

# R&D, INGÉNIERIE ET PRODUCTION ENSEMBLE POUR LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN

Le nucléaire a de l'avenir ! Un avenir encore plus sûr et toujours plus compétitif. Cette vision partagée par tout le Groupe EDF, associé à ses partenaires du CEA, de FRAMATOME et ORANO, a conduit la R&D, l'Ingénierie et la Production à oeuvrer ensemble pour innover sur de nombreux sujets...[Page 02](#)



### QUELLES PRIORITÉS NUCLÉAIRES POUR LA R&D D'EDF ?

Si le sujet "nucléaire du futur" touche quasiment tous les départements de la R&D, il faut néanmoins concentrer les efforts pour franchir des étapes de recherche et lever des verrous scientifiques. [Page 04](#)

### INITIATIVES NUCLÉAIRE DU FUTUR : UNE NOUVELLE APPROCHE POUR IMAGINER LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN

Avec Alain Le Gac, directeur des Programmes Production à la R&D d'EDF. [Page 07](#)

### LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN FACE AUX CYBER-ATTAQUES

[Page 12](#)

### INNOVATIONS ET IA AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Avec Frédéric Ravel-Sibillot, délégué Programme Environnement de la Production – EDF R&D.

[Page 13](#)

### DURÉE DE VIE DES CÂBLES ÉLECTRIQUES

[Page 14](#)

### 3 QUESTIONS À

David Monfort, chef de Département Délégué - Département Électrotechnique et Mécanique des Structures - EDF R&D [Page 15](#)

### LES COMBUSTIBLES E-ATF

[Page 15](#)

### FLEXIBILITÉ NUCLÉAIRE ET ENR

3 questions à Christelle Le Maître, déléguée Programme Production - EDF R&D - Pilote de la brique "Scénario de flexibilité"

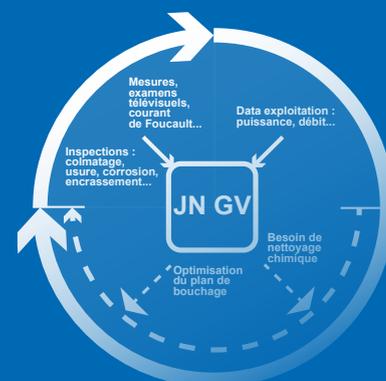
[Page 17](#)



### COMMENT FAIRE PROFITER AU MAXIMUM LA FILIÈRE NUCLÉAIRE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES ?

[Page 19](#)

### CAHIER TECHNIQUE



### JUMEAUX NUMÉRIQUES : LA SIMULATION AU PLUS PRÈS DU RÉEL

[Page 08](#)

# R&D, INGÉNIERIE ET PRODUCTION ENSEMBLE POUR LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN

Le nucléaire a de l'avenir ! Un avenir encore plus sûr et toujours plus compétitif. Cette vision partagée par tout le Groupe EDF, associé à ses partenaires du CEA, de FRAMATOME et ORANO, a conduit la R&D, l'Ingénierie et la Production à oeuvrer ensemble pour innover sur de nombreux sujets...



## Une innovation collaborative pour plus d'efficacité

Innover pour le nucléaire n'est pas une nouveauté pour la R&D. Elle y consacre d'ailleurs entre 35 et 40 % de son budget depuis de nombreuses années. Avec plusieurs décennies d'expérience, à l'échelle mondiale, en tant que concepteur, constructeur et exploitant, le Groupe EDF dispose d'un corpus de connaissances conséquent sur la technologie et l'opérationnel. "Nous entrons dans une nouvelle ère de recherche et développement beaucoup plus collaborative, qui vise d'une part à **améliorer la compétitivité de l'électricité nucléaire et d'autre part à renforcer encore sa sûreté**" annonce Michel Maschi, directeur en charge des domaines d'ac-

tivité Ingénierie et Production pour la R&D d'EDF. Concrètement, chaque projet de recherche embarque **une équipe pluridisciplinaire, dont les membres viennent sans distinction de la R&D, de l'ingénierie, et/ou de la production.** "Cette collaboration est même plus large puisque nous avons lancé avec nos partenaires FRAMATOME et CEA un vaste programme de travail baptisé *Initiatives Usine Nucléaire du futur* (voir notre article ci-après) qui concentre ses recherches sur des briques technologiques prometteuses pour renforcer la compétitivité et l'attractivité du nucléaire" rappelle Michel Maschi. "Son ambition est de proposer et mettre en œuvre des innovations sur le parc existant et les nouveaux réacteurs en exploitant au mieux les nouvelles

technologies, le digital et la valorisation des données. Ainsi, par exemple, nous allons disposer d'une réplique virtuelle d'un générateur de vapeur pour mieux prédire ses caractéristiques dans la durée et renforcer leur efficacité (voir notre article sur les ju-

## DU "LEAN START-UP" DANS LE NUCLÉAIRE

Chaque année, la DPN et la R&D se réunissent pour un séminaire ouvert : les équipes opérationnelles de l'exploitant y énoncent leurs rêves, et les chercheurs de la R&D proposent des pistes de réponses. Un exemple ? "Et si on pouvait voir la radioactivité ?" Pourquoi pas... avec un casque de réalité augmentée.

meaux numérique). D'autres innovations digitales majeures pourront aussi simplifier l'activité des exploitants et des concepteurs. Pour mener à bien ces études, nous allons chercher les talents là où ils se trouvent, chez nos partenaires, et souhaitons impliquer ceux qui seront in fine les véritables utilisateurs des innovations. C'est peut-être habituel pour une PME ou une start-up, mais c'est un événement managérial majeur pour le Groupe EDF. Et ça fonctionne ! Ces méthodes de travail transversales et systémiques sont plus efficaces, plus rapides, plus agiles... **C'est aussi un levier fort pour attirer de jeunes chercheurs vers le nucléaire**".

### Le nucléaire de demain commence aujourd'hui !

Mais de quelle échéance parle-t-on ? Le nucléaire de demain : c'est quand ? "Les réflexions sur le nucléaire du futur se nourrissent de l'exploitation d'aujourd'hui et réciproquement. Certes, il y aura de nouveaux types de centrales, mais elles cohabiteront avec le parc actuel, dont la durée d'exploitation pourra être prolongée en toute sûreté grâce aux apports de la R&D et de l'ingénierie. **Notre travail commun avec la R&D concerne donc aussi le futur des centrales actuelles**" explique Olivier Lamarre, directeur adjoint de la Division Production Nucléaire d'EDF. Deux objectifs principaux vont en ce sens. D'une part la sûreté, qui doit bénéficier des réponses à des risques en partie nouveaux, et qui ont été précisés depuis la conception des centrales actuelles, grâce notamment aux travaux de R&D sur le domaine et à la prise en compte du retour d'expérience national et international. D'autre part les performances de production, dont une part non négligeable n'est pas liée au design principal du

réacteur. "De nombreuses innovations découlent des recherches sur les nouveaux réacteurs, et sont déjà exploitables : pourquoi s'en priver ? Augmenter la durée de vie d'un générateur vapeur ou d'une enceinte, exploiter le big data, le contrôle-commande numérique, ou des algorithmes d'IA pour améliorer et faciliter la conduite... tout cela intéresse la DPN dès aujourd'hui ! De plus, en tant qu'exploitant, **nous disposons d'informations et de données utiles à la R&D pour orienter encore mieux leurs travaux**. Enfin, cette forme d'amélioration continue **crédibilise notre gestion auprès des autorités de sûreté**" précise Olivier Lamarre.

### Nouveaux réacteurs : chacun son tour

Si le nucléaire du futur est souvent associé à de nouveaux types de réacteurs comme les SMR (Small Modular Reactors) ou les "Génération IV" (capables d'utiliser directement l'uranium naturel ou appauvri et de produire 50 à 100 fois plus d'électricité avec la même quantité de minerai que les réacteurs nucléaires actuels), c'est l'EPR2, prévu pour 2040, que le Comex d'EDF a choisi comme design de référence pour les prochaines centrales. "Ce design est l'aboutissement d'un **important travail d'ingénierie et de R&D**, annonce Noël Camarcat, directeur chargé des relations avec la R&D à la Direction Ingénierie et Projets Nouveaux Nucléaire (DIPNN) d'EDF. *L'EPR2 sera plus compétitif, tant en termes de construction que de durée de vie et d'exploitation.*" Au programme : des bâtiments plus simples sans baisse de sûreté ; des sources froides redessinées (maquette dans les bassins de la R&D à Chatou) ; un nouveau code de calcul de cœur, la chaîne ODYSSEE (projet commun EDF - FRAMATOME).

"Le basic design d'EPR2 est stabilisé, mais **il reste encore beaucoup à étudier avec la R&D pour les options avancées**. Nous envisageons par exemple d'augmenter la puissance avec les mêmes bâtiments, ce qui nécessite des innovations autour de la modélisation et de l'inspection des matériaux. L'utilisation de combustible MoX doit également être étudiée dans les détails, pour préparer le cycle du combustible de l'après 2040" prévoit Noël Camarcat.

Le nucléaire s'affiche ainsi comme une énergie d'avenir pour le Groupe EDF, qui, plus que jamais, souhaite fédérer la filière pour identifier et appliquer les meilleures pratiques de demain. ●

### SMR : RUPTURE TECHNOLOGIQUE ET SYSTÉMIQUE

Les Small Modular Reactors, en français "réacteurs modulaires de faible puissance" sont l'un des **projets phares de la R&D d'EDF**. Le concept répond en effet à des objectifs très ambitieux tant à l'échelle des réacteurs eux-mêmes que de leur contribution au système électrique. Leur faible puissance (de 100 à 300 MWe) leur apporte de facto une **meilleure sûreté**, mais leur multiplication nécessite une forme de **standardisation de conception et de fabrication**, relativement éloignée des conceptions actuelles, qui présentent une forte "customisation" des projets. Modulaires, c'est-à-dire pouvant être couplés pour construire des centrales multi-réacteurs, ils offriront aussi une grande flexibilité de production (modification rapide de la puissance), gage de souplesse dans l'intégration des EnR dans le mix énergétique.

# QUELLES PRIORITÉS NUCLÉAIRES POUR LA R&D D'EDF ?

Si le sujet "nucléaire du futur" touche quasiment tous les départements de la R&D, il faut néanmoins concentrer les efforts pour franchir des étapes de recherche et lever des verrous scientifiques. C'est dans ce but que le domaine nucléaire est organisé en 7 "finalités" prioritaires. Ces enjeux recourent en grande partie ceux d'"Initiatives Usine Nucléaire du Futur".

## FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 7



### SÛRETÉ NUCLÉAIRE RADIOPROTECTION

- **Agressions** : séisme, inondation, agressions climatiques, incendie.
- **Accidents graves** : nouveaux modèles numériques, équipe et gestion de crise.
- **Études probabilistes de sûreté** : études de sûreté et analyses de risques.
- **Facteurs Socio-Organisationnels et Humains (FSOH)** : fiabilité humaine, management de la sûreté, Radioprotection.

#### QUELQUES PROJETS :

"Inspire" : étude sur le facteur humain en cas de crise extrême.

"Risque sismique" : recherche de solutions innovantes et économiquement réalistes face au risque séisme et à ses exigences de sécurité toujours plus élevées, et permettant un gain de marges sur les calculs de justification ainsi que la conception d'installations résilientes.

## FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 7



### PERFORMANCES DE PRODUCTION

(notamment via la transition numérique)

- **Simplification de l'exploitation** des centrales : représentation virtuelle partagée et fiable de l'état de l'installation pour faciliter la préparation des activités à réaliser ; pilotage des interactions entre les intervenants de conduite, de maintenance et les prestataires ; surveillance de l'installation et de son environnement ; anticipation des aléas ; formation des nouveaux entrants et capitalisation des compétences.
- **Simplification de la conception** des nouvelles tranches et gestion des modifications des tranches actuelles : socle de méthodes et d'outils d'ingénierie système pour raccourcir et fiabiliser la durée des études.

#### QUELQUES PROJETS :

"Projet VERONA" : résilience des sources froides des centrales, avec notamment des études sur la mise au point de système de détection d'arrivée massive de colmatants (détection des algues à Paluel par image proche infrarouge, détection acoustique des alevins à Penly...).



FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 7



### DURÉE DE FONCTIONNEMENT DES TRANCHES

- Acquisition et capitalisation de connaissances sur les mécanismes de vieillissement des équipements,
- Maîtrise des aléas génériques,
- Optimisation des stratégies de maintenance, de rénovation, et de remplacement des matériels et structures importants pour la sûreté et la disponibilité,
- Développement des techniques, méthodes et outils de contrôle / diagnostic / surveillance des matériels : détection de vieillissement, dégradations, désordre.

#### QUELQUES PROJETS :

Travaux sur la durée de fonctionnement des cuves et de l'enceinte (VeRCoRs).

Un brevet a été déposé sur une méthode de pronostic de durée de vie des câbles.

Impression 3D pour la fabrication additive et travaux sur la métallurgie des poudres (compression isostatique à chaud).

FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 7



### SYSTÈMES NUCLEAIRES DU FUTUR

- Systèmes nucléaires de 4<sup>e</sup> génération
- SMR (Small Modular Reactors).
- Nouveaux modèles et projet NID (Nuclear Innovation Design : ensemble de sujets de R&D visant la réduction des coûts et des améliorations en sûreté pour de nouveaux réacteurs).

#### QUELQUES PROJETS :

Entrées/sorties déportées pour les armoires de contrôle-commande : la fibre numérique au service de la réduction du nombre d'armoires de contrôle commande de leur taille.

Démonstration du bon fonctionnement du réacteur SMR uniquement avec des grappes de commande et sans bore.

FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 7



### COMBUSTIBLE

- Développement de nouvelles chaînes de calculs de cœur : modélisations couplées neutroniques, thermiques, hydrauliques.
- Modélisation du comportement du combustible en cœur (crayons et assemblages) en situations normales, incidentelles et accidentelles.
- Travaux sur l'aval du cycle : combustible usé, gestion des déchets (transport, entreposage, traitement, stockage...).

#### QUELQUES PROJETS :

Le combustible EATF plus résistant aux situations accidentelles graves et notamment aux pertes de refroidissement, offrira notamment aux exploitants plus de temps pour réagir en cas d'accident.



FINALITÉ 1 2 3 4 5 **6** 7

## SIMULATION NUMÉRIQUE

■ Fourniture d'environnements de simulation, utilisés dans des projets "applicatifs" de modélisation thermohydraulique, de mécanique des structures, d'électromagnétisme, ou de matériaux.

### QUELQUES PROJETS :

Réacteur numérique : développement de l'interopérabilité des codes de calculs du CEA et d'EDF, pour intégrer les calculs de neutronique, mécanique et thermo hydraulique dans les mêmes outils, en multi-échelles.

Plateforme de simulation mécanique (utilisant code\_Aster) pour développer des outils de calculs pour les ingénieries, par exemple pour les tenues vibratoires des machines tournantes.

FINALITÉ 1 2 3 4 5 6 **7**

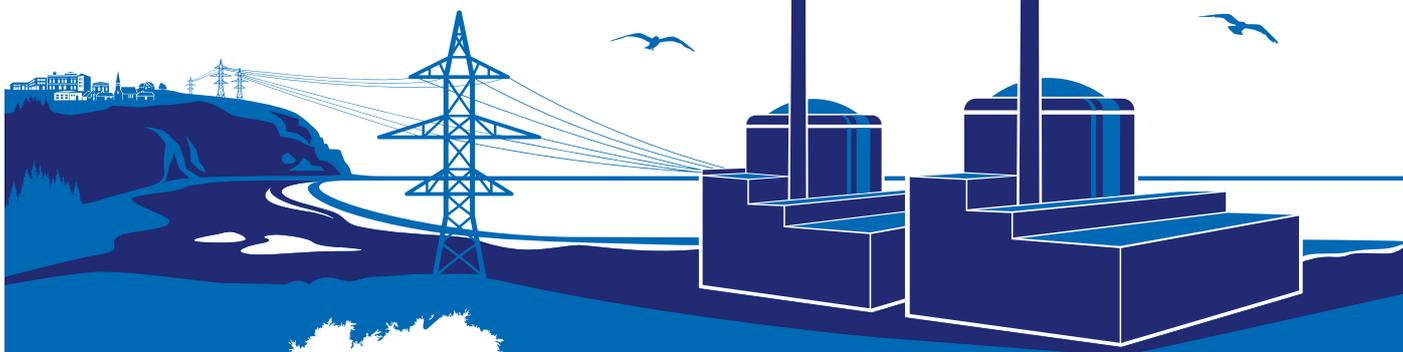
## ENVIRONNEMENT

■ Projets transverses au Groupe EDF, animés par des représentants de la DPNT, de DIPNN, de la Direction du Développement Durable, de la R&D...

### QUELQUES PROJETS :

"Biodiv" : projet transverse au Groupe EDF sur la biodiversité.

"Alchimic" : amélioration du refroidissement des centrales en bord de mer, notamment via dosage précis de l'électrochloration (fabrication in situ d'eau de Javel) ; et des sites en bord de fleuves avec tours aéroréfrigérantes par la maîtrise de l'entartrage.



## TOUTE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE COLLABORE AVEC "INITIATIVES USINE NUCLÉAIRE DU FUTUR"

Cette démarche de la Filière Nucléaire Française est coordonnée par EDF, le CEA, FRAMATOME et ORANO (ex AREVA) dans le cadre de l'Institut de Recherche Tripartite (I3P). Elle vise d'une part à développer l'innovation au service de la compétitivité du nucléaire, et d'autre part à attirer les jeunes ingénieurs vers cette filière industrielle d'avenir.

Sa mise en œuvre passe par une approche collaborative avec des plateformes communes de travail dont certaines seront basées à EDF Lab Paris-Saclay.

L'usine nucléaire du futur est basée sur des "briques technologiques" utilisables sur le parc en exploitation tout comme pour les réacteurs du futur. Les briques s'organisent en feuilles de route à différentes échelles de temps avec des premiers jalons visés à court terme.

## INITIATIVES NUCLÉAIRE DU FUTUR : UNE NOUVELLE APPROCHE POUR IMAGINER LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN

Avec Alain Le Gac, directeur des Programmes Production à la R&D d'EDF



### Comment accueillez-vous Initiatives Usine Nucléaire du Futur ?

Les enjeux du nucléaire, actuel comme futur, sont importants et complexes. Est-il besoin de rappeler les spécificités de cette énergie : des impératifs de sûreté évidents et légitimes, et une équation économique sans cesse challengée. Nous avons donc un double intérêt à nous associer au sein de la filière nucléaire française. D'une part, mobiliser les "champions du monde" du secteur, que nous avons la chance d'avoir en France, permet de travailler à partir du meilleur état de l'art scientifique. D'autre part, cette collaboration entre acteurs est de nature à rassurer la filière au sens large, y compris les

autorités de sûreté, les pouvoirs publics, et l'opinion publique.

### Quelles sont les particularités du dispositif ?

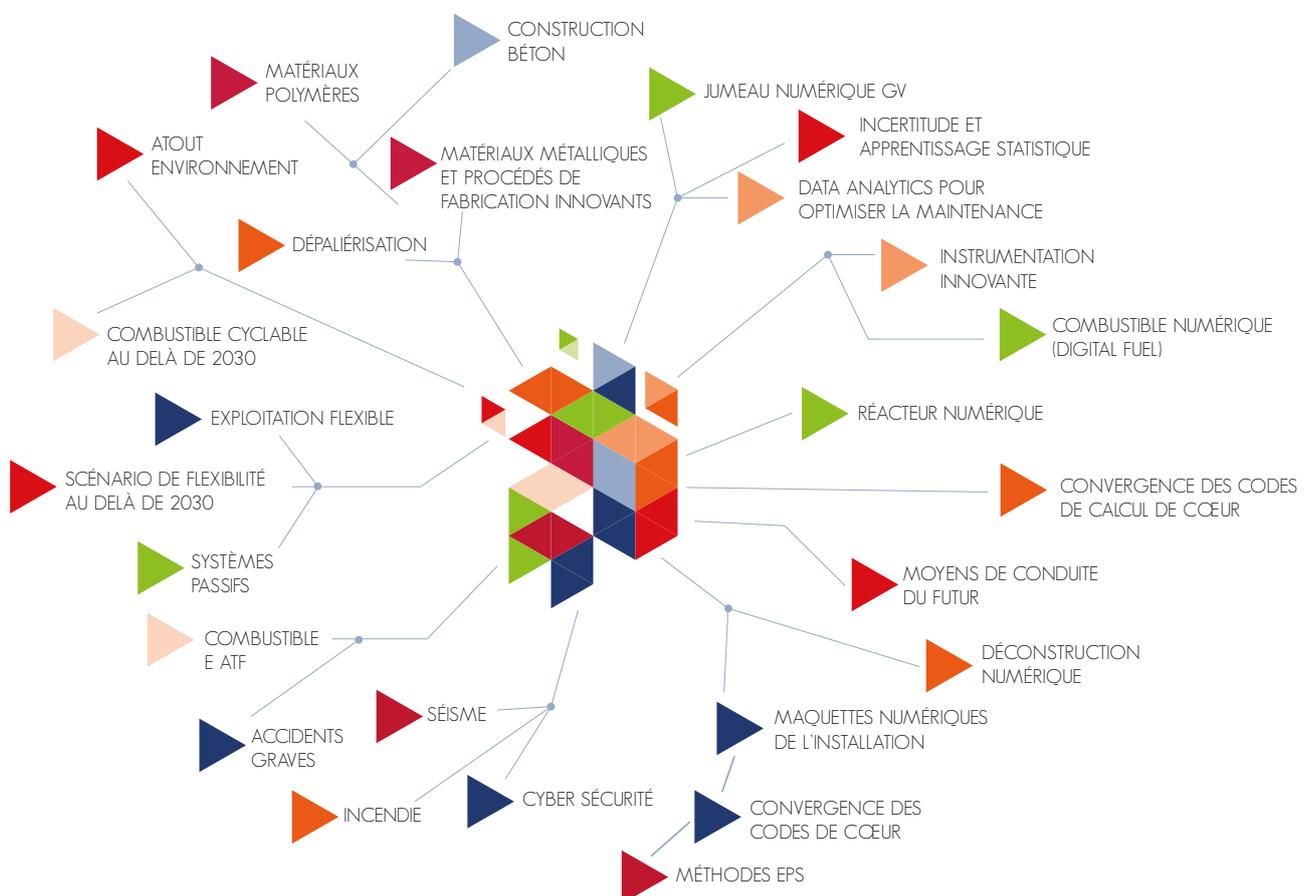
Principalement son organisation très modulaire : chaque brique de travail est indépendante, avec une équipe autonome, souvent multidisciplinaire, et dont l'action est optimisée par l'usage des outils de communication numériques qui facilite le fonctionnement en mode collaboratif sur un plateau ouvert à EDF Lab Paris-Saclay. Cela offre souplesse, efficacité, et permet d'accueillir ponctuellement des experts académiques par exemple. De plus, le triptyque compétences des chercheurs / outils de

calculs scientifiques de haut niveau / moyens d'essais apporté par les partenaires est exceptionnel à l'échelle mondiale.

### De quoi attirer de jeunes chercheurs dans le nucléaire ?

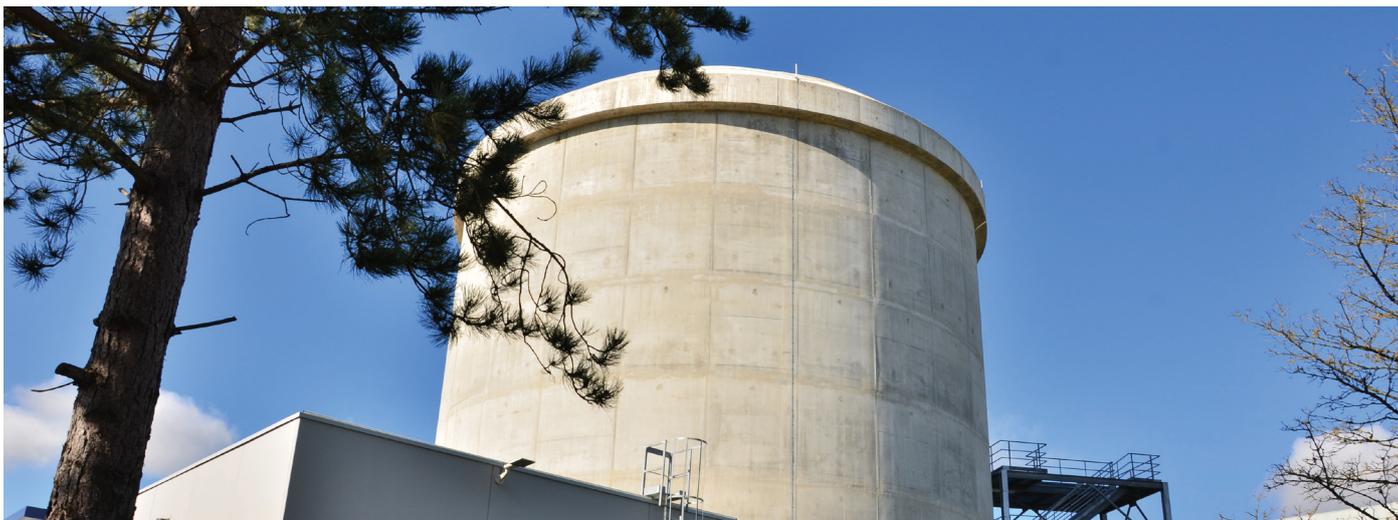
C'est effectivement l'un des enjeux de cette filière parfois délaissée pour cause de "temps longs" dans l'aboutissement des travaux de recherche. L'initiative y répond avec des briques dont les résultats concrets seront exploités à court terme, directement au sein du parc existant. Nous sentons d'ailleurs déjà que ces sujets ont la cote auprès des jeunes diplômés. ●

## LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES D'INITIATIVES USINE NUCLÉAIRE DU FUTUR



# JUMEAUX NUMÉRIQUES : LA SIMULATION AU PLUS PRÈS DU RÉEL

La modélisation à la R&D d'EDF, on connaît ! Et depuis longtemps : les premiers modèles numériques de simulation mécanique ont déjà plus d'un quart de siècle. Certes, mais beaucoup de ces outils pouvaient se révéler complexes d'utilisation, et assez théoriques. Leur pertinence pour la compréhension des phénomènes, le dimensionnement et la conception n'était plus à démontrer, mais un pas pouvait encore être franchi pour qu'ils contribuent pleinement à optimiser l'exploitation des moyens de production. Place donc aux jumeaux numériques !



## Un véritable écosystème logiciel

Défrichons d'abord la notion de "jumeau numérique" : il s'agit de la version virtuelle d'un objet technique (équipement, bâtiment...) existant, permettant de **prendre en compte sa**

**réalité passée et actuelle pour améliorer la simulation de ses futurs états.** *"La grande nouveauté, c'est de pouvoir intégrer en temps réel des données d'exploitation, de suivi, de contrôle, dans nos modélisations, qu'elles soient physiques ou issues*

*des data sciences"* explique Christophe Varé, délégué Programme Production de la R&D, responsable du projet "jumeau numérique Générateur de Vapeur", lancé fin 2017. *"En fait, un jumeau numérique n'est pas un programme unique, mais un écosystème logiciel, qui relie des données très diverses aux modèles numériques, et permet une visualisation ergonomique des résultats"* précise François Foct, responsable Programme Durée de Fonctionnement de la R&D d'EDF, très impliqué dans le projet "jumeau numérique VeRCORs", le double digital de la maquette d'enceinte réacteur installée aux Renardières et inaugurée en 2016. Son jumeau numérique repose ainsi sur deux systèmes dédiés : Armorique, qui utilise la plateforme Salome-Meca et Code\_Aster (logiciels open source développés par la R&D d'EDF) et qui agrège les modèles produits depuis plusieurs années ; et Cervin, un outil

## DATA SCIENCE : POURQUOI C'EST COMPLIQUÉ ?

On trouve des corrélations entre des données depuis les années 90... dans la grande distribution ! Oui, mais il y a un monde entre comparer l'achat conjoint de deux produits entre des milliers de tickets de caisse (un seul item : l'achat du produit ou non, 1 ou 0), et trouver un lien inconnu entre deux ensembles de **données très hétérogènes** : le corpus de données contient des états multidimensionnels (un "bon" fonctionnement est représenté par des plages de températures et de pression par exemple) dont les unités et fréquences de mesure sont diverses, et les comportements variés (linéaire ou pas, par exemple).

De plus, on attend aujourd'hui des **résultats immédiats**, même si les **quantités de données** sont astronomiques (saviez-vous qu'un capteur d'un kilomètre de fibre optique inséré dans le béton produit 10 000 données à chaque mesure ?).

Ces caractéristiques des data sciences sont généralement regroupées sous le vocable "3V" pour **Variety, Velocity, et Volume**.

de data visualisation web développé en interne qui permet de mettre en rapport les données de surveillance de la maquette avec la modélisation.

### Faciliter l'exploitation par de l'aide à la décision

L'objectif commun de ces deux projets consiste à passer d'une approche "expert", où les différents phénomènes sont simulés séparément, à un outil intégré au service de l'exploitation. *"Jusqu'à présent, la modélisation numérique était*

*une affaire de spécialistes et pouvait prendre beaucoup de temps, non seulement pour des raisons de puissance informatique, mais aussi parce que de nombreuses opérations étaient réalisées "à la main". Grâce à l'augmentation significative des performances de calcul et à l'avènement d'algorithmes de traitement de données, les jumeaux numériques vont pouvoir apporter des informations à plus court terme, voire en temps réel, et donc délivrer des informations nouvelles et plus complètes aux ingénieries et aux*

**exploitants"** annonce François Foct. *"C'est une boucle vertueuse, ajoute Christophe Varé, les données produites par l'équipement physique enrichissent son jumeau numérique, l'ensemble des jumeaux enrichit les modèles numériques (physiques et issus de la data science), qui permettent de prendre des décisions optimisées pour chaque équipement, qui produisent de nouvelles données..."*. Il semblerait donc que nos jumeaux numériques soient voués à se rapprocher toujours plus du réel qu'ils représentent...●

## JUMEAU NUMÉRIQUE VERCORS : UNE DOUBLE MAQUETTE DES ENCEINTES DE CONFINEMENT

Ce jumeau numérique concerne pour le moment la maquette d'enceinte de confinement à l'échelle 1/3 "VeRCoRs", mais sera à terme décliné pour chaque enceinte de confinement du parc nucléaire Français.

D'un point de vue technique, VeRCoRs et son jumeau visent à mieux connaître et comprendre l'étanchéité des ouvrages, qui sont mis à l'épreuve tous les

10 ans (mesure des taux de fuite sous une pression interne de 5 bars) :

- À quels endroits les fuites se produisent-elles ? Et pour quelles raisons? Les points singuliers, comme les traversées ou les interfaces de matériaux ou de reprise (même matériau mis en œuvre à des moments différents), sont particulièrement étudiés.
- Comment ces fuites évoluent-elle

dans le temps ?

- Quels sont les effets des travaux de maintenance (compléments d'étanchéité) ?

Plus de 2 km de fibres optiques et des centaines de capteurs ponctuels ont été installés dans la maquette, à l'intérieur du béton et/ou en parement, afin de mesurer température, déformations, et teneur en eau. Cette dernière mesure, particulièrement complexe a d'ailleurs conduit au développement de 2 capteurs innovants et brevetés, en partenariat avec l'université de Lille. Cette innovation va permettre à la R&D d'EDF d'améliorer les modèles numériques du séchage et de fluage du béton, phénomènes qui influencent au 1er ordre l'évolution de l'étanchéité des enceintes. Ces connaissances seront ensuite capitalisées dans un modèle numérique embarqué dans des outils opérationnels :

- Pour l'ingénierie nucléaire d'EDF (DT & DIPDE) : **préparation des visites décennales des enceintes et optimisation des travaux de compléments d'étanchéité.**

- Pour les équipes en charges des mesures in situ : **visualisation, consolidation et correction des mesures, vérification des capteurs.**●

### LE POINT DE VUE CLIENT

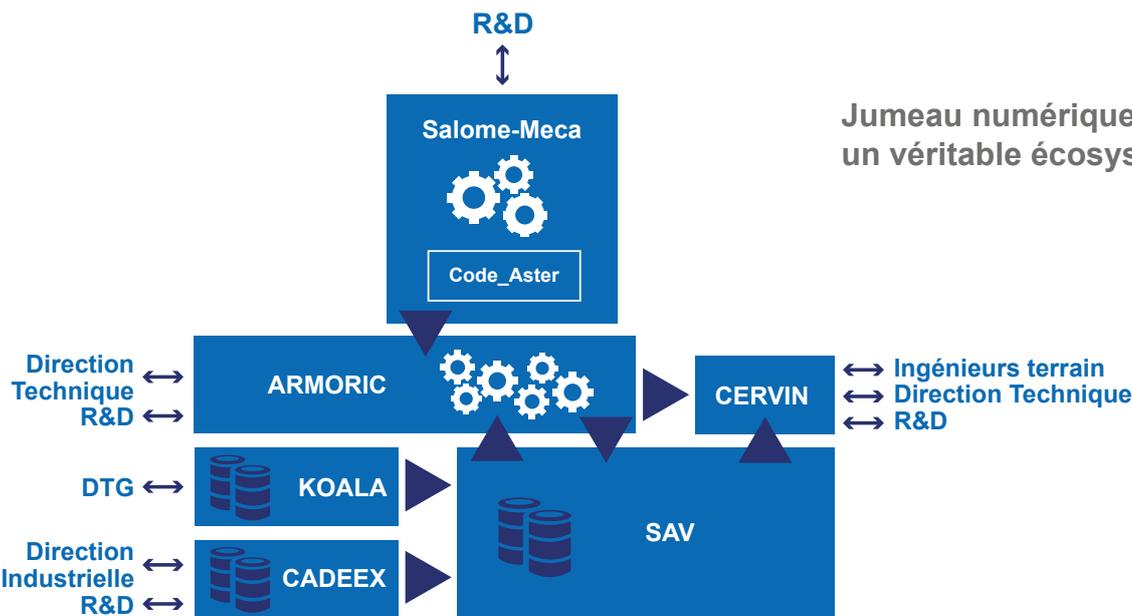
#### Benoit Masson

Pilote stratégique enceintes de confinement, direction Technique (SEPTEN)

*"Le jumeau numérique VeRCoRs est une construction modulaire, comme la station spatiale internationale ISS. Un de ses modules permet de capitaliser l'énorme quantité de données acquises (mesures, plans, essais...). Un autre donne accès aux différents modèles et calculs. Un autre encore permet de visualiser les mesures et les résultats de calcul. Le jumeau numérique, c'est déjà tout cela à la fois, et il ne demande qu'à grandir, avec l'ajout d'autres modules.*

*Nous pouvons ainsi mieux comprendre le vieillissement de la maquette VeRCoRs, prédire son comportement, et en permanence améliorer nos calculs et modèles, et in fine notre compréhension des phénomènes. Une avancée pour VeRCoRs bien sûr, mais aussi pour le parc en exploitation, qui reste notre finalité. Nous envisageons d'ailleurs, pour certaines enceintes, le déploiement d'une version allégée du jumeau numérique, avec seulement les modules indispensables pour optimiser la maintenance à venir. À plus long terme, en l'intégrant dès la phase de conception, ce type d'outil permettra d'optimiser la construction et les modifications sur les ouvrages.*

*Enfin, le jumeau numérique est un formidable outil de déclouement des métiers : la mesure parle au modélisateur, l'ingénieur au chercheur."*



Jumeau numérique VeRCoRs : un véritable écosystème logiciel

*KOALA : base de données automatisée contenant les données du parc en exploitation et les données de VeRCoRs  
 CADEEX : base de données contenant les données de matériaux testés par la R&D et les données des nouveaux matériaux expérimentés*

*SAV : système de structuration et capitalisation des données VeRCoRs*

*Salome-Meca : plateforme regroupant des codes R&D de simulation numérique*

*Code\_Aster : logiciel libre de simulation numérique en mécanique des structures, intégré dans la plateforme Salome-Meca*

*ARMORIC : outil d'études sur les "enceintes" et de capitalisation de ces études*

*CERVIN : outil de visualisation des résultats d'études via un accès WEB rapide et convivial*

## JUMEAU NUMÉRIQUE GÉNÉRATEUR DE VAPEUR : VERS UN MODÈLE SPÉCIFIQUE À CHACUN DES 200 GV DU PARC !

Pour assurer leur fonction dans les meilleures conditions de sûreté, de performance et de disponibilité, les générateurs de vapeur du parc nucléaire font l'objet d'un suivi rigoureux (auscultation des tubes par contrôles non destructifs, évaluation de la propreté interne par examens télévisuels...) et d'opérations de maintenance lourdes (nettoyages chimiques préventifs, bouchage / manchonnage des tubes fissurés...). Un programme de remplacement des GV, généralement après 30 à 40 ans de durée de fonctionnement est également en cours : une intervention complexe et surtout coûteuse. Optimiser l'exploitation et la maintenance de ce composant est donc un enjeu essentiel pour le parc. C'est l'ambition du "jumeau numérique GV", qui compte proposer une première version dès la mi-2019. Objectif

ultime : éviter le remplacement de certains GV du parc en leur permettant de fonctionner sur toute la durée de vie de la tranche qu'ils équipent.

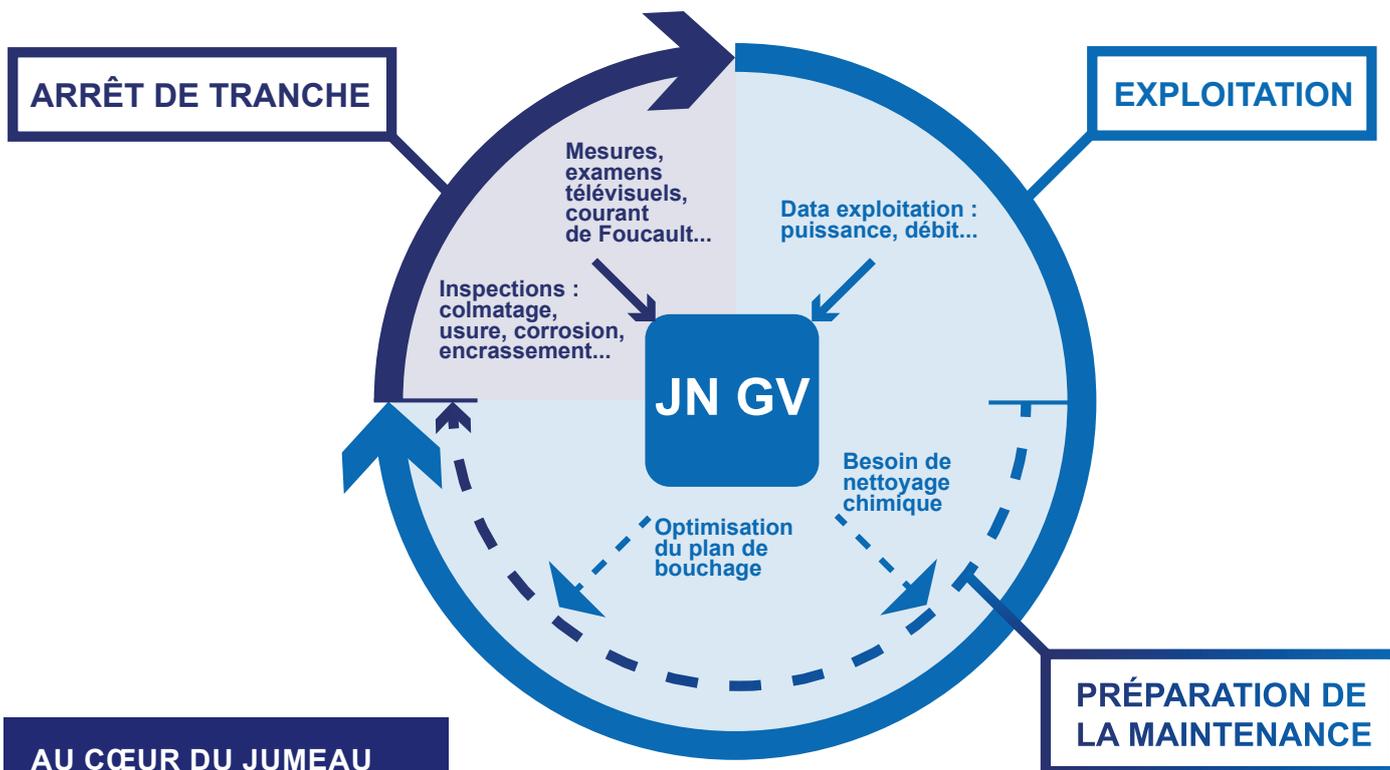
À partir des nombreuses données issues des contrôles réalisés sur les générateurs de vapeur lors des arrêts de tranches, combinées à leurs données d'exploitation (débits, températures, pression, durée...), **une modélisation permettra dans un premier temps de mieux comprendre les relations entre l'usage du générateur et son usure** : corrosion et encrassement des tubes, colmatage des plaques étroites... La modélisation prédictive du colmatage s'avère d'ailleurs particulièrement complexe, et fait l'objet de partenariats de long terme avec le CEA et des laboratoires universitaires (Centrale Marseille, Chimie ParisTech).

Fort de ces données et modèles, le jumeau numérique permettra **à terme d'optimiser la maintenance** en :

- **Programmant au mieux les nettoyages chimiques** des GV contribuant ainsi à une optimisation de leur sûreté, de leur performance et de leurs coûts de maintenance ;
- **Proposant des plans de bouchage / manchonnage optimisés** permettant d'augmenter la durée de fonctionnement des GV.

Les Jumeaux numériques GV contribuent ainsi à plus de sûreté, plus de performance et plus de disponibilité des GV du parc nucléaire, et ouvrent la possibilité à une plus grande optimisation de la stratégie de maintenance à l'échelle du parc et à des durées d'exploitation plus longues de certains GV. ●

Jumeau numérique GV : un fonctionnement asynchrone



**AU CŒUR DU JUMENT NUMÉRIQUE GV : THYC**

Développé par le département MFEE\*, THYC est aujourd'hui le logiciel de référence pour les calculs de mécanique des fluides 3D. Capable de traiter des écoulements de fluides monophasiques comme diphasiques (deux fluides différents), il est très utile pour modéliser la thermohydraulique des composants de centrales nucléaires, comme les condensateurs, les échangeurs thermiques, et bien sûr les générateurs de vapeur. Mais ce n'est pas tout ! THYC est aussi intégré à des chaînes de calcul de référence utilisées pour le rechargement du combustible, les études de vibrations, ou encore le risque d'instabilité des tubes des GV. Un outil précieux pour l'exploitation des centrales, mais aussi pour les justifications scientifiques et réglementaires fournies à l'Autorité de Sécurité Nucléaire.

\*Mécanique des Fluides, Energies et Environnement

**LE POINT DE VUE CLIENT**

**Olivier Coadebez** - Directeur maintenance DPN

« Pour bien mesurer l'apport du jumeau numérique GV, il faut d'abord comprendre les enjeux d'une opération de maintenance comme le nettoyage chimique. Il s'agit en effet d'une opération lourde, coûtant plusieurs millions d'euros et s'étalant sur plusieurs semaines, que seuls une poignée de prestataires en Europe savent pratiquer car elle nécessite des machines spéciales et l'utilisation de produits chimiques particuliers. Cette maintenance fait donc partie de nos opérations critiques, et se planifie généralement deux ans à l'avance, notamment pour la faire coïncider avec les arrêts de tranche programmés. Dé-

couvrir lors d'un contrôle qu'un nettoyage chimique imprévu s'avère nécessaire n'est donc pas envisageable ! C'est l'une des raisons pour lesquelles nous avons demandé à la R&D de créer ce jumeau numérique, qui sera nourri au quotidien par les données d'exploitation, et nous permettra d'optimiser la planification des nettoyages chimiques, c'est-à-dire prédire avec précision quels GV doivent être traités et le bon moment pour intervenir. Nous sommes très enthousiastes et confiants sur l'efficacité du futur outil et pensons d'ailleurs que la démarche pourrait être appliquée à d'autres équipements. »

## LE NUCLÉAIRE DE DEMAIN FACE AUX CYBER-ATTAQUES



Dans un contexte de **croissance constatée des attaques** visant des systèmes industriels, le nucléaire doit pouvoir résister à un incident de cybersécurité tout en assurant une continuité des services métiers critiques ainsi que la sécurité du personnel. Il convient donc d'assurer la sécurité des composants (logiciels et matériels), et des réseaux de communication qui soutiennent les processus, techniques et organisationnels.

Par exemple, l'exploitation et la maintenance utilisent de plus en plus de capteurs numériques (mesures physiques d'éléments techniques, données des processus métiers) et des applications d'analyse pour détecter d'éventuels valeurs anormales. Voilà qui impose des investigations sur la sécurité de ces nouveaux environnements : **les objets communicants, les télécoms et leurs infrastructures doivent être supervisés et, le cas**

**échéant, permettre la neutralisation ou le contournement** en quasi temps réel pour maîtriser toute situation anormale (intrusion, compromission du fonctionnement nominal...).

De même, pour répondre aux exigences de qualification de sûreté, la conception de nouveaux composants ou de nouvelles applications métiers doit **intégrer la cybersécurité dès ses premiers pas** : c'est le "**Security By Design**". Idem pour les modèles numériques permettant de simuler le comportement exact des systèmes en fonctionnement. Il est ainsi possible d'améliorer les analyses d'impacts d'une attaque ou d'une vulnérabilité sur la sûreté des composants du système industriel.

De plus, la collaboration croissante entre plusieurs intervenants dans la conception, le développement, la fabrication ou la maintenance des produits

ou systèmes, modifie potentiellement les enjeux de sécurité et accentue le besoin de confiance entre ces acteurs. **La transition numérique doit donc apporter des mécanismes à la fois imperméables** (le plus résistant possible à une tentative d'attaque) **et "respirants"** (facilitant les processus collaboratifs et les interventions rapides de mises à jour ou de remplacement).

Enfin, la cybersécurité des installations nucléaires passe aussi par une **sensibilisation accrue des personnels** aux risques numériques qui peuvent être réduits par des pratiques comportementales simples, comme s'assurer du contenu d'une clé USB dans le cadre d'un processus sensible. ●

*Avec le concours de Sylvain LANGLOIS : chef du département PERICLES - EDF R&D*

## INNOVATIONS ET IA AU SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Avec Frédéric Ravel-Sibillot, délégué Programme Environnement de la Production – EDF R&D



### Pourquoi les projets Biodiv' et IDEA sont-ils des priorités pour la R&D ?

"Biodiv'" est l'un des projets les plus ambitieux d'EDF Lab. En effet, EDF est à la fois un producteur d'énergie et un gestionnaire long terme d'espaces naturels avec plus de 100 000 ha de surfaces aquatiques et terrestres, souvent proches d'espaces sensibles, voire protégés. La production hydraulique gère par exemple 70 % des réserves d'eau douce de métropole. Nos sites de production interfèrent aussi avec leur environnement, comme toute activité humaine d'ailleurs. Le groupe EDF a la volonté de maîtriser ses impacts pour qu'ils soient acceptables dans la durée et de faire de sa gestion positive de la biodiversité un atout stratégique

pour un ancrage durable dans les territoires. Ça veut dire quoi ? Que dans l'un de ses 6 "objectifs de responsabilité d'entreprise", EDF s'engage à ne pas se contenter de réduire ses impacts, mais à avoir un effet positif sur la biodiversité ! Et cela dans un contexte réglementaire toujours en pleine effervescence. À nous d'innover pour trouver des solutions industrielles performantes pour EDF et pour l'environnement...

Le projet IDEA quant à lui, est beaucoup plus amont puisqu'il s'agit d'utiliser l'intelligence artificielle au service de la performance environnementale, par exemple pour mieux anticiper l'arrivée d'alevins au niveau de la prise d'eau d'une centrale nucléaire. La démarche relève donc à la fois de

### BIOVIV' EN BREF

#### Lancement

2018 pour 4 ans (renouvellement et regroupement des projets sur la biodiversité aquatique et terrestre)

#### Objectif

Sécuriser l'exploitation, faire que la biodiversité devienne un atout pour une production d'électricité responsable et intégrée à son territoire

#### Thèmes

Changement climatique et biodiversité, évaluation et fonctionnement des écosystèmes, maîtrise de nos impacts (chantiers, prélèvements d'eau, modification de régime hydrologique), biosurveillance, stratégie foncière... 230 actions R&D ont été proposées !

#### Budget

5 M€/an

l'optimisation à court terme (nouvelles méthodes, nouveaux outils) et de l'anticipation stratégique, par exemple sur les conséquences du réchauffement climatique.

### De la R&D sur la biodiversité existe déjà depuis plusieurs années, quels résultats marquants pouvez-vous partager ?

Un résultat important, en particulier pour la production nucléaire, est la démonstration de l'absence d'impact notable sur l'environnement de nos rejets thermiques en regard des autres évolutions, qu'elles soient climatiques ou non. Un autre succès : les travaux menés en partenariat avec le Musée d'Histoire Naturelle et l'IRSTEA\* sur une méthodologie d'évaluation de "l'équivalence écologique", indispensable dans l'application de la séquence "éviter-réduire-compenser" ancrée dans la réglementation. Plus en amont, on peut évoquer les travaux exploratoires sur l'utilisation de l'ADN environnemental

pour détecter la présence ou l'absence d'espèces dans les milieux naturels, et rendre plus performantes et robustes nos études d'impacts.

### Quels sont les grands verrous scientifiques que vous rencontrez ?

L'équivalence écologique dont je parlais en est un : la loi demande avec bon sens que l'on limite ses impacts, et qu'ils soient compensés. Le principe paraît simple... mais son application s'avère complexe. Il faut d'abord évaluer les impacts dans la durée : faisable pour une seule espèce, mais ardu pour un écosystème complet. Et comment compenser ? Une espèce en "vaut-elle" une autre ? Et qu'appelle-t-on le "bon état" d'une eau ? Les réponses sont difficiles à donner car elles mobilisent plusieurs angles : scientifique bien sûr, mais aussi juridique, sociétal, politique, et même éthique ou philosophique... Un autre verrou réside dans la ventilation des impacts entre les activités d'un industriel et des causes exogènes, comme le

### IDEA EN BREF

#### Lancement

Fin 2017

#### Objectif

Tester et évaluer l'apport de l'intelligence artificielle dans le traitement et la valorisation des données environnementales

#### Thèmes

Modélisation de la bio-chimie des masses d'eau, prolifération des végétaux aquatiques, machine learning appliqué à la modélisation hydrologique, assistant prévisionniste hydrométéo intelligent...

changement climatique ou tout simplement l'évolution des comportements de la population. Il y a encore beaucoup de données à récolter, de compétences à mobiliser, et de modèles à créer pour répondre à cette problématique de nature systémique.●

\*Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

## DURÉE DE VIE DU FONCTIONNEMENT DES CÂBLES ÉLECTRIQUES

### Une approche innovante au service de la durée de fonctionnement des câbles électriques du parc nucléaire

Avec plus de 1 000 km par tranche, les câbles électriques constituent le système nerveux de nos centrales nucléaires. Leur remplacement en totalité est difficilement envisageable tant le coût et l'impact sur la disponibilité seraient importants. Le suivi et la maîtrise de leur état de vieillissement constituent donc un enjeu majeur pour l'extension de la durée de fonctionnement des installations. Une tâche complexe, notamment du fait de la grande diversité des câbles déployés.

La R&D d'EDF a ainsi développé une approche multi-échelle originale visant à modéliser l'évolution de la chimie des matériaux et à la relier aux pro-

priétés fonctionnelles des matériels. L'expertise de câbles prélevés sur site contribuant ensuite à valider les modèles développés. En parallèle, cette approche permet d'imaginer de nouvelles méthodes de contrôles sur site des câbles à partir de micro prélèvements, et même des procédés non destructifs.

Cette approche dispose aujourd'hui d'une forte reconnaissance tant à l'international qu'en France. Dernièrement, l'ASN\* s'est ainsi exprimée très favorablement sur son site internet : *"la démarche mise en place par EDF dans le cadre de la maîtrise du vieillissement couvre l'ensemble des*

*câbles nécessaires au fonctionnement des réacteurs.[...] L'ASN estime par ailleurs que les caractérisations réalisées sur les câbles prélevés sur les réacteurs d'EDF, associées aux conclusions des études prédictives de durées de vie des câbles, permettent d'avoir un niveau de confiance élevé sur leur aptitude à conserver leur fonctionnalité d'origine pour les 10 prochaines années."*●

*Avec le concours de Christophe Varé : délégué Programme Production - EDF R&D*

\*ASN, rapport national, Évaluation de la sûreté des installations nucléaires en France, Maîtrise du vieillissement, Décembre 2017

### 3 QUESTIONS À DAVID MONFORT

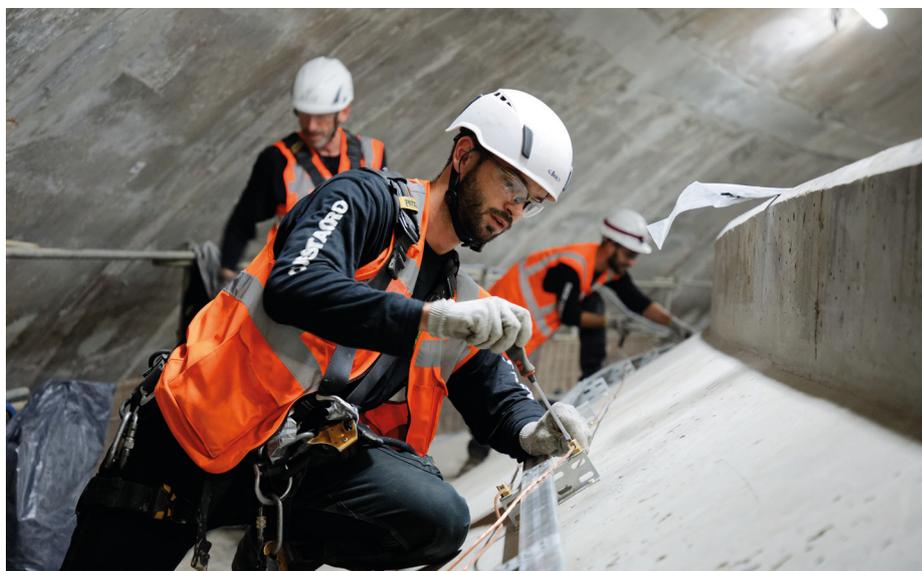
**Chef de Département Délégué - Département Électrotechnique et Mécanique des Structures - EDF R&D**

**Les risques sismiques ne sont pas une nouveauté pour la R&D. Pourquoi en faire une priorité ?**

Deux raisons complémentaires y concourent. D'une part l'accident de Fukushima, qui a conduit non seulement les exploitants à hausser leurs standards, mais aussi l'Autorité de Sécurité Nucléaire à revoir ses exigences. Et d'autre part, l'évolution de la technologie, qui permet aujourd'hui la réalisation d'études plus précises. À travers la brique séisme, la R&D d'EDF vise donc trois enjeux majeurs valables non seulement pour le nucléaire du futur mais aussi pour le parc existant.

D'abord, bien comprendre et maîtriser les exigences de l'ASN pour discuter sereinement autour d'un corpus scientifique commun et accepté par toutes les parties. En effet, toutes les études reposent sur un commun accord autour du "niveau de risque sismique raisonnablement probable" pour chaque site. Il faut donc en amont se mettre d'accord sur la façon de déterminer un "niveau" de risque et sa probabilité. Or c'est loin d'être trivial : les premiers travaux de la brique sont donc consacrés à la mise au point d'une méthodologie scientifique adaptée et adoptée par tous.

Ensuite, l'ingénierie doit pouvoir justifier la tenue aux séismes de ses ouvrages et matériels, tout en restant raisonnable sur ces coûts de construction et/ou de rétrofit. Nous allons donc chercher à réduire les incertitudes et les conservatismes (par exemple des coefficients dits "de sécurité" appliqués largement) grâce à des modélisations toujours plus fines et réalistes, mixant des méthodes probabilistes et physiques. De plus nous travaillerons de plus en plus sur des approches intégrées et multi-échelles, qui débutent avec l'évaluation de l'aléa sismique,



suivent la propagation des ondes sismiques dans le sol, étudient l'interaction avec le génie civil, et prédisent la tenue des matériels et composants à l'intérieur de la centrale.

Enfin, même si effectivement le risque sismique n'est pas nouveau, il reste encore des champs à explorer pour innover dans les solutions parasismiques : pour augmenter la résistance, pour limiter les entrecrocs, pour mieux dimensionner les protections etc.

**Avez-vous déjà des résultats à partager ?**

Le logiciel permettant la mise au point de la méthode d'établissement du risque sismique probable a été choisi après des tests in situ sur deux sites nucléaires en collaboration avec la Direction Industrielle. Il s'agit d'Open Quake, un modèle probabiliste de la définition de l'aléa sismique, proposé en open source par la fondation GEM (Global Earthquake Modeling, Italie). Nous en attendons des premiers résultats pour le second semestre 2018. D'autre part, les résultats du projet de R&D Risque Sismique

en collaboration avec la DIPDE, et présentés lors des derniers Trophées de la R&D, nous ont déjà permis d'économiser près de 5 M€ en évitant des renforcements inutiles : la méthode mixant essais sur site et simulation numérique permet d'extrapoler la réponse des matériels à de faibles vibrations (de simples

#### LA BRIQUE "SÉISME" EN BREF

##### Lancement

Été 2017

##### Objectif

Inventer sans cesse de nouveaux moyens "d'anticiper l'impensable" pour s'approcher sans cesse davantage du zéro risque sismique. Proposer des solutions innovantes économiquement réalistes face au risque sismique et à ses niveaux d'exigence de sécurité de plus en plus élevés, se doter des pratiques les plus performantes pour les calculs de justification et réduire ainsi les incertitudes et conservatismes, et concevoir des installations résilientes.

##### Acteurs

EDF, FRAMATOME, Institut SEISM (GIS en partenariat avec le CEA, Centrale, Supélec, l'ENS Cachan, le CNRS, le BRGM et le CRIEPI sur le Campus de Paris-Saclay)

coups de "marteau" sur le sol à proximité, voir photo) pour en déterminer la tenue aux séismes.

### Et pour demain ?

Nous avons déjà commencé à travailler sur une forme de data mining innovante. Comme vous l'avez compris, pour déterminer le "niveau de risque sismique raisonnablement probable", il est pertinent de se baser non seulement sur des données purement scientifiques (géologiques notamment), mais aussi historiques. Nous disposons de mesures (enregistrement physique) depuis 1960 et accédons à la base de données Sis-France pour les données antérieures. Il s'agit donc d'enrichir cette base avec de nouveaux éléments, pour la plupart non scientifiques, et de plus non structurés : journaux, livres d'histoire ou d'art, comptes rendus archéologiques etc. Des écrits qui, de plus, viennent d'époques diverses, avec un langage et des appréciations différentes (gravité, estimations non scientifiques...).



Nous avons donc lancé une étude utilisant du text mining pour transformer ce corpus de données non structurées en un jeu de data scientifique exploitable, avec l'aide d'historiens spécialisés du

BRGM\*. Cette approche très ouverte est, je pense, amenée à se développer dans d'autres domaines. ●

\*Bureau de Recherches Géologiques et Minières

## LES COMBUSTIBLES E-ATF "ENHANCED-ACCIDENT TOLERANT FUEL"

**Vers des combustibles plus sécuritaires** : après l'accident de Fukushima, plusieurs programmes de travaux de recherche sur de nouveaux concepts de combustibles nucléaires plus résistants aux accidents ont été lancés à l'échelle internationale. Aux Etats-Unis et en Europe notamment, les acteurs et fabricants développent des combustibles E-ATF pour "Enhanced Accident Tolerant Fuel", ayant une robustesse accrue en termes de sûreté, ainsi que d'autres propriétés intéressantes en fonctionnement normal (ex : réduction du coût du cycle du combustible). La France est leader dans ce domaine de recherche. En effet, la "brique technologique" E-ATF tripar-

tite FRAMATOME CEA EDF des "Initiatives Usine Nucléaire du Futur", abrite un des concepts les plus aboutis industriellement à l'échelle mondiale : **la gaine revêtue chrome**. Grâce à un revêtement en chrome très fin, l'oxydation et la déformation des gaines combustibles, notamment en conditions accidentelles, sont significativement réduites. Ce concept est développé dans le cadre du "French Nuclear Institute", et quelques crayons expérimentaux pourraient être irradiés dans un réacteur EDF à l'horizon 2019-2020. En complément, dans la brique E-ATF de l'usine nucléaire du futur, le **French Nuclear Institute travaille sur un concept de gainage compo-**

**site** en rupture avec les technologies actuelles. L'objectif est de valoriser au mieux les propriétés mécaniques et neutroniques exceptionnelles des SiC (Silicon Carbide). Il s'agit d'une option de long terme, mais les premiers résultats sont encourageants. Tous ces travaux sont prometteurs et permettront des avancées toujours plus importantes en matière de sûreté des installations du parc électro-nucléaire français et mondial. ●

*Avec le concours d'Édouard Pouillier : ingénieur chercheur responsable de la brique E-ATF - EDF R&D*

## VERS DE NOUVEAUX SCÉNARIOS DE FLEXIBILITÉ NUCLÉAIRE POUR INTÉGRER PLUS D'ENR

3 questions à Christelle Le Maître, déléguée Programme Production - EDF R&D - Pilote de la brique "Scénario de flexibilité"



### Pourquoi la flexibilité des tranches nucléaires est-elle un enjeu pour la R&D ?

C'est surtout un enjeu pour le système électrique dans son ensemble, qui évolue déjà avec l'insertion des EnR variables, mais aussi avec les évolutions de la consommation – par exemple avec le développement des véhicules électriques, des pompes à chaleur, de la domotique. De plus, des nouvelles technologies comme les réseaux électriques dits intelligents, ou encore le stockage d'électricité peuvent impacter la gestion du système électrique et la structure de son mix de production. Enfin, les interconnexions avec les

pays voisins continuent de se développer afin de faciliter les échanges d'électricité et le partage de ressources transfrontalières. Ces interconnexions facilitent l'intégration des marchés d'électricité en vue d'un marché unique Européen et une intégration des marchés jusqu'au balancing proche du temps réel. **Tout cela milite pour une parfaite connaissance des futurs besoins en manœuvrabilité de nos centrales nucléaires et l'identification, si besoin est, des différents leviers pour y parvenir : conduite des tranches, gestion du combustible...** Cette étude est également une collaboration entre le pôle amont et le pôle aval et nous enrichit mutuellement.

### À quelle étape de l'étude en êtes-vous ?

Les réacteurs nucléaires en France sont déjà capables de faire varier leur puissance de 80 % à la hausse ou à la baisse en l'espace de trente minutes. Le principal enseignement des études précédentes a conduit à une politique de gestion coordonnée du parc permettant de **moduler la puissance de 2 réacteurs sur 3 de façon simultanée, contre 1 sur 2 auparavant**. On se place dans notre nouvelle étude autour d'une vision prospective du système avec différents scénarios en 2030 et 2040. Ceci implique la construction d'une vision englobant les données cli-



## COMMENT FAIRE PROFITER AU MAXIMUM LA FILIÈRE NUCLÉAIRE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES ?



En les intégrant concrètement dans un laboratoire... et en le faisant de manière collaborative pour mettre en place une continuité numérique pour la R&D de la filière nucléaire, et ainsi maximiser les gains pour la filière.

Ainsi est né ConnexLab fin 2017 : 300 m<sup>2</sup> au sein d'EDF Lab Paris-Saclay, dédiés à la **recherche sur les briques numériques d'Initiatives Usine Nucléaire du Futur**, et mutualisés entre 9 partenaires : EDF, FRAMATOME et ORANO, TechnicAtome, Atos Worldgrid, ANSYS / Esterel, CEGELEC CSS, CORYS, SPIE Nucléaire, AFNeT, Assystem, et prochainement Codra et Siemens.

Au programme, 3 objectifs majeurs :

- Tester de **nouveaux concepts d'exploitation**
- Développer des **jumeaux numériques**
- Assurer **l'interopérabilité des briques** technologiques conçues par EDF et ses partenaires.

Ce laboratoire conçoit actuellement 6 démonstrateurs en appui des briques "moyens de conduite du futur", "réacteur numérique" et "maquettes numériques de l'installation" de l'Initiatives Usine Nucléaire du Futur.

Enfin, la **dimension collaborative** sera particulièrement mise en avant : comme outil pour ConnexLab, mais aussi comme sujet d'étude car la transformation numérique est également une transformation des méthodes de travail et des interactions entre acteurs. **Organisation et gouvernance** seront donc également de la partie.●

*Avec le concours d'Hadrien Leroyer, chef du groupe "Réalité Virtuelle et Visualisation Scientifique", et de Catherine Devic, responsable de programme recherche et développement - EDF R&D*



EDF  
22-30 avenue de Wagram  
75382 Paris cedex 08 - France  
Capital de 930 004 234 euros  
552 081 317 R.C.S. Paris

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

Publication EDF R&D  
EDF Lab Paris-Saclay  
7, boulevard Gaspard Monge  
91120 Palaiseau France  
Directeur de la publication : Bernard Salha  
Directeur de la rédaction : François Molho

Comité de rédaction : Equipe R&D  
Contact : [sandrine.dyevre@edf.fr](mailto:sandrine.dyevre@edf.fr)

Crédits photos : EDF - Alexis Morin, Rudy Burbant, Philippe Eranian, Popy Xavier,  
ConnexLab, Stéphane Avoue, Sébastien Lardon, Fotolia @Marc, Colin Mathieu  
Conception et réalisation : Cleantech Republic