qui permet, en associant solaire et nucléaire, de structurer des parcs électriques à très faibles émissions de CO₂.

D'ici 15 à 20 ans, les systèmes multi-énergies innovants incluant les renouvelables et le nucléaire (cogénération, couplage électricité-chauffage, couplage avec des électrolyseurs) déboucheront sur une extension des usages de l'électricité bas carbone par de nouvelles applications : chaleur décarbonée, biocarburants, mobilité électrique

et hydrogène, réseaux (bio) gaziers, services de stockage...

Un portefeuille de technologies élargi

Comme aujourd'hui il est indispensable d'utiliser le portefeuille le plus large possible de solutions bas carbone, il sera possible en 2050, de disposer d'une grande gamme de solutions de nouvelles technologies : stockage d'électricité, nouvelles énergies renouvelables, et nucléaire.

Une des solutions de la COP21 pourrait être de fournir à la filière nucléaire un environnement serein pour stimuler l'innovation et proposer des solutions plus économes en ressources, toujours plus sûres, produisant toujours moins de déchets. La recherche sur les réacteurs de 4^e génération est bien avancée et dans ce domaine, la France est un des leaders. Il faut conforter cet acquis.

Pour en savoir plus : sfen.org/fr/nuclear-climate



²⁰.Eurostat, 2014. ²¹. Rapport du Groupe III du GIEC : http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf. ²². Washington Post, 2013 http://www.columbia.edu/~jeh1/NuclearPowerInClimateBattle.WashingtonPost_2013.11.03.pdf. ²³. World Energy Investment Outlook, AIE, 2014 <http://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2014/june/name,72035,en.html>

Climat : les associations et forums nucléaires s'engagent

par **Isabelle Jouette**, SFEN



en substance...

Dans le cadre de l'initiative internationale *Nuclear for Climate*, 41 associations scientifiques de l'énergie nucléaire ont signé un manifeste présentant leur engagement dans la lutte contre le changement climatique. Elles demandent à la CCNUCC de reconnaître l'atome comme une énergie bas-carbone. La jeune génération européenne, les forums d'industriels et des associations extérieures au secteur du nucléaire rejoignent l'initiative.

A l'occasion du congrès ICAPP (*International Congress on Advances on nuclear Power Plants*), qui s'est tenu en mai à Nice, 41 associations représentant 50000 professionnels du nucléaire de 36 pays des cinq continents, ont présenté leur engagement dans la lutte contre le changement climatique.

Leur déclaration commune (voir page suivante) s'inscrit dans l'initiative *Nuclear for Climate* engagée en 2014 par la Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN), l'*American Nuclear Society* (ANS) et l'*European Nuclear Society* (ENS). Elle rassemble les scientifiques nucléaires du monde entier réunis dans 60 associations nucléaires régionales et nationales. Elle réunit à la fois des pays du Nord et des pays du Sud. Pour ces pays, qui ne veulent pas avoir à choisir entre la prospérité économique et la préservation de l'environnement, le nucléaire permet de réduire la pollution atmosphérique tout en apportant des réponses aux besoins énergétiques grandissants de leur population.

Les signataires ont déclaré : « *Nous sommes convaincus que l'énergie nucléaire fait partie de la solution*

dans la lutte contre le changement climatique. »

Pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ préconisés par le GIEC, les 41 signataires estiment que chaque pays doit pouvoir accéder à un portefeuille le plus large possible de technologies bas carbone, incluant l'énergie nucléaire. La SFEN et ses homologues souhaitent que la CCNUCC (Conférence des Nations unies contre le changement climatique) reconnaisse l'énergie nucléaire comme une énergie bas carbone et la fasse entrer dans les mécanismes de financement auxquels toutes les autres énergies bas carbone sont éligibles. L'initiative est largement reprise par les salariés de la filière nucléaire dans le monde, des laboratoires de recherche aux centrales nucléaires, sans oublier les applications médicales. ■

Les associations signataires de la déclaration de Nice

American Nuclear Society (ANS) - Argentine Association of Nuclear Technology (AATN) - Atomic Energy Society of Japan (AESJ) - Australian Nuclear Association (ANA) - Austrian Nuclear Society (OKG) - Belgian Nuclear Society (BNS) - Brazilian Nuclear Energy Association (ABEN) - Bulgarian Nuclear Society (BGNS) - Canadian Nuclear Society (CNS-SNC) - Chinese Nuclear Society (CNS) - Croatian Nuclear Society (HND) - Czech Nuclear Society (CNS) - European Nuclear Society (ENS) - Finnish Nuclear Society (ATS) - French Nuclear Energy Society (SFEN) - German Nuclear Society (KTG) - Hungarian Nuclear Society (MNT) - Indian Nuclear Society (INS) - International Nuclear Society Council (INSC) - Italian Nuclear Association (AIN) - Korean Nuclear Society (KNS) - Latin American Section of the American - Nuclear Society (LAS/ANS) - Lithuanian Nuclear Energy Association (BEA) - Malaysia Nuclear Society (PNM) - Mexican Nuclear Society (SNM) - Mongolian Nuclear Society (MNS) - Netherlands Nuclear Society (NNS) - Nuclear Engineers Society of Turkey (NMD) - Nuclear Industry Association South Africa (NIASA) - Nuclear Institute (NI) - Nuclear Society of Kazakhstan (NSK) - Nuclear Society of Russia (NSR) - Nuclear Society of Serbia (NSS) - Nuclear Society of Slovenia (DJS) - Nuclear Society of Thailand (NST) - Romanian Nuclear Energy Association (AREN) - Slovak Nuclear Society (SNUS) - Spanish Nuclear Society (SNE) - Swedish Nuclear Society (SKS) - Swiss Nuclear Society (SGK) - Ukraine Nuclear Society (UNS).

Les forums qui soutiennent *Nuclear for Climate* :
FORATOM, regroupement de 16 forums industriels européens - *Nuclear Industry Association*, Royaume-Uni -
Forum Nucléaire Belge - *Japan Atomic Industrial Forum*.

LE NUCLÉAIRE POUR LE CLIMAT NUCLEAR FOR CLIMATE

Déclaration de Nice - 4 mai 2015

Nous soussignés, scientifiques, ingénieurs, professionnels représentant les associations scientifiques régionales, nationales et internationales, ainsi que de nombreuses organisations techniques dédiées au développement et l'utilisation pacifique de la technologie nucléaire,

Réunis aujourd'hui à Nice, France

Reconnaissons les conclusions incontestables tirées par la majorité des climatologues, présentées dans le 5^e rapport d'évaluation des experts du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC): « *les activités humaines ont contribué aux changements du climat de la Terre* »;

Sommes confiants quant aux résultats de la COP 21 (Conférence des Parties) sur les changements climatiques qui se tiendra à Paris en décembre 2015;

Sommes conscients que, selon l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), alors que la population mondiale devrait atteindre environ 10 milliards, avec un développement croissant, la demande d'électricité est actuellement sur la voie d'un doublement d'ici 2050;

Partageons l'objectif de limiter le réchauffement global à 2 °C d'ici 2050, ce qui impose alors, selon le GIEC, que 80 % de l'électricité provienne de sources bas carbone (contre 30 % aujourd'hui);

Sommes conscients que cela représente un défi majeur qui nécessitera de recourir au déploiement de toutes les technologies bas carbone disponibles;

Sommes convaincus que le monde doit prendre

immédiatement des mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, car une grande part du budget carbone a déjà été consommée, et que nous ne pouvons pas attendre que les technologies futures soient prêtes pour commencer à engager nos efforts de décarbonation;

Reconnaissons que l'énergie nucléaire est une des rares options disponibles à une échelle qui permettra de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie, et nous tenons à souligner que ce point de vue est partagé par l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et le GIEC.

Déclarons ici que

Nous croyons avec fierté que l'énergie nucléaire est une partie essentielle de la solution pour lutter contre le changement climatique

Et **croyons** que chaque pays doit avoir accès à l'éventail le plus large possible de technologies bas carbone disponibles, dont l'énergie nucléaire, pour réduire les émissions de CO₂ et atteindre ses autres objectifs énergétiques;

Appelons les nouveaux protocoles de la CCNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) à reconnaître l'énergie nucléaire comme une option énergétique bas carbone, et à l'inclure dans ses mécanismes de financement climatiques, comme toutes les autres sources d'énergie à faible émission de carbone;

Avons décidé de signer ensemble cette déclaration et voulons la porter à l'attention des décideurs.

Fait à Nice, le 4 mai 2015.



Le changement climatique, un problème (aussi) économique

par Jacques David (CEA) - Boris Le Ngoc (SFEN)



en substance...

Le changement climatique est une réalité. Par son ampleur et son intensité, il fait peser d'importants risques sur l'environnement, la société et l'économie. Les régions les plus pauvres, et les moins émettrices de CO₂, seront les plus touchées, aggravant des situations déjà précaires. Depuis plusieurs années, les économistes se mobilisent et élaborent des outils permettant d'aider et orienter la politique vers une économie bas carbone. De la « taxe carbone » aux marchés de quotas en passant par la réglementation, l'éducation et les innovations, les économistes proposent un panel d'outils et de leviers qui se heurte parfois à l'acceptation sociale et à la vision politique. Loin d'être fatalistes, ils pensent qu'une transition énergétique bien pilotée peut dessiner des opportunités en matière d'emplois et d'innovation, et avoir des retombées positives sur toute l'économie.

ENJEUX ET APPORTS DES ÉCONOMISTES

L'histoire de l'humanité montre que nos sociétés ne savent pas faire de croissance sans une énergie abondante et bon marché. À la fin du XIX^e siècle, la première révolution industrielle s'est appuyée sur la consommation d'énergies fossiles, principale source d'émissions de dioxyde de carbone, pour soutenir l'essor économique. Depuis, la production mondiale, la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre (GES) se sont engagées sur des trajectoires de croissance parallèles. Le réchauffement climatique en cours est un sous-produit de la croissance passée, et sa prise en compte passera par une gestion de la croissance future.

En effet, la lutte contre le changement climatique n'est pas seulement l'affaire des climatologues, physiiciens, météorologues ou encore

chimistes... La contribution des économistes est aussi importante. Ils élaborent des instruments permettant de concevoir le problème climatique dans une globalité humaine (« le plus grand bien du plus grand nombre ») et de le gérer efficacement. L'apport des économistes est double. D'abord, ils réalisent un travail de prospective technico-économique pour estimer des trajectoires d'évolution possibles du « système-monde » – un exercice difficile soumis à des aléas et des incertitudes surtout lorsqu'il s'inscrit sur une longue période (ruptures technologiques imprévisibles). C'est une contribution qui vient compléter les travaux du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Puis, ils élaborent les concepts et instruments économiques qui permettront d'atteindre les objectifs climatiques au moindre coût – pour l'homme, la société, et les économies du monde développé et de toute la planète ; à charge pour les « politiques » de les mettre en œuvre.

Car dans leurs travaux, les économistes s'intéressent aussi et avant tout à l'Homme. La problématique du développement est largement prise en compte d'autant qu'elle est au centre des négociations internationales sur le climat. Le partage du fardeau – les efforts de réduction des émissions de GES – divise pays du Sud et du Nord. Dans les instruments qu'ils élaborent, les économistes réfléchissent à comment prendre en compte le bien-être des populations, dans l'instantané et sur la durée. D'autant qu'ils doivent jongler avec l'hétérogénéité entre les pays du Nord et du Sud en termes de revenus, de capacité technique, d'histoire, de mode de

vie ou d'inégalité face aux effets du changement climatique : certains pays seront plus touchés que d'autres, et ce ne sont pas forcément les plus « émetteurs », comme les îles du Pacifique. Une partie des travaux de la science économique porte donc sur la répartition la plus juste possible des coûts de l'ajustement au changement climatique. Et les trajectoires qu'ils proposent de mettre en œuvre souhaitent également apporter des réponses aux questions de pauvreté et de précarité énergétique.

Ainsi, sans l'aborder directement, l'éthique est prise en compte dans le questionnement de l'impact du passé : aux demandes des « nouveaux pays en développement » qui disent aux « vieux pays » « *vous avez pollué pendant deux siècles, payez maintenant* », répond l'intégration par les économistes du coût sur la durée, avec la question brûlante de savoir « *quel taux d'actualisation du long terme prendre* », ou, en termes non-économiques, « *quel degré de préférence de l'instant par rapport au futur* »¹. En matière environnementale, dans le passé, le cadre multilatéral a déjà permis de faire face à des menaces globales. L'exemple le plus connu est le protocole de Montréal, signé en 1987 qui a conduit la communauté internationale à pratiquement cesser les émissions de gaz CFC² dont l'accumulation dans l'atmosphère provoquait la destruction de la couche d'ozone (le fameux « trou d'ozone » au-dessus des pôles). Le succès de cet accord à portée universelle a reposé sur trois piliers : un engagement politique fort des gouvernements concernés, un système rigoureux et indépendant de suivi, des instruments économiques

adaptés (un marché de permis d'émissions à des coûts progressivement croissants pour des quotas progressivement décroissants), qui ont mené à un succès incontestable : le « trou » est maintenant résorbé. *A contrario*, pour ce problème du climat, plus de vingt ans de négociation dans le cadre de l'ONU (création du GIEC en 1988, Conférences des Parties (COP) en 1992, protocole de Kyoto élaboré à la COP3 en 1997 entré en vigueur en 2005, etc.) n'ont jusqu'à présent pas permis d'enregistrer de résultats comparables. L'adoption du protocole de Kyoto en 1997 a toutefois permis l'instauration d'un marché carbone entre pays de l'Annexe 1 (regroupant les pays industrialisés), assorti de mécanismes de flexibilité pour engager une réduction modeste de leurs émissions de GES sur une période de 5 ans (2008-2012). Ce qui a été possible pour l'ozone troposphérique serait-il hors d'atteinte pour les gaz à effet de serre ?

450 PPM : LE CADRE PRÉDÉTERMINÉ DE RÉFLEXION POUR LES ÉCONOMISTES

Dans l'élaboration de leurs outils, les économistes peuvent raisonner de deux manières.

La première, qui nous est familière au pays de Descartes, est fondée sur l'application d'une rationalité du général au particulier, prenant comme hypothèse première le besoin pour l'homme de la « maximisation du bien-être net », évaluée dans notre cas comme la différence entre les bénéfices économiques liés aux (industries qui génèrent des) émissions de GES desquels on soustrait le coût du dommage environnemental que la concentration des GES dans l'atmosphère provoque. On aboutit ainsi à un optimum, pour lequel le niveau d'émissions est déterminé par un équilibre entre

le bénéfice marginal et le dommage marginal. L'exemple sans conteste de cette démarche a été la rédaction du Rapport Stern en 2006 qui a apporté une contribution déterminante³.

Mais, cette approche n'est pas celle retenue par l'ONU et les États. Vu l'urgence climatique, ce sont les climatologues qui ont fixé une limite – 450 ppm en équivalent CO₂⁴ – au-delà de laquelle nos sociétés seraient bouleversées. Le « *business as usual* » n'est donc plus une option. Les économistes ont intégré cette contrainte et, deuxième démarche, cherchent aujourd'hui à déterminer la politique la moins chère pour respecter cet objectif. C'est donc cette seconde méthode dite d'« optimum sous contrainte » qui fut adoptée à la conférence de Copenhague.

LES COÛTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les effets du changement climatique se font sentir sur toute la planète mais, suivant les régions du monde, les impacts sont plus ou moins intenses. Selon le groupe de scientifiques de l'ONU, le GIEC, le changement climatique pourrait entraîner :

- la multiplication et l'aggravation des phénomènes météorologiques extrêmes (canicules, inondations, sécheresses, cyclones) ;
- la baisse de la biodiversité (20 à 30 % des espèces animales et végétales menacées d'extinction) ;
- la montée du niveau des mers et des océans (plus d'un mètre d'ici la fin du siècle) ;
- la baisse des ressources en eau potable (entre 20 % et 50 % dans de nombreuses régions⁵).

Les sociétés humaines pourraient aussi être impactées par la multiplication des flux migratoires et des conflits liés à l'accès aux ressources. Le changement climatique pourrait entraîner une baisse des rendements agricoles en Afrique subsaharienne, en Asie du Sud-Est et en Asie du Sud, régions où l'agriculture reste le principal moyen de subsistance pour 80 % de la population. C'est une mauvaise nouvelle à l'heure où l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) estime qu'il faudra accroître de 70 % la production alimentaire pour alimenter les 9 milliards d'humains que comptera la planète en 2050⁶.



Aparté

Le marché des quotas de CO₂ en Europe a-t-il failli, puisque le prix du CO₂ s'est effondré ? D'un point de vue d'économiste « pur », non, puisque les émissions de CO₂ de l'Europe sur la période (2005-2012) sont en dessous du maximum alloué par quota à l'origine, ce qui se manifeste par un « surplus de quotas ». Par contre, comme cela décourage les investisseurs en technologies propres, sur le long terme et l'objectif final (climat), oui. C'est donc que le problème était dans la fixation des objectifs initiaux et non dans le fonctionnement de l'outil.

1. Sujet de recherche pour psychologues et « économistes comportementaux », cf. « *Système 1, système 2* » de D.Kahneman. **2.** Les CFC ont été utilisés comme réfrigérants, gaz propulseur des aérosols, matières premières dans la synthèse de composés organiques, solvants, extincteurs et agents d'expansion dans les mousses de matières plastiques. Ils sont responsables pour une bonne part de la destruction de la couche d'ozone. Ils modifient les molécules d'ozone de l'atmosphère en enlevant un atome d'oxygène. Comme ils se dégradent progressivement mais très lentement dans l'atmosphère, leur effet destructeur se poursuit pendant plusieurs siècles après leur émission. **3.** La *Stern Review on Economics of Climate Change* soutient que le laissez-faire en matière climatique coûterait bien plus de richesses à l'humanité que les mesures de prévention requises pour maîtriser puis réduire les émissions de gaz à effet de serre, à condition que celles-ci soient conçues de façon à en minimiser le coût économique. **4.** Ce chiffre est la limite à ne pas dépasser pour une probabilité raisonnable de contenir l'élévation de température moyenne du globe à 2°C. **5.** Baissons la chaleur : phénomènes climatiques extrêmes, impacts régionaux et plaidoyer en faveur de l'adaptation (Banque Mondiale) : http://www.worldbank.org/content/dam/Worldbank/document/French_Executive_Summary_Turn_Down_The_Heat_Climate_Extremes_Regional_Impacts_Case_for_Resilience.pdf. **6.** La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : <http://www.fao.org/3/a-i4040f.pdf>

La conjugaison de ces facteurs – augmentation des événements météorologiques extrêmes et baisse des rendements agricoles – fait craindre une hausse et une volatilité des prix alimentaires qui dépendront de la répartition des efforts consentis entre atténuation et adaptation. D'ici 2050, le prix moyen des denrées de base pourrait s'envoler (riz 37 %, maïs 55 %, blé 11 %) réduisant d'autant l'accès à la nourriture des populations les plus démunies. Le changement climatique aura également des impacts sur l'économie mondiale. Chaque année, les mesures d'atténuation (*mitigation*: réduction des émissions de GES) et d'adaptation pourraient, d'après Stern, se situer, dans le cas d'une action immédiate, entre 1 % du PIB mondial (soit environ 750 milliards de dollars) et 5% suivant les hypothèses retenues. Avec une action plus tardive, ceux-ci pourraient atteindre entre 5 et 20% du PIB mondial. Face à cette falaise d'investissements, les économistes sont divisés : faut-il agir aujourd'hui ou attendre ? Derrière ce débat se trouvent la question du coût et celle du taux d'actualisation. Plus on part tard et plus la facture sera lourde à la fin, mais entre-temps on aura profité d'un répit. Plus on part tôt et plus il faut accepter de contribuer dès aujourd'hui, mais à la fin la facture sera plus légère.

Il y a très certainement un « *sweet spot* » (point de compromis, de moindre coût), quelque part au milieu de la courbe. Là où, à la fois les coûts de mitigation et d'adaptation seront supportables, et les conséquences climatiques pas trop grandes. Cette vision théorique permet de définir une « bonne » trajectoire demandant des efforts modérés au départ, et un coût total plus faible. L'utilisation d'une « taxe carbone » avec un coût croissant dans le temps est un outil pratique à mettre en œuvre pour ce genre de politique. Et nombre de modèles permettent de dériver des coûts de carbone implicites en considérant que les émissions de carbone correspondent à des « *shadow prices* » (prix virtuels) du carbone. C'est l'approche qui avait été retenue en Europe après le Protocole de Kyoto

pour établir un « marché du CO₂ », à l'image du marché des permis d'émissions de CFC du protocole de Montréal en 1987, qui lui était mondial.

LES INSTRUMENTS DE LA POLITIQUE CLIMATIQUE ET LEUR EFFICACITÉ, VUS PAR LES ÉCONOMISTES

En matière d'instruments économiques, les outils classiques sont

- › (1) les prix et taxes, que l'on peut appliquer à des marchés qui joueront le jeu naturel de l'action de leurs acteurs ;
- › ou (2) que l'on réglementera pour contraindre à respecter des normes préétablies si les incitations naturelles sont insuffisantes ;
- › enfin (3), sur un plus long terme, l'information et l'éducation des acteurs permettront des changements de comportements, et la R&D amènera de nouvelles technologies et leurs potentialités.

Plus spécifiquement pour le climat, cela se déclinera en taxes (par exemple « taxe carbone ») et marchés de permis d'émissions pour la vision « marché » – avec des variantes selon que le prix est libre, avec plancher ou avec plafond. Ou, pour les aspects réglementations, par des normes en matière d'habitat, telles que celle issues du Grenelle de l'environnement.

Ces outils tendent vers le même but, diminuer les émissions de CO₂, par des voies différentes. Alors que les normes imposent directement des niveaux maximums d'émission, les deux autres outils, taxe et marché de permis d'émissions, fonctionnent par incitation (forte) à réduction en donnant un prix à ce qui n'en avait pas avant : le CO₂ (donc le contenu en carbone) émis dans l'atmosphère. Si le niveau des prix ou de la taxe est convenablement fixé, les acteurs émetteurs auront intérêt à réduire leurs émissions car l'avantage économique procuré par celles-ci sera moindre que le coût supporté. Les normes « cachent » cet aspect coût qui n'est pas directement visible, mais il sera bien

supporté *in fine* par les acteurs malgré tout – c'est pourquoi les économistes préfèrent en général les deux premiers instruments, jugés plus efficaces car permettant d'atteindre un même résultat au moindre coût. On ajoutera ici que la transparence plus grande sur « qui paie quoi » leur donne un côté « éthique » supplémentaire, à rebours de l'intuition ordinaire.

En théorie, taxe et marché de permis sont équivalents quant à leurs effets, si le prix fixé pour la taxe est identique à celui que le marché atteint de façon indirecte par son libre jeu. Mais pour la taxe, cela suppose que le régulateur dispose d'une information parfaite, et néglige les coûts associés pour l'acquiescer, hypothèses en fait peu souvent remplies.

Par définition, le marché permet d'être sûr par avance du niveau d'émissions (maximum) qu'on atteindra puisque c'est le volume maximum de permis autorisés émis. C'est pourquoi si ce « maximum d'émission » est le problème principal que l'on veut attaquer, ce marché est l'outil idéal par exemple si le dommage marginal croît très rapidement avec le niveau d'émissions. À l'inverse, la taxe sera plus appropriée si le coût de réduction des émissions augmente très rapidement avec le niveau de réduction atteint. Les études empiriques sur le problème du climat semblent plutôt se situer dans ce second cas, donnant implicitement un avantage (« économique ») à la taxe, l'avantage « certitude quant à la réduction » restant lui au marché. Sur un plan de mise en œuvre concrète, on notera que la taxe dispose d'un gros avantage pratique : les gouvernements savent déjà faire avec l'infrastructure existante, alors que la mise en place d'un marché nécessite une infrastructure éventuellement à créer, avec les coûts correspondants.

En France, le Rapport Quinet (2005) a étudié la valeur tutélaire du carbone, et propose ainsi une trajectoire du prix du CO₂ à des niveaux croissants de valeur : (actualisé en 2015) 34 €/t CO₂ en 2010, 100 €/t en 2030, jusqu'à 250 €/t en 2050.

Une problématique de l'outil marché est classiquement la volatilité du prix constaté. Dans le cas du climat, cette volatilité peut être spécialement néfaste, car, correspondant à un brouillage du « signal prix » transmis aux acteurs, ceux-ci peuvent faire des choix d'investissements de long terme qui s'avèreront *in fine* défavorables. C'est ce qui se passe en ce moment en Europe. Il faudra donc pouvoir encourager un infléchissement des comportements sur le long terme dans le sens de la diminution des émissions et du développement des énergies non carbonées, ce qui conduira à mettre l'accent sur les outils non traditionnels de l'économiste tels que formation-éducation, information, R&D.

L'IMPORTANCE DE LA R&D

Le changement climatique est aussi, et avant tout, un problème technologique. Toute activité économique (production, transports, chauffage, etc.) qui nécessite l'usage d'énergies fossiles induit des GES. Pour inverser cette tendance – découpler les trajectoires entre croissance économique et émissions de GES – l'économie devra développer massivement les technologies non carbonées ou de capture de CO₂ (CCS)⁷.

Dans son rapport *Energy technology perspective 2015* publié en mai dernier, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime que « l'investissement actuel dans la recherche et le développement ne permettra pas d'atteindre les objectifs climatiques à long terme ». L'AIE estime à 17 milliards de dollars (15,2 milliards d'euros) par an les dépenses publiques mondiales de R&D dans le secteur énergétique et leur part dans les dépenses mondiales de R&D a chuté de 11 % en 1981 à 3 ou 4 % depuis le début des années 2000. Pour innover demain, il faut investir aujourd'hui. En cela, il est indispensable de sanctuariser, voire

d'intensifier les financements dans des projets bas carbone de rupture comme ASTRID (réacteur nucléaire de 4^e génération) et ITER (démonstrateur de la fusion nucléaire).

LA TAXE CARBONE : ATOUT POUR LE NUCLÉAIRE ?

Une politique climatique qui se traduirait par la mise en place d'outils de tarification du carbone (*marchés de quota ou taxes, voir en page 24*) permettrait de mobiliser des sommes considérables : environ 30 milliards d'euros par an pour la France. Cette recette fiscale supplémentaire pourrait représenter à terme 600 à 900 milliards d'euros. Une véritable manne financière pour l'économie française, et pas uniquement le secteur énergétique. En outre, la transition énergétique pourrait ainsi améliorer la balance commerciale de l'Hexagone, renforcer la sécurité d'approvisionnement en diminuant l'importation d'énergies fossiles, et créer des emplois. L'instauration d'une taxe carbone à l'échelle mondiale serait-elle un atout pour le développement de l'énergie nucléaire ? Oui, répond l'OCDE-AEN⁸ dans une étude publiée en 2011. Un régime mondial et uniforme de détermination des prix du carbone permettrait de « stimuler de manière significative l'expansion de la construction de centrales nucléaires ». Selon l'Agence, remplacer un système d'échange de quotas d'émissions, caractérisé par la volatilité des prix, par une taxe carbone stable équivalente au prix d'échange moyen aurait pour résultat « d'augmenter la volatilité des profits du charbon et du gaz et ainsi, d'accroître plus encore la compétitivité relative de l'énergie nucléaire ».

L'ÉCONOMIE, OUTIL INDISPENSABLE POUR LE CLIMAT ET LE NUCLÉAIRE

Comme on vient de le voir, la science économique s'est saisie depuis longtemps du sujet des

politiques efficaces au service de l'humain et désormais, de la prise en compte du changement climatique. En France, les instituts de la recherche publique organisés autour de l'ANCRE (Alliance nationale de la coordination de la recherche pour l'énergie) sont très actifs sur le sujet, notamment le CEA avec son Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-Tésé).

Le sujet est complexe et incertain. Les modèles sont perfectibles. Mais des conclusions solides se dégagent déjà :

- ▶ il est essentiel d'aller vers des actions de mitigation,
- ▶ le prix de l'énergie va/doit monter,
- ▶ l'innovation a un rôle déterminant à jouer dans la durée et au plan européen,
- ▶ de nombreux modèles permettent de dériver des coûts de carbone implicites en considérant que les émissions de carbone correspondent à des « *shadow prices* » (prix virtuels) du carbone.

Au final, il ressort de ces travaux d'étude approfondis que, bien pilotée, la transition peut être une opportunité pour la France et l'Europe. Pour cela, l'analyse économique est un outil indispensable pour guider le pays sur ce chemin ambitieux et hiérarchiser les actions à entreprendre.

7. Le procédé de capture (parfois appelé captage) du CO₂ (CSC, CCS pour *Carbon Capture and geological Storage*) consiste à piéger les molécules de CO₂ avant, pendant ou après l'étape de combustion pour éviter sa libération dans l'atmosphère (gaz à effet de serre). 8. La tarification du carbone et la compétitivité du nucléaire <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/carbon-pricing-exec-sum-2011.pdf> (2011)

Tarification mondiale du carbone, le mode d'emploi

Christian de Perthuis, directeur scientifique de la Chaire Économie du Climat (CDC Climat & Paris-Dauphine)
et **Pierre-André Juvet**, Professeur d'économie

Article publié dans la revue *Opinions & Débats*, numéro spécial de février 2015



en substance...

Un accord ambitieux à Paris doit dépasser les limites du protocole unijambiste signé à Kyoto ou du système de libre-service introduit à Copenhague où chacun peut picorer ce qui l'arrange. L'accord parisien devra fixer un cadre, avec une visibilité de long terme et des processus d'ajustement dans le temps à intervalles réguliers. À l'instar du Protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone, un tel accord doit reposer sur trois piliers : l'engagement politique fort des gouvernements ; un dispositif rigoureux et indépendant de mesure, vérification et reporting, des instruments économiques puissants. Pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre, l'instrument clef est l'introduction d'une tarification internationale du carbone.

La mise en œuvre d'un accord international sur le climat se heurte au problème très classique du « passager clandestin » (Olson-1965). Pour chaque acteur pris isolément, il n'y a pas de corrélation directe entre le niveau de l'effort qu'il accepte de produire pour réduire ses émissions et le bénéfice qu'il en tirera sous forme de moindres dommages. La perturbation climatique est en effet liée au stock global de gaz à effet de serre qui n'est que faiblement corrélié au flux annuel d'émission de chaque pays. De plus, les impacts les plus sévères sont éloignés dans le temps, ce qui incite chaque acteur à reporter l'intégralité des coûts

du changement climatique sur les générations futures.

Dans un tel contexte, chaque joueur a intérêt à attendre que ses voisins lancent l'action, la position idéale étant celle du « passager clandestin » qui ne ferait aucun effort quand tous les autres s'engageraient pour protéger le bien commun. Inversement, aucun acteur n'a intérêt à s'engager unilatéralement tant qu'il n'a pas la conviction que d'autres suivront dans le cadre d'une coalition plus large (Nordhaus - 2013). L'enjeu central des négociations internationales est de dépasser la vision de « stratégies substituables » déployée par les acteurs face au risque climatique, pour mettre en œuvre des « stratégies complémentaires »¹ (Sandler, T.-2004).

LES SCHEMAS POSSIBLES DE L'ACCORD « IDÉAL »

Tentons de tracer les contours de l'accord « idéal », dans lequel un prix du carbone s'applique à chaque tonne de gaz à effet de serre quel que soit l'endroit du globe où elle est émise. En 2013, les émissions mondiales de gaz à effet de serre sont estimées à environ 50 milliards de tonnes d'équivalent CO₂, soit 6,5 tonnes par habitant. Avec un prix de 25 dollars la tonne, on cumulerait une valeur totale à l'échelle du monde de l'ordre de 1250 milliards de dollars. Cette valeur est une nouvelle rente : la rente environnementale associée à la rareté

de l'atmosphère dans sa fonction de régulation du climat. Mais à 1250 milliards, pour impressionnant qu'il soit, ce montant ne représenterait encore que la moitié de la rente pétrolière estimée la même année. Comment peut se distribuer cette valeur dans l'économie mondiale ? Au plan international, les effets distributifs d'un prix unique du carbone constituent depuis vingt ans la réelle pierre d'achoppement de la négociation climatique. Comme l'ont souligné Graciela Chichilnisky et David Heal (1998), les écarts de richesses entre pays sont tels que la mise en place d'un prix uniforme du carbone (indifféremment sous forme de taxe ou de marché de permis) semble impossible : le prix du carbone adapté au Nord sera toujours bien trop élevé pour le Sud et réciproquement. Si on veut traiter cette question sans entrer dans la voie inefficace de prix du carbone différencié par zones, il faut opérer des transferts de ressources massifs du Nord vers le Sud pour guider les décisions de l'ensemble des acteurs économiques dans de bonnes conditions.

Sur le papier, l'introduction d'un prix international du carbone peut être facilement couplée à de telles redistributions forfaitaires. Imaginons que la tarification du carbone soit introduite par une taxe uniforme dont le produit serait redistribué de façon égalitaire à chaque pays, en fonction du nombre d'habitants. Au plan distributif, un tel mécanisme

¹ La vision de stratégies substituables implique que chaque joueur pense qu'il peut bénéficier des stratégies des autres sans faire d'effort, une vision complémentaire implique au contraire que chaque joueur pense que sa stratégie sera d'autant plus efficace qu'elle va dans le même sens que celle des autres. Ces visions sont à la base du comportement du passager clandestin.

équivalent à un système mondial de plafonnement et d'échange basé sur une répartition égalitaire des droits à émettre par habitant. À émissions inchangées, une telle tarification du carbone génère au démarrage des transferts massifs de revenu depuis les pays industrialisés vers les pays en développement : un flux global de l'ordre de 250 milliards de dollars par an, soit deux fois la totalité de l'aide publique au développement ! Avec une contribution de 115 milliards, les États-Unis seraient le premier perdant tandis que l'Inde serait le premier bénéficiaire avec un gain de 135 milliards. Un tel dispositif serait plébiscité par les pays en développement les plus réticents à rejoindre un accord climatique, comme l'Inde.

Ce sont en réalité les pays riches qui s'opposent à cette voie dans laquelle la mise en place d'une tarification internationale et unique du carbone s'accompagnerait de redistributions massives. Ces pays préfèrent s'arc-bouter sur la formule dite du « droit du grand-père » dans laquelle on reconnaît les droits historiques à émettre qui sont plafonnés puis réduits dans le temps. Une telle formule, retenue dans le protocole de Kyoto, laisse par construction les pays en développement à la périphérie de l'accord, avec le lot de consolation du mécanisme pour un développement propre.

Cette architecture rend très hypothétique l'élargissement du noyau initial de la coalition des pays riches basée sur la reconnaissance des droits historiques à émettre.

UN « BONUS-MALUS » CARBONE POUR INTÉGRER LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT DANS L'ACCORD UNIVERSEL

Malgré l'entrée en vigueur de la CCNUCC, il n'existe pas de système transparent et homogène de MRV² des émissions de gaz à effet de serre s'appliquant à l'intégralité des pays. Les bases techniques d'un tel système, *via* les inventaires nationaux et les travaux du GIEC sur les facteurs d'émission, sont disponibles et couvrent déjà les émissions des pays de l'annexe I de la Convention (pays

développés et en transition vers l'économie de marché). En revanche, les informations sur les émissions de la majorité des autres pays restent très lacunaires. Ce sont donc des obstacles politiques qu'il faut lever, avec l'aide d'incitations *ad hoc*, pour inclure l'ensemble des pays dans le dispositif commun de MRV.

L'expérience du Protocole de Kyoto a montré la difficulté, voire l'impossibilité, de faire émerger un prix international du carbone *via* un système de marché de permis entre États. De fait, le métier des gouvernements n'est pas de faire du *trading*. Pour inciter les gouvernements à entrer dans un jeu coopératif, il faut viser un autre système de tarification du carbone qui soit simple et transparent. Un dispositif de type « bonus-malus », qui définisse simultanément le prix à payer pour les émissions dépassant un certain seuil et l'usage à faire des sommes collectées, semble adapté. Dans un tel système, tout pays dépassant le niveau moyen d'émissions par tête verserait une contribution sur chaque tonne émise au-dessus du seuil ; symétriquement, chaque pays émettant moins que ce niveau de référence recevrait une compensation calculée sur le nombre de tonnes qu'il a permis d'économiser par rapport à la moyenne mondiale. Par construction, ce dispositif s'équilibrerait d'année en année. Il bénéficierait au démarrage aux pays qui ont les plus faibles émissions par habitant, qui se recouperait avec le groupe des pays les moins avancés.

En régime de croisière, le « bonus-malus » inciterait l'ensemble des pays à réduire leurs émissions par habitant pour alléger leur malus ou accroître leur bonus suivant leur position initiale. Comme dans les cas d'introduction d'une taxe carbone au plan national, se pose dès lors la question du taux à appliquer pour calculer les « bonus-malus ». Les méthodes

coûts-bénéfices ou coûts-efficacité utilisées par les économistes donnent des fourchettes assez larges de l'ordre de 50 à 140 dollars la tonne de CO₂ eq en 2020. À l'exception de la Suède, le bas de la fourchette n'est atteint dans aucun des pays ayant mis en œuvre une tarification domestique du carbone. Ces niveaux n'ont guère de chance de faire l'objet d'un consensus dans l'enceinte des négociations. Il faut donc viser un taux plus modéré en négociant à partir de deux considérations :

- ▶ si on retient le seul objectif d'inclure les pays en développement dans le cadre commun de MRV, un taux de 1 à 2 dollars la tonne, susceptible de lever de 3 à 6 milliards de dollars d'après les chiffres d'émission de 2011, permettrait de financer le déploiement d'un dispositif ambitieux de MRV dans les pays en développement ;
- ▶ pour que « la carotte » devienne réellement appétissante pour les pays pauvres, il conviendrait d'ajouter un second objectif au dispositif de « bonus-malus » : celui de crédibiliser la promesse de transferts financiers de 100 milliards de dollars faite à Copenhague qui est une pomme de discorde permanente entre pays riches et pays pauvres dans l'enceinte de la négociation. Un taux situé entre 7 et 8 dollars la tonne de CO₂ eq permettrait de dégager des ressources suffisantes pour transférer 100 milliards par an vers les pays à faible niveau d'émission par habitant. Les modalités des transferts générés sont sensibles aux années de référence et au périmètre des émissions retenu. Sur ces 100 milliards, un peu plus de 60 milliards proviendraient

² *Measuring, Reporting and Verification* (suivi, notification et vérification) : L'objectif du programme de recherche mis en place par la CCNUCC est de réduire le décalage entre les procédures et les technologies en matière de suivi, notification et vérification des émissions de gaz à effet de serre. <http://www.cdclimat.com/Programme-de-recherche-MRV-des.html>

des pays occidentaux et du Japon ; un peu moins de 20 milliards auraient pour origines respectives les pays exportateurs d'hydrocarbures (Russie et Arabie Saoudite) et les pays asiatiques ayant décollé (Chine et Corée). L'introduction du « bonus-malus » engendrerait donc des redistributions entre pays conforme au principe de responsabilité commune mais différencié, tout en sortant de son interprétation binaire qui bloque depuis plus d'une décennie toute avancée sérieuse de la négociation climatique internationale.

Le principal obstacle à lever pour lancer le système est de convaincre les gouvernements des pays donateurs de s'acquitter d'une contribution dont le poids est en réalité très modeste sitôt qu'on la rapporte à la taille de leur économie. Les transferts sont également très sensibles à la date de référence considérée. Un deuxième instrument économique pourrait les y aider : la mise en place d'un marché transcontinental du carbone calé sur des trajectoires ambitieuses de réduction d'émission qui leur permettrait d'engranger des fonds *via* la mise aux enchères des permis d'émission.

UNE COALITION À TROIS POUR LANCER LE MARCHÉ TRANSCONTINENTAL DU CARBONE

Le « bonus-malus » incite les pays en développement à rejoindre l'accord universel par les redistributions qu'il engendre. En revanche, il n'introduit pas directement un signal prix du carbone dans le système économique, susceptible de modifier les modes de production et de consommation. Or la crédibilité de trajectoires réduisant massivement les émissions repose sur l'introduction de la valeur climat dans le système des prix. Pour passer de l'accord « idéal » à un accord « effectif » qui permette

d'introduire un prix international du carbone dans l'économie, il convient de réduire drastiquement le nombre de joueurs au démarrage. Parmi les 193 pays de la CCNUCC, il faut former une coalition de grands émetteurs acceptant de coupler une réduction de leurs émissions avec un mécanisme de type *cap and trade*³ faisant émerger une valeur internationale du carbone. Les deux critères pour sélectionner les joueurs entrant dans la coalition initiale sont leur taille et leur courbe d'expérience en matière de tarification du carbone.

Le critère de la taille montre qu'avec 14 joueurs, on couvre pratiquement 85 % des émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique et qu'avec les trois premiers, la Chine, les États-Unis et l'Union européenne⁴, on est déjà à 56 %. Un principe de réalité élémentaire conduit à privilégier la recherche de la solidité de la coalition sur celle de son extension à un plus grand nombre de joueurs. Un tel dilemme entre le nombre et la solidité est un classique en matière de recherche d'accords environnementaux (Brousseau et alii - 2012). Dans le cas d'un futur accord climatique, du fait de la concentration des émissions sur un petit nombre de pays, l'efficacité recommande de construire un noyau solide avec un nombre plutôt réduit de joueurs qui pourra ensuite s'élargir. Le critère de courbe d'expérience conduit à sélectionner trois pays qui ont en commun de s'être engagés de façon unilatérale sur la voie de la tarification du carbone.

L'Union européenne a été la première à la mettre œuvre à grande échelle, mais peine à trouver un second souffle dans sa course en solitaire. Les États-Unis qui ont introduit un système de *cap and trade* pour réguler les émissions fédérales de dioxyde de soufre (SO₂) durant la décennie 1990, disposent de la plus longue courbe d'expérience de ce type d'instrument. En raison de l'hostilité du Sénat, un tel schéma n'a pas pu être

développé à l'échelle nationale pour le CO₂, mais le gouvernement peut tirer les leçons des expériences des États en la matière. La Chine procède depuis 2012 à l'expérimentation de marchés régionaux du carbone à l'échelle de municipalités et de provinces regroupant quelque 250 millions d'habitants. Comme le révèlent les travaux de Wen Wang (2012), le design de ces marchés s'inspire souvent de l'expérience européenne.

Sur la base de ces expérimentations, la prochaine étape de la politique chinoise consistera à mettre sur pied à partir de 2015 une régulation nationale de ses émissions de gaz à effet de serre assortie d'un élargissement de la tarification du carbone. Même si des variations importantes existent entre les différents marchés (Quemin et Wang - 2014), le noyau dur d'un futur accord climatique pourrait consister à construire entre 2015 et 2020 un jeu d'objectifs communs de réduction d'émission entre les trois principaux émetteurs, avec une trajectoire de long terme et un marché transcontinental du carbone, développé à partir des prototypes existants au sein des trois ensembles.

Ce prototype du marché international du carbone devrait couvrir dans un premier temps les seules émissions de CO₂ énergétiques pour des raisons pratiques et construire une gouvernance qui tire toutes les leçons des difficultés rencontrées dans chacun de ces pays pour faire émerger la valeur carbone. Le nombre très limité de joueurs peut choquer de prime abord. Il dépasse pourtant le cadre du simple accord bilatéral entre les États-Unis et la Chine qui était la voie préconisée en 2003 par Stewart et Wiener suite à l'échec constaté du Protocole de Kyoto (Stewart et Wiener - 2003). La réussite de cette coalition initiale se mesurera à sa capacité à construire un dispositif ouvert sur les autres émetteurs qui doivent être incités à le rejoindre pour le consolider. Les pays qui n'entrent pas dans cette coalition initiale, devront naturellement déposer des engagements à la CCNUCC, suivant les règles de MRV que l'introduction

3. Mécanisme de plafonnement (*cap*) et d'échanges (*trade*). 4. Nous considérons ici l'Union européenne comme un pays unique puisque c'est l'Europe qui négocie d'une seule voix aux Nations unies.

du bonus-malus aura généralisé. Mais ces objectifs ne seront pas, dans un premier temps, mutualisés dans le système d'échange de droits d'émission. Ils le seront dans les étapes suivantes quand ils rejoindront la coalition initiale suivant un ordre dépendant des deux critères : taille et courbe d'expérience.

Les candidats les plus intéressants sont l'Inde, la Russie, le Japon et la Corée, si on privilégie le critère de taille. Mais le second critère de la courbe d'expérience en matière de tarification du carbone ne saurait être sous-estimé, un pays ne pouvant rejoindre la coalition que s'il a déjà mis en place en interne les infrastructures nécessaires à une telle tarification. De ce point de vue, la Corée qui s'apprête à lancer en 2015 un système de marché du carbone couvrant les émissions de son industrie est bien plus avancée que d'autres grands émetteurs comme l'Inde ou la Russie. Comment inciter ces pays à rejoindre le groupe des trois pays pionniers ? D'une façon générale, l'incitation sera d'autant plus forte que l'accord climatique global aura simultanément tracé des voies positives en matière de coordination internationale des actions face aux risques climatiques.

L'UTILITÉ D'UN « AGENDA DES SOLUTIONS »

Dernier paramètre susceptible de déplacer les curseurs à la COP21 : la construction d'un « agenda des solutions » qui souligne les co-bénéfices que peuvent tirer les acteurs d'une action précoce réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Le plus important de ces co-bénéfices est la réduction des pollutions locales et des dommages sanitaires liés à l'usage du charbon. C'est manifestement l'un des ressorts importants de la stratégie climatique de la Chine qui est devenue l'acteur central de la négociation climatique. La construction d'un « agenda positif » est susceptible de révéler bien d'autres co-bénéfices incitant les gouvernements à rejoindre un accord universel.

Au gré des années, l'agenda des conférences climatiques s'est chargé de nouvelles thématiques alors même que la négociation

faisait du surplace, voire régressait, en matière de coordination des actions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Des thématiques nouvelles, comme l'adaptation au changement climatique, les transferts de technologie bas carbone, les nouveaux mécanismes financiers, sont introduites *via* des groupes de travail *ad hoc* sans véritablement apporter de perspectives nouvelles. La marche vers une coopération accrue en matière de réduction des émissions sera facilitée si on ramène ces thématiques générales à des questions précises en proposant aux acteurs concernés des programmes d'actions concrets apportant des solutions. En sélectionnant une ou deux priorités dans chaque domaine, on gagnerait en efficacité et on passerait d'une vision de substitution stratégique à celle de la complémentarité.

Donnons ici quelques exemples pour illustrer le propos. Concernant les questions d'adaptation au changement climatique, le 5^e rapport du GIEC a révisé à la hausse ses projections de remontée du niveau de la mer en soulignant la vulnérabilité des zones de deltas, dont les plus peuplées sont situées en Asie et en Afrique. Un programme ciblé sur les stratégies de défense face à ce risque, avec des financements ciblés sur les zones à plus forte vulnérabilité et un partage d'expérience des pays les plus innovants dans la recherche de solutions, serait plus efficace que les dissertations générales sur les mérites respectifs de l'adaptation et de l'atténuation.

Un autre domaine sur lequel le 5^e rapport du GIEC met l'accent est la vulnérabilité de la production alimentaire des pays en développement aux perturbations climatiques qui s'annoncent. Au plan technique, une voie d'adaptation importante pour les paysans est de disposer de matériels vivants (semences et animaux) capables de résister aux changements des conditions climatiques. En son temps, la « révolution verte » avait contribué à de grands progrès agricoles dans ces pays en lançant des programmes de recherche de sélection en direction des agricultures du Sud. N'est-ce pas le moment de lancer un nouveau

programme de ce type, sous l'égide des Nations unies, pour accroître les capacités de réponse des paysans du Sud aux dérèglements du climat ?

En matière de transferts de technologie, une grande partie de la discussion introduite à la CCNUCC s'est focalisée sur la question des brevets et des droits de propriétés qui risqueraient de freiner les transferts de technologies bas carbone vers le Sud. Cette problématique, tout à fait pertinente pour la diffusion de médicaments antisida, ne l'est pas pour ce type de technologies dont les transferts peuvent être très rapides comme le montre la délocalisation des industries produisant des panneaux photovoltaïques en Chine. En revanche, le déploiement des technologies de capture et de stockage de carbone (CCS) se heurte à de nombreuses barrières. Or, les scénarios du GIEC révèlent que les trajectoires d'émission qui permettent de limiter les risques d'un réchauffement à 2 °C passent par un déploiement à grande échelle de ces technologies. Plutôt que de discuter des brevets, ne vaut-il pas mieux construire un programme international de coopération technologique en matière de CCS, en tirant le maximum de leçon des pilotes qui pourraient être installés dans différentes régions du monde ? Les innovations susceptibles de déclencher des nouveaux financements ? À mesure que s'éloignait la perspective d'une généralisation rapide d'une tarification du carbone, des propositions se sont multipliées pour mobiliser des financements additionnels, et remplir les tuyauteries permettant de mobiliser les 100 milliards de dollars promis à Copenhague. On peut certes compter sur les financiers pour rivaliser d'imagination en matière de montage de produits non conventionnels. Ainsi formulée, cette question du financement n'a guère de sens. Si un accord climatique débouche sur une réelle perspective en matière de tarification du carbone, on verra immédiatement apparaître de multiples financements nouveaux pour orienter l'économie vers le bas carbone.

Les États-Unis ont opéré une complète révolution énergétique

depuis une décennie en mettant en exploitation les hydrocarbures non conventionnels sans rencontrer la moindre difficulté pour mobiliser des centaines de milliards de dollars supplémentaires. Investir dans une chaîne de production, transport et distribution de gaz naturel australien à destination du Japon implique un investissement de l'ordre de 50 milliards de dollars que les grands opérateurs énergétiques n'ont aucune difficulté à trouver! Si on change leur système de prix en tarifant correctement le prix du carbone, on réorientera ces investissements vers une transition énergétique compatible avec la protection du climat.

LE RÔLE CLEF DE LA TARIFICATION DU CARBONE

À l'instar de la conférence climatique de Copenhague en 2009, la COP21 de décembre 2015 va être très médiatisée. D'après l'horloge qui règle le temps des négociations onusiennes, c'est la date butoir pour poser les bases d'un accord universel, destiné à contenir les rejets de gaz à effet de serre dans des trajectoires limitant les risques d'un réchauffement climatique à 2 °C.

Un accord climatique ambitieux repose sur trois piliers: l'engagement des gouvernements qui déborde le cadre des vieux pays industrialisés; un système indépendant de MRV auquel acceptent de se soumettre les pays rejoignant l'accord; l'instauration d'une tarification internationale du carbone pour chasser les « passagers clandestins » et opérer les redistributions nécessaires au bénéfice des pays moins avancés.

Deux grandes voies permettent d'aboutir à une tarification internationale du carbone: celle des marchés de quotas d'émission, que le Protocole de Kyoto a tenté d'appliquer sans succès à des pays et celle de la taxation qui n'a pas été expérimentée dans des cadres multinationaux. Dans les deux cas, l'objectif est d'introduire une nouvelle valeur dans l'économie internationale: celle que la collectivité accorde effectivement à la protection du climat. Cette valeur doit faire

entrer dans le système existant des prix le coût des dommages associé à l'émission de chaque tonne de CO₂ rejetée dans l'atmosphère. C'est pourquoi on l'appelle usuellement le « prix du carbone ».

Nous proposons une méthode d'introduction de cette nouvelle valeur qui comporte deux volets complémentaires mixant taxation et marchés de permis :

- ▶ l'institution d'un bonus-malus carbone international, de l'ordre de 7 dollars par tonne de CO₂ qui se calcule pour chaque pays, à partir de l'écart entre son niveau moyen d'émission par habitant et la moyenne monde. Cette tarification fonctionnant entre les États aurait le double objectif d'inciter les pays à faible émission par tête à rejoindre le système commun de MRV et de faciliter le respect de la

promesse d'opérer un transfert annuel de 100 milliards de dollars à destination des pays les moins avancés. Par ailleurs, il constitue une incitation pour chaque gouvernement à ramener ses émissions sous le seuil moyen;

- ▶ la constitution d'un marché transcontinental du carbone, à partir des systèmes d'échange de quotas de CO₂ en cours de développement en Europe, en Chine et aux États-Unis. Interconnecter ces différents marchés exige de mettre en place une gouvernance commune, indépendante des lobbies et des pressions de court terme, pour s'assurer que les grands émetteurs s'engagent bien sur des trajectoires, compatible avec l'objectif de limitation du réchauffement climatique à 2 °C.



Créer un marché du carbone

Nouvelles centrales nucléaires en Europe : comment surmonter les obstacles au financement ?

Didier Beutier, Vice-président - Section Technique n°8 Économie et stratégie énergétique (ST8) - SFEN

L'Union européenne s'est fixé des objectifs ambitieux pour le climat et l'énergie. Il s'agit d'assurer à la fois notre sécurité énergétique, un prix de l'énergie non pénalisant par rapport aux autres régions du monde, et de réduire de 40 % les émissions de CO₂ en 2030 par rapport à 1990. Face à ces enjeux, l'énergie nucléaire a un rôle à jouer. D'ailleurs, des scénarios ont été élaborés par la Commission européenne en 2012 dans le cadre d'« *Energy Roadmap 2050* », suggérant le maintien de la part du nucléaire à la hauteur de 20 % dans la production d'électricité. Compte tenu des mises à l'arrêt futures des centrales en exploitation (120 GWe aujourd'hui dans l'UE), cela impliquera la construction et la mise en service d'environ 100 GWe de nouvelles capacités nucléaires d'ici 2050. Un tel programme semble parfaitement réalisable, si l'on se rappelle que sur le même périmètre géographique 80 GWe de capacité nucléaire ont été mises en service en 10 ans entre 1980 et 1990, dont la moitié en France...

UNE FILIÈRE ATOME EN EUROPE

Mais depuis, le contexte politique, économique et énergétique a beaucoup changé. Le rythme d'investissement actuel est très lent et les conditions nécessaires à une accélération ne sont pas réunies. Aujourd'hui dans l'UE, deux EPR sont en construction en Finlande et en France, et deux VVER en Slovaquie. Si l'on recense les projets de nouveaux réacteurs susceptibles de se concrétiser d'ici 2030, le paysage se présente ainsi : dix réacteurs projetés au Royaume-Uni,

portés par trois consortiums (EDF Energy, Horizon, NuGen), un en Finlande (Fennovoima), deux en Hongrie (Paks 2), deux en Roumanie (Cernavoda 3-4), un en Bulgarie (Kozloduy 7). La Pologne annonce 6000 MWe à mettre en service entre 2027 et 2035. La situation reste plus indécise en République tchèque, dont le gouvernement annonce une part nucléaire de 50 % vers 2040 mais a refusé de garantir un prix d'électricité à CEZ pour son projet de nouveau réacteur. Même situation en Slovaquie qui évoque un futur projet à Bohunice mais doit d'abord achever Mochovce 3-4 et en Lituanie dont le gouvernement reste intéressé par un nouveau réacteur malgré un référendum négatif. Au total, on peut envisager la mise en service de 20 GWe d'ici 2030. Cependant seuls les deux EPR de Hinkley Point au Royaume-Uni, le VVER de Fennovoima en Finlande et les deux VVER en Hongrie sont proches à ce jour d'avoir sécurisé leur financement, combinant partenariat d'investisseurs directs et emprunts. Certains projets cherchent leur financement parfois depuis plusieurs années, tel Cernavoda 3-4 dans lequel pourrait entrer l'investisseur chinois CGN. Face au manque d'appétit des investisseurs, une nouvelle tendance se confirme en Europe dans le marché international des nouveaux réacteurs : la contribution du vendeur en capital au financement du projet. Ainsi Rosatom entrera au capital de Fennovoima à hauteur de 34 %. De même, dans le projet à l'étude en Lituanie, Hitachi contribuerait à hauteur de 20 %. Au Royaume-Uni, le consortium Horizon initialement formé par deux électriciens



en substance...

Le contexte du marché de l'électricité européen n'est guère porteur. Entre demande stagnante, surcapacité et crise financière, le financement des projets nucléaires est délicat. Spécifique de par sa taille, sa durée d'exploitation, son risque, son rôle dans la lutte contre le changement climatique et son apport durable à l'économie, un projet nucléaire doit pouvoir bénéficier de tous les outils de financement offerts aux projets énergétiques.

pour construire de nouveaux réacteurs a été racheté par Hitachi. Plus radicalement, Rosatom propose son modèle BOOT (*Build - Own - Operate - Transfer*) où l'ensemble des risques liés la construction, au démarrage et au début d'exploitation est assumé par le vendeur, contre rétribution garantie par un prix fixe du kWh vendu. C'est le schéma retenu pour le projet Akkuyu en Turquie. La participation du vendeur à l'investissement financier peut contribuer à rassurer les autres investisseurs sur sa détermination et ses capacités à fournir dans le délai et le budget contractuels. Mais elle introduit aussi une confusion des rôles et potentiellement un mécanisme d'exclusion sans rapport avec la qualité du produit, que seuls certains grands acteurs pouvant se permettre cette option.

Le contexte du marché de l'électricité européen n'est guère porteur comparé à d'autres régions, pour plusieurs raisons. D'abord, la demande en électricité croît

faiblement, voire stagne. Des sur capacités sont induites notamment par le développement des capacités en énergies renouvelables. Enfin, la crise financière affecte plusieurs États membres. À cela s'ajoutent les difficultés propres au financement de projets nucléaires.

LES SPÉCIFICITÉS D'UN INVESTISSEMENT DANS UN PROJET DE CENTRALE NUCLÉAIRE

Un projet de centrale nucléaire se caractérise par le risque financier élevé encouru par l'investisseur et le temps de retour sur investissement assez long. C'est dans la durée que le projet apporte véritablement ses bénéfices, grâce à des coûts d'exploitation assez faibles et peu sensibles à la volatilité des prix du combustible.

Un investissement dans une centrale nucléaire est très important (plusieurs milliards d'euros); peu d'électriciens sont capables de financer seuls de tels projets. La durée de construction et d'exploitation est généralement plus longue pour une centrale nucléaire que pour d'autres technologies. Plus largement, la durée totale d'engagement juridique et financier approche la centaine d'années quand on inclut construction, exploitation, démantèlement et stockage des déchets. Le nucléaire est perçu comme porteur de risques spécifiques, dont certains peuvent occasionner une prime de risque significative. Le risque politique n'est pas le moindre, comme lors d'un changement de majorité gouvernementale (Suède en 2014). L'expérience en construction de réacteurs de Génération III+ est encore très restreinte dans l'UE (et plus largement dans le monde) avec des difficultés durant la réalisation des têtes de séries entraînant des dépassements importants des coûts et des durées de construction.

Toutes ces spécificités impactent directement les disponibilités de financement. Les financements de marché sont généralement l'apanage des grands électriciens. Les plus petits – dont un projet nucléaire affecterait significativement le bilan – rencontrent des difficultés plus

importantes à obtenir des financements pour de tels projets. Grâce une base d'actifs importante, les grands électriciens – EDF, E.ON ou Engie – peuvent recourir aux marchés traditionnels pour lever du capital destiné à financer leurs nouveaux investissements. Ils peuvent notamment émettre des obligations à très long terme. Cependant même pour ceux-ci la formation de partenariats d'investissement s'avère nécessaire, comme dans le cas de Hinkley Point.

Certaines banques ont une position réticente vis-à-vis du nucléaire, beaucoup plus marquée depuis l'accident de Fukushima, avec en particulier la crainte d'un impact négatif sur leur image (« *reputational risk* »). Mais aussi, les banques cherchent à limiter les engagements de long terme dans leurs actifs.

Des garanties sont particulièrement nécessaires pour les premiers projets GEN III+. En raison de leur caractère innovant, ces projets n'attirent pas les financements privés. Lorsqu'ils sont disponibles, le coût de ces financements est trop important car les primes de risque demandées par les investisseurs privés sont élevées. Cela reflète l'aversion au risque et l'absence de retour d'expérience industrielle de ces projets GEN III+. À titre indicatif, lorsque le coût du capital (« WACC »¹) passe de 5% à 10%, le coût total de l'investissement double et le coût du kWh produit augmente de 80%. Des garanties de crédit sont donc nécessaires pour attirer des capitaux privés dans le financement des prochains projets GEN III+, réduire leur coût en capital et rendre ainsi les premiers projets nucléaires compétitifs pendant la phase de développement commercial.

CADRE DURABLE ET FINANCEMENT INNOVANT

La relance d'investissements nucléaires en Europe nécessite la mise en place de nouvelles mesures à deux niveaux. D'abord, premier

niveau, il est nécessaire de bâtir un cadre d'investissement durable, associant des politiques publiques plus incitatives et une réforme du marché de l'électricité européen. Ensuite, second niveau, des mesures plus transitoires immédiates doivent assurer la faisabilité et le lancement de quelques « têtes de série », démonstrateurs indispensables pour regagner la confiance des investisseurs.

Définir un cadre durable

Le niveau 1 implique des changements assez fondamentaux dans le cadre de la politique énergétique européenne et dans la politique des États membres. Il s'agit avant tout d'orienter le marché de l'électricité vers les énergies à bas carbone (renouvelables, nucléaire puis la capture et séquestration du CO₂). Pour ce faire, il est important de modifier en partie les marchés de l'électricité afin que l'ensemble de ces technologies bas carbone soient soutenues avec un cadre réglementaire commun et des règles de marché partagées. Ceci implique une évolution vers des mécanismes de soutien aux énergies bas carbone plus incitatifs (*Contract for Difference*, *Feed-in premium*) et avec une plus grande neutralité entre ces technologies, mais aussi la mise en place de mécanismes destinés à internaliser les coûts de système avec la création de marchés de capacité pour pallier aux intermittences du solaire et de l'éolien. La Commission européenne a lancé cette année une vaste réflexion sur la réforme nécessaire du marché européen de l'électricité, en vue d'une proposition législative en 2016.

Cela passe également par une nécessaire réforme en cours du marché européen (ETS) des permis d'émission de CO₂, lequel n'est pas incitatif aujourd'hui avec un prix inférieur à 10 €/t CO₂. La mise en place d'un stock régulateur (*Market Stability Reserve*) et d'un plafond d'émission

1. Le coût moyen pondéré du capital (CMPC), ou *weighted average cost of capital* (WACC), est un indicateur économique, représentant le taux de rentabilité annuel moyen attendu par les actionnaires et les créanciers, en retour de leur investissement.

plus rapidement restrictif à partir de 2019 devrait permettre de maintenir un prix plus incitatif sur le marché ETS. L'introduction d'un prix plancher de la tonne de CO₂ viendrait renforcer l'importance de ce signal prix pour les investisseurs en réduisant les fortes incertitudes réglementaires actuelles.

Mais ceci implique aussi une aide à l'investissement. En effet toutes ces technologies non carbonées sont très capitalistiques et la rentabilité de l'investissement initial est à la merci d'une forte volatilité du prix de vente de l'électricité sur la durée de vie de l'unité. Les schémas fondés sur un contrat à long terme entre fournisseur et consommateur apportent alors une réponse satisfaisante aux deux parties : prix de vente sécurisé sur une longue période justifiant l'investissement chez le fournisseur et assurant la stabilité des coûts chez le consommateur. Le schéma finlandais appliqué à l'entreprise TVO va même un cran plus loin, les grands consommateurs d'électricité (industrie du papier, municipalités, etc.) étant à la fois clients et actionnaires de TVO et payant le kWh au coût moyen de production.

Enfin, il faut compléter ces mesures touchant toutes les énergies non carbonées par des mesures visant à supprimer les distorsions de concurrence actuelles entre énergies renouvelables et nucléaire. Il s'agit en premier lieu du risque politique. Ainsi, les taxes spécifiques imposées aux capacités nucléaires dans plusieurs pays européens (Allemagne, Belgique, Suède) montrent combien le risque est grand de voir la rente de long terme de l'investissement confiscuée par la puissance publique. Mais surtout, pèse l'hypothèse d'un changement de majorité gouvernementale conduisant à un abandon national du nucléaire. Ce point a été traité dans l'accord passé sur le projet Hinkley Point C entre le DECC (Département de l'énergie

et du changement climatique britannique) et NNBG (*Nuclear New Build Generation Company Limited*) : une compensation financière est prévue dans le cas où le gouvernement britannique déciderait l'arrêt de la centrale pour des raisons purement politiques. Il s'agit aussi de reconnaître, mesurer et rétribuer la sécurité de fourniture d'une technologie disponible en permanence par rapport à une énergie intermittente – ou inversement d'intégrer dans le coût d'une énergie intermittente l'ensemble des coûts de *back-up*, de réseau et de gestion dus à l'intermittence.

Déverrouiller le système

Le niveau 2 n'a évidemment de sens que si le niveau 1 est reconnu et enclenché. Mais il est nécessaire pour au moins deux raisons.

Aujourd'hui, les difficultés rencontrées sur les premiers projets GENIII+ en Europe et ailleurs soulèvent un doute sur la compétitivité de la filière (maîtrise temporelle des projets, maturité de l'ensemble de la chaîne industrielle, coût final de construction). La confiance des investisseurs reviendra lorsque les premiers réacteurs fonctionneront et que d'autres auront été réalisés dans les délais et les coûts prévus. L'effet de la réforme du marché ETS sur le prix du CO₂ ne va pas être immédiat, mais sans doute significatif à partir de 2025 selon certaines estimations. De même, les transformations décrites au niveau 1 ne prendront pas place immédiatement.

Il s'agit en quelque sorte de déverrouiller le système. Un soutien temporaire de l'UE pour faciliter le financement du nucléaire apparaît souhaitable, pour les premiers projets. La Commission européenne peut pour cela faire appel à la Banque européenne d'investissement (BEI) et à l'utilisation de crédits Euratom. Un groupe de travail dédié² de l'*European Nuclear Energy Forum* (ENEF) a proposé

plusieurs instruments :

- ▶ Des garanties de crédit par les institutions européennes, accordées sur la base d'une prime cohérente avec le risque supporté, et le cas échéant un recours du garant sur les parties prenantes au projet. Cette garantie va réduire le coût du financement en améliorant la qualité de crédit de l'emprunteur (la qualité de crédit du garant se substitue à celle de l'emprunteur ce qui diminue le taux d'intérêt et accroît la faisabilité financière des projets).
- ▶ Des prêts directs de la Banque européenne d'investissement (BEI) incorporant des éléments de subordination attribués en période de construction, destinés à être refinancés pendant l'exploitation, en vue de constituer un levier efficace pour d'autres sources de financement. Ce crédit représenterait une part minoritaire (10-20 %) de la dette contractée pour le projet. Le remboursement serait différé pendant un ou deux ans après la mise en service jusqu'à l'atteinte de la puissance nominale.
- ▶ Des lignes de crédit contingentes, disponibles en période de construction pour faire face aux aléas induits par les autorités de sûreté au cours de la procédure d'autorisation. Ici, l'*Energy Policy Act* américain est une référence utile, avec le « *Stand-by Support* » qui fournit une assurance contre d'éventuels retards imputables aux autorités de régulation.

Le premier instrument se justifie par le fait que les premiers projets vont, par leur réalisation, bénéficier aux suivants en abaissant la prime de risque liée au doute initial. Ce principe a été appliqué aux États-Unis³ et plus récemment au Royaume-Uni ▶

2. Sub Working Group « Financing », *Final Report*, 22nd April 2013. 3. *Loan Guarantees for the first movers, Energy Policy Act*, 2005, appliqué à Vogtle 3 (réacteur AP1000 en cours de construction en Georgie – États-Unis)

pour Hinkley Point C. Les deuxième et troisième instruments ciblent plus directement la question du risque spécifique aux premiers projets: surcoût de construction, modification de la réglementation de sûreté ou de son interprétation. Le groupe de travail ENEF a souligné l'importance du rôle de facilitateur que la BEI joue pour aider à atteindre les objectifs de la politique énergétique européenne. Sa politique de prêt devrait être « technologiquement neutre » entre les énergies non carbonées. Sur la période 2009-2013, les prêts de la BEI dans le secteur Énergie se sont élevés à 13 milliards d'euros par an en moyenne, dont six pour les infrastructures de réseaux, cinq pour les énergies renouvelables, et un pour des projets d'efficacité énergétique. Le montant de l'enveloppe suggère qu'elle pourrait aussi contribuer aux projets de réacteurs nucléaires et la BEI affirme qu'elle examinerait tout projet soumis selon les mêmes critères que pour les autres technologies.

Les prêts Euratom peuvent également représenter un levier important pour financer de nouveaux réacteurs. Ils peuvent financer à hauteur de 20 % maximum des projets ayant pour objet la production d'électricité nucléaire, au meilleur taux possible car la Communauté se porte garante. Ils ont par le passé joué ce rôle de catalyseur, jusqu'à un total distribué de 2,5 milliards d'euros. Mais le fond Euratom arrive maintenant à épuisement; il faudrait donc le refinancer.

SUIVRE L'EXEMPLE DU ROYAUME-UNI

La réforme du marché de l'électricité au Royaume-Uni vient du constat que l'on ne peut pas atteindre les objectifs majeurs de la politique énergétique en s'appuyant exclusivement sur les forces du marché libéralisé (*voir article « Royaume-Uni : vers un mix énergétique bas-carbone et compétitif », pages 36 à 38*). En effet, celles-ci privilégient la rentabilité à court terme et se détournent des options trop lourdes en investissement, risquées dans un marché où le prix de l'électricité pourra varier

fortement. Le marché britannique se dirigeait inéluctablement vers la domination du gaz, mettant en péril la sécurité énergétique et la réduction des émissions de CO₂. La mise en place des « *Contracts for Difference* » et de « *Credit Guarantees* » destinés aux énergies non carbonées permet de réintégrer celles-ci dans le marché. L'ensemble du dispositif prévu par le DECC répond au besoin de deux niveaux de mesures, durables et transitoires. Plus largement l'UE aussi doit mettre son marché de l'électricité en cohérence avec ses objectifs. Ceci implique un cadre plus favorable aux investissements dans les énergies non carbonées, nucléaire compris, qui peut s'inspirer du modèle anglais. Elle devrait également prendre en compte l'enjeu industriel et économique que représente la filière nucléaire, qui soutient aujourd'hui 800 000 emplois à travers l'UE. Cette filière a vécu une longue période (plus d'une décennie) d'atonie dans les investissements en nouvelles capacités, mais les premiers projets d'EPR ont permis de la revitaliser. La qualification nucléaire des entreprises industrielles implique des investissements conséquents en formation et en équipement, qui doivent être rentabilisés. Pour rester vivante et performante cette filière doit maintenant être soutenue par d'autres projets, en Europe et ailleurs dans le monde.

Financer les nouveaux projets nucléaires, c'est donc bien à la fois décarboner le mix énergétique européen, contribuer à la sécurité énergétique de l'Europe et améliorer les emplois européens de demain.

Chine : une révolution énergétique contrastée

Par **François Morin**, World Nuclear Association – Chine

LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE SOUTENUE

Depuis 1989, l'économie chinoise connaît une croissance continue (9,06 % en moyenne selon les autorités) tirée depuis le début des années 2000 par la consommation et l'urbanisation. Pour soutenir cette croissance, des quantités importantes d'énergie ont été nécessaires entraînant le rejet d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES). Si bien que, jusqu'à présent, la courbe de la consommation d'énergie primaire suit celle de la progression du produit intérieur brut (PIB). Résultat : la Chine émet cinq fois plus de CO₂ par \$PIB que l'Europe. La Chine est le premier pays producteur de charbon et le premier consommateur (23 % des GES de la planète). Son parc de centrales au charbon est deux fois et demi supérieur à celui des États-Unis et représente 70 % de la capacité électrique installée. Outre les nouvelles mesures restrictives sur les standards définissant les émissions polluantes, la Chine compte aussi réduire la part du charbon à 62 % de son mix électrique. Malgré cet effort, le besoin en charbon continuera de croître (2 600 Mtep en 2035 contre 2 100 Mtep en 2015).

LA POLITIQUE CLIMATIQUE ET ENVIRONNEMENTALE CHINOISE

Les Chinois veulent mettre en place de nombreux mécanismes et sont désormais prêts à signer des accords engageants comme en témoigne la Déclaration conjointe Chine – États-Unis signée en début d'année. Grâce à son « Plan national d'action contre le changement climatique », la Chine prévoit d'atteindre son pic de production de CO₂ vers 2030. À cette date, la part des énergies

bas carbone dans l'énergie primaire devrait atteindre 20 %. La Chine reconnaît toutefois que cet objectif ambitieux ne sera atteint qu'au prix d'efforts « extraordinaires », croissance et consommation d'énergie étant encore fortement liées. Depuis les années 1990, la Chine a multiplié par 20 son PIB par habitant. Si l'intensité énergétique a diminué de 59 % et l'intensité carbone de 62 %, la consommation énergétique, elle, n'a cessé de croître : multipliée par quatre, elle a contribué pour plus de 60 % au surplus d'émissions entre 2005 et 2013.

L'effort est supérieur à celui d'autres pays. Ainsi, le plan de réduction du CO₂ aux États-Unis (-30 % de 2005 à 2030 et -21,5 % de 2011 à 2030) se traduit par le remplacement de 120-130 GW charbon en 120-130 GW non fossiles. Mais en Chine, le plan implique la création de 1 000 GWe non fossiles d'ici à 2030 !

DES CONTRAINTES INCOMPRESSIBLES

La consommation d'énergie par rapport au PIB reste 1,8 fois supérieure à la moyenne mondiale et même si des efforts considérables sont faits comme la fermeture d'installations de production vieillissantes, la croissance continue de s'appuyer sur les industries lourdes et chimiques, et sur des activités à faible valeur ajoutée (N.B. : la consommation de charbon a pris son essor ces dix dernières années). Il semblerait qu'à moins de délocaliser une partie de l'outil industriel vers d'autres pays (ce qui se produit à petite échelle pour le textile, la production de médicaments, etc.), un plateau soit désormais atteint.

Dans ce contexte, les déclarations chinoises doivent être relativisées. La Chine évoque une « révolution énergétique » qui permettra de

en substance...

Si les ambitions chinoises en matière de développement d'énergies bas carbone, nucléaire compris, sont importantes (20 % de l'électricité en 2030), les leviers sur lesquels repose la croissance du pays et les contraintes technologiques pourraient calmer leurs ardeurs. À cet horizon de temps, le nucléaire devrait représenter 120 GWe, l'hydroélectrique 400 GWe, le solaire 56 GWe, l'éolien 60 GWe et la biomasse 30 GWe. Loin des 1 000 GW fixés par les autorités pour atteindre les objectifs climatiques.

passer vers un modèle caractérisé par l'efficacité énergétique et les énergies bas carbone. L'objectif de référence reste 2020. À cette date, la part d'énergie non-fossiles est attendue à 15 %, contre 11,4 % aujourd'hui. Ceci ferait 700 Mtep. En fait, la clef de l'évolution d'ici à 2020 est encore « sous presse » car c'est un des contenus essentiels du 13^e plan quinquennal, le plan 2016-2020, qui sera publié avant la fin de l'année. On sait que le gaz naturel doit y jouer un rôle important, atteignant 10 % de l'énergie primaire (contre 2,6 % en 2005). Quant au reste, il est question de « contrôler fermement la consommation d'énergie globale et d'infléchir la demande d'énergie non raisonnable (!) », ou encore de « transformer les schémas de développement économiques et la gouvernance environnementale », selon le Président Xi Jing Ping.

Ce qui est attendu, voire espéré, c'est que la demande pour des produits à haute intensité énergétique, comme l'acier ou le ciment, diminuera. En fait, une grosse partie du pari sur 2020 et au-delà, et en partie sur le pic de CO₂ en 2030, repose sur la confiance en cet infléchissement des productions





Pollution à Pékin

industrielles énergivores (pic de la construction à 11 milliards de m² en 2020, pic du ciment à 2,5 milliards de tonnes, pic de l'acier dès 2015 à 800 millions de tonnes, aluminium et cuivre continuant à croître jusqu'en 2025).

L'objectif « pic 2030 » dominera les 13^e, 14^e et 15^e plans quinquennaux. On souligne qu'alors le niveau de CO₂/habitant sera inférieur à celui des pics des pays développés à une époque reculée, vers 1973.

Mathématiques obligent, si la croissance est projetée à 4,5 % environ en 2030, et si vraiment la croissance en consommation énergétique est maîtrisée à 1,2-1,5 %, il faut qu'à cette époque la décroissance du CO₂/consommation énergétique soit supérieure à 1,5 %. Longtemps les Chinois ont invoqué un ratio CO₂/habitant très inférieur à celui de l'Occident et justifiaient ainsi leur peu d'efforts dans le domaine. Ce n'est plus pertinent car si l'on s'en tient à la Chine côtière (environ 250 millions d'habitants) qui dispose aujourd'hui d'un revenu de 10000 \$/an/habitant, sa production de CO₂ reste très supérieure à celle des pays de l'UE ou du Japon.

La dégradation de l'environnement dans sa forme visible (pollution de l'air, des sols et de l'eau) est une question majeure pour la population chinoise. Selon certaines ONG, le nombre de maladies liées à la pollution serait aujourd'hui 400 fois

ce qu'il était il y a 30 ans. Bien entendu, il est impossible de donner une coloration objective à de tels chiffres, dans la mesure où depuis 30 ans, le système de santé a évolué, les moyens hospitaliers et les consultations se sont multipliés, etc. Néanmoins, ces études permettent au gouvernement d'arbitrer en faveur de changements énergétiques et industriels. Ils expriment ainsi de louables intentions : ciblage de villes particulièrement exposées comme Zhenjiang (Jiangsu), Ningbo (Zhejiang), Qingdao (Shandong), amélioration des structures gouvernementales et du traitement des statistiques, ouverture de fonds spéciaux pour le développement bas carbone, sites pilotes pour la promotion des mesures bas-carbone, substitution dans l'usage de matières premières, développement de la séquestration de CO₂, etc.

Les calculs permettant d'affirmer que le pic de CO₂ sera atteint en 2030 reposent sur un certain nombre d'hypothèses : évolution du prix de la tonne de carbone de 20 \$ en 2020 à 64 \$ en 2040, efficacité énergétique supérieure à la croissance économique attendue à 4,5 % en 2030, et 20 % d'énergie bas carbone (dont le nucléaire) en 2030. La sensibilité du projet « Pic carbone en 2030 » aux variables croissance/intensité énergétique est grande. Ainsi une croissance du PIB supérieure de 0,5 % aux

prévisions et une intensité énergétique baissant de 1 % de moins que les prévisions emmènent le pic en 2035!

Plusieurs freins pourraient empêcher d'atteindre ces proportions. D'abord, la croissance relativement lente du nucléaire (5-6 tranches/an maximum) et du gaz naturel. Ensuite, le retard à mettre en place la « transformation économique ». En effet si le modèle est fondé sur l'évolution des pays de l'OCDE, cela signifie le passage à « industrie = 30 % de l'énergie ». Mais aujourd'hui, en Chine, l'industrie représente 70 % de l'énergie utilisée. Enfin, par quelque bout que l'on le prenne, le problème se heurte toujours à la question : « Comment changer le rapport énergie/économie ? » Pour assurer une crédibilité aux projections « Pic Carbone en 2030 », il est nécessaire de gonfler les projections « Production d'électricité non carbonée ». Ainsi le nucléaire est estimé à 150 GW en 2030, ce qui semble ambitieux ou, à tout le moins, supposant un rythme annuel soutenu et constant de nouvelles constructions.

LE POTENTIEL DES ÉNERGIES BAS CARBONE AVEC UN ACCROISSEMENT DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE DE 80-90 GWe/AN!

L'éolien

L'énergie éolienne a démarré sur les chapeaux de roue! Les programmes d'installation ont été atteints longtemps avant les prévisions. Quand le Plan prévoyait de produire 10 GW en 2010 et 30 en 2020, on dépassait déjà les 30 GWe en 2010. La capacité installée est d'environ 100 GWe, mais le facteur de charge n'est que de 22 %. Le secteur, subventionné par des prix de rachat d'électricité avantageux (entre 0,51 et 0,61Rmb/kWh) a vu jusqu'à plus de 90 fabricants d'éoliennes qui sont encouragés à fusionner... ou disparaître. Le problème principal vient des sources en vent, essentiellement dans le nord, le nord-ouest, et l'ouest, c'est-à-dire des zones pratiquement

inhabitées (Mongolie intérieure, Gobi, Xinjiang) à l'exception du nord-est (Pékin, Hebei, Liaoning, Heilongjiang). Les difficultés à l'expansion du programme ont entraîné une baisse des installations nouvelles en 2012. Toutefois, après rationalisation du secteur, la croissance semble repartir. L'éolien *offshore*, lui, a dû réduire la voilure : le plan initial de 30 GW installés en 2030 a été révisé à 10 GW.

Le solaire

Le solaire thermique a d'abord été installé en Chine jusque dans les villages du Tibet. Hélas, ces équipements n'ont pas entraîné de baisse de consommation énergétique, car leur installation ne s'est pas accompagnée de formation, d'assistance, d'éducation à changer les habitudes (profiter de l'eau chaude quand elle est disponible, en fin d'après-midi par exemple). Toutefois, les projections 2030 prévoient de passer de 258 à 900 millions m².

Le solaire photovoltaïque est arrivé plus tard, comme un effet des « délocalisations » destinées à fabriquer pour l'export. Pour les Chinois déjà indépendants énergétiquement à moindre coût, cette énergie s'est avérée trop chère en production. Toutefois, la diminution des importations américaines et européennes ayant mis la filière en difficulté, le gouvernement a pris des mesures de sauvegarde, sans effet pour la filière. Des mesures de soutien garantissent l'achat du kWh de 0,6 à 1,1 yuan/kWh selon les régions. Fin 2015, on devrait avoir 42-47GW de capacité installée, avec une projection de 70GW en 2020 et un objectif de 100GW en 2030. Mais le facteur de charge n'est que de 12 à 14 % en moyenne.

L'hydroélectrique

Elle représente aujourd'hui 18,2 % du mix électrique chinois. Un tiers des grands barrages en construction dans le monde le sont en Chine. La capacité totale actuelle approche les 260 GW. Si le potentiel total est d'environ 500 GW, les autorités ne prévoient d'exploiter que 390-400 GW d'hydroélectrique

en 2030. Aucune autre installation ne devrait voir le jour. Les autorités craignent en effet une possible corrélation entre le tremblement de terre du Sichuan de 2006 et la somme des masses d'eau retenue par tous les barrages de la région.

Le nucléaire

Le programme électronucléaire chinois a débuté en 1987 avec la construction d'un premier réacteur à eau pressurisée (300 MWe) de conception chinoise, à Qinshan (au sud de Shanghai). Après une pause de sept ans, l'atome s'est développé sur la côte est, depuis le sud (Daya Bay) à proximité de Hong-Kong jusqu'au nord dans la province du Liaoning.

Les technologies sont françaises (4 tranches et 2 EPR en construction), canadiennes (2 tranches), russes (4 tranches) et « sinisées ». Aujourd'hui, 26 réacteurs représentent 23 GWe installés, contribuant modestement à hauteur de 2,5 % à la production nationale d'électricité. Toutefois, les perspectives sont très importantes. Outre les 24 réacteurs en construction (26 GWe), le rythme des autorisations de construction devrait atteindre 5 à 6 tranches par an, voire plus. Malgré le moratoire sur les nouvelles centrales depuis Fukushima jusqu'au début 2015, l'objectif initial de 58 GWe en 2020 devrait être atteint avec au plus 1 an à 18 mois de retard. Ce rythme semble ambitieux, et quoiqu'il se compare au rythme maximal de construction en France à la création du parc nucléaire, il est remarquable dans le sens où il s'applique bien au-delà de 2030 ! Les capacités de production d'équipements, la formation des ingénieurs et techniciens, tout est planifié pour assurer ce rythme de construction et d'exploitation. Néanmoins, une vraie limite pourrait être la capacité en financement, estimé à environ 20 milliards de dollars par an. Les défenseurs de la politique Climat, dont le Pr. He Jian Kun, Président du Comité consultatif changement climatique, n'hésitent toutefois pas à prôner une accélération du rythme, allant jusqu'à projeter 150 GWe de capacité

nucléaire en 2030, soit 6 % du total, pour aller jusqu'à 400 GWe en 2050. C'est pour eux un élément absolument essentiel du plan de réduction des émissions de CO₂ en 2030. Les industriels, par la voix de la *China Nuclear Energy Association*, tablent sur « au moins 100 GWe en 2030 ». L'ensemble du système actuel peut suivre ce rythme, moyennant toutefois quelques étapes.

Il faudra d'abord résoudre les problèmes techniques de l'AP1000 pour connecter au réseau les premières tranches de Sanmen et Haiyang, avant 2017 et de là, mettre en place la production de série sur les 12 sites prévus (32 GWe). Deuxième étape : l'extension du programme du réacteur local, Hualong One (HPR1000), inspiré des systèmes américains de sécurité passive, et dont la première construction vient de commencer à Fuqing (Fujian). La troisième étape, et non la moindre, est l'acceptation par le public et les autorités de la construction de centrales dans les terres, vers l'ouest, essentiellement autour du bassin du Yang Tsé, dans des zones riches en eau mais aussi sensibles aux inondations, peur ancestrale chinoise que Fukushima a paradoxalement réveillée. Enfin, il faut démarrer le réacteur deux boucles de grande capacité CAP1400 (1 450 MWe), sorte d'AP1000 « sinisé ».

Dans ce contexte, les ambitions à l'export du nucléaire chinois semblent plus satisfaire la recherche d'une image internationale, fiable et reconnue, que la recherche de marchés. Si les volumes attendus restent faibles (1 réacteur en Argentine, 1 en Roumanie, 1 en Turquie, 1 en Egypte peut-être ou 1 en Pologne), leurs besoins en financement pourraient alourdir le poids financier du programme, que ce soit pour CNNC, CGN ou le dernier-né SPIC (fusion SNPTC-CPI). Les récentes levées de fonds en bourse de CGN (Hong-Kong 2014) et CNNC (Shanghai juin 2015) contribueront à alléger la note.

Royaume-Uni : vers un mix énergétique bas carbone et compétitif

L'AMBASSADEUR DU ROYAUME-UNI EN FRANCE, SIR PETER RICKETTS, REVIENT SUR LA COOPÉRATION ENTRE LE ROYAUME-UNI ET LA FRANCE EN MATIÈRE ÉNERGÉTIQUE. DEUX QUESTIONS CRUCIALES SONT INTIMEMENT LIÉES : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'ACCÈS À UNE ÉNERGIE DÉCARBONÉE, SÛRE ET COMPÉTITIVE. LES DEUX PAYS COLLABORENT ÉTROITEMENT POUR ASSURER UN AVENIR SOBRE EN CARBONE. ET, DES DEUX CÔTÉS DE LA MANCHE, LE NUCLÉAIRE JOUERA UN RÔLE MAJEUR.

Sir Peter Ricketts

Ambassadeur du Royaume-Uni



Le Royaume-Uni est à 100 % engagé dans le sommet climatique de Paris, la COP21. Nous soutenons pleinement la présidence de la France lors de cet événement et sommes persuadés qu'un accord historique est possible.

Par ailleurs, nous considérons que la lutte contre le changement climatique et la relance de notre programme nucléaire sont liées. Le développement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires est pour nous d'une importance stratégique.

L'engagement du Royaume-Uni

Le changement climatique est au carrefour de plusieurs enjeux. Il y a d'abord un volet majeur : le volet environnemental. Puis il y a d'autres défis, régaliens, comme la sécurité énergétique et l'économie. Ainsi, pour de nombreux pays, il faudra parvenir à accorder objectifs

climatiques et développement économique. Un véritable challenge pour les jeunes ingénieurs !

Comme l'a expliqué Laurent Fabius, ministre des Affaires étrangères français, la COP21 pourrait bien être la dernière opportunité de parvenir à un accord international à même de limiter les émissions mondiales de gaz à effet de serre et rester sous la barre des 2 °C. L'opportunité est donc historique.

Le Royaume-Uni est pionnier dans l'aventure climatique. En 2006, l'économiste Sir Nicholas Stern mettait en lumière l'impact du climat sur notre économie. Deux ans plus tard, en 2008, notre pays s'est engagé avec le « *Climate Change Act* » en inscrivant dans la loi les objectifs de réductions d'émissions de CO₂. Ces objectifs sont très ambitieux : réduire de 80 % en 2050 nos émissions. Nous les avons déjà réduites d'un quart ! À l'avenir, le Royaume-Uni compte bien rester pionnier. C'est d'ailleurs tout l'enjeu

de « *l'Electricity Market Reform* » qui crée les conditions nécessaires aux investissements dans les technologies bas carbone à des coûts abordables pour le citoyen.

À l'échelle de l'Union européenne, le Royaume-Uni travaille main dans la main avec la France pour réduire ces émissions. Nous sommes très heureux que le Conseil européen ait fixé comme objectif de réduire les émissions européennes de 40 % en 2030. Cela place l'UE comme moteur des négociations climatiques.

La France et le Royaume-Uni travaillent également ensemble pour s'assurer qu'au sein de l'Union de l'énergie, chaque pays européen puisse choisir son mix énergétique pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂. Nous sommes aussi d'accord pour dire qu'un des moyens les plus efficaces pour atteindre les objectifs climatiques, c'est l'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire émet très peu de gaz à effet de serre. Il est donc indispensable que le nucléaire forme une part importante de notre mix énergétique.

Nucléaire : le partenariat franco-britannique

Pour le Royaume-Uni, le nucléaire est vital pour assurer nos besoins énergétiques. L'atome bénéficie d'un consensus dans les différentes formations politiques. Plus largement, les parties prenantes s'accordent pour intégrer une part importante de nucléaire dans le futur mix énergétique. Lequel sera résolument bas carbone, comprendra du nucléaire, des énergies renouvelables, du stockage captage du CO₂ et du gaz de schiste.

Au Royaume-Uni, nous sommes au début d'une grande campagne de renouvellement de notre parc nucléaire. La collaboration avec la France, le gouvernement et les industriels, est très importante. Du côté français, ce sont EDF et AREVA qui sont les investisseurs, avec bien sûr le soutien d'un grand nombre de fournisseurs britanniques. Pour nous, c'est une grande chance d'avoir une énergie sûre à prix stable.

Hinkley Point est la première pierre de ce vaste programme. Les futurs réacteurs EPR permettront d'alimenter en électricité plus de 6 millions de foyers britanniques. L'approbation du projet par la Commission européenne en octobre était une étape importante. Désormais s'ouvre un défi juridique avec certains États membres de l'UE. Nous sommes confiants sur la solidité juridique de notre projet. Nous continuerons à soutenir auprès de la Commission que chaque État, membre de l'Union de l'énergie, peut décider de son propre mix énergétique.

Hinkley Point réunira les entreprises françaises et britanniques du secteur. En témoigne le rapprochement entre les différents acteurs : l'association entre le français Bouygues et le britannique Laing O'Rourke (dans le BTP), et la *joint-venture* entre Bocard et Cavendish.

D'autres projets sont sur la table : Horizon (Hitachi) et Nugen (Engie et Westinghouse).

Pour le gouvernement, il est vital que cette renaissance du nucléaire se traduise par la création de nouveaux emplois, de nouvelles compétences, d'innovations et d'un renforcement du tissu industriel.

DES CLÉS POUR COMPRENDRE

Au moins 16 GWe de nucléaire à l'horizon 2025

Le Royaume-Uni produit son électricité essentiellement à partir d'énergies carbonées (charbon et gaz). Pour réduire ses émissions de gaz carbonique, le pays a engagé une transition vers un modèle électrique sobre en carbone, s'appuyant sur le développement du nucléaire, des énergies renouvelables et du captage et stockage du CO₂.

Avec 16 réacteurs, l'énergie nucléaire fournit 18 % de l'électricité du pays. À l'exception d'une unité, les réacteurs en fonctionnement devraient être arrêtés en 2023. Dans ce contexte, le gouvernement a engagé un programme de renouvellement de son parc nucléaire et la construction 16 GWe nucléaires complémentaires d'ici 2025.

Cet engagement s'est traduit par la réforme du marché de l'électricité, qui reconnaît le nucléaire comme une énergie bas carbone qui devra contribuer « de manière significative » à la réduction des émissions de CO₂, aux côtés des énergies renouvelables.

La coopération franco-britannique : de la R&D à la construction

La France et le Royaume-Uni ont en commun d'être deux acteurs historiques du nucléaire dans le monde. Tous deux ont développé des programmes qui, par bien des aspects, se ressemblent. Ainsi, le Royaume-Uni a aussi développé la technologie du recyclage des combustibles usés. En 2008, en rachetant British Energy, l'énergéticien français EDF est devenu le premier exploitant électronucléaire du Royaume-Uni. EDF est également devenue le pilier de la coopération franco-britannique dans le domaine nucléaire.

Depuis plusieurs décennies, les deux pays ont tissé des liens forts dans le domaine de la R&D. D'abord dans la Défense, puis, plus tard, dans le nucléaire civil. À ce titre, le CEA et son homologue britannique le NNL, ont signé un accord de coopération qui s'articule autour de trois projets : le réacteur de

recherche Jules Horowitz (RJH), les réacteurs à neutrons rapides et le cycle du combustible.

Les deux centres de recherche ont acquis une expérience importante dans les réacteurs à neutrons rapides. Chacun en a exploité un pendant une dizaine d'années : la France avec Phénix et la Grande-Bretagne avec Dounreay. Deux « trésors » en matière de retours d'expérience dont la mutualisation est indispensable pour la réalisation et le succès d'un projet comme ASTRID.

Enfin, la France et le Royaume-Uni collaborent dans le domaine de l'assainissement et du démantèlement. Beaucoup d'activités au Royaume-Uni ont des similitudes avec la France : il y a des réacteurs électrogènes à assainir et démanteler, et des installations du cycle du combustible.

La réforme du marché de l'électricité

Cette réforme vise à mettre en place les mesures nécessaires à l'engagement des investissements (110 milliards de livres – 152,4 milliards d'euros – d'ici 2020) pour le remplacement de 20 % environ des capacités de production et la

mise à niveau du réseau indispensables pour faire face à l'augmentation de la demande en électricité et la transition vers une électricité décarbonée.

Dans ce pays économiquement libéral où les investissements viendront du secteur privé, le gouvernement a développé des outils pour rassurer les investisseurs sur la compétitivité des technologies bas carbone. L'intervention de l'État dans un marché non régulé est motivée par le fait que :

- › le nucléaire et l'éolien *offshore* présentent des coûts d'investissement initiaux importants, comparés aux centrales à gaz ;
- › toutes ces technologies sont à des degrés de maturité différents ;
- › le prix du marché carbone est actuellement trop bas pour véritablement intégrer le coût du changement climatique, et son évolution incertaine rend difficile les investissements à long terme ;
- › le marché ne peut pas assurer seul la construction des capacités de production nécessaires. ▶



Le projet Hinkley Point C (vue d'artiste)



Hinkley Point C, sur la côte du Somerset, dans le sud-ouest de l'Angleterre

Le financement « innovant » d'Hinkley Point

L'aspect le plus emblématique du montage financier du projet est la mise sur pied de « contrats pour différence » (« CFD » ou « *contract for difference* »). Ils doivent permettre d'obtenir un prix fixe et indexé sur l'inflation (par le biais de l'indice des prix à la consommation), quelle que soit l'évolution future des prix de marché de l'électricité. Les CFD ont vocation à être appliqués à l'ensemble des énergies bas carbone. Ils permettront une juste rémunération des investisseurs en limitant leur exposition au risque-prix. Le prix du mégawattheure nucléaire a été fixé à 92,50 livres (115 €) – un montant comparable à celui de l'éolien terrestre au Royaume-Uni (coûts de production et coûts systèmes inclus) – pour une durée de 35 ans,

sur les 60 ans de la durée d'exploitation prévue pour chaque réacteur. Soucieux de rendre accessible les prix de l'électricité aux consommateurs, le gouvernement britannique a souhaité mettre en place un partage des bénéfices entre les industriels et les consommateurs. Le contrat pour différence contient une série de mécanismes de « partage des gains » qui permettent aux clients de bénéficier de réductions de prix, si les coûts de construction ou le rendement du projet s'avèrent plus favorables que prévu. Suite à l'examen de la Commission européenne, ces mécanismes de « partage des gains » ont été renforcés. Par ailleurs, pour aider à atténuer les risques, le gouvernement britannique a accepté de fournir une garantie de prêt pour le projet. La Commission européenne s'était alors interrogée sur la compatibilité

de ces mesures avec le droit européen de la concurrence. Bruxelles s'interrogeait notamment sur le risque de surcompensation. EDF Energy avait affiché une rentabilité espérée autour de 10 %, qui est pourtant un montant usuel au regard des projets de ce type, dont les risques financiers restent significatifs (retard de chantier par exemple). La Commission a finalement approuvé ces mesures. L'Autriche et le Luxembourg semblent déterminés à porter un recours contre cette décision devant la Cour de Justice de l'Union européenne (CJUE).

En associant l'ensemble de ces éléments, le département de l'énergie et du climat britannique (DECC) considère le nucléaire comme une des énergies bas carbone parmi les plus compétitives pour les années à venir.

Adapter les centrales nucléaires au changement climatique : le retour d'expérience des canicules de 2003 et 2006

par **Alain Vicaud**, Directeur de l'environnement et de la prospective - EDF Production nucléaire,
Éric Jouen, Directeur de projets - EDF Ingénierie Nucléaire

LES BESOINS DE REFROIDISSEMENT DES CENTRALES

Les centrales thermiques ont besoin de sources de refroidissement pour assurer la production d'électricité et, dans le cas des centrales nucléaires, pour garantir la sûreté. Selon l'implantation des sites et la nature des équipements, ces sources de refroidissement proviennent de l'air ou de l'eau : mer, cours d'eau, eaux souterraines.

On peut classer en quatre catégories les principales fonctions de refroidissement qui touchent à la fois à la production d'électricité et à la sûreté :

- ▶ l'évacuation de la puissance du cœur du réacteur nucléaire en situation normale de production (sûreté nucléaire et production d'électricité) ;
- ▶ l'évacuation de la puissance résiduelle après l'arrêt du réacteur, en situations normale et accidentelle (sûreté nucléaire) ;
- ▶ la condensation de la vapeur en sortie de la turbine (production d'électricité) ;
- ▶ le conditionnement de l'air des locaux et le refroidissement des matériels (sûreté nucléaire et production d'électricité).

Des échangeurs air/air, eau/eau et eau/air concourent à ces fonctions. Ils ont été dimensionnés dans les années 1970 sur la base de températures extérieures dites « de conception » et d'apports calorifiques estimés des matériels.

Pour assurer les fonctions de sûreté en situation d'exploitation normale, les besoins en eau sont de l'ordre du m³/seconde par réacteur, très en deçà des débits des cours d'eau concernés, même en cas d'étiage¹ sévère en période de sécheresse.

Les centrales disposent d'autorisations administratives de prélèvements d'eau et de rejets dans l'environnement délivrées par les pouvoirs publics : ministères et Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Ces autorisations sont établies sur la base d'une étude d'impact fournie par l'exploitant qui analyse les conséquences environnementales et sanitaires de l'installation et de chaque rejet. Compte tenu de leur impact potentiel, du retour d'expérience et des résultats obtenus par les meilleures technologies disponibles, l'Administration fixe des limites à ne pas dépasser. Les rejets thermiques du circuit de refroidissement du condenseur font ainsi l'objet de limites réglementaires dépendantes des cours

en substance...

Si les canicules de 2003 et 2006 n'ont eu que peu d'impact sur le fonctionnement des centrales nucléaires françaises, EDF n'en a pas moins mis en place un plan « Grands chauds » dès 2008. Dans la perspective d'une multiplication d'événements extrêmes de cette nature du fait du changement climatique, ce programme intègre une ré-interrogation périodique des évolutions climatiques et leurs conséquences sur le dimensionnement des ouvrages. Des modifications concernant la sûreté nucléaire et l'exploitation sont mises en œuvre.

d'eau concernés : en échauffement maximum amont-aval et/ou en température maximale à l'aval. Un réacteur nucléaire utilise environ 100 000 m³ d'eau par an pour les circuits primaires et secondaires. Selon la disponibilité en eau, on utilise deux modes de refroidissement pour le circuit tertiaire. Quand l'eau est abondante (bords de mer, estuaire, grands fleuves), le refroidissement se fait en circuit



Aéroréfrigérant de la centrale de Golfech

¹. Niveau moyen le plus bas d'un cours d'eau, abaissement exceptionnel du débit d'un cours d'eau

ouvert. L'eau prélevée passe par les tubes du condenseur puis retourne au milieu. L'échauffement est de quelques degrés et environ 50 m³/s d'eau sont nécessaires pour un réacteur de 1300 MW.

Lorsque la ressource en eau est moins importante, le refroidissement se fait en circuit fermé. L'eau circulant en boucle dans le condenseur est refroidie par un courant d'air ascendant dans des tours aéro-réfrigérantes. La chaleur s'évacue par la vapeur d'eau qui forme le panache au-dessus des tours. Un appoint continu en eau (2 m³/s) compense l'eau évaporée dans les tours (0,8 m³/s) et renouvelle l'eau des condenseurs et limite leur encrassement. Dans ce type de circuit fermé, l'échauffement de l'eau du cours d'eau ne dépasse pas quelques dixièmes de degré pendant les périodes chaudes.

Le besoin en eau prélevée est de 150 à 180 m³/MWh (1 500 millions de m³ par an) pour un circuit ouvert, 6 m³/MWh pour un circuit fermé (60 millions de m³/an). Dans un circuit ouvert, l'eau prélevée est intégralement et immédiatement retournée au milieu. La consommation d'eau (eau évaporée) est de 2 à 3 m³/MWh pour un circuit fermé.

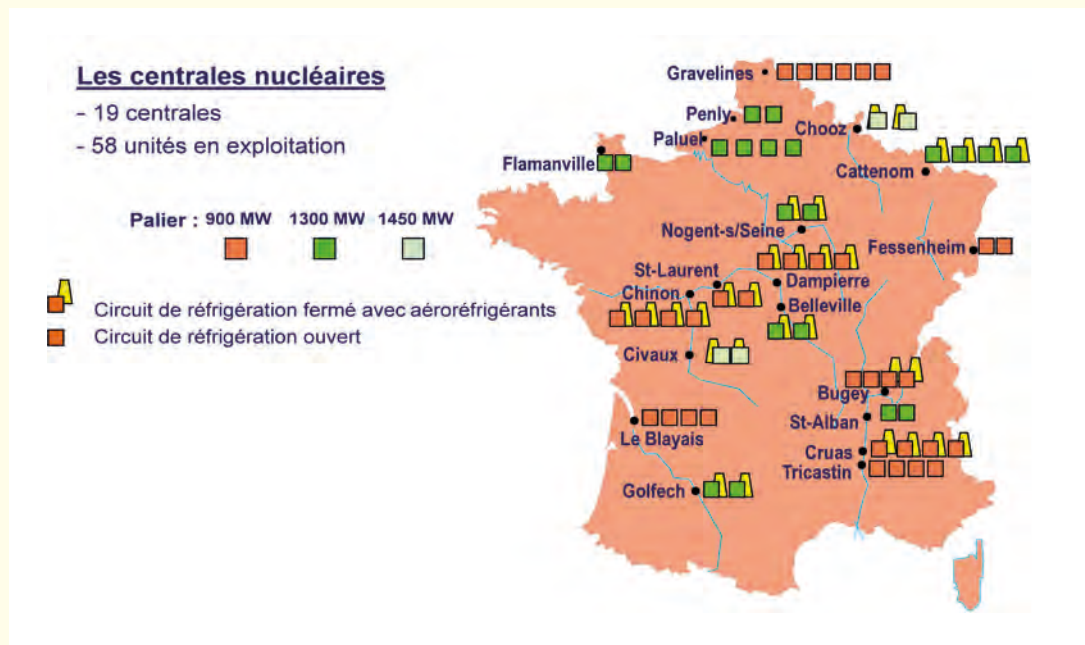
LES CANICULES DE 2003 ET 2006

Ces dix dernières années, la France a connu plusieurs périodes de fortes températures et/ou de sécheresses: les canicules de grande ampleur et de longues durées de 2003 puis 2006, une sécheresse sévère et précoce en 2003, et en fin de printemps, début d'été, en 2011. Quelles ont été les conséquences de ces phénomènes sur le fonctionnement des centrales nucléaires? Quelles ont été les éventuelles mesures d'adaptation nécessaires? Plus généralement, quelles sont les dispositions prises par EDF pour garantir la sûreté des installations et la production d'électricité pour faire face à ces épisodes climatiques qui pourraient devenir plus fréquents du fait du changement climatique? La canicule d'août 2003 a été exceptionnelle par sa durée, son intensité et son extension avec des températures maximales d'air supérieures à 35 °C relevées sur les 2/3 des stations météorologiques en France métropolitaine avec des excursions au-dessus de 40 °C sur 15 % des stations, y compris en Bretagne. Ce qui n'était jamais arrivé depuis le début des mesures de la température. Certains fleuves

ont connu des augmentations de température moyenne sans précédent: 0,5 °C par jour sur la Seine et la Moselle au début du mois d'août. Les températures maximales de la Loire ont dépassé 30 °C avec une amplitude jour/nuit de 3 °C. Celles de la Garonne et de la Moselle s'en sont approchées. De février à septembre 2003, la sécheresse a aussi affecté l'ensemble de la France: la pluviométrie a été parfois déficitaire de 20 à 50 %.

La canicule de 2006 a affecté le mois de juillet pendant une vingtaine de jours (du 10 au 28 juillet 2006). Cette vague de chaleur plus longue qu'en 2003 a été moins intense et moins étendue géographiquement. Elle est néanmoins au deuxième rang des plus sévères observées en France depuis 1950, après celle de 2003 et devant celles de 1976 et 1983.

En 2006, les précipitations ont été relativement conformes à la normale sur le tiers nord du pays, excédentaire du Poitou-Charentes à l'Alsace. Le début d'année a été marqué par deux épisodes neigeux importants dans le sud et le nord-est et un mois de mars particulièrement pluvieux. Les températures maximales de l'air et de l'eau atteintes au voisinage des



Le parc de production thermique d'EDF en France

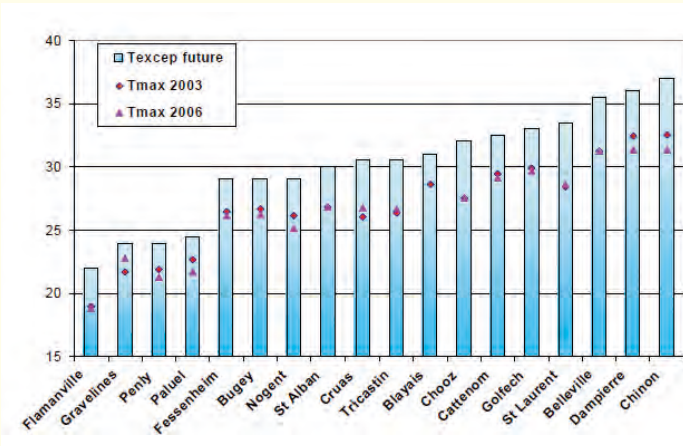


Figure 1 – Évaluation de la température maximale de l'eau à l'horizon 2030

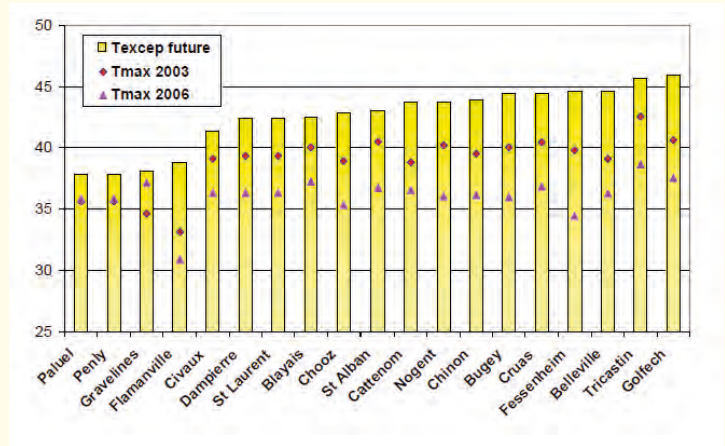


Figure 2 – Évaluation de la température maximale de l'air à l'horizon 2030

centrales nucléaires sont restées un peu inférieures à celles de 2003.

Conséquences sur le fonctionnement des centrales

Pendant ces épisodes caniculaires, la sûreté des centrales nucléaires a toujours été garantie dans le respect des règles générales d'exploitation. Le bon fonctionnement des équipements nécessaires à la production d'électricité a également été assuré. Les règles particulières de conduite et les dispositions particulières prévues ont été mises en œuvre : contrôle renforcé de l'efficacité des échangeurs destinés aux fonctions de sûreté, limitation de l'usage des charges calorifiques dans les locaux, utilisation de toute la plage de réglage avec des déplacements de points de consigne si nécessaire des équipements de réfrigération, mise en service de groupes frigorifiques de secours et de ventilateurs, brumisation d'entrées d'air...

Pour respecter les limites réglementaires de température de l'eau, des baisses, voire des arrêts de production ont été nécessaires. Les centrales avec un refroidissement du condenseur en circuit ouvert ont été les plus concernées : Bugey (Ain), Saint-Alban (Ardèche), et

Tricastin (Gard) sur le Rhône et Blayais (Gironde) sur l'estuaire de la Gironde. Golfech (Tarn-et-Garonne) en circuit fermé, a également été affectée.

Les pertes de production ont atteint 5,5 TWh en 2003 et 2,5 TWh en 2006². Au plus fort de la canicule, le 12 août 2003 et le 22 juillet 2006, la rupture possible de l'équilibre production/consommation d'électricité, et au-delà, un impact notable sur le système électrique français (risque de *black-out*) a nécessité l'adoption par l'État de modifications temporaires des limites autorisées pour quelques sites nucléaires et thermiques à flamme.

En 2003, trois réacteurs de la centrale de Tricastin³ et un de Golfech ont fonctionné un peu plus d'une dizaine de jours sous couvert de ces dispositions temporaires pour éviter des ruptures d'approvisionnement.

En 2006, ces dispositions n'ont finalement pas été utilisées pour les centrales nucléaires.

LE PROJET « GRANDS CHAUDS »

Au-delà des mesures prises à court terme et portant essentiellement sur l'exploitation, EDF a engagé en 2008 le projet « Grands Chauds ».

Ce projet examine les perspectives d'évolution du climat, en analyse l'impact sur les ouvrages et décline les adaptations nécessaires pour la sûreté et la disponibilité des centrales nucléaires.

L'évolution climatique prise en compte

Les températures de conception des centrales ont été adaptées, site par site, pour des canicules de longue durée que pour des situations exceptionnelles plus courtes. Ces températures ont été déterminées à partir des données observées sur les trente dernières années, avec une méthode d'extrapolation des tendances constatées sur les extrêmes, validée scientifiquement. Météo-France indique que, compte tenu de l'état de l'art des connaissances, la méthode et les résultats présentés par EDF sont « tout à fait raisonnables et ne présentent pas de contradiction évidente avec l'appréciation portée par la communauté de recherche sur l'évolution des températures à attendre d'ici 2030 ». Les résultats obtenus à l'horizon 2020-2030 sont cohérents avec la modélisation climatique à long terme qui a fait l'objet des scénarios du GIEC⁴.

². Ces manques de production sont à rapprocher de ceux affectant la production nucléaire d'électricité du fait de températures élevées pendant une année « normale » qui peuvent varier de 0 à 2,5 TWh/an, principalement de juin à septembre. ³. Les unités d'EDF Tricastin ont surtout été nécessaires pour répondre aux besoins d'alimentation électrique en continu de l'usine d'enrichissement d'uranium Eurodif.

⁴. GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, créé en 1988 pour fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml



La centrale de Golfech, entre le canal de Golfech et la Garonne

Les températures retenues, associées aux situations exceptionnelles, ont été majorées par rapport à celles observées en 2003 (Figure 1 et 2). Par exemple, on retient 37 °C pour la Loire à Chinon, contre 32,5 °C observés en 2003. De même, on retient 46 °C pour l'air à Tricastin, contre 42,5 °C relevés en 2003.

Mise à jour du référentiel « Grands Chauds »

Le référentiel « Grands chauds » est un ensemble d'exigences de sûreté, associé à ces nouvelles valeurs de températures de l'air et de l'eau de dimensionnement. Ces exigences sont conçues pour garantir la sûreté dans tous les états de fonctionnement, en puissance comme à l'arrêt, aux températures les plus élevées. Le projet prévoit aussi une veille climatique pour une interrogation périodique, notamment à l'occasion des réexamens de sûreté décennaux, de la pertinence des niveaux de température retenus. Des mises à jour ont été effectuées dès 2009, intégrant la période 2004-2008. Leurs conclusions n'ont pas remis en cause les valeurs de température du référentiel. Une nouvelle actualisation a été menée en 2014.

Après échange avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), EDF a engagé les études de déclinaison du référentiel « Grands Chauds » sur l'ensemble des centrales nucléaires et préparé les évolutions matérielles et documentaires correspondantes.

Ces évolutions consistent principalement à remplacer et augmenter les capacités de « groupes froids » de production d'eau glacée, ajouter des climatiseurs (dont certains classés de sûreté), augmenter la capacité d'échange des échangeurs eau/eau, vérifier la tenue des matériels à des températures plus élevées que celles prescrites par leur conception, ou modifier certains matériels pour assurer leur tenue à des températures supérieures à celles retenues à la conception. La robustesse a encore été accrue par une série de mesures. Après les canicules de 2003 et 2006, le plan d'actions canicule sécheresse (PACS) a été déployé : nettoyages préventifs d'échangeurs et de batteries froides, moyens mobiles de réfrigération, prise en compte dans la documentation d'exploitation des situations de canicule...

À partir de 2011, des moyens provisoires ont été installés pour protéger les matériels sensibles des températures élevées de l'air identifiés à l'issue des études de déclinaison du référentiel « Grands Chauds ». Des Règles particulières de conduite « Grands Chauds » précisent les dispositions matérielles et organisationnelles pour faire face à des températures élevées de l'air et de l'eau.

Des moyens de réfrigération mobiles sont notamment déployés chaque été pour certains systèmes de ventilation. En 2007 et 2010, des modifications destinées à augmenter la capacité d'échange des échangeurs eau/eau des sites

les plus sensibles (Chinon et Dampierre) et le débit d'eau brute secourue (Chinon en 2007, Blayais en 2010-2011) ont été mises en place. Après 2007, des modifications matérielles ont été intégrées pour augmenter la capacité des échangeurs sur certains sites (Saint-Laurent en 2008, Chooz en 2009 et Belleville en 2011).

Sans oublier le remplacement de groupes frigorifiques par des groupes plus puissants à partir de 2010. Enfin, certains équipements ont été remplacés pour améliorer leur tenue en température (remplacement et rebobinage de moteurs). Les mesures d'adaptation complémentaires s'échelonneront au fil des réexamens décennaux de sûreté prévus par la réglementation.

Actions d'amélioration de la performance thermique

« Grands Chauds » comprend également un programme de maintenance, rénovation et équipements pour améliorer les performances thermiques des aéroréfrigérants. Toutes les centrales concernées ont été équipées de dispositifs de suivi des performances thermiques, qui permettent d'optimiser les plans d'actions spécifiques à chaque échangeur.

Des travaux de réhabilitation des tours aéroréfrigérantes sont menés à mesure des besoins : rénovation des corps d'échange, réparation des coques et structures internes, réalisation d'installations antitartre. De nouveaux moyens de nettoyage des corps d'échange sont développés.

Sur toutes les centrales, des opérations de rénovation complète des stations de surveillance de l'environnement pour les mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau ont également été menées depuis 2003 pour sécuriser les mesures en continu dans l'environnement, notamment de la température.

Toutes ces actions concourent au Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) mis en place par le gouvernement en 2011.

Acquisitions de nouvelles connaissances en hydrobiologie

Depuis 2006, un groupe de travail pluraliste « rejets thermiques » créé à l'initiative du ministère de l'Environnement, de l'ASN et d'EDF a pour objectif de partager les connaissances relatives à l'influence de la température sur les écosystèmes dans les grands cours d'eau pour mieux appréhender l'effet des rejets thermiques dans le contexte du changement climatique, en particulier lors des épisodes de canicule et à en tirer les enseignements en termes d'éventuelles modifications de la réglementation. Dans ce cadre, un programme de recherches « Thermie-Hydrobiologie », mené à l'échelle européenne, élaboré par EDF R&D et l'IRSTEA⁵, a été réalisé sur la période 2008-2012 autour de plusieurs thèmes :

- ▶ une revue bibliographique pour actualiser les connaissances sur les préférences et les tolérances thermiques des principales espèces de poissons en Europe occidentale ;
- ▶ la recherche de relations entre la distribution spatiale des espèces aquatiques et le régime thermique des cours d'eau à partir de données mesurées ou modélisées ;
- ▶ la recherche de relations plus globales entre les données biologiques et les données thermiques, hydrologiques et chimiques en utilisant les séries de données collectées sur le long terme ;
- ▶ l'évaluation des effets thermiques sur le métabolisme des compartiments bactérien, algal et benthique à la base des réseaux trophiques.

Les résultats de ce programme ont été présentés à la communauté scientifique en 2013. Les chercheurs ont relevé la difficulté de détecter des tendances sur des séries de données soumises à une importante variabilité temporelle, ce qui confère une grande valeur

aux données biologiques collectées dans le cadre de la surveillance hydrobiologique des centrales nucléaires.

Les peuplements benthiques⁶ (algues et invertébrés) évoluent sous l'effet d'une amélioration de la qualité chimique des eaux qui réduit l'eutrophisation⁷ dans les grands cours d'eau. Pour les poissons, les régimes hydrologique et thermique apparaissent comme les deux grands facteurs moteurs des variations pluriannuelles.

Un suivi thermique approfondi est réalisé depuis 2007 en aval des centrales nucléaires du Bugey, sur le Rhône et de Golfech sur la Garonne. Au Bugey, un panache thermique se développe en rive droite sur plusieurs kilomètres avec une veine d'eau moins échauffée en rive gauche.

À Golfech, les mesures montrent une zone faiblement échauffée en rive droite sur quelques centaines de mètres avec, comme au Bugey, des zones moins chaudes sur l'autre rive, refuges potentiels pour des poissons d'eau froide.

Pendant les étés 2007 à 2011, le suivi piscicole fait à Golfech n'a pas mis en évidence de lésion ou de signe de présence parasitaire. Les observations sur les peuplements de poissons (richesse spécifique et abondance) présentent peu de différences entre zones échauffées et non échauffées par les rejets thermiques de la centrale.

Au Bugey, en 2003, les poissons d'eau froide ont été moins pêchés que les années antérieures mais truites et vairons, probablement réfugiés dans des zones d'eau plus fraîches, sont réapparus en novembre. Les effets observés ont été similaires d'amont en aval de la centrale. Toujours au Bugey, les mouvements d'une centaine de poissons ont été suivis pendant l'été 2009.

Évolution réglementaire

Considérant, du fait du changement climatique, que le risque de rencontrer des situations de

canicule de plus en plus fréquemment devait être pris en compte dans la réglementation, avec un encadrement spécifique évitant le recours à des textes dérogatoires, et prenant acte que les recherches récentes ne mettaient pas en évidence d'impact spécifique des rejets thermiques des centrales sur la faune piscicole, celui-ci étant beaucoup plus ténu et localisé que celui imputable aux évolutions tendanciennes de la température de l'eau, l'ASN a mis à jour, en mai 2012, sa doctrine relative au processus décisionnel en cas de canicule applicable aux centrales nucléaires.

Les orientations principales retenues sont :

- ▶ Le recours à des modifications temporaires des prescriptions doit être limité à des situations exceptionnelles. Pour cela, les prescriptions relatives aux prélèvements et aux rejets des centrales nucléaires prévoient des valeurs limites spécifiques applicables aux rejets thermiques en situation climatique exceptionnelle, l'acceptabilité de ces valeurs devant être justifiées dans l'étude d'impact ou sa mise à jour et avoir fait l'objet d'une concertation préalable. L'application de ces dispositions sera limitée aux situations où le réseau de transport d'électricité (RTE) requiert le fonctionnement de la centrale concernée ou quand l'équilibre entre la consommation et la production d'électricité nécessite ce fonctionnement. Ces dispositions prévoient la durée de validité de ce régime, les mesures complémentaires et compensatoires éventuelles (surveillance renforcée de l'environnement, limitation de l'échauffement), et les modalités d'information.
- ▶ Pour les sites où ces situations exceptionnelles ne sont pas prévues, ou si la situation dépasse les conditions

⁵. IRSTEA : Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (ex CEMAGREF) ⁶. Vivant au fond de l'eau, au plus près du substrat du milieu aquatique ⁷. Phénomène de dégradation d'un environnement aquatique, généralement provoqué par une augmentation des substances nutritives, telles que l'azote apporté par les cultures et la pollution automobile

prévues dans les textes, et si l'exploitant demande une modification temporaire dans un délai incompatible avec le déroulement des consultations prévues par la réglementation (cf. II de l'article 18 du décret du 2 novembre 2007), il sera néanmoins possible, en conformité avec la réglementation (cf. II de l'article 25 du même décret) d'accorder ces modifications temporaires de prescriptions en matière de rejets et prélèvements d'eau sans mettre en œuvre les consultations préalables normalement nécessaires si le gouvernement a informé l'ASN qu'il considérait que la poursuite du fonctionnement du réacteur constituait une nécessité publique; et si le besoin et l'urgence des modifications temporaires sont justifiés par une situation climatique ou hydrologique que l'ASN, sur la base des justifications fournies par l'exploitant, après consultation des services spécialisés (Météo-France, ministère chargé de l'Environnement...), considère comme une situation exceptionnelle.

En juin 2011, un exercice réunissant toutes les parties prenantes a permis de se préparer à une telle situation.

LES 3 PHASES D'ADAPTATION : ANTICIPATION, SURVEILLANCE, GESTION DE CRISE

Le processus de protection contre les aléas climatiques fait ainsi appel à plusieurs types d'actions.

Il s'agit d'abord d'actions de prospective et d'anticipation/prévention du type de celles définies dans le projet « Grands Chauds ». Ensuite, des actions de surveillance opérationnelle des conditions météorologiques et hydrologiques sont déclinées. Les sites disposent des prévisions hydrologiques établies par une entité experte d'EDF et des prévisions météorologiques de Météo-France.

La situation hydro-climatique fait l'objet d'un partage entre toutes les entités concernées par des réunions périodiques du Groupe de gestion de l'eau de la Coordination de l'eau d'EDF. Selon la situation, des niveaux de mobilisation (veille, vigilance, pré-alerte, alerte) par zone sont définis. Des actions de gestion des événements sont l'occasion de mettre en place une organisation permettant de prendre au bon niveau les décisions visant à limiter les conséquences d'une situation exceptionnelles.

En phase de veille, les sites de production suivent régulièrement les débits et températures de l'eau de refroidissement et la température de l'air. Les menaces climatiques



locales sont transmises au niveau national.

Lors du passage en mode vigilance puis éventuellement aux modes pré-alerte et alerte avec un risque de situation tendue de l'équilibre offre/demande d'électricité, une cellule de gestion des aléas de production est activée au niveau national. Elle coordonne les actions des différentes entités (production, management d'énergie, ingénierie) et pilote les études de scénarios pour les jours et semaines à venir selon les prévisions météo et

la situation à venir de l'état du parc de production (prise en compte des aléas et des contraintes de sûreté).

Elle est en appui pour les prises de décision concernant des critères de situations exceptionnelles prévus dans les autorisations réglementaires individuelles de chaque centrale, voire la demande, en liaison avec les pouvoirs publics, de modifications temporaires de ces autorisations. ■



La centrale de Tricastin et le canal de Donzère-Mondragon

Tricastin paré pour la crue millénale

Pour se prémunir d'une crue du Rhône exceptionnelle, la centrale de Tricastin a engagé un programme de sécurisation et de renforcement des ouvrages hydrauliques en amont de ses installations. Si les grandes crues dévastatrices au sud de la vallée du Rhône sont rares, l'ASN a estimé que l'exploitant devait se prémunir d'une crue « millénale ».

Le niveau de sûreté est maximal. La crue millénale prise en compte par EDF ferait passer le débit du Rhône à 13 700 m³/s (contre 1 600 m³/s en moyenne). Et ferait gonfler les eaux du canal de Donzère-Mondragon, qui longe le site en contrebas. Plusieurs aménagements ont été réalisés : le tablier d'une passe navigable du canal a été rehaussé, les digues aux abords d'un pont renforcées, un déversoir pour évacuer l'éventuel trop plein d'eau. Les ouvrages étaient dimensionnés pour résister à une crue de 9 900 m³/s.

Tous les ouvrages qui régulent les débits du canal en cas de crue du Rhône ont désormais de nouvelles consignes d'exploitation. Ainsi, le barrage de retenue serait ouvert pour favoriser l'écoulement dans le lit naturel du fleuve, les vannes du barrage de garde seraient fermées pour que l'eau n'alimente pas trop le canal et les déchargeurs de l'usine hydroélectrique de Bollène seraient ouverts pour réguler le débit sortant du canal.

Le service climatique au cœur des nouveaux enjeux

par **Boris Le Ngoc** (SFEN)



en substance...

Contributeur majeur du changement climatique¹, le secteur énergétique pourrait souffrir de ses effets. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, la R&D d'EDF suit attentivement l'évolution du climat. Dès 1990, le Conseil Scientifique du groupe s'est emparé du sujet pour définir des solutions « opérationnelles » permettant de limiter les impacts du climat sur les activités de l'énergéticien. 25 ans plus tard, l'essentiel des efforts de recherche intègre une dimension climatique, en témoigne la récente création d'un service dédié.

À l'échelle de la planète, le changement climatique pourrait impacter le secteur de l'énergie du fait du réchauffement global, des modifications régionales du cycle hydrologique et de la multiplication (et de l'intensification) des événements climatiques extrêmes.

À long terme, l'évolution des données climatiques moyennes modifiera les opérations de tous les

acteurs de la filière énergétique : comment vont réagir les fleuves, nécessaires au refroidissement des centrales nucléaires et à l'alimentation des barrages ? Comment évoluera la demande en énergie de telle ou telle région ? Quel dimensionnement des bâtiments pour faire face à des canicules ou à l'augmentation du niveau de la mer ? Apporter des réponses à ces questions est essentiel pour exploiter au mieux les installations.

LE PREMIER SERVICE CLIMATIQUE

« Après la canicule de 2003, le besoin s'est fait sentir de vraiment mettre en place des projets R&D dédiés aux impacts du climat. Puis, l'idée de mettre en place un service climatique s'est imposée » explique Paul-Antoine Michelangeli, ingénieur-chercheur chargé de créer le service à EDF. L'objectif de ce service climatique « maison » est de collecter et mettre en forme les données climatiques disponibles, puis de les transformer pour une utilisation directe dans les modèles et outils opérationnels. Dans un premier temps, il s'agit de construire une base de données de projections climatiques de référence², unifiée, accessible et exploitable par tous les métiers du groupe. « L'idée est de regrouper les données qui nous intéressent : le vent, la température... ces variables vont être utilisées pour étudier l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des installations de production d'électricité : barrage, centrales thermiques, centrales nucléaires. Puis de développer des outils et méthodes de traitement de ces données, adaptés aux différents besoins des métiers, en se basant notamment sur une importante veille scientifique. Enfin, il s'agit de combiner les deux pour aider les différentes unités d'EDF à prendre des décisions opérationnelles et stratégiques face aux changements climatiques ».

Les chercheurs d'EDF doivent ainsi gérer une quantité importante d'informations. « Nous utilisons les jeux de données issus de la quarantaine de modèles climatiques utilisés par le GIEC. Cela représente 2 Pétaoctets, soit environ 2 000 Téraoctets, répartis en 4,5 millions de fichiers, dont nous extrayons environ 15 To de données pertinentes pour EDF » précise M. Michelangeli.

Les données sont également très hétérogènes car issues de dizaines de modèles différents. « On y trouve plusieurs résolutions, des pas de temps et des calendriers différents, sans parler des données manquantes ou des biais inhérents aux modèles climatiques... » rappelle l'ingénieur-chercheur.

Pour les exploiter, le service climatique s'engage dans un long travail d'uniformisation, d'homogénéisation, de détection et de correction. « L'échelle typique de résolution des modèles climatiques globaux est de l'ordre de 150 à 200 km, ce qui place quasiment Grenoble et Marseille dans la même maille ! Nous appliquons donc, sur ces projections climatiques globales, des méthodes de descente d'échelle qui nous permettent de générer des séries de données climatiques locales, adaptées aux besoins des utilisateurs du Groupe. Cela permet notamment de nourrir les études d'impact des événements naturels sur nos installations » complète Paul-Antoine Michelangeli. ▶



L'équipe du Service Climat

1. En 2010, 35 % des émissions directes de gaz à effet de serre provenaient de la production d'énergie.

2. Les données proviennent des observations (stations ou satellites) et des sorties de modèles (résultats des simulations du CMIP5, modèle d'intercomparaison sur lequel se base le GIEC pour ses travaux).

LES DONNÉES OPÉRATIONNELLES POUR EXPLOITER LES CENTRALES

En l'occurrence, le but d'EDF n'est pas de faire doublon avec d'autres services extérieurs comme DRIAS³, mais plutôt d'être un relais entre ces services qui fournissent les données brutes ou corrigées à l'échelle de la France métropolitaine, et les données dont ont besoin les ingénieries sur site. Les études réalisées visent à déterminer les conséquences des évolutions climatiques sur trois sujets : l'évolution de la demande en énergie, les conséquences du réchauffement climatique sur l'exploitation du parc de production et le dimensionnement des futurs moyens de production.

Pour le parc nucléaire en exploitation, le service climatique permet de fournir les informations nécessaires aux mesures d'adaptation

au changement climatique. « *En ce moment, nous travaillons pour le CIDEN⁴ sur l'évolution de la source froide des centrales nucléaires, c'est-à-dire essentiellement sur la variation de la température et des débits des fleuves* » explique le chef du Service climat. Ces données et des développements méthodologiques adaptés permettent également d'estimer les valeurs nécessaires au dimensionnement des nouvelles installations.

Le réchauffement climatique peut perturber le fonctionnement normal de certaines centrales nucléaires (cf. page 43). Celles-ci doivent respecter une batterie de contraintes techniques et réglementaires, comme maintenir une température maximale de 50 °C dans le bâtiment réacteur. Les fleuves, qui permettent de refroidir certaines unités, sont eux aussi

surveillés : débit minimal, niveau d'eau, température en aval de la centrale, dilution des effluents, impact sur la faune et la flore... Une importance particulière est accordée aux centrales qui partagent un même fleuve⁵. « *Il est primordial de savoir anticiper l'évolution des cours d'eau sur le long terme, en particulier lorsqu'un événement météorologique vient modifier significativement le débit et/ou la température de l'eau* » explique Sylvie Parey, chercheur senior au Service Climat. « *L'air est également étudié. Les centrales sont climatisées, notamment pour préserver le bon fonctionnement du matériel électronique et informatique. Il faut donc s'assurer que les capacités des groupes froids resteront suffisantes en cas de canicule encore plus sévère que celles que nous avons connues en 2003 et 2006.* »

Climatologie et météorologie, quelles différences ?

La planification de la maintenance des centrales nucléaires s'intéresse à des projections de l'ordre du trimestre jusqu'à une ou plusieurs années, relevant donc plus de la climatologie que de la météorologie. Si la météorologie et la climatologie partagent des modèles communs de mécanique des fluides appliqués à la « dynamique de l'atmosphère », ces deux disciplines présentent toutefois quelques différences dans leur approche. La météorologie cherche à prédire le temps qu'il fera dans un délai compris entre quelques heures et quelques semaines (15 jours à 3 semaines au plus). Elle s'attache à produire des séries temporelles de paramètres météo (température, pression, pluie, vent...) avec le maximum de précision possible, et à des échelles spatiales fines (de quelques kilomètres à 10-20 kilomètres). Si pour le court terme (quelques jours) on fournit une prévision déterministe (un chiffre précis, pour un lieu et un moment donnés), la prévision à plus longue échéance nécessite une approche probabiliste (avec des fourchettes de valeurs pour des lieux et des périodes moins précises). Cela est dû aux incertitudes liées à la simplification des processus physiques représentés par les modèles numériques et à la nature chaotique de l'atmosphère.

La climatologie concerne des échelles de temps plus longues et produit des prédictions ou projections probabilistes. La caractérisation du climat passé récent utilise des moyennes sur 30 ans (définition officielle de l'Organisation météorologique mondiale, organe des Nations unies pour la météo et le climat). Lorsqu'il s'agit de l'avenir, l'échelle de temps pertinente dépend de l'échéance : on utilise ainsi des prévisions saisonnières sous forme de moyennes mensuelles, des prévisions décennales en moyennes annuelles et des projections climatiques sur des périodes d'une ou plusieurs dizaines d'années.

3. DRIAS a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques. **4.** Centre d'Ingénierie de Déconstruction et Environnement d'EDF. **5.** En vallée du Rhône : Bugey, Cruas, Saint-Alban, Tricastin ; en vallée de la Loire : Belleville, Chinon, Dampierre, Saint-Laurent-des-Eaux.

Le recyclage des combustibles nucléaires : une contribution efficace à la réduction de l'empreinte environnementale nucléaire

par **Christophe Poinssot**, Chef du Département de Radiochimie et des Procédés
Direction de l'Énergie Nucléaire - CEA Marcoule

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, le recyclage est déjà mis en œuvre industriellement comme en France, au Japon ou au Royaume-Uni. Recycler les matières nucléaires est un pilier essentiel des systèmes nucléaires du futur. En effet, le recyclage des matières nucléaires énergétiques contenues dans les combustibles irradiés permet d'utiliser plus efficacement la ressource en uranium naturel, et réduit considérablement l'empreinte environnementale globale du nucléaire. Ainsi, recycler les matières nucléaires permet d'économiser près de 20 % d'uranium naturel pour une même quantité d'électricité produite. En changeant de génération de réacteurs, l'économie d'uranium peut encore être démultipliée : la quantité de matières nucléaires et d'uranium appauvri produite pendant la durée de fonctionnement d'un réacteur pourrait permettre, grâce au recyclage, de produire pendant plus de mille ans la même quantité annuelle d'électricité. Cela requiert néanmoins de disposer de réacteurs avec un flux de neutrons plus important et avec des neutrons plus énergétiques : c'est tout l'enjeu des réacteurs de 4^e génération, et notamment des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ils pourraient devenir une réalité industrielle dans la seconde moitié du siècle et produire une électricité de base décarbonée sans production de CO₂ atmosphérique.

Dans ce contexte, disposer d'indicateurs quantitatifs et robustes pour évaluer l'impact du recyclage sur l'empreinte environnementale est important. Nous avons

donc développé un outil de simulation de type « Analyse de cycle de vie » qui a pour originalité de prendre en compte la réalité des intrants et entrants environnementaux pour toutes les installations du cycle électronucléaire français, sur la base des rapports environnementaux de chaque installation. Cet outil – NELCAS (*Nuclear Energy Life Cycle Assessment*) – nous a permis d'évaluer l'empreinte environnementale de l'énergie nucléaire, de la comparer avec d'autres sources d'énergie et d'examiner l'influence du recyclage des matières.

LE RECYCLAGE DES MATIÈRES NUCLÉAIRES

Lier l'énergie nucléaire, en particulier le traitement des combustibles, avec une faible empreinte environnementale n'est pas une évidence pour le grand public, car le nucléaire est souvent associé à des accidents ou aux déchets à vie longue. La réalité de l'empreinte environnementale du nucléaire est tout autre.

Les réacteurs nucléaires utilisent l'énergie libérée par la fission d'une partie des noyaux d'uranium, (l'isotope 235 de l'uranium) pour produire de la chaleur et vaporiser de l'eau qui fait tourner une turbine pour produire de l'électricité. La quantité d'énergie libérée par chaque réaction de fission est si importante que même après avoir été utilisé pendant 3 à 4 ans, seul environ 5 % du combustible initial a été réellement consommé, le reste constituant le combustible nucléaire « usé » qui contient encore environ 95 % de l'uranium initial, mais avec une moindre teneur en uranium 235. Il contient aussi 1 % de plutonium, autre réserve énergétique

en substance...

Une nouvelle évaluation de l'empreinte environnementale de l'énergie nucléaire démontre que le recyclage de l'uranium et du plutonium est la pierre angulaire de tout système nucléaire durable et respectueux de l'environnement. Trier et recycler les matières valorisables issues des déchets ménagers et industriels est en passe de devenir une démarche naturelle pour préserver l'environnement. Elle permet de diminuer significativement le volume des déchets, d'économiser les ressources naturelles et donc de limiter notre impact sur l'environnement. Personne ne remet en cause les bénéfices du recyclage qui a vu se développer de nouveaux procédés et des industries à la base d'une future économie circulaire.

importante. Néanmoins, ce combustible ne peut pas être brûlé plus, car il contient des produits de fission qui « empoisonnent » progressivement les réactions de fission. Alors, que faire de ce combustible nucléaire usé ?

Certains pays, comme la Suède et la Finlande, considèrent ce combustible usé comme un déchet ultime, à enfouir profondément, en stockage géologique. C'est le « cycle direct » ou « cycle du combustible ouvert » (*Once Through Cycle – OTC*). Cette option fait fi des 95 % d'uranium et du 1 % de plutonium que contient encore le combustible. D'autres pays (la France, le Japon, le Royaume-Uni et bientôt la Chine) ont décidé de récupérer par des procédés performants de recyclage, ces matières énergétiques valorisables encore présentes dans le combustible usé pour produire une deuxième génération de combustible, le MOX (*mixed oxides*). Cela permet d'avoir un cycle partiellement fermé dans lequel les matières énergétiques passent deux fois en



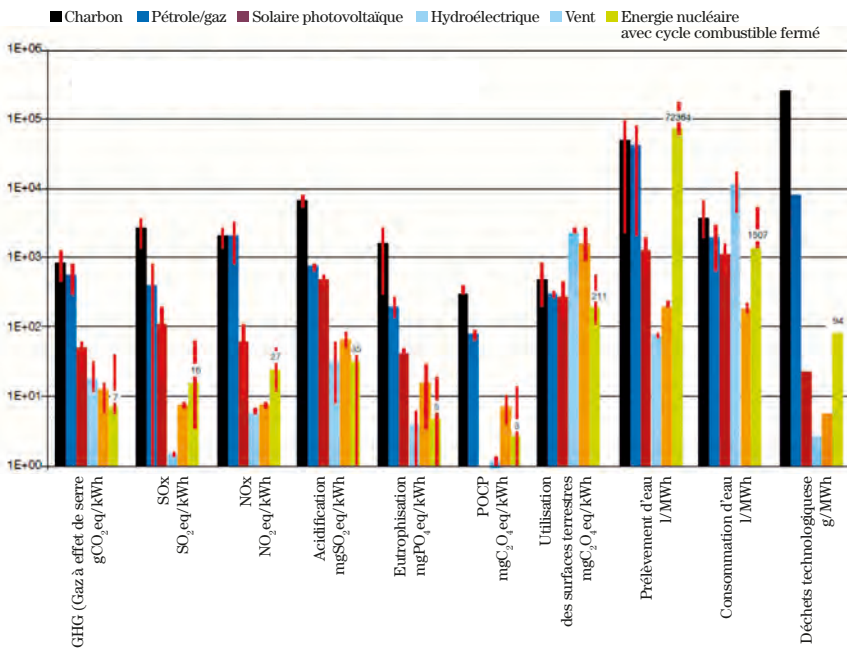


Figure 1 : empreinte environnementale de l'énergie nucléaire comparée aux autres sources d'énergies. Les données pour le nucléaire sont issues du modèle NELCAS. Les données pour les autres sources d'énergie sont tirées de la littérature disponible. Cette figure illustre clairement l'impact environnemental relativement bas de l'énergie nucléaire, à l'exception des prélèvements d'eau.

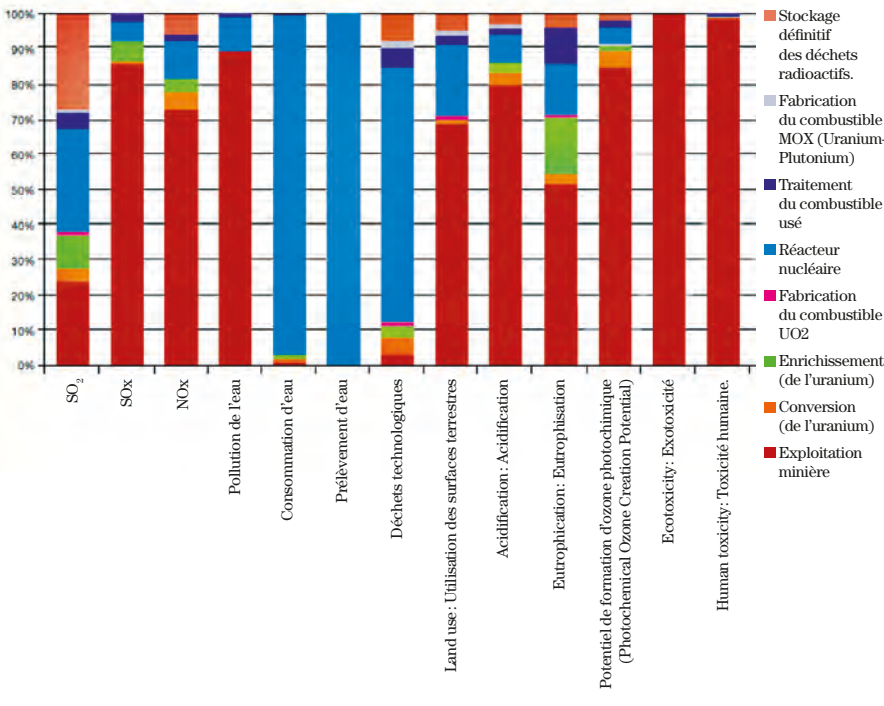


Figure 2 : contribution relative des étapes/installations du cycle du combustible aux indicateurs environnementaux. Cette figure illustre clairement l'impact très important des activités de l'amont du cycle, en particulier l'extraction minière. L'amélioration de l'impact environnemental de l'énergie nucléaire nécessiterait une amélioration de ces activités ou leur diminution.

réacteur (*Twice Through Cycle – TTC – cycle avec monorecyclage*). Malheureusement, en raison de l'accumulation d'isotopes du plutonium non-fissiles dans les réacteurs, le MOX utilisé ne peut pas être recyclé dans les réacteurs, ce qui limite donc le recyclage. Pour un multi-recyclage (MTC) effectif des matières, il faut disposer de réacteurs avec des neutrons d'énergies plus élevées (réacteurs à neutrons rapides) permettant la fission de tous les isotopes du plutonium et de favoriser la transformation de l'uranium 238 en plutonium fissile. Ces réacteurs transforment l'uranium 238 non-fissile en matière fissile. On parle alors d'isotope fertile. Ces RNR consommant très efficacement l'uranium naturel, ils sont appelés à se développer pour permettre une production propre et plus efficace d'énergie nucléaire décarbonée. Leur capacité à utiliser efficacement l'uranium 238 pourrait permettre de produire de l'électricité pendant plusieurs millénaires sans avoir besoin de nouvelles ressources naturelles, simplement en utilisant les stocks d'uranium appauvri et multi-recyclant le plutonium. Néanmoins, une telle perspective ne deviendra réalité que si l'acceptabilité du nucléaire est suffisamment large dans l'opinion publique, ce qui requiert en particulier, de répondre aux craintes du public concernant son empreinte environnementale (déchets, accidents, rejets...).

DÉFINIR L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DU NUCLÉAIRE

Pour définir l'empreinte environnementale du nucléaire, l'outil numérique d'Analyse de cycle de vie (NELCAS¹) prend en compte pour chaque installation du cycle électronucléaire les flux réels de matière et d'énergie tels que publiés annuellement dans les rapports environnementaux des installations. NELCAS permet ainsi d'évaluer les principaux indicateurs

1. Poinsot, C, Bourg, S, Ouvrier, N, Combernoux, N, Rostaing, C, Vargas- Gonzalez, M, Bruno, J, « Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles », Energy, 69, 199–211, 2014.

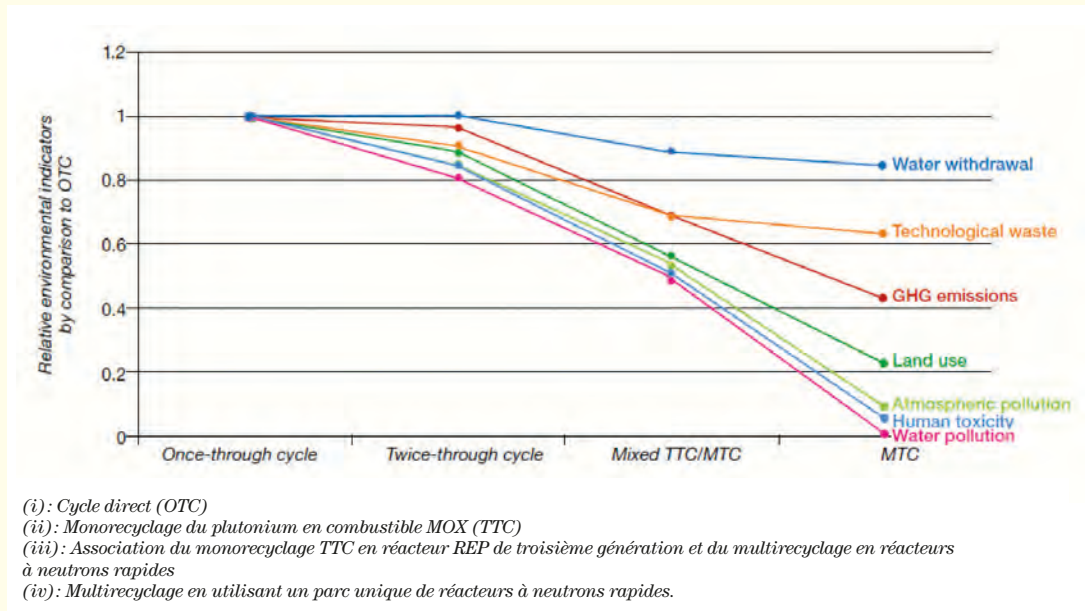


Figure 3: évolution de l'indicateur environnemental relatif et augmentation des activités de recyclage

environnementaux globaux, comme les émissions de gaz à effet de serre (GES), les émissions de particules, l'utilisation des terres agricoles, le prélèvement, la consommation et la pollution de l'eau, la production de déchets technologiques et nucléaires, la toxicité écologique et humaine. Cette étude est originale car elle repose pour une grande part non sur des estimations, mais sur des données réelles accessibles au public. Les principaux résultats de l'étude sont présentés ici ; son intégralité a fait l'objet d'un article scientifique dans la revue *Energy* (Poinssot et coauteurs, *Energy*, 69, 199-211).

ÉNERGIE NUCLÉAIRE VS. AUTRES ÉNERGIES

Comme le montre la figure 1, un système de production électronucléaire bien optimisé peut avoir une très faible empreinte environnementale comme c'est déjà le cas en France. À l'exception des rejets radioactifs spécifiques, l'énergie nucléaire est parmi les trois sources d'énergies les plus respectueuses de l'environnement, avec un impact similaire à celui de l'éolien ou de l'hydraulique. Ceci est en particulier dû à la très grande production électrique d'une centrale comparativement aux installations renouvelables. Ces

résultats peuvent varier d'un pays à l'autre selon les conditions locales. Ainsi, la contribution de l'enrichissement de l'uranium a un impact limité sur l'empreinte carbone du nucléaire car l'usine est alimentée par de l'électricité nucléaire décarbonée, alors que dans d'autres pays, elle sera plus conséquente si l'usine est alimentée par une électricité d'origine fossile.

Le faible impact de l'énergie nucléaire en termes de gaz à effet de serre est connu depuis longtemps. Mais notre étude démontre que l'effet bénéfique de l'énergie nucléaire est beaucoup plus large et que cette énergie est également importante pour de nombreux autres indicateurs environnementaux.

ORIGINE DE L'IMPACT DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Le modèle NELCAS a permis d'identifier pour chaque indicateur la contribution des différentes étapes du cycle, depuis l'extraction du minerai d'uranium jusqu'au stockage géologique final des déchets nucléaires (figure 2).

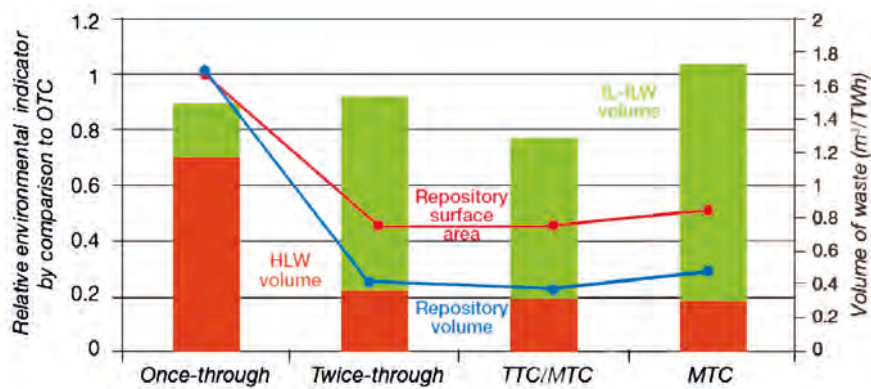
Les activités de l'amont du cycle du combustible dominant de manière significative (plus de la moitié) l'empreinte environnementale globale, à la seule exception de la consommation d'eau. Inversement, l'influence

des activités de l'aval du cycle, y compris le recyclage des combustibles usés, est très limitée (inférieure à 20 %), la seule exception étant la contribution à l'émission de gaz à effet de serre puisque le stockage des déchets représente près de 30 % de l'impact total.

À l'inverse, les rejets radioactifs liquides et atmosphériques proviennent essentiellement des opérations de recyclage mais il a été démontré qu'ils n'ont pas d'impact sur la santé des populations (<1% de la radioactivité naturelle). Améliorer l'empreinte environnementale du nucléaire nécessite d'améliorer l'amont du cycle pour les rendre plus propres et/ou de limiter l'activité minière en utilisant plus efficacement les ressources naturelles. Recycler les combustibles nucléaires usés est donc un moyen performant pour améliorer l'empreinte environnementale globale du nucléaire.

RECYCLER LE COMBUSTIBLE USÉ : UNE BONNE SOLUTION

L'outil NELCAS et les données disponibles en France sur les systèmes de 4^e génération, notamment le REX des réacteurs Phenix et Superphenix, nous ont permis de réaliser une première évaluation



Le recyclage conduit évidemment à une réduction des besoins de stockage. Alors que le volume total des déchets reste à peu près inchangé, le type de déchets est modifié, c'est-à-dire qu'il y a une diminution des déchets de haute activité (courbe rouge) et un accroissement des déchets à vie longue de moyenne activité (courbe verte).

Figure 4: évolution des caractéristiques relatives du stockage géologique des déchets radioactifs selon les activités de recyclage

qualitative des indicateurs environnementaux des cycles du futur, dont l'impact potentiel d'un cycle mettant en œuvre le multi-recyclage du plutonium dans des réacteurs de 4^e génération (*Multi-Through Cycle* – MTC). Cette évaluation permet d'évaluer qualitativement l'influence d'un recyclage croissant des matières sur l'empreinte écologique globale du nucléaire. La figure 3 montre l'évolution très favorable de l'ensemble des indicateurs environnementaux à mesure que le multi-recyclage des matières prend de l'importance.

La figure 3 montre que plus l'ampleur du recyclage croît, plus les indicateurs environnementaux génériques ont tendance à baisser, traduisant l'effet bénéfique du recyclage sur l'empreinte environnementale. Ce résultat est cohérent avec le fort poids relatif des activités de l'amont du cycle du combustible sur l'empreinte environnementale, et le fait que le recyclage conduit à diminuer les activités de l'amont du cycle au profit des activités de recyclage moins polluantes.

En revanche, augmenter le recyclage conduit à accroître les rejets radioactifs atmosphériques (gaz rares) ou liquides dont il a été démontré qu'ils n'avaient pas d'impact radiologique sur la santé des populations les plus exposées,

restant toujours de l'ordre de 0,1 % de la radioactivité naturelle.

Le recyclage conduit évidemment à une réduction des besoins de stockage géologique profond. Alors que le volume total des déchets reste à peu près inchangé, le type de déchets est modifié: il y a une diminution des déchets de haute activité (rouge) et un accroissement des déchets à vie longue de moyenne activité (vert). Le recyclage de l'uranium et du plutonium permet ainsi de réduire la surface et le volume du stockage en réduisant les volumes de déchets HAVL thermiques et ce pour un volume total de déchets à peu près constant. La mise en œuvre du multirecyclage du plutonium et des cycles de 4^e génération ne modifie pas considérablement cette situation alors qu'en revanche, la mise en œuvre éventuelle du recyclage de l'américium permettrait un nouveau gain substantiel en termes de surface et volume du stockage.

Sachant que le coût d'excavation d'un stockage géologique profond est un poste important du coût d'un stockage, le recyclage pourrait permettre un gain sur le coût attendu du stockage géologique profond. Par ailleurs, un stockage de surface donné (comme sur le site de Meuse/Haute-Marne) pourrait être utilisé

beaucoup plus longtemps avant d'être saturé puisque le recyclage permettrait de réduire la surface utilisée de 40 % pour une même quantité d'électricité. Recycler est donc aussi un moyen de préserver la ressource « stockage géologique profond » dont la complexité de mise en œuvre technique et politique démontre tous les jours la rareté et donc le coût intrinsèque.

POUR CONCLURE

Les systèmes énergétiques du futur devront répondre à des critères de durabilité s'ils veulent être compétitifs et acceptés par le public, et prendre une place effective dans les mix énergétiques. Ils devront démontrer leur contribution à la préservation de l'environnement et des ressources naturelles. En raison de ses très faibles émissions de gaz à effet de serre, l'énergie nucléaire présente un fort potentiel pour contribuer à atténuer le changement climatique mondial.

Au-delà de ce résultat bien connu, notre étude démontre que la contribution de l'électronucléaire va encore plus loin et permet aussi de réduire l'impact global de la production d'énergie sur l'environnement, avec d'autant plus d'efficacité que les matières nucléaires présentes dans les combustibles usés sont recyclées.

Un tel choix est la base d'un développement durable des systèmes électronucléaires de demain. Il nécessite de disposer de procédés industriels performants et propres de séparation des actinides qui sont pour une grande part disponibles, et des nouveaux réacteurs capables de consommer plus efficacement l'uranium naturel, en l'occurrence des réacteurs à neutrons rapides.

À très long terme, de tels réacteurs devraient être capables de produire de l'électricité à partir des seuls stocks existants d'uranium appauvri et de plutonium recyclé, supprimant ainsi les activités de l'amont du cycle qui portent une grande part de l'impact environnemental global.



MIEUX QUE LE BOUCHE À OREILLE POUR VOUS FAIRE CONNAÎTRE

La Revue Générale Nucléaire vous permet de toucher tous les publics – entreprises de la filière, grands acteurs institutionnels publics, chercheurs, étudiants et ingénieurs – concernés par son domaine d'expertise : de l'énergie à la médecine. Diffusée sur abonnement tous les deux mois à 2 000 exemplaires, le tirage de la RGN varie à l'occasion de séminaires ou salons et selon les besoins de l'actualité.

Être publié dans la RGN, c'est l'assurance de faire connaître sa marque, son entreprise ou ses projets dans un environnement scientifique et technique unique.



Publireportage ou insertion publicitaire,
2 façons de faire parler de vous dans la **RGN**

Pour tout renseignement et toute demande de publiereportage ou d'insertion publicitaire, contactez **Alison Blondiau** au **01 84 24 00 57**, **pub-rgn@grouperougevif.fr**. N'hésitez pas à la contacter si vous ne disposez pas d'annonce presse ou si vous souhaitez la mise à disposition d'un journaliste pour réaliser votre publiereportage.



Société
Française
d'Énergie
Nucléaire

Changement climatique : quelles conséquences en France en 2050 ?

10 jours

jusqu'à de canicule par an dans la capitale

-10%
de précipitations
estivales

Les sécheresses plus
intenses et plus fréquentes
conduisent à un déficit en
eau de 2 milliards de m³/an

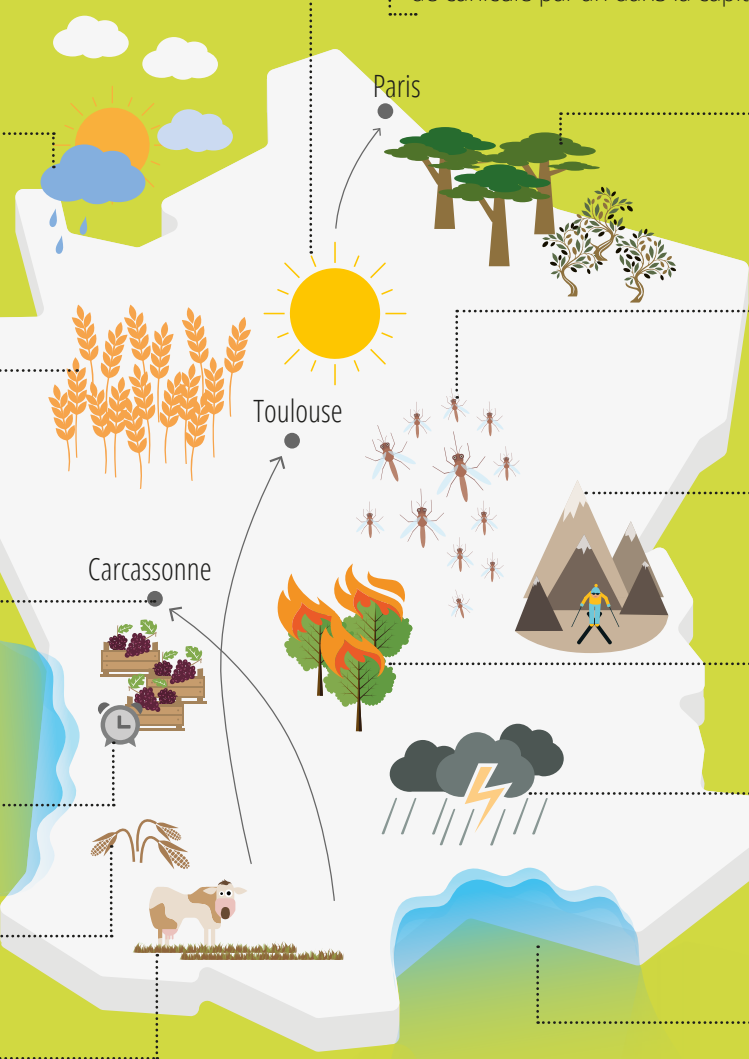
Le rendement
des céréales
s'améliore dans le Centre
et le Nord

Le climat à Poitiers
correspondra au climat actuel
de Carcassonne
Le climat à Orléans
correspondra au climat actuel
de Toulouse
Le climat à Lille
correspondra au climat actuel
de Paris

Les vendanges
sont avancées à la mi-août

Le rendement
du maïs
chute dans le Sud

Les prairies
de moyenne montagne sont
moins productives
pour nourrir les troupeaux



Des pins parasols
et des oliviers
poussent dans les Ardennes
Les forêts de hêtres
disparaissent

Les moustiques
remontent vers le Nord,
vecteurs de maladies

Moins de neige
en basse montagne.
Chaque degré de réchauffement
repousse de 150 m l'altitude
d'enneigement.

Les stations de ski
les plus basses sont privées
de neige

Les feux de forêt
se déplacent vers le Nord

Des épisodes cévenols
plus fréquents et plus violents
La Fédération française des sociétés
d'assurance estime à 13 milliards
d'euros l'indemnisation des
dommages matériels liés à la
fréquence accrue des événements
naturels extrêmes d'ici 2030.

L'élévation
du niveau de la mer
fait reculer les plages, impliquant
plusieurs milliards d'euros
de patrimoine



+ 0,6 à + 1,3° C
sur toute la France

Jusqu'à **+ 3,5° C**
dans le Sud Est de la France en été



— de vagues de froid
↗ de 30 % des besoins de chauffage
dans les Alpes

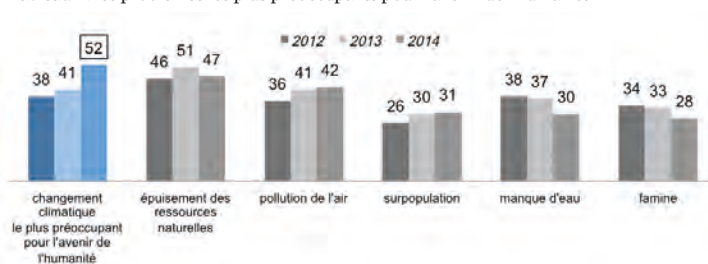


+ de vagues de chaleur
↗ de 100 % des besoins en climatisation
dans le Sud

Où en sont les Français avec le changement climatique ?

Par **Didier Witkowski**, Directeur Études et Veille, EDF.

Tableau 1: les problèmes les plus préoccupants pour l'avenir de l'humanité



Dans les sondages¹, l'environnement ne fait plus partie des préoccupations majeures des Français depuis au moins 2011, tant ils sont inquiets des conséquences d'une crise économique dont ils ne voient pas la fin. Pour autant, l'environnement reste un sujet de vigilance et il reprendra sans doute des couleurs si la crise économique s'apaise. Le changement climatique est un bon exemple de cette capacité de rebond: perçu comme affaibli, voire décrédibilisé depuis Copenhague. Il occupe aujourd'hui la première place des périls graves pour l'avenir de l'humanité aux yeux des Français, avant celle qui était hier prépondérante: l'épuisement des ressources naturelles². Le regain d'attention des médias sur le sujet fin 2014, un an avant la COP21, y a sans doute contribué. Le changement climatique est un péril grave, et qui est déjà à l'œuvre (93 % le pensent, dont 58 % certainement). Cette idée s'est même renforcée en 2014 et n'est plus l'apanage des électeurs de sensibilité écologiste.

LES CLIMATO-SCEPTIQUES MINORITAIRES EN FRANCE

L'existence du réchauffement est donc de moins en moins contestée et l'origine humaine du phénomène est l'explication majoritaire en France. Fin 2014, 63 % des Français pensaient que l'activité humaine est en cause. « L'effet Copenhague » ou les polémiques connexes ont certes induit une forte évolution de l'opinion entre 2010 et 2011 défavorable à l'origine humaine. Mais cette évolution se résorbe depuis, sans retrouver toutefois les niveaux de 2006. De fait,

les climato-sceptiques restent une forte minorité (36 %)³. Des clivages forts sont à l'œuvre. Les Français de droite sont plus sceptiques que ceux de gauche (respectivement 58 % et 69 % pensent que le changement est provoqué par l'activité humaine), les agriculteurs également plus circonspects que les cadres supérieurs et professions libérales (49 % contre 71 %). Et surtout, les plus de 65 ans ne sont que 54 % à croire à l'origine humaine, contre environ 65 % des autres classes d'âge.

LA COMPRÉHENSION DU PHÉNOMÈNE N'A PAS PROGRESSÉ DEPUIS 15 ANS

Depuis l'année 2000, l'ADEME réalise chaque année en juin une enquête par sondage sur les représentations sociales de l'effet de serre et du changement climatique⁴. Les interviewés y ont la possibilité de répondre librement à cette question ouverte: en quoi consiste, selon vous, l'effet de serre? En quinze

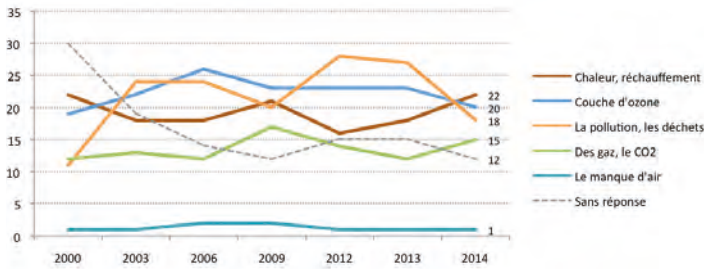
ans, la médiatisation des phénomènes climatiques a permis à un plus grand nombre de personnes de saisir le sens même de la question du réchauffement: de 30 % de sans réponse en 2000, on passe à 12 % en 2014. Néanmoins, peu de Français semblent comprendre le mécanisme de l'effet de serre, qui reste attribué à la diminution de la couche d'ozone, à la pollution ou à un « réchauffement » sans cause de l'atmosphère, facteurs d'explication majoritaires et très stables jusqu'à aujourd'hui, les explications fondées sur le CO₂ n'ayant pas progressé. On aurait tort, toutefois, de trop se focaliser sur cette incompréhension du mécanisme de l'effet de serre, car elle n'est ni un obstacle à la prise de conscience du péril climatique, ni un écran à une vision assez réaliste des activités humaines impliquées dans le phénomène. Ainsi, dans l'enquête ADEME où une question est consacrée aux sources du réchauffement, les activités industrielles, les transports et la destruction des forêts ►

Tableau 2: les origines du changement climatique selon les Français

	RAPPEL 2006	RAPPEL 2007	RAPPEL 2009	RAPPEL 2010	RAPPEL 2011	RAPPEL 2012	RAPPEL DÉC. 2012	RAPPEL DÉC. 2013	DÉC. 2014
Un phénomène provoqué par l'activité humaine	66	66	61	63	53	57	59	59	63
Un phénomène naturel comme la Terre en a toujours connu dans son histoire	18	16	23	21	24	22	20	20	19
On ne peut pas le dire	15	18	16	16	21	21	20	20	17
Ne se prononcent pas	1	0	1	0	2	0	1	1	1
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

1. Voir par exemple « Les ménages français face à l'efficacité énergétique de leur logement en 2013 », enquête TNS-Sofres pour l'ADEME auprès de 10000 ménages, réalisée en janvier 2014. **2.** Baromètre Image des énergies, enquête réalisée pour EDF par CSA auprès d'un échantillon national de 2020 personnes âgées de 18 ans et plus, entre le 4 et le 20 décembre 2014. **3.** Avec une formulation légèrement différente, l'enquête TNS-Sofres de 2013 pour le ministère de l'Écologie conclut à la même proportion de climato-sceptiques: 35 %. Voir Chiffres et statistiques n°440, Commissariat général au développement durable, août 2013. **4.** De 2000 à 2014 quinze enquêtes ont été réalisées. Jusqu'en 2013, elles ont été réalisées par téléphone auprès de 1000 Français; la dernière vague de 2014 a été réalisée *online* par Opinion-Way auprès d'un panel de 1548 internautes âgés de 15 ans et plus, du 20 juin au 7 juillet 2014, avec les critères habituels de représentativité (sexe, âge, PCS, catégorie d'agglomération et région).

Tableau 3: Les évocations spontanées de l'effet de serre (regroupements) de 40 et 60 ans.



apparaissent comme les principaux accusés. Qu'ils le soient au nom de la « pollution » et non du CO₂ importe finalement assez peu: le diagnostic final est correct.

Il y a un cas où le flou entourant le CO₂ est un handicap: c'est le cas des centrales nucléaires. On voit bien que, si elles sont citées parmi les fautifs, elles le sont à un niveau moindre que l'industrie ou les transports, et surtout moins que les centrales électriques en général (si on compare avec la formulation retenue dans l'enquête jusqu'en 2013⁵). Cela signifie-t-il que les Français ont intégré que le nucléaire ne produit pas de CO₂? Ils sont en réalité très partagés: 45 % pensent qu'il en produit, contre 48 % qu'il n'en produit pas⁶. Néanmoins, même s'il ne s'agit que d'un Français sur deux, ce taux permet sans doute au

nucléaire d'être un peu plus épargné. Dans ce contexte de remobilisation de l'opinion sur le changement climatique, le nucléaire peut-il tirer parti du fait qu'il ne produit pas de gaz à effet de serre pour s'attirer de nouveaux soutiens? Rien n'est moins sûr.

LA DIFFICILE ÉQUATION CO₂/NUCLÉAIRE

Actuellement, l'énergie nucléaire n'arrive pas à transformer en atout maître l'absence d'émission de gaz à effet de serre. D'une part parce que cet atout ne fait pas consensus, on l'a vu; d'autre part parce que cette caractéristique n'est pas totalement opérationnelle dans le cadre d'un débat sur le changement climatique (l'ignorance du mécanisme CO₂). Aujourd'hui, la crainte d'un accident nucléaire et le problème des

déchets demeurent des menaces plus graves que la production de carbone, quand bien même le changement climatique inquiète. Dans leur majorité, les Français ne veulent pas se passer du nucléaire, ils croient d'ailleurs de moins en moins que cela soit possible. Néanmoins, ils adhèrent à l'idée d'une décroissance du nucléaire de 75 % à 50 % en 2025, ce qui montre bien qu'une large partie de l'opinion n'est pas mûre pour adhérer à l'idée que le nucléaire est une des solutions pour lutter contre le changement climatique.

Une amélioration de la connaissance du public est-elle un levier possible en faveur du nucléaire? C'est peu probable. Il découle de nos analyses du Baromètre Énergies que les personnes les plus sensibles au réchauffement sont plutôt hostiles au nucléaire et pensent davantage que le nucléaire produit du CO₂. À l'inverse, on constate que les pro-nucléaires sont plus sceptiques sur l'origine humaine du réchauffement (Tab. 5).

En fait, il faut bien admettre que pour l'opinion, la question de la production de CO₂ n'est pas perçue comme un fait indiscutable. Si c'était le cas, les antinucléaires pourraient reconnaître que le nucléaire ne produit pas de CO₂ tout en conservant leurs convictions.

Dans le tableau 6, on a comparé

les pourcentages de réponses « le nucléaire ne produit pas de CO₂ » dans quatre catégories d'interviewés, créées par le croisement de deux critères: le fait d'être pour ou contre le nucléaire, et le fait d'avoir des connaissances faibles ou élevées sur l'énergie (mesurées objectivement avec un quiz).

Le constat est clair: on observe qu'à niveau de connaissance égal, y compris lorsque les connaissances sur l'énergie sont élevées, le fait d'être pour ou contre le nucléaire influence les réponses alors qu'il s'agit d'un fait scientifique (17 points d'écart). La connaissance joue également son rôle: à conviction égale, pour ou contre le nucléaire, une meilleure connaissance joue en faveur de la bonne réponse (30 points d'écart en moyenne). Mais les deux variables se cumulent presque parfaitement. En réalité, une partie des antinucléaires perçoit le CO₂ comme un argument pro-nucléaire de plus, pas comme une vérité indiscutable. Donc, il faut bien admettre que connaissances et convictions se combinent pour produire des effets qui ne sont pas « chimiquement purs ». Et en aucun cas il n'y a d'effet mécanique entre l'accroissement des connaissances et le changement d'opinion. Si l'argument CO₂ n'est avancé que par les défenseurs du nucléaire, alors il devient suspect.

Tableau 4: les causes de l'effet de serre selon les Français

Question. Pour chacune des activités suivantes, dites-moi si d'après ce que vous savez elle contribue beaucoup, assez, peu ou pas du tout à l'effet de serre (Réponse « beaucoup » + « assez »)

	LES ACTIVITÉS INDUSTRIELLES	LES TRANSPORTS	LA DESTRUCTION DES FORÊTS	LES BOMBES AÉROSOLS	LE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS	LE TRAITEMENT DES DÉCHETS	LES CENTRALES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	LES CENTRALES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ AU GAZ AU CHARBON OU AU FUEL	LES CENTRALES NUCLÉAIRES	L'AGRICULTURE ET L'ÉLEVAGE	L'ACTIVITÉ VOLCANIQUE
2014	88	85	88	75	75	74	-	91	53	66	36
2013	90	88	89	73	72	70	64	-	61	59	36
2010	90	88	90	70	70	69	64	-	61	59	42
2007	93	92	89	75	71	69	59	-	56	50	31
2004	90	88	87	73	58	70	62	-	63	41	28
2001	89	87	84	67	46	67	52	-	61	39	33
2000	85	83	79	64	39	57	60	-	59	33	30

5. La formulation de cet item a changé en 2014: l'Ademe a ajouté « au gaz, au charbon ou au fuel », ce qui a provoqué une augmentation artificielle de cet item (ces combustibles ont une image de polluants) et empêche toute comparaison avec les années précédentes. 6. Baromètre Image des énergies 2014, op.cit..

Tableau 5: opinion sur le nucléaire et conviction sur le changement climatique

Pensent que le changement climatique est avant tout provoqué par l'activité humaine	OPINION SUR LE NUCLÉAIRE				
	ENSEMBLE	Vraiment contre	Plutôt contre	Plutôt pour	Vraiment pour
	63%	75%	71%	58%	42%

Tableau 6 : l'influence respective des connaissances et des convictions sur la crédibilité d'un fait scientifique. Pourcentage de réponses « le nucléaire ne produit pas de CO₂ »

	SONT CONTRE LE NUCLÉAIRE	SONT POUR LE NUCLÉAIRE
Ont peu de connaissances sur l'énergie	21	44
Ont des connaissances élevées sur l'énergie	54	71

Lecture : 21 % de ceux qui sont contre le nucléaire et ont peu de connaissances sur l'énergie, pensent que le nucléaire ne produit pas de CO₂.

DES FRANÇAIS DE MOINS EN MOINS OPTIMISTES SUR LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Alors même que le péril climatique paraît de plus en plus aigu aux yeux des Français, un certain fatalisme semble s'installer.

Devant l'inaction de la communauté internationale, d'abord. La confrontation avec le changement climatique est perçue de plus en plus inéluctable sans que cela modifie le degré de confiance – dans un sens ou dans l'autre – à l'égard de la capacité de l'humanité à réagir efficacement. Depuis que la question est posée (2006), ce rapport reste du même ordre et n'a pas évolué après Copenhague : environ 40 % sont plutôt confiants, 60 % pas vraiment. Scepticisme aussi vis-à-vis de leur propre capacité d'action. Depuis trois ans, une majorité de Français (58 %) estime que les gestes individuels que l'on peut faire pour lutter contre l'effet de serre ne sont pas efficaces. Le scepticisme est plus fort chez les personnes de plus de 55 ans (62 %) mais il n'est pas absent chez les moins de 35 ans (48 %).

Dans l'enquête ADEME, on propose aux interviewés de choisir leur solution préférée entre quatre, pour lutter contre l'effet de serre. Peu de Français (11 %) croient que le progrès technique permettra de trouver

des solutions pour lutter contre l'effet de serre, sans doute à cause de l'ampleur disproportionnée du phénomène. Sont aussi minoritaires les fatalistes qui pensent qu'il n'y a rien à faire, qui sont certes deux fois plus nombreux qu'en 2006, mais qui ne dépassent guère 12 %.

L'idée que c'est aux États de réguler le réchauffement climatique à l'échelle mondiale n'a jamais séduit plus de 25 % des Français depuis 2006 (19 % en 2014), Copenhague n'ayant d'ailleurs pas particulièrement joué sur cette opinion.

C'est bien la modification des modes de vie qui apparaît comme l'option la plus crédible. Elle est partagée par 57 % des Français et progresse de nouveau depuis 2012.

On aurait tort toutefois de prendre pour argent comptant la posture majoritaire du changement de mode de vie. Pour essayer d'entrer dans le concret des comportements et déjouer les déclarations d'intention sans valeur, l'enquête ADEME a tenté de distinguer entre des actions qui pourraient réduire les émissions de gaz à effet de serre, que le public a déjà adopté ou pourrait adopter plus ou moins facilement, et des inflexions de comportement plus difficiles, souvent pour des raisons d'impossibilité pratique.

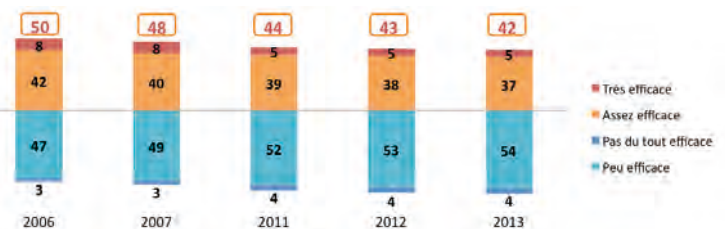
À l'examen des réponses, on constate que les réticences sont

plus fortes lorsque les comportements prescrits :

- › ont un coût pour le consommateur (les taxes, notamment, sont très mal acceptées) ;
- › ont une justification environnementale floue : la limitation de la consommation de viande apparaît sans doute comme une bonne pratique pour la santé (déjà pratiquée par 46 %), mais le lien avec le climat est ténu ; la résistance est donc plus élevée ;
- › se heurtent à des impossibilités pratiques : ainsi c'est dans le domaine des transports que les réticences sont les plus fortes : prendre les transports en commun ou utiliser le vélo plutôt que la voiture, voire faire du covoiturage, est difficile ou irréaliste pour un Français sur deux ; chez les utilisateurs quotidiens de la voiture, 75 % n'envisagent pas de l'abandonner.

Finalement, la confrontation entre les intentions et les comportements est assez cruelle : les actions les moins contraignantes sont évidemment plébiscitées, mais dès que l'on aborde la question des transports, levier le plus important de la lutte contre le CO₂, ou la fiscalité écologique, les réticences sont fortes. La question de l'habitat pavillonnaire, testé dans l'enquête et que les interviewés ne veulent abandonner à aucun prix, est sans doute le meilleur exemple d'un changement de mode de vie qu'en réalité peu de Français sont prêts à assumer.

Tableau 7 : le jugement des Français sur l'efficacité des gestes individuels
Question : d'après vous, les gestes que chacun peut faire à titre individuel pour lutter contre l'effet de serre (changement climatique) sont-ils :
(source Ademe)



Le vieillissement des internes de cuve. Programme de recherche en support à la durée de fonctionnement des réacteurs REP

Par **Benoit Tanguy** - DEN/DANS/DMN/SEMI/CEA Saclay, **Faiza Sefta** - EDF R&D Les Renardières,
Pierre Joly - Engineering and Project/AREVA



en substance...

Cet article vise à donner un aperçu non exhaustif du programme de recherche collaboratif sur le vieillissement des matériaux des internes de cuve mené dans le cadre de l'Institut tripartite CEA, EDF et AREVA. Les différents phénomènes de vieillissement, identifiés ou potentiels sont décrits. La méthodologie générale mise en œuvre pour identifier puis conduire les actions de R&D est donnée. Enfin, les programmes liés à certains phénomènes sont décrits de façon plus détaillée. On s'intéressera notamment à l'IASCC, au fluage sous irradiation et au gonflement.

Les aciers inoxydables austénitiques, en raison de leur propriété de résistance à la corrosion sont très utilisés pour les éléments de structures des réacteurs nucléaires soumis à un milieu chimiquement agressif. Différentes nuances de ces aciers sont largement employées dans les réacteurs à eau légère (REL) constituant la majorité du parc nucléaire mondial. Elles sont aussi envisagées pour des systèmes futurs, comme ITER, où les aciers seront potentiellement soumis à des conditions de fonctionnement plus sévères (température, flux, dose, pression). Dans les réacteurs à eau pressurisée (REP), les structures d'internes inférieurs (figure 1) portent le poids du cœur, maintiennent en alignement les assemblages combustibles, les grappes de commande et l'instrumentation, canalisent l'écoulement du fluide caloporteur et protègent la

cuve contre les rayonnements émis par l'irradiation.

Au cours du fonctionnement du réacteur, les structures d'internes inférieurs – en aciers inoxydables austénitiques 304L hypertrempe (18 % Cr, 10 % Ni) pour les cloisons et renforts et en 316 écroui (17 % Cr, 11 % Ni, 2,5 % Mo) pour les cloisons et renforts – sont soumises à la combinaison des rayonnements neutroniques et de températures élevées (300 à 370 °C). Pour une durée d'exploitation de 40 ans, ces structures auront subi des doses de plusieurs dizaines de dpa (déplacement par atome) (tableau 1).

L'irradiation neutronique des aciers inoxydables austénitiques dans le domaine de fonctionnement des REP (température, dose, flux...) provoque une évolution microstructurale et une évolution des propriétés mécaniques. Par ailleurs,

Tableau 1: caractéristiques d'irradiation (temp, dose) pour les différents composants d'internes pour des durées d'exploitation de 40 et 60 ans.

Composant	Matériau	Température (°C)	Dose à 40 ans* (dpa)	Dose à 60 ans** (dpa)
Vis de liaison cloison-renfort	316 écroui et 316L écroui (17%Cr-11%Ni-2.5%Mo)	~300 - 350	jusqu'à ~80	max 120
Plaques de cloisonnement		~300 - 350	jusqu'à ~80	max 120
Renforts	304L hypertrempe 18% Cr-10% Ni	~300 - 350	jusqu'à ~50	max 75
Enveloppe de cœur		~300	jusqu'à ~10	max 15
Soudures enveloppe de cœur	308 L soudure	~300	jusqu'à ~10	max 15

* Valeurs calculées pour 40 ans d'exploitation avec un facteur de charge de 80%.

** Estimation de la dose à partir de la dose à 40 ans.

l'exposition à un environnement corrosif (fluide primaire) combinée aux modifications microstructurales du matériau par l'irradiation entraîne une sensibilité à la fissuration par corrosion sous contrainte dite « assistée par l'irradiation » (IASCC) qui affecte essentiellement les vis de cloison du palier CP0. Le gonflement sous irradiation qui pourrait résulter de la formation de nano-cavités est un dommage potentiel qu'il est important de maîtriser dans la perspective d'une durée d'exploitation au-delà de 40 ans.

Les structures d'internes sont des composants « remplaçables », cependant compte tenu de leur fonction de sûreté qui doit être maintenue en permanence, et de la difficulté liée au remplacement de l'ensemble des internes, l'évaluation du comportement sous irradiation des internes inférieurs est un enjeu économique majeur pour le parc nucléaire.

Le vieillissement des internes de cuve doit être géré pour optimiser l'exploitation du réacteur et

minimiser le nombre et la durée des arrêts pour maintenance.

Le projet de recherche collaboratif dédié « Internes de cuve » entre EDF, AREVA et le CEA permet l'acquisition des connaissances sur les mécanismes de vieillissement des matériaux des internes inférieurs sous irradiation en conditions REP (ensemble cloison-renfort pour les paliers 900 et 1300 MWe et réflecteur lourd pour l'EPR), sur les effets de ce vieillissement sur les propriétés des matériaux et sur ses conséquences en termes de dégradations. D'autres programmes nationaux et internationaux (programmes européens PERFECT, PERFORM-60 [1] avec des travaux plus amont) complètent la compréhension des mécanismes de vieillissement de ces matériaux.

Le projet « Internes de cuve » vise à apporter des éléments pour alimenter les dossiers de sûreté analysant la durée de vie des internes de cuve REP et les dossiers nécessaires à la démonstration de l'aptitude des composants principaux à assurer leur fonction jusqu'à la

VD4 + 20 ans pour les paliers 900, 1300 MWe et N4. Pour cela, le projet contribue à l'amélioration de la connaissance des mécanismes de dégradation sous irradiation et à l'acquisition de données matériaux :

- › en menant des actions de compréhension des mécanismes de dégradation des matériaux dus à l'irradiation (évolution microstructurale des matériaux irradiés, IASCC, gonflement, durcissement, fluage d'irradiation...);
- › en améliorant les lois de comportement des aciers inoxydables austénitiques irradiés et sous irradiation nécessaires pour les calculs élasto-plastique de la structure;
- › en améliorant le critère de fissuration par IASCC fonction des paramètres de fonctionnement (température, dommage d'irradiation, contrainte...);
- › en étant présent dans les programmes expérimentaux internationaux et en menant une veille scientifique.

Figure 1: structures des internes de cœur en acier inoxydable austénitique dans un réacteur REP.
a) Vue générale du réacteur, b) Renforts et cloisons en 304L hypotempéré, c) Vis de liaison renfort/cloison en 316 écroui.

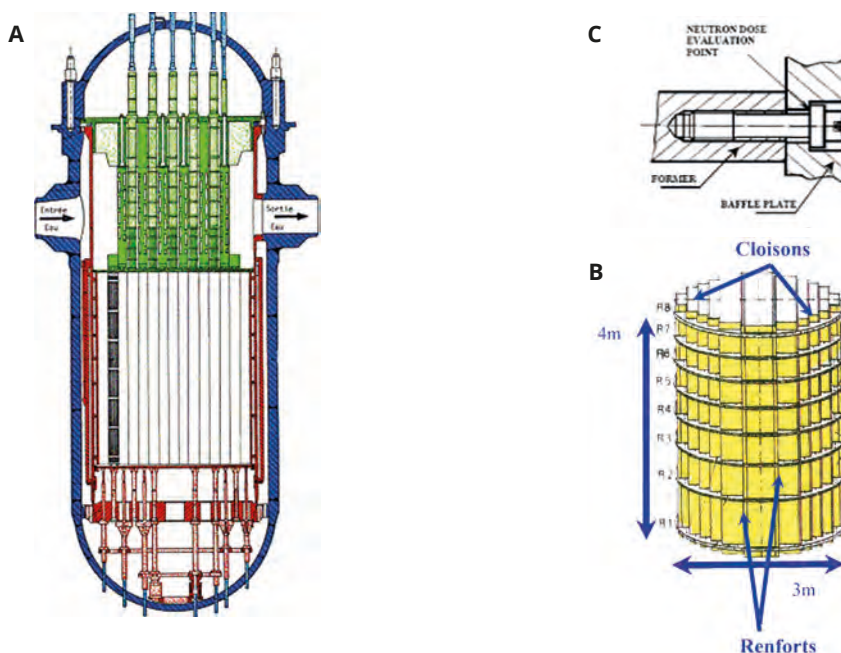
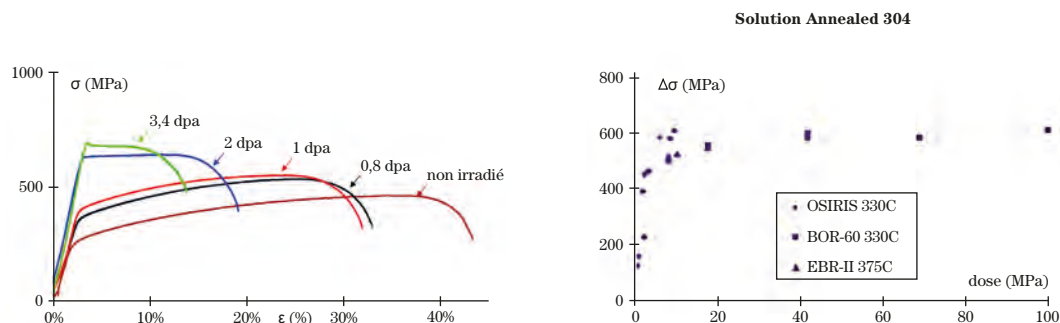


Figure 2: évolution des propriétés de traction avec la dose pour une nuance 304 état hypertrempe irradiée et testée à 330°C [9] et saturation du durcissement au-delà de 10-20 dpa [10].



**PHÉNOMÈNES
DE VIEILLISSEMENT
SOUS IRRADIATION
DES MATÉRIAUX D'INTERNES
DE CUVE**

Les matériaux d'internes de cuve sont des aciers austénitiques inoxydables de structure cubique à faces centrées. D'une manière générale, l'irradiation provoque un durcissement par une augmentation de la limite d'élasticité, et une diminution de la ductilité des aciers austénitiques (figure 2).

Pour les faibles doses, jusqu'à une dizaine de dpa, et dans le domaine de température d'intérêt (290 °C-350 °C), le matériau montre une forte augmentation de la limite d'élasticité s'accompagnant d'une perte marquée de ductilité. Au-delà de 10 dpa, une saturation de ces effets est observée. La forte diminution de la ductilité due à l'irradiation a une implication significative sur la diminution de la ténacité dans les aciers austénitiques.

Le durcissement résulte de la création d'amas de défauts sous irradiation (boucle de dislocations, précipités, cavités...) qui font obstacle au mouvement des dislocations. La contrainte à exercer pour assurer la mobilité des dislocations augmente.

Pour les aciers inoxydables austénitiques, aux températures d'irradiation rencontrées dans les REP, les principaux défauts sont les boucles de dislocations interstitielles, les cavités (et/ou bulles de gaz) et la précipitation induite par l'irradiation (notamment de type Ni₃Si). Les mécanismes de plasticité sont

également affectés avec la formation de canaux de localisation de la déformation appelés bandes claires. Sous flux neutronique, bien que ces matériaux ne soient pas ou peu sensibles au fluage thermique (déformation dépendante du temps pour une contrainte inférieure à la limite d'élasticité) aux températures d'intérêt, le phénomène de fluage d'irradiation apparaît.

Ces caractéristiques sont très différentes de celles du fluage thermique avec un exposant de la contrainte proche de l'unité et une faible dépendance en température. Il existe différents régimes de fluage sous irradiation : après un régime transitoire de courte durée (autour de 1 dpa), le matériau entre dans un régime stationnaire ou la déformation de fluage est proportionnelle à la dose et à la contrainte.

Il est connu que l'apparition du gonflement observée à plus hautes températures dans les irradiations dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR) conduirait au troisième régime caractérisé par une accélération de la cinétique de fluage.

Bien que les données expérimentales soient disponibles et intégrées dans le paramétrage des lois matériaux utilisées pour les calculs des contraintes mécaniques dans les structures d'Internes, les mécanismes du fluage d'irradiation induits par les défauts ponctuels ne sont pas entièrement établis.

Le plus classique des mécanismes avancés est le fluage APIC (montée des dislocations par absorption préférentielle induite selon la

contrainte). Il a été montré récemment [2, 3] par la modélisation de ce mécanisme par la technique de la dynamique d'amas que les cinétiques obtenues de la déformation en fonction de la dose étaient très inférieures à celles mesurées expérimentalement, mettant ainsi en évidence qu'un autre mécanisme entre en jeu. À partir de la modélisation, la diffusion d'atomes interstitiels et de lacunes le long des joints de grain apparaît comme un mécanisme potentiel qui permet de reproduire le bon ordre de grandeur des cinétiques mesurées et leur sensibilité à la contrainte.

Le fluage par irradiation a pour principale conséquence une relaxation des contraintes au niveau des vis de liaison [4] et est donc susceptible d'améliorer le comportement à la corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation (IASCC) [5]. Ce phénomène, qui s'est traduit dans les REP majoritairement le palier 900 MW CPO, par une fissuration de quelques vis de liaison cloison-renfort (Figure 3), résulte d'un ensemble complexe de phénomènes affectant le matériau et les phénomènes d'oxydation résultant de l'exposition au fluide primaire encore incomplètement compris.

La ségrégation intergranulaire induite par l'irradiation (RIS - *Radiation Induced Segregation*) en modifiant la chimie des joints de grains, notamment par un appauvrissement en chrome et par un enrichissement en silicium a été identifiée comme un phénomène contribuant à la fragilisation

intergranulaire. Les profils de ségrégation évoluent avec l'augmentation de la dose. Cette ségrégation intergranulaire évolue rapidement jusqu'à des doses autour de 5 dpa puis sature ou augmente très lentement. L'apparition de ces différentes modifications de la microstructure (boucle de dislocation, RIS...) se produisant à des niveaux de fluence similaires, il est difficile de séparer leur contribution individuelle dans le mécanisme d'IASCC. De plus, d'autres facteurs influents pourraient apparaître pour des niveaux élevés de fluence. Enfin, il est possible que les effets de synergie entre les différents facteurs impliqués puissent évoluer en fonction du domaine de fluence considéré. Le retour d'expérience des études liées aux structures internes des réacteurs à neutrons rapides montre que la sursaturation des lacunes créée par l'irradiation peut conduire à la germination et à la croissance de cavités dont la signature macroscopique est une expansion volumique isotrope appelée gonflement. Ce phénomène est un phénomène à seuil : après une période d'incubation (phase de germination des cavités), le gonflement évolue linéairement avec la dose (phase de croissance des cavités). La dépendance du gonflement vis-à-vis de la dose, de la température, du flux de neutrons et de la quantité de gaz créée par l'irradiation fait que le REX des études sur les RNR ne peut être transposé aux REP. L'anticipation du phénomène de gonflement nécessite donc de conduire des irradiations en conditions représentatives de celle des REP et de développer des outils de simulations d'évolution de la microstructure à bases physiques permettant d'appréhender l'effet des différents paramètres d'irradiation et métallurgiques.

MÉTHODOLOGIE DES ÉTUDES DE R&D

Pour appréhender les phénomènes de vieillissement par irradiation liés aux internes, les études R&D s'organisent autour de trois axes que sont :

- (i) la détermination des conditions d'apparitions des phénomènes de dégradation,
- (ii) l'évaluation des effets des

phénomènes de vieillissement sur la tenue des composants internes, et

- (iii) la compréhension des mécanismes des phénomènes de vieillissement.

Le premier axe s'appuie sur l'analyse de REX des composants déposés et sur des irradiations en réacteurs expérimentaux. En France, le réacteur OSIRIS du CEA, dont le spectre d'irradiation est représentatif des REP est utilisé.

Pour atteindre des doses plus importantes, représentatives de 60 ans de fonctionnement REP pour certains composants (tableau 1), on utilise aussi des réacteurs à spectre rapide comme le réacteur russe BOR-60 qui permet d'anticiper grâce à un flux neutronique 10 fois plus important les phénomènes de vieillissement jusqu'à 120 dpa en quelques années.

L'intérêt de ces irradiations est la bonne maîtrise de leurs conditions neutroniques. Pour évaluer la représentativité des irradiations faites dans les RNR, on les confronte aux basses doses aux données obtenues à partir des irradiations provenant de REP ou d'OSIRIS.

Pour les structures d'internes, l'évaluation des effets du vieillissement sur la tenue des composants est évaluée à partir de calculs de structure qui s'appuient sur la loi de comportement du matériau fonction de l'irradiation [7] qui prend en compte l'effet du fluage d'irradiation et

du gonflement sur la déformation mécanique du composant.

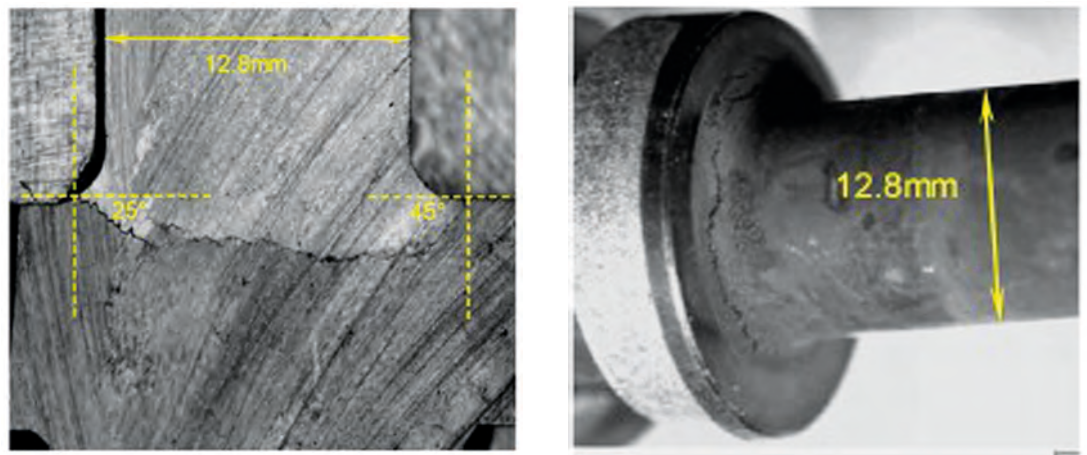
Dans le cas des vis de liaisons paroi-renfort, les contraintes résultantes au niveau des vis sont comparées à un critère empirique d'amorçage en IASCC établi à partir de nombreux essais, notamment dans les laboratoires chauds (LECI) du CEA Saclay [8].

Enfin, parallèlement à ces études qui alimentent pour chaque période décennale les dossiers de justification de fonctionnement de ces structures, des études de compréhension et de modélisation amont sont conduites pour, à terme, anticiper le vieillissement des matériaux de ces structures.

Ces études théoriques et expérimentales s'appuient sur des irradiations analytiques permettant d'étudier de manière isolée certains phénomènes et sur des observations fines de la microstructure d'irradiation avec des outils comme la microscopie électronique en transmission et la sonde atomique tomographique (SAT) qui permettent des échelles d'observation de l'ordre du nanomètre.

Enfin, il faut noter au niveau international et notamment européen avec les projets PERFECT et PERFORM-60 [1] du PCRD-7, un effort continu depuis une dizaine d'années pour développer des outils de simulation prédictifs des effets de l'irradiation sur les matériaux d'internes et de cuve à différentes échelles.

Figure 3: illustration de la fissuration de vis de liaison renfort-paroi par IASCC [6].



**PROGRAMMES D'ÉTUDES
DES PHÉNOMÈNES
DE DÉGRADATION**

Cette partie est dédiée à une description plus détaillée mais non exhaustive des programmes de recherche en support à la durée de fonctionnement des réacteurs REP. On s'intéresse à l'IASCC, au fluage sous irradiation et au gonflement.

Fluage sous irradiation

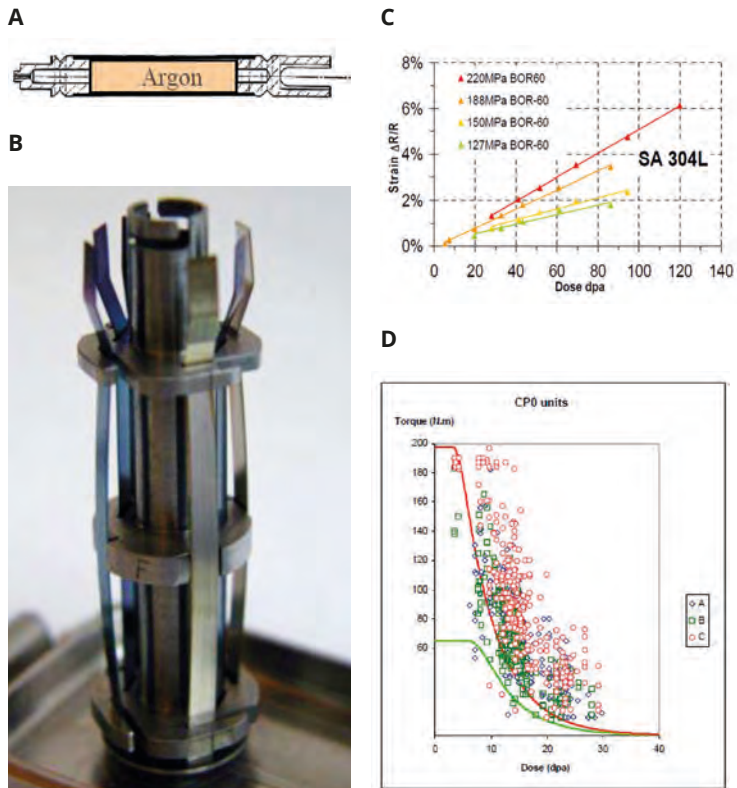
Sous flux neutronique, soumis à une charge inférieure à la limite d'élasticité, les aciers d'internes montrent une déformation qui évolue avec le temps, alors qu'ils ne sont pas ou peu sensibles au fluage thermique pour ces températures (290 °C-350 °C). Pratiquement, le REX montre une diminution du couple de serrage des vis avec la dose [4] qui traduit l'apparition sous flux neutronique du phénomène de fluage d'irradiation. La connaissance des lois gouvernant les cinétiques de fluage sous irradiation (on parle dans le cas des vis de relaxation sous irradiation, la déformation des vis étant imposée lors du serrage initial) est particulièrement importante pour pouvoir évaluer, en fonction de la dose, la fonctionnalité des vis et pour pouvoir évaluer en fonction de la dose le niveau de contrainte auquel est soumis le composant.

Ce niveau de contrainte sera utilisé, notamment pour évaluer la situation des vis vis-à-vis d'un amorçage par IASCC. Un premier programme de recherche a été conduit pour quantifier l'évolution du fluage d'irradiation selon la dose pour des contraintes entre 127 et 220 MPa. Pour cela, des tubes pressurisés (figure 4a) ont été irradiés dans trois réacteurs, deux RNR et OSIRIS (spectre mixte) à des doses entre 10 et 120 dpa. La mesure de l'évolution diamétrale des tubes avec la dose (figure 4c) a permis de valider le type de loi de fluage $\epsilon = A_1(\sigma\phi - \eta)$ (pour $\sigma\phi > \eta$ ou σ est la contrainte, ϕ la dose, η la dose d'incubation et A_1 une constante qui dépend du matériau et du flux) et d'en déterminer les paramètres.

Il a ainsi été montré

- (i) une différence significative des cinétiques de fluage

Figure 4: étude expérimentale du fluage d'irradiation. a) tube pressurisé permettant d'obtenir une contrainte appliquée constante, b) bobines avec des lames en flexion, c) Résultats de mesure sur tubes pressurisé à différents niveaux de contraintes, d) mesures expérimentales de couple de desserrage des vis de liaison paroi-renfort en fonction la dose et comparaison avec la modélisation (traits continus pour un couple initial minimum et maximum).



d'irradiation entre le 316 écroui (vis) et le 304 hypertrempe (paroi, renfort), le dernier fluant plus rapidement;

- (ii) la présence d'une dose d'incubation.

Ce modèle a été utilisé avec un accord satisfaisant pour évaluer l'évolution des couples de serrage avec la dose lors d'une campagne de remplacement de vis sur trois réacteurs REP français (figure 4d) confirmant que l'évolution des couples de serrage des vis est liée au fluage d'irradiation. Actuellement, un second programme est en cours dans le réacteur OSIRIS pour des niveaux de contrainte plus élevés obtenus à partir de lame en flexion (figure 4b).

Gonflement

Le REX actuel des expertises de composants REP déposés [6, 11]

montre que les évolutions microstructurales constatées sur ces composants ne conduisent pas à un gonflement macroscopique significatif. Toutefois, le gonflement induit par l'irradiation est considéré comme un phénomène potentiel pouvant limiter la durabilité de ces structures pour les fortes doses, essentiellement du fait des modifications dimensionnelles qui en seraient induites (gradient de gonflement entre différents composants).

Compte tenu des forts niveaux de fluence auquel le gonflement macroscopique est associé en réacteur à neutrons rapides, ce phénomène a été peu étudié expérimentalement en environnement REP. La plupart des études ont été menées dans les RNR où les conditions de température, de spectre neutronique et de doses reçues

sont plus propices au développement du gonflement.

L'évaluation du risque de gonflement en conditions REP pour des durées de fonctionnement de 60 ans a été entreprise par le programme expérimental international GONDOLE dans le réacteur OSIRIS dont les caractéristiques d'irradiation (spectre, température d'irradiation) sont proches de celles des REP.

Pour quantifier la présence significative de gonflement pour des forts niveaux de fluence d'intérêt et évaluer les cinétiques (fluence seuil, vitesse de gonflement), des plaquettes de matériaux vierges et pré-irradiés jusqu'à 80 dpa en conditions REP ont été placées dans le réacteur.

À l'issue de l'irradiation, qui aura duré plus de 9 ans permettant d'accumuler plus de 30 dpa dans le réacteur dans des conditions d'irradiations bien connues, l'évaluation du gonflement macroscopique sera basée sur des matériaux avec des doses comprises entre 30 et 110 dpa. Plusieurs nuances d'aciers inoxydables austénitiques avec différents états métallurgiques (hypertrempé et écroui) et avec différents teneurs en éléments d'addition chimiques ont été mises en irradiation pour appréhender l'effet de ces éléments sur l'apparition d'un gonflement macroscopique.

Parallèlement à GONDOLE, des études de compréhension des mécanismes pouvant conduire à la formation et la croissance des amas lacunaires sont conduites. L'évolution de microstructure d'irradiation et spécifiquement des amas lacunaires et d'interstitiels est étudiée avec la modélisation de la dynamique d'amas qui permet de simuler la germination, la croissance et la coalescence des amas de solutés ou de défauts sur des temps comparables aux durées expérimentales.

Le code CRESCENDO, co-développé par le CEA et EDF, est utilisé pour appréhender l'effet de différents paramètres (flux, taux de gaz produit, température) sur le gonflement résultant des amas lacunaires (figure 5).

IASCC (FISSURATION SOUS CONTRAINTE ASSISTÉE PAR L'IRRADIATION)

La synergie des mécanismes impliqués dans l'endommagement par IASCC a conduit à définir une stratégie d'étude à plusieurs niveaux, au niveau expérimental et au niveau de la modélisation.

Au niveau expérimental, les études peuvent être classées en trois catégories :

- ▶ (i) essais de CSC *in situ* en réacteurs d'essais,
- ▶ (ii) essais de CSC post-irradiation sur matériaux irradiés aux neutrons,
- ▶ (iii) essais de CSC sur matériaux « représentatifs » ou « modèles ».

Ces derniers sont des matériaux susceptibles de représenter une des modifications microstructurales dues à l'irradiation telles que le durcissement, la ségrégation chimique intergranulaire ou la localisation de la déformation plastique.

La complexité et le coût des essais et de leur interprétation vont en diminuant de la première catégorie à la dernière. La première catégorie est la plus représentative des effets de synergie se produisant dans les réacteurs industriels, la représentativité de l'historique de chargement restant à ce jour le paramètre le moins reproductible.

Les études paramétriques sont généralement menées sur des matériaux « représentatifs ». De nombreuses études ont été faites sur des

matériaux de laboratoire avec une ségrégation artificielle ou sur des nuances industrielles avec un durcissement obtenu par écrouissage à froid, équivalent à ceux observés sur matériau irradié. Toutes ces études sont réalisées dans des boucles de corrosion qui simulent l'environnement du milieu pour les REP et/ou les REB.

La représentativité de la microstructure des aciers austénitiques inoxydables irradiés avec des particules énergétiques (protons, ions) vis-à-vis de celle obtenue par irradiation neutronique a permis ces dernières années, compte tenu de la faible activité des échantillons irradiés avec ces particules, le développement de nombreuses études paramétriques.

Elles ont notamment mis en évidence le rôle de la composition chimique initiale et du niveau des impuretés sur la ségrégation et le rôle de la localisation de la déformation plastique sur l'IASCC se produisant lors de sollicitations dynamiques post-irradiation en milieu REB [12].

Ces études, qui ont permis d'isoler des facteurs prépondérants, restent cependant limitées à des niveaux moyens de dose (2-10 dpa) et permettent uniquement l'étude de l'amorçage. Compte tenu des profondeurs d'irradiation de l'ordre de la trentaine de micromètres.

La difficulté et le coût des essais sur matériaux irradiés aux neutrons conduisent à réaliser ce

Figure 5 : étude paramétrique sur le gonflement calculé à partir des amas lacunaires par le code CRESCENDO. a) effet du flux sur la température du pic de gonflement, b) effet du taux d'hélium sur la concentration des amas lacunaires. (Courtesy A. Courcelle, CEA).

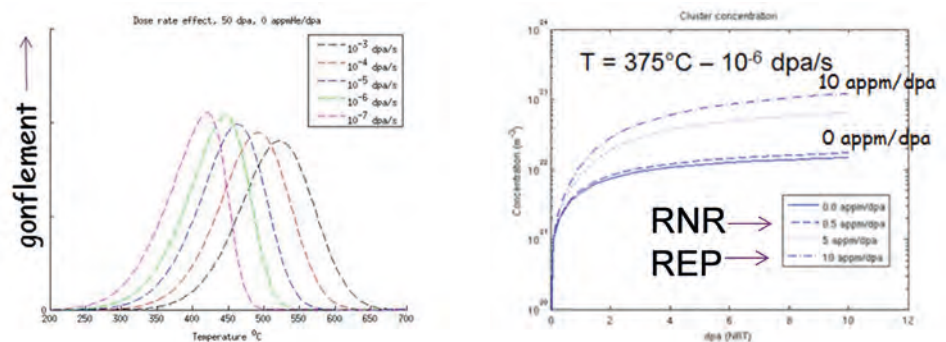
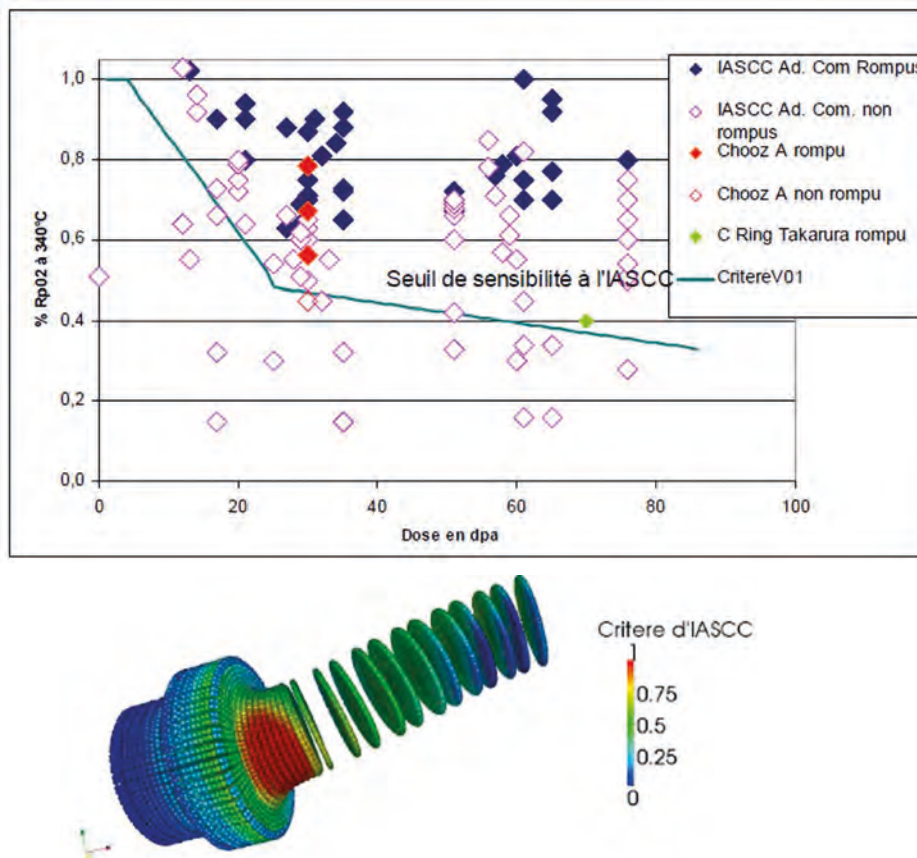


Figure 6: évaluation de l'amorçage en IASCC. a) Critère d'amorçage en IASCC, rapport de la contrainte seuil à la limite d'élasticité en fonction de la dose. b) Évaluation et localisation du risque de fissuration.



type d'essais pour établir un critère empirique d'amorçage en IASCC (en REP), quantifier des cinétiques de propagation (REB) et comprendre l'effet de paramètres spécifiques (température, chimie, transitoire).

Ces essais sont majoritairement conduits post-irradiation dans une boucle de corrosion en laboratoire chaud, comme celle du LECI au CEA Saclay, sur des matériaux pré-irradiés en réacteurs industriels ou en réacteurs expérimentaux. L'établissement d'une courbe limite de sensibilité à l'amorçage par IASCC (figure 6a) en conditions quasi-statiques, plus représentatives de celles des vis de cloisons, et de son évolution en fonction de différents paramètres (température, milieu, nuance, etc.) est un des principaux objectifs de ce type d'essais pour évaluer empiriquement le risque de fissuration.

Ces essais ne permettent cependant pas d'appréhender le rôle

de la relaxation des contraintes et du fluage d'irradiation dans le mécanisme d'IASCC. Ces effets ne peuvent être appréhendés que par des essais de CSC sous flux en réacteurs expérimentaux qui nécessitent une très grande maîtrise technologique.

Du fait de leur complexité et des équipements spécifiques inhérents aux essais de CSC sous flux, seuls trois réacteurs expérimentaux (celui de l'OCDE à Halden en Norvège, le japonais JMTR de Oarai et celui du NRI à Rez en République Tchèque) ont la capacité de mener ce type d'essai *in situ*. La réalisation d'essais d'amorçage ou de propagation nécessite des montages de mise en charge et une instrumentation spécifiques. À ce jour, la réalisation d'essai de CSC *in situ* n'est plus possible en France et est envisagée parmi les équipements du futur réacteur d'essais international RJH en construction au CEA de Cadarache.

La comparaison du critère de fissuration en IASCC, aux contraintes évaluées au niveau des vis et la localisation de l'amorçage est montrée sur la figure 6b.

En matière de modélisation, les efforts actuels portent essentiellement sur l'amorçage. Une première tentative est d'établir un critère semi-empirique de sensibilité à l'IASCC, qui devra notamment considérer la modification des mécanismes de déformation, la teneur en éléments chimiques, les cinétiques d'oxydation et leur évolution avec la dose.

Parallèlement, une stratégie de modélisation multi-échelles a été déployée dans les projets européens PERFECT puis PERFORM-60. L'objectif est de mieux comprendre le mécanisme de l'IASCC à partir de la modélisation de la microstructure, de l'oxydation et de la réponse mécanique du matériau et de leur évolution sous flux pour pouvoir proposer un critère de fissuration.

**CONCLUSIONS
ET PERSPECTIVES**

Les structures d'internes de cuve portent le poids du cœur, maintiennent en alignement les assemblages combustibles, les grappes de commande et l'instrumentation, canalisent l'écoulement du fluide caloporteur et protègent la cuve contre les rayonnements émis par l'irradiation.

Au cours du fonctionnement du réacteur, les structures sont soumises à la combinaison des rayonnements neutroniques, de températures élevées et d'une exposition à un environnement corrosif. Pour une durée d'exploitation de 60 ans, ces structures subiront des doses de plusieurs dizaines de dpa. Les structures d'internes peuvent être remplacées, mais compte tenu de leur fonction de sûreté qui doit être maintenue en permanence et de la difficulté de remplacement de l'ensemble des

internes, l'évaluation du comportement sous irradiation des internes de cuve représente un enjeu économique majeur.

Pour identifier, évaluer et anticiper les mécanismes de vieillissement sous irradiation des matériaux constituant ces structures, plusieurs programmes de R&D nationaux ont été engagés depuis les années 1990, en collaboration entre EDF, le CEA et AREVA.

Au niveau international, d'autres programmes permettent de fédérer les données expérimentales sur les matériaux irradiés aux neutrons. Ils s'appuient sur l'expertise de composants déposés et sur des irradiations menées dans des réacteurs expérimentaux.

Ainsi, les phénomènes avérés de vieillissement que sont le durcissement, la perte de ductilité, le fluage d'irradiation, la fissuration sous contrainte induite par l'irradiation sont largement étudiés.

Plus récemment et dans l'optique d'une durée d'exploitation à 60 ans, des études liées à l'évaluation des conditions d'apparition du gonflement en conditions REP ont été engagées. Parallèlement à ces études expérimentales, le développement d'une modélisation prédictive des effets de l'irradiation sur l'évolution des propriétés de ces matériaux a été amorcé, permettant de fédérer les efforts de R&D à l'échelle européenne.

Les avancées liées à cette modélisation doivent à terme permettre une meilleure compréhension des phénomènes comme le gonflement et l'IASCC, faisant intervenir et interagir des mécanismes physiques nombreux et complexes, nécessitant pour leur étude des installations expérimentales (essais mécaniques spéciaux, essais de corrosion) d'autant plus sophistiquées qu'elles sont en laboratoire chaud, voire *in situ* en réacteur.

 **références**

- [1] PERFORM 60 – Prediction of the effects of radiation for reactor pressure vessel and in-core materials using multi-scale modelling – 60 years foreseen plant lifetime, S. Leclercq, D. Lidbury, S. Van Dyck, D. Moinereau, A. Alamo, A. Al Mazouzi, J. of Nuc. Mat., 406, pp 193-203, (2010). [2] Irradiation creep of SA 304L and CW 316 stainless steels: Mechanical behaviour and microstructural aspects. Part II: Numerical simulation and test of SIPA model, J. Garnier, Y. Bréchet, M. Delnondedieu, A. Renault, C. Pokor, P. Dubuisson; J-P. Massoud, J. of Nuc. Mat., 413, pp 70-75, (2011) [3] Relaxation and irradiation creep of PWR baffle bolt materials, J. Garnier, P. Dubuisson, C. Pokor, E. Lemaire, N. Monteil, J.-P. Massoud, Fontevraud 7, Contribution of materials investigations to improve safety and performances of LWR's, September 26-30, 2010. [4] Lessons learned from baffle bolt replacements regarding irradiation-induced creep behavior, E. Lemaire, N. Monteil, J.P. Massoud, C. Pokor, N. Ligneau, G. Courtemanche, Fontevraud 7, Contribution of materials investigations to improve safety and performances of LWR's, September 26-30, 2010. [5] Corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation des aciers inoxydables austénitiques (IASCC), B. Tanguy, Revue de Métallurgie, 108, 39-46, (2011) [6] Metallurgical examinations update of baffle bolts removed from operating French PWR. Microstructural investigations of a baffle to former bolt located on a high level of the internal structures. C. Panait, E. Fargeas, M. Tommy-Martin, S. Miloudi, P. Moulart, N. Monteil, C. Pokor, Fontevraud 8 - Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs' Safety, Performance and Reliability, September 15-18, 2014. [7] IASCC of Core Internals of PWRs: EDF R&D and Engineering program to assess internals lifetime management, C. Pokor, C. Courtemanche, J.-L. Flejou, M. Tommy-Martin, I. Rupp, B. Tanguy, J.P. Massoud N. Monteil, Fontevraud 7, Contribution of materials investigations to improve safety and performances of LWR's, September 26-30, 2010. [8] Initiation stress threshold irradiation assisted stress corrosion cracking criterion assessment for core internals in PWR environment, B. Tanguy, C. Pokor, A. Stern, P. Bossis, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2011, July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA. [9] Effect of irradiation defects on the work hardening behavior, C. Pokor, X. Averty, Y. Bréchet, P. Dubuisson; J-P. Massoud, Scripta Materiala, 50, 597-600, (2004). [10] Irradiation damage in 304 and 316 stainless steels: experimental investigation and modeling. Part II: Irradiation induced hardening. C. Pokor, Y. Bréchet, P. Dubuisson; J-P. Massoud, X. Averty, J. Nuc. Mater, 326, pp 30-37, (2004). [11] Influence of irradiation temperature and dose gradients on the microstructural evolution in neutron-irradiated 316SS, D.J. Edwards, E.P. Simonen, F.A. Garner, L.R. Greenwood, B.M. Oliver, S.M. Brummer, J. Nuc. Mater, 317, pp 32-45, (2003). [12] Localized deformation and IASCC initiation in austenitic stainless steels. Jiao, Z., Was, G.S., J. Nuc. Mater, 382, p. 203-209, (2008).

La durée de fonctionnement des enceintes de confinement

Par **Benoît Masson** – EDF SEPTEN



en substance...

Dans une centrale nucléaire, l'enceinte de confinement partage avec la cuve du réacteur plusieurs similitudes qui en font deux composants remarquables. Toutes deux sont conçues pour résister à la pression, du fluide primaire pour la cuve, due au relâchement du fluide primaire en situation accidentelle pour l'enceinte.

Cet objectif conduit à une similarité de forme, le cylindre et les calottes hémisphériques étant des formes particulièrement adaptées à la résistance mécanique recherchée. La cuve et l'enceinte constituent une barrière de confinement, la deuxième pour la cuve, la troisième et ultime pour l'enceinte. Enfin, n'étant pas remplaçables, leurs comportements sont donc primordiaux pour la durée de fonctionnement de l'installation. Nous allons revenir sur le rôle de l'enceinte et sa conception, puis présenter les mécanismes de vieillissement qui pourraient l'affecter, et enfin les dispositions mises en œuvre pour garantir une exploitation sûre dans une perspective de durée d'exploitation de 60 ans au moins.

DEUX CONCEPTIONS D'ENCEINTES DE CONFINEMENT

Comme son nom l'indique, l'enceinte doit confiner les produits radioactifs présents dans l'atmosphère du bâtiment réacteur en situation accidentelle, pour protéger l'homme et son environnement. Pour cela, elle doit à la fois rester intègre alors que la pression interne est amenée à augmenter du fait de la vaporisation plus ou moins rapide du fluide primaire (fonction tenue mécanique), et ne pas laisser les produits radioactifs s'échapper vers l'extérieur (fonction confinement). L'étanchéité de l'enceinte repose aussi sur celle des circuits qui la traversent et dont la problématique sera évoquée brièvement, car ces organes d'isolement sont réparables et remplaçables.

Sur le parc nucléaire français en exploitation (hors EPR), deux conceptions coexistent. La première, sur le palier 900 MWe, est celle des enceintes à simple paroi (ESP) des réacteurs REP (réacteurs à eau sous pression) conçue initialement aux États-Unis. Elle est constituée d'une enceinte en béton armé précontraint qui assure la tenue mécanique, à l'intérieur de laquelle un *liner* (peau) métallique est ancré sur toute la surface, dôme et radier inclus. Le *liner*, utilisé comme coffrage perdu lors du bétonnage, assure la fonction de confinement. Le béton ne porte ainsi aucun requis d'étanchéité. La précontrainte permet de créer dans la paroi de l'enceinte un état mécanique de compression, cette compression s'opposant lors d'un hypothétique accident aux tensions

créées par la mise en pression de l'enceinte. L'état de contrainte ainsi atteint permet alors de ne pas dépasser les seuils d'endommagement du béton. Pour les ESP, on parle ainsi de concept d'étanchéité statique de la paroi (unique).

Plus tard, les enceintes à double paroi (EDP) sont apparues sur les paliers 1 300 et 1 450 MW. Si le béton précontraint de la paroi interne continue d'assurer la fonction de tenue mécanique, on lui confie aussi le rôle de barrière d'étanchéité. Pour cela, le niveau de précontrainte a été sensiblement augmenté pour que la paroi demeure dans un état comprimé même lorsqu'elle est sollicitée par une pression interne engendrant des efforts de traction. On comprend aisément le principe retenu par les concepteurs, les éventuelles fissures du béton ne pouvant s'ouvrir lorsque la paroi est comprimée. L'enceinte interne est protégée des agressions extérieures par une seconde enceinte, en béton armé. L'espace créé entre les deux enceintes – l'Espace entre-enceintes (EEE) – permet de collecter la fuite de l'enceinte interne (aspect confinement) et sa filtration avant rejet par un système actif de filtres et de ventilateurs d'extraction (aspect dynamique). Pour les EDP, on parle donc d'un concept mixte d'étanchéité : statique pour la paroi interne et dynamique pour l'espace entre-enceintes.

Les phénomènes de vieillissement des enceintes à prendre en compte sont donc ceux qui concernent la tenue structurelle de l'ouvrage – et de ce point de vue, les deux conceptions sont soumises à la même problématique – et ceux qui pourraient en dégrader l'étanchéité.



Enceinte et îlot nucléaire

**LA TENUE STRUCTURELLE
DE L'OUVRAGE**

Elle repose sur la précontrainte qui, comme nous l'avons vu, génère lors de la mise en tension des câbles un effort de compression dans le béton. Cet effort est déterminé lors du dimensionnement de l'ouvrage en prenant en compte la pression accidentelle et une marge pour compenser les déformations différées du béton. Les déformations différées sont causées par le retrait, qui se manifeste par un raccourcissement du matériau, et le fluage, qui se manifeste par des déformations de même direction que la contrainte appliquée (raccourcissement dans le cas d'une compression, élongation dans le cas d'une traction). Le retrait comporte une part dite endogène, propre au béton lui-même qui apparaît dès la prise et se prolonge de quelques mois à quelques années, et une part inhérente au séchage dite « retrait de dessiccation », qui se développe durant toute la phase de séchage et peut durer plusieurs dizaines d'années dans le cas des parois épaisses. Le fluage, phénomène qui apparaît sur nombre de matériaux lorsqu'ils sont soumis à une contrainte prolongée, comporte également une part propre au matériau, dite fluage propre, et une part induite par le séchage, le fluage de dessiccation. Dans le cas des enceintes

précontraintes (précontrainte de compression), le fluage se manifeste, comme le retrait, par un raccourcissement du béton. Le consensus scientifique n'est pas définitivement acquis pour savoir si le fluage propre est asymptotique ou pas. Quant au fluage de dessiccation, il se développe pendant toute la phase de séchage.

Pour comprendre l'effet des déformations différées sur un ouvrage précontraint, il faut revenir au principe même de la précontrainte. Un câble, inséré dans un conduit placé à l'intérieur de la paroi, est tendu puis bloqué à ses extrémités dans une pièce d'about, dite « ancrage », solidaire du béton. La tension du câble crée, par réaction, une contrainte de compression dans le béton. Les déformations différées se manifestent par un raccourcissement du béton. Les ancrages se rapprochent, et de fait, comme pour un élastique, la tension dans le câble diminue et par réaction la compression du béton aussi. Pour que l'enceinte assure sa fonction de tenue structurelle, il faut donc que la précontrainte demeure, à tout instant de la vie de l'ouvrage, suffisante pour s'opposer à l'effet mécanique d'une pression accidentelle dans l'enceinte.

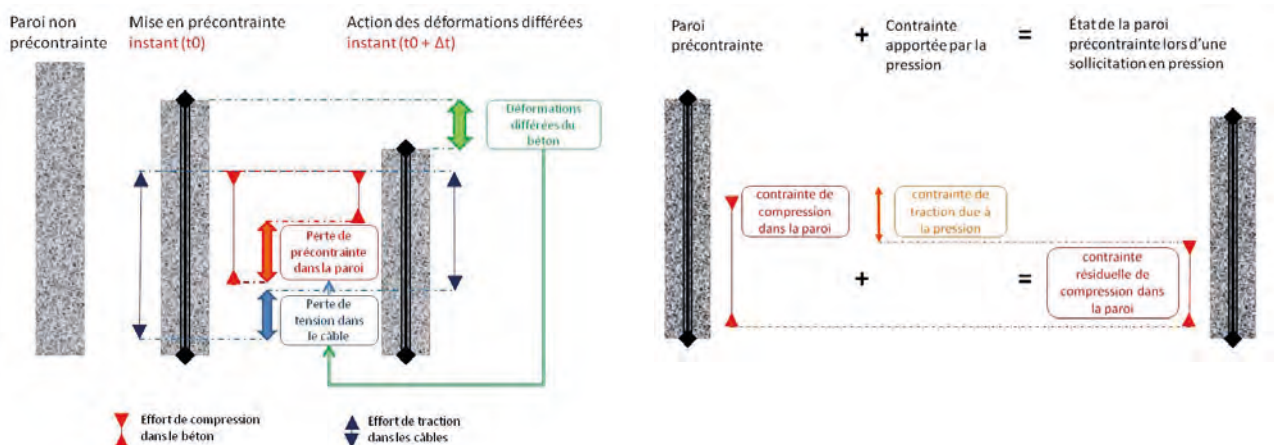
Le retour d'expérience a montré que les règlements utilisés à la conception sous-estimaient l'évolution des

déformations différées. On pourrait dès lors se poser la question de la résistance mécanique à 60 ans d'ouvrages conçus pour une durée d'exploitation de 40 ans. En réalité, il faut savoir que dans toute démarche de dimensionnement, des marges sont provisionnées pour couvrir les incertitudes du projet, au niveau des connaissances, des hypothèses. C'est d'autant plus vrai dans la construction nucléaire qui privilégie la sûreté. Ces marges supplémentaires provisionnées à la conception s'avèrent suffisantes pour une exploitation sûre des tranches à 60 ans. EDF l'a démontré, sur la base de calculs intégrant les connaissances nouvelles, tant au niveau des matériaux que de la modélisation des enceintes. Les calculs n'ont pas encore été menés au-delà de 60 ans, mais les déformations différées, bien qu'évoluant très lentement au-delà de 20 ans d'exploitation, pourraient être un facteur limitant de la durée d'exploitation pour certaines enceintes après 60 ans.

GARANTIR L'ÉTANCHÉITÉ

Pour les enceintes à double paroi, les pertes de précontrainte plus importantes que celles imaginées à la conception sont en partie responsables de l'évolution de l'étanchéité de l'enceinte interne. En effet, moins de précontrainte

Figure 1: (gauche) effet des déformations différées, (droite) effet de l'augmentation de pression dans l'enceinte.



signifie une résistance moindre à l'ouverture de fissure, et donc des chemins de fuite potentiellement plus ouverts. Le séchage est également responsable de l'évolution de l'étanchéité, par sa part dans les déformations différées et donc la perte de précontrainte, mais aussi car le béton est un matériau poreux. Lorsque les pores du béton se désaturent en eau, lorsqu'ils perdent une partie de l'eau qui les remplit pour laisser place à l'air, le béton devient plus perméable au gaz. L'image du siphon peut être utilisée pour comprendre le phénomène : lorsque le siphon est rempli d'eau, aucune odeur ne remonte. Lorsqu'il n'a plus qu'un fond d'eau, les gaz sont susceptibles de circuler.

Pour compenser l'évolution de l'étanchéité, EDF applique à l'intérieur de l'enceinte des revêtements étanches en matériaux composites, qualifiés pour résister et rester performants en situation accidentelle. Cette stratégie est payante car lors des dernières visites décennales (VD2, i.e. après 20 ans d'exploitation), toutes les enceintes ont satisfait le critère de la règle d'essai qui décline les exigences de sûreté du Dossier d'autorisation de création. Par ailleurs, la démonstration a été apportée que l'altération des propriétés d'adhérence et d'étanchéité de ces revêtements sous l'effet du vieillissement n'était pas significative, pour une durée d'exploitation de 60 ans. Pour les prochaines visites décennales (VD3), ce dispositif pourrait être complété par des revêtements appliqués cette fois sur l'extrados de la paroi interne, et non plus seulement à l'intrados, pour renforcer encore la fonction confinement.

Pour les enceintes à simple paroi, l'étanchéité repose sur le liner métallique. Les déformations globales de l'enceinte sont trop limitées, même en situation accidentelle, pour conduire à une déchirure de cette « peau ». On peut alors redouter un phénomène localisé, mais les déformations que peut subir le *liner* avant rupture (largement au-delà de 3 % d'allongement) permettent de conserver une marge confortable. D'autres modes de défaillance sont

envisageables pour le *liner* : la corrosion ou la fissuration au niveau d'une soudure. Le retour d'expérience international a montré sur quelques enceintes que la corrosion du *liner*, traversante dans certains cas, est une réalité. Elle se traduit parfois, mais pas systématiquement, par une augmentation du taux de fuite de l'enceinte en épreuve. Le béton possédant aussi une étanchéité, l'augmentation de la fuite est sensible mais ne conduit pas à un effet falaise. La fissuration au niveau d'une soudure, dont aucun retour d'expérience ne fait état à ce jour, reste un mode de défaillance envisageable.

Dans les deux cas, la difficulté n'est pas dans la réparation, mais dans la détection d'un défaut traversant de taille très réduite (quelques centimètres de longueur et quelques dizaines de micron d'ouverture pour une fissure par exemple) sur une paroi de 8000 m². EDF étudie actuellement les moyens de réaliser des inspections déportées (robots) avec les technologies de contrôle les plus adaptées (courants de Foucault, ultrasons, thermographie...).

TRAITER LES PATHOLOGIES DU BÉTON

Si, comme nous l'avons vu, les déformations différées ont pu être sous-estimées à la conception, les pathologies du béton n'étaient pas envisagées explicitement car peu ou pas connues alors. On sait maintenant que deux pathologies de réactions de gonflement interne du béton (RGI) sont susceptibles d'apparaître sur les ouvrages de génie-civil, de façon différée car survenant souvent plus de 10 ans après la construction.

La première est la réaction alcali granulat (RAG), qui comme son nom l'indique, nécessite des granulats particuliers, « réactifs », pour se développer. La seconde est la réaction sulfatique interne (RSI), dont le développement dépend principalement de la composition du ciment et de la température atteinte lors de la réaction exothermique de prise du béton. Si la température reste inférieure à 65 °C, la réaction ne se développera pas.

L'eau est également nécessaire pour amorcer ces réactions, mais l'eau contenue dans le béton et non consommée lors de la prise peut être suffisante. Pour les bétons que l'on sait sensibles à ces pathologies, on évitera autant que possible les apports d'eau externes, d'autant qu'il n'existe actuellement aucun traitement connu pour stopper ces réactions avant qu'elles ne s'éteignent d'elles-mêmes, faute de réactifs.

Ces deux pathologies développent des gels gonflants qui, s'ils deviennent excessifs, modifient l'état de contrainte de la paroi en créant des efforts de traction dans les aciers des armatures. Dans le fonctionnement du béton armé, les aciers devant apporter une résistance à la traction à un béton qui en possède peu, ces pathologies consomment une part de la réserve de traction que l'on attend des aciers. Lorsque le béton est de surcroît précontraint, le gonflement apporte une tension supplémentaire dans les câbles qui ne doit pas excéder leur capacité initiale.

Notons également que dans le cas de nos enceintes précontraintes verticalement et tangentiellement, le gonflement s'opère de manière privilégiée dans la direction non précontrainte, c'est-à-dire dans le sens radial (dans l'épaisseur de la paroi). Certains exploitants étrangers redoutent ainsi une délamination de la paroi (fissure verticale dans l'épaisseur de la paroi, donc pas visible directement). Les enceintes des réacteurs français étant pourvues d'un épingleage entre les lits de ferraillements interne et externe (présence d'aciers dans la direction radiale), ce risque est beaucoup plus faible.

À ce jour, si localement dans le radier une amorce de gonflement a pu apparaître sur un nombre très restreint d'enceintes, le parc nucléaire français demeure dans un état tout à fait satisfaisant vis-à-vis de ces pathologies. Néanmoins, au titre de la surveillance des installations, le diagnostic de premier niveau des pathologies est intégré dans le programme de base de maintenance préventive (PBMP) du génie civil. Ainsi, toute indication potentiellement révélatrice d'une atteinte du

béton est détectée lors d'inspections visuelles périodiques, tracée et son évolution mesurée lors des inspections suivantes. En cas de doute, des analyses complémentaires sont réalisées sur des prélèvements *in situ* pour confirmer ou infirmer le diagnostic et des études sont déployées si nécessaire pour s'assurer du maintien des fonctions de confinement et de tenue mécanique.

Le PBMP, mis en place très tôt dans la « vie » des enceintes, permet de détecter, principalement sur la base d'inspections visuelles, toute évolution des phénomènes identifiés touchant le béton : corrosion des armatures, des têtes d'ancrage, fissuration, apparition d'exsudats, de gels, écaillages... En cas d'anomalie, il est ainsi possible de réinterroger les bilans précédents et d'apprécier la cinétique d'évolution des défauts. Cette pratique, peu répandue hors de France, tend à se développer avec les objectifs de durée d'exploitation affichés jusqu'à 80 ans.

LES TRAVERSÉES D'ENCEINTE

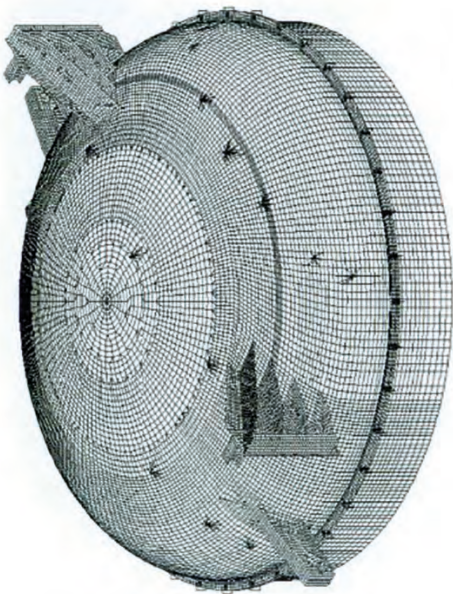
L'analyse des difficultés liées au génie civil que pourraient rencontrer les enceintes s'applique aussi aux traversées d'enceinte qui participent aussi à la fonction de

confinement. L'étanchéité des traversées « mécaniques » (organes d'isolement manœuvrables, vannes, robinets, clapets) est vérifiée lors d'essais périodiques. Des bilans d'étanchéité, organe par organe, sont réalisés pour chaque palier de conception, voire pour l'ensemble du Parc quand les technologies sont identiques. La base de résultats est conséquente, rendant les analyses de tendance ou de fiabilité d'autant plus pertinentes.

Le cas échéant, cela permet de proposer de nouvelles technologies plus performantes, une maintenance plus adaptée ou une exploitation différente. Les marges d'amélioration sont toutefois limitées parce

que le critère d'essai à respecter est particulièrement sévère et que la robinetterie nucléaire est au meilleur état de l'art.

Une traversée – le tampon matériel – revêt une importance particulière de par son diamètre (environ 8 m) et son système de fermeture (près de 160 boulons ou une cinquantaine de clames selon les paliers). Une fois mise en place et serrée, son étanchéité est assurée par un double joint en silicone, dont le comportement a été validé par essais y compris pour les situations d'accident grave (fusion totale du cœur). Simple et robuste, cette conception se retrouve en interaction avec le génie civil.



Modélisation du tampon matériel de l'EPR Flamanville



Le Tampon Accès Matériel, depuis l'intérieur du bâtiment réacteur

En effet, les déformations différées qui conduisent à un raccourcissement du béton, agissent sur le fourreau de cette traversée en lui imposant cette déformation sur l'interface avec le béton. Comme pour l'extrémité d'un gobelet en plastique que l'on écraserait entre ses doigts, le fourreau, dans sa partie hors béton, appelée virole, s'ovalise et se voile. Cette ovalisation et ce voilement sont transmis à la bride, qui à la mise en place du tampon, est au contact de la bride de ce dernier. Lorsque les déformations relatives des deux brides sont trop importantes, il devient difficile de mettre en vis-à-vis leurs alésages respectifs pour permettre le passage des lacets de serrage. Sur les enceintes pour lesquelles ces difficultés étaient anticipées, un réalésage des brides a été effectué et des boulons de nuance d'acier plus élevée mis en place, pour réduire leur section tout en augmentant leur résistance. Des rondelles « Belleville » ont également fait leur apparition pour autoriser une rotation au niveau du point de serrage, et donc garantir une résistance accrue.

VERCORS : UNE ENCEINTE À ÉCHELLE 1/3

Parmi les mécanismes de vieillissement, certains sont bien maîtrisés, en ce sens que la détection, le suivi, et l'impact sur la structure sont connus et maîtrisés, d'autres sont connus mais l'état des connaissances doit être complété pour anticiper l'évolution des ouvrages sur le long terme. En particulier, l'évolution de l'étanchéité des enceintes à double paroi, qui repose sur de multiples paramètres tels que la composition du béton, sa mise en œuvre et son séchage, nous encourage à améliorer nos capacités de prévision.

Pour pallier cette difficulté, EDF a engagé un programme de recherche sans précédent dans le domaine du génie civil, dont le support expérimental principal est la maquette VerCoRs (VERification Réaliste du CONfinement des RéacteurS). Cette maquette est une homothétie à l'échelle 1/3 d'une enceinte à double paroi du palier P4. Elle a



Construction de l'enceinte VERCORS

pour objectif de quantifier l'évolution du taux de fuite au cours du temps, d'améliorer les connaissances du comportement des structures et de démontrer la robustesse en situation d'accident grave d'une enceinte.

L'échelle 1/3 conduit à un séchage 9 fois plus rapide de la paroi de l'enceinte. Le séchage étant le principal moteur du vieillissement, agissant sur le retrait, le fluage et la perméabilité, la maquette VerCoRs accélère le temps. Ainsi, en 7 ans, elle permettra d'appréhender le comportement d'une enceinte à 60 ans. Outre la maquette, pourvue d'une instrumentation très dense et sans précédent, plus d'un millier d'échantillons de matériaux, béton, câbles, aciers, seront testés à différentes étapes de la vie de l'ouvrage pour caractériser leur comportement et leur vieillissement. Plusieurs programmes de recherche utiliseront les données acquises sur VerCoRs et des *benchmarks* sont programmés pour que les différentes équipes scientifiques du monde entier puissent comparer leurs méthodes d'évaluation du comportement des structures de génie civil.

VERS UNE EXPLOITATION SEREINE À 60 ANS

EDF a complètement intégré dans ses méthodes de surveillance et de diagnostic des ouvrages une durée d'exploitation de 60 ans pour les enceintes de confinement. La situation actuelle du parc permet d'être optimiste quant à l'atteinte de cet objectif. Pour les volets où les connaissances scientifiques sont encore à compléter, des programmes de recherche ambitieux couvrent tous les champs nécessaires à la démonstration de l'aptitude des ouvrages à fonctionner dans la durée, avec un niveau de sûreté sans cesse amélioré, conformément au cadre réglementaire.

La Chinese Nuclear Society, un partenaire de longue date

FONDÉE EN 1980, LA SOCIÉTÉ NUCLÉAIRE CHINOISE (CNS) A ÉTÉ FONDÉE AU MOMENT OÙ LA CHINE A ADOPTÉ UNE POLITIQUE D'OUVERTURE À LA COOPÉRATION INTERNATIONALE. SES MISSIONS PRINCIPALES SONT LES ÉCHANGES ACADÉMIQUES ET LA DIFFUSION DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLÉAIRES VERS LE PUBLIC.



Présidée par Li Guangxing, spécialiste du combustible nucléaire et des matériaux, membre de l'Académie chinoise d'ingénierie, la CNS compte 10 000 adhérents et 145 partenaires institutionnels tels que l'Autorité à l'énergie atomique (CAEA), les énergéticiens *China National Nuclear Corporation* (CNNC), *China General Nuclear Power Corporation* (CGN), *State Nuclear Power Technology Corporation* (SNPTC), l'université de Tsinghua. La CNS compte 24 sections techniques et 21 groupes régionaux. Elle coopère avec les sociétés nucléaires de plus de 30 pays, dont la SFEN, l'*American Nuclear Society* (ANS), l'*European Nuclear Society* (ENS), la *World Nuclear Association* (WNA).

Conférences académiques

Depuis sa création, la CNS a développé de nombreuses activités. Ainsi, tous les deux ans se tient la Conférence académique durant laquelle 1 200 participants, dont plus d'une vingtaine de membres de l'Académie des Sciences et de l'Académie de l'Ingénierie, se réunissent. C'est le plus grand événement nucléaire

académique de Chine. Tous les deux ans, la CNS organise aussi la *China International Nuclear Power Instrument & Control conference*, qui accueille plus de 400 participants. Chaque année, les Sections techniques proposent aussi une quarantaine de journées techniques.

Avec l'*American Society of Mechanical Engineers* (ASME) et la *Japan Society of Mechanical Engineers* (JSME), l'association chinoise est un des 3 organisateurs d'ICONE (*International Conference on Nuclear Engineering*) dont la 21^e édition, à Chengdu (Province du Sichuan), a vu la présentation d'environ 800 papiers et près de 1 300 participants.

En 1987 et 2002, la CNS a organisé la Conférence nucléaire du Pacifique (PBNC) et participe régulièrement à d'autres conférences académiques comme ICAPP et GLOBAL.

La CNS et la SFEN ont des relations très étroites. Les deux associations ont organisé un séminaire consacré à l'exploitation des centrales nucléaires (avril 2014) et à l'aval du cycle du combustible (décembre 2014).

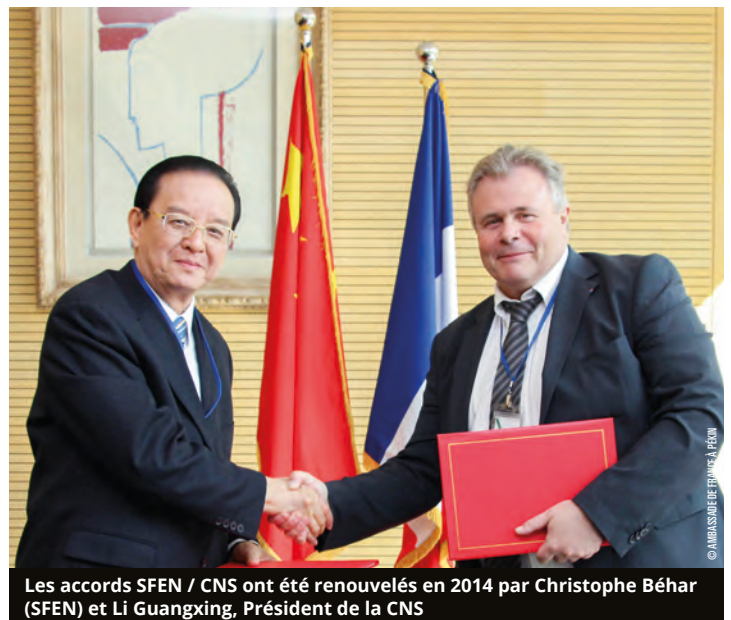
Diffuser la science nucléaire

L'acceptation du public est un élément clé du développement des sciences et industries du nucléaire. CNS se consacre à la diffusion des connaissances scientifiques et techniques du nucléaire auprès du public. Sur le terrain, elle organise chaque année le salon international *Nuclear Industry China* (NIC). Sur 14 000 m², l'édition 2014 a été la plus grande exposition nucléaire jamais tenue en Chine. En 2015, le

concours de connaissances « *Fierté du Nucléaire* », destiné aux collégiens, a compté plus de 250 000 participants. Les 30 premiers gagnants sont invités à un séminaire d'été pour visiter des centrales nucléaires et des laboratoires de recherche. « *Tête à tête avec les scientifiques* », autre événement de la CNS, permet les rencontres entre les médias publics et les scientifiques. De la même manière, le « *Tour des Académiciens* » permet aux riverains des centrales nucléaires de rencontrer des scientifiques du nucléaire, autour des centrales. L'activité d'édition et de publication de magazine sur le nucléaire est une autre priorité de l'association.

La CNS utilise l'ensemble des nouveaux médias, notamment les médias mobiles comme l'application WeChat pour publier des nouvelles et des informations sur le nucléaire. Avec la SFEN, la CNS a organisé un séminaire franco-chinois sur la communication du nucléaire pour échanger les expériences.

La CNS est régulièrement sollicitée pour organiser la qualité scientifique et technique de projets de R & D nucléaire. Seule société académique nucléaire qualifiée pour nommer des académiciens à l'Académie des Sciences et à celle des Ingénieurs, CNS a déjà recommandé 19 académiciens. ■



Les accords SFEN / CNS ont été renouvelés en 2014 par Christophe Béhar (SFEN) et Li Guangxing, Président de la CNS



La pose du dôme (150 tonnes) a été réalisée en une fois

Jules Horowitz l'autre réacteur en chantier

EN CONSTRUCTION À CADARACHE (GARD), JULES HOROWITZ DEVRAIT SUCCÉDER VERS 2019, À SON GRAND FRÈRE OSIRIS. RÉACTEUR POLYVALENT ET FLEXIBLE, LE « RJH » PERMETTRA D'Étudier LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX ET DES COMBUSTIBLES DE TOUS LES RÉACTEURS DE PUISSANCE : 2^e, 3^e ET 4^e GÉNÉRATION. CE SERA ÉGALEMENT UN IMPORTANT PRODUCTEUR DE RADIOÉLÉMENTS, CAPABLE DE PRODUIRE JUSQU'À 50 % DU TECHNÉTIUM UTILISÉ DANS DES OPÉRATIONS DE MÉDECINE NUCLÉAIRE EN EUROPE.

LE CHANTIER EST BIEN AVANCÉ : LE BÂTIMENT RÉACTEUR EST SORTI DE TERRE, LE DÔME POSÉ... VISITE GUIDÉE D'UN RÉACTEUR UNIQUE.



La technologie de précontrainte par torons gainés graissés

Dans un contexte d'exploitation des centrales nucléaires au-delà de 40 ans, les recherches pour améliorer les performances et la sûreté des réacteurs de puissance sont essentielles. Les réacteurs expérimentaux permettent de tester le comportement des matériaux et des combustibles sous de forts flux de neutrons, ce qui est très important lorsqu'il s'agit de qualifier des prototypes ou des produits industriels qui seront utilisés dans les réacteurs en exploitation ou dans ceux de demain.

Or, en Europe, ces réacteurs de recherche datent des années 1960 et sont, soit soumis à des opérations de maintenance lourdes qui les rendent indisponibles pendant plusieurs mois, soit arrêtés. Pour continuer à innover, un nouveau réacteur de recherche est indispensable. C'est là que le réacteur Jules Horowitz (RJH) entre en piste.

Polyvalence et flexibilité

En 2007, un consortium international (voir page 72) a engagé la construction du RJH. Plus puissant (100 MW thermique) que le réacteur Osiris (Saclay – Ile-de-France), il se distingue aussi de son aîné par ses caractéristiques intrinsèques : la polyvalence et la flexibilité.

Pour la première, le RJH disposera d'un « spectre neutronique à deux bosses », capable de produire des flux intenses de neutrons, tant dans le domaine thermique (recherches pour les réacteurs en exploitation) que dans le domaine rapide (applications pour les réacteurs de la 4^e génération). Par ailleurs, le RJH produira le radioélément « best-seller » de la médecine nucléaire : le technétium 99 Mo. Il fournira 25 % des

besoins européens et pourra monter jusqu'à 50 % en cas de pénurie (contre 10 % pour Osiris). Un atout lorsque l'on sait que les phénomènes de pénuries se sont multipliés ces dix dernières années (voir RGN n° 1 2015).

La seconde caractéristique du RJH, sa flexibilité, lui permettra de mener une vingtaine d'expériences en même temps dans des conditions extrêmement variables. Les nouveaux systèmes d'instrumentations pourront remonter l'information en ligne sur le comportement du combustible et des matériaux. En complément du principe de « *cook and look* » utilisé à Osiris (on irradie des échantillons, on les sort, on les teste, on constate). Ces nouveaux dispositifs permettront l'accès à l'évolution de paramètres physiques sous flux. Ces missions n'auraient pas pu être remplies par des réacteurs de puissance : le RJH vieillit dix fois plus vite les matériaux et son cœur a été conçu pour laisser de la place pour des instruments de mesure.

Le dimensionnement d'un réacteur 900 MWe

En matière de sûreté, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ne fait pas de distinction entre les réacteurs de recherche et les réacteurs de puissance. La réglementation demande

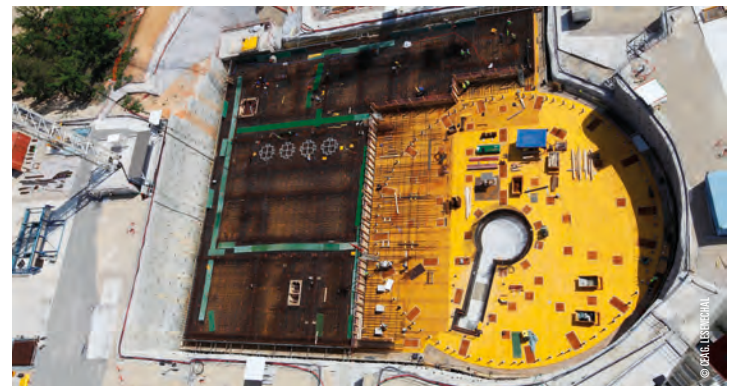
aux nouveaux réacteurs d'adopter les performances de sûreté des réacteurs de 3^e génération.

Ainsi, le dimensionnement de l'enceinte du RJH s'apparente à celui d'une tranche de 900 MW : 43 mètres de hauteur pour 37 m de diamètre. Par contre, le cœur du réacteur est de 60 cm sur 60 cm. Pour se faire une idée des volumes, il faut donc imaginer un réacteur de 900 MW avec à l'intérieur un cœur de la taille d'une – grosse – machine à laver !

Les étapes clés du chantier

La préparation du site et la paroi cloutée (juin 2007 à juin 2008)

Avant de construire le réacteur, d'importants travaux de terrassement ont été engagés. Dans un premier temps, il a fallu préparer le site à l'excavation. Des explosifs ont été utilisés pour enlever 360 000 m³ de roche. Une opération délicate menée en tenant compte de la proximité géographique de la maquette critique Masurca. Placé « à fond de colline », le RJH est « semi-enterré » pour parer une éventuelle agression extérieure et



Le radier supérieur

Qui était Jules Horowitz ?

Physicien français (1921-1995), ancien directeur des réacteurs nucléaires et de la recherche fondamentale du CEA, Jules Horowitz s'est spécialisé dans l'étude des réacteurs de recherche dès 1946. Ce physicien de renommée internationale est l'un des pères de la filière uranium-graphite-gaz. En 1962, il était directeur des piles atomiques au Commissariat à l'énergie atomique.



200 appuis parasismiques

s'affranchir des phénomènes de liquéfaction liés aux caractéristiques de la vallée de Cadarache où se trouve une faille sismique. Tout autour, la paroi de l'encuvement du réacteur a été clouée de longues tiges métalliques de 14 mètres de long permettant de stabiliser la roche.

Les appuis parasismiques (2009)

Le RJH est l'une des premières unités nucléaires construite sur appuis parasismiques. Cette isolation parasismique est la même que celle d'ITER (les deux projets ont d'ailleurs partagé les processus de qualification). À ceci près que le réacteur de fusion dispose de 500 appuis et

le réacteur de recherche de 200, permettant de supporter un îlot nucléaire d'environ 100 000 tonnes (soit 500 tonnes par plot). Ces appuis, composés d'un bloc de néoprène fretté compris entre deux platines métalliques, isolent l'unité nucléaire du radier inférieur coulé sur le sol. Ces dispositions parasismiques, bien connues pour la construction des ponts, permettent de filtrer les mouvements du bâtiment des mouvements de terrain et donc de limiter les accélérations sismiques transmises au bâtiment et aux équipements.

Le radier supérieur et le bâtiment réacteur (2010-2013)

En 2010, le radier supérieur a été

coulé sur les appuis parasismiques. Il reçoit le bloc piscine, dont la densité d'armature (400 à 500 kg d'acier par mètre cube de béton) et les exigences de protection radiologique ont amené au développement et à la qualification d'un béton lourd auto-plaçant spécifique. L'ensemble de l'unité nucléaire a « consommé » 40 000 m³ de béton.

Parmi les difficultés techniques, il a fallu anticiper la fixation des équipements pour les 50 ans d'exploitation de l'installation (chemin de câbles, gaines techniques, points de manutention, passerelles, supports de cannes...). Des platines métalliques, solidaires du ferrailage, ont donc été installées sur les parois de l'unité nucléaire.

Le dôme (décembre 2013-2014)

Le coffrage perdu et métallique du dôme a été assemblé en trois mois sur chantier, à côté du bâtiment réacteur. La pose de cet « objet » de 150 tonnes a été réalisée en une fois : il a été soulevé à l'aide d'une des deux seules grues au monde capable de soulever un tel édifice avec une précision de l'ordre d'un centimètre en rotation et en position. Une année a ensuite été nécessaire pour ferrailer le dôme et le

bétonner en une seule opération avec du béton auto-plaçant.

Travaux de précontrainte (2015)

L'enceinte du bâtiment réacteur est en béton précontraint. La technologie utilisée est celle de la « précontrainte par torons gainés graissés ». Elle permet d'insérer des câbles métalliques dans une gaine, de les graisser dans celle-ci, puis d'introduire un coulis ciment dans ces conduits pour fixer les gaines. Une fois le ciment sec, les câbles sont tirés. Cette technologie permet, pendant toute la durée d'exploitation, de contrôler la tension des câbles, de les retendre ou de les remplacer. ■



Jules Horowitz devrait succéder dans quelques années, vers 2019, à sa grande sœur Osiris

en chiffres...

LE REACTEUR JULES HOROWITZ

14 partenaires regroupés en un consortium international : industriels (EDF, AREVA), centres de recherche (CEA, Studsvik (Suède), CIEMAT (Espagne), SCK (Belgique), NRI (République Tchèque), VTT (Finlande), IAEC (Israël), DAE (Inde), JAEA (Japon),>NNL (Royaume-Uni)) et institutionnels (Commission européenne, Grand Emprunt).

0 accident impliquant un arrêt de travail en janvier 2015.

416 personnes travaillant en moyenne chaque jour sur le chantier

3 889 494 heures travaillées depuis le début du chantier

Portrait

Christophe Berretti, Les semaines passent très vite !

CHRISTOPHE BERRETTI, 51 ANS, EST LE CHEF DE « L'AUTRE » GRAND CHANTIER NUCLÉAIRE FRANÇAIS, CELUI DU RJH. CHARGÉ, AVEC SON ÉQUIPE, DE MENER À BIEN LA RÉALISATION DE CE RÉACTEUR DE RECHERCHE, IL DOIT COORDONNER LES PARTITIONS QUE JOUENT LES DIFFÉRENTS INTERVENANTS SOUS LE SOLEIL PROVENÇAL, EN RESPECTANT LES OBJECTIFS DE SÛRETÉ, DE SÉCURITÉ ET BIEN SÛR PLANNING ET DE COÛT. UNE JOURNÉE DANS LA VIE DU CHEF D'UN PROJET « HORS NORME » AVEC UN HOMME ENGAGÉ.



« En moyenne, la journée commence vers 8h et se termine vers 19h-19h30. Mais ce n'est qu'une moyenne ! » Christophe Berretti, responsable de la réalisation du Réacteur Jules Horowitz, sourit quand on évoque sa « journée type ». Arrivé à Marcoule en octobre 2012, cet ingénieur qui se sent « à l'aise dans le secteur de l'énergie » dans lequel il évolue depuis 1991, a reçu pour mission de faire passer les lots du projet de la phase d'études à celle de la réalisation avec un génie civil déjà bien avancé. Près de trois ans plus tard, Christophe est fier de l'avancée du chantier: « Aujourd'hui, grâce à la mobilisation de l'équipe projet,

de la Direction du programme et des équipes du CEA à Saclay et Cadarache, le RJH est passé en mode réalisation sur la majorité des lots, en usine et sur le terrain. Le bloc-pile, le cuvelage de la piscine, les composants classés, les ponts, les cellules chaudes, la machine de chargement-déchargement... tout cela est en cours. Et le pont polaire est déjà en exploitation. »

Sécurité et sûreté d'abord

Avec sa « garde rapprochée » de l'équipe de Direction, le chef de chantier traite de sujets très variés. Le premier est celui de la sécurité. Sur un chantier de cette ampleur, Christophe rappelle que « c'est un combat de tous les jours. Nous avons de très bons résultats avec un taux de fréquence de 4,1 et un taux de gravité de 0,09 pour 500 à 600 personnes sur site en permanence. » Un tel résultat s'obtient avec l'implication de tous dans une organisation soudée, réunissant maître d'œuvre, maître d'ouvrage et les personnes dédiées à la sécurité de chaque entreprise intervenante.

Bien sûr, la sûreté est dans le périmètre de Christophe: « Les relations avec l'Autorité de sûreté sont permanentes. Depuis 2009, nous avons eu 22 inspections. Ces inspections

épluchent nos documents et notre organisation. Contrairement à ce que l'on a pu lire dans la presse, les inspections n'ont pas fait l'objet de constat et l'Autorité de sûreté souligne notre rigueur et notre maîtrise du sujet ! »

Fédérer les énergies

De nombreux acteurs œuvrent à la mise en route du RJH. Responsables de marchés, chefs de projet, maîtres d'œuvre, maître d'ouvrage, responsables sécurité et sûreté, responsables qualité, contract managers, titulaires des marchés... Le directeur de la réalisation les fait avancer ensemble. « On se répartit le boulot, explique Christophe Berretti. Avec mes trois collègues de l'équipe de direction, nous intervenons quand il faut prendre une décision stratégique ou régler les points durs. » Mais c'est bien à lui que revient la mise en œuvre et la responsabilité de la relation avec le maître d'œuvre AREVA TA sur le terrain. De la même manière, Christophe veille à « intégrer exploitation et projet, en relation étroite avec les futurs exploitants et expérimentateur ». En l'occurrence, c'est l'ancien chef du projet du démantèlement de Phénix qui s'exprime. Car avant de construire le RJH, Christophe a – de 2008 à 2012 – eu la charge de

lancer les opérations préparatoires au démantèlement du réacteur à neutrons rapides.

Apprendre et bouger

« On apprend beaucoup avec RJH, et dans tous les domaines » souligne Christophe. De fait, apprendre est une constante dans son parcours. Bouger aussi! Diplômé de l'ENSI Nancy en génie des procédés et de l'ENSEEIH Toulouse en informatique industrielle, il a débuté « dans le pétrole ». Embauché en 1991 à SNG (AREVA NC), il a mis en place des claculs de procédés pour les ateliers de La Hague, été responsable des systèmes de contrôle-commande et ingénieur projet pour SGN et COGEMA, avant de préparer le passage à l'an 2000 des sites de la branche retraitement de COGEMA. Responsable du Système d'information de Marcoule et d'AREVA TA, il était dans l'équipe de direction du projet AREVANET, le réseau intranet destiné aux 30000 utilisateurs en France, aux États-Unis et en Allemagne. L'envie de retrouver les « travaux neufs et les projets industriels » le mène à rejoindre le CEA pour rénover ATALANTE, le laboratoire de Marcoule. « C'était très intéressant car il fallait travailler avec les exploitants et les chercheurs en gérant une coactivité chantier » se souvient Christophe. Après ATALANTE, ce sera Phénix, une autre occasion d'apprendre et de travailler en équipe. Le directeur de projet est aussi professeur, quelques jours par an, à l'INSA V. Parce que « ça [lui] permet de garder un pied dans l'enseignement » et de partager ses savoirs. S'il a visité « l'autre » chantier nucléaire français? « Non, pas encore. Mais mon équipe oui, plusieurs fois. Et nous échangeons beaucoup avec Flamanville sur le génie civil, le pont polaire, les diesels de sauvegarde, l'ESPN... C'est très important » affirme le bucco-rhodanien d'adoption qui prévoit d'aller rencontrer son collègue, chef du chantier manchois. ■



Affiche du film qui sortira sur les écrans le 5 août

Les 4 fantastiques : un quatuor cosmique

Leur origine : ce groupe de superhéros, que l'on retrouvera sur grand écran cette année, a déjà occupé les salles obscures à deux reprises depuis 2005. Il a fait l'objet de la plus longue série des Marvels, de 1961 au printemps 2015, en attendant une probable relance en fin d'année.

Leur histoire : au cours d'un vol expérimental dans le cosmos destiné à atteindre un nouveau système solaire, trois hommes et une femme voient leur fusée exploser. À leur retour sur Terre, ils ne sont plus les mêmes : ils sont M. Fantastique, la Femme invisible, la Torche humaine et la Chose.

Leurs pouvoirs : M. Fantastique peut jouer avec son corps comme avec un élastique, pratique pour s'enrouler autour de ses adversaires. Son épouse, la Femme invisible, peut générer des champs de force et de protection. La Torche humaine vole et joue avec le feu. Enfin, la Chose, sous sa peau orange, est faite de pierre et dotée d'une force hors du commun.

L'atome et eux : c'est l'exposition aux rayonnements cosmiques du milieu spatial (voir l'interview de Roland Lehoucq p. 77) qui déclenche des mutations génétiques chez les membres de l'équipage, et leur permet ensuite d'être suffisamment armés pour lutter contre tous ceux qui menacent la Terre, forces extraterrestres ou originaires d'autres dimensions. Les rayonnements cosmiques reviennent fréquemment dans les *comics*, comme danger propre au cosmos, ou comme arme – pour ceux qui savent s'en servir.



Superman : l'icône de Krypton

Ses origines : c'est l'un des plus anciens superhéros et l'un des plus mythiques. Né en 1938, il est apparu à la radio, à la télévision et au cinéma, où il est popularisé par Christopher Reeve. Puis il revient sur grand écran en 2006 et 2013.

Son histoire : envoyé sur Terre pour sauver Krypton, sa planète natale, Kal-L y reste, est adopté par des humains et devient Clark Kent. Journaliste au *Daily Planet*, il est aussi Superman : cet homme au justaucorps bleu et à la cape (et le slip) rouge, doté de pouvoirs surhumains.

Ses pouvoirs : vision, ouïe... tous ses sens sont démultipliés. Extrêmement fort, endurant et rapide, il a une superintelligence et une supermémoire. Son organisme étant adapté à la gravitation de sa planète, il est capable de voler. En somme, Superman est quasiment invulnérable.

L'atome et lui : avec un extraterrestre, tout est possible et l'imagination des auteurs quant à la radioactivité n'a pas de limites. Ainsi, ils parviendront à relancer la série en inventant la kryptonite, qui agit à distance et évoque les rayonnements ionisants issus de la radioactivité. Ce minerai aux multiples couleurs et effets, dont des fragments tombent parfois sur Terre, a des effets sur les seuls Kryptoniens. Ainsi, la kryptonite verte rend Superman plus vulnérable qu'un humain ! La rouge désinhibe, rend maléfique ou fait perdre le contrôle ; la noire, dans *Superman 3*, a même pour effet de « défusionner » le héros : d'un côté Clark Kent, le bon, et de l'autre Superman, le mauvais.

Batman : l'humain high-tech

Son père : créé en 1939, *The Batman* était à la télévision dès 1966. Il a fait l'objet d'une série d'adaptations au cinéma, réalisées par Tim Burton (années 1990), et la trilogie de Christopher Nolan (2005-2012).

Son histoire : Bruce Wayne est un humain qui n'a aucun pouvoir, si ce n'est celui d'être milliardaire. Souhaitant améliorer le sort de ses concitoyens et lutter contre le crime à Gotham City, il dédie ses nuits au combat contre gangsters et criminels.

Ses pouvoirs : pas de superpouvoir, mais un équipement high-tech : une « armure » en kevlar ainsi que de nombreuses armes et gadgets. Superman peut aussi compter sur sa perspicacité et ses talents d'enquêteur, ainsi que sa maîtrise des arts martiaux.

L'atome et lui : leur rencontre se fait au cinéma. Dans *Batman : the Dark Knight Rises* (2013), Bruce Wayne a mis au point un prototype de réacteur à fusion, censé apporter toute l'énergie (propre) dont le monde a besoin. Mais l'objet est dérobé par des terroristes. Or, s'il est laissé à lui-même, sans surveillance, se déclenche une réaction en chaîne et, en bout de course, une explosion capable de détruire la ville de Gotham... Heureusement, Batman parvient à récupérer le réacteur pour le faire exploser en mer.



Les X-Men, « enfants de l'atome »

Leurs origines: ils naissent en 1963, inaugurant une saga, qui les fait passer par une série de films (sept opus depuis 2000).

Leur histoire: ces héros sont des mutants. Des étudiants qui, sous l'influence de mutations génétiques – dont on ne comprend pas clairement l'origine –, se trouvent peu à peu pourvus de capacités sur-humaines. Ils apprennent à maîtriser leurs pouvoirs dans une école spécialisée, dirigée par le Professeur Xavier, et se dédient à la protection de la population.

Leurs pouvoirs: leur palette est large, télépathie, ailes, sang guérisseur, agilité et force décuplées, énergie optique, contrôle de la glace...

L'atome et eux: l'énergie nucléaire fait fréquemment son apparition dans l'histoire, et semble, au fil des épisodes, expliquer les transformations ayant affecté les adolescents. Ainsi, le père du Pr Xavier était employé d'une centrale nucléaire; il aurait été contaminé en réparant la fuite d'un réacteur, et aurait contaminé son fils à son tour. Néanmoins, à partir de 2000, les nombreuses adaptations cinéma remplaceront les radiations par une manipulation génétique.



Docteur Manhattan : le toubib rayonnant

Son père: superhéros des *Watchmen* (les gardiens), série lancée en 1986, adaptée au cinéma en 2009.

Son histoire: chercheur en physique nucléaire, Jonathan Osterman se retrouve bloqué dans une chambre d'essai d'accélérateur de particules: il est désintégré... Il se reconstitue petit à petit, avant de réapparaître dans le monde réel, sous la forme d'un superhéros radioactif.

Ses pouvoirs: capable de se désintégrer, de se transformer, de se téléporter, de manipuler toute matière, mais aussi omniscient et immortel... Seul héros des *Watchmen* à posséder des superpouvoirs, Dr Manhattan fait tout ce qu'il veut.

L'atome et lui: symbolisé par un atome d'hydrogène, le Dr Manhattan personnifie l'idée d'une maîtrise totale et sans limite de l'atome. Sa connaissance « rapprochée » de l'énergie nucléaire lui permet d'aider le gouvernement américain à améliorer le sort de la population. Mais il est aussi accusé d'avoir, par sa seule présence, irradié certains de ses proches (et de ses ennemis); son ex-petite amie, Janey Slater, ainsi que l'un de ses anciens compagnons d'arme, souffrent ou sont tous morts de cancer... C'est la seule évocation de cette maladie dans le milieu des superhéros. Au final, le Dr Manhattan décidera de s'exiler sur Mars.

Attention, supervillain !

Docteur Octopus : la fusion pour passion

Son père: personnage de *comic* à partir de 1963, il débarque sur les écrans dans la réincarnation négative de Spiderman, dans *The Amazing Spiderman* (2012).

Son histoire: c'est le meilleur ennemi de l'homme araignée. Otto Octavius, titulaire d'un doctorat en science nucléaire, est un brillant inventeur, un génie en physique nucléaire. Il a notamment mis au point des bras intelligents commandés par son cerveau pour manipuler à distance les substances radioactives. Mais un jour, lors d'un accident de manipulation, ces tentacules prennent le pouvoir sur son corps...

Son pouvoir: doté d'une grande capacité de concentration et de contrôle mental de ses tentacules, il devient, à force d'entraînement, capable de combattre seul plusieurs adversaires... tout en effectuant une tâche plus minutieuse, comme remuer son café ou construire une machine.

L'atome et lui: aux mains du Dr Octopus, la radioactivité est tantôt l'objet de recherches passionnées, tantôt le moyen d'expression de sa folie. C'est elle qui, lors d'une explosion radioactive, provoque la « greffe » des bras et accélère ses troubles de la personnalité. Dans le film *Spiderman 2* (2004), le savant parvient à créer une énergie extrêmement puissante, de la fusion thermo-nucléaire contrôlée. Et il jubile: « *La puissance du Soleil dans la paume de ma main...* »



Un gros « Gloubi-boulga » scientifique

Quel regard un physicien porte-t-il sur la question? La réponse de Roland Lehoucq, astrophysicien, chercheur au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et enseignant à l'École Polytechnique.

Roland Lehoucq,
Astrophysicien, chercheur au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, et enseignant à l'École Polytechnique

« On a des évocations de la radioactivité dès les premiers comics, sans savoir à l'époque parfaitement comment celle-ci fonctionne. Vers 1945-1950, Superman voit ses pouvoirs annihilés à distance par la kryptonite : cela s'apparente à un rayonnement ionisant. Dans Les Quatre fantastiques, les rayons cosmiques qui frappent les astronautes sont des particules de très haute

énergie émises par le Soleil ou les supernovae (explosions d'étoiles) qui évoquent celles émises lors de la radioactivité : elles ont des tas d'effets étranges et engendrent des mutations génétiques, rendues ici de manière positive, puisqu'elles confèrent des pouvoirs – alors qu'à des doses très élevées, dans les mêmes circonstances, elles seraient mortelles.

Dans Spiderman 2, la scène de la fusion est un parfait exemple de Gloubi-boulga scientifique : la façon dont le Dr Octopus allume ses lasers, dont se déroule la fusion, la durée de la réaction, l'introduction du magnétisme, la taille de la machine... absolument tout est faux ! Si ce n'est que l'on espère maîtriser un jour la

fusion nucléaire pour produire de l'énergie, et que cette énergie est bien celle qui permet aux étoiles de briller durablement. J'utilise néanmoins cette scène comme exercice d'application du cours, pour effectuer avec mes élèves une analyse critique ou calculer des ordres de grandeurs. Les histoires de superhéros, tout comme la science-fiction en général et le cinéma, sont de très bons prétextes pour parler de science. »

Pour voir la scène de la fusion www.youtube.com/watch?v=0DsKaphCrFA



Une histoire à rebondissements

Trois questions à Xavier Fournier, rédacteur en chef de *Comic Box*, revue française sur les comics.

Quelle place occupe la radioactivité dans les comics ?

Une place de choix ! Mais qui est traitée différemment selon les époques, car on distingue deux phases. Les premiers comics, dans les années 1930-1940, ont été lancés à l'époque des pilules au radium et autres dentifrices miracle... C'était une phase de confiance en la science et au progrès : Pyroman, superhéros bombardé de radiations, s'en porte à l'époque très bien. Puis, à la fin des années 1960, l'humanité a connu les bombardements atomiques, les catastrophes nucléaires. Les comics modernes, relancés par la société Marvel, sont porteurs d'une menace. Les héros de la nouvelle vague ont en commun de dénoncer les dérives de la science, et en particulier des radiations. Ce sont les X-Men et autres Daredevil (héros de comics apparu en 1964. Éclaboussé dans l'enfance par des déchets radioactifs au cours d'un accident de la route, il devient aveugle... et développe des capacités sensorielles exceptionnelles). Les auteurs ont à l'esprit les bombes atomiques, les fuites de centrales, et cela transparait dans leurs ouvrages. Néanmoins, on reste dans le côté sublimé.

Comment est traité ce thème ?

La science, la technologie, dans les comics, apportent le degré de magie nécessaire à toute intrigue. Ce n'est plus : « La sorcière a jeté un sort au personnage », mais : « Il a été exposé aux radiations ». Néanmoins, la notion de radioactivité est un peu floue dans l'esprit des auteurs, qui sont souvent jeunes, peu documentés, se projettent dans un futur où tout va changer... et s'adressent à un lectorat également jeune, que la censure morale de l'époque interdit d'alarmer. La vision du nucléaire est donc globalement optimiste : même en cas d'exposition importante, aucun héros n'a de cancer ou de graves dommages corporels... Certes les gènes sont modifiés, l'humeur peut s'en trouver altérée (Hulk et ses accès de colère), mais c'est tout !

Et au cinéma ?

Superman et Batman apparaissent sur grand écran dès les années 1970, mais depuis les années 1990, le perfectionnement des effets spéciaux a changé la donne : on peut tout montrer, ou presque. Surtout, la peur de l'atome a été remplacée par une autre peur : celle du transgénétique. Ainsi, Spiderman, à l'origine piqué par une araignée radioactive, se retrouve, en 2001 dans le film de Sam Rémey, attaqué par une araignée génétiquement modifiée. L'origine des pouvoirs des X-Men, initialement attribuée à la radioactivité, est également modifiée : à partir de 2000, les films parlent plutôt de manipulations génétiques et de bombe génétique...

L'énergie nucléaire et l'opinion publique globale depuis l'accident de Fukushima

par **Robert Knight**,

Directeur des Recherches, Ipsos MORI, Londres



en substance...

L'opinion publique est un baromètre de l'autorisation accordée à l'industrie nucléaire d'exploiter ses centrales dans un pays. Aux côtés des aspects financiers, politiques et technologiques de l'environnement économique, le soutien du public, ou tout au moins l'absence d'opposition, est un préalable à la poursuite et au développement réussi de l'énergie nucléaire.

Depuis sa naissance après la deuxième guerre mondiale, la perception de l'énergie nucléaire par le public dans le monde a été considérablement influencée par la forte médiatisation accordée à une succession d'accidents importants, notamment Three Mile Island en 1979, Tchernobyl en 1986 et Fukushima Daiichi en 2011. Puisque les événements les plus médiatisés sont des catastrophes, chacun de ces jalons a eu un impact négatif sur le soutien du public à l'industrie nucléaire. Chaque fois, ce soutien s'est effondré et un certain laps de temps aura été nécessaire pour faire remonter l'opinion en faveur du nucléaire.

Cet article analyse le progrès réalisé depuis l'accident de Fukushima en 2011, et fait appel à l'une des plus importantes enquêtes régulières de l'opinion publique, l'Ipsos Global Advisor.

La mesure et le suivi du soutien ou de l'opposition du public vis-à-vis de l'énergie nucléaire ont été irréguliers et incohérents. La plupart des recherches ont été menées au niveau national dans quelques pays clés, financées souvent par des associations professionnelles ou des entreprises du secteur de l'énergie. Peu d'historiques de mesure remontent aussi loin que Tchernobyl. La recherche internationale est encore moins importante, la série de l'Eurobaromètre étant une des sources les plus pertinentes, même si son étendue est limitée par son obligation de se concentrer uniquement sur l'Union européenne (UE), dont la couverture a été modifiée dans le temps puisque ses frontières se sont largement agrandies dans les deux dernières décennies. Par contre la couverture de l'opinion en dehors de l'UE et de l'Amérique du Nord est éparse.

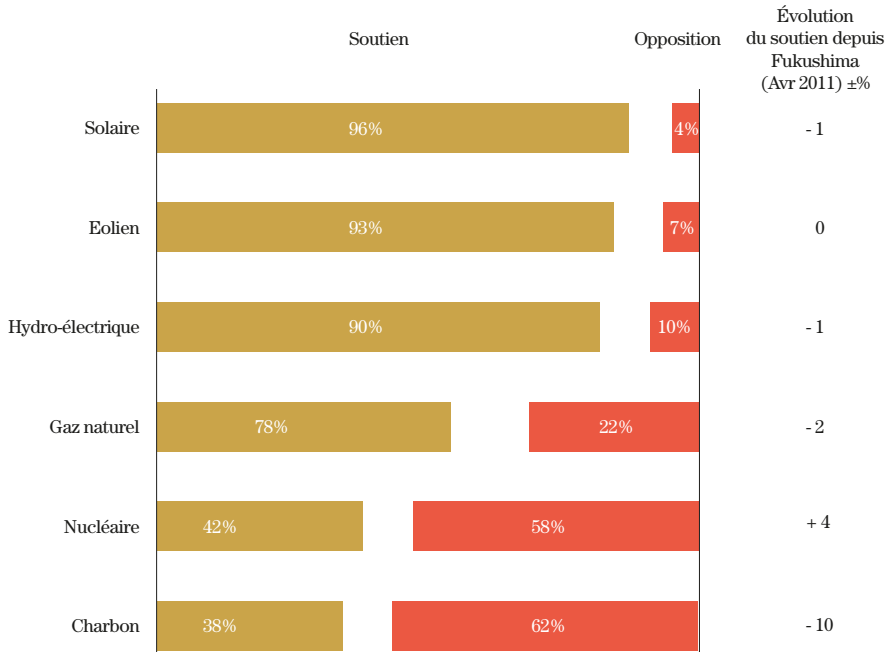
L'Ipsos Global Advisor est une enquête en ligne menée dans 24 pays auprès d'un échantillon d'environ 18 000 personnes âgées de 18 à 64 ans, sur la base de 500 à 1 000 entretiens par pays. Chaque enquête pays est pondérée afin d'être représentative de la population en ligne. Pour les pays les plus développés, la pénétration d'Internet est si élevée que les enquêtes en ligne sont largement représentatives de l'opinion publique totale. Pour les pays en développement, une telle méthode peut poser problème. Dans certains pays comme l'Inde, la Chine et l'Indonésie, il faut donc garder à l'esprit que le Global Advisor ne représente que les principales populations urbaines et la

tranche la plus aisée de la population. Chaque enquête couvre une étendue différente de sujets. Ces enquêtes ont été menées sur les attitudes face aux sources d'énergie en avril 2011 (un mois après Fukushima, moment où l'effet négatif sur l'opinion publique était le plus fort), en septembre 2012 pour mesurer la remontée initiale de l'opinion publique et plus récemment en février 2015 pour suivre le progrès réalisé et explorer d'autres sujets liés à l'énergie nucléaire.

LE NUCLÉAIRE ET LES AUTRES ÉNERGIES

En février 2015, le soutien global et l'opposition à l'énergie nucléaire sont comparés à cinq autres sources de production d'électricité. Les énergies renouvelables (solaire, éolien et hydroélectrique) sont de loin les sources d'énergie les plus populaires; le gaz naturel se situe entre les énergies renouvelables et les sources les moins plébiscitées que sont l'énergie nucléaire et le charbon (Figure 1). Le gaz naturel est souvent positionné par l'industrie gazière comme combustible de transition entre les combustibles fossiles et les combustibles renouvelables et ce positionnement est confirmé à la fois en termes de contenu CO₂ et de niveau de soutien. S'il existe une certaine opposition aux renouvelables, elle est souvent localisée et représente rarement plus de 10 % de la population. L'énergie nucléaire se place maintenant avant le charbon en termes de soutien. Cette évolution est due à la fois à la baisse du soutien au charbon et à une remontée de l'opinion positive après Fukushima.

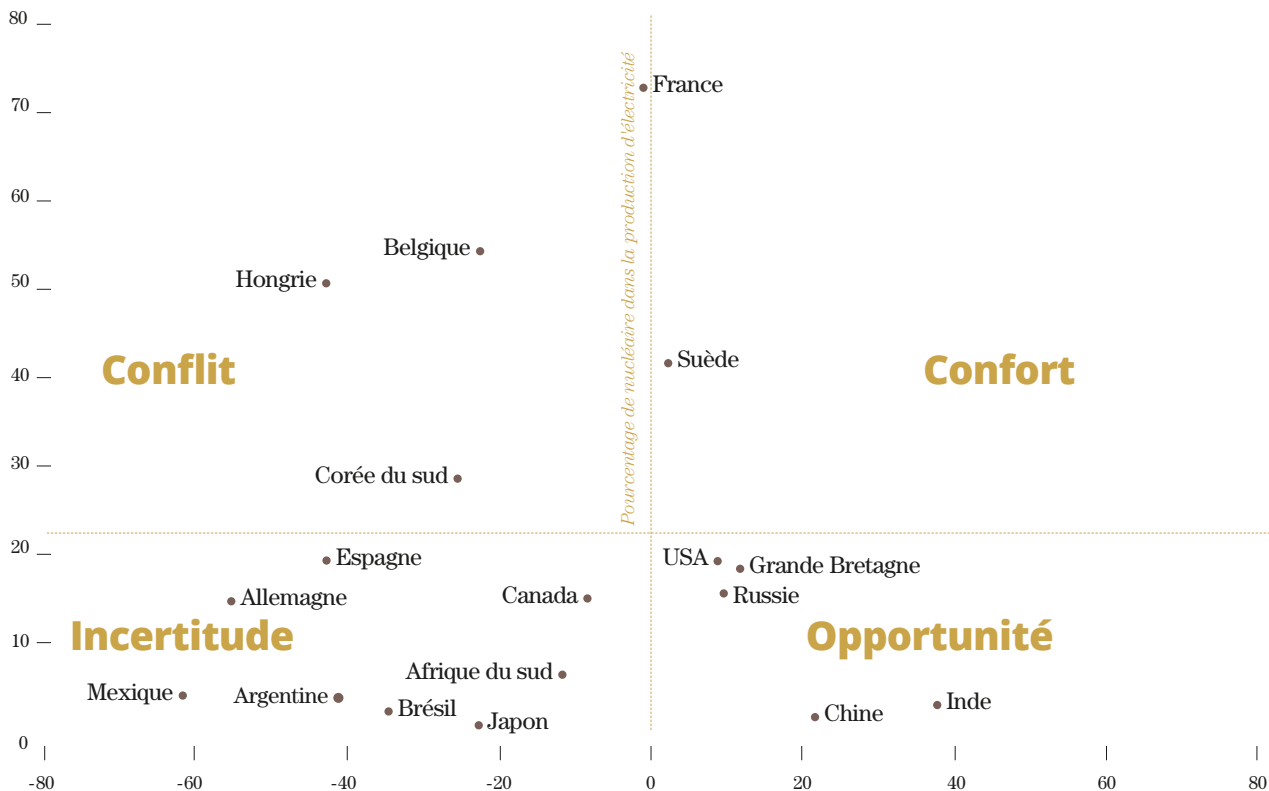
Figure 1: soutien/opposition globale par source de production
Indiquez votre niveau de soutien pour chaque source de production d'énergie : soutien fort, soutien moyen, opposition moyenne, opposition forte



L'OPINION PUBLIQUE FAVORABLE AU NUCLÉAIRE DANS SEPT PAYS SUR 24

Cette remontée a été rapide dans les mois qui ont suivi l'accident, passant de 38 % en avril 2011 à 45 % en septembre 2012. Depuis, on note une légère baisse à 42 %, mais le soutien reste plus fort qu'au moment de l'accident. À noter cependant que sur toute la période, et encore aujourd'hui, l'opinion publique globale montre une opposition franche envers l'énergie nucléaire cumulée sur les 24 pays de l'enquête. Ceci ne veut pas dire qu'il y a opposition nette partout. Au contraire, sept pays font état d'un soutien net en faveur de l'énergie nucléaire : les États-Unis, la Russie, la Suède, la Grande Bretagne, la Chine, l'Inde et l'Arabie saoudite. Il est important de noter qu'il existe de forts contrastes dans le soutien entre ces différents pays : l'Inde affiche le soutien le plus élevé avec 38 %

Figure 2: soutien du public lié à la dépendance au nucléaire par pays



comparé à la Suède (2 %), aux États-Unis (6 %) et à la Russie (8 %). Les pays où l'énergie nucléaire est la moins plébiscitée sont le Mexique (-62 %) où des découvertes récentes de gisements de gaz naturel ont conduit à l'abandon de projets de construction de centrales; et l'Allemagne (-56 %) où la sortie du nucléaire a été annoncée pour 2022. Sur la question du nucléaire, l'opinion publique se polarise. Cependant, dans certains pays, soutien et opposition au nucléaire s'équilibrent. C'est le cas en Suède, en France et en Pologne, où l'opposition dépasse tout juste le soutien à l'énergie nucléaire.

Si l'on compare le soutien net au niveau de dépendance sur l'énergie nucléaire dans chaque pays, il devient possible d'identifier les pays où l'opportunité de développement est le critère le plus important et ceux où un conflit concernant tout nouveau développement est le plus susceptible de se produire en raison de l'opposition du public, malgré une forte dépendance à l'énergie nucléaire

La majorité des pays se trouve dans le quadrant inférieur gauche (Figure 2), soit parce que la part du nucléaire dans leur mix énergétique a été réduite suite à des décisions politiques dans un environnement d'opinion publique négative, soit parce que la croissance de cette part est contrainte par la prépondérance d'une opposition au nucléaire. Ceci entraîne une incertitude quant à l'avenir de l'énergie nucléaire dans ces pays.

UNE OPINION QUI A TENDANCE À S'AMÉLIORER DANS LE TEMPS

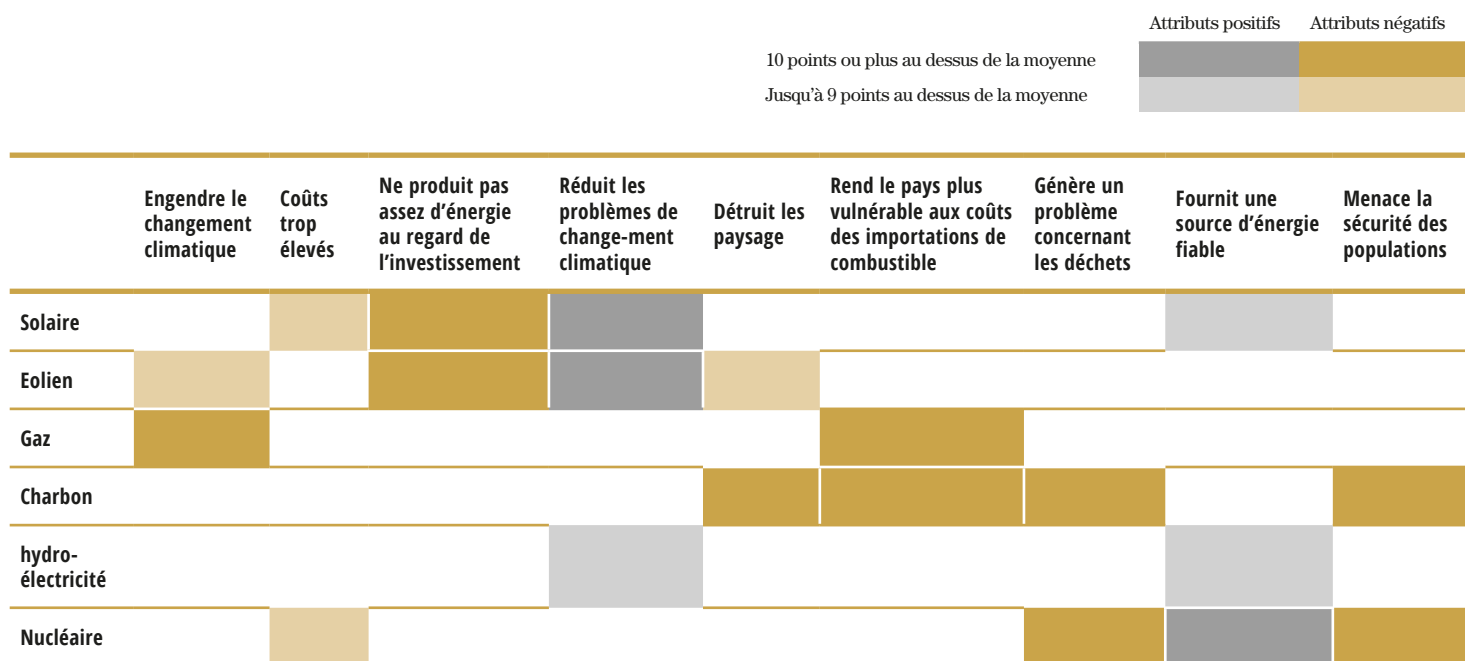
Globalement, l'opinion publique a évolué depuis Fukushima: le soutien net a augmenté de huit points en cumul depuis avril 2011). Mais encore une fois, de manière différenciée suivant les pays. Une amélioration est visible dans 18 des 24 pays depuis 2011, mais son étendue varie. C'est en Chine, en Russie, en Arabie saoudite et en France qu'elle est la plus forte, contrairement au Brésil, à l'Allemagne, au Mexique et aux États-Unis où l'amélioration est la plus faible sur la même période.

Dans une minorité de pays, le niveau de l'opinion publique a baissé plus encore depuis 2011, notamment en Hongrie, en Espagne et en Pologne ainsi qu'au Japon. La réaction négative à l'accident de Fukushima a d'ailleurs été retardée dans ce pays: l'opinion publique y était, au début, moins négative que dans certains autres pays, mais celle-ci s'était dégradée jusqu'en septembre 2012 à mesure que les conséquences étaient connues de la population. Depuis, l'opinion publique japonaise reste globalement opposée à l'énergie nucléaire. Cependant la tendance à l'amélioration contribue de manière positive aux efforts entrepris pour remettre en service les centrales nucléaires du pays.

DES PROFILS MARQUÉS

Des profils similaires de soutien et d'opposition à l'énergie nucléaire dominent sur les 24 pays. En général, les hommes sont plus favorables au nucléaire que les femmes (y compris dans des pays où le rôle des femmes est perçu d'une manière très opposée, par exemple la Suède et l'Arabie saoudite); le soutien au nucléaire

Figure 3 : attributs associés à chaque source d'énergie – Soutien à l'énergie nucléaire



augmente avec l'âge, le niveau du revenu et d'études. Les entrepreneurs et cadres supérieurs sont plus susceptibles de soutenir l'énergie nucléaire que les autres personnes interrogées. On peut tirer de cette caractérisation du soutien par une classe d'hommes d'affaires plus âgés une image de l'énergie nucléaire plutôt « conservatrice », tandis que les énergies renouvelables sont souvent perçues comme les « *challengers* », les nouveaux arrivants à la mode, attirant le soutien des jeunes.

DES CRITÈRES DE PERCEPTION TRÈS DIFFÉRENTS SELON LES ÉNERGIES

L'enquête de février 2015 a également abordé les caractéristiques attribuées à chaque type d'énergie (Figure 3). Il en ressort des perceptions très différentes selon les énergies.

On constate ainsi que les opposants au nucléaire l'associent majoritairement aux problèmes de déchets, de menace pour la sécurité civile, de destruction des paysages, de coûts trop élevés et de changement climatique. Cette énergie est peu perçue comme pouvant résoudre le changement climatique ou représentant une source d'électricité fiable. Rappelons ici que cette analyse vise

à mesurer les perceptions du public et non à déterminer si elles sont justes ou non. Même si elles sont erronées, de telles idées influent sur le soutien ou l'opposition du public. L'électricité produite à partir du charbon fait elle aussi l'objet de perceptions très négatives, moins fortes en ce qui concerne la menace pour la santé des populations que la vulnérabilité du pays vis-à-vis des coûts de l'importation des combustibles.

Ceux qui sont favorables au nucléaire ont plutôt une image positive. Mais même s'ils soutiennent le nucléaire, ils identifient les déchets, la sécurité des populations et les coûts comme des problèmes.

CONCLUSION

Cette étude permet de constater une amélioration du soutien global à l'énergie nucléaire depuis Fukushima. Si elle est géographiquement inégale, les chiffres les plus récents montrent que la période de retournement rapide de l'opinion publique s'est légèrement estompée dans les deux ou trois dernières années. Seuls 7 des 24 pays de l'enquête font état d'une opinion publique positive pour le futur développement de l'énergie nucléaire, et une opposition importante persiste.

Un contraste important existe entre les pays les plus positifs – la Chine et l'Inde – et les pays nucléaires les plus anciens : les États-Unis, le Royaume-Uni et la Russie.

Les raisons de l'opposition à l'énergie nucléaire sont bien documentées, bien qu'il soit évident d'après l'enquête que certaines se fondent sur des idées erronées (l'énergie nucléaire est une cause du changement climatique). L'objectif premier de la communication de l'industrie nucléaire doit donc être de corriger de telles idées fausses et de promouvoir les aspects positifs de cette énergie, comme son rôle dans la réduction du changement climatique. Ce point sera simple à résoudre. Il sera plus difficile de changer les perceptions concernant les déchets et les risques. Le fait que même ceux qui soutiennent le nucléaire soient préoccupés par ces problèmes souligne leur profond enracinement. Avec les progrès réalisés dans le traitement des déchets et l'association de performances solides et de nouvelles conceptions plus sûres de réacteurs, l'industrie nucléaire pourra commencer à progressivement réduire l'enracinement de cette opposition.



Manifestation anti-nucléaire

JOURNALISTE PAR ÉVIDENCE, STÉPHANE PAOLI A LONGTEMPS ÉTÉ LE CHEF D'ORCHESTRE DES *MATINALES* DE FRANCE INTER. DEPUIS 2010, IL Y ANIME *3D*, *LE JOURNAL DU DIMANCHE MIDI*. SON PLATEAU, TOUJOURS ÉCLECTIQUE, PORTE UNE PAROLE PLURIDISCIPLINAIRE, LIBRE ET NUANCÉE. DU NUCLÉAIRE, IL DIT QUE « C'EST UN FAIT. UNE RÉALITÉ, UNE DÉCOUVERTE IMPORTANTE QUI, DE FAIT, A CHANGÉ NOTRE VIE. »



“ Nous sommes à un moment où l'humanité doit choisir ses sources d'énergie ”

Stéphane Paoli

Journaliste

Dans son bureau de la Maison Ronde, Stéphane Paoli est entouré de livres. Ceux qu'il a écrits, ceux qu'il lit, ceux que les maisons d'édition lui envoient et qu'il offre à une association humanitaire quand il les a lus. Journaliste par passion, il est « naturellement ouvert à tout ce qui occupe l'espace de la Cité ». Ce qui l'intéresse, c'est « comprendre comment un événement, quel qu'il soit, est en interaction avec le reste ».

Étudiant en droit, il devient journaliste après avoir passé des nuits à « couper des dépêches à l'ORTF » pour payer sa première voiture. Une de ces nuits, celle du 21 juillet 1969, Neil Armstrong pose le pied sur la lune. Vivant l'événement au cœur de l'actualité, le jeune Stéphane décide de ne plus la quitter.

Quand on lui parle de nucléaire, « la première image qui s'impose toujours, c'est évidemment la bombe atomique. C'est une image rémanente. Elle est en nous ». Dans l'imaginaire, le cancer c'est « le crabe » et le nucléaire, « le champignon », deux images associées qui, pour l'homme de radio, « interrogent nos angoisses ». De fait, il remarque qu'il n'est pas facile d'en parler en dehors d'une approche « quasi théologique ». Et

se référant à l'Institut Curie, il rappelle que « le nucléaire a aussi sauvé des vies ».

Pour autant, l'atome ne lui inspire « rien de particulier, sauf à l'inscrire dans un espace extrêmement large qui va de la santé à la défense ». Et donc, « le nucléaire est un fait. C'est une réalité, une découverte importante. »

Stéphane Paoli estime que « la vraie question, complexe, que nous pose le nucléaire aujourd'hui et pour laquelle [il] ne [connaît] pas de réponse satisfaisante, c'est la question des déchets ». Toujours à la recherche de « la bonne distance », l'homme des *Matinales* juge qu'il s'agit là de « la transmission de quelque chose dont la durée de vie est très largement supérieure à la nôtre. Et qui donc interroge les générations futures ». Il trouve que ce qui est publié sur le sujet manque de visibilité et de précision. En tant que journaliste, il ne sait pas répondre à cette question qui pourtant « interroge notre responsabilité: qu'allons-nous laisser à ceux qui nous suivent? »

À l'heure de la COP21 et des perspectives climatiques plus qu'inquiétantes, Stéphane Paoli estime que « nous sommes à un moment où l'humanité doit choisir ses

sources d'énergie ». De son point de vue, et sans vouloir donner de leçon à quiconque, il n'a « pas l'impression que les questions soient vraiment posées, avec la visibilité qu'elles demandent. C'est un vrai problème de société qui nous concerne tous. »

Sans concession, le vieux loup de l'info trouve que « les responsables politiques et les médias n'abordent pas suffisamment frontalement cette question de l'énergie ». Pourtant, il rappelle « qu'il y a urgence. La temporalité des choix est engagée. Il faut qu'on aille vite. Et ce sont des questions extrêmement importantes, parce que l'action environnementale est une question existentielle. L'avenir de l'humanité est engagé. »

Il sait que « le nucléaire est un aspect du problème, un acteur important qui pose toutes sortes de questions ». Mais il estime



bio express

Né à Rabat (Maroc) au milieu du XX^e siècle, Stéphane Paoli débute sa carrière de journaliste à l'ORTF en 1969. Il rejoint Europe 1 en 1974 et y reste 20 ans avant de rejoindre France Inter où il anime le 7/9 jusqu'à ce qu'un accident cérébral le décide à « ne plus se lever le matin à 4 heures ». Il prend alors en charge, toujours sur France Inter, plusieurs émissions politiques avant d'animer depuis 2010, *3D le journal du dimanche midi*. Honnête homme, il a publié avec Alain Rey, linguiste et directeur en chef du Robert « *Causa. Échanger, partager, reconnaître.* », recueil épistolaire. En vue de la COP21, il est parrain de Place to B.

que « ces questions doivent être abordées en dehors de tout dogmatisme, de toute théologie, de toute idée préconçue, dans une perspective de mise à plat réelle. » Journaliste curieux à la recherche d'explications, il affirme: « posons toutes les questions pour de bon, avec des gens compétents qui savent de quoi ils parlent et ensuite, voyons ce qu'on peut faire. »

Comment le nucléaire peut-il se combiner avec d'autres choses? Existe-t-il une possibilité d'utiliser le nucléaire en en minimisant les effets négatifs ou dangereux? Il aimerait trouver les réponses à ces questions, car il admet que « s'agissant du nucléaire, [il est] absolument un béotien ». Passant régulièrement à proximité de centrales nucléaires, il les voit, les connaît. Mais reconnaît qu'il « ne les [a] jamais visitées. C'est sûrement passionnant! » Rendez-vous est pris! ■



Société
Française
d'Énergie
Nucléaire

GLOBAL

2015 21-24 septembre Paris, France

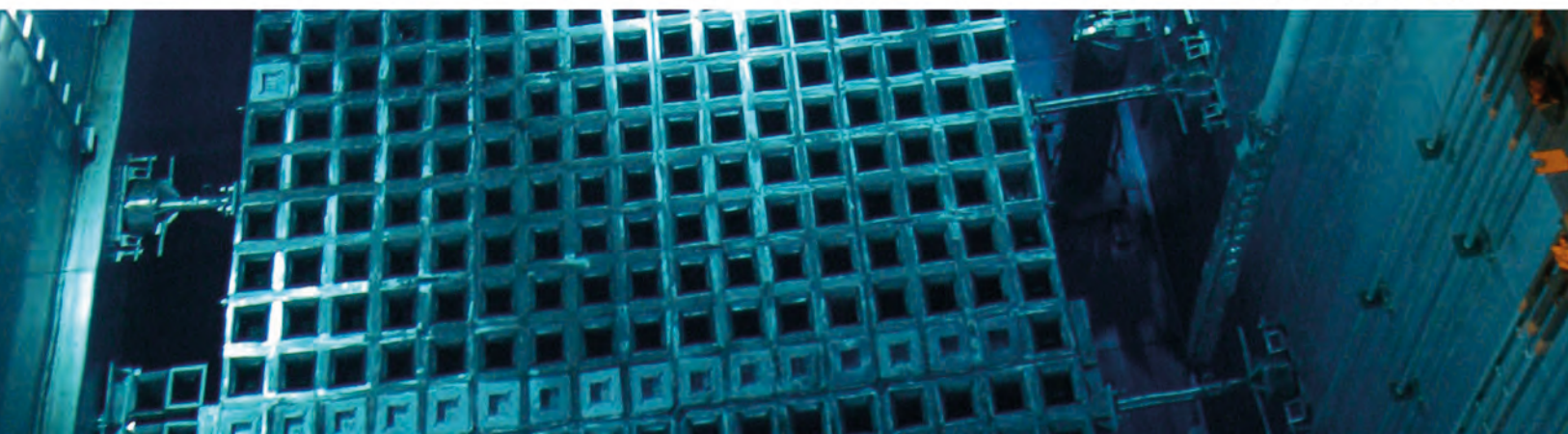
LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE POUR UN FUTUR BAS-CARBONE

Le cycle du combustible nucléaire est un élément clef du déploiement de systèmes nucléaires durables qui permettront de lutter contre le réchauffement climatique.

La Conférence GLOBAL 2015 traite des problématiques et défis du cycle du combustible, de la mine au recyclage et au stockage des déchets, aujourd'hui et demain, pour construire un futur bas-carbone.

INSCRIVEZ-VOUS MAINTENANT !

Informations sur
fr.amiando.com/GLOBAL-2015



L'AVENIR POUR ÉNERGIE, C'EST S'ENGAGER AU SERVICE DE LA SÛRETÉ DE 250 RÉACTEURS DANS LE MONDE.

7 12 054 923 ROS NANTERRE - HAVAS WORLDWIDE PARIS - Crédit photo : Yann Geoffroy

Chez AREVA, nous savons que les défis énergétiques de demain exigeront toujours plus de vigilance. En assurant la maintenance et la modernisation de 250 réacteurs dans le monde, nous réaffirmons notre volonté de faire de la sûreté un engagement d'avenir et un gage de confiance. C'est aussi ça, avoir l'avenir pour énergie. areva.com

L'énergie est notre avenir, économisons-la!



AREVA
l'avenir pour énergie