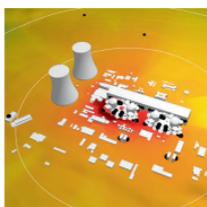


LES DÉFIS SCIENTIFIQUES DU NUCLÉAIRE



La recherche pour les réacteurs nucléaires
de production d'électricité

Les défis scientifiques du nucléaire

La recherche pour les réacteurs nucléaires
de production d'électricité

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Directeur éditorial : Jean-Marc Bocabeille
Édition : Concept Éditions
Crédits photos de la couverture : Alexis Legrix,
Sébastien Thion, Sandrine Dyèvre
Composition : Nord Compo
Impression : Isiprint

© 2021, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2623-3

Liste des auteurs

Laurent AMICE

Laurent Amice est délégué du programme Nouveaux réacteurs à la R&D d'EDF depuis 2015. Il a passé une grande partie de sa carrière à la Direction de l'Équipement puis à la Division Ingénierie nucléaire d'EDF pour le démarrage du palier 1 300 MWe, la construction de Chooz B, la construction de Ling' Ao en Chine, et pour les études puis le management du projet EPR Flamanville 3.

Patrick BARBRAULT

Patrick Barbrault a fait toute sa carrière à EDF dans différentes Directions de R&D, d'ingénierie, de production nucléaire, et de négociation de prestations autour du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets radioactifs. Il gère actuellement un portefeuille de projets de R&D qui visent à développer des codes de calcul et à réaliser des études pour évaluer la sûreté des réacteurs nucléaires, simuler le comportement du combustible tout au long de son cycle, optimiser la déconstruction des centrales nucléaires, et gérer les déchets radioactifs.

Hervé BOLL

Hervé Boll est en charge de coordonner les activités de R&D nucléaire depuis 2016. Il a rejoint le groupe EDF en 2009 où il a d'abord occupé les fonctions de Délégué d'état-major à la Division de la Production Nucléaire sur les thèmes de l'incendie, des agressions et de la malveillance. Il avait préalablement été manager sur les thèmes Incendie et Explosion au sein de l'IRSN et inspecteur des Installations Nucléaires de Base à

l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Ancien Officier de sapeur-pompier de Paris il est également expert sûreté/incendie/explosion pour le groupe EDF.

Caroline BONO

Caroline Bono est ingénieure-chercheuse senior au sein de la R&D d'EDF dans le domaine de l'intégration des énergies renouvelables au sein du système électrique européen et des flexibilités associées sur des horizons de temps prospectifs. Elle a débuté sa carrière au Lawrence Berkeley National Laboratory puis au Lawrence Livermore National Laboratory dans le développement de méthodes numériques. Elle est titulaire d'un PhD en Mechanical Engineering and Scientific Computing de l'University of Michigan et d'un diplôme d'ingénieur de l'ENSTA.

Bruno CARLOTTI

Bruno Carloti est depuis 2019 délégué du programme Environnement Production à la R&D d'EDF qui regroupe les activités de recherche sur les interactions entre les moyens de production centralisés (nucléaire, hydraulique, thermique) et l'environnement. Il a été auparavant directeur général de l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF), qu'il a créé en collaboration avec EDF, TOTAL, AIR LIQUIDE, le CNRS et l'École polytechnique. Il a tenu précédemment des rôles de management d'unités à la R&D d'EDF sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, la production décentralisée et la modélisation des systèmes.

Jean-Paul CHABARD

Diplômé de l'École Centrale de Paris, Jean-Paul Chabard a rejoint la R&D d'EDF en 1984 comme chercheur en mécanique des fluides numérique. Il a dirigé successivement le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou, le Département Transferts Thermiques et Aérodynamique puis le Service Modélisation et Technologies de l'Information. Il a ensuite assuré plusieurs postes de management au sein de la R&D d'EDF dont celui de Directeur Gestion Finances. Il est aujourd'hui Directeur Scientifique de la R&D d'EDF et membre de nombreux conseils scientifiques tels que l'ENSTA Paris, CentraleSupélec et la Direction des Énergies du CEA, Membre d'Honneur de l'AIRH (International Association for Hydro-Environment Engineering and

Research) et membre du Conseil d'administration de la Société Hydrotechnique de France. Il est également Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Pascal CHARLES

Pascal Charles est directeur des programmes de recherche à la R&D d'EDF dans le domaine de la production, en particulier nucléaire. Avant de rejoindre la R&D, il a passé sa carrière au service de l'ingénierie, dans le génie civil des grands ouvrages, puis dans l'ingénierie du nouveau nucléaire avec différentes fonctions de management et de direction technique, incluant la coordination technique des différentes disciplines métier, pour les projets EPR en France et à l'international.

Catherine DEVIC

Catherine Devic est spécialiste dans le domaine des réseaux et télécommunications. Ingénieure diplômée de Sup Telecom, elle a exercé au sein d'EDF des missions d'expertise dans ce domaine pendant huit ans. Après plusieurs projets d'industrialisation d'infrastructures et de services à l'échelle nationale et européenne, elle s'est orientée vers la recherche appliquée dans le domaine des réseaux mobiles et des réseaux de capteurs sans fil en environnement fortement contraint, pilotant pendant plus de dix ans, un groupe de recherche dans le domaine du contrôle-commande de centrales électriques et de la sûreté de fonctionnement des systèmes programmés. Depuis 2011, elle est responsable de la programmation des activités de recherche à la R&D d'EDF dans le domaine de la Performance nucléaire et depuis 2017 y intègre la dimension simulation numérique.

Véronique GOURAUD

Véronique Gouraud est ingénieure-chercheuse senior à la R&D d'EDF, depuis 1999, sur l'évaluation, la réduction et la compensation des impacts des aménagements hydroélectriques et des centrales thermiques sur la biodiversité. Elle a piloté pendant quinze ans des projets de recherche sur cette thématique au sein d'EDF en partenariat avec des laboratoires externes. Elle co-dirige, avec l'INRAE, l'équipe de recherche commune HYNES, qui permet de co-encadrer des thèses et post-doc sur l'écologie des milieux aquatiques et terrestres. Elle est rédactrice

en chef de la revue Hydroécologie appliquée. Elle est également membre du Comité d'Orientation Stratégique de la Fondation de la Recherche pour la Biodiversité.

Guillaume HERVE-SECOURGEON

Guillaume Hervé-Secourgeon est ingénieur-chercheur expert à la R&D d'EDF. Il est également ingénieur des Travaux Publics et docteur en Génie Civil. Il travaille depuis 20 ans dans le domaine du Génie Civil Nucléaire. Il a mené en parallèle une carrière en bureau d'études puis à l'ingénierie d'EDF et une activité académique en tant que responsable de la formation de Génie Civil Nucléaire de l'ESTP Paris, où il a enseigné, puis en tant que Directeur-Adjoint du Mastère Spécialisé en Génie Civil des Grands Ouvrages pour l'Énergie commun à l'École des Ponts ParisTech et à l'École CentraleSupélec. Il a fondé en 2013 et présidé la conférence internationale Technological Innovations in Nuclear Engineering. Il est également le président de la Section Technique Génie Civil et Architecture de la Société Française d'Énergie Nucléaire.

Denis LE BOULCH

Denis Le Boulch est ingénieur senior à la R&D d'EDF dans le domaine de l'Analyse du Cycle de Vie depuis 1998. Il a piloté le premier projet de recherche dédié à l'ACV de la production d'électricité d'EDF, participé à de nombreux projets européens, et mené de multiples missions d'expertise, internes et externes (CESE, ADEME). Il est l'auteur de nombreuses publications (SCP) et interventions en congrès internationaux (SETAC), principalement dans le champ de l'ACV appliquée à la production d'électricité. Il est également vice-président de l'Association SCORE LCA (association interindustriels dédiée au Développement de l'ACV).

David LECARPENTIER

David Lecarpentier est ingénieur-chercheur expert à la R&D d'EDF. Il travaille depuis vingt ans sur les réacteurs du futur et leur cycle du combustible. Il a étudié la neutronique et les transitoires accidentels de plusieurs réacteurs de quatrième génération. Il a également contribué aux études de scénarios d'évolution du parc nucléaire, avec le code Tirelire-Stratégie, développé à la R&D d'EDF.

Alain LE GAC

Alain Le Gac a rejoint la R&D d'EDF en 2016, après une carrière réalisée en grande partie à la Production nucléaire d'EDF. Il a exercé des fonctions de chef de service production au CNPE de Gravelines, de directeur délégué en charge des arrêts de tranches au CNPE de Dampierre, de directeur du CNPE de Nogent-sur-Seine, de directeur de l'Inspection nucléaire pour la Production nucléaire.

Christelle LE-MAITRE

Christelle Le-Maître a fait toute sa carrière à la R&D d'EDF. Après un premier poste d'ingénieure-chercheuse dans le domaine de l'incendie et du combustible, elle a évolué vers la gestion de projet technique puis des postes de management d'équipe et de département en tant que déléguée. Elle gère actuellement un portefeuille de projets de recherche sur la sûreté nucléaire et la radioprotection.

David LEMASSON

Après des études en génie atomique, David Lemasson a travaillé pendant 10 ans à la R&D d'EDF sur les réacteurs du futur et le cycle du combustible associé. Il a principalement travaillé sur la simulation de transitoires accidentels sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et sur les scénarios d'introduction de ces réacteurs dans le parc français. Il a été responsable pendant 2 ans du projet de recherche dédié aux réacteurs de quatrième génération.

Claire LE RENARD

Claire Le Renard est ingénieure-chercheuse à EDF R&D depuis 1999, d'abord en environnement, puis en économie de l'environnement et prospective énergétique ; depuis 2009, sa recherche en sciences sociales analyse le processus de changements sociotechniques dans le secteur de l'énergie (filières nucléaires, énergies renouvelables...) et de l'environnement, éclairant en particulier les technologies futures de production d'énergie. Elle enseigne les sciences sociales dans plusieurs cursus d'ingénieurs, dont le Génie Atomique à l'INSTN. Elle est diplômée de l'École Polytechnique et de l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

Patrick MORILHAT

Patrick Morilhat est responsable du programme de recherche sur les performances des centrales nucléaires à la R&D d'EDF depuis 2009. Il a commencé sa carrière à EDF en 1985 et a occupé diverses positions techniques ou de management. Côté technique, il a développé l'utilisation d'approches probabilistes dans le domaine de la mécanique des structures et mis en place des systèmes de monitoring dans les centrales nucléaires et thermiques. A partir de 2002, il a été en charge du développement de partenariats internationaux de recherche pour la production d'électricité, en lien avec les principales sociétés électriques. Il est à la R&D depuis 2009.

Sylvie PAREY

Sylvie Parey est ingénieure-chercheuse senior à la R&D d'EDF et habilitée à diriger des recherches. Sa compétence porte d'une part sur le système climatique, sa modélisation et son évolution et d'autre part sur le traitement statistique des variables météorologiques, tant en termes de tendances, d'extrêmes en contexte non stationnaire que de modélisation stochastique. Elle participe aux recherches sur le changement climatique à la R&D d'EDF dès le début des années 1990. Au début des années 2000, elle a initié et piloté le premier projet sur les impacts du changement climatique sur les activités d'EDF, avant de se consacrer à la filière expertise.

Frédéric RAVEL-SIBILLOT

Frédéric Ravel-Sibillot est ingénieur généraliste à EDF, investi dans les domaines « eau » et « environnement » sur le bassin de la Loire. Aujourd'hui directeur du développement durable territorial à la centrale nucléaire de Chinon, il a supervisé le programme « Environnement-Production » de la R&D d'EDF de 2015 à 2019. Il est en particulier à l'initiative du lancement des projets de R&D sur la biodiversité et sur les évolutions attendues de la ressource en eau. Il a piloté également la synthèse du Conseil Scientifique d'EDF de mars 2019 sur « le changement climatique et ses impacts sur EDF ».

Christophe VARÉ

Christophe Varé est ingénieur diplômé de l'École Centrale de Lyon et travaille à la R&D d'EDF depuis 1993. Il a en particulier

été responsable du département Matériaux et Mécanique des Composants de 2008 et 2012. Entre 2012 et 2016, il a travaillé en Chine pour y développer des collaborations avec les acteurs industriels et académiques locaux. Depuis 2016, il est responsable du programme de recherche Durée de Fonctionnement du Parc Nucléaire à la R&D d'EDF.

Liste des coordonnateurs :

Hervé Boll – Délégué en charge de la coordination des activités de R&D nucléaire, R&D d'EDF

Bruno Carlotti – Délégué Programme Environnement, R&D d'EDF

Jean-Paul Chabard – Directeur scientifique, R&D d'EDF

Pascal Charles – Directeur Programmes Production & Ingénierie, R&D d'EDF

Sandrine Dyèvre – Ingénieure-chercheure, chef de projet communication scientifique, R&D d'EDF

Alain Le Gac – Directeur R&D Production et Ingénierie, R&D d'EDF

Sommaire

Liste des auteurs	III
Abréviations	XV
Introduction	1
1. Les débuts du nucléaire en France	5
1.1. Panorama des générations de réacteurs.....	5
1.2. Génération 1 de réacteurs : avant les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP).....	8
1.2.1. <i>Graphite gaz, Chooz A</i>	8
1.2.2. <i>Les premières étapes d'une diversification</i>	10
1.3. Génération 2 de réacteurs : les REP et la construction du parc actuel.....	12
1.3.1. <i>Pourquoi ce choix ? Historique de construction du parc 900 MWe</i>	12
1.3.2. <i>Le parc actuel est composé des paliers 900 MWe, 1 300 MWe et N4</i>	17
1.3.3. <i>La filière industrielle française</i>	19
1.4. Génération 3 : EPR et EPR2.....	20
1.4.1. <i>L'EPR et la coopération franco-allemande</i>	20
1.4.2. <i>Les difficultés apparues avec Flamanville</i>	21
2. Le cycle du combustible	25
2.1. Les constituants des combustibles nucléaires.....	25
2.1.1. <i>De la réaction en chaîne à l'électricité</i>	25
2.1.2. <i>L'uranium 235</i>	26
2.1.3. <i>Le thorium</i>	28
2.2. Le cycle du combustible en France.....	29
2.2.1. <i>De l'uranium pour au moins un siècle</i>	29

2.2.2. <i>Le cycle du combustible des années 70</i>	31
2.2.3. <i>Le mono-recyclage actuel dans les REP</i>	32
2.3. L'aval du cycle du combustible nucléaire.....	35
2.3.1. <i>Les déchets radioactifs</i>	35
2.3.2. <i>Le centre de stockage géologique Cigéo</i>	39
3. La sûreté	43
3.1. Les fondamentaux de la sûreté nucléaire.....	43
3.1.1. <i>Les principes fondamentaux</i>	43
3.1.2. <i>Les ré-évaluations de sûreté tous les dix ans, lors des visites décennales</i>	45
3.2. La recherche au service de la sûreté.....	46
3.2.1. <i>La recherche sur la simulation des cœurs nucléaires et du combustible</i>	48
3.2.2. <i>La recherche sur le thème des agressions</i>	58
4. Pilotage et flexibilité	65
4.1. Introduction au système électrique.....	65
4.1.1. <i>Comment fonctionne le système électrique ?</i>	66
Production.....	66
Réseaux.....	69
Consommateurs.....	69
4.1.2. <i>Comment assure-t-on la résilience d'un système électrique ?</i>	71
Planification des investissements et des stocks de combustible.....	71
Planification de la production.....	72
4.2. Pilotage des tranches et manœuvrabilité du parc.....	75
4.2.1. <i>Qu'est-ce que la flexibilité ?</i>	75
4.2.2. <i>Les principes de base du pilotage de la flexibilité</i>	78
4.2.3. <i>Les impacts de la flexibilité sur les installations et composants</i>	79
Sûreté.....	79
Combustible.....	79
Circuit primaire.....	80
Environnement.....	81
Chimie.....	81
Effluents liquides et consommation de produits chimiques....	82
Déchets solides.....	82
Limites environnementales.....	83
Circuit secondaire.....	83
Maintenance.....	83
Compétences.....	84
4.3. Les besoins futurs en flexibilité.....	85
4.3.1. <i>Un développement massif des EnR qui modifie en profondeur le système électrique</i>	85
4.3.2. <i>Vers un objectif de décarbonation</i>	89

5. La durée d'exploitation des équipements	91
5.1. Le programme Grand Carénage.....	92
5.2. Les contributions de la R&D au programme Grand Carénage	94
5.2.1. <i>Étude du vieillissement des matériaux</i>	94
5.2.2. <i>Optimisation technico-économique des stratégies de maintenance</i>	96
5.3. Les moyens pour y arriver	97
5.3.1. <i>La maquette VERCORS</i>	97
5.3.2. <i>Les outils de préparation des interventions</i>	98
5.3.3. <i>Une gestion optimisée des chantiers en arrêt de tranche</i>	100
5.4. De nouvelles technologies au service d'une gestion du parc toujours plus sûre	101
5.4.1. <i>Les jumeaux numériques</i>	102
5.4.2. <i>La fabrication additive (ou impression 3D)</i>	104
6. Performance environnementale et acceptabilité de la production nucléaire d'électricité	109
6.1. Les centrales nucléaires et l'environnement.....	109
6.1.1. <i>Besoins en eau d'une centrale nucléaire</i>	110
6.1.2. <i>Les rejets thermiques</i>	111
6.1.3. <i>Rejets d'effluents liquides et gazeux</i>	112
6.2. La production d'électricité nucléaire et la biodiversité	113
6.2.1. <i>Les incidences et les dépendances de la production vis-à-vis de la biodiversité</i>	113
6.2.2. <i>L'évaluation de l'état de la biodiversité, la caractérisation des impacts et les solutions innovantes pour les réduire</i>	115
Les rejets thermiques.....	116
Les prélèvements d'eau	117
La gestion de la biodiversité sur le foncier.....	118
6.3. Prise en compte du changement climatique	119
6.3.1. <i>Les aléas extrêmes d'origine naturelle</i>	121
6.3.2. <i>La robustesse des sources froides</i>	121
6.4. Empreinte environnementale du kWh nucléaire.....	123
6.4.1. <i>Rappels sur la méthode Analyse du Cycle de Vie</i>	123
6.4.2. <i>Analyse du Cycle de Vie du kWh nucléaire</i>	124
Panorama général.....	124
ACV du kWh nucléaire France.....	126
6.4.3. <i>Performance environnementale du kWh nucléaire dans un mix de production</i>	126

XIV Les défis scientifiques du nucléaire _____

6.5. Acceptabilité et relations avec les collectivités territoriales.....	127
6.5.1. <i>L'acceptabilité du nucléaire : un processus dynamique</i>	127
6.5.2. <i>Un regard rétrospectif pour comprendre la situation présente</i>	129
6.5.3. <i>Le nucléaire vu par le grand public : opinions et représentations</i>	134
7. Les nouveaux réacteurs	141
7.1. Vision à moyen terme : les prochains réacteurs	142
7.2. SMR, une opportunité de développement à l'international	146
7.3. Les réacteurs de génération 4	149

Abréviations

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADS	<i>Accelerator Driven System</i> (Système piloté par accélérateur)
AGR	<i>Advanced Gas Reactor</i> (Réacteur avancé refroidi au gaz)
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AM	Actinides Mineurs
ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Energies Alternatives
CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (Mécanique des fluides numérique ou MFN)
Cigéo	Centre Industriel de stockage Géologique des déchets HAVL et MAVL
CNDP	Commission Nationale du Débat Public
CNPE	Centre Nucléaire de Production d'Électricité
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CP	Contrats Programmes
CPP	Circuit Primaire Principal
CTGREF	Centre Technique du Génie Rural, des Eaux et Forêts devenu l'INRAE

DAC	Demande d'Autorisation de Création
DOS	Dossier des Options de Sûreté
EPR	<i>European Pressurised water Reactor</i> , ou aussi dénommé <i>Evolutionary Power Reactor</i>
EPR2	Version optimisée de l'EPR
EPRI	<i>Electrical Power Research Institute</i>
EPS	Études Probabilistes de Sûreté
EUR	<i>European Utility Requirements</i> (Exigences des compagnies d'électricité européennes)
FARN	Force d'Action Rapide Nucléaire
GFR	<i>Gas-cooled Fast Reactor</i> (Réacteur à Neutrons Rapides Refroidi au Gaz)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIF	<i>Generation IV International Forum</i> (Forum International Génération 4)
GES	Gaz à Effet de Serre
GV	Générateur de Vapeur
HAVL	Haute Activité à Vie Longue
HTR	<i>High Temperature Reactor</i> (Réacteur à Haute Température)
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (Agence Internationale de l'Énergie Atomique ou AIEA)
ICEDA	Installation de Conditionnement et d'Entreposage de Déchets Activés
IGNIS	Installation Grandeur Nature Incendie Sûreté
IHM	Interface Homme-Machine
INB	Installation Nucléaire de Base
INES	<i>International Nuclear Event Scale</i> (Echelle internationale des événements nucléaires)
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
IoT	<i>Internet of Things</i> (Objets connectés)

IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
JEPP	Jours Équivalent Pleine Puissance
LCOE	<i>Levelized Cost Of Energy</i> (coût actualisé de l'énergie)
LFR	<i>Lead-cooled Fast Reactor</i> (Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au plomb)
MAI	<i>Materials Ageing Institute</i> (Institut sur le vieillissement des matériaux)
MAVL	Moyenne Activité à Vie Longue
MNHN	Museum National d'Histoire Naturelle
MOX	Mélanges d'Oxydes (combustible nucléaire composé d'Uranium appauvri et de Plutonium)
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i> (Réacteur à Sels Fondus)
MW	MégaWatt (Unité de puissance)
MWe	MégaWatt électrique (Unité de puissance électrique aux bornes de l'alternateur)
MWth	MégaWatt thermique (Unité de puissance thermique correspondant à la puissance du réacteur avant transformation en électricité)
NEA	<i>Nuclear Energy Agency</i> (Agence de l'Énergie Nucléaire)
NPI	<i>Nuclear Power International</i>
OAP	Outil d'Aide au Pilotage
OCS	Outils de Calcul Scientifique
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economique
OPECST	Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques
PA	Produit d'Activation
PF	Produit de Fission
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> (Réacteur à Eau Pressurisée ou REP)
PNGMDR	Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs

PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
REP	Réacteur à Eau Pressurisée
REX	Retour d'Expérience
RJH	Réacteur Jules Horowitz
RNR	Réacteur à Neutrons Rapides
RNR-Na	Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au Sodium (SFR)
SCWR	<i>SuperCritical Water Reactor</i> (Réacteur à Eau Supercritique)
SDAGE	Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SENA	Société d'Énergie Nucléaire franco-belge des Ardennes
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology And Chemistry</i>
SFR	<i>Sodium-cooled Fast Reactor</i> (Réacteur à Neutrons Rapides refroidis au sodium)
SMR	<i>Small Modular Reactor</i> (Petit Réacteur Modulaire)
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
STE	Spécifications Techniques d'Exploitation
TMI	<i>Three Mile Island</i> (centrale nucléaire Américaine)
UNGG	Uranium Naturel Graphite Gaz
URE	Uranium de Retraitement Enrichi
URT	Uranium de Retraitement
UOX	Oxyde d'Uranium
V&V	Vérification et Validation
VD4	Visite Décennale n° 4 (40 ans d'exploitation)
VHTR	<i>Very High Temperature Reactor</i> (Réacteur à Très Haute Température)

Introduction

Le nucléaire est une source d'énergie avec laquelle il faut compter dans la transformation nécessaire du paysage énergétique pour réduire durablement les émissions de CO₂. Le rôle que jouera l'électricité comme vecteur énergétique prioritaire pour décarboner l'économie (transports, procédés industriels, usages domestiques) est de plus en plus partagé. En France, il est clairement inscrit dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) qui vise un taux d'électrification de 50 % en 2050. Notre pays dispose déjà d'une production d'électricité fortement décarbonée, grâce aux productions d'origines nucléaire et renouvelable, essentiellement hydraulique jusqu'à présent. La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie prévoit un accroissement des productions d'origine éolienne et photovoltaïque (PV) dans l'avenir avec une cible de 50 % d'électricité produite par d'autres sources que le nucléaire en 2035. Pour autant, le nucléaire continuera de représenter des capacités de production importantes dans les décennies qui viennent. Il est donc essentiel, pour sécuriser le réseau électrique, de savoir combiner la production des énergies renouvelables variables, comme l'éolien et le PV, avec des moyens de production d'électricité pilotables et décarbonés, comme le nucléaire et l'hydraulique, challenge d'autant plus important avec une part croissante des énergies renouvelables variables.

L'ambition de cet ouvrage est de partager largement l'état des connaissances sur les réacteurs nucléaires français. Il a vocation à fournir des repères technologiques et scientifiques permettant à chacun à se faire une opinion à l'occasion des débats en cours sur la transition énergétique et sur la place qui revient au nucléaire.

Après un premier chapitre qui rappelle l'histoire du développement du parc nucléaire français, le chapitre 2 décrit en détail le cycle du combustible nucléaire. Si la matière première nécessaire à la fabrication du combustible est importée, après extraction dans des pays différents, tout le cycle de fabrication du combustible, son utilisation dans les réacteurs, puis le traitement du combustible utilisé, ont lieu sur le territoire national, et font de l'industrie nucléaire et de la production d'électricité d'origine nucléaire, un pilier de l'indépendance énergétique nationale. Le nucléaire est également une industrie pourvoyeuse d'emplois qualifiés : en France, ce sont environ 200 000 emplois directs et indirects, plus d'un million en Europe et au Royaume-Uni, plus de 15 000 personnes sont mobilisées en Europe sur la recherche et le développement en relation directe avec le nucléaire.

Bien sûr, la conception et l'exploitation des réacteurs doivent répondre à un haut niveau d'excellence en matière de sûreté des installations. Le chapitre 3 présente les grands fondamentaux de la sûreté nucléaire et donne un aperçu des travaux de recherche qui appuient la démarche d'amélioration permanente de la sûreté qui est le propre de l'industrie nucléaire.

Comme cela a été rappelé plus haut, le parc nucléaire constitue le principal moyen de production pilotable d'électricité décarbonée et jouera un rôle clé dans le futur pour palier la variabilité de la production éolienne et photovoltaïque. Le quatrième chapitre de cet ouvrage est consacré à cet enjeu. Il décrit en détail le niveau de flexibilité des réacteurs nucléaires français, flexibilité unique au monde, obtenue grâce des adaptations technologiques mises au point dans les années 80. En France, la combinaison d'un parc hydraulique conséquent et d'un parc nucléaire avec plus de 60 % des réacteurs fortement manœuvrant apporte la garantie d'un fonctionnement robuste du système électrique.

Les réacteurs nucléaires représentent des investissements financiers conséquents et leur rentabilité est donc fortement liée à leur durée de fonctionnement. La connaissance des performances intrinsèques de chaque équipement, la qualité de son entretien sont décisives. L'innovation, les nouvelles technologies, en particulier numériques, comme l'utilisation massive de données et la mise au point de jumeaux numériques contribuent à des prises de décisions les mieux adaptées sur les

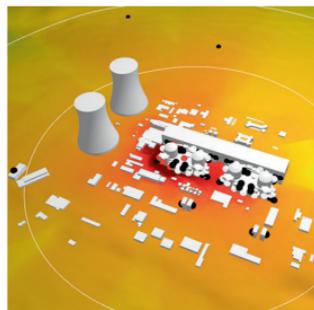
actes de maintenance ou de remplacement d'équipements et c'est l'objet du cinquième chapitre de ce livre qui montre comment l'industrie nucléaire bénéficie des innovations les plus avancées, tant dans le domaine de la fabrication que du contrôle commande.

Comme tout moyen de production d'électricité, le nucléaire interagit avec son environnement. Ce sujet est abordé en détail dans le chapitre 6, sous différents angles. Plusieurs décennies de mesures environnementales à proximité des centrales, sur la faune et la flore, démontrent clairement le respect des normes environnementales mais elles permettent également de modéliser et de prévoir les évolutions possibles dans un contexte du changement climatique. L'acceptabilité des installations nucléaires est également abordée dans ce chapitre. Elle est bien sûr dépendante de l'excellence de la sûreté des installations et de leur impact le plus réduit possible sur leur environnement.

Enfin, le dernier chapitre de cet ouvrage présente les perspectives de développement du nouveau nucléaire à différentes échelles de temps, qu'il s'agisse des EPR2 pour le renouvellement du parc actuel, ou des petits réacteurs modulaires qui voient un large engouement dans le monde et qui pourraient jouer un rôle important pour remplacer des centrales thermiques existantes à l'international. Pour le plus long terme, les réacteurs à neutrons rapides permettraient de tirer tout le parti du contenu énergétique de l'uranium 238, donnant ainsi accès à une énergie abondante pour des centaines d'années.

Le nucléaire constitue une source d'électricité pilotable, décarbonée et concentrée, ce qui lui donne de nombreux atouts pour jouer un rôle important dans la transition vers un mix électrique décarboné : économie de matières premières, économie d'espaces fonciers, coûts maîtrisés. Au niveau international, de très nombreux acteurs s'accordent aujourd'hui à penser qu'il sera très difficile de construire un système électrique robuste et décarboné sans faire appel au nucléaire. Je suis convaincu qu'il s'agit d'une énergie d'avenir !

Bernard Salha,
Directeur de la R&D d'EDF



Les réacteurs nucléaires de production d'électricité en France sont le socle d'une énergie bas carbone, pilotable, complémentaire des énergies hydrauliques et renouvelables variables. La sûreté des réacteurs, le cycle du combustible, les grandes opérations de maintenance, la protection de l'environnement et les nouveaux réacteurs, sont déchiffrés dans cet ouvrage et illustrés par les défis scientifiques qui contribuent à l'amélioration continue de la filière.

