

Place aux petits réacteurs

S'adapter, voire se réinventer. Et vite. Voilà les maîtres-mots de la filière nucléaire pour relever les défis posés par le tandem de l'urgence climatique et de la souveraineté. Comment ? En organisant différemment la fourniture d'énergie, au plus près des clients et pour des usages allant bien au-delà de la seule production d'électricité. Et en intégrant de nouveaux concepts de réacteurs, plus petits et plus flexibles.

Comment arriver en 2050 à un monde neutre en carbone tout en satisfaisant une demande en énergie qui ne cesse d'augmenter, poussée par la croissance démographique et l'urbanisation induite, et par la digitalisation galopante de nos pratiques et outils industriels ? D'abord en diminuant notre consommation globale d'énergie de 40 % par rapport à 2015, indique la Stratégie nationale bas carbone, par des actions d'efficacité et de sobriété énergétiques. Et en électrifiant massivement nos usages. RTE, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité, estime notre consommation d'électricité en 2050 à 645 TWh contre 449 en 2020 dans son scénario de référence, passant de 25 à 55 % de notre consommation d'énergie¹.

Mobiliser toutes les énergies bas carbone

« Nous sommes face à une demande gigantesque d'énergie décarbonée », prévient Jérôme Garcin, chef de la cellule valorisation des programmes énergie du CEA. Y répondre exigera non seulement la mobilisation de toutes les énergies bas carbone, nucléaire et renouvelables, et ce dès la décennie 2030 ; mais aussi de faire émerger puis d'industrialiser des solutions de rupture dans les technologies de production et de distribution d'énergie.

⁽¹⁾ Étude prospective « Futurs énergétiques 2050 » présentée en octobre 2021.



© L. Godart/CEA

Car à la demande d'électricité, il convient aussi d'ajouter d'immenses besoins de chaleur décarbonée industrielle. Les aciéries, cimenteries, industries du verre ont par exemple besoin de très hautes températures, supérieures à 500 °C ; tandis que d'autres secteurs, métallurgie, papier, plastique, chauffage urbain, dessalement d'eau de mer ou encore textile, sont à la recherche de températures inférieures à 300 °C. Ces pans entiers de l'industrie sont très dépendants du gaz et restent difficiles à électrifier. Ajoutons à cela la montée en puissance de la production d'énergies décarbonées, elle aussi consommatrice de

chaleur et d'électricité : hydrogène, et à plus long terme, carburants de synthèse via la capture de CO₂, pour l'aéronautique et le transport maritime.

Une vision intégrée de l'énergie

Pour absorber ce changement d'échelle, le CEA prône une vision intégrée du système énergétique, incluant plusieurs piliers interconnectés : production d'énergies bas carbone (nucléaire, renouvelables, hydrogène, carburants de synthèse...);

solutions de flexibilité et de stockage pour compenser la variabilité des renouvelables, s'appuyant sur les batteries, mais aussi sur l'hydrogène ; réseaux « intelligents » à même de traiter des flux importants de données en temps réel pour gérer les pics de consommation en fonction des énergies disponibles ; le tout dans une logique d'économie circulaire des matières, allant des combustibles nucléaires aux matériaux critiques des composants électroniques (batteries, éoliennes, panneaux photovoltaïques). « *Nous souhaitons porter toutes les options permettant d'atteindre la neutralité carbone au moindre coût pour la société et en renforçant notre souveraineté* », résume Stéphane Sarrade, le directeur des programmes énergies du CEA.



« Nous souhaitons porter toutes les options permettant d'atteindre la neutralité carbone au moindre coût pour la société et en renforçant notre souveraineté. »

Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies du CEA

Dans ce mix, le nucléaire, une énergie pilotable, joue un rôle crucial. Mais il doit innover pour s'adapter à ces nouveaux besoins de décarbonation. « *55 % d'électricité en 2050, c'est beaucoup*, confie Stéphane Sarrade. *Nous aurons besoin de plus de nucléaire de puissance, c'est le sens de la construction des EPR annoncée par le président de la République. Et il sera complété par une nouvelle offre portée par des petits réacteurs nucléaires. Ceux-là viendront proposer des services complémentaires, totalement inédits pour la filière : de l'électricité locale aux*

←
Toutes les énergies bas carbone, nucléaire et renouvelables, seront nécessaires pour diminuer les émissions de CO₂. Ici, des recherches au CEA sur les biocarburants produits à partir de micro-algues.

territoires en synergie avec les énergies renouvelables, mais surtout de la chaleur pour les industries lourdes, la production d'hydrogène, etc. C'est une des facettes d'une vision intégrée de l'énergie ». France 2030 est venu donner une impulsion à l'innovation en soutenant le développement de ces petits réacteurs (à fission ou à fusion). « Le programme sollicite exclusivement de nouveaux entrants, au-delà des organismes historiques, souligne l'expert. Ceci pour pousser à l'émergence de nouveaux concepts, modèles économiques, écosystèmes industriels et modes de financement, typiquement portés par des modèles start-up ».

L'univers des petits réacteurs

Pour comprendre l'intérêt et la pertinence de ces petits réacteurs, une explication s'impose. Ces concepts, qu'on appelle SMR (*small modular reactor*), AMR (*advanced modular reactor*) ou MMR (*micro modular reactor*) sont en rupture totale avec la philosophie des réacteurs de puissance. « L'idée sous-jacente, apparue aux États-Unis il y a une vingtaine d'années, a été de jouer sur l'effet de série pour abaisser les coûts d'investissement et de construction, plutôt que de viser une économie d'échelle par la taille du réacteur », raconte Jean-Claude Garnier, en charge du programme de réacteurs de 4^{ème} génération. Ces petites centrales, dont la puissance s'échelonne entre 50 et 300 MWe², sont plus simples à construire grâce à une architecture allégée, sont fabriquées en usine par modules, faciles à transporter, puis à assembler sur site. Effet induit, leur

sûreté est plus simple à mettre en œuvre, souvent de manière passive, s'appuyant par exemple sur la convection naturelle.

SMR et AMR se distinguent entre autres par leur technologie. Les premiers s'appuient sur celle bien connue, mature et maîtrisée, des réacteurs à eau (pressurisée ou bouillante), dite de 2^{ème} et 3^{ème} générations. « Trois réacteurs sur quatre dans le monde sont des réacteurs à eau pressurisée », rappelle Jean-Claude Garnier, si bien que les premiers déploiements de SMR au niveau international sont attendus pour le début 2030.

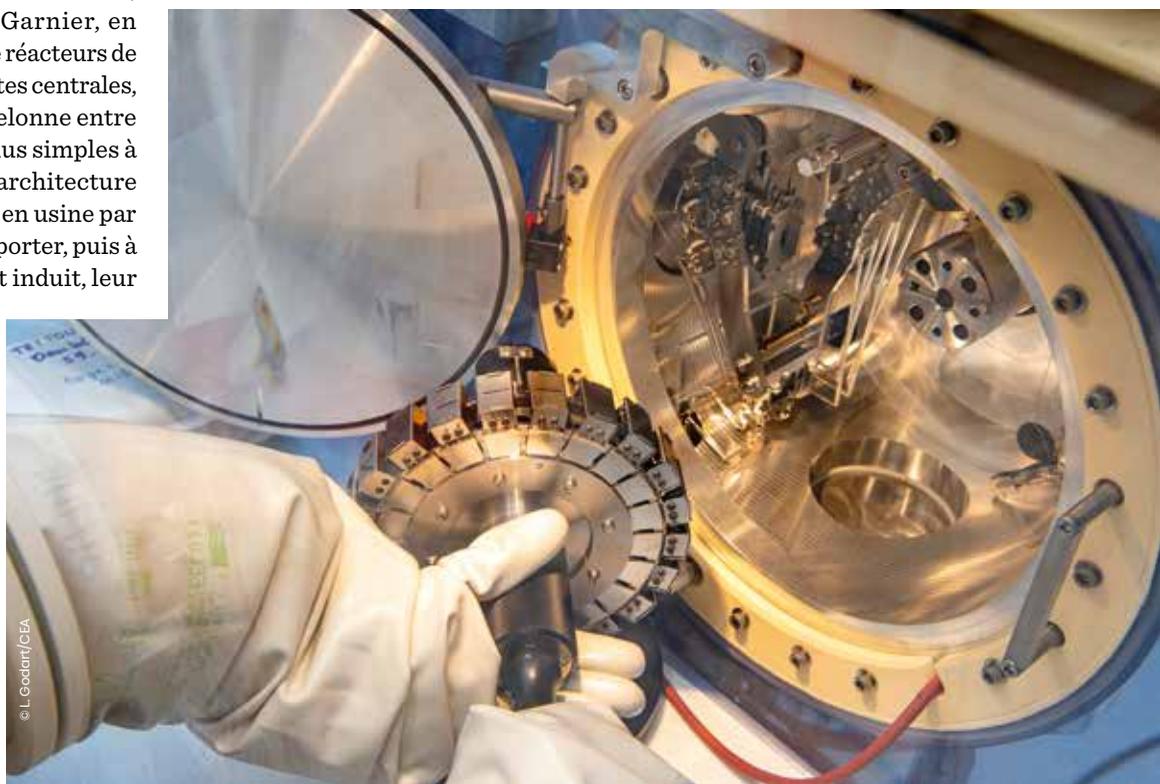
Les AMR s'apparentent quant à eux à des technologies de 4^{ème} génération : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, au plomb ou au gaz, réacteurs à sels fondus, à haute température, à eau supercritique. Plus disruptifs et moins matures, ils devraient se déployer ultérieurement, dans les années 2030. Les MMR, enfin, sont des versions miniatures des SMR et des AMR (1 à 20 MWe). Facilement transportables, ils visent d'autres usages : remplacement de groupes électrogènes, transport maritime, zones isolées, spatial...

Assurer la souveraineté énergétique à long terme

Tous ces modèles, ou presque, sont grésés pour de la cogénération : électricité décentralisée et chaleur. À ceci près que les AMR l'emportent sur les SMR en matière de température : jusqu'à 800 °C, versus un maximum de 250 °C. « La plage de chaleur la plus demandée en Europe se situe entre 250 et 500 °C. Les AMR pourront répondre à d'immenses besoins industriels de décarbonation », illustre Jean-Claude Garnier. Ces AMR séduisent également pour leur capacité à fermer le cycle du combustible. En valorisant les matières nucléaires sans emploi (uranium appauvri, combustibles nucléaires usés, voire déchets ultimes, selon les concepts de réacteur), ils pourraient résoudre la question de l'indépendance énergétique, et réduire celle des déchets. « Les projections à l'horizon 2050 montrent une tension sur l'uranium issu des mines. À cette date, ces réacteurs de 4^{ème} génération ont une viabilité économique. Et en France, dans cette optique de cycle fermé, nous disposons d'un stock de matière nucléaire de plus de 5 000 ans », affirme Jérôme Garcin.



Préparation pour l'analyse de micro-échantillons de combustible nucléaire irradié.



Signe de la pertinence de ces mini-centrales, l'engouement international qu'elles suscitent depuis une quinzaine d'années, notamment dans les pays anglo-saxons, en Chine, en Russie et au Japon.

Le coût de l'énergie, devenu en moins d'un an un facteur critique pour les industries énergivores, est depuis venu s'immiscer dans l'équation. « *La stabilité du coût de la ressource est indéniablement un argument fort en faveur du nucléaire, et bien davantage pour les AMR de 4^{ème} génération*, observe Guillaume Ravel, en charge des accords stratégiques à la Direction des énergies. *Les industriels commencent à regarder les SMR non pas comme des éléments qui alimentent le réseau en électricité, mais pour en acquérir pour leurs propres besoins, adossés à leurs usines* ».

Voilà pourquoi les SMR et AMR pourraient bien s'imposer dans le mix énergétique, en complément des énergies renouvelables. Non seulement pour remplacer des petites centrales à charbon ou à gaz, mais aussi pour répondre à ces nouveaux besoins de chaleur décarbonée, allant jusqu'à la production d'hydrogène et de carburants de synthèse.

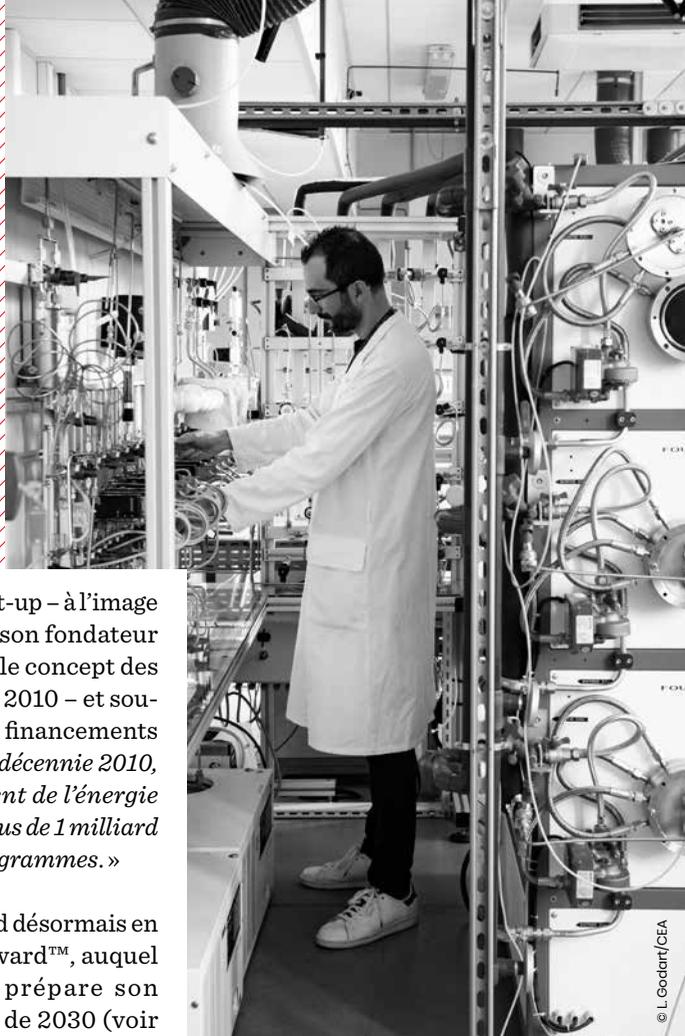
La France a des atouts

Signe de la pertinence de ces mini-centrales, l'engouement international qu'elles suscitent depuis une quinzaine d'années, notamment dans les pays anglo-saxons, en Chine, en Russie et au Japon. Pas moins de 70 concepts sont aujourd'hui à l'étude « *à des degrés de maturité et d'avancement inégaux* », précise cependant Jean-Claude Garnier. Ils sont portés à la fois par des exploitants

historiques et des start-up – à l'image de Terra Power et de son fondateur Bill Gates qui a lancé le concept des AMR dans les années 2010 – et souvent soutenus par des financements importants. « *Dans la décennie 2010, le DOE, le Département de l'énergie américain, a investi plus de 1 milliard de dollars dans ces programmes.* »

Ce mouvement s'étend désormais en Europe. Le SMR Nuward™, auquel contribue le CEA, prépare son déploiement à partir de 2030 (voir page 22). Et l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » de France 2030, ouvert du 2 mars 2022 au 28 juin 2023, a accéléré la R&D. Le CEA y jouera un rôle central d'expert, en accompagnant les start-up candidates (voir page 26).

Dans cette compétition internationale, Stéphane Sarrade se veut confiant : « *la vraie réponse pour être dans le bon temps, c'est de faire trois choses à la fois : développer le concept de réacteur ; être en capacité d'intégrer le licencing³ ; et maîtriser le cycle du combustible (approvisionnement, enrichissement, transport, traitement et gestion des déchets). Les start-up aux États-Unis ont commencé il y a quinze ans et rencontrent des difficultés d'accès au combustible et à des ressources humaines compétentes. En France, nous avons commencé plus tard, mais nous disposons d'un socle plus important. Notre force, c'est d'être en capacité d'aborder ces trois sujets avec la même temporalité. C'est cela qui nous fera gagner du temps* ». ●



↑ Installation de test de corrosion en milieu gaz à haute température, notamment pour l'étude de nouveaux matériaux pour des échangeurs de chaleur de réacteurs du futur.

(2) À titre de comparaison, les puissances des réacteurs du parc électrique français sont de 900, 1300 et 1450 MWe pour les REP ; et de 1670 MWe pour un EPR2.

(3) Démonstration de la maîtrise de la sûreté d'un réacteur nucléaire, en vue de l'obtention d'une autorisation de l'autorité de sûreté pour le construire et l'exploiter.

Le nucléaire : mission décarbonation

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, toutes les énergies bas-carbone devront être mises à contribution. L'énergie nucléaire, qui a permis jusqu'ici d'éviter l'émission d'environ 70 gigatonnes de CO₂ à l'échelle mondiale, contribuera à ce mix énergétique, aux côtés des énergies renouvelables qui monteront en puissance. À partir de 2030, des petits réacteurs nucléaires viendront compléter ce paysage énergétique. Ils apporteront de nouveaux services, en fournissant non seulement de l'électricité, mais surtout de la chaleur locale pour les réseaux urbains et pour répondre aux immenses besoins de décarbonation des industries les plus énergivores.

© Colin Matthieu



1970

Les REP* (ou les REB*) produisent de l'électricité nucléaire

Depuis 1970, environ **70 Gt de CO₂** non émises dans le monde grâce à l'énergie nucléaire

C'est l'équivalent de 173 ans d'émissions nettes de gaz à effet en France (2019)

(Source: AIEA)

2022

Développement de nouveaux concepts de réacteurs et lancement de nouveaux projets de réacteurs nucléaires pour la production d'électricité et de chaleur

La consommation d'électricité représente environ **27 000 TWh** dans le monde (Ember), et **449 TWh** en France (RTE).

Le nucléaire représente :
environ **4 %** de la production d'énergie mondiale

environ **10 %** de la production d'électricité mondiale



© Morn Alexis

Salle des machines de l'EPR de Flamanville

- **Demande d'électricité**
- **Efficacité et sobriété énergétiques**
- Décarbonation des industries énergivores (environ **30 000 TWh/an** sont nécessaires)
- **Énergies renouvelables**
- **Énergies fossiles**

2030

1 SMR*

2 AMR à haute température*

3 AMR à neutrons rapides*

4 AMR à sels fondus*

2050

Mise en production des SMR*, AMR* et des MMR* pour la fourniture d'électricité et de chaleur (cogénération)

OBJECTIF 70 pays engagés à atteindre la neutralité carbone

Mise en production de réacteurs à fusion nucléaire

OBJECTIF INTERMÉDIAIRE DE L'EUROPE

Fit for 55

(-55% d'émissions nettes de CO₂ par rapport à 1990)



Énergies renouvelables



Énergies fossiles



Efficacité et sobriété énergétiques

La consommation d'électricité représentera environ 54 000 TWh dans le monde (AIEA) et 645 TWh en France (RTE).

LEXIQUE

REP: réacteur à eau pressurisée de 2^{ème} ou 3^{ème} génération

REB: réacteur à eau bouillante

EPR: concept français de REP de 3^{ème} génération

1 **SMR**: *small modular reactor*
C'est une technologie mature qui s'appuie sur celle des réacteurs à eau sous pression, majoritaire dans le monde. La plupart des SMR sont conçus pour fonctionner en cogénération: production d'électricité et/ou de chaleur (température maximale: 250 °C)

AMR: *advanced modular reactor* issu de technologies de 4^{ème} génération

2 Un **AMR à haute température** est une technologie robuste et simple qui permet d'atteindre des températures très hautes (850 °C), choisie par près de la moitié des start-up dans le monde.

3 Les **AMR à neutrons rapides** exploitent une technologie de grande maturité. Plusieurs réacteurs à neutrons rapides ont déjà été construits dans le monde. Ils permettent de fournir de la chaleur jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité.

4 Les **AMR à sels fondus** sont des concepts de réacteurs à neutrons thermiques ou rapides disruptifs, bien qu'imaginés dans les années 1960. Ils rencontrent un grand succès auprès des investisseurs et des start-up. Des verrous sont encore à lever sur les matériaux (corrosion par les sels, notamment) et sur le cycle du combustible associé. Ils permettent de fournir de la chaleur jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité.

MMR: *micro modular reactor* (SMR ou AMR « miniatures »)



© Hexarna



© C. Rouw/CEA

Nuward™, prêt à décoller

Nuward™ est le premier projet de petit réacteur modulaire (SMR) développé en France, associant les grands acteurs de la filière. 500 millions d'euros sont alloués par France 2030 pour le développement de l'avant-projet détaillé. Objectif : un prototype en 2030 pour le marché européen.

C'est quoi ?

Nuward™ est une petite centrale nucléaire de 340 MWe constituée de deux réacteurs de technologie REP (réacteur à eau pressurisée) de génération 3 immergés dans une piscine commune. Comme tous les SMR, le réacteur, au design simplifié, est conçu pour être compact, modulaire et fabriqué en série. Il répond à un haut niveau de sûreté et offre une meilleure résistance aux agressions externes grâce à une construction semi-enterrée.

Le projet a été lancé en 2019, à la suite d'une réflexion initiée en 2012, par un consortium EDF - CEA - Naval Group - TechnicAtome rejoint en 2021 par Framatome et l'entreprise européenne Tractebel Engie. La construction du premier réacteur est attendue pour 2030.

Pourquoi et pour qui ?

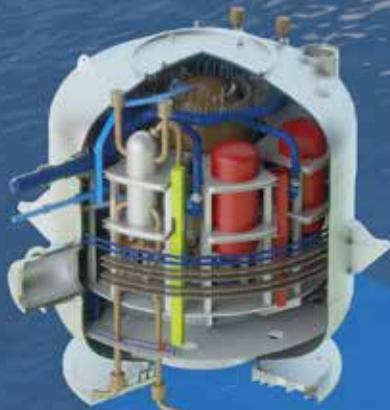
Nuward™ est un SMR essentiellement électrogène adapté à l'export, notamment pour remplacer des centrales thermiques. Sa conception permet aussi de fonctionner en cogénération pour produire de la chaleur : réseaux de chauffage urbain, production d'hydrogène, dessalement d'eau de mer, capture et valorisation du CO₂.

Le CEA travaille en particulier sur les configurations de couplage pour servir des besoins industriels, notamment avec des électrolyseurs à haute température pour la production d'hydrogène décarboné.

Quelle place dans une compétition mondiale ?

Plus de 50 projets de SMR sont en développement dans le monde, à des niveaux d'avancement très variables. Un des plus avancés est porté par Nuscale Power (États-Unis), la première société à avoir lancé le concept de SMR; elle a récemment obtenu l'agrément de l'autorité de sûreté américaine. D'autres sociétés sont aussi en lice : GE-Hitachi (EU-Japon), Rolls Royce (Royaume-Uni), Westinghouse (EU), ainsi que des start-up canadiennes. La Chine développe à ce jour six modèles de SMR, dont un en construction. Les seuls SMR aujourd'hui en exploitation se trouvent en Russie (Rosatom), sous la forme de deux petits réacteurs installés en 2019 sur une barge pour alimenter des sites isolés du nord du pays.

En Europe, Nuward™ est de loin le projet le plus mature. Selon les experts, le concept des SMR reposant sur un effet de série, le premier modèle industrialisé, attendu vers 2030, pourrait s'imposer sur le marché.



LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES APPORTÉES PAR LE CEA

- > **La conception d'un nouveau design de générateur de vapeur**, plus compact
- > **La conception neutronique du cœur** : design des assemblages combustibles ; stratégie de management des barres de contrôle qui permettent de réguler les réactions nucléaires ; première image numérique de référence du cœur ; gestion simplifiée du cœur en eau claire
- > **Des études de thermohydraulique** (mécanique des fluides avec transferts de chaleur) pour optimiser la circulation du fluide dans le circuit primaire et les échanges de chaleur entre le combustible et le fluide
- > **Sûreté** : intégration de systèmes passifs pour l'évacuation de la chaleur

- > **Des codes de calcul développés** au CEA et adaptés à Nuward™ :
 - Apollo 3®, pour les calculs de neutronique
 - Cathare, pour les calculs de thermohydraulique sur l'ensemble du circuit du réacteur
- > **Des plateformes d'essais** :
 - Beench pour simuler les conditions thermohydrauliques et chimiques des phénomènes d'encrassement du générateur de vapeur
 - Exocet pour l'amélioration des modèles physiques
 - Everest, en cours de construction, pour valider les systèmes de sûreté
 - Une boucle intégrale attendue en 2028, pour reproduire l'architecture du cœur à échelle réduite

Nous avons apporté des éléments d'innovations fortes dans le design et sur les systèmes de sûreté, amené et adapté nos outils de calcul, réalisé la conception neutronique du cœur et conduit de nombreuses études de neutronique et de thermohydraulique.

Pierre Gavaille,
chef du programme SMR
au CEA





© L. Godard/CEA

Pierre Gavoille
 Chef du programme SMR
 au CEA

Nuward™, l'ambition européenne

À travers l'Europe, de plus en plus d'États ont manifesté un intérêt pour se doter d'un SMR. Dans un paysage fortement concurrentiel, l'élaboration d'une offre industrielle compétitive européenne est cruciale. Avec pour candidat le modèle français Nuward™.

Bertrand Bouchet
 Représentant du CEA
 auprès de l'Union européenne



© L. Godard/CEA

La stratégie

Bertrand Bouchet — Nous discutons avec nos partenaires de l'UE, États, industriels, organismes de recherche, pour réfléchir ensemble à la construction d'une offre européenne incluant une technologie, en l'occurrence celle de Nuward™ – la seule assez mature pour arriver sur le marché à court terme –, une *supply chain* adaptée, c'est-à-dire toute la chaîne d'industriels, et des processus de coordination, y compris entre autorités de sûreté.

Pierre Gavoille — Nous sommes sur des échéances de temps très courtes. Les premiers déploiements se feront autour de 2030. Il est donc crucial, pour des questions de compétitivité et de souveraineté, de mobiliser le plus d'acteurs industriels possibles pour être à l'heure à ce rendez-vous.

Bertrand Bouchet — Il y a deux approches différentes au sein de l'Europe : celle d'un projet de SMR européen, incarné par Nuward™, avec sa *supply chain*, et celle d'un projet de SMR en Europe, avec des *supply chains* locales qui permettraient à un pays de produire sur son territoire les modules d'un SMR, quel qu'il soit, et il pourrait être américain. La stratégie française consiste à construire des partenariats avec des industriels européens autour de Nuward™ et de sa *supply chain* pour privilégier la première option.

Une concurrence intense

Pierre Gavoille — Les pays anglosaxons sont très offensifs pour implanter leur technologie sur le sol européen. Nous avons vu une démarche coordonnée de l'Agence américaine pour le commerce et le développement auprès de différents pays pour promouvoir les vendeurs américains, via des accords commerciaux, des contacts auprès des acteurs de la *supply chain*, une offre de formation... Avec de surcroît un avantage concurrentiel, celui du soutien financier massif de l'*Inflation reduction act*. Les Anglais de Rolls Royce, tout

comme GE-Hitachi, ont eux aussi engagé de nombreux contacts commerciaux.

L'action institutionnelle

Bertrand Bouchet — Nous menons de front une double action, institutionnelle et industrielle. Un pré-partnership européen s'est mis en place depuis plus d'un an à l'initiative du CEA et d'EDF en lien avec les autorités françaises, pour rassembler un certain nombre d'acteurs autour de la problématique des SMR. C'est un processus soutenu par la Commission européenne. Cinq sujets critiques y sont instruits : l'analyse du marché ; les autorisations d'exploitation délivrées par les autorités de sûreté (le *licencing*) ; le financement et la gouvernance d'une alliance ou d'un partenariat européen ; la construction de la *supply chain* ; la R&D sur le court et le long terme, pour accompagner le déploiement de Nuward™ à partir de 2030, puis celui des AMR. Cette réflexion a abouti à de premières concrétisations : une déclaration le 4 avril de la commissaire Mariya Gabriel sur le rôle de la recherche et de la formation ; et la sollicitation de la Commission par dix ministres en vue de l'organisation d'une réunion des parties prenantes sur les SMR. Cet événement pourrait être le point de départ d'un partenariat ou d'une alliance européenne.



Un pré-partnership européen s'est mis en place depuis plus d'un an à l'initiative du CEA et d'EDF en lien avec les autorités françaises, pour rassembler un certain nombre d'acteurs autour de la problématique des SMR. »

Bertrand Bouchet



Avec le SMR, le secteur nucléaire passe d'une industrie de construction sur site à une industrie manufacturière qui devra fabriquer en usine et en série des petits modules avec des systèmes pré-équipés. »

Pierre Gavoille

L'action industrielle

Pierre Gavoille — Avec le SMR, le secteur nucléaire passe d'une industrie de construction sur site à une industrie manufacturière qui devra fabriquer en usine et en série des petits modules avec des systèmes pré-équipés. À cela, deux conséquences : le besoin d'adapter la *supply chain* et l'entrée de nouveaux acteurs industriels. Il est vraisemblable que la fabrication des éléments du cœur, tout comme la question des combustibles et de leur cycle, seront confiés aux acteurs français, déjà hautement spécialisés et expérimentés. Mais pour tous les systèmes périphériques et leur pré-assemblage (générateurs de vapeur, pompes, tuyauteries...), nous cherchons à solliciter le plus possible les industriels européens. La construction par modules, avec des éléments de taille réduite, impliquera également de nouveaux acteurs du génie civil, plus classiques et bien plus nombreux que ceux habituellement engagés dans les chantiers des réacteurs de puissance. Enfin, les stratégies de décarbonation pour la fourniture de chaleur, d'hydrogène ou de produits chimiques, mobiliseront encore d'autres intervenants.

Les premiers accords

Pierre Gavoille — Nous avons déjà des contacts commerciaux en Pologne, où Respect Energy a signé des accords exclusifs avec Nuward™,

et en Finlande. D'autres pays, Estonie, Suède, République tchèque, ont exprimé un intérêt fort pour le SMR français. Ceux-là sont évidemment pressentis pour contribuer à la *supply chain*, mais pas seulement. Nous avons notamment approché des industriels italiens. Tractebel Engie, entré dans le consortium Nuward™, facilitera aussi cette dimension européenne. Enfin, citons l'Inab, l'*International Nuward Advisory Board*. Il s'agit d'un groupe d'instituts et d'industriels à l'échelle internationale qui conseille l'équipe de Nuward™ sur son développement, le design, les performances, la sûreté, de manière à préparer le déploiement à l'international. Ce sont aussi des vecteurs de discussions avec les acteurs industriels.

Accélérer le licencing

Pierre Gavoille — La crédibilité d'une nouvelle offre de réacteurs est liée à l'obtention de sa certification auprès de l'autorité de sûreté du pays d'implantation. Nous voulons accélérer ces processus. C'est pourquoi Nuward™ a lancé la *Joint Early Review*. C'est un point fort assez novateur, qui distingue Nuward™ de ses concurrents. Trois autorités de sûreté différentes, France, Finlande et République tchèque, travaillent ensemble pour réaliser la première analyse de sûreté et aboutir à une précertification. Aujourd'hui, l'initiative s'élargit, avec les Suédois qui souhaitent rejoindre le groupe. Bien entendu, les autorités de sûreté des différents pays resteront souveraines dans leurs homologations nationales.

Anticiper l'arrivée des AMR

Bertrand Bouchet — Nous devons aussi dès à présent anticiper la deuxième vague de réacteurs modulaires qui arrivera sur le marché, celle des AMR, avec un cycle du combustible différent, des systèmes différents et donc une *supply chain* qui devra s'adapter. Le marché potentiel à venir est énorme. ●

Coachez de start-up

Les sociétés lauréates à l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » de France 2030 pourront être coachées par le CEA, qui leur apportera son expertise technique en R&D nucléaire, ainsi que sa longue expérience de maturation de projets innovants. À la clé, l'émergence de nouvelles filières industrielles au service de la décarbonation.

« Une start-up dans le nucléaire, cela ne ressemble pas du tout aux start-up que l'on connaît, tout est démultiplié ! », souligne Jérôme Garcin. Plus de budget, de ressources humaines, de temps de développement et de maturation, et la spécificité particulière de la sûreté et de la sécurité des concepts qu'il faudra démontrer auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et des services du Haut fonctionnaire de défense et de sécurité (HFDS). Et pour envisager l'export de ces technologies, l'exercice devra être répété dans chacun des pays visés !

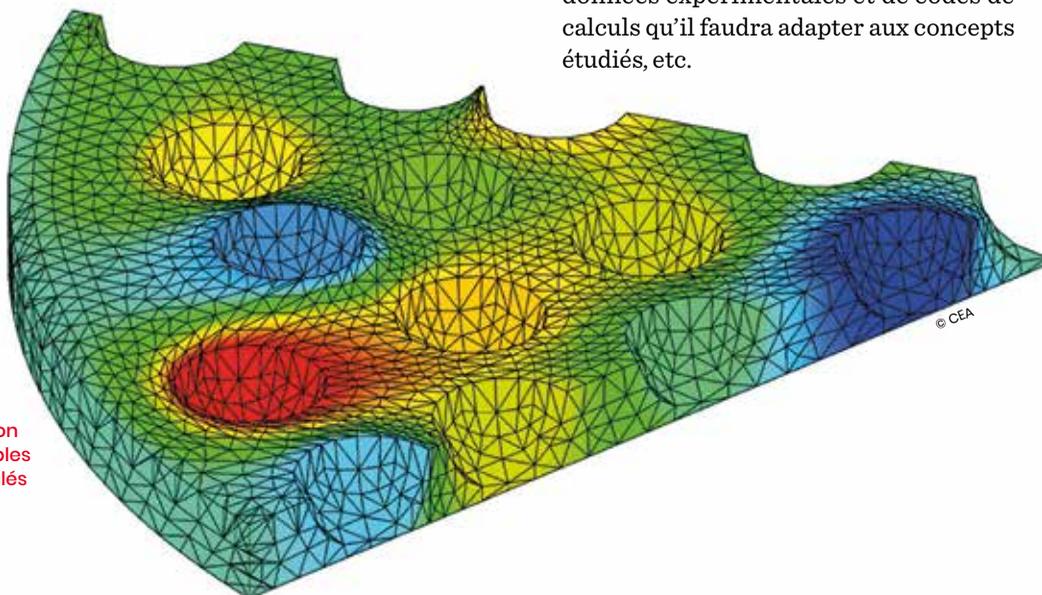
C'est pourquoi le programme France 2030 a d'emblée demandé au CEA d'accompagner, si elles le souhaitent, les start-up candidates à l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » (AAP) pour accélérer leur maturation. Il est vrai que l'organisme a tous les atouts et l'expérience pour endosser ce rôle : une culture en R&D nucléaire unique en France et une culture de l'innovation et de l'essai de start-up, allant jusqu'à la contribution à la structuration de filières industrielles souveraines (STMicronics, Cogema, et plus récemment Genvia pour la production d'hydrogène).

Accompagner jusqu'à l'avant-projet détaillé

Au CEA, c'est donc une nouvelle aventure qui démarre. Comme le résume Stéphane Sarrade, « les start-up dans le nucléaire, c'est totalement nouveau en France, et c'est enthousiasmant ! L'exercice a démarré en 2022. Nous avons rencontré une dizaine de candidats et start-up dans les domaines de la fission et de la fusion. Nous les avons challengés sur la réalité technologique de leurs propositions, la temporalité annoncée et leurs besoins techniques. Il était important aussi de les amener dans une acculturation du monde nucléaire, par exemple sur les enjeux de sûreté et le niveau d'exigence attendu dans ce domaine, et sur le cycle du combustible nucléaire ». Ceci pour aider les porteurs à rédiger et présenter des dossiers de haute qualité lors de la phase de sélection de l'AAP.

Pendant les deux années qui viennent, le CEA fournira toute son expertise scientifique et technique aux start-up lauréates pour les mener à un niveau pré-APS (avant-projet sommaire) : aide à la conception, mise à disposition de données expérimentales et de codes de calculs qu'il faudra adapter aux concepts étudiés, etc.

(1) Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.



→
Simulation de la déformation de la matrice de combustibles sphériques micro-encapsulés pour des réacteurs de type AMR-MMR.



Suivra une montée en puissance de l'accompagnement pour atteindre les phases de preuve de concept, avec la mise en place d'expériences, voire la conception et la construction de nouvelles installations. « Une étape qui nécessitera de renforcer les compétences et les moyens expérimentaux au CEA », estime Jean-Claude Garnier. Et à partir de 2026, le meilleur projet retenu par Bpifrance, l'opérateur de l'AAP, recevra une enveloppe pouvant aller jusqu'à 300 millions d'euros. De quoi lui permettre de produire un avant-projet détaillé, avec une démonstration via un prototype. À charge pour la société de compléter par des financements privés, ainsi que le modèle l'exige.

Combustible et sûreté, deux paramètres clés

Les start-up candidates proposent des concepts variés et à des stades de maturité technologique très différents. « Les plus nombreuses ont choisi la fission nucléaire, en version SMR ou AMR, dans des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb, à haute température ou à sels fondus. D'autres ont opté pour des réacteurs à fusion, avance Jean-Claude Garnier. Pratiquement tous les projets proposent de la chaleur pour des besoins industriels énergivores ou de chauffage urbain, dans des gammes de température s'échelonnant entre 50 et 600 °C, et de l'électricité locale décarbonée ».

« Notre mission est de leur faire gagner du temps », résume Jean-Claude Garnier. Par exemple en les sensibilisant aux deux paramètres clés que sont le combustible et le *licencing*, c'est-à-dire toute la démarche menant à la démonstration de la sûreté du réacteur, de sorte d'obtenir l'agrément de l'autorité de sûreté pour le construire et l'exploiter. « En France, nous avons des lois, des arrêtés, des guides édités par l'ASN ou l'IRSN. Ces start-up doivent apprendre à fonctionner avec cette réglementation et ces dossiers techniques qui sont complexes », ajoute-t-il. Les études de sûreté reposent en outre sur des outils de calcul, validés avec des expérimentations représentatives, sur des installations qui ne sont pas forcément disponibles aujourd'hui, et sur une simulation intégrale du fonctionnement du réacteur. Pierre Gavaille le souligne : « Faire du *licencing* pour un concept de réacteur à eau pressurisée, par exemple pour un SMR, nous le maîtrisons bien. Pour des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, nous avons déjà des données pertinentes acquises via les programmes passés et les collaborations, même si elles sont plus limitées. Sur des concepts à sels fondus avec un combustible liquide, c'est plus novateur, cela nécessitera un travail de R&D plus important sur le plan expérimental ».

Enfin, les combustibles, en particulier ceux très spécifiques des AMR de 4^{ème} génération, demanderont à testés, qualifiés, validés. Et leurs capacités industrielles de production, pour tout le cycle du combustible, sont encore à construire. ●

↑ Des start-up auront accès à l'expertise et aux moyens expérimentaux du CEA. Ici, four à très haute température pour les études de sûreté des réacteurs nucléaires.

« Il est important d'amener les start-up dans une acculturation du monde nucléaire. »

Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies du CEA

Start-up essaïmées du CEA

Février 2022, le CEA pousse ses équipes à la créativité pour « imaginer de nouveaux concepts de réacteurs nucléaires portés par des start-up, afin de répondre aux objectifs de neutralité carbone en 2050 ». De cette réflexion sont nées cinq start-up s'appuyant sur des technologies et brevets de l'organisme. Présentation de deux d'entre elles : Hexana et Stellaria, candidates à l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030.

Hexana

hexana.fr

TECHNOLOGIE

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium

Hexana s'appuie sur un important socle de connaissances acquis depuis des décennies par le CEA et ses partenaires industriels: brevets, retours d'expérience sur les réacteurs expérimentaux, outils et matériaux qualifiés, données expérimentales, savoir-faire, personnels compétents.

INNOVATION

Système constitué de deux réacteurs de 150 MW électrique (ou 400 MW thermique), alimentant une unité de stockage thermique via des réservoirs de sels fondus. Ces réservoirs permettent de fournir à la demande, soit de la chaleur, soit de l'électricité, avec une grande flexibilité.

COMBUSTIBLES

Uranium appauvri et combustibles usés des REP (MOx).

SÛRETÉ

Passive (absence de pression, refroidissement par convection naturelle).

PARTENAIRES

CEA, Framatome, EDF. Discussion avec d'autres acteurs en cours.

CALENDRIER

Première mise en service envisagée en 2035, précédée par la construction d'un démonstrateur.



Hexana n'est pas Astrid

Le réacteur d'Hexana est un objet complètement différent de celui du projet Astrid. Ce dernier préfigurait ce qu'aurait pu être un réacteur de puissance uniquement destiné à la fourniture d'électricité. Hexana est en revanche conçu pour de la cogénération. En bénéficiant de tous les acquis du CEA et de ses partenaires industriels sur les RNR, la start-up devrait gagner cinq à dix ans d'études préalables.



Paul Gauthé

Sylvain Nizou

Jean-Baptiste Droin



Guillaume Campioni

Lucas Tardieu

Nicolas Breyton

Stellaria

stellaria-energy.com

TECHNOLOGIE

Réacteur à sels fondus chlorure

Bien qu'imaginés dans les années 1960, les réacteurs à sels fondus sont des concepts plus disruptifs et à faible niveau de maturité, mais très prometteurs du fait de leurs atouts: grande polyvalence en matière de combustibles, facilité de mise en œuvre et sûreté simplifiée du fait d'un combustible liquide (sous forme de sels fondus), compacité, capacité à brûler les actinides mineurs (américium) in situ et en continu. Des verrous restent encore à lever sur les matériaux (corrosion par les sels, notamment) et la preuve de concept doit être démontrée.

INNOVATION

Système ultracompact (4 m³), fonctionnant en autonomie pendant cinq ans grâce à un concept de cuve

amovible. Cette stratégie permet de s'affranchir des problèmes d'usure des matériaux, notamment la corrosion provoquée par le sel. Puissance: 100 MWe (ou 250 MWth).

COMBUSTIBLES

Grande polyvalence: uranium, naturel et appauvri, plutonium, MOx, actinides mineurs.

SÛRETÉ

Passive (absence de pression, refroidissement par convection naturelle, autostabilisation du cœur).

PARTENAIRES

CEA, Schneider Electric. Discussion avec d'autres acteurs en cours.

CALENDRIER

Première mise en service envisagée vers 2040, précédée par la construction d'un démonstrateur.



Revivez le
DÉMO DAY FAST
du 24 mai 2023