

■ Cœur du réacteur SMR NUWARD™ - Crédit photo TechnicAtome.

NUWARD™, le premier SMR français

Renaud Crassous

Directeur de projet SMR, EDF

NUWARD™ un atout supplémentaire de l'industrie électronucléaire française pour répondre aux défis de production d'électricité bas-carbone à l'horizon 2030 dans le monde.

Introduction

L'objectif de limitation du changement climatique à moins de 2 °C requiert de recourir à tous les leviers possibles et économiquement acceptables pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre et tendre vers la neutralité carbone d'ici

2050. Les différents rapports du Groupe international des experts sur le climat (GIEC) ou de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) l'ont reformulé à maintes reprises : une telle trajectoire de réduction requiert à la fois une forte maîtrise de la consommation d'énergie, une décarbonation générale du secteur électrique

mondial, aujourd'hui encore alimenté aux deux tiers par les énergies fossiles, et une substitution massive des usages des fossiles vers cette électricité progressivement décarbonée, même si l'hydrogène, la biomasse ou le gaz vert peuvent aussi jouer un rôle complémentaire dans certains scénarios.

Dans la droite ligne de sa raison d'être, le groupe EDF multiplie les leviers pour assurer une fourniture d'énergie décarbonée et compétitive à ses clients en France, en Europe et à l'international. C'est notamment le cas dans le domaine nucléaire, où l'entreprise renforce son implication et ses investissements dans le projet de petit réacteur nucléaire français (SMR), avec l'intention de proposer ce nouveau produit après 2030, comme une offre complémentaire aux réacteurs de grande et moyenne puissance qui sont déjà disponibles pour les nouveaux projets de la décennie à venir. Le projet de SMR français réunit des entreprises à forte expérience en conception et en exploitation des réacteurs à eau pressurisée : le groupe EDF, CEA, TechnicAtome, et Naval Group.

Les futurs marchés des SMR et la cible de NUWARD™

Des segments de marché multiples

L'ensemble des modèles de réacteurs classés comme SMR (ou AMR pour les réacteurs de génération 4) est très hétérogène. Il embrasse des produits très différents, que l'on pourrait schématiser en trois catégories :

- De 5 à 15 MW : des « micro-réacteurs » destinés à des usages bien particuliers, en soutien des communautés isolées ou pour des usages mobiles ;
- De 15 à 200 MW : par exemple pour fournir de la chaleur et/ou de l'électricité à des sites industriels de grande taille et des industries électro-intensives ;
- De 200 à 400 MW : du même ordre de grandeur que des centrales au charbon ou au gaz ou des grands parcs éoliens offshore (figure 1).

Ces catégories illustrent les différentes utilisations possibles des SMR et des différents segments de marchés qui se formeront probablement dans les décennies à venir. Par ailleurs, le fait de pouvoir

construire des centrales en y ajoutant un nombre de modules variables, comme c'est déjà envisagé par certains concepteurs, ouvre la voie à ce qu'un même concept de chaudière puisse être utilisé dans différentes configurations pour des usages distincts, ou pour atteindre la compétitivité.

Le projet SMR français - fondé sur le produit NUWARD™ et en cours d'avant-projet sommaire, peut être placé dans la troisième catégorie ci-dessus. Il est fon-

dé sur une chaudière nucléaire délivrant 540 MW thermiques, utilisé dans une centrale constituée de 2 chaudières, ce qui conduit à délivrer 340 MW électriques. NUWARD™ vise ainsi en premier lieu le remplacement des centrales à charbon ou à gaz, qui constituera pour les 30 prochaines années un défi immense.

Il n'est guère aisé d'estimer la taille d'un marché qui n'est pas encore matérialisé par des projets concrets et va émerger d'ici 2030 et au-delà. Les observateurs ●●●

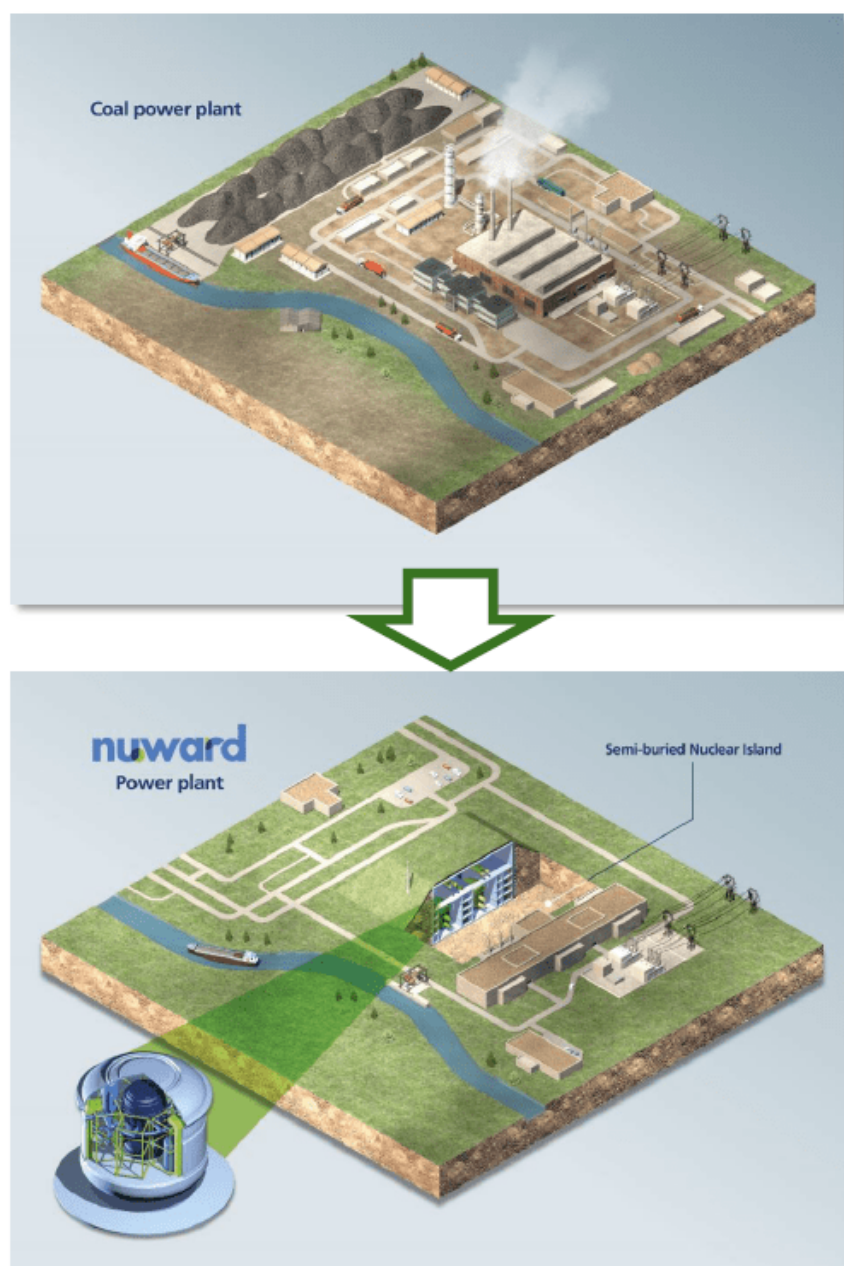


Figure 1 : Remplacement d'une centrale au charbon par une centrale à base de NUWARD™ (©EDF 2020).

●●● s'accordent cependant sur le fait que les perspectives des SMR pourraient se compter à minima en dizaines de GW, dans le contexte d'une intensification de la lutte contre le changement climatique et du besoin de capacités décarbonées pilotables en complément des ENR intermittentes. L'OCDE évalue par exemple le marché potentiel des SMR à 25 GW à l'horizon 2035, soit un marché de 100 Mds d'euros à minima.

Une autre façon d'estimer le besoin est de recenser les tranches charbon devant être remplacées. Si on ne regarde que les pays explicitement intéressés par du nouveau nucléaire, on compte environ 3300 tranches charbon. Plus des trois quarts de ce parc charbon correspond à une capacité unitaire inférieure à 400 MW, 60% a déjà un âge supérieur à 20 ans, 30% plus de 40 ans. Le besoin de remplacement des centrales électriques au charbon existantes, indispensable dans tous les scénarios de limitation du changement climatique à +2°C, est donc considérable dans le segment 200 – 400 MWe. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire peut assurément jouer un rôle majeur dans la transition énergétique ; le produit NUWARD™ fera partie des solutions technologiques pour répondre aux besoins après 2030.

La cible de NUWARD™

Notre SMR est prioritairement orienté sur cette cible et donc destiné à l'export. Le scénario de développement du produit prévoit la construction d'un démonstrateur NUWARD™ en France, car c'est un levier pour sécuriser la maturité industrielle et assurer la crédibilité de notre produit, en disposant d'une centrale de référence licenciée dans notre pays, pour accéder ensuite au marché mondial. Cela suppose de mener un processus complet de certification et d'autorisation par notre Autorité de sûreté française.

Au-delà de cette première orientation électrogène, NUWARD™ sera aussi utilisable pour d'autres usages que la production d'électricité. D'autres applications bénéfiques pour l'environnement sont

également envisageables telles que la production d'hydrogène sans émission de carbone, d'eau douce ou de chaleur pour des réseaux de chauffage urbains.

Les pays intéressés

De nombreux pays ont déjà exprimé leur intérêt pour se doter de SMR, dans le cadre de la décarbonation de leur secteur électrique ou du souci d'assurer la croissance de la demande sans émettre plus de CO₂.

En Europe, le Royaume-Uni, la République tchèque, la Finlande et la Pologne s'y intéressent dans le cadre de leur programme nucléaire en complémentarité avec la forte et la moyenne puissance.

EDF est engagée dans la promotion et la commercialisation de NUWARD™ à l'export, en complément de son offre de forte puissance (EPR) et moyenne puissance (EPR1200).

Au Canada, les acteurs institutionnels et industriels sont alignés autour d'une feuille de route commune destinée à accueillir un premier projet SMR dans le courant de cette décennie.

L'Afrique du Sud considère aussi l'option des SMR dans le cadre de la relance potentielle d'un programme nucléaire en complément des réacteurs de puissance.

D'autres états nouveaux entrants dans le nucléaire, comme l'Indonésie, l'Égypte, la Jordanie et le Ghana s'y intéressent tout particulièrement dans la définition de leurs programmes nucléaires.

La convergence des objectifs de sûreté, clé du succès des SMR

Face à cet intérêt croissant, les pays disposant d'ingénieries et de fabricants de centrales nucléaires sont tous mobilisés pour développer une offre. Les USA en ont fait un objectif de reconquête de leur leadership technologique dès le début des années 2010, avec une convergence d'intérêts portés par le DOE, les laboratoires

fédéraux, les industriels et la NRC. Pour tous les industriels, la clef de la réussite réside dans le fait de pouvoir produire des SMR en série, de manière à rentabiliser des ateliers dédiés et atteindre la compétitivité. L'émergence d'un vrai marché international est indispensable et l'harmonisation de règles du jeu sera décisive pour faciliter l'émergence de nombreux projets.

Depuis quelques années, de nombreuses discussions ont lieu dans les instances internationales de coopération sur le nucléaire civil (AIEA, WENRA, Foratom, EUR, etc.) pour travailler sur l'harmonisation et la normalisation des objectifs de sûreté et les modalités de licensing, sans pour autant enlever sa souveraineté à chaque autorité de sûreté nationale. Le succès de ces démarches pourrait permettre de faire émerger plus rapidement un marché des SMR de plusieurs dizaines de GW dans le monde, une bonne chose pour le climat !

Les concepts de SMR, des réacteurs prometteurs

Les SMR sont de « petits réacteurs pleins de promesses », comme l'a rappelé le Président de la République française Emmanuel Macron lors de son allocution au Creusot en décembre 2020.

Promesse pour le climat d'abord, comme cela a été mentionné précédemment. Du fait de leur puissance unitaire, les SMR peuvent s'adapter à des pays qui ont des difficultés à accueillir des réacteurs à forte ou moyenne puissance, du fait de la taille de leur réseau électrique ou de leur géographie. En ajoutant un levier complémentaire aux autres moyens pour produire de l'électricité sans CO₂, les SMR pourront aider à atteindre des objectifs de réduction des émissions très ambitieux.

Promesse industrielle aussi, car c'est un produit qui génère des emplois hautement qualifiés dans les pays dotés d'une filière nucléaire. Pour la filière française, la perspective d'exporter des dizaines de tranches passe par la construction d'usines dédiées, complémentaires des installations existantes.

Promesse économique enfin. L'approche modulaire et standardisée est un changement de paradigme visant à être aussi compétitive que les centrales de grandes puissances, dans des mix électriques décarbonés où le nucléaire et les renouvelables intermittentes se complètent. Là où la compétitivité des centrales nucléaires à forte puissance est fondée sur l'effet d'échelle apporté par leur niveau de puissance unitaire et la maîtrise des grands chantiers, les SMR reposent sur une autre logique. La standardisation, la modularité et l'effet de série en amont dans la production des modules doivent compenser la perte de l'effet d'échelle obtenu sur les réacteurs de grande puissance. Le temps de construction doit être plus rapide et générer une réduction significative des risques liés aux chantiers. Par exemple, pour NUWARD™, le SMR français, l'objectif est de tendre vers une durée de 40 mois entre le premier béton et la mise en service de la centrale.

Toutes ces promesses doivent bien sûr encore être tenues, pour tous les modèles concurrents dans le monde, y compris notre modèle français.

NUWARD™, un SMR de génération 3 dont la conception s'appuie sur l'expertise française

Le projet français, fondé sur un produit baptisé NUWARD™, pour NUCLEAR FORWARD, est entré officiellement dans une nouvelle phase en septembre 2019, pour 3 ans d'« Avant-Projet Sommaire » ou de « Conceptuel Design ». C'est une phase dans laquelle les principaux choix d'options technologiques doivent être confirmés au niveau de leur maturité technique et industrielle. A la suite de développements antérieurs au sein des ingénieries des différents industriels impliqués, et des travaux de R&D menés en commun depuis 2012, le groupe EDF a pris en 2020 le rôle de chef de file du projet, avec le CEA, et coordonne les contributions de ses sous-traitants stratégiques TechnicAtome et Naval Group.

L'association de ces industriels français dans le projet permet de rassembler un collectif projet très solide et expérimenté autour des technologies des réacteurs à eau pressurisée, maîtrisées par la filière française qui dispose d'une expérience en exploitation de 2000 années-réacteurs en la matière, et largement reconnues dans le monde. Ces expertises sont diverses et complémentaires : EDF pour l'expérience d'architecte-ensemblier et d'exploitant, le CEA pour la recherche et la qualification de nouvelles technologies, Naval Group pour l'expérience en matière de structures modulaires et TechnicAtome qui dispose d'un savoir-faire unique en matière de conception de réacteurs compacts. Enfin, le gouvernement français y apporte son soutien, notamment en attribuant une enveloppe de 50 millions d'euros du plan de Relance pour soutenir les développements technologiques nécessaires au projet NUWARD™ en phase d'avant-projet sommaire.

Le planning directeur du projet prévoit ensuite une phase de *basic design*, puis 3 ans de *detailed design*, en parallèle du processus d'autorisation complet auprès de l'ASN et des démarches visant à permettre la construction du démonstrateur en 2030. Le délai de ces phases est com-

parable à ce que les autres concurrents connaissent ou ont connu au minimum sur les développements en cours.

Le design de NUWARD™, un réacteur compact innovant

NUWARD™ est une centrale de 340 MWe, dotée de deux réacteurs à eau pressurisée (REP) intégrés et compacts de 170 MWe chacun, implantés dans un même bâtiment, qui permet de mutualiser une partie des équipements et la piscine combustible (figure 2). Le réacteur NUWARD™ est intégré, c'est à-dire que l'ensemble du circuit primaire se situe dans la cuve, ce qui est un point commun à d'autres concepts SMR. NUWARD™ se distingue par sa compacité, avec une hauteur très limitée en comparaison d'autres concurrents comme Nuscale ou Holtec.

Principales caractéristiques de conception du SMR français

Le réacteur

Le réacteur NUWARD™ est un réacteur à eau pressurisée entièrement intégré, ●●●

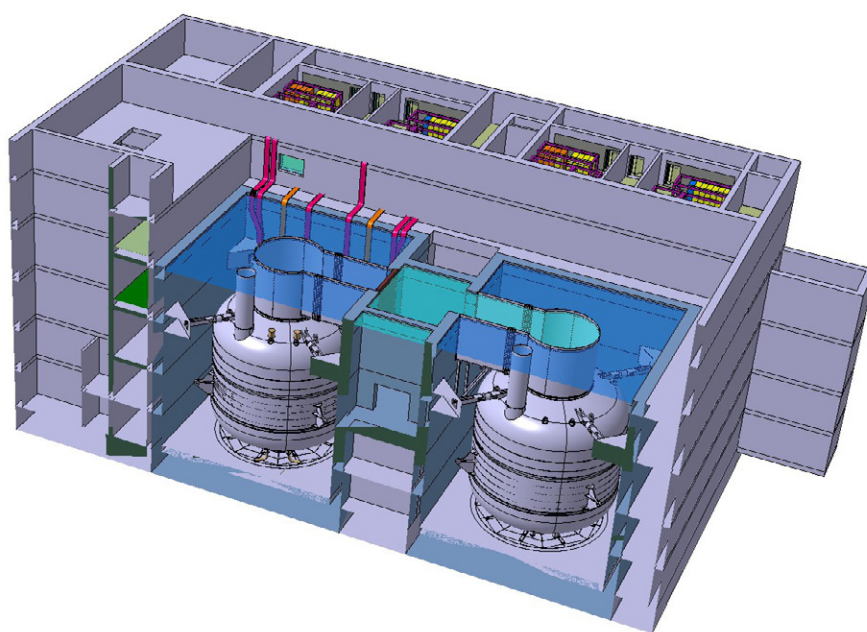


Figure 2 : Configuration d'une centrale de 340 MWe à base de deux SMR NUWARD™ (©EDF 2020).

••• qui abrite dans une seule cuve tous ses composants, y compris les générateurs de vapeur, le pressuriseur et les mécanismes d'entraînement des barres de contrôle. L'intégration des composants primaires dans une seule cuve simplifie l'architecture de l'ensemble et diminue le nombre de systèmes, ce qui facilite aussi une construction et un assemblage au maximum en usine.

Le contrôle de la réactivité

Le cœur est conçu pour fonctionner en eau claire, avec une maîtrise intrinsèque de la réactivité : l'utilisation du bore soluble n'est pas nécessaire. Cette innovation simplifie la conception et l'exploitation des systèmes auxiliaires dans les situations normales et accidentelles (conditions de base de la conception) et réduit la production d'effluents.

Le système de refroidissement du réacteur et du générateur de vapeur

Le système de refroidissement du réacteur est basé sur l'utilisation d'une technologie innovante de générateurs de vapeur à simple passe, sur la base d'échangeurs de chaleur à plaques. Des développements spécifiques en termes de conception, d'essais et de processus de fabrication sont menés pour développer cette technologie unique dans le secteur nucléaire.

“ Le projet NUWARD™ vise à atteindre les meilleurs standards internationaux de sûreté que l'on déploie actuellement sur les grands réacteurs de génération 3, y compris les dispositions post-Fukushima. ”

Le pressuriseur

Le pressuriseur de NUWARD™ est également intégré dans la cuve du réacteur. Cette innovation supprime une capacité sous pression de grand volume et apporte des gains en termes de réalisation et de sûreté. Son développement implique aussi la mise en œuvre de technologies nouvelles et sa conception s'appuie des dispositions actives et passives (figure 3).

Des caractéristiques de sûreté au niveau des meilleurs standards mondiaux Gen3+

Le projet NUWARD™ vise à atteindre les meilleurs standards internationaux de sûreté que l'on déploie actuellement sur les grands réacteurs de génération 3, y compris les dispositions post-Fukushima, c'est-à-dire de manière à garantir l'absence de contre-mesures

en-dehors de la centrale en toute situation.

La conception établit ainsi des systèmes de sûreté associés pour la gestion passive de tous les scénarios du domaine de dimensionnement incidentels et accidentels (dits « *Design Basic Condition* »), sans intervention de l'opérateur, sans source froide externe, sans injection de bore ni alimentation électrique externe (normale et de secours) pendant a minima 3 jours.

Ces systèmes de sûreté intègrent également une gestion active des scénarios du domaine de dimensionnement étendu (dits « *Design Extension Condition-A* ») pour lesquels la fusion du combustible est évitée avec un diagnostic simple et la mise en place de systèmes diversifiés. Enfin est prise en compte la gestion des accidents graves (dits « DEC-B ») pour lesquels la fusion du combustible est postulée malgré toutes les dispositions prises pour la prévenir, et qui est gérée avec une rétention du corium en cuve.

L'approche sûreté de NUWARD™ bénéficiera de caractéristiques intrinsèques à sa conception pour satisfaire à ces exigences internationales :

- Le fonctionnement du réacteur en eau claire empêche les accidents de dilution du bore, tout en diminuant la production d'effluents.

- l'architecture intégrée supprime certains risques tels l'éjection des grappes de contrôle de la réactivité ou les brèches importantes sur le circuit primaire.

- l'enceinte de confinement métallique immergée dans un bassin d'eau assure

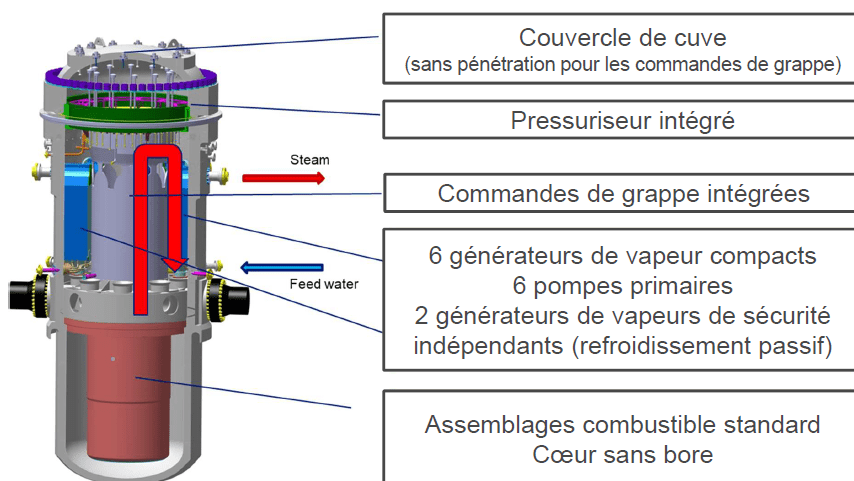


Figure 3 : Détails du réacteur NUWARD™ (©EDF 2020).

Principes de modularité

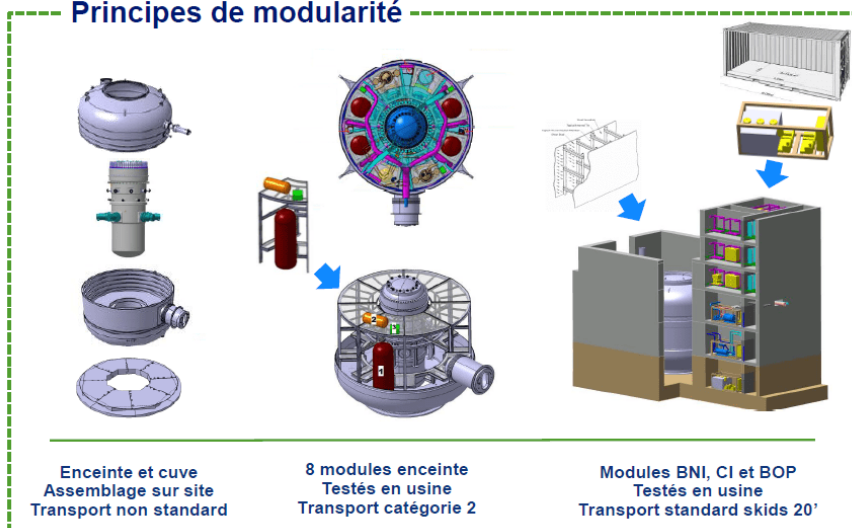


Figure 4 : Modularité de NUWARD™ (© EDF 2020).

un refroidissement naturel pendant plusieurs jours.

- un inventaire important en eau de refroidissement du réacteur (kg/MWth) fournit une grande inertie pour évacuer la puissance résiduelle en situation accidentelle.

- les caractéristiques propres (puissance thermique, géométrie de la cuve) doivent permettre une stratégie de rétention dans la cuve du corium pour les accidents postulant la fusion du cœur.

Performances opérationnelles de la centrale

NUWARD™ vise une disponibilité à pleine puissance supérieure à 90 %, avec des arrêts pour rechargement du combustible de l'ordre de 15 jours tous les 24 mois. La stratégie de référence pour le rechargement consiste à remplacer la moitié d'un cœur tous les deux ans. L'installation offre une capacité de stockage des assemblages combustibles usés pour 10 ans d'exploitation.

L'architecture de la centrale

Les centrales NUWARD™ s'adaptent aussi bien aux sites en bord de mer qu'en bord de rivière, avec un refroidissement par condenseur conventionnel en boucle

ouverte. Néanmoins, un refroidissement par aérocondenseurs est une option possible.

NUWARD™ est également conçu pour satisfaire les exigences de raccordements aux réseaux de transport d'électricité, comme par exemple celles fixées en Europe par l'Association européenne des gestionnaires de réseaux de transport (ENTSO-E), typiquement pour un raccordement 225kV/400kV et 50Hz. Une adaptation aux exigences spécifiques des utilisateurs, telles que 60 Hz, est également possible.

La fabrication modulaire au cœur de la compétitivité

La conception de NUWARD™ progresse avec une exigence de modularité intrinsèque, pour maximiser la production et l'assemblage en usine. Les modules peuvent ensuite être directement transportés sur site, offrant ainsi des gains de

L'auteur



Renaud Crassous

Diplômé de l'École Polytechnique (1997), ingénieur des Ponts, des eaux et des forêts et titulaire d'un doctorat en économie, Renaud Crassous a d'abord travaillé dans le domaine des scénarios énergétiques et des politiques de lutte contre le changement climatique, puis il est nommé au Conseil économique du développement durable (CEDD) auprès du ministre de l'écologie et du développement durable. Il intègre le Groupe EDF en 2009 en tant qu'ingénieur économiste. En 2012, il coordonne l'accompagnement du débat sur la transition énergétique au sein du groupe EDF. En 2017, il prend la direction du centre d'ingénierie responsable de la partie conventionnelle et de la source froide des centrales en exploitation et en construction. En 2020, il devient directeur de projet SMR pour EDF.

Renaud Crassous est auteur de plusieurs publications sur les politiques énergétiques et climatiques, et de travaux de recherche et d'expertise auprès de la Banque Mondiale, du Ministère de l'environnement et du développement durable et de l'ADEME, de la Mission Interministérielle de l'effet de serre (MIES) - ONERC ou encore auprès de l'AIE.



“ Les centrales NUWARD™ s'adaptent aussi bien aux sites en bord de mer qu'en bord de rivière, avec un refroidissement par condenseur conventionnel en boucle ouverte. ”

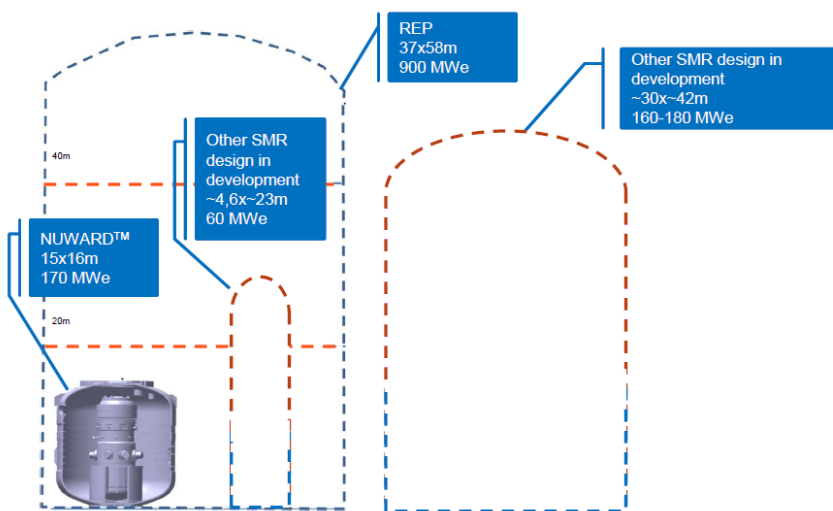


Figure 5 : Comparaison de la taille du NUWARD avec celle de réacteur REP classique (© EDF 2020).

- productivité, une réduction des temps d'assemblage, et une meilleure maîtrise des risques associés (figure 4).

Ces options de conception font de NUWARD™ un produit SMR prometteur, de construction simplifiée, compétitif et offrant un haut niveau de sûreté intrinsèque. Aucun concept SMR n'est véritablement industrialisé à ce jour. Concernant les

pays occidentaux, les premiers projets concrets pourraient voir le jour au Canada, qui vise une première mise en service vers 2028, ou aux USA avec le projet de démonstrateur de Nuscale en Idaho, celui-ci n'étant pas encore lancé. Au-delà de ces annonces, l'enjeu pour tous les projets concurrents est vraiment d'être au rendez-vous avec un produit adapté au marché de la prochaine décennie, dont on peut espérer qu'elle sera celle d'une accélération de la marche mondiale vers la neutralité carbone.

EDF, le CEA, TechnicAtome et Naval Group sont fermement convaincus du rôle des SMR dans le futur mix énergétique, et conduisent ensemble le développement de NUWARD™, seul projet SMR de l'Union européenne. Ce challenge est un beau défi pour la filière nucléaire française et sera un nouveau levier de création d'emplois supplémentaires dans notre industrie, troisième filière industrielle en France. ■

Résumé

Les objectifs bas-carbone retenus pour les décennies à venir vont conduire à devoir remplacer dans le monde quelques milliers de centrales au charbon. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire peut assurément jouer un rôle majeur dans la transition énergétique et les petits réacteurs nucléaires devraient pouvoir offrir une solution technologique pour répondre aux besoins du marché énergétique à l'horizon 2030.

NUWARD™ est une petite centrale nucléaire (SMR) de 340 MWe, dotée de deux réacteurs à eau pressurisée intégrés et compacts de 170 MWe chacun, implantés dans un même bâtiment. Ce projet de SMR réunit des entreprises à forte expérience en conception et en exploitation des réacteurs à eau pressurisée : le groupe EDF, CEA, TechnicAtome, et Naval Group. Il est de construction simplifiée, compétitif et offrant un haut niveau de sûreté intrinsèque.

EDF et ses partenaires sont fermement convaincus du rôle des SMR dans le futur mix énergétique, et conduisent ensemble le développement de NUWARD™, seul projet SMR de l'Union européenne. Ce challenge est un beau défi pour la filière nucléaire française et sera un nouveau levier de création d'emplois supplémentaires dans notre industrie, troisième filière industrielle en France. ■

Abstract

The low-carbon objectives adopted for the coming decades will lead to the need to replace a few thousand coal-fired power stations around the world. In this context, nuclear energy can certainly play a major role in the energy transition and small nuclear reactors should be able to offer a technological solution to meet the needs of the energy market by 2030.

NUWARD™ is a small nuclear power plant (SMR) of 340 MWe, with two integrated and compact pressurized water reactors of 170 MWe each, located in the same building. This SMR project brings together companies with strong experience in the design and operation of pressurized water reactors: the EDF group, CEA, TechnicAtome, and Naval Group. Its construction is simplified, competitive and offers a high level of intrinsic safety.

EDF and its partners are firmly convinced of the role of SMR in the future energy mix, and together lead the development of NUWARD™, the only SMR project in the European Union. This challenge is a great challenge for the French nuclear sector and will be a new lever for the creation of additional jobs in our industry, the third industrial sector in France. ■