

REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE



L'INFORMATION DE RÉFÉRENCE SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

.46 DÉCRYPTAGE

Les coûts de production
du parc nucléaire français

.50 SCIENCES ET TECHNIQUES

Avec le CFETR, la Chine accélère
le développement de la fusion
nucléaire

.58 NUCLÉAIRE ET SOCIÉTÉ

L'électricité propre,
nouvel or noir de la voiture



.9 DOSSIER INNOVATIONS, TECHNOLOGIES, EXPORT

Chine, le nouveau géant du nucléaire



DÉCOUVREZ LE NOUVEAU VISAGE DE L'ÉLECTRICITÉ BAS CARBONE.

L'électricité produite par EDF en France en 2014 a émis 15 fois moins de carbone que la moyenne européenne du secteur, grâce à un parc de production composé à 84 % de nucléaire et d'énergies renouvelables. Nous mettons en avant les femmes et les hommes qui innovent et font ensemble d'EDF le champion de l'électricité bas carbone*.

Rejoignez nos équipes sur edf.fr



Centrale nucléaire de Penly.

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

* Source : étude PWC « Facteur carbone européen » – Comparaison des émissions de CO₂ des principaux électriciens européens en 2014 : moyenne Europe : 313 kg de CO₂/MWh – EDF SA : 20 kg de CO₂/MWh.

REVUE GÉNÉRALE NUCLÉAIRE

**ÉDITEUR
SFEN**

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

DIRECTRICE DE LA PUBLICATION
Valérie Faudon

RÉDACTEUR EN CHEF
Boris Le Ngoc

RÉDACTION SFEN
Aurore Ernie Daigremont, Cécile Crampon,
Alexandra Bender, Céline Cudelou,
Sylvie Delaplace, Tristan Hurel

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

ABONNEMENT/ VENTE AU NUMÉRO
Tél. : 01 53 58 32 10
www.revuegeneralenucleaire.org/
abonnement

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

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

Prix du numéro
France : 25 € TTC

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

TIRAGE
3 000 exemplaires
Impression : Galaxy
© couverture : CGN
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 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...

.09 DOSSIER

INNOVATIONS, TECHNOLOGIES, EXPORT

La Chine, le nouveau géant du nucléaire

Lancée tardivement dans le nucléaire, la Chine rattrape son retard aux moyens d'investissements importants soutenus par une politique ambitieuse, désireuse d'en faire la première puissance nucléaire de la planète.

.45 PARTENARIATS

L'EPJ-N, première revue scientifique des sciences du nucléaire

.46 DÉCRYPTAGE

- Une électricité nucléaire bon marché en France
- Les coûts de production du parc nucléaire français

.50 SCIENCES ET TECHNIQUES DU NUCLÉAIRE

Avec le CFETR, la Chine accélère le développement de la fusion nucléaire

.54 REPORTAGE

Communication de crise : 20 heures de pression médiatique simulée

.58 NUCLÉAIRE & SOCIÉTÉ

L'électricité propre, nouvel or noir de la voiture

.62 REGARD SUR

Bernard Debré, médecin et homme politique



www.revuegeneralenucleaire.fr



Transition énergétique allemande : les indicateurs sont au rouge

Début octobre le cabinet de conseil McKinsey a réalisé un nouveau point d'étape de la transition énergétique allemande (*Energiewende*). Un constat sans appel en est ressorti. Si l'Allemagne a pratiquement atteint son objectif de 35 % d'énergies renouvelables dans sa production électrique, les indicateurs environnementaux ne suivent pas, au point que l'Allemagne, toujours *addict* au charbon, semble avoir perdu de vue l'objectif principal de la transition énergétique : la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, non seulement le pays ne parviendra pas à atteindre sa cible de 40 % de réduction des émissions de CO₂ en 2020 par rapport à 1990, mais ses ménages paient désormais l'électricité la plus chère d'Europe et la grogne monte chez les industriels, jusqu'à présent préservés. Un constat en signe d'avertissement qu'avait relevé France Stratégie fin août dans une note. L'organisme du Premier ministre rappelait notamment que malgré tous ses efforts, l'Allemagne demeure l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre en Europe et dans le monde, très loin devant la France. Autant de signaux qui devraient prêter à réfléchir dans une France qui se prépare à débattre de son avenir énergétique dans le cadre des discussions sur la Programmation pluriannuelle de l'énergie.

Valérie Faudon

Déléguée générale de la SFEN

Cigéo

Les riverains soutiennent le projet

LANDRA A ENGAGÉ DEPUIS FIN 2016 DES DISPOSITIFS DE CO-CONSTRUCTION AFIN D'IMPLIQUER PLUS FORTEMENT ET PLUS LARGEMENT LES ACTEURS LOCAUX ET LES CITOYENS DANS LE PROJET CIGÉO.

Pour identifier les attentes des habitants résidant à proximité du futur centre Cigéo, l'Andra a mené au début de l'été une campagne de porte à porte. Ainsi, dans 45 communes, 18 ambassadeurs sont allés à la rencontre des 2674 ménages qui leur ont ouvert leur porte, soit 40 % du total. Il ressort de ces échanges que 33 % des riverains sont favorables au projet, 35,1 % sont neutres ou indifférents et 18,8 % sont explicitement défavorables. Enfin, 13,1 % étaient sans avis identifiable. Contrairement à une idée reçue : plus les riverains sont proches du site de Cigéo, plus ils y sont favorables. Pour réaliser cette enquête auprès des

citoyens, l'Andra s'est appuyée sur la *start-up* Liegey Muller Pons.

La lassitude des habitants face aux violences

L'enquête révèle aussi l'exaspération des riverains face aux comportements d'une partie des opposants (la plupart ne sont pas des locaux) et au climat de tension qui en découle. En effet, mois après mois, l'occupation illégale du site du Bois Lejuc par des zadistes se poursuit, et avec elle des violences. L'un des manifestants a ainsi été grièvement blessé en août 2017. Cet hiver, les opposants avaient notamment attaqué et dégradé l'écothèque de l'Andra.



Galleries du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Nouveau nucléaire

Le nucléaire, une priorité pour les Émirats arabes unis

DÈS 2018 LES ÉMIRATS ARABES UNIS SERONT LE PREMIER PAYS DU GOLFE À COMPTER LE NUCLÉAIRE DANS SON MIX DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE.

Les Émirats arabes unis (EAU) réaffirment leur engagement en faveur de l'énergie nucléaire. Du 30 octobre au 1^{er} novembre, l'émirat accueille pour la première fois la conférence ministérielle internationale sur l'énergie nucléaire de l'AIEA. Une conférence à replacer dans le contexte du démarrage

courant 2018, de l'unité 1 de la centrale Barakah. Quatre réacteurs à eau pressurisée APR-1400 sont actuellement en construction par un consortium mené par le Coréen Kepco. Une fois achevés et connectés au réseau, à l'horizon 2020, les quatre réacteurs de la centrale de Barakah fourniront

près du quart des besoins en électricité du pays. Actuellement, les EAU recourent massivement à des centrales fossiles pour la production d'électricité, bien que leur secteur photovoltaïque soit également en plein développement.



La centrale de Barakah, dont l'unité 1 attend l'autorisation de charger son combustible, devrait voir ses quatre réacteurs connectés au réseau entre 2018 et 2020

Sûreté

Cigéo : les préconisations de l'IRSN sur les colis bitumineux

En mai, l'IRSN a publié ses conclusions d'analyse sur le Dossier d'options de sûreté du projet Cigéo. Estimant que le projet a atteint une maturité technique satisfaisante, 90 % des options de sûreté étant validées, l'IRSN a toutefois mis en avant un risque d'emballage thermique des colis d'enrobés bitumineux en cas d'incendie. Ces colis, au nombre de 40 000,

représenteront 18 % du nombre total des colis destinés à être stockés dans Cigéo. Pour y remédier, l'institut a préconisé en septembre deux options : la mise en sécurité des fûts et l'amélioration du système d'évacuation des déchets en cas d'incendie. Pour l'IRSN, la première solution pourrait se faire en vitrifiant les déchets. Une fois vitrifié, tout risque d'ignition serait

écarté mais pareil traitement thermique suppose la mise en œuvre d'un système de collecte et de filtration des effluents gazeux qui n'est pas prévu dans le projet actuel. Dans le second cas, l'IRSN juge que l'Andra n'est pas en mesure, avec son système de manutention envisagé, d'évacuer rapidement un fût de déchets subissant un emballage thermique.

Atlas des énergies mondiales



En 150 cartes et infographies, cette quatrième édition de l'Atlas des énergies mondiales permet de comprendre les enjeux énergétiques du XXI^e siècle. Charbon, nucléaire, pétrole, hydraulique, éolien, photovoltaïque : toutes les énergies, traditionnelles ou renouvelables y sont étudiées à la loupe, notamment sous l'angle de la limitation des ressources, de la fluctuation des prix, de la gestion des pollutions et des déchets ou encore de la prévention des risques. Bref, le livre fait état d'une énergie sous contraintes. D'autres questions sont analysées et émaillent également le contenu : qui détient les ressources ? Qui maîtrise la production ? Qui approvisionne le monde ? Cette nouvelle édition fait le point sur les techniques, l'économie, la géopolitique de l'énergie et présente les actions à mettre en œuvre pour faire de l'énergie un facteur de développement plus équitable et plus respectueux de l'environnement.

Bertrand Barré et Bernadette Mérenne-Schoumaker,

Atlas des énergies mondiales, Autrement, septembre 2017, 24 €

Inde

Narendra Modi veut apporter l'électricité à 40 millions de foyers défavorisés

Le Premier ministre indien, Narendra Modi, veut électrifier complètement son pays d'ici décembre 2018. Le plan prévoit de raccorder le quart des ménages indiens qui n'ont toujours pas accès à l'électricité. Le projet mobilisera un peu plus de deux milliards d'euros et sera gratuit pour les citoyens concernés. Depuis 2015, plus de 15 000 villages ont déjà été reliés au réseau électrique dans le cadre d'un autre programme de développement, et 3 000 seraient encore en attente.



En Inde, 330 millions de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité (AIE)

Diesels d'ultime secours

Les premiers travaux de renforcement post-Fukushima arrivent à terme



La construction du DUS de Saint-Laurent-des-Eaux fournit une expérience utile pour leur installation sur l'ensemble des centrales

AVEC L'INSTALLATION PROGRESSIVE DES DIESELS D'ULTIME SECOURS, LES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES SE DOTENT DE GARANTIES DE SÛRETÉ SUPPLÉMENTAIRES TIRÉES DE L'EXPÉRIENCE DE L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA.

En 2011, après Fukushima, l'ASN a demandé aux exploitants d'augmenter le niveau de sûreté pour pouvoir parer aux situations exceptionnelles. Les premiers travaux de mise en conformité arrivent progressivement à leur terme. C'est notamment le cas des diesels d'ultime secours (DUS) de la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher), site pilote pour ces chantiers destinés à permettre l'alimentation des centrales en continu. En effet, face à une situation critique, les DUS sont en capacité de garantir le fonctionnement des systèmes de refroidissement de l'installation si les autres systèmes viennent à dysfonctionner. Pour cela, ils sont prévus pour résister à des situations extrêmes,

notamment de catastrophes naturelles (séisme, inondation, tornade), bien plus importantes que celles prises en compte à la conception des installations et lors des réévaluations de sûreté. Les chantiers de mise à niveau de sûreté post-Fukushima arrivent également à leur terme sur certains sites d'AREVA NP et de New AREVA. En matière de séisme par exemple, l'ASN a ainsi mis en place le référentiel SMS (Séisme majoré de sécurité). Les installations nucléaires doivent résister à un séisme hypothétique d'une énergie cinq fois supérieure à celle du séisme le plus important recensé depuis 1000 ans dans un rayon de 50 km autour de l'installation.

Transport

Le Japon a été livré en combustible Mox par AREVA

Après près de trois mois (du 5 juillet au 21 septembre) de voyage en mer sous haute surveillance à bord de deux navires britanniques, seize emballages de combustible Mox, retraité par AREVA sur le site de la Hague, sont arrivés au Japon pour fournir la compagnie japonaise Kepco. Il s'agissait du 6^e transport de ce combustible recyclé vers le Japon, et surtout du premier depuis 1999. Le Mox alimentera notamment la centrale de Takahama, dont l'un des réacteurs vient de redémarrer.



Le Mox envoyé au Japon est fabriqué à partir de combustibles japonais

Société civile

Journées portes ouvertes dans les installations nucléaires

ANNÉES APRÈS ANNÉES, LES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES CONTINUENT DE FIGURER PARMIS LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES LES PLUS VISITÉES DE FRANCE.

Les 7 et 8 octobre, dans le cadre des Journées de l'industrie électrique (JIE), 1250 volontaires EDF, salariés, alternants ou retraités, étaient mobilisés pour accueillir les 20 000 visiteurs qui ont pu découvrir 63 sites de production d'électricité du groupe, mais aussi de R&D ou de

logistique. Créées en 2011, les JIE permettent au plus grand nombre de découvrir ces sites industriels d'exception. Au côté des visites organisées tout au long de l'année, ces journées contribuent à faire d'EDF la 2^e entreprise la plus visitée de France.

De son côté, l'Andra organisait le 24 septembre la 23^e édition de ses Journées portes ouvertes sur le Centre de stockage de l'Aube. En tout, plus de 1 000 visiteurs ont pu mieux comprendre la gestion des déchets radioactifs en visitant la zone de stockage.



Guidés par le chef de service délégué chaudronnerie et robinetterie, des visiteurs ont pu découvrir la centrale de Paluel lors des JIE 2017

CRÉATION D'UN CAMPUS « MAINTENANCE EN ENVIRONNEMENT SENSIBLE » AU BLAYAIS

Labellisé pour la rentrée 2017 par l'académie de Bordeaux, un nouveau Campus des métiers et des qualifications dédié à la « maintenance en environnement sensible » a ouvert à proximité de la centrale du Blayais (Gironde), avec le lycée professionnel de l'Estuaire de Blaye en établissement support. Portée par la Région Nouvelle-Aquitaine et le rectorat, la création de ce pôle d'excellence répond à la volonté de faciliter l'insertion professionnelle et de fluidifier les parcours vers l'enseignement supérieur grâce à un réseau d'établissements. Il devrait aussi favoriser le renouvellement des compétences, dans un contexte d'évolution des exigences, de transformation des métiers et de développement du numérique.



Retrouvez toute l'actualité de la filière nucléaire sur revuegeneralenucleaire.fr

- L'industrie nucléaire part à la recherche de sa « licorne »
- Séisme : fallait-il arrêter la centrale du Tricastin ?
- Rapport Greenpeace : alerte ou coup de com' ?
- L'expertise nucléaire française dans le suivi de charge séduit en Europe



The Nuclear Institute's
11th International Conference on the
**Transport, Storage and Disposal
of Radioactive Materials**

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

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

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

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

CONFERENCE CONTACT DETAILS

Event Organiser

For any further details on the conference please contact the event organiser Amanda MacMillan, The Nuclear Institute
T: +44 (0) 203 475 4701
E: events@nuclearinst.com

Exhibition and Corporate Sponsorship Opportunities

For further information on the exhibition or corporate sponsorship opportunities please contact Lisa Jones Taylor, Nu-Tech Associates Ltd
T: +44 (0)1946-695554
E: sales@nu-techassoc.co.uk

Official Partners



Conference:

15-17 May 2018

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

Opening Reception:

ARUP

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

Conference Banquet:

Premium venue to be announced Summer 2017.



INNOVATIONS, TECHNOLOGIES, EXPORT

Chine, le nouveau géant du nucléaire

PARTIE SUR LE TARD, LA CHINE INVESTIT DÉSORMAIS DANS TOUS LES SECTEURS DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AVEC LA VOLONTÉ DE FERMER SON CYCLE, D'AVOIR LE PREMIER PARC DE PRODUCTION ET DE PROPOSER LES TECHNOLOGIES DE RÉACTEURS LES PLUS AVANCÉES POUR SA PRODUCTION NATIONALE D'ÉLECTRICITÉ ET POUR L'EXPORT.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE

Les grandes lignes du programme
nucléaire chinois **10**

Historique de la coopération
franco-chinoise **13**

La coopération franco-chinoise
aujourd'hui **17**

La stratégie de la Chine
dans l'aval du cycle **20**

Un Hualong multiforme **24**

La Chine, un enjeu majeur
pour la filière française **27**

« La Chine est un marché
concurrentiel mais incontournable » **29**

L'industrie nucléaire chinoise
en quête d'internationalisation **34**

Sûreté nucléaire chinoise,
un impératif bien compris **36**

Taishan, premier jalon de l'EPR **39**

▼ **CEFR**
China
Experimental
Fast Reactor.

▼ **HTGR**
High
Temperature
Gas Reactor.

Les grandes lignes du programme nucléaire chinois

Par **Dominique Ochem**, conseiller nucléaire à l'ambassade
de France en Chine, et **Loeïza Cavalin**, adjointe du conseiller
nucléaire à l'ambassade de France en Chine.



en substance...

Avec sa politique de développement de l'énergie nucléaire, la Chine entend démontrer sa capacité à entrer dans le petit club des pays exportateurs d'une technologie avancée. Elle a testé de nombreux standards et met maintenant en avant le Hualong (« dragon chinois »), un réacteur de moyenne puissance, évolution des modèles réalisés avec la France, tant pour le marché domestique que pour l'international. Dans le domaine du cycle, la Chine, quasiment autonome sur les étapes de l'amont, entend également développer la stratégie du cycle fermé, à l'instar de la France. Dans cette perspective, des négociations pour un partenariat franco-chinois ambitieux dans ce domaine sont en cours. Enfin, elle se donne les moyens d'une position dominante dans le futur, en lançant de nombreux projets de 4^e génération, avec, entre autres, le réacteur à neutrons rapides **CEFR**▼ de 600 MWe, ou le réacteur à caloporteur gaz **HTGR**▼ de 100 MWe qui devrait démarrer l'an prochain.

Puissance montante sur la scène mondiale du nucléaire, la Chine continue sur sa lancée pour atteindre l'objectif de se doter d'ici 2020 d'un parc nucléaire industriel équipé d'une puissance installée de 58 GW en exploitation et de 30 GW en construction. C'est ce qu'affiche le 13^e plan quinquennal (2016-2020). En septembre 2017, le parc national dispose d'une puissance installée de 34,43 GWe en exploitation pour 36 unités et de 23,20 GWe en construction pour 20 unités. Si la Chine veut pouvoir atteindre son objectif, il faudrait qu'elle lance la construction de six

à huit nouvelles tranches chaque année (ce qu'elle a du mal à faire actuellement). Au-delà de ces prévisions, la Chine vise un parc d'une capacité installée de 150 à 200 GW à l'horizon 2030, soit environ la moitié du parc mondial actuel.

Ces données, combinées au constat d'une augmentation de la consommation d'électricité pendant le premier semestre 2017 et aux réformes engagées sur la baisse du prix du marché de l'électricité en 2016, illustrent l'ambition du pays d'augmenter la part du nucléaire dans son mix énergétique: de 3,56 %¹ aujourd'hui, elle passerait à 5 % d'ici 2020 et à environ 10 % d'ici 2030.

1. 3,56 % correspond à la part du nucléaire dans la production électrique nationale. En termes de capacité installée, le nucléaire représente 2,04 %.



Le HTGR illustre les efforts de la R&D de la Chine dans le développement des technologies nucléaires de 4^e génération

Cet effort est bien sûr lié à la volonté de contrôler les émissions de gaz à effet de serre et la pollution générée par le charbon, mais il a aussi une valeur symbolique de démonstration de la Chine à accéder à la maîtrise d'une technologie complexe, à la fois sur son marché domestique, mais aussi à l'export.

En cohérence avec l'ambition de développement du parc, la Chine a choisi la politique du cycle fermé, et là encore la France est considérée comme le partenaire modèle. Les négociations en cours portent sur la construction d'une usine de retraitement de 800 tonnes par an et d'une usine de combustible Mox sur le modèle de Melox. À l'horizon 2030 le besoin sera de trois fois cette capacité.

Le déploiement d'un parc de réacteurs rapides est le prolongement naturel de cette politique. Là aussi, le programme est impressionnant, avec un premier démonstrateur de 600 MWe annoncé pour 2023, planning sans doute très optimiste mais qui démontre le volontarisme du programme. L'ambition en matière de R&D est impressionnante, la Chine essaie de nombreuses technologies: des réacteurs à caloporteurs gaz, plomb bismuth, eau super critique, des ADS[®], des SMR[®], etc. Même si tous ces projets n'aboutissent pas, ils stimulent l'accumulation d'une expertise et la formation

d'un potentiel humain qui ont toutes les chances de faire de la Chine la puissance nucléaire du XXI^e siècle.

L'AUTONOMIE SOUHAITÉE SUR L'AMONT ET L'AVANT DU CYCLE

La Chine souhaite acquérir une autonomie sur la partie amont du cycle, c'est-à-dire les activités qui englobent les mines, la conversion, l'enrichissement et la fabrication du combustible. Le pays est quasiment parvenu à cet objectif et fait même parfois face à des surcapacités, à l'exception du secteur de la mine, où la Chine mène une stratégie de sécurisation dynamique des ressources, même si le résultat n'est pas toujours au rendez-vous.

S'agissant de l'aval du cycle, la Chine s'est intéressée dès les années 1980 à la politique du cycle fermé, mais ce n'est que récemment que des installations purement civiles ont été construites.

C'est ainsi qu'une usine prototype de retraitement de 50 t/an et une usine de fabrication de combustible Mox de 500 kg/an ont été construites sur le site 404, près de Diwopu dans le désert de Gobi. Le démarrage du pilote de 50 t n'a pas fonctionné correctement et l'usine serait à l'arrêt aujourd'hui. Nous n'avons pas d'information sur la partie combustible Mox.

Dans le but de remplacer ce pilote et de se former à la technologie Purex, la CNNC a décidé de lancer la construction d'une usine de 200 t/an avec ses moyens propres, prévue pour 2020. Toutefois il a été décidé récemment d'en soustraire l'atelier vitrification, pour lequel un appel d'offres compétitif est en cours (AREVA est en lice). Par ailleurs la Chine a entamé en 2007 des négociations avec la France pour l'acquisition d'une usine commerciale de 800 tonnes sur le modèle de l'UP3 à La Hague, prévue pour 2030. Les négociations pour ce projet, en gré à gré, sont entrées dans une phase décisive, et un contrat commercial pourrait être signé en 2018. Le projet comprend également une usine de fabrication de combustible Mox pour réacteurs à eau légère.

Enfin, toujours dans ce domaine du cycle, AREVA et CNNC sont en cours de négociation pour un accord ambitieux qui englobe tous les domaines du cycle, de la mine aux déchets, en passant par les opérations d'assainissement, de démantèlement et de logistique.

UN PARC INDUSTRIEL NUCLÉAIRE DIVERSIFIÉ ET EN CONSTANTE ÉVOLUTION

La Chine, fidèle à ses pratiques, a testé plusieurs filières en les achetant à l'étranger, avant de faire le choix de sa propre stratégie avec des réacteurs sinisés. C'est ainsi qu'elle a commencé par les réacteurs à eau pressurisée français dans les années 1990, les CANDU canadiens en 2002-2003, les VVER russes en 2007 (deux sont actuellement en construction), les EPR (première connexion à la grille de Taishan 1 attendue début 2018) et les AP1000 de Westinghouse (le premier à devoir être connecté à la grille se trouve sur le site de Sanmen, prévu cette année). Aujourd'hui, le paysage n'est pas encore stabilisé:

- ▶ **Pour la filière de moyenne puissance**, il semble que l'on se dirige vers la construction d'un nombre limité d'AP1000, peut-être une dizaine, très loin de l'objectif initial de 40 à 50, et de réacteurs Hualong, « semi-convergés » puisqu'on ne voit pas comment les concepts CNNC et CGN pourraient aller beaucoup plus loin que la convergence actuelle, qui porte principalement sur le « triple S » (« *steam supplier system* »).
- ▶ **Pour la filière de grande puissance**, le modèle théorique est le CAP 1400, et au-delà le CAP 1700, évolution de l'AP1000 et pour lequel la Chine possède l'intégralité des droits. Néanmoins, le manque de maturité de ce modèle pourrait laisser une chance à l'EPR. Sur ce plan, il reste encore à négocier les tranches 3 et 4 de Taishan. De toute façon, il faut d'abord réussir le démarrage commercial des deux premières tranches.

ADS
Accelerator Driven
Systems.

SMR
Small Modular
Reactor.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**

“
**À horizon 2030,
la Chine vise un parc
nucléaire installé
de 150 à 300 Gw.**”

- › **S'agissant du rythme de déploiement**, on voit bien que la Chine a du mal à suivre sa feuille de route. Ceci est dû d'une part à un début de saturation des sites actuels et à la nécessité d'ouvrir des sites en bordure de rivière, processus compliqué et qui n'a pas encore commencé, et d'autre part à une certaine inertie des autorités locales qui ne suivent pas toujours la politique du gouvernement central.
- › **Pour ce qui est du futur à moyen terme**, la filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR) reste la filière de référence pour la 4^e génération. L'objectif actuel est un déploiement à partir de 2035 avec un premier prototype, le CFR 600, dont le démarrage est prévu pour 2023. Initialement motivé par la stratégie nationale du cycle fermé qui consiste à récupérer des matières valorisables pour les réutiliser en réacteurs sous forme de Mox, l'objectif annoncé est cependant en décalage avec la maîtrise actuelle : le petit réacteur CEFR de 20 MWe, fourni par la Russie et fonctionnant avec du combustible à l'uranium enrichi se limite à quelques centaines d'heures équivalent pleine puissance. Ni la Russie, ni la Chine ne maîtrisent pour l'instant le combustible Mox.

UNE R&D FOISSONNANTE

La Chine possède les moyens, la volonté politique, et joue également de la diversité de ses acteurs qui se font concurrence entre eux pour lancer une multitude de

projets dont l'inventaire englobe à peu près tout ce que la communauté internationale a envisagé durant les vingt dernières années. Habités par un enthousiasme et un sens de la prise de risque que nous avons oublié depuis longtemps, ces acteurs n'hésitent pas à lancer le début des travaux de génie civil, voire les achats de composants, alors même que les concepts ne sont pas stabilisés, ni bien sûr la certification validée, ce qui explique en partie des durées de construction bien inférieures à ce que les pays occidentaux peuvent espérer. On citera, entre autres :

- › **le HTGR (HTR-PM)**, à caloporteur gaz, de 200 MWe (en fait deux cœurs pour la même unité), dont la fin de construction est attendue pour fin 2017 à Shidaowan, est conçu afin de répondre aux besoins de production électrique et aussi au dessalement de l'eau de mer et au chauffage urbain ;
- › **le réacteur à sels fondus**, au combustible au thorium et porté par la SNPTC ;
- › **plusieurs projets de SMR**, que ce soit sur terre ou embarqué, et qui devraient contribuer au développement des espaces isolés de la Chine ;
- › **un projet de réacteur refroidi au plomb bismuth ;**
- › **un projet de réacteur sous critique associé à un accélérateur (ADS).**



La Chine, qui aspire à fermer son cycle du combustible, veut développer une usine de retraitement-recyclage des combustibles nucléaires sur le modèle des usines françaises de La Hague (Manche) et de Melox (Gard)

UNE PERCÉE DANS LE MARCHÉ MONDIAL DU NUCLÉAIRE

L'ambition de la Chine vis-à-vis de son programme nucléaire est logique et n'est pas nouvelle : après avoir acquis une technologie étrangère, on réalise la sienne, que l'on essaie dans un troisième temps d'exporter. C'est le projet chinois, qui commence par la percée du marché anglais, en tentant d'implanter son Hualong sur le site de Bradwell. Par ailleurs, plusieurs mémorandums sont signés avec de nombreux

pays, mais le seul qui apparaisse crédible aujourd'hui concerne la fourniture en Argentine d'un réacteur CANDU. Ce projet fonctionne comme un produit d'appel pour proposer un Hualong dans un deuxième temps. La stratégie emblématique de développement des nouvelles routes de la soie possède bien entendu son volet nucléaire et on entend parler d'une quarantaine de projets potentiels, mais il y a là un effet d'annonce dont la crédibilité paraît aujourd'hui bien faible. ■

Concentrations en cours chez les électriciens chinois

Longtemps numéro un mondial de l'électricité, EDF a perdu sa première place à l'été 2017 au profit de *China Energy Investment Corporation*, nouveau géant de l'énergie, résultat de la fusion des sociétés publiques chinoises Shenhua, premier producteur de charbon et détenteur d'un parc de production thermique au charbon de 82 GW, et Guodian, un des principaux fournisseurs d'électricité chinois et déjà bien ancré dans les énergies renouvelables. Une autre fusion serait aussi en vue, entre Huaneng, ex n°1 chinois de l'électricité, et contrôlant aux côtés de CNNC la centrale nucléaire de Changjiang, et SPIC, n°5, et société mère de l'entreprise nucléaire SNPTC. Pour les autorités, ces fusions d'entreprises publiques viseraient notamment à mettre sur pied des industriels plus forts et plus puissants. Ce faisant, elles pourraient modifier la configuration de l'industrie nucléaire chinoise.

Historique de la coopération franco-chinoise

Par **Pierre-Yves Cordier**, assistant relations internationales à la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) du CEA



en substance...

Le partenariat entre la Chine et la France sur le nucléaire se caractérise avant tout par sa flexibilité et son adaptation – comment pourrait-il en être autrement au vu des transformations spectaculaires de la Chine au cours de ces trente dernières années ? Il se distingue également par sa profondeur et sa richesse, touchant directement ou indirectement la vie de centaines de personnes, ingénieurs, chercheurs, dirigeants, des deux pays. Ce partenariat comprend plusieurs facettes, allant de la R&D à la sûreté, et intégrant une dimension industrielle et régaliennne. Sa vitalité est une autre de ses caractéristiques. Cette année, la montée en puissance de nombreux projets consolidera ce partenariat unique.

LE PROGRAMME NUCLÉAIRE CHINOIS : UN PEU D'HISTOIRE

La Chine a une longue histoire nucléaire, marquée par une alternance et une complémentarité entre aide extérieure et adoption de technologies étrangères, et développement des capacités domestiques. Quelques dates sont structurantes :

- › lancement du programme dans les années 1950, initialement à des fins militaires, avec dès son commencement un transfert technologique considérable venant de l'URSS ;
- › malgré le refroidissement des relations avec les Russes vers juin 1959, les projets lancés avec leur aide sont poursuivis avec les compétences internes acquises, et aboutissent au premier test nucléaire chinois le 16 octobre 1964 ;
- › le nucléaire civil est lancé dans les années 1970 par le Premier ministre de l'époque, Zhou Enlai. C'est après la Révolution culturelle qu'est prise la décision de construire une première centrale de 300 MWe sur le site de Qinshan en novembre 1982 ;
- › le développement nucléaire chinois se poursuit avec des phases plus ou moins rapides, en s'appuyant fortement sur les technologies étrangères : construction de Daya Bay (technologie française, qui sera choisie pour la filière chinoise de 2^e génération), CANDU (technologie canadienne), et VVER (technologie russe) ;
- › dans les années 2000, la Chine veut se préparer à passer à la 3^e génération de

réacteurs nucléaires, et lance un appel d'offres international. L'AP1000 sera choisi, mais immédiatement après seront lancées des négociations avec AREVA pour la construction de deux EPR sur le site de Taishan par une *joint-venture* entre EDF et CGN ;

- › l'accident de Fukushima modifiera la logique de ce passage progressif à la 3^e génération. Après une période sans lancement de projets, la Chine accélère le développement de sa propre technologie, et, en forçant la convergence des *designs* évolués de CNNC et CGN, donne naissance au Hualong 1, dont la construction est déjà lancée sur plusieurs sites en Chine.

LA FRANCE, PARTENAIRE HISTORIQUE

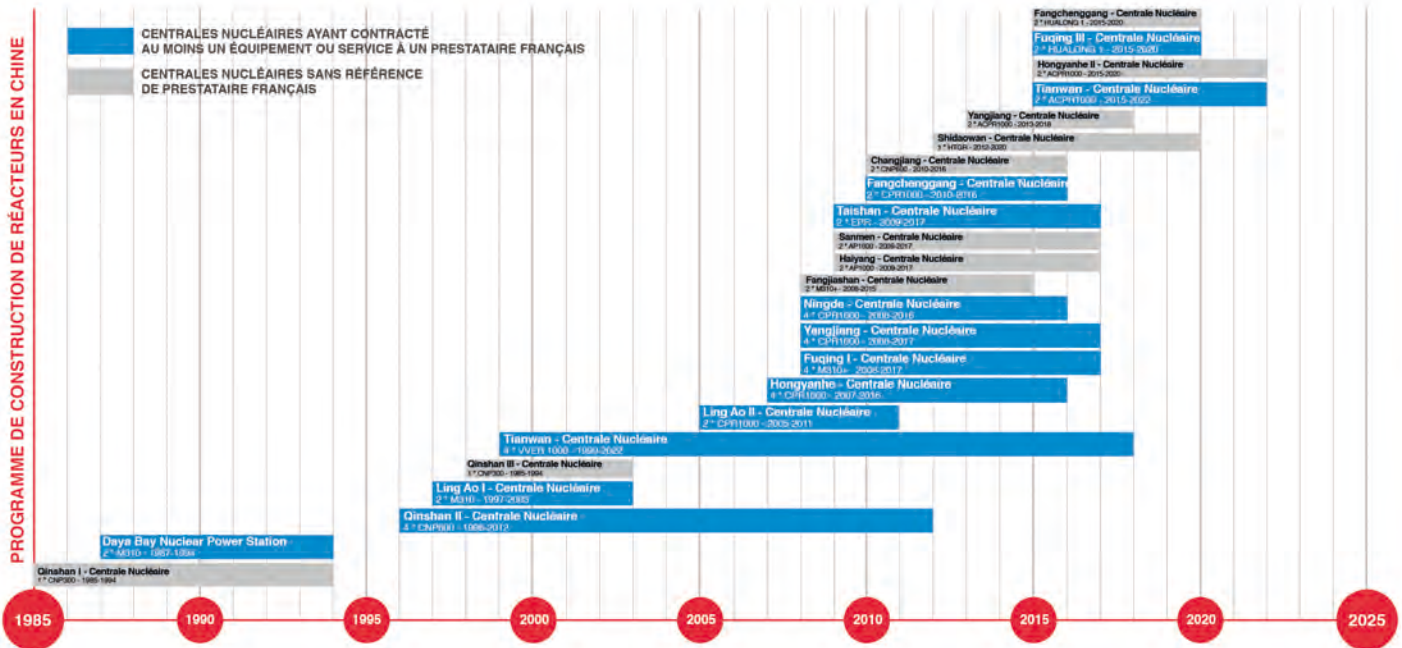
La France accompagne en fait depuis ses débuts le programme nucléaire civil chinois. Si le général de Gaulle avait décidé d'initier des relations diplomatiques avec ce pays en 1964, les contacts dans le domaine nucléaire remontent à août 1973, date de la première visite en Chine du président Pompidou. Ils se concrétisent le 22 novembre 1982 par la signature de « l'accord de coopération entre le Commissariat à l'énergie atomique (CEA)¹ et le ministère chinois de l'Industrie nucléaire (MIN) dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie atomique ». Cet accord est régulièrement renouvelé depuis trente ans, toujours avec le CEA côté français, et pour la partie chinoise avec les différents ▶

1. En 2010, le CEA est devenu le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

DOSSIER

Innovations, technologies, export
CHINE, LE NOUVEAU GÉANT DU NUCLÉAIRE

30 ANNÉES DE COLLABORATION FRANCO-CHINOISE DANS LE NUCLÉAIRE CIVIL AVEC LES PRESTATAIRES FRANÇAIS



LA SUPPLY CHAIN FRANÇAISE

Fournit plus de 30% de la capacité nucléaire installée dans le monde entier dans plus de 12 pays

Fournit des équipements et des services pour le cycle du combustible, y compris les projets de gestion des déchets et de démantèlement (Brésil, Chine, France, Japon, Kazakhstan, États-Unis, etc.)

Participe à la construction de nouveaux réacteurs 3G+ et couvre différents types de codes : de RCC à ASME, QOST, EN et plus

Respecte et atteint les exigences de sûreté et de sécurité des autorités de sûreté des pays (Brésil, Chine, Finlande, France, Inde, Japon, Russie, Corée du Sud, Royaume-Uni, États-Unis, etc.)

Données 2016



GIIN
 Groupe Intersyndical de l'Industrie Nucléaire

©Copyright 2017 - Tous droits réservés

CAEA
 China Atomic Energy Authority

partenaires dont les noms suivent l'évolution du nucléaire chinois: MIN, CNNC, **CAEA**.

Suite à plusieurs visites en France du vice-ministre des Eaux et de l'Électricité, M. Li Peng, un « Mémoire de coopération électronucléaire » est signé à Pékin en mai 1983. Il prévoit la fourniture de centrales nucléaires de 900 MWe en incluant une clause relative aux transferts de technologie que la France effectuera.

La construction de la centrale nucléaire de Daya Bay (2 tranches REP 985 MWe) est lancée, avec une mise en service commerciale en 1994, puis la centrale nucléaire de Ling Ao phase 1 (deux tranches REP 985 MW) dont les contrats sont signés en 1995 et pour une mise en service industrielle en 2002 et 2003.

La technologie de l'ilot nucléaire (REP trois boucles - 900 MW) est transférée aux instituts d'ingénierie

chinois et la technologie de fabrication du combustible (AFA-2G puis AFA-3G) est transférée à l'usine de la CNNC à Yibin (province du Sichuan) où sont désormais fabriqués les recharges de combustible de Daya Bay, Ling Ao et Qinshan II, ainsi que les premiers cœurs des CPR1000 et M310+.

La bonne réalisation des chantiers et les bonnes performances d'exploitation de ces centrales convaincront les Chinois que le réacteur français de 900 MW constitue une base solide pour devenir le modèle de référence de l'électronucléaire de puissance chinois. Ce sera le programme CPR1000 dérivé du 900 MW (CP1 Gravelines 5-6) français auquel des améliorations significatives ont été apportées (notamment un contrôle-commande numérique, des structures internes de la cuve du réacteur légèrement différentes, turbines de type N4, un débit primaire un peu

supérieur...). Ce programme a donné naissance à seize unités en fonctionnement actuellement.

Un partenariat qui a su évoluer avec le temps :

- la Chine a subi des transformations impressionnantes depuis le lancement des réformes de Deng Xiaoping à la fin des années 1970. Le nucléaire a accompagné le mouvement de l'industrie et de l'économie. Alors que les premiers contrats étaient clés en main, avec la fourniture des pièces et des équipements, le transfert de technologie et la formation du personnel chinois, la localisation a été un objectif affiché clairement, ainsi que la montée en puissance des compétences locales. Les entreprises françaises ont su s'adapter à cette demande,

et graduellement leur rôle a changé. Les *joint-ventures* avec des entreprises chinoises se sont petit à petit mises en place (essentiellement pour AREVA, EDF et ALSTOM), et certaines entreprises comme Vallourec ont ouvert leur propre site de production en Chine;

- › La Déclaration conjointe signée entre les deux Premiers ministres en 2015 définit les éléments d'une relance très ambitieuse d'un partenariat déjà vieux de plus de trente ans. Les négociations qui ont suivi cette déclaration s'inscrivent dans deux nouvelles directions :
 - thématique dans le domaine de l'aval du cycle avec le projet de construction d'une usine de retraitement de combustibles usés sur le modèle de celle de la Hague, et d'une usine de fabrication de combustibles Mox;
 - géographique avec le partenariat en pays tiers avec le premier projet emblématique d'Hinkley Point.

Ces projets s'inscrivent dans la durée et le partenariat franco-chinois est donc relancé pour quelques décennies...

QUELLES SPÉCIFICITÉS POUR LE PARTENARIAT FRANCO-CHINOIS ?

La force de la composante industrielle

Le choix de la base industrielle française pour le développement du nucléaire chinois a bien entendu bénéficié fortement à nos entreprises :

- › AREVA a plus de 800 collaborateurs en Chine et est présent sur l'amont du cycle et les réacteurs, notamment par un ensemble de *joint-ventures*, mais aussi sur l'aval du cycle avec le projet d'usine de retraitement-recyclage d'une capacité de 800 tonnes. En février 2017, un accord global pour continuer à développer le partenariat

30%

La part d'EDF dans TNPJVC, l'exploitant des EPR de Taishan

800

collaborateurs d'AREVA travaillent en Chine

500

ingénieurs nucléaires chinois ont été formés dans les centres de recherche du CEA.

50%

des entreprises membres du PFCE produisent en Chine

stratégique entre CNNC et AREVA a été signé en présence des deux Premiers ministres : le « *Framework for industrial & commercial cooperation agreement* ».

- › EDF a également plus de 800 collaborateurs en Chine, et l'entreprise y est l'un des plus grands investisseurs étrangers dans l'énergie. EDF est présent dans le thermique (centrale de Laibin), dans l'hydraulique (prestations de conseil dans la majorité des projets chinois), et bien sûr dans le nucléaire, depuis Daya Bay et Ling'ao. La société détient 30 % de la *Taishan Nuclear Power Joint-Venture Company* (TNPJVC) qui construit et exploitera les deux EPR de Taishan et prévoit d'ailleurs deux autres EPR par la suite.
- › Les deux sociétés françaises bénéficient de leur engagement sur le long terme en Chine, présentes depuis le projet Daya Bay (Framatome à l'époque pour AREVA), et ayant accompagné la montée en puissance du nucléaire chinois. Il faut aussi mentionner ALSTOM, dont les groupes turbo-alternateurs en particulier sont bien représentés sur l'ensemble du parc des centrales chinoises, thermiques ou nucléaires.

Mais derrière ces grandes entreprises dont la présence semble évidente sur un marché aussi important, il faut surtout mettre l'accent sur les PME/PMI françaises, qui sont partie prenante de la chaîne d'approvisionnement du nucléaire chinois, non seulement pour les réacteurs de technologie française, mais également pour les autres modèles. Il faut souligner ici le rôle majeur d'EDF qui, en créant le **PFCE**, a permis aux PMI/PME qui faisaient partie de sa chaîne d'approvisionnement en France de participer à l'aventure chinoise, et de profiter du réseau d'EDF en Chine pour s'implanter sur ce marché difficile. Ces entreprises sont présentes en Chine *via* des *joint-ventures*, des usines de production, et leurs produits et équipements sont sur quasiment

PFCE
Partenariat France
Chine électricité.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**

tous les sites en construction. Le marché chinois permet d'augmenter leur capacité de production, de recruter du personnel en France, et représente pour beaucoup une part importante de leur chiffre d'affaires. Elles sont de plus en plus nombreuses à vouloir pénétrer ce marché, et beaucoup font partie du PFCE : actuellement plus d'une centaine d'entreprises, dont 70 % d'entre elles ont une présence permanente en Chine, et 50 % produisent dans le pays. Le GIIN (Groupe intersyndical de l'industrie nucléaire) est aussi actif en Chine, et est en mesure d'aider les 200 entreprises qui le composent à s'implanter dans le pays. Il faut enfin noter que la proximité des référentiels nucléaires chinois et français (en particulier au niveau des codes et normes, promus en Chine par l'AFCCEN) facilite la pénétration de nos entreprises sur le marché chinois.

La richesse du partenariat

Par-delà la composante industrielle, les liens franco-chinois existent à tous les niveaux : accords entre l'Autorité de sûreté nucléaire française (ASN) et son homologue la *National Nuclear Security Administration* (NNSA), accords entre l'IRSN et la NNSA ainsi que la *Nuclear and Radiation Safety Center* (NRSC), l'ANDRA et la CNNC (BRIUG entre autres)... En 2007 ont été mis en place des groupes de travail entre le CEA et divers instituts de recherche et

d'ingénierie chinois dans différents domaines : accidents graves, aval du cycle, gestion des déchets, laboratoires chauds, réacteurs thermo-hydrauliques, réacteurs rapides, vieillissement des matériaux et physique des coeurs.

Toutes les composantes du nucléaire français sont depuis longtemps en contact avec leurs homologues chinois. C'est cette richesse et cette diversité qui lui donnent ce caractère si particulier, et tous les accords conclus entre nos deux pays ont permis à des centaines de scientifiques et d'ingénieurs chinois de se former en France, dans les domaines de la R&D, de la sûreté, de l'exploitation, etc.

On peut enfin citer la composante de l'enseignement, qui a été ajoutée très récemment, avec la création de l'IFCCEN une école d'ingénieur à la française dans le Guangdong, à Zhuhai, d'où est sortie cette année la deuxième promotion de 75 jeunes ingénieurs formés au nucléaire, et possédant la double culture franco-chinoise.

L'aventure humaine

Au cours de toutes ces phases, se nouent entre les ingénieurs et techniciens français et chinois qui participent à ces chantiers – aventures humaines tout autant que techniques – des liens très forts, qui, trente ans après, sont toujours au cœur de nos relations. Par exemple, dans le cadre de cette coopération sur le long terme, environ



Daya Bay en 2003 : des ingénieurs français et chinois échangent leur expérience sur l'exploitation des réacteurs nucléaires

500 ingénieurs nucléaires chinois ont été formés dans les centres de recherche du CEA.

De nombreux responsables chinois de la sûreté nucléaire ont ainsi séjourné plusieurs mois ou années en France et sont francophones et francophiles. Les liens créés sont restés vivaces, et les jeunes ingénieurs chinois sont maintenant à des postes importants. Dans quels autres pays que la Chine peut-on discuter en français avec les dirigeants des compagnies électriques (He Yu, PDG de CGN par exemple), avec le ministre de l'Environnement et pendant longtemps patron de l'Autorité de sûreté, Li Ganjie ?

En définitive, par le caractère historique de sa présence en Chine, la qualité des liens tissés, d'abord avec CGN, puis maintenant avec CNNC, et son image forte dans le nucléaire, la France reste un partenaire très important du programme chinois, avec de nombreux atouts, dont ses grandes entreprises et ses PME/PMI, considérées comme des partenaires de référence. Elles sont partie prenante de la chaîne d'approvisionnement du nucléaire chinois, et peuvent se développer dans de nouveaux domaines où leur savoir-faire est certain, comme les services, la maintenance ou le démantèlement. L'autre grand atout tient dans la nature du partenariat qui couvre l'amont, l'aval, les réacteurs, et se fait dans une vision partagée d'une sûreté nucléaire au plus haut niveau.

L'IFCCEN un modèle de coopération académique

Inauguré en 2011 en présence du ministre français des Affaires étrangères de l'époque, Alain Juppé, l'Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire répond à la volonté des deux États de renforcer leur coopération nucléaire sous trois angles : politique, industriel et académique. D'un point de vue académique, l'idée est d'allier le meilleur des deux modèles : la meilleure université chinoise d'une part, avec l'université Sun Yat-sen, et l'excellence de la formation scientifique française d'autre part, basée sur le modèle des classes préparatoires et des grandes écoles d'ingénieurs. La première promotion de l'IFCCEN a été diplômée en juin 2016.

AFCCEN
Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électro-nucléaires.

IFCCEN
Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire.

BRIUG
Beijing Research Institute of Uranium Geology.

La coopération franco-chinoise aujourd'hui

Entretien avec **Éric Pohu**, responsable des projets Chine au sein de la direction de la production nucléaire d'EDF

RGN : Comment a débuté la collaboration entre EDF et la Chine en matière d'exploitation des réacteurs ?

Éric Pohu : L'origine de cette collaboration remonte à la centrale de Daya Bay. Au début des années 1990, lors du démarrage de cette centrale, il a fallu accompagner le nouvel exploitant, dans un contexte où l'exploitation de réacteurs était quelque chose de nouveau en Chine.

Dès le début du projet, la Chine a affirmé sa volonté d'atteindre rapidement le niveau du standard international. C'est dans le cadre de cet objectif qu'EDF a formé, sur le parc français, l'ensemble des opérateurs, ingénieurs sûreté, et tous les postes d'exploitation les plus importants. À cette époque il s'agissait de former les premiers exploitants chinois au pilotage d'une centrale issue de la technologie française. Depuis cette période, le groupe CGN a progressivement diminué la part de la formation initiale de ses jeunes exploitants en compagnonnage dans nos centrales ou dans les centres de formations d'EDF. Une grande part des jeunes opérateurs du parc CGN se sont ainsi imprégnés de la culture française, mais surtout de l'approche de la culture de sûreté défendue par EDF, au travers des procédures, des règles, codes et standards (tels que l'APE, les RCC...) appliqués par l'industrie électronucléaire française. Certains de ces anciens stagiaires sont devenus des décideurs, voire les dirigeants du groupe CGN. C'est en partie grâce à la construction de ce lien culturel fort que l'industrie française, nos entreprises prestataires et fournisseurs, a acquis en Chine des parts de marché importantes.

C'est par ce lien que se transmet le retour d'expérience (REX) nécessaire à l'amélioration de nos performances, REX particulièrement riche en Chine dans cette période de construction et de démarrage. Le projet Taishan illustre le rapprochement entre les deux exploitants à travers le programme de coopération et de services. Entre le démarrage de Flamanville 3 et de Taishan il n'y a pas de compétition, mais une solidarité qui doit viser la réussite des deux projets et la mise en place de relations entre exploitants, bénéfiques à tous sur le long terme. Les actions de coopération entre Taishan, Flamanville 3 et même Hinkley Point C fonctionnent bien. L'approche du démarrage nous pousse à consolider ces échanges, à les rendre rapides et efficaces afin que chacun bénéficie totalement du REX de l'autre.

Des liens ont été également construits avec CNNC, autre exploitant nucléaire chinois. Un jumelage est notamment en place entre la centrale de Fuqing, exploitée par CNNC, et la centrale de Saint-Laurent-des-Eaux.

Avez-vous des concurrents en Chine ?

E. P. : Notre position en Chine n'est pas garantie. Avec l'accélération du développement de l'industrie électronucléaire chinoise, de nouveaux acteurs, pouvant remettre en question notre place, sont venus s'implanter. Notre partenaire principal et historique est CGN. Celui-ci a lancé le développement d'un parc de centrales nucléaires. Le parc CGN comprend actuellement vingt tranches en exploitation¹. En 2020, l'objectif est de porter ce parc à une trentaine de tranches ▶

en substance...

Présente depuis la construction des premières tranches du parc nucléaire chinois, EDF a su nouer un partenariat durable avec l'exploitant CGN, lui permettant une montée en compétences accélérée. Dans un environnement de jeunes ingénieurs, l'appui d'EDF et l'adoption des normes et de la culture d'exploitation nucléaire française ont été et continuent d'être déterminants pour la sûreté. Cette relation privilégiée entre le premier exploitant au monde, EDF, et le premier parc nucléaire au monde en devenir, assure un gain mutuel d'expérience. Reste que l'électricien fait face à une concurrence accrue qui l'oblige à se renouveler sans cesse pour conserver sa position. Entretien avec un fin connaisseur des enjeux, Éric Pohu, responsable des projets Chine au sein de la direction de la production nucléaire d'EDF.

Éric Pohu,
responsable
des projets Chine
chez EDF



© EDF

¹ Le parc CGN comprend vingt tranches : Daya Bay 1/2, Ling Ao 1/2/3/4, Hong Yan He 1/2/3/4, Yangjiang 1/2/3/4, Ningde 1/2/3/4, Fangchengang 1/2.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**



Le siège de la division Chine de la branche Asie Pacifique d'EDF, à Pékin

en service ou en construction, avec éventuellement Taishan 3/4. Actuellement, sur ces futures unités de CGN, seules deux sont planifiées pour être éventuellement des *designs* AP1000, les autres sont toutes d'un *design* issu de la filière française (M310, CPR1000, ACPR1000, Hualong, EPR). Afin de maintenir notre présence et nos standards, il est donc nécessaire d'accompagner la mise en œuvre de ce parc. C'est dans cet objectif que des actions de coopération et de partage entre les deux exploitants se sont développées ces dernières années.

Quelle expertise apportez-vous auprès de la Chine ?

E. P.: Toujours dans le cadre de notre partenariat, les deux exploitants ont mis en place un plan d'actions de coopération

spécifique concernant le management d'une flotte nucléaire, basé sur l'échange bilatéral de *managers* de même niveau. Ce plan d'actions, appelé « *working together: how to lead our fleet* »² est basé sur des échanges réguliers entre le top management des deux flottes. Différents domaines sont abordés: le management de la sûreté nucléaire, l'application du *leadership* dans le pilotage d'un parc nucléaire, la gestion des ressources et compétences, le contrôle des dépenses d'exploitation, efficacité de l'ingénierie d'exploitation, le contrôle de l'évolution du référentiel d'exploitation et du *design* des unités, la relation avec l'Autorité de sûreté...

Les équipes de direction se rencontrent régulièrement. En particulier, Philippe Sasseigne, directeur du parc nucléaire en exploitation

d'EDF, s'entretient périodiquement à l'occasion de séminaires sûreté, avec le vice président de CGN en charge du parc nucléaire, M. Gao Ligang, ainsi que M. Shu Shengbing, son homologue en charge du parc en exploitation. Ce dernier parle parfaitement le français, il a fait partie des premiers ingénieurs sûreté de Daya Bay formés sur la centrale de Blayais en 1990. De même, Olivier Lamarre, directeur adjoint de la DPN, rencontre périodiquement son homologue Xu Wenbing, également francophone, formé sur nos centrales au début des années 1990. Philippe Mercel, directeur de

l'unité d'ingénierie en exploitation, échange périodiquement avec son homologue Wang An, directeur de SNPI. Afin de faciliter cet échange de REX dans l'ingénierie d'exploitation, un échange d'ingénieur a même été réalisé: un ingénieur de l'UNIE a rejoint CGN SNPI, alors qu'un ingénieur de CGN a rejoint l'UNIE.

Toutefois, cette coopération entre exploitants doit assurer sa pérennité et sa solidité dans l'avenir. Aussi, dans l'esprit de cette coopération à long terme avec le groupe CGN, et en particulier pour recréer de nouveaux liens entre les jeunes et nouveaux dirigeants des deux flottes, une formation commune de « dirigeants à haut potentiel » est organisée chaque année. Six futurs directeurs d'unité EDF et six futurs directeurs d'unité d'exploitation CGN suivent ensemble une formation de dirigeants.

Quelle plus-value apporte encore EDF ?

E. P.: Les bons résultats de Daya Bay ont permis de générer des revenus qui ont participé au développement du groupe CGN et notamment à la construction de son parc nucléaire. CGN, aujourd'hui groupe de niveau international, n'a pu grandir que parce que son parc est rentable. L'accompagnement d'EDF dans les domaines de l'ingénierie de *design*, de construction et, bien sûr, dans l'exploitation a permis à CGN l'acquisition de compétences et du savoir-faire nécessaire à son développement. Le niveau de sûreté en exploitation de CGN est reconnu au niveau international. Lors du dernier challenge sûreté/innovation d'EDF, DNMC, exploitant du site de Daya Bay, a reçu un trophée reconnaissant les performances de sûreté, en particulier dans la maîtrise des arrêts automatiques réacteurs.

“

Les opérateurs de CGN se sont imprégnés de la culture, des codes et des standards français, ainsi que du référentiel EDF”

2. Travailler ensemble, comment mener notre parc nucléaire.

12

futurs directeurs d'unité d'exploitation, 6 d'EDF et 6 de CGN, suivent chaque année quatre semaines de formation commune.

“
Le partenariat avec CGN a permis de maintenir les compétences d'EDF dans la construction de centrales nucléaires”

GPA:

en 2007, la France et la Chine signent un *Global Partnership Agreement* qui garantit notamment le partage d'expériences dans la construction et l'exploitation.

Comment partagez-vous le retour d'expérience et quelles sont les limites du partage ?

E. P. : Pour le REX qui concerne les événements d'exploitation, il doit être le plus fluide possible pour être pris en compte par l'exploitant CGN pour les événements d'EDF et par EDF pour les événements de CGN. Dans le cadre de notre contrat de service avec CGN, nos conseillers sur place assurent notamment le partage de REX d'exploitation. Ils sont la porte d'entrée du REX d'EDF pour les exploitants du parc CGN mais sont également l'accès au REX du parc CGN pour EDF. De plus, un expert de CGN est présent au sein de l'unité d'ingénierie d'exploitation d'EDF pour faciliter cet échange de REX entre exploitants et le rendre le plus fluide et dynamique possible.

Comment aidez-vous les exploitants chinois à augmenter leur coefficient de disponibilité ?

E. P. : Nos lots de modifications, l'évolution du référentiel de tranche de notre parc sont présentés systématiquement à CGN. Ces évolutions couvrent tous les domaines d'exploitation, en particulier ce qui améliore la sûreté, et les performances de la tranche.

Nos conseillers sur place alertent et proposent les axes d'améliorations pour permettre d'augmenter le coefficient de disponibilité des tranches. Cependant, la priorité du parc CGN reste la sûreté. En effet, nous sommes sur un parc nouveau, avec une population d'exploitant très jeune, avec beaucoup de nouveaux fournisseurs et des choix technologiques nouveaux. Le risque en termes de sûreté est important et il est nécessaire d'en rester conscient. La priorité reste donc le management de la sûreté. Si cette dernière n'est pas au rendez-vous, le reste n'y sera pas, la disponibilité ne sera pas au rendez-vous.

Apportez-vous une expertise pour optimiser les arrêts de tranche ?

E. P. : Nous avons beaucoup d'échanges, de séminaires sur le

sujet. Ces dernières années, CGN a dû modifier son organisation de management des arrêts. D'une organisation d'un site unique à Daya Bay, il est passé à une organisation multisite. D'une équipe de maintenance locale qui s'organisait avec ses fournisseurs et sociétés de services, pour les quelques arrêts de tranches du site, il a fallu se transformer, adapter les ressources, élargir les fournisseurs, pour être en capacité de faire des arrêts sur l'ensemble du parc CGN, s'étalant du sud-ouest au nord-est de la Chine. EDF a accompagné CGN dans la mise en œuvre de ses services centraux. Notamment, nous maintenons notre conseil et support auprès de la nouvelle entité de CGN en charge des arrêts de tranche du parc, CNOC. Dans le cadre de notre contrat avec CGN, un ancien directeur délégué du parc d'EDF a même été détaché pendant quelques mois pour accompagner CGN à la mise en place de sa nouvelle organisation de support au parc. Aujourd'hui dans le cadre de l'échange de REX nous maintenons beaucoup d'échanges entre les chefs d'arrêts en Chine et en France. Des échanges dans le domaine du management des arrêts de tranche ont également lieu avec l'exploitant de CNNC dans le cadre du jumelage entre Saint-Laurent et Fuqing.

Quels sont les apports de l'expertise chinoise pour EDF ?

E. P. : Pour EDF, au-delà du bénéfice économique que lui confère le partenariat avec CGN, relativement modeste à l'échelle de son activité globale, l'enjeu majeur de ces 20 dernières années a été le maintien en activité d'un certain nombre de fournisseurs stratégiques du parc nucléaire français (Vanatome, Bernard Controls, Velan, REEL...) et le maintien de compétences chez EDF dans le domaine de la construction. De nombreux salariés d'EDF ont ainsi acquis l'expérience de la construction de centrale nucléaire à Ling Ao.

En novembre 2007, à l'occasion de la visite du président de la République française en Chine, EDF et CGN ont signé un accord de partenariat, le « *Global Partnership Agreement* » (GPA) qui introduit la notion de partenariat de long terme et équilibré. L'apport principal du GPA et des accords qui en découlent a été de garantir l'accès au retour d'expérience de construction et d'exploitation de l'ensemble du parc de CGN, y compris pour ce qui concerne les EPR de Taishan. Il a également permis de maintenir le référentiel français au plus proche des industriels chinois de CGN afin notamment de favoriser l'industrie française dont EDF a besoin pour ses centrales.

Avec le GPA, EDF a élargi son retour d'expérience d'exploitation en intégrant de façon plus structurée celui des tranches CGN. Celui-ci contribue à l'amélioration du niveau de sûreté des tranches françaises et facilite l'augmentation de la durée de vie du parc. L'intégration du retour d'expérience de CGN est aujourd'hui facilitée par l'utilisation de méthodes, d'outils, de codes (RCC) et normes identiques par EDF et CGN pour l'exploitation de leurs parcs. ■

La stratégie de la Chine dans l'aval du cycle

Par **Erwan Hinault**, Senior Vice-President Strategy & Marketing (Asie) chez New AREVA



en substance...

Avec un parc nucléaire de trente-sept réacteurs totalisant 36 GWe, la Chine est d'ores et déjà au troisième rang mondial en matière de capacité nucléaire installée, et elle entend poursuivre son développement : dix-neuf réacteurs sont actuellement en construction (22 GWe).

Très ralenti après l'accident de Fukushima de mars 2011, le rythme soutenu d'approbation et le début de construction de nouveaux réacteurs a repris en 2015 (approbation de huit unités / début de construction de six autres). Il s'est interrompu à nouveau à partir de 2016 dans l'attente de la fin des essais et du démarrage commercial des premières unités des réacteurs de 3^e génération en construction (AP1000 de Westinghouse à Sanmen et Haiyang ; EPR d'AREVA à Taishan). Ces chantiers arriveront à leur terme fin 2017-début 2018 et devraient entraîner l'approbation par les autorités chinoises d'un nombre important de nouveaux projets de 3^e génération, actuellement en attente.

Même si l'objectif fixé dans le 13^e plan quinquennal (2016-2020) de 58 GWe en exploitation à l'horizon 2020 n'est pas atteint, la Chine disposera assurément d'une capacité nucléaire installée de 50 GWe ou plus à cette date. Et en 2030, la capacité nucléaire installée devrait être comprise entre 125 et 150 GWe suivant les prévisions, faisant de la Chine le premier pays disposant de la première capacité nucléaire au monde, deux fois supérieure à celle de la France.

D'IMPORTANTES QUANTITÉS DE COMBUSTIBLES USÉS

Les quantités de combustibles usés déchargés par les centrales nucléaires chinoises vont donc augmenter significativement dans les prochaines années. En 2016, la Chine avait déjà accumulé plus de 3000 tonnes de combustibles usés. Les projections chinoises¹ indiquent que les quantités de combustibles usés accumulées en 2025 et 2030 devraient atteindre respectivement plus de 14000 tonnes et plus de 23000 tonnes. Pour mémoire 20 à 25 tonnes de combustibles usés sont déchargées d'un réacteur de 1000 MWe annuellement.

Une étude de juin 2016 de la CIAE¹/NRSC² sur la gestion des combustibles usés en Chine apporte un éclairage complémentaire. Elle étend les projections à l'horizon 2050 en proposant une analyse selon deux scénarios de développement du parc nucléaire chinois (développement rapide/développement lent). Selon cette étude, la quantité accumulée de combustibles usés en 2050

sera comprise entre 62000 et 140000 tonnes selon respectivement le scénario développement lent (130 GWe de capacité nucléaire installée en 2050) et celui de développement rapide (400 GWe de capacité nucléaire installée en 2050).

LA VOLONTÉ DE « FERMER LE CYCLE »

Dès le début des années 1980, la Chine a décidé d'adopter une stratégie de cycle fermé du combustible nucléaire, articulée autour des principes suivants :

- ▶ utilisation complète des matières nucléaires ;
- ▶ réduction des coûts d'extraction, de conversion et d'enrichissement de l'uranium ;
- ▶ traitement des combustibles usés ;
- ▶ développement des réacteurs à neutrons rapides (RNR) pour le long terme ;
- ▶ réduction du volume des déchets nucléaires générés ;
- ▶ vitrification des déchets nucléaires de haute activité à vie longue ;
- ▶ stockage régional en surface des déchets de faible et moyenne activité ;
- ▶ stockage centralisé en profondeur des déchets de haute activité après vitrification.

Sans être jusqu'à présent transcrite dans des textes de loi, cette politique a été réaffirmée à de très nombreuses reprises par les autorités chinoises. En particulier, le 13^e plan quinquennal (2016-2020) publié en mars 2016 appelle à une accélération des projets de construction des usines de traitement des combustibles usés.

CIAE
China Institute
of Atomic Energy
(Institut de R&D de
CNNC).

NRSC
Nuclear and
Radiation Safety
Center du Ministry
of Environmental
Protection.

1. Données 2016 de CNNC / CAEA.

Agence gouvernementale subordonnée à la **SASTIND**¹ qui dépend elle-même du **MIIT**², la **CAEA**³ définit la stratégie du cycle du combustible nucléaire en Chine² et en supervise les activités. À ce titre, la CAEA est l'une des autorités de tutelle de CNNC, l'entreprise d'État en charge de l'ensemble des activités du cycle du combustible nucléaire en Chine.

DE L'ATELIER PILOTE À L'USINE COMMERCIALE

Le développement du traitement des combustibles usés en Chine a débuté par la construction d'un atelier pilote de traitement de capacité 50 t/an (atelier 404, à Diwopu dans la province du Gansu) approuvée par le Conseil d'État chinois en 1986. Les campagnes d'essais actifs menées dans cet atelier depuis le début des années 2010 jusqu'à maintenant ont permis à CNNC d'acquiescer les connaissances fondamentales en matière de traitement de combustibles usés.

Pour la suite la CAEA/CNNC a proposé au gouvernement la construction de deux usines de traitement-recyclage de combustibles usés :

- › une usine de capacité 200 tML³/an, projet démonstratif à Jinta dans la province du Gansu,
- › une usine commerciale de capacité 800 tML/an sur un site qui reste à déterminer.

Avec l'usine de Jinta (200 tML/an), l'objectif de la Chine est de poursuivre le développement domestique des procédés et technologies de traitement-recyclage. La construction de l'usine a été approuvée par le gouvernement chinois en 2015 et les études sont en cours. L'usine commerciale permettra quant à elle de traiter et recycler à une échelle industrielle (800 tML/an) les combustibles usés générés par le parc chinois de réacteurs à eau légère. Projet structurant de la coopération entre CNNC et New AREVA, cette usine sera construite sur le modèle de l'usine de La Hague. L'usine chinoise intégrera

toutes les améliorations apportées au fil des ans dans l'installation française (en matière de sûreté, de réduction des rejets, de performances) et également des innovations telles qu'une digitalisation plus poussée. CNNC prévoit la mise en service de l'usine à l'horizon 2030.

VERS DES SURGÉNÉRATEURS À L'HORIZON 2030

Pour compléter sa politique du cycle fermé, la Chine a un programme de développement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) dans lesquels le plutonium issu du traitement des combustibles usés des réacteurs à eau légère sera plus tard recyclé. La réalisation d'un prototype de RNR de 20 MWe (*China Experimental Fast Reactor*, ou CEFBR) exploité par la CIAE (*China Institute of Atomic Energy*)⁴ a constitué la première phase de ce programme. La construction de RNR de plus grande puissance va constituer la seconde et troisième phase du programme :

- › **CDFR**⁵ de 600 MW, dont la construction est prévue durant la période 2018-2025 sur le site de Xiapu, dans la province du Fujian ;

- › **CCFR** (*China Commercial Fast Reactor*) de 1 000 MW, dont la construction est prévue après 2030.

La perspective de surgénérateurs de grande taille à l'échelle industrielle étant encore très lointaine, la Chine va commencer à recycler le plutonium dans son parc de réacteurs à eau légère en y chargeant des combustibles Mox, à l'image de ce que fait EDF en France depuis 1987. L'atelier de fabrication de combustibles Mox de l'usine commerciale de traitement-recyclage sera ainsi construit sur le modèle de l'usine Melox de New AREVA en France.

LE FINANCEMENT DES PROJETS

Le financement des projets et activités de l'aval du cycle en Chine est assuré principalement par trois fonds gouvernementaux :

- › **fonds pour le traitement et le stockage des combustibles usés.** L'objet de ce fonds est le financement de l'entreposage, du transport et du traitement des combustibles usés ainsi que l'entreposage et stockage final des déchets nucléaires issus du traitement de ces combustibles usés (déchets de haute activité) ;

SASTIND
State
Administration for
Science, Technology
and Industry for
National Defense.

MIIT
Ministry of Industry
& Information
Technology.

CAEA
Chinese Atomic
Energy Authority.

CDFR
China
Demonstration
Fast Reactor.



ZOOM SUR...

DÉCHETS : UN LABORATOIRE SOUTERRAIN DANS LE DÉSERT DE GOBI

Les acteurs de la gestion des déchets radioactifs en Chine sont la CNNC, en charge notamment du traitement et du stockage des déchets, ainsi que la BRIUG (*Beijing Research Institute of Uranium Geology*), en charge des études et recherches concernant le stockage des déchets de haute activité ainsi que de la recherche de site. La stratégie chinoise en matière de fin de cycle a été définie dans les années 1980 et repose sur deux principes : les déchets de faible et moyenne activité seront stockés en surface, dans des stockages régionaux ; ceux de haute activité seront stockés en profondeur, dans un stockage national que le gouvernement chinois a choisi d'implanter au nord-ouest du pays. La construction d'un laboratoire souterrain dans le granite du désert de Gobi est envisagée et une alternative dans l'argile est à l'étude. La construction du futur site de stockage ne débutera qu'à partir de 2040.

2. Jusqu'en 2008 la CAEA administrait l'ensemble des activités nucléaires en Chine. La réforme ministérielle de 2008 a conduit à la création de la NEA (*National Energy Administration*) dépendant de la NDRC (*National Development & Reform Commission*) et au partage de l'administration/supervision des activités nucléaires entre la CAEA et la NEA. **3.** Données 2016 de CNNC / CAEA. **4.** La CIAE est l'institut de R&D de CNNC.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**

› **fonds pour le traitement et le stockage des déchets radioactifs.** L'objet de ce fonds est le financement des opérations de décontamination/démantèlement des sites nucléaires anciens (et donc n'inclut les centrales nucléaires) et du traitement/stockage des déchets nucléaires de ces sites. Ce fonds finance également le stockage final en surface de l'ensemble des déchets nucléaires de faible activité;

› **fonds pour le développement de projets nationaux dans le domaine des sciences et technologies.** Le projet d'usine de traitement-recyclage de Jinta (200 tML/an) est financé par ce fonds. Le premier fonds dont la création date de 2010 est géré par le ministère des Finances (MOF) chinois et alimenté par une taxe prélevée sur chaque kWh nucléaire vendu par

les opérateurs nucléaires. Le montant de la taxe est fixé (26 yuans/MWh⁵) et s'applique à tous les réacteurs à eau légère commerciaux (Candu et les réacteurs de recherche en sont donc exonérés). Enfin, le décret de création stipule que chaque nouveau réacteur est exonéré du paiement de cette taxe durant les cinq premières années après la date de démarrage commercial

5. Équivalent à environ 3,3 euros/MWh.

L'usine commerciale de traitement-recyclage chinoise : un projet majeur de la coopération franco-chinoise dans le cycle du combustible nucléaire

Engagées depuis 2007 avec la signature de deux accords fondateurs (accord entre les gouvernements chinois et français ouvrant la voie à une coopération dans l'aval du cycle du combustible ; accord de coopération pour les études, la construction et l'exploitation d'une usine de traitement-recyclage entre AREVA et CNNC) les discussions ont été jalonnées d'accords politiques et industriels marquant les avancées réalisées ; en particulier : un mémorandum d'accord sur les périmètres de fourniture respectifs de CNNC et d'AREVA en 2010 ; une lettre d'intention de CNNC pour la construction de l'usine en 2013 ; un mémorandum d'accord sur la feuille de route de la négociation commerciale en 2015.

L'usine chinoise adoptera quasi exclusivement les procédés et technologies éprouvés des usines de La Hague et Melox de New AREVA, dans le cadre d'un accord de licence associé à un droit d'usage délimité.

En charge de la partie centrale de l'usine, New AREVA réalisera les études de conception et les études détaillées, et fournira les équipements clés ainsi que l'informatique industrielle de l'usine. New AREVA apportera également une assistance à CNNC durant les phases de construction, d'essais et de démarrage.

Les négociations techniques sont maintenant terminées et les négociations commerciales ont bien progressé. Plusieurs décisions des autorités chinoises concernant le choix du site de l'usine et le modèle économique du recyclage en Chine sont attendues dans les mois à venir. Ces décisions doivent permettre la finalisation des négociations commerciales et la signature des contrats avec l'objectif d'un lancement du projet en 2018.



NDRC
National
Development &
Reform Commission.

du réacteur. Le décret de création conjointement signé par les trois ministères MOF, **NDRC** et MIIT (2010) et le décret de la SASTIND sur les modalités de gestion (2014) fixent le cadre réglementaire du fonds. Certains aspects tels que la propriété des matières recyclées restent néanmoins à clarifier par les autorités chinoises.

S'agissant des déchets de haute activité issus du traitement-recyclage

des combustibles usés (principalement les colis de déchets vitrifiés), la Chine prévoit un stockage centralisé en profondeur dans la province du Gansu, et mène depuis plusieurs années des études d'évaluation et de sélection de sites. Un laboratoire de recherche sera construit sur le site sélectionné à l'horizon 2020, puis la construction du stockage centralisé débutera à partir de 2040 pour une mise en exploitation attendue en 2050.

DES SOLUTIONS TEMPORAIRES POUR L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES USÉS

Les piscines de combustibles usés des premiers réacteurs arrivant à saturation, les deux opérateurs nucléaires chinois CGN et CNNC ont été amenés à trouver des solutions temporaires pour l'entreposage de leurs combustibles usés, dans l'attente de la mise en service des usines de traitement-recyclage. Entre 2003 et 2013, CGN a ainsi transféré environ 400 tML de combustibles usés dans une piscine d'entreposage centralisée à Diwopu, dans la province du Gansu, où se situe l'atelier pilote de traitement. Cette piscine est maintenant pleine. Une extension de capacité d'environ 800 tML de combustibles usés a été construite sur le même site, et se trouve dans l'attente de l'autorisation de la **NNSA**, l'Autorité de sûreté chinoise, pour sa mise en service. CGN a également transféré une centaine de tonnes de combustibles usés des piscines de sa centrale de Daya Bay vers celles de sa centrale de Lingao.

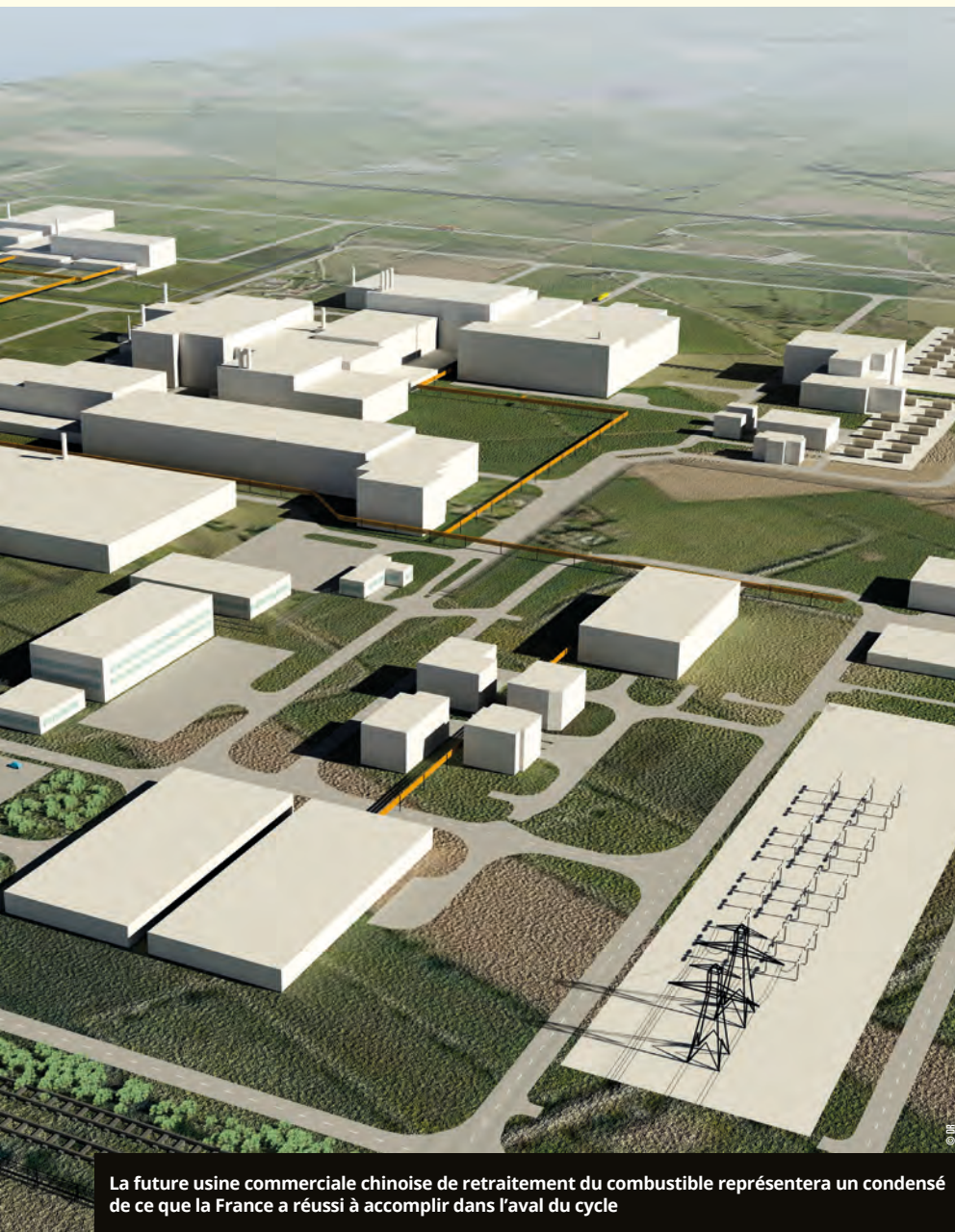
De son côté, CNNC a construit un entreposage à sec pour les combustibles usés de sa centrale Qinshan III de type Candu.

Enfin fin 2016, CGN et CNNC ont sélectionné New AREVA pour la fourniture de système d'entreposage à sec de type NUHOMS® pour les combustibles usés de leurs centrales de Daya Bay et Tianwan respectivement.

Pour la suite, CGN et CNNC disposent de plusieurs options pour l'entreposage temporaire de leurs combustibles usés: l'extension de la piscine d'entreposage centralisée de Diwopu, les piscines d'entreposage des futures usines de traitement-recyclage (Jinta et l'usine commerciale) ou bien des solutions d'entreposage à sec complémentaires.

La loi sur la sécurité nucléaire adoptée par l'organe législatif chinois le 1^{er} septembre 2017 constitue une nouvelle avancée importante pour le nucléaire chinois. Cette loi précise en particulier les responsabilités et le financement relatif au traitement des combustibles usés, au démantèlement des installations nucléaires et au stockage des déchets.

NNSA
National
Nuclear Safety
Administration.



La future usine commerciale chinoise de retraitement du combustible représentera un condensé de ce que la France a réussi à accomplir dans l'aval du cycle

Un Hualong multiforme

Par **Dominique Ochem**, conseiller nucléaire à l'ambassade de France en Chine,
et **Loeiza Cavalin**, adjointe du conseiller nucléaire à l'ambassade de France en Chine.



en substance...

Le réacteur chinois, baptisé « Hualong 1 », littéralement « dragon chinois », ou HPR1000 pour sa version internationale, est un réacteur à eau pressurisée de 1 000 MW issu de deux programmes différents de la CNNC et de la CGN et appelé à converger.

Cet été, la *National Energy Administration* (NEA) a donné son accord pour les propositions de la *Hualong Pressurized water reactor Technology Corporation* (HPTC), développé conjointement par la CGN et la CNNC, concernant la définition d'un Hualong commun.

Si ce projet aboutit, la Chine sera en capacité de proposer un modèle de réacteur de 3^e génération pour son marché intérieur et pour l'export.

UN PEU D'HISTOIRE

Deux modèles distincts...

En 2010, la CGN a lancé le développement de l'ACPR1000 (*Advanced, Cost competitive, Proven-Technology, Reliable*), une évolution du M310 de Daya Bay et Ling Ao. Après l'accident de Fukushima et à la suite de nouvelles améliorations apportées au niveau de la sûreté, il est devenu l'« ACPR1000+ »

Au cours de la même année, le réacteur CNP1000 développé par la CNNC a été rebaptisé « CP1000 », puis « ACP1000 ».

L'ACPR1000+ et l'ACP1000 sont issus d'une coopération de longue date avec la France, depuis la construction de Daya Bay en 1993. Rappelons que le transfert de technologie était réalisé entre EDF et CGN. Mais il faut savoir que par le passé, une seule

société d'ingénierie commune existait entre CNNC et CGN, ce qui explique que CNNC ait pu bénéficier du transfert de technologie des réacteurs français.

Il faut également garder en mémoire l'appel d'offres lancé par la Chine en 2004 en vue de développer son parc nucléaire sur la base d'un nouveau standard et qui a débouché sur le choix de la technologie des AP1000, au détriment des EPR français de grande puissance. Mais les déboires auxquels ont dû faire face les AP1000 ces dernières années ont poussé CNNC et CGN à s'orienter vers le développement du (des) Hualong, à savoir un réacteur de 3^e génération, qui se trouve être une évolution de l'ACPR1000+ et de l'ACP1000.

En 2015, la CNNC et la CGN ont lancé deux projets de démonstration de Hualong, respectivement sur le site de Fuqing (prévu pour 2020) et celui de Fangchenggang (prévu pour 2019). En mai 2017, le Premier ministre Li Keqiang a salué la pose du dôme du premier Hualong 1 à Fuqing 5, qui a eu lieu avec quinze jours d'avance sur le planning prévu et qui a lancé l'étape suivante de l'installation des composants lourds. Un peu plus tôt en avril les tests hydrauliques avaient été finalisés. Fuqing 6 a quant à lui pu réaliser son premier béton en décembre 2015 et les travaux de construction sont en cours, respectant les jalons fixés par le calendrier.

Quant à Fangchenggang 3, les dernières opérations de coulage de béton du radier ont été achevées en mai 2017, jetant une base solide pour les travaux de construction du bâtiment de réacteur, des bâtiments de sauvegarde et du bâtiment

combustible. Les travaux de l'ilot conventionnel de la tranche 4 ont quant à eux été lancés le 26 mai 2017, avec le premier béton coulé sur le canal de circulation marquant une étape importante de la construction d'un deuxième réacteur Hualong 1 pour CGN.

... Appelés à la convergence

La NEA¹ a souhaité imposer une concertation entre CGN et CNNC afin d'orienter leur concept vers un modèle unique. Elle a donc impulsé en avril 2013 un mouvement de convergence entre la CNNC et la CGN afin d'intégrer leur technologie pour un même réacteur. En décembre 2015, la *Hualong Pressurized water reactor Technology Corporation* (HPTC) a été créée sous la forme d'une *joint-venture* entre la CNNC (45 %) et la CGN (45 %). En juin 2017, la *China Reform Holdings Corporation Ltd* (CRHC)² a rejoint la JV avec 10 %, dans le but d'unifier la technologie de Hualong 1 à travers des normes standardisées.

Ainsi, les travaux de convergence ont été lancés le 25 avril 2013 et ont abouti en 2014 à la signature d'un accord portant sur « l'intégration des technologies pour le développement autonome du Hualong » entre la CNNC et CGN, sous les auspices de M. WU Xinxiong (ancien président de la NEA).

La démarche n'a pas été jugée satisfaisante, si bien que le Premier ministre Li Keqiang s'est exprimé lors d'une réunion du Conseil d'État en janvier 2017 pour que la CNNC et la CGN aillent plus loin dans la convergence des deux modèles. La démarche a abouti en mai 2017 à la présentation d'un

1. La NEA formule, pilote et administre la politique énergétique chinoise. 2. Données 2016 de CNNC / CAEA.



Chantier du Hualong de CNNC/Huadian sur le site de Fuqing, dont la connexion au réseau est prévue pour 2020

rapport sur le programme d'intégration du Hualong à la NEA, que cette dernière a validé en juillet. En fait, la validation porte sur un cahier des charges commun, ce qu'HPTC appelle le « *preliminary design* » que les deux groupes CNNC et CGN doivent respecter. Les spécificités de ce *preliminary design* comprennent notamment la puissance (1200 MW), le nombre d'assemblages (177) ou encore l'approche de la sûreté à la fois passive et active. En revanche, l'étape suivante appelée « *detailed design* » résulte de la responsabilité des deux groupes, ce qui permet d'atteindre une certaine flexibilité du produit, notamment en termes de systèmes de sûreté : CGN possède trois trains de sûreté, tandis que CNNC en possède deux, et les deux modèles comportent des systèmes auxiliaires distincts.

L'AVENIR DU HUALONG EN CHINE

Une production domestique menée sur deux fronts

► **Deux têtes de série, deux Hualong.** En parallèle au processus de convergence impulsé par la NEA, cette dernière a autorisé en décembre 2014 la CGN à équiper Fangchenggang Phase II de deux réacteurs Hualong 1. Ce projet a été acté par le Conseil des Affaires d'État lors de la réunion hebdomadaire du 16 décembre 2015 présidée par le Premier ministre chinois.

Dans le même temps, Fuqing a été choisi pour la tête de série des Hualong de CNNC. Mais Fangchenggang 3 et 4 et Fuqing 5 et 6 font seulement figure de démonstrateurs et n'empêcheraient *a priori* pas d'adopter par la suite un Hualong unifié en Chine.

► Zhangzhou : une préférence pour le Hualong (convergé) aux AP1000.

En 2016, la NNSA précisait que « *la centrale nucléaire de Zhangzhou Phase I [prévoyait] la construction de 4 réacteurs AP1000* ». Mais en avril 2017³, la NEA a finalement autorisé la substitution des AP1000 prévus sur le site de Zhangzhou par des Hualong, comme le lui avait demandé la CNNC. Le remplacement de l'AP1000 par le Hualong 1 s'expliquerait essentiellement par des retards importants pris sur le chantier des AP1000 sur les sites de Sanmen et de Haiyang.

Cette décision démontre une position pragmatique de la NEA, qui reste tout de même alignée sur le discours officiel, en positionnant l'AP1000 comme le réacteur standard « officiel » du parc chinois, et qui n'a donc pas (encore) confirmé de préférence pour le Hualong, même si elle a donné son accord en mars 2017 pour « *mettre en place une normalisation des activités nucléaires basées sur le Hualong 1, projet national important* »⁴.

En réalité, c'est CNNC et CGN qui poussent pour le déploiement du réacteur chinois. Dans cet esprit, le président de CGN, He Yu a nettement prôné le déploiement du Hualong lors des deux sessions parlementaires annuelles tenues à Pékin en mars dernier. Il soutient la construction en série du réacteur, avec le lancement annuel de 4 à 6 tranches pendant la période couvrant 2017-2020.

Dans un certain sens, l'AP1000 et le Hualong 1 se livrent à une course contre la montre : la SNPTC est mobilisée pour assurer le couplage au réseau de son projet pendant le 2^e semestre 2017 alors que la CNNC et la CGN attendent l'autorisation de construire des nouveaux réacteurs de Hualong convergés.

Quid du CAP1400 ?

Pour l'exportation de réacteurs de moyenne puissance, la Chine aurait pu en profiter pour négocier les droits de l'AP1000, mais a préféré exporter le Hualong. Pour la grande puissance, le pays essaie de proposer le CAP1400, dont le lancement du projet n'a pas été entravé par les déboires de l'AP1000. Il s'agit cependant d'un modèle non encore éprouvé puisque la SPIC⁵ vient tout juste de lancer un projet de construction sur le site de Shidaowan. Il est donc difficile de croire aujourd'hui en ses chances d'exportation dans ces conditions.

LES PROJETS INTERNATIONAUX

Vers une unification des codes et normes du Hualong

La NEA, aux côtés de la NNSA et de la SAC⁶, a présenté le « Plan de mise en œuvre du pilote des codes et normes du réacteur Hualong 1 », projet national phare qui lance les travaux de rédaction des standards pour ce nouveau réacteur chinois. Ainsi les projets démonstrateurs du Hualong 1 (Fuqing 5 et Fangchenggang 3) seront utilisés pour faciliter la mise en place des codes chinois applicables aux réacteurs à eau pressurisée afin d'appuyer le positionnement du

⁵ SPIC
State Power Investment Corporation.

⁶ SAC
Standardization Administration of the People's Republic of China.

³ Yicai, 13 avril 2017. ⁴ Cnenergy, 16 mars 2017

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**

CFHI
China First
Heavy Industries.

nucléaire chinois à l'international. La durée des travaux de mise en place de ces standards est fixée à quatre ans.

Les codes en question couvrent l'ensemble des activités d'un réacteur à eau pressurisée pendant toute sa durée de vie: mise en place d'infrastructures, travaux préliminaires, conception, fabrication d'équipements, construction, essais avant la mise en service, exploitation et démantèlement. Ces codes, dès qu'ils auront été établis, permettront à la Chine de disposer de ses propres standards dont le niveau sera égal à d'autres codes applicables à l'international, et répondront aux conditions requises pour la construction des réacteurs Hualong 1 en Chine et à l'étranger. Pour cela, les nouveaux codes chinois seront traduits en anglais. Les réacteurs chinois qui seront construits à partir de 2020 pourront utiliser les codes chinois établis et cela constituera également une étape importante pour permettre aux concepteurs et équipementiers chinois d'améliorer leurs compétences professionnelles et d'augmenter leur influence internationale.

Une exportation qui évite la double concurrence

La NEA vise surtout à faciliter l'exportation du réacteur chinois et à éviter ainsi une double concurrence inutile (CNNC vs CGN). Ceci étant dit, on remarque d'ores et déjà que la Chine pose ses jalons partout et de manière très coordonnée, puisque les trois acteurs chinois ne se présentent

jamais en concurrence à l'étranger. D'ailleurs, d'après la NEA, trois projets d'exportation du Hualong sont particulièrement crédibles :

- › **au Pakistan:** deux Hualong sont en cours de construction par la CNNC depuis 2015 et 2016. Conçue par le NPIC (institut de CNNC) et réalisée par **CFHI**, la cuve destinée à la tranche 2 de la centrale nucléaire de Karachi au Pakistan a passé un test hydrostatique avec succès le 9 juillet 2017. Cet événement marque une étape importante dans le positionnement du nucléaire chinois à l'international;
- › **en Grande Bretagne,** avec Bradwell. L'accord du 15 septembre 2016 sur la construction de centrales nucléaires par EDF et CGN a marqué le début de la présence de la CGN sur le marché britannique, et son introduction sur le marché européen. Grâce au *General Design Assessment* (licence de construction délivrée par l'Autorité de sûreté britannique pour le Hualong) en cours d'obtention (le processus va durer cinq ans), le Hualong sera certifié conforme aux normes de l'ONR, facilitant l'accès du réacteur chinois en Europe et à l'international;
- › **en Argentine,** en coopération avec le Canada pour l'installation d'un Candu (prévu pour 2018) et d'un Hualong

(prévu pour 2020) : La NEA et l'Argentine ont beaucoup interagi depuis 2010, avec la signature d'un mémorandum d'entente (MoU) en 2010, la signature d'accords en 2012 et 2014, la signature d'un MoU en 2015 sur un projet de réacteur Hualong, projet concrétisé en mai 2017 puisque les 4^e et 5^e tranches nucléaires en Argentine ont été l'objet d'un contrat global en présence du président chinois Xi Jinping et du président argentin Mauricio Macri.

Pour le reste, des projets sont à l'étude et des visites bilatérales attestent d'un rapprochement entre les deux pays :

- › **au Brésil:** HPTC intègre le Brésil dans ses prochains projets d'exportation de Hualong. Par ailleurs, très récemment, on a vu le projet d'un MoU signé entre la CNNC et Eletrobras et sa filiale Electronuclear pour la promotion de la coopération dans le domaine nucléaire;
- › **en République tchèque:** le 31 mars 2016, la CGN et le groupe énergétique tchèque ont signé à Prague un protocole d'accord aux termes duquel le Hualong 1 serait homologué par l'*European Utility Requirement*;
- › **au Kenya:** la CGN et le *Kenya Nuclear Electricity Board* (KNEB) ont signé en septembre 2015 un mémorandum sur la coopération dans le domaine nucléaire, notamment pour un développement de réacteurs Hualong au Kenya, à la demande du pays du continent africain. Les deux acteurs ont conclu le 21 mars 2017 d'autres accords complémentaires selon lesquels la CGN aidera son partenaire kenyan à former du personnel, à augmenter sa capacité industrielle et à partager des informations sur le Hualong 1 et d'autres réacteurs chinois adaptés.⁴



Représentation de la future centrale de Guangxi avec ses deux Hualong, actuellement en construction. Prévus pour être connectés au réseau en 2019 et 2020, ils seraient les premiers réacteurs de 3^e génération de conception chinoise à entrer en service

4. Source : Nuclearnet

La Chine, un enjeu majeur pour la filière française

Par **Yohan Rey**, représentant en Chine du Partenariat France Chine Electricité (PFCE)



en substance...

Créée en 1997 sous l'impulsion d'EDF, l'association Partenariat France-Chine Électricité (PFCE) vise à encourager la sûreté et la compétitivité de la production nucléaire d'électricité en Chine en favorisant l'implantation durable des acteurs français du nucléaire dans le programme chinois. Actuellement sous la présidence d'Hervé Machenaud, l'association regroupe une centaine de membres, tous des grandes entreprises, des PME ou des ETI françaises qualifiées par EDF pour fournir le parc nucléaire français¹. Régulièrement, PFCE maintient à jour sa connaissance des échanges entre la France et la Chine en interrogeant directement ses membres. Les chiffres du présent document proviennent des études 2015 et 2016, réalisées auprès de la centaine de membres de l'association. Elles ont toutes deux obtenu un taux de réponse de 60 %.

Depuis plus de trente ans (première mission d'étude en décembre 1986) les sociétés françaises accompagnent l'émergence du parc nucléaire chinois. Avec les premiers contrats à Daya Bay jusqu'au plus récent projet d'EPR à Taishan, la filière française a su diversifier et étendre sa présence dans tous les secteurs du cycle nucléaire en Chine. Aujourd'hui, cette stratégie est gagnante. En effet, face au ralentissement des nouveaux projets à travers le monde, la Chine, avec 19 unités en construction, s'impose comme un marché incontournable pour les entreprises françaises. Et ces dernières constatent des répercussions concrètes de leurs activités dans le pays.

DES RETOMBÉES FINANCIÈRES INDÉNIABLES

En 2015, le marché chinois du nucléaire a généré 281 millions d'euros pour les entreprises françaises. Ces dernières ont même réalisé dans le pays un chiffre d'affaires total de 732 millions d'euros dans le secteur énergétique. Avec plus du quart des entreprises françaises occupant une part de marché supérieure à 30 %, elles sont relativement bien ancrées dans le paysage nucléaire chinois. Pour 13 % des entreprises, la Chine représente plus du tiers de leur chiffre d'affaires. Certains membres déclarent par ailleurs des chiffres d'affaires chinois hors nucléaire (parfois plusieurs dizaines de millions d'euros) directement dus à leur prospection sur le marché nucléaire chinois. Pour ce faire, 64 % des sociétés françaises sont présentes dans le

pays, que ce soit par le biais de *joint-ventures*, de WOFE² (entreprises autonomes à capitaux 100 % étrangers), de bureaux de représentation ou d'agents. On constate d'ailleurs depuis quelques années que c'est le statut de WOFE, qui se développe principalement. Plus souple que la JV, ce système permet également aux entreprises étrangères de mieux protéger leurs savoir-faire, tout en maîtrisant leur stratégie de développement et leur capital.

UN MARCHÉ CHINOIS SOURCE DE DYNAMISME

En 2016, ce sont 16 % des répondants qui ont indiqué avoir signé un nouveau contrat ou avoir renouvelé leurs engagements avec des clients chinois. La locomotive chinoise semble donc continuer à entraîner avec elle la filière hexagonale vers une coopération inscrite dans la durée.

Autre phénomène majeur, plus de la moitié des entreprises françaises membres de PFCE saluent l'impact positif de ses activités en Chine sur l'emploi. Ainsi, elles estiment à plus de 760 le nombre de postes maintenus, et elles affirment avoir créé 228 nouveaux postes en France pour soutenir leurs activités en Chine.

Enfin, la moitié d'entre elles jugent qu'une présence sur le marché chinois leur a ouvert des perspectives pour des marchés tiers, principalement au Royaume-Uni. Il semble aussi que les exigences liées au marché chinois insufflent une forte dynamique de recherche et de développement au sein des entreprises françaises. De ce fait, 62 % des sondés ▶

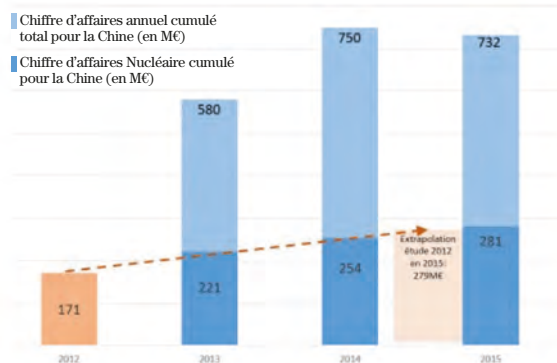


Figure 1 : chiffre d'affaires annuel cumulé pour les membres du PFCE en Chine (en M€).
Source : PFCE 2016.

1. Selon le système en vigueur appliqué par EDF pour la qualification de ses fournisseurs et sous-traitants.

2. Le statut de *Wholly Owned Foreign Enterprise* (WOFE) désigne un type d'entreprise de la République populaire de Chine destiné aux entrepreneurs ou investisseurs étrangers.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**

reconnaissent avoir innové dans le but de remporter des appels d'offres en Chine. C'est donc l'ensemble de la filière nationale qui est amené non seulement à se maintenir à la pointe de l'innovation et de l'adaptation, mais aussi à conserver une précieuse avance sur la concurrence.

OPPORTUNITÉS DU MARCHÉ CHINOIS

Interrogées sur les perspectives offertes par le marché chinois, les entreprises sont nombreuses

à estimer que la croissance du parc chinois est une opportunité de développement majeure. Avec une vingtaine d'unités en projet, la Chine représente le premier parc en construction du monde. Les sociétés françaises suivent aussi de près le développement de la technologie du réacteur Hualong (HL). En effet, cette dernière étant fortement inspirée des standards français, sa montée en puissance permettrait aux sociétés françaises de se positionner. C'est donc la deuxième source d'opportunités identifiée par nos membres.

Dans ce contexte, des discussions (avancées) sont en cours entre l'AFCEN (Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électronucléaires) et la NEA (*National Energy Administration*). Cet accord permettra d'approfondir la coopération dans le domaine des codes et standards entre la France et la Chine.

Enfin, la filière française perçoit de belles opportunités de développement dans les secteurs de la maintenance et dans la future numérisation du parc chinois.

DES PERSPECTIVES ATTRACTIVES, MODÉRÉES PAR CERTAINS FREINS

En revanche, les commentaires reçus lors de l'enquête PFCE 2016 illustrent que la moitié des sondés s'inquiètent de la volonté grandissante des autorités chinoises de localiser la production. Comme le montre également la figure 4, plus de 30 % des répondants font aussi état d'une forte montée de la concurrence chinoise.

POUR CONCLURE...

Il convient de remarquer que, malgré la concurrence et des difficultés grandissantes, la quasi-totalité des entreprises PFCE considèrent que le marché chinois (nucléaire et hors nucléaire) reste pour elles un enjeu tout à fait majeur. Face à cette situation, c'est en faisant ensemble la promotion de leur large gamme de savoir-faire que les entreprises françaises ont su gagner en présence et en visibilité en Chine. Aujourd'hui, cette démarche collective, initiée par les fournisseurs qualifiés d'EDF depuis vingt ans, apparaît plus pertinente que jamais : elle leur permet de se projeter dans la durée, sur un marché certes complexe, mais des plus dynamiques.

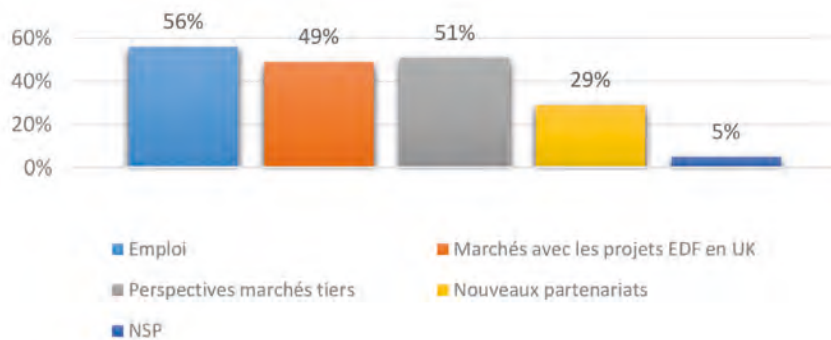


Figure 2 : influence positive du marché chinois sur les sociétés françaises.
Source : PFCE 2016

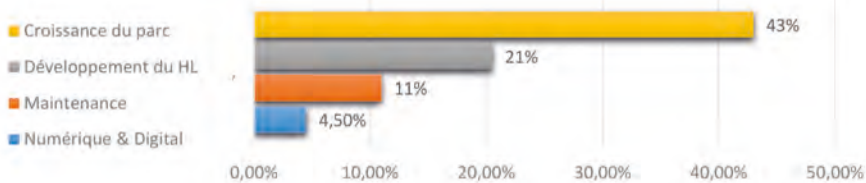


Figure 3 : principales opportunités identifiées sur le marché chinois.
Source : PFCE 2016

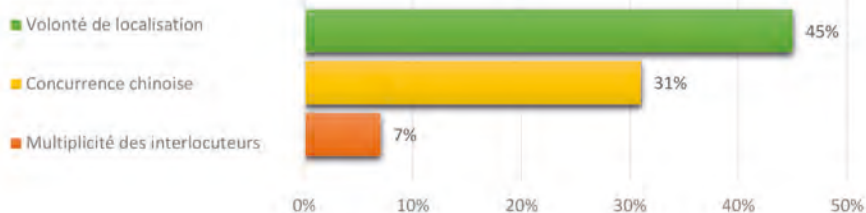


Figure 4 : principaux freins identifiés sur le marché chinois.
Source : PFCE 2016

« La Chine est un marché concurrentiel mais incontournable »

Entretien avec **Philippe Anglaret**, président du Groupe intersyndical de l'industrie nucléaire (GIIN)



en substance...

Premier marché nucléaire au monde, la Chine attire les entreprises du monde entier, d'autant que le pays dispose d'un parc de production hétérogène faisant la part belle aux différents réacteurs de conception étrangère. Pour les industriels français, notamment les PME, le marché chinois, porteur ces dernières années, se révèle de plus en plus compliqué à aborder décrypte Philippe Anglaret, président du GIIN.

Philippe Anglaret,
président du GIIN



© GIIN

RGN : La Chine est-elle un marché porteur pour les entreprises prestataires françaises ?

Philippe Anglaret : La Chine est un marché incontournable pour les entreprises prestataires françaises qui souhaitent exporter. L'empire du Milieu représente depuis de nombreuses années plus de la moitié du marché nucléaire mondial. Le pays est le premier marché en matière de constructions neuves, le troisième en matière d'exploitation-maintenance et sera demain un marché important pour le cycle du combustible. Il reste donc aujourd'hui le premier marché d'exportation des entreprises prestataires françaises.

Quels sont les atouts de la France en Chine ?

P.A. : Présente depuis la construction de la centrale nucléaire de Daya Bay en 1987, la France a été le premier partenaire de l'industrie chinoise. La plupart des sociétés françaises se sont d'ailleurs implantées dès cette époque.

La base des réacteurs actuellement en exploitation, les réacteurs CPR 1000, dérivés technologiques de la centrale de Daya Bay, puise son origine dans la technologie française. Pour le développement de son programme de troisième génération, la Chine s'est également appuyée en partie sur la technologie française de l'EPR. Dans d'autres domaines, comme le développement des codes et normes et la constitution d'une industrie du cycle du combustible, le pays regarde aussi beaucoup ce qui se fait dans l'Hexagone.

Est-il simple pour une entreprise d'entrer sur le marché chinois aujourd'hui ?

P.A. : À moins de disposer d'un produit ou d'un service exceptionnel, il est aujourd'hui très difficile pour une entreprise étrangère de s'implanter en Chine sur le marché de la construction, pour des raisons à la fois réglementaires et concurrentielles. La plupart des entreprises françaises qui se trouvent en Chine y sont arrivées et y ont plusieurs années et sont aujourd'hui dans une logique de consolidation de leur implantation. Il pourrait y avoir une nouvelle vague d'implantation d'entreprises françaises si le contrat d'AREVA pour la construction d'une usine de traitement-recyclage se conclut. Dans ce cas, les entreprises présentes sur ce marché auront une opportunité exceptionnelle pour s'implanter durablement.

Quelles sont les difficultés du marché chinois ?

P.A. : Le marché chinois est un marché très concurrentiel qui attire les entreprises prestataires du monde entier. Cette concurrence est exacerbée avec l'essor de la concurrence locale très soutenue par les

pouvoirs publics qui imposent une très forte localisation et des transferts de technologie.

La Chine est également un marché où il peut être compliqué de comprendre la manière dont sont prises les décisions.

Enfin, la réglementation détermine les conditions d'implantation des entreprises : pour certaines activités, cette réglementation interdit la vente de prestations en direct sur le marché chinois. Certaines sociétés d'État sont seules habilitées à répondre aux appels d'offres et sont donc un point de passage obligé. Toute participation au marché implique nécessairement des transferts technologiques pouvant inclure des transferts de *know how*.

La Chine souhaite exporter des centrales utilisant sa propre technologie et renforcer sa supply chain, est-ce un risque pour les entreprises prestataires françaises ?

P.A. : La Chine est devenue un grand pays nucléaire au même titre que la Russie, les États-Unis, le Japon, la Corée et la France. Le pays est devenu tout à la fois un « concurrent », un « partenaire » et un « client ». L'empire du Milieu souhaite être autonome sur le plan technologique et adopte la même stratégie que la France dans les années 1970-1980. Cependant, pour exporter, le pays sait qu'il devra nouer des accords avec d'autres prestataires. Il y aura donc toujours des opportunités pour les entreprises françaises. ■

DOSSIER

Innovations, technologies, export
CHINE, LE NOUVEAU GÉANT DU NUCLÉAIRE

104 PRESTATAIRES FRANÇAIS EN CHINE

- ACTEMIUM
- ADES TECHNOLOGIES
- ALLOSS
- ALSTOM - GE POWER
- ALTRAN TECHNOLOGIES
- ANDRE LAURENT
- APAVE
- AREVA
- AREVA NP
- ATOS ORIGIN
- ATS INGENIERIE
- AUBER & DUVAL
- BAUMERT
- BERNARD CONTROLS
- BOCCARD
- BUREAU VERITAS
- CLEMESY SA
- CLEXTRAL DKM
- CLYDEUNION PUMPS - SPX
- CMR FRANCE
- CNIM
- COMETE FAYAT
- CROUZET AUTOMATISMES
- CTI GROUPE
- DAHER
- DEF
- DELTA NEU
- DESCOTE
- DEXTRA
- DIRICKX
- ECM TECHNOLOGIES
- EFFECTIS FRANCE
- EGIS INDUSTRIES
- EIFFAGE METAL
- ELTA
- ENSIVAL MORET FAPMO
- ESI FRANCE
- ETNA INDUSTRIE
- FIVES GROUP
- FLOWSERVE
- FLUIDYN
- FREYSSINET
- FSG FRANCE
- FUJI ELECTRIC FRANCE
- GEODIS WILSON
- GEORGIN
- HAMON
- HEICO FRANCE
- HONEYWELL SAFETY PRODUCTS
- HOWDEN SOLVENT-VENTECH
- HUTCHINSON
- IFTS - INSTITUT DE LA FILTRATION ET DES TECHNIQUES SEPARATIVES
- INSAVALOR
- INSTITUT DE SOUDURE
- KEMICA COATINGS
- KEP TECHNOLOGIES
- KROHNE
- KSB - AMRI
- KURY
- LANDAUER
- LATTY INTERNATIONAL
- LEROY SOMER
- LISEGA - CITA PRODUCTION
- MAN DIESEL & TURBO
- MANOIR INDUSTRIES
- MIRION TECHNOLOGIES
- MISTRAS GROUP
- NEXANS FRANCE
- NFM TECHNOLOGIES
- NORD-LOCK FRANCE
- NUVIA
- ODU FRANCE
- PENTAIR VALVES & CONTROLS
- PROMAT
- PRONAL
- PRYSMIAN GROUP
- PYROCONTROLE
- QUIRI
- REEL
- REYES INDUSTRIES
- ROLLS-ROYCE
- S.A.L.B CONNECTIQUE
- SBS
- SCHNEIDER ELECTRIC
- SEGULA TECHNOLOGIES
- SETEC
- SIEM SUPRANITE
- SIMELECTRO
- SITES
- SOURIAU
- SRA SAVAC
- STABLI
- SULZER POMPES FRANCE
- THERMOCOAX
- TRACTEBEL ENGINEERING - COYNE ET
- BELLIER
- VALINOX NUCLEAIRE
- VELAN
- VINCI CONSTRUCTION
- VINCI ENERGIES
- VSL
- VULCAIN INGENIERIE
- VULCANIC
- WEIR POWER INDUSTRY FRANCE
- WIKA

73%

LA PART DES CENTRALES NUCLÉAIRES CHINOISES EN OPERATION AYANT CONTRACTÉ AU MOINS UN ÉQUIPEMENT OU SERVICE D'UN FOURNISSEUR FRANÇAIS

65%

LA PART DES PRESTATAIRES FRANÇAIS IMPLANTÉS EN CHINE MEMBRES DU GIIN

RÉFÉRENCES CLIENTS DANS LE NUCLÉAIRE EN CHINE
 CNNC, CGN, SNPTC, SNPEC, TNPJVC, EDF, GE-ALSTOM, AREVA, AREVA NP, CNPEC, TQNPC, NPQJVC, DNMC, GNPJVC, HUAXING, CNPDC, CNEIC, LANPC, HARBIN ELECTRIC

CODES ET NORMES DES PRESTATAIRES FRANÇAIS IMPLANTÉS EN CHINE (Liste non exhaustive)

- ALLEMAGNE** : STANDARD KTA 1401, AVS D 100/50
- CANADA** : CAN3 Z-299, CSA N285.0, CSA
- ÉTATS-UNIS** : ASME/SECTIONS III, VIII, ASME NQA 3800, ASME-NQA1, ASME IX, SME SECTION III CLASS 1, 2 AND 3, NPT STAMPS, ASME SECTION VIII 'U' STAMP, ASME QME-1, PED/CE, IEEE, NNSA, API 610, ISO 5199, ANSI/ASME B73.1, ICEA
- FRANCE** : RCC, RCCM, RCCMRX, RCCE, RSEM, ESPN, DESP, CODETI, CODAP
- INDE** : AERB
- INTERNATIONALE** : IAEA 50-C-Q, IEEE
- RUSSIE** : GOST, Z299. OTT 87 / NP 06805

CERTIFICATIONS DES PRESTATAIRES FRANÇAIS IMPLANTÉS EN CHINE (Liste non exhaustive)

- ALLEMAGNE** : DIBT, TÜV - AD MERKBLATT WRD
- CANADA** : CSA Z299
- CHINE** : HAF604, HAF601
- CORÉE DU SUD** : KHNP
- ÉTATS-UNIS** : ATEX, PED, ASTM, API1104, NDT, 10CFR50, 10CFR21, NBIC-NR, GS-R-3, NQA-1 and NSQ-100, IRIS
- FRANCE** : EDF-UTO, CAEAR, CEA, CEFRI (657 E), AFCAB, Q-N-100 et Q-N-300 (AREVA), SGAQ (EDF), FRA/N/100/OL3
- INTERNATIONALE** : OHSAS 18001: 2007, ISO 9001: 2008, ISO 140001, ISO 38342, ISO IEC 17025, AS9100C, CMMI Lebel 3, ATEX 94/9/CE, MIL-Q-9858-A
- JAPON** : JSME, MHI
- RUSSIE** : NIIZh, Energoatom, TRCU
- ROYAUME-UNI** : CARES, ROSPA 2010



CARTOGRAPHIE DES PR DU NUCLÉAIRE IMPLAN

Légendes

- Centrales nucléaires
- Implantation des sociétés françaises
- Prestataire de services français présent
- Prestataire d'équipements français présent

HAIYANG CENTRALE NUCLEAIRE
 Haiyang, Shandong



HONGYANHE CENTRALE NUCLEAIRE
 Hongyanhe, Liaoning



LING AO CENTRALE NUCLEAIRE
 Ling Ao, Guangdong



FANGCHENGANG CENTRALE NUCLEAIRE
 Fangchenggang, Guangxi



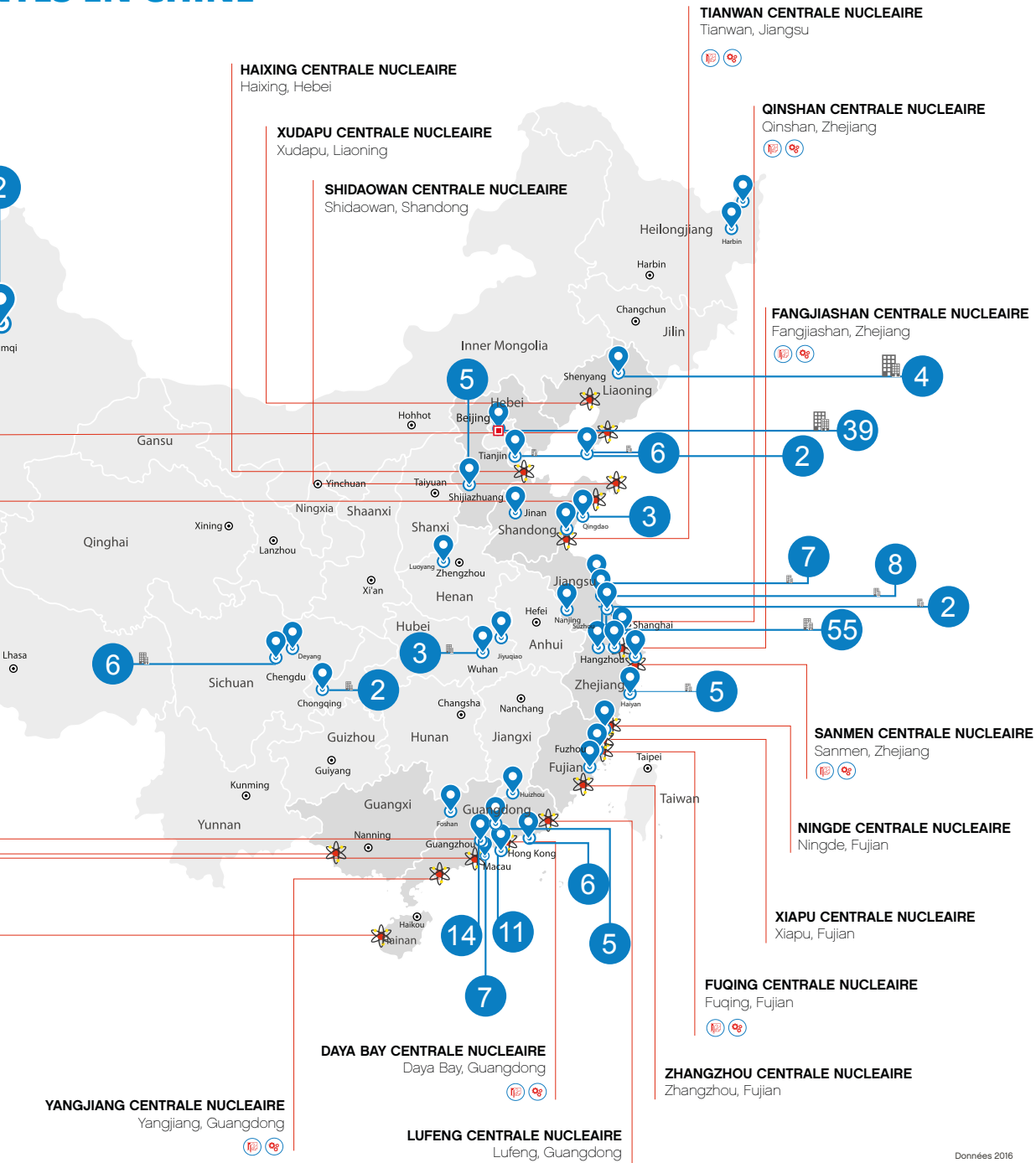
TAISHAN CENTRALE NUCLEAIRE
 Taishan, Guangdong



CHANGJIANG CENTRALE NUCLEAIRE
 Changjiang, Hainan



RESTATAIRES FRANÇAIS ACTIVITÉS EN CHINE



Données 2016



CALL FOR
SPEAKERS

iNDEX

25 - 26 +27* JUNE 2018
PARIS, FRANCE

SFEN-INDEX2018.ORG





International NUCLEAR DIGITAL EXPERIENCE



SFEN partners with **WNE 2018**, organizes the first major international conference dedicated to digital transformation in the nuclear field.

WNE 2018 (World Nuclear Exhibition) will host 800 international exhibitors and welcome 10,000 international visitors from the nuclear industry on June 26-28 in Paris-Villepinte.

25-26 June: a 2-day conference in Paris (Plenaries, keynotes, case studies and tech-demonstrations)

*** +27 June:** a 1 day-visit on WNE 2018 (WNE free exhibition access, WNE onsite guided tours and networking activities organized jointly by WNE and INDEX)

L'industrie nucléaire chinoise en quête d'internationalisation

Par **Tristan Hurel**, SFEN



en substance...

Plus grand marché nucléaire de la planète, la Chine lorgne désormais au-delà de ses frontières. Capitalisant sur l'acquisition de différentes technologies nucléaires étrangères depuis les années 1980, le pays développe une gamme de réacteurs domestiques de 3^e et 4^e générations. Ses nouvelles technologies, portées par des entreprises présentes sur l'ensemble de la chaîne de fabrication nucléaire, donnent à la Chine des outils pour exporter son savoir-faire au-delà de ses frontières.

UNE MONTÉE EN GAMME RAPIDE

Un savoir-faire et une expérience importés puis nationalisés

L'industrie nucléaire civile chinoise a émergé au début des années 1970. Son démarrage réel s'est fait dans les années 1980, avec le projet de construction à Qinshan d'un premier réacteur à eau pressurisé de 300 MWe, le CNP-300 PWR, et, en parallèle, l'importation de la technologie française sur les réacteurs 900 MWe pour le projet de la centrale de Daya Bay. Dans les années 1990 et 2000, les technologies de réacteur russe (VVER) et canadien (Candu) ont également fait leur arrivée sur le marché chinois.

Peu à peu, le nucléaire a été reconnu en Chine comme une source d'énergie importante. À partir du milieu des années 2000, le pays engage un ambitieux programme de développement nucléaire dans le cadre de son 11^e plan quinquennal de développement national (2006-2010), marqué par la construction en série du CPR1000 (trente unités)

basé sur la technologie française du 900 MW. La base industrielle actuelle, tant pour la conception que pour l'ingénierie et la fabrication, s'est constituée en grande partie grâce à cette première grande phase de construction en série.

En tant qu'État contractant du Traité de non-prolifération nucléaire, la Chine a commencé à développer ses compétences dans toute la chaîne de l'industrie nucléaire : développement de nouvelles technologies nucléaires, exploitation de réacteurs, conversion et enrichissement de l'uranium, fabrication du combustible, ingénierie, achats, construction, retraitement des combustibles usés...

Près de trente ans après le début de son programme nucléaire, le pays a mis sur pied une industrie nucléaire intégrée, de l'amont à l'aval, avec le projet de fermer son cycle, sur le modèle de ce qu'a accompli la France.

Une capacité industrielle nucléaire favorisée par le dynamisme économique

Au cours de cette période, la Chine est devenue un acteur économique mondial de premier plan. La croissance rapide et l'épanouissement de l'industrie chinoise ont favorisé l'essor de sa capacité de production d'équipements nucléaires, tant en qualité qu'en quantité. Les très importants besoins énergétiques du pays depuis la fin des années 1970 (multiplication par cinq des capacités de production énergétique) ont notamment favorisé l'émergence de géants industriels de l'énergie capables de produire les grands composants des centrales thermiques. Le développement de ce tissu industriel, avec une réelle montée en gamme, a accompagné celui de

l'expertise chinoise sur l'ingénierie nucléaire et la conception de pièces nucléaires, tant et si bien que le pays aurait aujourd'hui la capacité de fabriquer des équipements pour plus de dix réacteurs par an. Cette importante capacité de production permet non seulement de satisfaire les besoins du marché intérieur, mais aussi d'en réserver une partie pour l'export.

L'EXPORT DES TECHNOLOGIES NUCLÉAIRES DE 3^e GÉNÉRATION À L'HORIZON

Hualong One, le réacteur de 3^e génération *made in China*

À partir des années 2000, les autorités ont commencé à importer des réacteurs de 3^e génération, et leurs technologies. Le réacteur AP1000 de Westinghouse a été choisi au milieu des années 2000 pour devenir la base du développement de la filière nucléaire chinoise. Les chantiers des démonstrateurs de ce réacteur, Sanmen 1&2 et Haiyang 1&2, ont démarré en 2009-2010. C'est à cette même période que la technologie EPR, a été choisie pour les projets 1 & 2 de Taishan. Ainsi, au-delà des bases formées par la technologie du 900 MW français, l'industrie chinoise se retrouve en position de mettre en service les premiers réacteurs de troisième génération au monde, notamment grâce à la construction sur place de réacteurs AP1000 et d'une partie des composants des réacteurs EPR. Après l'accident de Fukushima, en 2011, la Chine a décidé que tous les nouveaux projets devraient satisfaire aux normes de sûreté les plus exigeantes. Désormais, seuls des réacteurs de 3^e génération seraient lancés. En 2013, lorsque la Chine s'apprêtait à réautoriser de nouveaux projets

Le rôle central des **compagnies intégrées** dans l'industrie nucléaire chinoise

Pour des raisons historiques, l'exploitant nucléaire chinois est toujours en charge de la gestion du projet, de la plupart des activités de conception (même la conception des équipements), de l'ingénierie NI, de la mise en service, de l'exploitation et du démantèlement. Cette organisation industrielle s'appuie sur le modèle français. Seuls la fabrication de l'équipement et les travaux de construction et de montage sont confiés à des fournisseurs. Cette caractéristique fait des exploitants chinois les géants de l'industrie nucléaire, gardant en leur sein tout le savoir-faire nucléaire. Cette configuration explique pourquoi ce sont eux qui pilotent toujours le développement du marché à l'export.

nucléaires, tous les projets de réacteurs étrangers de 3^e génération connaissaient des retards et aucun d'entre eux n'avait encore été raccordé au réseau. Profitant de cette situation, les exploitants nucléaires chinois CNNC et CGN ont respectivement fait la promotion de leur propre concept de réacteur de 3^e génération, développé sur la base du CPR1000, lui-même dérivé du 900 MW français. En 2014, sous l'impulsion du gouvernement, CNNC et CGN ont entamé la convergence de leurs créations sous une marque commune, « Hualong One » (HPR1000). Peu après, les premiers projets de ce réacteur de 3^e génération chinois, Fuqing 5 & 6 pour CNNC, et Fangchenggang 3 & 4 pour CGN, ont été approuvés et leur construction a démarré en 2015.

À travers *Hualong International Nuclear Power Technology*, la co-entreprise réunissant les « alliés concurrents » CNNC et CGN, la Chine veut proposer un modèle de réacteur de 3^e génération convergent et compétitif pour développer l'industrie nucléaire chinoise à l'international. Le réacteur bénéficiera du retour d'expérience des chantiers en cours en Chine. Ce pari international a déjà remporté de premiers succès. Le Hualong a ainsi obtenu de premiers contrats au Pakistan, pour deux unités près de Karachi. D'autres pays, comme la Turquie, et peut-être la Roumanie, envisageraient aussi de se doter de

la technologie chinoise. Le Hualong a aussi été proposé en République Tchèque, en Pologne et au Kenya.

Le Royaume-Uni, futur gage de crédibilité du nucléaire chinois ?

La Chine compte beaucoup sur la perspective de construire des Hualong sur le site de la centrale nucléaire de Bradwell, au Royaume-Uni. L'accord entre le gouvernement britannique d'un côté et CGN et EDF de l'autre pour construire à Hinkley Point deux réacteurs EPR s'est aussi accompagné de la possibilité pour la Chine de proposer, pour la première fois, un réacteur dans un pays occidental aux normes nucléaires reconnues mondialement. Associé à EDF dans la *General Nuclear Services* (GNS), CGN a entamé les démarches nécessaires pour obtenir la *Generic Design Assessment* (GDA) de l'*Office for Nuclear Regulation* (ONR), l'organisme de sûreté britannique, dont les exigences sont parmi les plus élevées au monde. L'hypothèse d'une validation technologique par l'ONR constituerait un gage de crédibilité très important pour le Hualong et pourrait ouvrir de nouveaux contrats pour la Chine. Ce serait alors la première fois que les technologies nucléaires « *made in China* » seraient mises sur un pied d'égalité avec les autres technologies de 3^e génération déjà approuvées que sont l'EPR et l'AP1000.

Des défis en passe d'être relevés ?

Malgré les ambitions politiques et économiques des autorités derrière l'export de technologies nucléaires chinoises, cette politique de « *Go abroad* » doit encore relever plusieurs défis. Le premier sera celui du GDA de l'ONR. S'il n'est pas accepté, la crédibilité du programme nucléaire chinois serait mise à mal. La Chine doit donc encore rassurer ses clients sur la fiabilité de sa technologie par rapport à celle de ses concurrents, notamment occidentaux, dont les produits demeurent, malgré leurs retards et dérives de coûts, des références en matière de sûreté. Paradoxalement, la Chine contribuera d'ailleurs à valoriser ses

technologies concurrentes à travers la mise en service des premières unités de 3^e génération (AP1000 à Sanmen et EPR à Taishan). La Chine devra aussi se trouver une place face à une Russie qui s'est hissée au rang de premier exportateur de technologies nucléaires au monde, avec un portefeuille de 133 milliards de dollars en attente pour Rosatom, le géant nucléaire russe¹.

Sur le marché intérieur, en raison d'une relative surcapacité électrique et de questionnements autour de l'acceptation par le public du développement de l'énergie nucléaire, l'hésitation sur le choix technologique, ainsi que les retards dans la construction des têtes de série de réacteurs de 3^e génération, certaines ombres sont projetées sur l'ambitieux programme nucléaire. Ces aspects pourraient diminuer la capacité du pays à promouvoir à l'export ses technologies, bien que les autorités comptent sur l'énergie nucléaire, au côté des énergies renouvelables, pour décarboner leur mix de production électrique. Reste que les premiers contrats signés par la Chine à l'étranger ne trompent pas sur la volonté du pays à s'implanter durablement hors de ses frontières, y compris sur les marchés occidentaux, ce qui aurait été encore impensable il y a quelques années. ■

1. <http://www.rosatom.ru/>



ZOOM SUR...

L'EXPORT DE SMR DÉJÀ ENVISAGÉ

La Chine consacre d'importants efforts de R&D dans le développement de la prochaine génération de réacteurs nucléaires. Plusieurs options sont en développement dans la phase de la construction de projet de démonstration ou de préparation (tels que HTR, FBR, SMR, etc.). Dans ce cadre, au printemps, CNNC a annoncé que plusieurs pays s'intéressaient à ses technologies de petits réacteurs modulaires (SMR), indiquant discuter avec le Royaume-Uni, l'Arabie saoudite, l'Indonésie, la Mongolie, le Brésil, le Pakistan, l'Égypte, le Canada et l'Iran.

Sûreté nucléaire chinoise, un impératif bien compris

Par la rédaction



en substance...

Figurant parmi les derniers nés des grands programmes nucléaires civils, le programme chinois, démarré réellement dans les années 1980, a suivi l'essor fulgurant de la Chine ces trente dernières années.

Si ce développement rapide a pu interroger certains observateurs sur le niveau de sûreté et l'exigence des autorités chinoises, les derniers doutes sont en passe d'être levés.

L'empire du Milieu se dote d'un dispositif réglementaire et législatif permettant de renforcer les prérogatives de ses autorités en matière de contrôle. Dans le domaine de la sûreté, la Chine travaille également avec ses pairs pour adopter les meilleurs standards internationaux.

S'INSPIRER DES MEILLEURS STANDARDS INTERNATIONAUX

Au regard des enjeux de sûreté nucléaire, l'arrivée tardive de la Chine parmi les grandes nations nucléaires civiles s'avère ambivalente.

D'un côté, son manque de retour d'expérience sur l'exploitation de réacteurs rend *a priori* la sûreté nucléaire moins rassurante, là où d'autres exploitants, EDF le premier, peuvent capitaliser sur plusieurs milliers d'années-réacteur d'expérience (une expérience inégalée à ce jour). S'y ajoute, l'impression d'un manque de transparence et de communication des autorités chinoises (dans plusieurs segments de l'économie), qui peut fragiliser la crédibilité de la sûreté chinoise vis-à-vis de l'opinion.

D'un autre côté, cette jeunesse est un atout puisqu'elle permet non seulement à la Chine de se doter de technologies de réacteurs éprouvées mais aussi de

bénéficier, grâce à d'habiles partenariats, du retour d'expérience dans la sûreté des autres pays, France en tête. Ainsi, en arrivant, dans les années 1980, sur un marché nucléaire mature, avec l'expérience acquise de deux accidents importants : Three Miles Island en 1979 aux États-Unis et Tchernobyl en 1986 en URSS, les autorités chinoises en charge de la sûreté du parc nucléaire ont eu l'opportunité et la volonté de partir sur les meilleures bases possible. C'est notamment sur ce critère que le choix des réacteurs français de 900 MW sera opéré pour équiper les premières centrales du pays et que le pays adoptera les codes et règles de sûreté de l'exploitant EDF pour tous les réacteurs issus ou dérivés de la technologie française.

Cet accompagnement français dans la sûreté chinoise a été pionnier et structurant. Ainsi, l'ASN et l'IRSN ont été des partenaires majeurs de l'autorité de sûreté chinoise **NNSA**, et de ses appuis techniques **TSO** : **NRSC**, **BINE** puis **CNPE**). Cet accompagnement a contribué, notamment en 1987, à la formation en France de 70 ingénieurs chinois, dont la plupart occupent à ce jour des postes à responsabilités dans la sûreté nucléaire, l'industrie nucléaire et l'administration chinoises. Cette coopération se perpétue puisque depuis 2014 la Commission européenne, *via* son instrument **INSC**, a confié à l'ASN et à l'IRSN une contribution importante dans les contrats d'assistance à la NNSA et à son organisme technique de sûreté, le NRSC. Parmi les actions d'envergure mises en œuvre ces dernières années figurent également l'organisation et la tenue d'une part d'un

séminaire en 2010 sur les conditions d'installation des réacteurs nucléaires, d'autre part d'un séminaire à Pékin en avril 2012 sur les *stress-tests* post-Fukushima – que la France et l'UE avaient menés suite à l'accident –, avec des représentants chinois de **CNEA**, **NNSA**, **NRSC**, les exploitants **CNNC** et **CGN** et des représentants de l'ASN et de l'IRSN ainsi que d'EDF et d'AREVA, ayant permis à la France et à la Chine de comparer les actions respectivement mises en place.

La Chine collabore aussi avec d'autres États, dont les États-Unis ou la Corée du Sud, sur les enjeux de sûreté nucléaire. Ainsi, si les normes chinoises sont calées sur celles de l'AIEA, les codes, quant à eux, varient selon l'origine des réacteurs. La Chine adopte ainsi les codes américains pour l'AP1000 et les codes français pour l'EPR et la partie de son parc issue du 900 MW français. Dans une situation unique au monde, le pays démontre sa capacité à s'approprier des normes étrangères et à s'inspirer des standards internationaux les plus exigeants.

UN PARC NUCLÉAIRE HÉTÉROGÈNE : UN DÉFI POUR LA SÛRETÉ ?

La Chine est œcuménique sur le plan technologique. Dans sa volonté d'acquérir une grande expérience dans les sciences et techniques nucléaires, le pays a construit sur son sol un maximum de technologies nucléaires étrangères. Après avoir développé une partie de son parc sur la base du 900 MW français, le pays a investi ces dernières années sur des technologies canadiennes (Candu), russes (VVER-1000) et américaines (AP1000). La Chine a également misé sur

▼ **NNSA**
National
Nuclear Security
Administration.

▼ **TSO**
Technical
Support
Organisation.

▼ **NRSC**
Nuclear
and Radiation
Safety Center.

▼ **BINE**
Beijing Institute
of Nuclear
Engineering.

▼ **CNPE**
China
Nuclear Power
Engineering Co.

▼ **INSC**
Instrument for
Nuclear Safety
Cooperation.

▼ **CNEA**
China
Nuclear Energy
Association.

le réacteur français de 3^e génération: l'EPR. Sans compter sur les nouveaux concepts de fabrication chinoise. Cette diversité multiplie *de facto* les points spécifiques à contrôler et impose aux autorités de contrôle comme aux exploitants de maîtriser des réacteurs parfois très différents.


Pour l'EPR, dont deux unités sont en construction à Taishan (Guangdong), les enjeux de sûreté liés à la résistance de l'alliage de la cuve du réacteur en construction à Flamanville ont conduit les autorités chinoises à suivre de près le dossier et ont contribué au partage d'informations entre les deux pays. Comme l'explique Isabelle Forest, de l'ASN, « *la Chine accueille chaque année une réunion du groupe de travail du MDEP¹ dédié à l'EPR.* » Ainsi, en mars 2017, dans le cadre des premiers tests de démarrage du réacteur EPR, un essai du comportement vibratoire des internes de cuve a été réalisé en présence de représentants d'Autorités de sûreté étrangères, dont l'ASN, témoignant ainsi de la volonté d'ouverture des autorités chinoises. Par ailleurs, des experts de la NNSA ont été invités en 2015 et 2017 à participer à deux réunions décisives du groupe permanent d'experts des équipements nucléaires sous pression (GPESPN) sur l'anomalie affectant la composition de l'acier dans certaines zones du couvercle et du fond de la cuve du réacteur de l'EPR de Flamanville. Pour Jean-Marie Mattei, de l'IRSN, « *le partage des informations et des résultats est bien établi. Il est ressorti, ajoute-t-il, que l'approche chinoise est de rester fidèle à l'approche de sûreté française pour le projet EPR, en se référant aux directives techniques élaborées en 2002 par les experts français, et de reprendre en temps voulu pour le projet Taishan la base de l'instruction de l'IRSN et les conclusions de l'ASN sur le projet EPR de Flamanville 3.* » Les échanges sont donc approfondis sur tous les sujets.

En parallèle de cette instruction, les autorités de sûreté chinoises conduisent celle de l'AP1000, basée sur l'approche américaine, aux exigences et aux règles d'études différentes. Prendre en compte les enseignements de l'accident de Fukushima-Daiichi tout en devant justifier les deux approches (EPR et AP1000) est un exercice ambitieux. Les Chinois le réalisent pourtant, dans la perspective d'une harmonisation de leurs règles de sûreté visant notamment à favoriser le développement du réacteur Hualong.

UN DISPOSITIF INSTITUTIONNEL EN PHASE DE MATURATION

En 2010, une mission d'audit international du dispositif de contrôle de la sûreté nucléaire et de radioprotection a été organisée en Chine. Cette revue par les pairs (IRRS, *Integrated Regulatory Review Service*), coordonnée par l'AIEA, a identifié quelques bonnes pratiques et formulé des recommandations et suggestions. La mission

de suivi qui s'est terminée en septembre 2016 afin de vérifier la mise en œuvre d'actions tenant compte des recommandations et suggestions formulées six ans plus tôt a établi que sur les 79 recommandations, 71 avaient donné lieu à des améliorations². L'IRRS a identifié deux bonnes pratiques :

► les personnels de l'autorité de sûreté partagent abondamment expérience et informations *via* un logiciel dédié; 

2. AIEA, « *IAEA Mission Says China's Nuclear Regulator Effective; Should Continue to Enhance Safety Programme* », septembre 2016

Une reconnaissance internationale croissante

Pour Isabelle Forest, de l'ASN, « *la Chine, via son autorité de sûreté, a acquis une plus grande visibilité sur la scène mondiale, et les représentants de NNSA bénéficient d'une reconnaissance certaine par la communauté internationale.* » Celle-ci se manifeste notamment par la présidence de la Chine à plusieurs conférences internationales sur la sûreté. Ainsi, en avril 2011, le vice-ministre et administrateur de NNSA, Li Ganjie a présidé la 5^e réunion d'examen de la convention sur la sûreté nucléaire à l'AIEA à Vienne. En octobre 2014 s'est tenue à Pékin une conférence internationale traitant des enjeux en matière de sûreté nucléaire auxquels font face les organismes de soutien technique qui a réuni des participants d'un grand nombre de pays. Enfin, en avril 2016, le vice-administrateur de NNSA, Liu Hua, a présidé à l'AIEA à Vienne une conférence internationale sur le renforcement de l'efficacité du contrôle de la sûreté et la sécurité nucléaires.



Li Ganjie (centre droit), alors administrateur de la NNSA, présidant la 5^e réunion d'examen de la convention sur la sûreté nucléaire à l'AIEA en 2011. Un symbole fort du crédit porté par la communauté internationale à l'égard des autorités de sûreté chinoises

1. MDEP : programme multinational d'évaluation des conceptions de réacteurs.

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE

x 6

le nombre d'employés
de la NNSA et de la NSRC
depuis quinze ans

“

Toute proportion
gardée, la loi sur la
sûreté nucléaire peut
être comparée à la loi
TSN de 2006 ”

- › la NNSA et le NRSC évaluent de manière indépendante les plans d'évacuation locaux en utilisant une analyse numérique des données sur la taille de la population et les routes des zones qui pourraient avoir à être évacuées en urgence.

En revanche, la mission de l'AIEA a formulé des recommandations et des suggestions d'amélioration, notamment sur le fait que :

- › les autorités devraient adopter un cadre juridique entourant la sûreté nucléaire qui inscrirait dans la loi l'indépendance et la transparence de ses autorités de sûreté, et qui engagerait la responsabilité première de l'exploitant dans la sûreté ;
- › la NNSA devrait créer un guide pour les demandes d'extension de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires, et établir un processus pour l'examen de ces demandes.

En janvier 2016, la Chine avait publié son livre blanc sur la préparation aux urgences nucléaires. La loi de sûreté nucléaire, adoptée le 1^{er} septembre 2017 va beaucoup plus loin. Elle a pour but de faire rejoindre le cadre chinois sur ses homologues internationaux. La loi donne ainsi plus de pouvoir à la NNSA. Le vice-président de l'agence a déclaré à cette occasion que la loi avalisait la stratégie de « *priorité à la sûreté* » voulue par les autorités chinoises. Dans la pratique, la nouvelle loi promeut la transparence sur les questions nucléaires, précise la responsabilité des différents acteurs, leur rôle respectif en cas de crise, les systèmes de contrôle et de vérification, favorise la transparence de l'information, etc. Toutes proportions gardées, cette loi peut être comparée à la loi TSN de 2006 qui avait profondément transformé le cadre de la sûreté nucléaire française. En ce sens, la nouvelle loi

chinoise est la brique qui manquait à la fondation de la sûreté en Chine. Avec cette loi, en préparation depuis plusieurs années, les autorités chinoises se dotent de la plus importante règle édictée par l'État dans le domaine de la sûreté nucléaire. Elle fait partie des dispositions réglementaires sur la sécurité nationale du pays dont l'application jouera un rôle majeur dans la promotion du positionnement du nucléaire chinois à l'international.

Ces enjeux sont d'autant plus pris en compte par les autorités chinoises qu'une défiance grandissante d'une partie de la population est perceptible vis-à-vis des grands projets comme le nucléaire, notamment après l'accident de Fukushima-Daiichi. C'est aussi dans ce cadre que doit être comprise l'adoption d'une nouvelle loi sur la sûreté en septembre 2017. Début août, une protestation concernant une usine de retraitement du combustible a stoppé le processus d'identification du site. La plupart des séminaires chinois sur le nucléaire évoquent la question de la *public acceptance* qui devient un enjeu central et une problématique à prendre en compte par les autorités chinoises dans leur volonté de développer le parc nucléaire. La crédibilité de la sûreté de ses installations, de ses technologies et de ses autorités permettra d'améliorer cet état de fait. La problématique est prise en compte aujourd'hui en veillant à ce que la sûreté soit élevée et réponde, au minimum, aux standards internationaux fixés par l'AIEA.

En définitive, et malgré certains doutes, l'absence d'accident majeur ou de dégagement radioactif sérieux pendant les vingt-cinq années d'exploitation de son parc nucléaire constitue l'un des meilleurs arguments en faveur du sérieux de la sûreté nucléaire chinoise et de sa prise en compte en tant qu'enjeu majeur par les fabricants, les exploitants et les autorités. ■



Dépendant directement du ministère de la Protection environnementale, la NNSA n'est pas indépendante des autorités gouvernementales. La nouvelle loi de sûreté nucléaire devrait y remédier

Taishan, premier jalon de l'EPR

Par **Tristan Hurel**, SFEN

Les deux EPR de Taishan, dont le démarrage de l'unité 1 devrait avoir lieu prochainement, seront les deux premiers EPR à fournir de l'électricité et parmi les premiers de 3^e génération en Chine et dans le monde. Avec une puissance par tranche de 1750 mégawatts (MW), ils seront les plus puissants réacteurs nucléaires jamais construits. Dès leur mise en service commerciale, ils contribueront à alimenter en électricité la province du Guangdong, la plus peuplée, avec 110 millions d'habitants, et la plus riche de Chine. Terre historique du nucléaire chinois, le Guangdong abrite notamment les villes de Canton (Guangzhou) et Shenzhen et jouxte

les régions administratives autonomes de Hong-Kong et Macao.

L'ABOUTISSEMENT D'UNE LONGUE COOPÉRATION

Taishan représente l'un des aboutissements de la longue et riche coopération entre la France et la Chine, démarrée il y a 30 ans sur la construction des réacteurs de Daya Bay.

En 2004, les autorités chinoises dévoilent un grand plan de développement nucléaire. Dans la foulée, elles lancent un appel d'offres pour définir le futur standard chinois de 3^e génération. La Chine portera d'abord son choix vers l'AP 1000, réacteur de 1000 MW, pour lequel l'américain Westinghouse offrira aux Chinois un co-développement. ▶



en substance...

Témoignage des capacités d'export de la 3^e génération de réacteurs nucléaires de l'industrie française, la mise en service prochaine de la centrale nucléaire de Taishan, avec ses deux réacteurs EPR, est un indice supplémentaire des avancées nucléaires chinoises. Depuis le Guangdong, dans le cœur économique de la Chine, une nouvelle aventure nucléaire est sur le point à démarrer.



Le 10 février 2010, quelques semaines après le coulage du premier béton de l'unité 2, l'enceinte de l'îlot nucléaire se devine déjà, avec ses murs épais de 2,6 mètres (contre 1,2 mètres pour les tranches N4 du parc français et 90 cm pour celles du palier 900 MWe)

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**



Vue générale de la tranche 1, le 25 novembre 2010, treize mois après le coulage du premier béton. La structure d'ensemble de l'unité est déjà visible, avec son dôme en attente d'être posé. Il le sera le 23 octobre 2011



La France, avec la technologie EPR portée par AREVA, sera retenue dans un deuxième temps, le gouvernement Chinois et CGN, partenaire historique d'EDF, décidant d'en construire deux unités sur le site de Taishan.

Dans la pratique, les EPR de Taishan sont le fruit d'un accord entre les partenaires historiques EDF et CGN noué en 2007. Deux ans plus tard, en 2009, une *joint-venture* entre CGN (51 % des parts), Guangdong Yudean (entreprise publique de la province du Guangdong, 19 % des parts) et EDF (30 % des parts) est créée. Cette JV est en charge de la construction et de l'exploitation des deux tranches.

EPR : UN RÉACTEUR SÛR ET PERFORMANT

Par sa conception originelle, l'EPR marque la volonté de conjuguer puissance, sûreté, performance et disponibilité. Les EPR de Taishan incorporent tous les gains de sûreté apportés par cette technologie, à commencer par un *design* réputé pour être l'un des plus sûrs au monde, certifié dans quatre pays, en France, en Finlande, en Chine et au Royaume-Uni, et répondant déjà à l'ensemble des nouvelles exigences tirées du retour d'expérience de

Taishan

EN CHIFFRES

Puissance :

2x1 750 MW

Investisseurs :

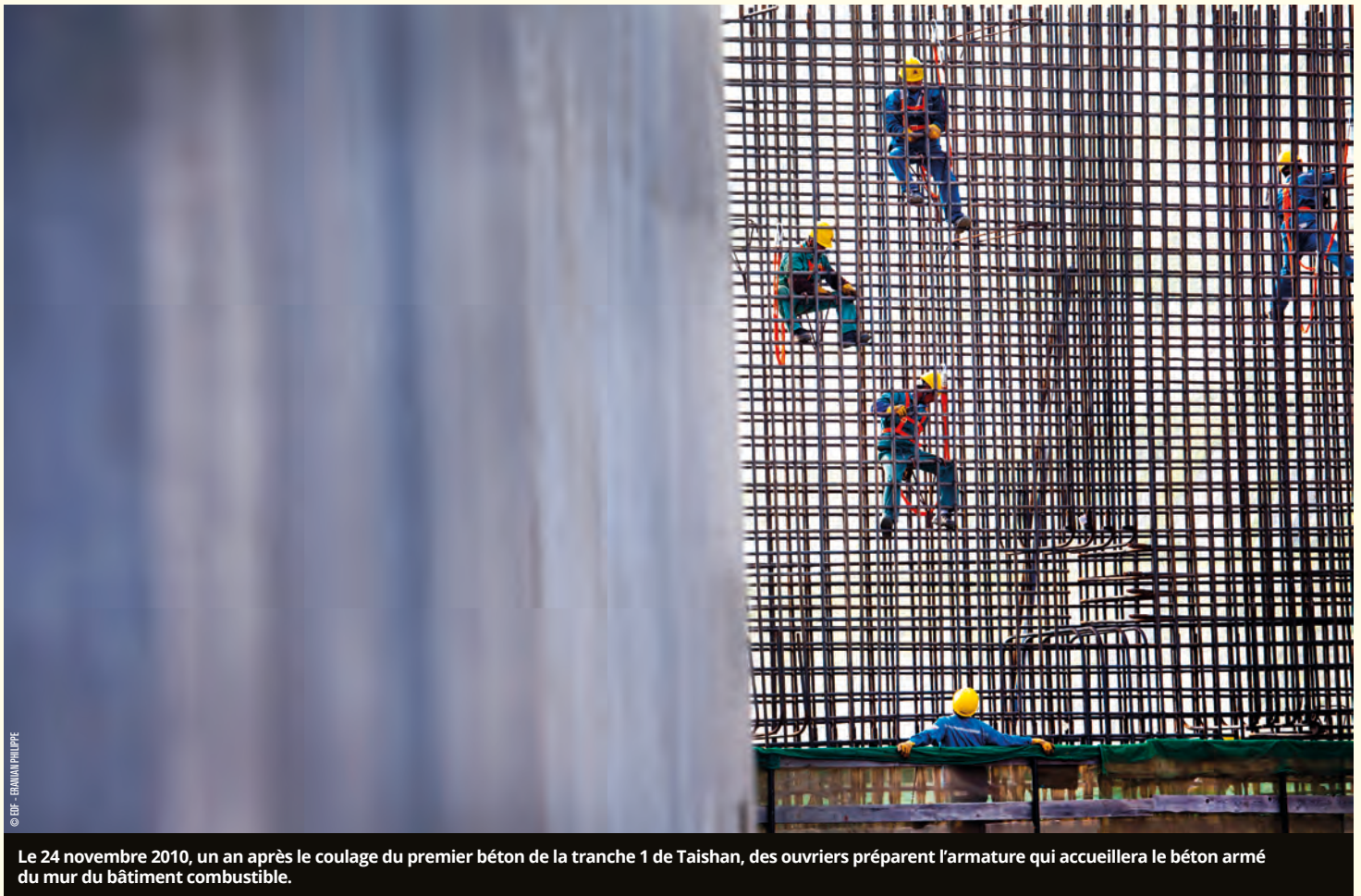
EDF 30% ;

CGN 51% ;

Yudean 19%

DOSSIER

Innovations, technologies,
export
**CHINE, LE NOUVEAU GÉANT
DU NUCLÉAIRE**



Le 24 novembre 2010, un an après le coulage du premier béton de la tranche 1 de Taishan, des ouvriers préparent l'armature qui accueillera le béton armé du mur du bâtiment combustible.

l'accident de Fukushima. Ainsi, parmi ses avancées dans la sûreté, l'EPR dispose notamment d'une double enceinte de confinement. Une coque en béton armé recouvre les bâtiments les plus sensibles de l'EPR : bâtiment réacteur, bâtiment combustible, salle de commande et deux des quatre bâtiments de sauvegarde. Elle constitue une protection très efficace contre les agressions externes.

À cette structure renforcée s'ajoutent des systèmes de sûreté dupliqués. Quatre dispositifs séparés peuvent assurer individuellement la sécurité à 100 % et prendre le relais d'un autre dispositif en cas de dysfonctionnement ou d'agression. Un système de recombinaison de l'hydrogène permet d'éviter son accumulation en cas de perte de refroidissement et une détonation telle que celle survenue lors de l'accident

de Fukushima. Les protections contre les secousses sismiques sont aussi améliorées. Enfin, un gain important pour la sûreté est matérialisé par le récupérateur de corium. En cas de fusion du cœur, dont la probabilité de survenue est réduite par 10 par rapport aux réacteurs de 2^e génération, déjà très sûrs, le combustible radioactif fondu serait récupéré dans ce bac en matériaux très résistants sous lequel circule de l'eau pour en assurer le refroidissement.

L'EPR est aussi beaucoup plus performant. Il permet notamment de consommer, à production équivalente, 17 % de combustibles en moins. Il offre des coûts d'utilisation réduits, tout en étant conçu dès le départ pour fonctionner au minimum 60 ans. Enfin, son taux de disponibilité devrait atteindre 92 %, en particulier grâce à une réduction de la durée moyenne

des périodes d'arrêts pour rechargement du combustible à 16 jours, contre 30 à 45 jours aujourd'hui.

UNE RÉUSSITE INDUSTRIELLE

Les EPR de Taishan auront été construits en un temps record pour l'EPR puisque :

- bien que démarré deux ans après celui de Flamanville et quatre ans après celui d'Olkiluoto, les EPR chinois entreront en service avant ;
- lancés après les AP 1000 en Chine qui prévoyaient une mise en service industrielle en 2013, non encore effectuée, ils sont en passe d'entamer l'étape ultime d'essai avant démarrage.

En 2011, trois ans après le début des travaux, le dôme de l'unité 1 était posé. Autre record, les essais à froid, qui visent à étudier le comportement des matériaux face à la pression, ont démarré dès la fin décembre 2015

sur la tranche 1, soit les premiers pour un réacteur de 3^e génération. Ils ont été suivis par les essais à chaud sur la tranche 1.

La Chine, qui construit sans interruption des réacteurs nucléaires depuis trente ans a pleinement bénéficié de son expérience. Preuve en est, CGN avait établi un record industriel en construisant en seulement 52 mois un autre réacteur dans le Guangdong, contre 60 à 64 mois dans la norme mondiale¹. L'unité 1 de Taishan pourrait finalement entrer prochainement en service, moins de 100 mois après le coulage du premier béton. Ce délai de construction est supérieur à celui du programme initial très ambitieux mais constitue une référence pour une tête de série, sur un produit de plus grande complexité que les réacteurs antérieurs. Tout au long des travaux, l'exigence de sûreté des autorités chinoises a été au rendez-vous. Depuis 2009, la *National Nuclear Safety Administration* (NNSA) assure

périodiquement de nombreuses inspections, vérifications spécifiques et examens.

PERSPECTIVES

Dans un premier temps, la mise en service des réacteurs 1 et 2 de Taishan va permettre de donner un premier retour d'expérience sur le fonctionnement des réacteurs. Cette expérience bénéficiera à la mise en service des autres EPR actuellement en phase d'essai, à Flamanville, en Normandie, et Olkiluoto, en Finlande. La construction par la Chine des réacteurs a aussi apporté un retour d'expérience précieux qui est d'ores et déjà mis à profit pour optimiser le chantier des deux réacteurs EPR d'Hinkley Point au Royaume-Uni, projet conjoint d'EDF et de CGN. Les autorités britanniques regardent d'ailleurs de près les progrès de Taishan, considéré comme la référence pour les EPR d'Hinkley Point.

La connexion au réseau des EPR de Taishan démontrera la viabilité technique du produit ainsi que du projet et permettra peut-être à son concepteur, la France, de décrocher de nouveaux contrats en vue dans d'autres pays, par exemple en Inde, pour le projet de six EPR à Jaitapur, ou en Arabie saoudite et en Afrique du Sud.

Enfin, la Chine attendrait la mise en service de l'EPR, tout comme celles de l'AP 1000, avant de lancer de nouvelles demandes de construction pour ces technologies étrangères. Ainsi, le bon fonctionnement des EPR chinois permettra peut-être d'envisager la construction de nouvelles unités dans le pays, notamment sur le site même de Taishan.

1. « *China General Nuclear vows to meet new deadline for world's first EPR reactor* », *South China Morning Post*, 36/03/2017.

chronologie

2007

premier contrat commercial entre EDF et CGN

2009

création de la joint-venture « TNPJVC » et premier béton Unité 1

2011

pose du dôme Unité 1

2014

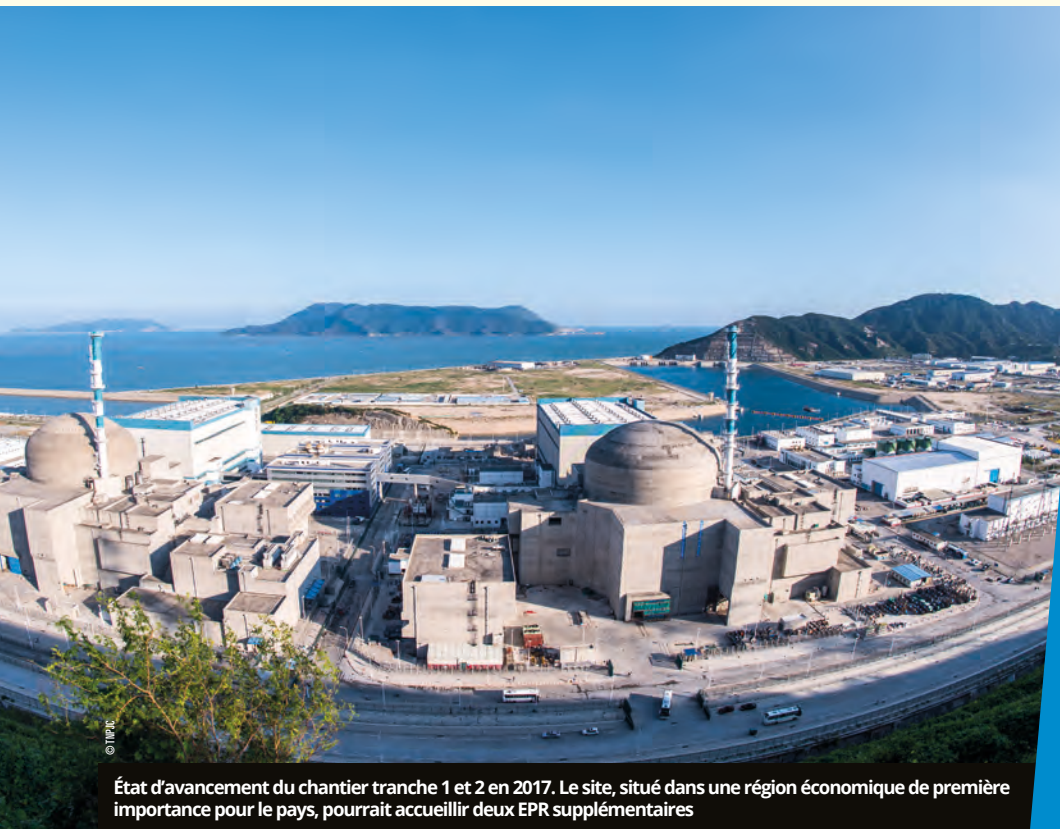
fin du génie civil Unité 1

2015

début des essais d'ensemble Unité 1

2016

début des essais à chaud Unité 1



© JNEP

État d'avancement du chantier tranche 1 et 2 en 2017. Le site, situé dans une région économique de première importance pour le pays, pourrait accueillir deux EPR supplémentaires

Ces livres
bouleversent
les idées reçues
sur les énergies
renouvelables,
le nucléaire et
la radioactivité...

Disponible sur 

Ou par chèque (22 € par livre, frais de port inclus)
à l'ordre de Michel Gay, adressé à :
Michel Gay, 191 rue du Grand Mont. 73000 Chambéry.

www.vive-le-nucleaire-heureux.com



Des solutions optimales pour l'inspection TV au cœur des centrales nucléaires

ECA Group propose, pour l'inspection des structures nucléaires, des systèmes innovants basés sur deux technologies de caméras TV :

- Les caméras CCD, pour l'inspection des générateurs de vapeur et des pressuriseurs
- Les caméras tube, pour l'inspection des réacteurs et des piscines de stockage de combustible usé

Selon le niveau de radiations, l'une ou l'autre technologie sera adaptée à l'assistance aux opérations de décontamination de sites nucléaires, et à l'inspection de cellules chaudes ou de centres de stockage.

Découvrez nos solutions
d'inspection pour sites
nucléaires

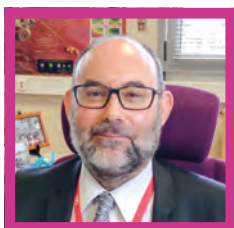


contact@ecagroup.com | www.ecagroup.com

L'EPJ-N, première revue scientifique des sciences du nucléaire

LANCÉE EN 2015 AVEC LE SOUTIEN DE LA SFEN, DE L'EUROPEAN NUCLEAR SOCIETY (ENS) ET L'ÉDITEUR EDP SCIENCES, L'EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS N (EPJ-N) EST UNE REVUE SCIENTIFIQUE À COMITÉ DE LECTURE PUBLIANT DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR L'ENSEMBLE DES SUJETS NUCLÉAIRES. EN LIBRE ACCÈS, DISPONIBLE GRATUITEMENT SUR INTERNET, L'EPJ-N REPRÉSENTE UN MODÈLE INNOVANT GARANTISSANT LA PUBLICATION RAPIDE D'ARTICLES DE HAUTE QUALITÉ SCIENTIFIQUE. DEUX ANS APRÈS SA CRÉATION, BILAN, ATTENTES ET PERSPECTIVES AVEC SON CO-ÉDITEUR EN CHEF, GILLES MOUTIERS.

Gilles Moutiers,
co-éditeur en chef,
avec Anne Nicolas,
de l'EPJ-N.



© BR

dans des journaux en libre accès, ce qui favorise notre visibilité et notre attractivité.

Qu'est-ce qui différencie l'EPJ-N des autres revues scientifiques nucléaires ?

G.M. : Contrairement aux autres journaux extrêmement spécialisés, nécessitant un abonnement, l'EPJ-N a vocation à être le journal de l'ensemble des disciplines scientifiques relevant du nucléaire, tout en ayant une qualité éditoriale de très haut niveau et en étant en libre accès et uniquement sur Internet.

différence de l'EPJ-N c'est la qualité du système de *peer reviewing*. Nos relecteurs sont de véritables scientifiques, reconnus et issus de partout dans le monde : Europe, États-Unis, Russie, Asie.

Quelles sont les prochaines étapes ?

G.M. : La grande étape à venir sera d'être référencé et d'avoir un facteur

d'impact. Nous ne maîtrisons pas le temps nécessaire pour y parvenir mais cela ne devrait plus excéder dix-huit mois maintenant. Nous devons aussi continuer à promouvoir l'EPJ-N. C'est essentiel car lorsque vous publiez depuis quinze ans vos articles dans un autre journal, vous vous tournez spontanément vers lui pour votre prochaine publication. ■

Deux ans après sa création, quel premier bilan tirez-vous de l'EPJ-N ?

Gilles Moutiers : Nous constatons une augmentation du nombre de sollicitations reçues pour publier dans le journal. Cet engouement nous a conduits à renouveler notre comité de relecture pour couvrir des thématiques plus spécifiques, plus nombreuses et mieux identifiées. Pour autant, nous sommes encore limités par l'absence de facteur d'impact¹ du journal, qui n'est pas encore indexé dans les bases, ce qui conduit certains chercheurs, en particulier les plus jeunes, à privilégier des journaux déjà référencés.

Par ailleurs, nous constatons que la Commission européenne pousse de plus en plus à ce que les résultats de recherches issus des projets européens qu'elle finance soient publiés

En quoi le modèle libre accès représente-t-il une rupture et une innovation dans la publication académique ?

G.M. : Pendant un siècle et demi les journaux scientifiques ont été uniquement diffusés en papier. Il fallait s'abonner, faire sa bibliographie en lisant la table des matières, etc. C'était un travail fastidieux et chronophage. Le passage au format électronique a constitué une première évolution, avec la possibilité d'utiliser des mots-clefs, mais il fallait s'abonner aux journaux en ligne. Le libre accès est complètement nouveau. Désormais, même avec des moteurs de recherche classiques on peut arriver à trouver des articles que l'on va pouvoir lire librement. Aujourd'hui, de plus en plus de revues scientifiques sont en libre accès. Par contre, ce qui fait la

Les atouts de l'EPJ-N par rapport aux autres revues

En libre accès sur Internet, gratuit, l'EPJ-N dispose d'un comité de relecture international composé de scientifiques de haut niveau répartis en treize sections thématiques, ce qui garantit une rapidité de publication exemplaire tout en maintenant le haut niveau de qualité scientifique : à peine quelques mois contre jusqu'à dix-huit pour les autres journaux classiques. Ce dernier point est essentiel car il est important pour un chercheur de publier vite, plusieurs équipes travaillant souvent simultanément sur le même sujet.

Les derniers articles publiés dans l'EPJ-N :

- *Trends in severe accident research in Europe : SARNET network from Euratom to NUGENIA*
- *Oxygen segregation in pre-hydrated Zircaloy-4 cladding during a simulated LOCA transient*
- *Formalization of the kinetics for autocatalytic dissolutions. Focus on the dissolution of uranium dioxide in nitric medium*



Retrouvez toutes les publications de l'EPJ-N sur www.epj-n.org

¹ Un facteur d'impact est un indicateur qui estime indirectement la visibilité d'une revue scientifique. Le facteur d'impact d'une revue est le nombre moyen de citations de chaque article publié dans cette revue.

Une électricité nucléaire bon marché en France



Pour les industriels

Le prix de l'électricité pour les industriels français est

25% inférieur à la moyenne européenne

Un atout pour :

- + La compétitivité des entreprises
- + L'implantation d'industries grosses consommatrices d'électricité (datacenters, métallurgie, industrie chimique)



Pour les particuliers

Un ménage français paye son électricité

70% moins cher qu'un ménage allemand



Vrai ou Faux ?

Le coût de production de l'électricité n'inclut pas le coût du démantèlement et de gestion des déchets.

FAUX !

La Cour des comptes a confirmé que ces coûts sont bien pris en compte et que les provisions prévues par EDF pour les financer sont suffisantes. Elle a par ailleurs montré qu'un doublement de ces coûts n'impacterait que très faiblement le coût de production de l'électricité.



Les coûts de production du parc nucléaire français

À L'HEURE DES DISCUSSIONS AUTOUR DE LA PROCHAINE PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE (PPE), QUI CONDITIONNERA L'ORIENTATION DU MIX ÉLECTRIQUE JUSQU'EN 2023, LE COÛT DE PRODUCTION DES DIFFÉRENTS MOYENS DE PRODUCTION BAS CARBONE DISPONIBLES CONSTITUE UN CRITÈRE DE CHOIX DÉTERMINANT. DANS CE CADRE, LA COMPÉTITIVITÉ DU PARC DE PRODUCTION NUCLÉAIRE EXISTANT DEMEURE, AVEC UN COÛT CASH DE PRODUCTION À 33 EUROS PAR MWH, LE MOYEN DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ LE PLUS COMPÉTITIF. CONTRAIREMENT À L'IDÉE REÇUE D'UN « MUR D'INVESTISSEMENT » À VENIR, CE PRIX PREND EN COMPTE LES INVESTISSEMENTS NÉCESSAIRES POUR PROLONGER LA DURÉE D'EXPLOITATION DES CENTRALES NUCLÉAIRES. IL CONTRIBUE AINSI À PERMETTRE À LA FRANCE DE BÉNÉFICIER D'UN PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ PARMIS LES MOINS CHERS D'EUROPE. DÉCRYPTAGE.

Par la SFEN et sa section technique Économie et Stratégie Énergétique

CONTEXTE

Le ministère de la Transition écologique et solidaire a engagé des travaux concernant les scénarios qui sous-tendent la révision de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), à l'horizon fin 2018.

La Société française d'énergie nucléaire (SFEN) souhaite participer et contribuer aux réflexions de ces groupes de travail, en apportant l'expertise de ses sections techniques.

D'une manière générale, elle :

- rappelle que l'enjeu prioritaire de la PPE est la réduction de la consommation d'énergies fossiles, importées et émettrices de gaz à effet de serre ;
- comprend le souci pragmatique de certains Français de diversifier le mix électrique et de ne pas « mettre tous les œufs dans le même panier » ;
- estime que la diversification du mix électrique devra se faire en temps et en heure, à mesure de l'amélioration des performances

économiques et techniques des énergies renouvelables.

OBJET DE LA NOTE

Un des volets importants de la PPE est la « *préservation du pouvoir d'achat des consommateurs et de la compétitivité des prix de l'énergie, en particulier pour les entreprises exposées à la concurrence internationale.* » Dans ce contexte, il est important de bien connaître le coût de production du parc nucléaire actuel, et c'est l'objet des travaux menés par la section technique Économie et Stratégie Énergétique de la SFEN.

Par « coût de production » on entend ici le coût de l'électricité à la sortie de l'installation de production (centrale nucléaire, champ éolien, ferme solaire, etc.). Les coûts des activités de transport et de distribution de l'électricité, et, d'une manière générale, les coûts d'équilibrage du « système électrique » ne sont pas ici pris en compte. On notera cependant que ces derniers sont aussi très fortement influencés par le choix des modes de production, et que le nucléaire présente

sur ce sujet de nombreux atouts : nombre limité de sites, haute disponibilité, caractère pilotable, grande flexibilité dans ses variations de puissance, etc.

Les coûts du nucléaire apparaissent parfois mal connus. Pourtant, depuis de nombreuses années, un effort¹ considérable a été déployé pour les expliciter. Les sources sont nombreuses, fournies par des rapports publics (dont ceux de la Cour des comptes²) et par les entreprises comme EDF, en particulier lors de la publication des comptes. Peu de pays mettent à disposition des indications aussi précises sur les coûts de leur parc nucléaire.

1. LA MÉTHODOLOGIE DES COÛTS CASH DOIT ÊTRE RETENUE POUR DÉCIDER DE POURSUIVRE OU NON L'EXPLOITATION DE TRANCHES DU PARC NUCLÉAIRE ACTUEL

Le calcul des coûts de production nucléaire a fait l'objet de développements méthodologiques en France depuis quelques années. La Cour des comptes dans son

rapport 2014³ présente différentes méthodes de calcul, lesquelles permettent de répondre à des questions spécifiques : établir les tarifs de vente de l'électricité nucléaire aux nouveaux entrants sur le marché, ou déterminer une approche tarifaire.

Ces méthodes distinguent deux types de coûts :

- **Les coûts cash** qui comme leur nom l'indique, correspondent aux décaissements « en monnaie sonnante et trébuchante ».
- **Les coûts non cash**, qui prennent en compte des flux non relatifs à la production de la période considérée (ex : rémunération de l'investissement initial). Le terme de « coûts non cash » est de fait d'ailleurs particulièrement inapproprié, puisqu'il s'agit majoritairement d'une rémunération du capital investi initialement et non d'un coût.

Une des questions posées par la PPE est de décider de poursuivre ou non l'exploitation de certaines tranches du parc nucléaire actuel. ▶

1. Cet effort résulte de l'activité de diverses parties prenantes : entreprises (pour la publication des comptes), services de l'État (ministères, Cour des comptes), organismes internationaux (comme l'OCDE ou l'AIEA), sociétés savantes (comme la SFEN ou son équivalent américain, l'ANS), universitaires dans le domaine de l'économie de l'énergie. D'autre part, la loi organise spécifiquement la publication d'une part importante de cette information, en sus des obligations comptables menées dans le cadre de l'augmentation de la transparence comptable (IFRS), en particulier en matière de charges futures pour le démantèlement et le stockage des déchets. 2. « *Les coûts de la filière électro nucléaire* » (2012) et « *Le coût de production de l'électricité nucléaire* » (2014) – Cour des comptes. 3. « *Le coût de production de l'électricité nucléaire* » (2014)

“
La pertinence économique de l'exploitation future d'un moyen de production dépend des recettes et des coûts actuels et à venir”

Dans ce contexte, les seuls coûts à prendre en compte sont les coûts *cash*. Du point de vue de l'exploitant, la pertinence économique de l'exploitation future d'un moyen de production ne dépend pas des coûts passés et encore moins de la rémunération attendue, mais seulement des recettes et des coûts actuels et à venir. S'il anticipe qu'il serait moins cher de le remplacer, la décision a du sens économique. À l'inverse, si un arrêt puis un remplacement ont lieu entraînant une augmentation des coûts futurs, l'exploitant ou les clients font face à une perte économique.

2. LES DERNIÈRES DONNÉES DISPONIBLES PERMETTENT D'ÉVALUER LE COÛT CASH DE PRODUCTION DU PARC NUCLÉAIRE EXISTANT À 32-33 €/MWH.

La Cour des comptes a réalisé en 2014 une estimation, pour la période 2011-2025, des dépenses attendues pour l'exploitation et les investissements de maintenance, notamment de maintenance lourde (rénovation et sûreté). On pouvait en déduire une évaluation des coûts *cash* annuels moyens, rapportés à la production à 36 €₂₀₁₅/MWh⁴. Depuis, EDF a annoncé, dans ses publications officielles, des gains de coûts⁵ sur son programme d'investissement, ainsi qu'un plan d'économies sur les dépenses annuelles de 1 Md€⁶. Le montant des coûts *cash* doit être révisé, pour prendre en compte l'évolution des profils de dépenses attendues.

La SFEN estime désormais le coût *cash* de production du parc nucléaire existant à environ 33 €/MWh

Dans sa note méthodologique, la SFEN estime désormais le coût *cash* de production du parc nucléaire

existant à environ 33 €₂₀₁₅/MWh. Cette estimation rejoint une récente communication d'EDF à 32 €/MWh⁷ jusqu'en 2025⁸. Ce coût fait de l'énergie nucléaire le moyen de production le plus compétitif pour les deux périodes (2016-2018 et 2019-2023) et même au-delà.

La compétitivité du parc nucléaire permet à l'électricité française d'être très bon marché. Un ménage allemand paie son électricité 70 % plus cher qu'un ménage français. Le prix de l'électricité pour les industriels est inférieur de 25 % au prix moyen en Europe, ce qui constitue un facteur-clef d'attractivité pour les entreprises, et permet de prévenir les délocalisations.

3. LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ NUCLÉAIRE EST AUJOURD'HUI RENTABLE EN FRANCE : IL N'Y A PAS DE « MUR D'INVESTISSEMENT » À VENIR

Les coûts *cash* de production du parc nucléaire (évalués ci-dessus à 33 €/MWh) sont inférieurs à la valorisation moyenne de l'électricité (estimée ici à 40 €/MWh) : la production d'électricité nucléaire est rentable en France. Ainsi, ces dix dernières années, dans un contexte où les prix de marché étaient notablement plus élevés, EDF a pu verser 20 milliards d'euros de dividendes à l'État⁹. Aujourd'hui, EDF est l'un des électriciens européens qui résiste le mieux à la chute majeure des marchés de gros.

Malgré le contexte de marché difficile, EDF est en mesure d'autofinancer les investissements à réaliser sur le parc nucléaire existant. Pour rappel, le programme « Grand carénage », qui est estimé par EDF à 45 Md€ d'euros constants 2015 pour la période 2014-2025, comprend une large part de dépenses de maintenance courante, ainsi que les dépenses pour rénover, aux conditions de sûreté exigées par l'autorité

de sûreté, les installations pour une exploitation au-delà de 40 ans.

Contrairement à une idée reçue, ces dépenses ne représentent pas un « mur d'investissement », mais correspondent à une période où les coûts *cash* sont plus élevés d'environ 1 Md€/an en moyenne. Ces investissements sont pris en compte dans le calcul des coûts *cash* à 33 €/MWh. Cet investissement est même profitable et contribue à l'équilibre des comptes de l'électricien. Les flux de trésorerie engendrés contribueront au nécessaire investissement en nouvelles capacités, nucléaires ou renouvelables¹⁰.

Ces dépenses de 1 Md€/an en moyenne, doivent enfin être ramenées à la quantité d'électricité fournie par le parc (384 TWh en 2016, soit 72 % de l'électricité produite¹¹). En comparaison, la Commission de régulation de l'électricité¹² (CRE) évalue pour 2018 les charges de service public de l'énergie à 3 Md€/an pour le solaire photovoltaïque, pour une production de 9,2 TWh, et de 1,4 Md€/an pour l'éolien, pour une production de 25 TWh. Ces charges ne sont pas payées par les producteurs d'électricité mais par les consommateurs, *via* une taxe sur l'électricité.

4. LES COÛTS DU NUCLÉAIRE SONT PEU SUJETS À LA HAUSSE, CAR ILS SONT PEU SENSIBLES AUX ÉVOLUTIONS DES PRIX DE L'URANIUM

Avec les chiffres retenus – qui sont le reflet d'une stabilité d'ensemble des grands postes de coût *cash* – le résultat précédent montre que la meilleure solution est de continuer à exploiter les réacteurs actuels plus longtemps, dès lors qu'ils satisfont les exigences de sûreté fixées par l'Autorité de sûreté (ASN).

Il est toutefois pertinent de vérifier que ces hypothèses ont du sens, notamment au regard de deux postes sujets à des incertitudes significatives : le prix de l'uranium

4. Les résultats diffèrent selon la durée d'exploitation retenue pour les réacteurs (la durée retenue ici est de 50 ans). 5. Le programme d'investissement sur la période 2014-2025, initialement estimé à 55 Md€₂₀₁₅ en janvier 2015, a été revu à la baisse à 45 Md€₂₀₁₅ fin 2016 – Document de référence EDF 2016, page 21. 6. La quote-part du nucléaire est estimée en prenant le poids relatif du nucléaire dans les activités d'EDF. 7. *Enerpresse* (1^{er} juin 2017). 8. 2025 est l'horizon défini par la Cour des comptes pour évaluer les coûts de production électronucléaire. 9. Macron : « L'État a prélevé trop de dividendes chez EDF » (*Le Figaro* – 24 avril 2016). 10. À noter toutefois que les prix du marché de gros sont aujourd'hui inférieurs au niveau de rémunération du capital permettant à EDF de financer, à la fin de l'exploitation des moyens existants, un réinvestissement dans de nouveaux moyens de production, faisant appel à une large part d'auto-financement.

“
Les importations d'uranium ne représentent qu'entre 500 millions d'euros et 1Md€ environ par an, à comparer aux 60 Md€ pour l'importation annuelle d'énergies fossiles (gaz et pétrole)”

et des coûts futurs (*aval du cycle du combustible, gestion et stockage des déchets radioactifs et démantèlement des réacteurs, voir point 5*).

Le coût du combustible, qui inclut le coût de l'uranium, ne représente que 15 % environ du coût de production du parc nucléaire existant en France. Ce faible pourcentage permet de rendre quasiment insensible le coût de production du nucléaire aux fluctuations des cours internationaux de l'uranium. Les importations d'uranium ne représentent qu'entre 500 millions d'euros et 1 Md€ environ par an, à comparer aux 60 Md€ pour l'importation annuelle d'énergies fossiles (gaz et pétrole).

5. LES COÛTS DE DÉMANTÈLEMENT ET DÉCHETS SONT COUVERTS À PLUS DE 100 % PAR DES ACTIFS DÉDIÉS

Pour le démantèlement, l'inventaire des coûts est constitué en début d'exploitation, et n'évolue que très peu avec la production. Des provisions de 19,6 Md€ non actualisées (fin 2015) (soit 337 M€ par réacteur) sont enregistrées dans le bilan d'EDF, et sont entièrement couvertes par des « actifs dédiés ». Une augmentation pèserait peu sur les coûts *cash*, comme l'indique la Cour des comptes.

Les coûts de l'aval du cycle et de la gestion des déchets radioactifs comprennent principalement les coûts de traitement des combustibles usés et de gestion des déchets (dont le stockage final). Les coûts de traitement et recyclage sont décaissés au fur et à mesure. Pour les coûts futurs de long terme, les producteurs (EDF, AREVA, CEA) – propriétaires des déchets – ont aussi constitué des provisions couvertes par des fonds dédiés. De nouvelles provisions sont effectuées chaque année, en relation avec la production additionnelle de déchets.

Tous ces coûts futurs ont un poids peu significatif dans le coût total



Dans le cadre de la PPE, la SFEN publiera quatre autres notes d'ici fin décembre 2017

“
La Cour des Comptes a montré que le doublement de ces coûts aurait une influence très limitée et ne changerait pas les conclusions précédentes”

de production, du fait du caractère lointain de l'exposition des dépenses, et de leur faible poids rapporté à la production totale des tranches. La plupart de ces coûts sera de toute façon à décaisser. De plus, ces coûts sont largement fixes, c'est-à-dire peu dépendants de la durée d'exploitation, de sorte qu'un arrêt d'un réacteur ou plusieurs ne modifie pas fortement les dépenses à venir (par exemple pour le stockage des déchets). Plus on exploite longtemps, et plus le poids relatif de ces coûts diminue, ce qui renforce l'intérêt de la poursuite de l'exploitation.

Les méthodes d'évaluation ont été validées par un audit de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) de 2016. Parallèlement, les comparaisons internationales montrent que les estimations des dépenses de démantèlement en particulier sont sujettes à des incertitudes significatives. Un calcul de sensibilité¹³ de la Cour des comptes montre cependant qu'un doublement des coûts de démantèlement ne conduirait qu'à une augmentation de 5 % du coût de production suivant la méthode du « coût courant économique ». Elle estime

aussi qu'un doublement du devis du centre de stockage des déchets Cigéo conduirait à une augmentation de seulement 1 %¹⁴ du coût de production suivant la même méthode.

Les coûts du nucléaire existant sont donc très bien connus et globalement stables. Ce mode de production d'électricité partage cet avantage avec les énergies renouvelables (éolien et solaire, notamment). Par contre, les énergies fossiles (comme le gaz) sont fortement susceptibles de variations de grande ampleur, avec un coût d'énergie importée de plus de 50 % du total et une taxation des émissions de CO₂ qui se met en place. ■

Une étude approfondie a été réalisée par la section technique Économie et Stratégie Énergétique de la SFEN. Celle-ci est consultable sur le site de l'association www.sfen.org



11. Bilan électrique 2016, RTE. 12. Évaluation des charges de service public pour 2018, CRE. 13. « Les coûts de la filière électronucléaire » Cour des comptes (2012). 14. Il faut noter que les échéances sont différentes: le démantèlement arrive tôt après la mise à l'arrêt, le stockage des déchets HAVL (qui d'ailleurs concerne peu le démantèlement) est fait des dizaines d'années après que les combustibles ont été brûlés.

Avec le CFETR, la Chine accélère le développement de la fusion nucléaire

Par **Yuanxi WAN** et **Yingkun XI**, académiciens



en substance...

La première phase de la conception du CFETR a été achevée en 2015. Dans le douzième plan quinquennal de la Chine, (2010-2015), environ 1 milliard de RMB yuan (130 millions d'euros) a été investi dans la conception de la machine, la R&D de composants clés, ainsi que dans des programmes de pépinières de talents et de formation. Bien que la date de construction du CFETR n'ait pas encore été fixée, un budget supplémentaire devrait être alloué dans les prochaines années pour poursuivre la conception technique, la R&D, et la mise en place de moyens d'essais. Le CFETR a pour but essentiel de combler l'écart entre ITER et le futur réacteur à fusion commercialisable, ce qui en fait un projet à la fois passionnant et extrêmement ambitieux. La Chine pose les premiers jalons... et non des moindres.

La fusion nucléaire permettra de produire une grande quantité d'énergie bas carbone à partir d'un combustible abondant et équitablement réparti sur la planète : l'eau. Cette énergie pourrait contribuer à répondre à une demande d'électricité en forte croissance tout en préservant l'environnement. La construction d'ITER¹ en France étant bien engagée, les ingénieurs et les scientifiques imaginent déjà les réacteurs qui lui succéderont. Dans la planification du développement de l'énergie de fusion, un réacteur à fusion de démonstration (DEMO) apparaît comme une étape intermédiaire nécessaire entre ITER et un prototype de réacteur à fusion commercial. Les défis à relever pour la construction de DEMO vont, dans certains domaines, au-delà de ceux qu'il a fallu résoudre pour construire ITER.

Le *China Fusion Engineering Test Reactor* (CFETR) est le prochain réacteur prévu dans la planification du développement de l'énergie de fusion en Chine (figure 1). Il constitue une étape intermédiaire entre ITER et le réacteur de démonstration DEMO.

Deux phases sont prévues dans l'exploitation du CFETR. La première phase aura pour objectif la maîtrise du fonctionnement en régime permanent et la capacité du réacteur à produire son propre combustible (autosuffisance en tritium). La puissance de fusion ne dépassera pas 200 MW durant cette phase.

La compréhension de la physique d'un plasma puissamment chauffé par les réactions de fusion ainsi que le développement de technologies de cryomagnétisme et des systèmes de chauffage du plasma seront les éléments clés qui permettront d'accéder au fonctionnement continu. Dans la deuxième phase, le CFETR devra produire une puissance de fusion supérieure à 1 GW pour valider le concept de DEMO.

La communauté chinoise des chercheurs en fusion a défini une stratégie de développement et un plan d'action qui devraient permettre à la Chine de développer l'énergie de fusion. Ces quatre dernières années, des avancées significatives ont été faites dans les domaines de la physique des plasmas et des technologies liées à la fusion sur des installations nationales existantes : **EAST**, **HL-2A** et **J-TEXT**. Chacune avec ses spécificités, ces installations ont joué et jouent un rôle important dans la validation expérimentale des options de conception du CFETR et aussi d'ITER :

- › la mission principale d'**EAST** est de valider le fonctionnement en régime permanent, et de fournir un banc d'essai de haute puissance pour les scénarios de fonctionnement avancés avec une paroi métallique activement refroidie ;
- › **HL-2A** se consacre à la science de la fusion afin de préparer le fonctionnement d'ITER et du CFETR. Dans sa nouvelle version, HL-2M, il permettra

¹. ITER est un projet de recherche fondamentale visant à démontrer la faisabilité d'une fusion.



Figure 1 : le CFETR est le prochain réacteur prévu dans la planification du développement de l'énergie de fusion en Chine.

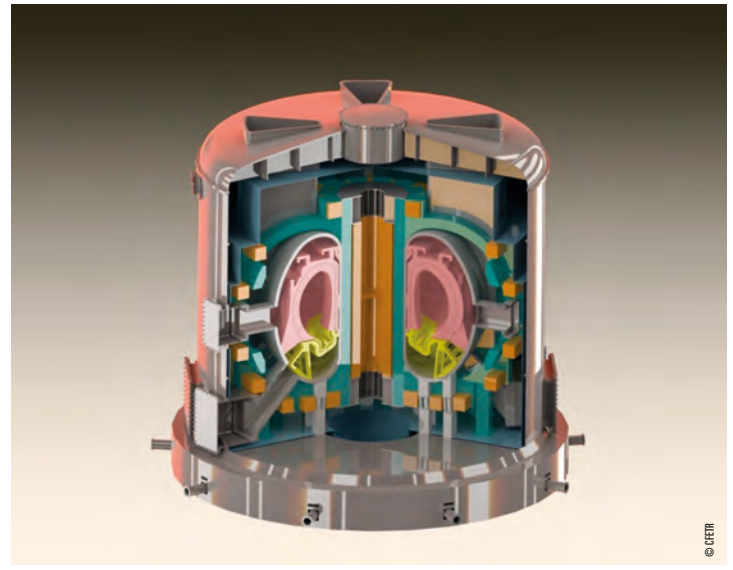


Figure 2 : coupe du CFETR.

l'étude de la physique des plasmas puissamment chauffés et des éléments face au plasma soumis à un flux de chaleur élevé, en particulier, le « divertor » qui est un des composants clés dans la chambre à vide assurant l'extraction des particules et de la chaleur. Ainsi, HL-2M pourrait être utilisé pour tester de nouvelles configurations du divertor pour le CFETR et pour les machines de la prochaine génération;

- ▶ **J-TEXT** se concentre principalement sur le contrôle et la mitigation des disruptions (perte soudaine de la configuration magnétique).

Par ailleurs, la Chine fait des efforts considérables pour accélérer l'accès à l'utilisation de l'énergie de fusion, avec notamment une vaste coopération internationale dont le CEA est l'un des partenaires majeurs. ITER, première machine à produire un plasma majoritairement chauffé par les réactions de fusion, est une étape nécessaire pour démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion à des fins pacifiques. La Chine, en tant que partenaire du projet, va beaucoup apprendre d'ITER, elle y réalisera

des activités de R&D sur les technologies clés pour le CFETR.

Le travail de conception du CFETR a commencé depuis près de quatre ans. L'approche initiale était basée sur deux phases correspondant à deux machines de taille différente.

Le premier tokamak était de taille relativement modeste, avec un grand rayon plasma $R = 5,7$ m, un petit rayon $a = 1,6$ m et un champ magnétique toroidal de $BT = 4-5$ T. Des études avaient déjà été menées pour cette machine : l'étude des scénarios, les choix des options d'ingénierie pour les éléments clés et la R&D associée comme la fabrication de la chambre à vide en grandeur nature ou le développement de la technologie du tritium, des matériaux de la première paroi et du divertor.

Cependant, une machine de plus grande taille était nécessaire pour atteindre les objectifs de la deuxième phase. Afin d'optimiser le coût de construction et d'atteindre les objectifs des deux phases du projet avec des solutions techniquement réalisables, la taille de la machine initiale a été revue à la hausse avec un grand rayon $R = 6,6$ m, un petit rayon $a = 1,8$ m, et un champ toroidal BT

= 6-7 T. Ainsi, la puissance de fusion pourra atteindre plus de 1 GW et il sera techniquement plus facile de mener l'ensemble des programmes avec la même machine.

La figure 2 montre une coupe du CFETR pour lequel 13 sous-systèmes composent son *design* conceptuel :

- ▶ l'implantation et l'intégration de la machine;
- ▶ la physique et la technologie des plasmas;
- ▶ l'aimant supraconducteur et la cryogénie;
- ▶ la chambre à vide et le système de pompage;
- ▶ les composants internes de la chambre à vide;
- ▶ le chauffage;
- ▶ le système de commande, les diagnostics et le CODAC (*Control Data Access and Communication*);
- ▶ la puissance électrique et le système de génération de courant;
- ▶ le cycle du combustible et la gestion des déchets;
- ▶ la radioprotection;
- ▶ la sûreté et RAMI (*Reliability, Availability, Maintainability and Inspectability*);
- ▶ la télémanipulation et le système de maintenance;
- ▶ le système auxiliaire et la gestion de projet.

Une série de travaux de recherche a d'ores et déjà été lancée concernant le système magnétique, la chambre à vide, la problématique tritium et la télémanipulation.

LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Pour la phase I les paramètres de performance du plasma ont été choisis en fonction des données expérimentales obtenues sur les tokamaks existants. Dans ces scénarios, la démonstration de production d'énergie est effectuée avec un confinement optimisé et une dépendance modérée du courant plasma par rapport aux systèmes externes. En augmentant le niveau de confinement du plasma, il devrait être possible d'obtenir le scénario de fonctionnement en régime permanent avec une puissance de fusion de 200 MW.

Avec une puissance de fusion jusqu'à 1 GW pour la phase II, les scénarios de fonctionnement ont été évalués sur la base de l'obtention de plasmas haute performance. Le chauffage à résonance cyclotronique ionique (170-230 GHz) et le système de génération de courant de type hybride (5-7.5 GHz) couplé au système de chauffage par injection de neutres devront permettre d'atteindre le fonctionnement en régime permanent. ▶



Figure 3 : le CFETR constituera un grand bond en avant dans la maîtrise chinoise de la fusion nucléaire.

Afin de générer assez de fluence neutronique pour obtenir l'autosuffisance en tritium, le CFETR doit fonctionner jusqu'à 105-106 s. Il sera donc nécessaire de maintenir des plasmas performants en régime stationnaire. Des simulations intégrées ont démontré que cet objectif est réalisable.

Dans le réacteur de fusion, les particules alpha de 3,5 MeV seront générées par les réactions D-T tandis que les ions rapides seront dominés par le système de chauffage par injection de neutres. Actuellement, pour le CFETR, les problèmes majeurs liés aux ions rapides ont été traités, et tous sont acceptables pour la Phase I. Les calculs effectués pour ITER ont montré que pour éviter d'endommager la première paroi, la perte de particule alpha

devrait être inférieure à 5 %. Dans le calcul de la Phase I avec une puissance de fusion de 200 MW, la perte maximale de particules alpha par ondulation (*ripple*) est seulement d'environ 3,6 %.

La capacité à évacuer la puissance sortant du plasma est un problème critique à résoudre pour la réalisation d'un réacteur de fusion industriel. Pour la phase I, la puissance de fusion de ~200 MW sera inférieure à celle d'ITER. Utiliser un divertor en W/Cu identique à celui d'ITER est donc envisageable. Cependant, durant la phase II, la charge thermique du divertor sera supérieure à 20 MW/m², ce qui pourrait empêcher les chocs longs et l'atteinte d'un régime permanent. Ainsi, les études s'acheminent vers une configuration de type « divertor avancé » et

l'amélioration des techniques d'évacuation de cette charge thermique (supérieure à 20 MW/m²) par ce dernier.

Pour les diagnostics qui permettent de mesurer les paramètres du plasma durant les décharges, ceux d'ITER ont été pris en exemple pour la phase I et ceux de DEMO pour la phase II. En effet, l'environnement dans le CFETR sera plus extrême que dans ITER et ou que dans n'importe quel autre tokamak existant, avec en particulier un niveau élevé de fluence neutronique.

LE SYSTÈME MAGNÉTIQUE

En adoptant de nouveaux matériaux supraconducteurs comme le Nb₃Sn CICC et Bi-2212 CICC, un flux maximum de 400 Voltage Seconde (VS) sera fourni par les

bobines du solénoïde central. Les bobines de champ toroïdal apporteront un champ magnétique s'élevant à 7 T au centre du plasma.

Pour fournir le flux magnétique nécessaire à l'opération du tokamak, le Solénoïde Central (SC) du CFETR comportera huit modules avec un rayon central de 1,75 m. Chaque module, composé de 720 tours de conducteurs avec une structure de 18 (horizontal) × 40 (vertical), sera alimenté indépendamment pour maintenir l'équilibre du plasma. Un supraconducteur à haute température en Bi-2212 et un supraconducteur à basse température composés de brins en Nb₃Sn seront utilisés pour générer un champ magnétique maximum de 19.9 T à 51.25 kA/tour. Pour développer et vérifier les méthodes de fabrication et les

concepts d'outillage de la bobine SC, le projet d'une bobine modèle a été lancé. Un grand programme de R&D a démarré, prenant en compte la technologie de câblage, le contrôle non destructif de l'enveloppe et le test mécanique de l'isolation.

Le choix du conducteur s'est porté sur du Bi-2212 car il semble plus économique. Compte tenu d'une température de fonctionnement potentiellement très élevée (10-30 K), le Bi-2212 est aussi le seul supraconducteur cuprate² pouvant être transformé en fil circulaire. Le câble en Bi-2212 CICC avec 42 fils a été développé par l'Institut de la physique des plasmas (ASIPP). Ce conducteur a été testé à 4,2 K avec un champ propre, et le courant critique a atteint 13,1 kA.

Des études ont également porté sur l'estimation de la charge thermique et la conception du système cryogénique du CFETR. Pour une charge thermique de 4,5 K, une usine cryogénique avec une capacité moyenne de réfrigération de 75 à 85 kW serait nécessaire. Ainsi, une unité d'azote devrait être dimensionnée pour une capacité maximale d'environ 1300 kW. La superficie des bâtiments pour le système cryogénique du CFETR est estimée à ~7000 m².

LA CHAMBRE À VIDE

Comme le montre la figure 2, la chambre à vide du CFETR est un tore avec une coupe transversale en forme de D. Elle comportera quatre fenêtres d'accès verticales supérieures, huit fenêtres inférieures et six fenêtres sur le plan équatorial. L'intérieur de la chambre à vide aura une taille d'un peu plus de 8 mètres de large sur 15,8 mètres de hauteur. L'accès aux composants internes du tokamak dans le cadre de la maintenance est un point important de la conception de la chambre à vide. Les quatre fenêtres d'accès supérieures seront utilisées pour la maintenance et le démontage des éléments de la paroi du tore.

Les six fenêtres d'accès au niveau médian seront utilisées pour les diagnostics et quelques outils télé-manipulés. Les huit fenêtres inférieures sont pour la maintenance du divertor et des pompes cryogéniques. Une maquette à l'échelle 1/8 (45° toroïdal) du secteur de la chambre à vide est en cours de fabrication.

Le cryostat du CFETR est une large enveloppe sous vide avec une simple paroi. Il se compose d'un couvercle et de deux cylindres, le cylindre supérieur et le cylindre pour la base. Le cryostat fournira un environnement sous vide (10⁻⁴ Pa) pour le fonctionnement des bobines supraconductrices, et servira d'interfaces pour l'accès des différents systèmes: chauffage, groupes de pompage, refroidissement, diagnostics, et télémanipulation.

LA PROBLÉMATIQUE TRITIUM

Une couverture tritigène refroidie à l'hélium (HCCB: *Helium-Cooled Ceramic Breeder*) a été choisie dans un premier temps pour tester le concept. Néanmoins d'autres types de couvertures tritigènes (refroidie à l'eau - WCCB, *Water Cooled Ceramic Blanket* et refroidie par LiPb) seront introduits pour effectuer des comparaisons. D'après une simulation 3D, les trois options permettraient d'obtenir un ratio supérieur à 1 pour la production du tritium.

Les couvertures tritigènes HCCB et WCCB devront répondre aux

exigences de production du tritium: atteindre l'autosuffisance en tritium, évacuer la chaleur pour générer de l'électricité *via* un échangeur de chaleur, et protéger les aimants en limitant le dépôt de chaleur. Des analyses de performances neutroniques, thermo-hydrauliques et thermo-mécaniques sont menées pour valider ces concepts. Différents modules seront utilisés durant les deux phases. La différence se situera au niveau de la superficie occupée par ces couvertures tritigènes, plus importantes en phase II à cause des dépôts de flux de chaleur beaucoup plus élevés.

Le système de recyclage du tritium est constitué de trois boucles principales. Le cycle interne permettra la récupération du tritium, la séparation isotopique des gaz issus du plasma et la réinjection du combustible dans le plasma. Le système de recyclage externe comprend l'extraction du tritium, la séparation, la purification et les mesures dans la couverture tritigène. Le troisième sous-système permet le confinement du tritium et la détritiation des effluents.

LA TÉLÉMANIPULATION

La technologie de télémanipulation a été identifiée comme l'un des problèmes clés du CFETR en raison de l'activation neutronique des composants internes du tokamak. La stratégie de maintenance grâce aux technologies de télémanipulation aura un impact significatif sur la disponibilité du CFETR et la conception des composants. Le remplacement à distance des couvertures tritigènes et du divertor sera la principale opération ayant un impact significatif sur les temps de maintenance et les exigences de disponibilité de la machine. L'option de référence pour la maintenance des composants internes du tokamak consiste en un divertor et une couverture segmentée en plusieurs modules. Sécurité, fiabilité, disponibilité et compatibilité ont été prises en compte lors du processus de conception. Le CEA a développé un premier robot pour la fusion dédié à l'inspection des composants internes du tokamak. Ce robot a été optimisé en collaboration avec l'ASIPP et a été mis en opération avec succès sur EAST récemment. ■



1. WAN Y. et al 2017
Nucl. Fusion 57 102009

SIFFER, collaborer au futur de la fusion magnétique

La création d'un centre commun franco-chinois des sciences et technologies de la fusion (SIFFER) devrait voir le jour d'ici la fin de l'année. Le CEA et le ministère chinois de la Science et de la Technologie (MOST) ont entamé début 2017 les démarches destinées à formaliser ce nouvel élan donné à leur collaboration. SIFFER traduit ainsi la volonté commune du CEA et de MOST de collaborer plus étroitement au futur de la fusion magnétique, avec un soutien affirmé à ITER et aux projets de fusion en Chine, particulièrement le CFETR.

2. Un cuprate est un composé chimique dans lequel du cuivre forme un anion ou un complexe dont la charge globale est négative.



Interview télévisée du directeur de la communication New AREVA pendant l'exercice de crise

Communication de crise 20 heures de pression médiatique simulée

NEW AREVA ORGANISAIT UN EXERCICE DE CRISE INTERNE, DE GRANDE AMPLEUR, SUR LE SITE DE MELOX (GARD), LES 11 ET 12 OCTOBRE 2017. DE 23 H À 19 H, SOIT 20 HEURES EN CONTINU, - UNE PREMIÈRE - CE SONT PLUS DE 200 COLLABORATEURS QUI SE SONT MOBILISÉS ET RELAYÉS TANT SUR LE SITE QU'AU SIÈGE À LA DÉFENSE.



Il est 4 heures du matin, les équipes du poste de commandement à Melox sont sur le pont

Il est 23h quand un accident survient à MELOX¹, dans le Gard. L'équipe d'astreinte prévient immédiatement ses interlocuteurs internes. Au vu de la situation, le Poste de commandement et de décision local (PCD-L) est créé, puis celui au niveau national (PCD-N).

Il est 23h20 quand déjà une cinquantaine de collaborateurs prennent leur poste de gestion de crise sur les deux sites.

« *Les premiers tweets affluent... Ah une première dépêche AFP* », échangent les communicants mobilisés. 15 minutes plus tard, une chaîne TV d'information signale

l'événement avec toutes les interrogations qu'il suscite. Suspicion de malveillance? Impact sur une installation nucléaire du site? Les deux PC s'informent régulièrement de la situation. Les autorités, la préfecture, les parties prenantes locales et nationales ont été prévenues. Tous se concentrent sur la gestion et la maîtrise de l'événement.

1. Pour des raisons de confidentialité, le contenu de l'exercice ne peut être communiqué.



4 heures du matin aussi, côté Paris



12h30 : prise en charge d'un blessé

Le scénario préparé depuis de longs mois revêtait des rebondissements réguliers et sur toute la durée, obligeant toutes les ressources internes à creuser chaque problématique et surtout à trouver des solutions pour maîtriser la situation. « Pour les équipes communication, c'est aussi l'opportunité à chaque exercice de réviser leurs connaissances pour être en mesure de répondre le plus précisément, dans la réactivité, aux médias », note Cécile Crampon, communicante et organisatrice de la Pression médiatique simulée (PMS). Pour exercer la pression médiatique aux niveaux national et local, une dizaine de journalistes se sont relayés sans interruption pour jouer

un panel représentatif de médias et assurer une pression médiatique forte. « Cette année, un des enjeux était aussi de solliciter plusieurs porte-parole, comme cela serait le cas dans la vraie vie. »

Il est 8h. La fatigue se ressent sur les visages des équipes de nuit. Les équipes se relaient. Les points de

situation sont faits entre les deux relèves, chacun dans son domaine d'expertise. Le scénario prévoit une dégradation de la situation au fil de la journée. La pression médiatique est redoublée. La concentration des équipes reste totale.

Enfin 19h! L'exercice est terminé. Au PCD-N, toutes les équipes se réunissent pour écouter le dernier « faux » flash d'information TV, et établir un premier retour d'expérience (REX) « à chaud ». Le REX « à froid », pour chacune des fonctions supports et techniques, se fait généralement un mois plus tard. « S'agissant de notre fonction, la communication, ces exercices sont à chaque fois une réelle opportunité d'acquiescer un niveau de maturité en gestion de crise, de sang-froid, de réactivité, et aussi de travail d'équipe. Les points forts sont relevés, mais aussi et surtout nos axes d'amélioration. Nous établissons et mettons en œuvre un plan d'actions. Il peut s'agir de renforcer tel ou tel poste en situation de crise, de compléter des argumentaires, créer des infographies pour davantage vulgariser un domaine technique... », précise Cécile.



ZOOM SUR...

LES EXERCICES DE CRISE CHEZ NEW AREVA

Chaque année, New AREVA organise plusieurs dizaines d'exercices dont plusieurs de grande ampleur. L'objectif reste toujours le même, progresser individuellement, collectivement et enrichir les dispositifs de gestion de crise. « Ces exercices constituent un véritable laboratoire d'observation et d'amélioration continue », explique Cécile Crampon de la Direction de la communication.



Organisation des équipes d'intervention sur site dont la FINA (Force d'intervention nationale d'AREVA)



Portrait



« À Melox, nous nous préparons à faire face à tous les scénarios »

Valérie Lecuir, responsable gestion de crise à Melox

APRÈS QUINZE ANNÉES D'EXPÉRIENCE DANS LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, VALÉRIE LECUIR A PRIS LA CHARGE DE LA GESTION DE CRISE D'UN DES SITES INDUSTRIELS LES PLUS IMPORTANTS DU NOUVEL AREVA: MELOX, L'USINE OÙ SONT FABRIQUÉS LES COMBUSTIBLES RECYCLÉS MOX. UN MÉTIER MÉCONNU MAIS ESSENTIEL PUISQU'IL PERMET D'APPRENDRE AUX ÉQUIPES À FAIRE FACE AUX SITUATIONS LES PLUS EXTRÊMES.

La gestion de crise porte deux objectifs explique Valérie Lecuir: « D'abord, limiter les conséquences de l'accident pour qu'il n'y ait pas d'impact à l'extérieur du site, et revenir à une situation normale. Puis, dresser une analyse de la situation pour permettre aux pouvoirs publics de prendre l'ensemble des décisions nécessaires à la protection des populations. »

Pour faire face aux scénarios complexes, Valérie Lecuir met tout en œuvre pour entraîner les équipes de Melox et mettre à leur disposition les outils indispensables pour résoudre la crise.

Plusieurs fois par an, le site réalise des exercices pour tester la réactivité des équipes et la robustesse

de l'organisation. « Certains sont de grande ampleur et mobilisent l'ensemble des acteurs: Melox, les équipes nationales d'AREVA, l'ASN, l'IRSN et même la Préfecture. Ils donnent également lieu à de véritables mises en situation avec le déploiement d'un ensemble de dispositifs. » Lors des exercices, seules une poignée de personnes, dont Valérie, connaissent le scénario. « Je travaille avec les experts pour rendre le scénario réaliste. Ce qui est difficile est d'anticiper la réaction des équipes, déjà très entraînées. Il faut donc dérouler l'ensemble des étapes: qu'est-ce que cela implique d'avoir un incendie dans une boîte à gant? Quelles seront les conséquences?

Est-ce crédible de perdre tel ou tel filtre? Au bout de combien de temps le filtre doit brûler pour être perdu? Etc. »

Ces entraînements permettent de créer des réflexes et de gagner en efficacité: « Cette efficacité dans la réalisation de certaines tâches permet de se concentrer sur d'autres sujets plus complexes et d'imaginer des solutions innovantes. » Parce que les crises ne se déroulent jamais comme prévu, les professionnels doivent apprendre à raisonner *out of the box* et l'organisation accepter les solutions (très) innovantes.

La gestion de crise implique également de tout mettre en place pour que les équipes puissent fonctionner en complète autonomie pendant

48 heures. Tous les aspects pratiques doivent être anticipés (nourriture, salle de repos) ainsi que les éléments permettant aux personnels d'agir de manière méthodique dans un contexte dégradé. « Ce que nous a appris l'accident de Fukushima est que certains membres du personnel entraînés et rompus à la gestion de crise peuvent être en situation de ne pas accéder au site. Dès lors, pour que l'organisation de gestion de crise puisse être créée dans n'importe quelle circonstance, le Groupe a décidé de former davantage de professionnels aux situations sensibles. La FINA¹, la Force d'intervention nationale AREVA, a été créée en ce sens. » Comme l'ensemble des installations nucléaires françaises, Melox est également en train de se doter d'un nouveau poste de commandement de crise permettant d'abriter l'équipe de la gestion de crise en cas de séisme ou de tornade. Reste que travailler dans la gestion de crise recouvre un paradoxe, conclut Valérie Lecuir: « Celui de tout mettre en place pour permettre à l'organisation de faire face à une situation critique, tout en espérant que jamais le dispositif n'ait besoin d'être déployé... »

1. L'objectif de la FINA est d'apporter à un site confronté à un événement majeur des moyens humains et matériels venant d'autres entités du groupe dans un délai inférieur à 48 heures.

L'électricité propre, nouvel or noir de la voiture

DEMAIN LA VOITURE ROULERA À L'ÉLECTRICITÉ.
C'EST EN TOUT CAS L'AMBITION
DE PLUSIEURS PAYS: NORVÈGE, FRANCE, ROYAUME-UNI, CHINE AINSI QUE
DE DIX ÉTATS AMÉRICAINS ET DE GRANDES VILLES COMME PARIS ET LONDRES.
TOUS SOUHAITENT ARRÊTER À PLUS OU MOINS BRÈVE ÉCHÉANCE LA VENTE
ET LA CIRCULATION DE VOITURES THERMIQUES.
CE VIRAGE RADICAL DOIT PERMETTRE DE RÉDUIRE SIGNIFICATIVEMENT
LES ÉMISSIONS DE CO₂ ET D'ENDIGUER RAPIDEMENT LA POLLUTION
ATMOSPHÉRIQUE. CEPENDANT, POUR ÊTRE VRAIMENT ÉCOLOGIQUE,
LE NOUVEAU PARC AUTOMOBILE QUI SERAIT ÉLECTRIQUE ET HYBRIDE,
DEVRA ÊTRE ALIMENTÉ PAR UNE ÉLECTRICITÉ PROPRE,
SANS QUOI LES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT POURRAIENT ÊTRE DÉVASTATEURS.

Par **Boris Le Ngoc**, SFEN

PHOTOGRAPHIE DE LA SITUATION EN 2017

Air irrespirable

La pollution atmosphérique touche toute l'Europe, révèle l'Agence européenne de l'environnement¹. Selon ses estimations, cette dégradation de la qualité de l'air aurait causé le décès prématuré de 520 400 personnes dans les 41 pays du continent européen, dont 487 600 au sein de l'Union européenne. L'Allemagne est le pays le plus touché avec 81 160 décès. De son côté, la France, en dépit d'une production électrique décarbonée², compte 45 840 décès prématurés.

Cependant, les pays en développement font face à des problèmes sanitaires bien plus importants. La Chine est le pays qui paye le plus lourd tribut avec 3 millions de décès prématurés selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Désormais, il n'est plus rare qu'en Chine et en Inde, le taux de microparticules relevé dans les villes soit huit fois plus élevé que celui recommandé par l'organisation onusienne...

À l'échelle mondiale, une récente étude³ publiée dans la prestigieuse revue *The Lancet* évalue à 9 millions le nombre de morts par an dus à la pollution de l'air. Selon les auteurs, la contamination de l'air, de l'eau et des sols tue trois fois plus chaque année que le sida, le paludisme et la tuberculose combinés.

Réchauffement climatique

La réduction rapide des émissions de CO₂ s'avère de plus en plus indispensable. Toutefois, les secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre ne sont pas les mêmes partout. Ainsi, dans la grande majorité des pays, la production d'électricité est le premier secteur d'émissions, totalisant 40 % des émissions globales de CO₂⁴. En Europe, le transport est responsable d'un quart de toutes les émissions de gaz à effet de serre. Cette part est en augmentation depuis 1990.

Au sein de l'Europe, seule une poignée de pays – la France, la Suède et la Norvège – ont réussi à décarboner leur production d'électricité. Pour ces États, l'essentiel de l'effort climatique réside donc dans l'utilisation de leur électricité pour se passer

des énergies fossiles dans les transports, principal secteur d'émissions de CO₂. Dans l'Hexagone, le transport représente ainsi 40 % des émissions de CO₂.

Dieselgate

Dans ce contexte, plusieurs États ont annoncé leur ambition d'arrêter la commercialisation des véhicules thermiques dans les 20 prochaines années. Une détermination qui s'est renforcée avec les révélations autour du *dieselgate* qui ont jeté un doute sur l'honnêteté des mesures antipollution prises par certains constructeurs.

Notons qu'en 2017, les moteurs diesel représentent 70 % des motorisations des véhicules particuliers et plus de 95 % dans les autres segments du transport routier⁵.

VERS LA VOITURE SANS CO₂

Les ambitions européennes

Dans son plan climat présenté il y a quelques mois, le Gouvernement français a intégré un volet « mobilité propre ». Nicolas Hulot, ministre de la Transition écologique et solidaire,

1. « *Qualité de l'air en Europe* », rapport 2017, Agence européenne de l'environnement. 2. En France, la production d'électricité est à 95 % décarbonée. 3. « *Pollution, health, and the planet: time for decisive action* », *The Lancet*, 19 octobre 2017. 4. AIE 2015. 5. SOeS

a ainsi annoncé sa volonté d'interdire dans l'Hexagone la vente de véhicules thermiques d'ici 2040. Cet été, le Royaume-Uni, qui connaît des pics de pollution à répétition dans ses grandes villes, lui a emboîté le pas. Reste que dans ces deux pays, la montée en puissance des voitures électriques est balbutiante : en 2017, le parc électrique représente une toute petite part de la flotte nationale. En France, cette part est inférieure à 1 %.

A contrario, la Norvège est en passe de réussir son pari. Parti au début des années 1990, le pays nordique est devenu aujourd'hui l'État où la pénétration de voitures électriques est la plus élevée au monde : plus de 100 000 véhicules pour 5,2 millions d'habitants. Forte de ce succès, la Norvège ambitionne d'arrêter la commercialisation de voitures thermiques d'ici 2025.

L'impulsion chinoise

Le passage à la voiture électrique et hybride pourrait connaître une accélération avec les déclarations de la Chine. Le plus gros marché de voitures au monde souhaite interdire la production et la commercialisation de voitures à carburants fossiles. Le calendrier est encore à l'étude mais la Chine a déjà exigé des constructeurs automobiles chinois et étrangers que les véhicules hybrides ou électriques y représentent 10 % de leurs ventes en 2019 (puis 12 % en 2020). Compte tenu du dynamisme

du marché chinois, l'empire du Milieu est en capacité de contraindre l'ensemble de l'industrie automobile à s'engager pour le développement de la voiture électrique et hybride.

LES VOITURES ÉLECTRIQUES SONT-ELLES FORCÉMENT BONNES POUR L'ENVIRONNEMENT ?

Oui...

À la différence de leurs cousines thermiques, les voitures électriques et hybrides se marient plutôt bien avec les impératifs de réduction de gaz à effet de serre et de pollution atmosphérique. Sur la route, elles n'émettent pas de CO₂ et significativement moins de particules fines que les voitures essence et/ou diesel. Les voitures électriques sont également bien moins bruyantes que leurs cousines thermiques.

Tous les signataires de l'accord de Paris de 2015 (COP21) doivent d'ailleurs proposer des objectifs nationaux pour la protection du climat, y compris – explicitement pour la première fois – pour le secteur des transports. Par ailleurs, le GIEC – qui recommande d'atteindre 80 % de production d'électricité bas carbone en 2050 – intègre une électrification de la mobilité à ces scénarios permettant de contenir le réchauffement global de la surface terrestre à 2 °C.

Cette électrification reste cependant conditionnée à la nécessité de produire une électricité à partir

d'énergies propres, c'est-à-dire sans CO₂ et sans polluants atmosphériques (SOX, NOX, etc.) qu'elles soient renouvelables ou nucléaire.

... Mais

Mettre une pile à combustible, un moteur à hydrogène ou un moteur électrique⁶ sous le capot des prochaines automobiles participera à respirer un air plus pur mais pourrait également conduire à déplacer la pollution...

Une voiture électrique qui roule dans un pays où l'électricité n'émet pas de CO₂ (France, Suède, Norvège) est plus écologique qu'une voiture à essence. De même, l'empreinte environnementale de la fabrication d'un véhicule électrique – dont l'opération requiert plus d'électricité qu'une voiture thermique (il faut autant d'énergie pour produire la batterie que pour le reste de la voiture) – émettra moins de CO₂ dans ces trois pays.

A contrario, le bilan carbone d'une voiture électrique alimentée par du charbon ne serait meilleur que si la voiture restait alimentée par du diesel. C'est le cas en Allemagne. Ce qui a fait dire en mars dernier à sa chancelière, Angela Merkel : « *Pour la protection du climat, les voitures diesel restent aujourd'hui aussi bonnes qu'elles l'étaient hier et avant-hier*⁷. » En effet, d'un point de vue environnemental, le mix électrique allemand est très carboné – 500 grammes de CO₂/

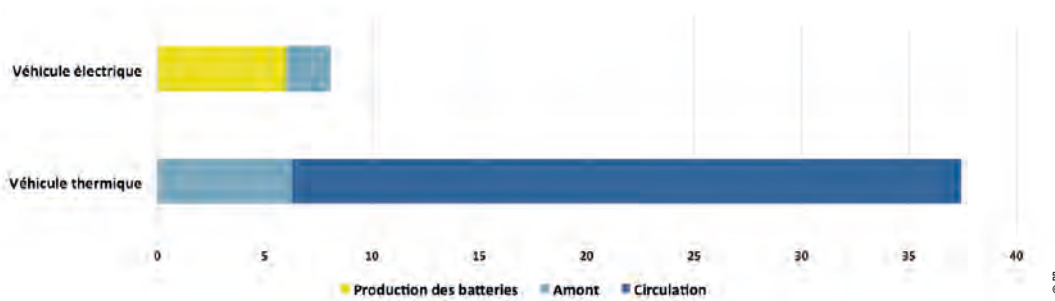


Figure 1 : émissions de CO₂ sur le cycle de vie du véhicule (en tCO₂).
Sources : UFE d'après CGDD.

6. Deux options techniques sont possibles pour le développement des véhicules électriques : les batteries et les piles à combustible. Les travaux effectués au niveau mondial par les différents laboratoires de recherche ont permis de mettre sur le marché des batteries performantes et fiables, ces travaux sont à l'origine de la réalité du véhicule électrique et de son développement. La technologie de la pile à combustible évolue également mais son stade industriel est encore lointain et sa mise en œuvre comme mode de traction nécessitera le déploiement d'un réseau de stations d'hydrogène actuellement quasiment inexistant. **7.** « *Angela Merkel verteidigt Diesel-Autos* », *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 23 mars 2017.



Grâce à sa production électrique décarbonée, la France pourrait réduire de plus de 25 % ses émissions de gaz à effet de serre en électrifiant intégralement ses transports

kWh, comparable à celui des États-Unis –, le bilan en CO₂ du véhicule électrique n'y est donc pas meilleur que celui de son équivalent thermique. La fabrication de batteries étant très consommatrice en énergie, le pays aurait encore plus de mal à tenir ses engagements si elles étaient fabriquées sur place.

QUELLE ÉNERGIE POUR ALIMENTER LES VOITURES ?

Production et pilotage de la demande avec un parc automobile « petit »

Le marché de la voiture électrique est en croissance mais le rythme actuel de renouvellement de la flotte ne nécessite pas de développer de nouveaux moyens de production d'électricité. EDF anticipe 1,5 million de véhicules électriques en 2025, et entre 13 et 15 millions à l'horizon 2040, contre 115 000 aujourd'hui. Avec 1,5 million de véhicules, la demande en 2025 pour cet usage est estimée à 4 TWh par l'électricien, soit 1 % de la consommation électrique totale de la France. En 2030, elle pourrait atteindre 10 TWh et entre 35 et 40 TWh en 2040. L'heure n'est pas à l'inquiétude. Dans son bilan prévisionnel 2016 (à l'heure où cet article est écrit, le rapport 2017 n'a pas encore été publié), RTE calcule que si un parc d'un million de véhicules électriques se rechargeait simultanément, la demande supplémentaire varierait entre 0,6 GW et 0,9 GW selon les saisons⁸.

L'opérateur de transport d'électricité établit toutefois trois profils de charge dont la prévalence conditionnera l'impact sur le réseau et la production électrique des véhicules électriques : « charge naturelle », « signal tarifaire » et « *Battery Management System (BMS)* ». Dans le premier cas, les véhicules sont rechargés en fonction du besoin, sans contrainte ou incitation. Dans le deuxième, les véhicules sont rechargés pendant les heures creuses à la réception d'un signal tarifaire par simple incitation tarifaire. C'est notamment sur cette option que travaille le constructeur

⁸. Le chiffre 0,6 à 0,9 GW s'entend sans recharge rapide.

Renault, qui a dévoilé mi-octobre son application *ZE Smart Charge*. Lancée aux Pays-Bas, elle permettra aux utilisateurs de VE de se rémunérer en rechargeant leur batterie pendant les heures creuses au moyen d'une application. Enfin, le dernier mode de charge, le « BMS », serait le moins impactant pour le réseau car la batterie serait sollicitée selon les besoins du réseau.

Pour l'Observatoire de l'industrie électrique⁹, l'enjeu est d'optimiser la production actuelle pour inciter la recharge intelligente et pilotée. Ainsi, les experts réfléchissent aux services systèmes que pourrait rendre la voiture électrique en faisant du *vehicule to grid*. L'idée serait que les véhicules contribuent à la stabilité du système électrique en rechargeant les batteries depuis le réseau lorsque la demande générale d'électricité est faible. À plus long terme, cela pourrait également permettre aux véhicules électriques de restituer de l'énergie électrique provenant de leurs batteries vers le réseau lorsque la demande générale d'électricité est élevée. Cette modernisation passe notamment par le développement des réseaux intelligents (*smart grids*). Ces technologies permettraient de gagner en réactivité et en flexibilité pour piloter les réseaux de distribution et réguler les bornes de recharge, afin de toujours assurer l'adéquation entre l'offre et la demande d'électricité, et cela, en temps réel.

Et si demain le parc automobile était tout électrique ?

Créer de nouveaux moyens de production d'électricité « pilotables » pourrait être nécessaire si l'ensemble de la flotte était électrique et que les Français rechargeaient tous en même temps leur voiture. Selon France Stratégie¹⁰, le *think tank* du Premier ministre: « *Un parc de 30 millions de véhicules électriques se rechargeant en même temps à 19 heures, même*

lentement à 3 kW, nécessiterait une puissance supplémentaire installée de 90 GW (gigawatts), soit un quasi-doublement de la demande de pointe actuelle. »

Pour rappel, la loi sur la Transition énergétique pour la croissance verte (2015) prévoit d'abaisser la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 %. Un fin connaisseur de ces questions, Jean-Marc Jancovici, président du *think-tank The Shift Project* prévient: « *Si elle devait être appliquée à la lettre, on perdrait une partie de la puissance pilotable, et ça n'aiderait pas à recharger 30 millions de véhicules!* »

Un faux problème? Le Commissariat général au développement durable rappelle dans son *Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques* que la substitution complète du nucléaire (ou des centrales à gaz ou au charbon) par des moyens de production « électronique de puissance » de type batterie pour

la réserve de puissance n'est pas envisageable. En effet, les moyens dits « inertiels » sont nécessaires à la stabilité du réseau.

ET POUR CONCLURE

Dans ce contexte, de nouveaux acteurs émergent. Pour se distinguer ils devront avoir plusieurs casquettes et maîtriser à la fois, la production d'électricité, les *smart grids* et les technologies de l'information, y compris l'intelligence artificielle. Récemment, Renault est entré dans le capital de la *start-up* hollandaise spécialisée dans la recharge intelligente, Jedlix¹¹. Le constructeur français espère à terme utiliser la voiture pour réinjecter l'énergie de la batterie dans le réseau grâce à des dispositifs de charge bidirectionnels. La voiture électrique est donc appelée à changer notre quotidien et à réorganiser, plus ou moins fortement, le marché de l'énergie. Affaire à suivre.

Les matières premières seront-elles suffisantes pour fabriquer les batteries ?

UBS a récemment chiffré que si toutes les voitures en circulation (1 milliard de voitures) étaient électriques, la production de lithium devrait augmenter de 2 980 % et celle du cobalt de 1 980 %. Ce métal est (comme son nom ne l'indique pas) un des principaux composants des batteries lithium-ion, indispensables aux véhicules électriques.

La Banque mondiale confirme les chiffres de la banque suisse puisqu'elle prévoit que la transition énergétique pourrait entraîner une augmentation de la demande de métaux de plus de 1 000 %¹².

La question de la disponibilité des matières premières rares nécessaires à la production des batteries pose de nombreuses questions. Certains métaux sont concentrés dans certains États au lieu d'être répartis équitablement sur la planète. L'approvisionnement du cobalt est ainsi considéré comme « critique » en raison de la forte concentration de sa production en République démocratique du Congo (65 % de la production mondiale).

¹². « *The Growing Role of Minerals and Metals for A Low-Carbon Future* » (2017) – Banque mondiale

⁹. *Les enjeux de l'intégration des véhicules électriques dans le système électrique*, Observatoire de l'industrie électrique (septembre 2017). ¹⁰. « *Le véhicule propre au secours du climat* », France Stratégie (2016). ¹¹. Jedlix a développé l'application *ZE Smart Charge*. Celle-ci vient optimiser la charge des véhicules électriques pour profiter au maximum des énergies renouvelables et des tarifs d'électricité les plus bas.

UROLOGUE ET HOMME POLITIQUE, BERNARD DEBRÉ A GARDÉ EN MÉMOIRE L'ÉPOQUE OÙ LE NUCLÉAIRE FASCINAIT EN FRANCE. UN SENTIMENT QU'IL RETROUVE AUJOURD'HUI DANS UNE CHINE QU'IL CONNAÎT ET QUI DOIT FAIRE FACE À DES POLLUTIONS.

“ Les Chinois souffrent de la pollution. Ils veulent une énergie plus propre ”

Bernard Debré

médecin et homme politique

Ancien ministre et vingt et un ans député, Bernard Debré est aussi un médecin urologue réputé. Ce métier, et sa volonté d'aider un pays en plein développement le conduisent, il y a un quinze ans, à créer une fondation, Action pour la santé. C'est dans ce cadre qu'il se rend en Chine, plusieurs fois par an, pour diriger bénévolement le service d'urologie d'un grand hôpital de Shanghai, l'Est Hospital Pudong. De ce contact prolongé et régulier avec ce pays « extraordinaire », Bernard Debré est marqué par la transformation « vertigineuse » qui s'est opérée ces dernières années : « J'ai pu la mesurer, avant, pendant et après les Jeux Olympiques de Pékin de 2008, et surtout lors de l'exposition universelle de Shanghai en 2010. » En médecine, comme dans d'autres domaines, la Chine est volontaire et progresse rapidement : « Il y a quinze ans il n'y avait pas d'urologie, pas de chirurgie et pas de matériel correct. Maintenant, le matériel est ultramoderne et le personnel très compétent, à tel point que j'ai pu me demander ce que je pouvais leur apporter de plus. La corruption reste

cependant omniprésente et les questions d'éthique totalement absentes des esprits. Ils veulent gagner de l'argent, ce qui peut leur faire accepter l'absence de droits politiques. »

Auteur de près de vingt-cinq livres, Bernard Debré voit aussi dans la Chine un pays « libéral-communiste », ajoutant que « Les Chinois sont d'un nationalisme exacerbé. C'est "la Chine avant tout", qui se manifeste par un expansionnisme prononcé, visible en Asie, mais aussi de plus en plus en Afrique. » Il avertit : « Dans l'esprit de beaucoup d'Européens, et de Français en particulier, la Chine est une terre que l'on peut conquérir. C'est un miroir aux alouettes. Les lois économiques y sont variables en fonction de leurs intérêts. Ce n'est jamais à l'avantage des Occidentaux. »

Bernard Debré confie aussi avoir fait partie des très rares médecins à avoir exercé en Corée du Nord. « J'ai eu l'occasion d'y opérer l'ex n° 2 du régime. » De cette expérience, il se souvient de ce sentiment étrange du retour à Pékin : « En Corée du Nord, on ressent l'oppression, l'absence de liberté, et lorsque l'on revient en Chine, on a un sentiment de très grande liberté. »



bio express

Député pendant six mandats, ministre de la Coopération dans le gouvernement d'Édouard Balladur, Bernard Debré est aussi le fils de Michel Debré, Premier ministre et principal rédacteur de la Constitution de la V^e République. Auteur de près de vingt-cinq livres, dont le dernier, *Un homme d'action* (Stock), est paru en 2015, Bernard Debré est aussi médecin urologue, une profession qui le conduit à se rendre tous les deux ou trois mois en Chine, où, dans le cadre de sa fondation, il y soigne et opère bénévolement.

Le développement prodigieux de la Chine qu'il a vu de ses yeux a un prix : « Les Chinois en ont oublié l'écologie, si bien que la pollution ravage le pays ». Le médecin confie une anecdote : « Lorsque l'on sort de Pékin pour se rendre à la Grande muraille de Chine puis que l'on revient, on voit arriver une bulle de pollution dans laquelle on pénètre. » Lors de ses échanges avec la population, il a constaté que « les Chinois ont très peur de la pollution et sont demandeurs d'une énergie plus propre. Ils sont très conscients qu'il faut développer conjointement l'électricité nucléaire et les énergies renouvelables. » Amateur de pêche en mer, Bernard Debré reconnaît justement l'apport du nucléaire pour l'environnement. « Il a sauvé notre pays d'une pollution terrifiante. » Dans le passé, l'homme politique a pu visiter la centrale du Bugey. « En tant que scientifique, j'étais fasciné », se souvient-il. Celui qui reste conseiller de Paris prône aujourd'hui un

mix énergétique alliant renouvelable et nucléaire. « Je ne crois qu'il faille rayer d'un coup de plume rageur toute électricité d'origine nucléaire. Par contre il est évident qu'il faut développer des énergies alternatives, comme le solaire et l'éolien. » Concernant la voiture électrique, il s'interroge : « Comment va-t-on recycler les batteries et comment va-t-on produire l'électricité ? Il faudra bien la fabriquer. Avec seulement des énergies renouvelables nous aurons de grandes difficultés... » « L'atome et la radioactivité servent aussi aux traitements et diagnostics médicaux. Or, nous avons pris du retard dans la création de radio-isotopes. Il y a cinq ou six ans, nous dépendions entièrement des Pays-Bas pour le samarium, utilisé dans le traitement du cancer : parfois, nous ne pouvions plus soigner certains patients. Cette situation provient de la stigmatisation de certains écologues » conclut-il. ■

CALL FOR PAPERS

TINCE 2018

28 - 31 AUGUST 2018
PARIS-SACLAY, FRANCE

International Conference on Technological
Innovations in Nuclear Civil Engineering

SFEN-TINCE2018.ORG



DEM 2018

22 - 24 OCTOBER 2018
AVIGNON, FRANCE

International Conference on Dismantling
Challenges: Industrial Reality, Pros-
pects and Feedback Experience

SFEN-DEM2018.ORG



Nous sommes les gardiens

NOUS SOMMES LE NOUVEL AREVA

Dans un monde transformé par de nouveaux enjeux économiques et environnementaux, un nouvel AREVA se déploie... En intervenant sur l'ensemble du cycle du combustible nucléaire, nous garantissons à nos clients une culture de sécurité et de sûreté sans concession. Avec des installations renouvelées et une expertise unique au monde, nous assurons la protection de vos projets, nous sommes les gardiens.

areva.com

A worker in a white protective suit and red helmet is working in a nuclear facility. The worker is standing next to a large piece of equipment, possibly a fuel element assembly, and is using a tool. The background shows a complex industrial environment with various pipes, ladders, and machinery. The floor has yellow and black safety markings.


AREVA