Le projet NUWARD™, une nouvelle offre nucléaire européenne au service de la neutralité carbone

Renaud Crassous*

@ 72476

Mots-clés: nucléaire, électricité, bydrogène, Europe, innovation

Le développement de petits réacteurs modulaires connaît un dynamisme sans précédent dans le monde. Les premiers exemplaires des modèles les plus matures, fondés sur les technologies de génération III, sont attendus d'ici 2030. C'est aussi l'horizon visé pour la tête de série du projet NUWARDTM, visant à devenir le modèle européen de référence avec une centrale de 340 MW équipée de deux petits réacteurs modulaires. Cet article resitue le projet dans le contexte mondial et l'histoire des petits réacteurs, pour expliciter le marché visé et les caractéristiques du produit. Il détaille les enjeux de design et de développement, ainsi que les conditions de succès internes et externes.

Même si le développement de concepts de «petits réacteurs modulaires» civils (ou *Small Modular Reactors* − SMR) remonte en France à plus de 10 ans, et dans le monde à plusieurs décennies, c'est bien 2021 que l'on retiendra comme l'année de leur véritable apparition dans le débat public en France. Dans les années précédentes, seuls des observateurs avertis avaient commencé à suivre les projets dans d'autres pays, ou noté au début de la décennie 2010 les travaux de R&D menés par les acteurs de la filière française (AREVA-TA, le CEA, EDF, DCNS) qui allaient devenir partenaires dans le projet désormais appelé NUWARD™.

Après une étude d'opportunité menée conjointement par les partenaires de 2017 à 2019, soutenue par l'Agence Nationale de la Recherche, puis le lancement de la première véritable phase d'ingénierie, appelée avant-projet sommaire ou *conceptual design* en 2019, c'est la mention de ces «petits réacteurs pleins

de promesses» dans le discours du président de la République au Creusot le 8 décembre 2020 puis l'annonce d'un soutien de 1 milliard d'euros dédié à ce segment industriel au premier rang du programme d'investissement France 2030 qui a porté à la connaissance d'un public beaucoup plus large ces nouveaux développements.

Qu'est-ce que ce petit réacteur NUWARDTM? Quels avantages? Pour quels marchés, à l'international ou en France? Quel est le planning de développement? Pourquoi maintenant? Combien va-t-il coûter? Comment le projet est-il structuré et mené? Quelles sont les conditions de son succès?

Autant de questions récurrentes auxquelles nous nous proposons de répondre dans cet article, en resituant NUWARD™ dans le contexte mondial d'un développement très dynamique des concepts de petits réacteurs modulaires (partie 1) et dans l'histoire des

^{*} EDF.

petits réacteurs (partie 2). La partie 3 présente les grandes caractéristiques du produit et du projet NUWARD™. La partie 4 dresse la liste des enjeux techniques, économiques et sociétaux que le projet embrasse. Enfin, la partie 5 analyse les conditions de succès du projet, tant du point de vue du développeur que du côté institutionnel.

1. Une vague mondiale d'innovation industrielle dans le nucléaire

Depuis quelques années, le secteur nucléaire connaît un formidable regain de R&D et de prédéveloppement industriel, en particulier dans les domaines des petits réacteurs modulaires. Le développement de NUWARD™ s'inscrit dans cette dynamique avec les travaux conceptuels puis de R&D menés depuis vingt ans par les partenaires du projet. La base ARIS de l'AIEA, qui recensait en 2020 plus de 70 concepts à travers le monde, est le signe de ce dynamisme, même si tous ces concepts ne sont pas au même stade de maturité. Désormais, dans tous les grands pays dotés d'une industrie nucléaire, les soutiens publics se chiffrent en centaines de millions ou en milliards d'euros pour stimuler les projets et les aider à arriver à maturité, soutien public généralement justifié par le sous-investissement privé dans l'innovation nucléaire (risque d'échec, manque d'incitations à investir sur le long terme) et ses externalités positives.

Pour y voir clair dans la «jungle» des concepts, deux critères sont utiles : le type de réacteur et la gamme de puissance.

Le type de réacteur permet de distinguer :

• Les modèles de génération III+, en grande majorité des réacteurs à eau pressurisée : NuScale et Holtec aux États-Unis, Rolls-Royce au Royaume-Uni, le RITM-200 russe, l'ACP 100 chinois, le modèle iSMR coréen (auparavant SMART) et NUWARD™ en France. On classera aussi dans cette catégorie le BRWX-300 de GE-Hitachi, le seul projet actif fondé sur la technologie à eau bouillante.

• Les modèles dits «avancés» (Advanced Modular Reactor, ou AMR), assimilés à la génération IV, principalement les réacteurs à neutrons rapides au sodium ou au plomb (ou plomb-bismuth), les réacteurs à sels fondus (fluorures et chlorures), ou les réacteurs haute température à gaz (High-Temperature Reactor, ou HTR).

Cette distinction ouvre la question de la maturité technique, économique et industrielle des différents modèles, que de nombreux observateurs se posent. Les concepts sont généralement étudiés déjà depuis plusieurs décennies, certains allant jusqu'à quelques modèles de démonstration. De nombreux projets affichent des dates de mise en service souvent très ambitieuses pour leur démonstrateur ou leur «First-of-a-kind» pour ceux qui envisagent directement une série industrielle. Il est souvent difficile de trier entre la crédibilité industrielle et des effets de surenchère marketing.

Les réacteurs de génération III+, dont fait partie NUWARDTM, sont développés sur la base de technologies qui ont été en majorité déjà testées, industrialisées et commercialisées. Cela permet aux projets les plus rapides de parcourir le cycle complet d'ingénierie en 10 à 12 ans, du lancement du design jusqu'au premier béton, en incluant les démarches d'approbation du design et d'autorisation. Le développement ne nécessite pas de prototype à proprement parler, et l'on parle bien de «tête de série» (Firstof-a-kind ou FOAK) ou «centrale de référence» pour le premier exemplaire. Sur ce segment, les différents projets concurrents annoncent des mises en chantier de leur tête de série d'ici 2030 qui sont crédibles même quand des incertitudes doivent être levées (en termes de choix de site, d'autorisations, de schéma industriel, etc.).

Les réacteurs de génération IV nécessitent des développements nettement plus importants; les experts de ces technologies sont d'avis qu'il faudra attendre 2040 voire 2050 pour la disponibilité industrielle et commerciale de réacteurs de ce type en série. Cet horizon prend en compte les barrières technologiques

qui sont encore à lever, l'enchaînement nécessaire des études, des multiples essais à réaliser, la mise au point des codes de calculs, puis l'établissement d'une démonstration exhaustive de sûreté pour constituer une demande d'autorisation auprès des autorités de sûreté. Ou encore le délai nécessaire à la mise au point, l'autorisation et la construction d'un cycle du combustible amont-aval au stade industriel, car la mise au point du réacteur seul ne suffit pas.

Cet horizon pour les AMR peut paraître conservateur, car il est quasi certain que le foisonnement extraordinaire des initiatives au niveau mondial, le volume sans précédent des investissements et des subventions, ou encore la concurrence qui s'installe entre les développeurs, provoqueront des ruptures technologiques et une accélération des phases de design et de mise au point. La forte probabilité de ces «bonnes surprises» ne doit cependant pas faire oublier que le chemin critique qui mène à l'industrialisation n'est pas qu'une affaire de design et d'apprentissage rapide, mais nécessite la mise au point, l'approbation du design (licensing) et la compétitivité d'une filière complète. Les difficultés de mener de tels projets au bout (techniques, financières, réglementaires) provoqueront aussi probablement une mortalité importante parmi le foisonnement actuel.

Le second critère de différenciation est celui de la taille des réacteurs en développement. Schématiquement, on peut les classer en trois catégories¹ :

- Le segment des microréacteurs, de quelques mégawatts à quelques dizaines de mégawatts, avec deux types de clients potentiels déclarés aujourd'hui : des besoins militaires pour l'alimentation électrique des bases de soutien des théâtres d'opérations²; des besoins hors réseau pour les communautés éloignées aujourd'hui dépendantes de groupes électrogènes.
- Un segment intermédiaire de 50 à 200 MW, correspondant plutôt aux besoins énergétiques d'industries fortement consommatrices de chaleur et d'électricité (par exemple pour les secteurs minier, pétrochimique,

métallurgique ou la production d'hydrogène) ou pour le chauffage urbain³.

• Le segment des centrales électrogènes connectées au réseau, de quelques centaines de mégawatts. Cette catégorie rejoint le besoin de fourniture d'électricité décarbonée et pilotable en substitution des centrales à combustible fossile ou pour accompagner la croissance de la demande d'électricité.

Le produit NUWARD™ se situe dans cette dernière catégorie, avec une puissance électrique totale de 340 MW par centrale, obtenue en juxtaposant deux réacteurs délivrant chacun 170 MW. Cette puissance permet de viser un marché international potentiellement très significatif, déjà bien réel, constitué à la fois des besoins d'augmentation de capacités électriques pour accompagner la croissance de la demande dans le monde, et des besoins de substitution des centrales thermiques au charbon. Les ordres de grandeur des investissements nécessaires à la neutralité carbone nous obligent à considérer qu'il faudrait que le marché des SMR se compte en centaines d'unités : le World Energy Outlook [IEA, 2021] projette une croissance de la puissance nucléaire installée, tous types de centrales confondus, de 415 GW aujourd'hui à 812 GW en 2050. Rien que dans les pays ayant fait le choix du nucléaire dans la durée, plus de 3000 tranches de quelques centaines de mégawatts doivent être déclassées d'ici 2050. Pour que ce déclassement indispensable à la lutte contre le changement climatique ait lieu, il faudra pouvoir compter sur un mix de renouvelables, de nucléaire et peut-être de centrales équipées de captage du CO2. Même si la prudence s'impose sur le fait de réunir les conditions d'un déploiement par dizaines ou par centaines de centrales SMR, il nous semble que le potentiel de marché sera suffisamment large pour que plusieurs modèles coexistent en concurrence dans les décennies à venir.

2. Les SMR vont élargir les possibilités d'utilisation du nucléaire civil

Ce développement des petits réacteurs modulaires est soutenu par deux grandes tendances, dans lesquelles le projet NUWARDTM s'inscrit complètement.

La première d'entre elles tient à l'identification de nouveaux besoins et l'intérêt de nouveaux clients pour l'énergie nucléaire civile : dans un contexte global où la lutte contre le changement climatique devient centrale, la prise de conscience de la place du nucléaire parmi les options disponibles s'accélère. On voit apparaître de nouveaux acteurs inhabituels dans le monde du nucléaire civil :

- Du côté des clients potentiels, on rencontre, en plus des habituels électriciens exploitants nucléaires, des industriels importants ou des infrastructures très consommatrices d'énergie. La crise des prix de l'électricité et du gaz en Europe vient d'ailleurs accroître l'intérêt porté sur le «petit» nucléaire comme source d'énergie pilotable et décarbonée, à coûts prévisibles sur plusieurs décennies. Le Canada est sans aucun doute le pays qui a le plus clairement identifié, de manière concertée, les besoins que les SMR pourraient satisfaire. Pour l'Europe, on pourra se référer à l'analyse prospective du livre blanc publié en 2020 par la division nucléaire de Tractebel [Touré et al., 2020]. Déjà, le projet NUWARD™ reçoit un nombre croissant de sollicitations précommerciales de la part d'industriels ou d'électriciens qui souhaitent connaître le produit et étudier un business plan avec nous.
- Du côté des développeurs, on observe, à côté des grandes entreprises du nucléaire, des structures de taille très variable, y compris des start-ups du nucléaire, dont certaines explorent de nouveaux besoins qui ne sont pas encore exprimés, comme les microréacteurs à usage civil au sein de zones connectées au réseau électrique. En observant ce fait nouveau, on peut en premier lieu se féliciter que le secteur du nucléaire connaisse une émulation technologique et commerciale accrue. Il est aussi

permis d'émettre un doute sur la solidité industrielle des structures les plus «légères» quand elles ne sont pas soutenues de près par de solides institutions publiques ou des industriels confirmés. L'organisation en déploiement pour développer le produit NUWARD™ combine les deux mondes : une structure légère et horizontale privilégiant la vitesse de décision et d'exécution et autorisant la prise de risques, avec un adossement aux compétences profondes de grands acteurs reconnus de la filière à eau pressurisée.

Sur les marchés financiers, l'intérêt pour le nucléaire s'accroît, en particulier sur les SMR, qui portent la promesse d'un profil de risque et d'une chronique de flux financiers plus accessibles que la grande puissance, du fait de chantiers plus courts. Cet intérêt va de pair avec le désengagement croissant des investisseurs vis-à-vis des industries fossiles. même s'il reste dépendant de l'évolution dans le détail des normes extrafinancières comme la taxonomie durable en Europe. Certains projets sont portés par le soutien de milliardaires philanthropes, d'autres ont pu boucler des tours de table de plusieurs centaines de millions assez rapidement, parfois avec une maturité technologique et industrielle peu avancée. Dans la quasi-totalité des cas, les États apportent un cofinancement public du même ordre de grandeur. L'intérêt durable des investisseurs dépendra assurément de la tenue des promesses sur les cibles de coûts d'investissements (cf. partie 4).

La deuxième explication tient à l'histoire industrielle du nucléaire. Les SMR représentent une «autre voie» industrielle, axée sur la simplification, la standardisation, la production en modules en amont des chantiers et l'effet de série — une autre voie que d'autres secteurs, comme le spatial, la construction navale ou l'exploitation pétrolière et gazière ont empruntée avec de beaux succès avant le nucléaire. Le projet NUWARDTM emprunte pleinement cette «autre voie» et a intégré dès l'origine une nouvelle façon de concevoir et d'industrialiser les futures centrales.

En fait, les SMR ne sont pas complètement nouveaux, ils ont fait l'objet de nombreux développements depuis 60 ans [Todreas, 2021] sans jamais devenir une vraie filière industrielle pour des réacteurs terrestres. Le terrain a été en revanche «préparé» pour un basculement en développement industriel, avec les multiples études conceptuelles et les réalisations industrielles du côté de la propulsion navale dans certains pays.

Dès les années 1960, des petits réacteurs pensés pour rester «petits» (et non simplement pour être des prototypes permettant ensuite de croître en taille) et standardisés ont été élaborés pour des usages particuliers, par exemple quelques modèles de microréacteurs pour alimenter des radars ou des bases militaires très isolées, et surtout des réacteurs embarqués pour la propulsion navale militaire (chaufferies de sous-marins et de porte-avions aux États-Unis, en Grande-Bretagne, en Russie ou en France) ou civile (brise-glaces Lenin 3x90 MWt en 1959, HS Savannah 74 MWt en 1962; Otto Hahn 38 MWt en 1968; Mutsu 36 MWt en 1972; Sevmorput 135 MWt en 1988, etc.).

Dans les années 1980 et 1990, les développements de SMR terrestres se sont poursuivis au stade conceptuel, sans passer à l'industrialisation, comme le PIUS (*Process Inherent Ultimate Safety*) en Suède, le MAP (*Minimum Attention Plant*) aux États-Unis, puis le SIR (*Safe Integral Reactor*) avec le Royaume-Uni et enfin le projet américain STAR-LW devenu ensuite IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*), qui rassemblait des contributions d'une dizaine de pays, et fut finalement clos en 2009.

Une motivation forte derrière ces projets était d'aller chercher des gains supplémentaires en sûreté, tels qu'ils étaient formulés dans les objectifs de durabilité au sein du forum génération IV [DOE, 2003], en revenant à une gamme de puissance de quelques dizaines ou centaines de mégawatts permettant d'envisager des réacteurs intégrés, avec des atouts en termes de sûreté intrinsèque (*safety-by-design*), sur lesquels nous reviendrons dans la partie 4.

Une autre motivation tient à l'économie des projets nucléaires. Jusqu'à la fin des années 2000, les économies d'échelle ont dominé dans l'ingénierie des réacteurs civils, les gains économiques compensant le renforcement de la sûreté et les exigences croissantes liées à l'augmentation progressive de la puissance unitaire. Les modèles de grande puissance de génération III fournissent ainsi des moyens de production centralisés, pilotables et décarbonés particulièrement adaptés pour les pays industrialisés avec des réseaux de grande taille. Toutefois, il apparaît désormais évident que la maîtrise de leur complexité nécessite de soutenir une filière industrielle robuste avec une logique de production continue, sans interruption de trop longue durée. Ces conditions sont déjà réunies pour l'industrie nucléaire en Russie ou en Chine, elles sont en train de le redevenir au Rovaume-Uni et en France. Les États-Unis, en revanche, ont clairement fait à la fin des années 2000 le constat que ces conditions ne seraient plus réunies et que l'industrie nucléaire américaine perdrait son leadership dans le monde; le développement des SMR est alors apparu comme la «planche de salut» pour retrouver un leadership technologique mondial sur l'usage civil du nucléaire⁴. C'est à cette époque que les États-Unis (DOE) ont décidé officiellement d'investir massivement cette voie-là.

En termes de conception et d'industrialisation, les SMR présentent une autre voie en comparaison de la grande puissance, avec des atouts suffisants pour intéresser une nouvelle vague d'investisseurs et de développeurs : moindre volume d'investissement, objectifs de plus grande simplicité, promesse de maîtrise des risques chantiers et de compétitivité.

Du point de vue de la demande et du système énergétique global, grande puissance et SMR constituent des marchés complémentaires, pas des substituts. Cela apparaît très clairement dans la stratégie des grands pays nucléaires, qui développent à la fois la grande puissance — pour fournir des dizaines de gigawatts d'énergie décarbonée dans des systèmes électriques à forte croissance ou en fort besoin de

renouvellement, avec un nombre limité de sites nucléaires — et les SMR/AMR pour les besoins industriels souvent en cogénération, les sites non interconnectés ou les réseaux de plus petite taille. La disponibilité de ces différentes tailles de réacteurs sera donc un atout pour atteindre nos objectifs climatiques, en élargissant les usages possibles du nucléaire pour se substituer aux fossiles.

3. Le produit NUWARDTM

Le projet NUWARD™ a été initié en tant que projet industriel en 2019, sur la base de travaux de R&D réalisés dès le début de la décennie voire antérieurement par les partenaires du projet, TechnicAtome, le CEA, Naval Group et EDF. En 2019, ce démarrage faisait immédiatement suite à une phase de «pré-APS⁵», dans laquelle les quatre partenaires avaient investi avec le soutien de l'Agence Nationale de la Recherche de 2017 à 2019, et qui a permis de confirmer l'opportunité industrielle et commerciale du projet.

Les objectifs commerciaux du produit NUWARD™ ont été clarifiés à l'occasion de

l'entrée en APS : développer pour le marché international une centrale complète de production d'électricité et de chaleur décarbonée et compétitive, sur le segment 200–500 MWe, à partir de technologies majoritairement connues et maîtrisées et d'un cycle du combustible déjà opérationnel (choix de la génération III) pour garantir la mise sur le marché d'ici 2030. L'ambition des partenaires du projet est de développer, grâce à leurs capacités industrielles et à leurs savoir-faire combinés, une offre complète de conception, d'industrialisation et de mise en service de bout en bout, en s'appuyant en particulier sur les fournisseurs industriels européens.

Cette ambition se décline en exigences de haut niveau qui guident le travail de conception et de préparation de l'industrialisation, notamment :

- La compétitivité sur la production d'électricité décarbonée en base (cf. partie 4), qui découle à la fois du coût d'investissement *overnight*, et des conditions de financement, notamment via la maîtrise des risques de design et de construction.
- La standardisation maximale pour le marché international, qui se décline sur les

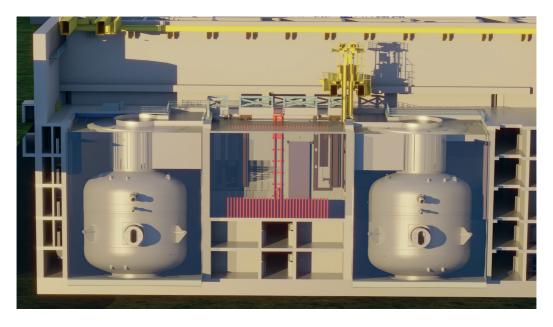


Figure 1. Coupe du bâtiment réacteur d'une centrale NUWARDTM

choix de conception, les choix de codes de justification de la conception, la stratégie de dialogue avec différentes autorités de sûreté.

• La sécurisation de l'horizon 2030 pour le premier béton de la centrale de référence, qui est un déterminant clef des choix de design et de développement des innovations technologiques et industrielles dans NUWARDTM.

Pour réaliser cela, le choix de la base technologique a été confirmé à partir du concept de réacteur intégré i54 développé par TechnicAtome. Les grandes options d'architecture de la centrale et de ses systèmes principaux sont progressivement validées dans la phase de conceptual design (2019-2022). Le réacteur est totalement intégré : l'ensemble du circuit primaire (générateurs de vapeur, pressuriseur, mécanismes de commande de grappes) se situe à l'intérieur de la cuve du réacteur, avec des équipements spécifiques développés et dimensionnés pour que les dimensions de la cuve restent compatibles avec les outils de fabrication industriels actuels. La cuve est ellemême située à l'intérieur d'une enceinte métallique, qui joue le rôle de troisième barrière de confinement. Enfin, la centrale NUWARD™ dispose d'un système passif pour assurer le refroidissement du réacteur à l'arrêt en toute situation, offrant un délai de grâce de plusieurs jours avant toute nécessité d'intervenir : c'est le rôle de la réserve d'eau ultime dans laquelle est immergée l'enceinte métallique (Figure 1). La conception d'ensemble de la centrale NUWARD™ vise la généralisation de la modularisation, de manière à engranger un maximum de gains en qualité, planning et coûts, grâce au fait qu'une part importante des activités de montage et de test peut être exécutée en usine plutôt que sur le chantier lui-même. Enfin, la conception inclut aussi dès le départ les dispositions nécessaires à diversifier les débouchés via une cogénération de vapeur, qui peut être dimensionnée pour alimenter une production par électrolyse haute température ou une installation de dessalement.

Le planning directeur du projet est guidé par l'objectif d'être prêt pour déployer de multiples projets dans la décennie 2030. Le projet est en phase d'APS jusqu'à la fin 2022, date à laquelle est visé un niveau suffisant de maturité technique et économique pour soumettre le dossier d'options de sûreté (DOS) à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et entrer en Basic Design (ou avant-projet détaillé) en 2023. Cette phase-là est actuellement planifiée jusqu'en 2026, horizon auquel une décision d'investissement dans la centrale de référence (tête de série) devra être prise, en même temps que le dépôt d'un rapport préliminaire de sûreté auprès de l'ASN. Ce calendrier est aujourd'hui fondé sur le scénario central d'une centrale de référence en France, gage de crédibilité commerciale et industrielle à l'export. Cela suppose bien sûr de franchir les étapes nécessaires de dialogue avec les autorités, de concertation publique, et les jalons réglementaires. D'ici 2026, le projet pourra confirmer l'horizon 2030 pour le premier béton, le schéma industriel complet, le délai du chantier et la date visée de mise en service. Cette confirmation sera adossée à une exigence suffisante d'avancement du design, de robustesse de la démonstration de sûreté et de préparation de l'industrialisation. Les mêmes ingrédients permettront d'entamer les discussions de précommercialisation avec les potentiels clients intéressés.

Le projet NUWARD™, né au sein de la filière nucléaire française, a une visée internationale. Il s'est doté d'un comité consultatif constitué de clients potentiels et d'experts (International NUWARDTM Advisory Board ou INAB), annoncé au Word Nuclear Exhibition de décembre 2021, qui formulera des avis réguliers sur l'avancement de la conception et de l'industrialisation du produit. Le projet cible prioritairement le marché européen, en tant que seul projet SMR électrogène de troisième génération en cours de développement au sein de l'UE. Cette ambition européenne se décline dans des coopérations étroites en Europe à plusieurs niveaux. En matière de conception et de schéma industriel, le projet vise à étendre progressivement son schéma industriel à l'échelle européenne. En matière de dialogue avec les régulateurs, le projet bénéficie maintenant d'une initiative inédite d'évaluation conjointe des choix techniques de NUWARD™ par les autorités de

sûreté française, tchèque et finlandaise qui permettra de dégager les options de conception standardisées qui pourront être le plus largement acceptées dans différents pays.

4. Les enjeux techniques, économiques et sociétaux de ce nouveau modèle de centrale

Les avantages recherchés avec les SMR de plusieurs centaines de mégawatts connectés au réseau en général, et NUWARD™ en particulier, sont bien identifiés [Carelli et al., 2010], et ils se confirment ces dernières années dans un contexte de transition énergétique et de recherche de souveraineté technologique et industrielle.

• Dans le domaine de la sûreté : la taille plus modeste des réacteurs permet d'atteindre les objectifs de sûreté de la génération III+ par d'autres moyens que pour la grande puissance, notamment la réduction de certains initiateurs d'accidents (*safety-by-design*), et le recours à des systèmes de sûreté passive garantissant le refroidissement autonome du réacteur à l'arrêt, en toute situation, pendant plusieurs jours.

Dans nos échanges avec les autorités de sûreté comme dans les forums internationaux, ces attributs conduisent certains clients potentiels ou certains développeurs à envisager la possibilité de réduire ou de supprimer la zone d'évacuation d'urgence (EPZ) autour des sites SMR et de les implanter sur des sites proches des agglomérations ou des zones industrielles (Figure 2). La poursuite du dialogue avec les régulateurs permettra de confirmer la démonstration complète de sûreté au fur et à mesure des étapes successives de licensing, y compris la bonne prise en compte des effets sur la sûreté et la sécurité d'un plus grand nombre de réacteurs, ou de leur répartition sur un plus grand nombre de sites. Pour NUWARDTM, nous en aurons un premier bilan avec d'une part le process d'évaluation conjointe de notre conception par les régulateurs français, tchèque et finlandais, et d'autre part l'avis formel de l'ASN sur le dossier d'options de sûreté que nous déposerons à l'issue de la phase de conceptual design.

• En matière de compétitivité, les objectifs annoncés par les développeurs pour les SMR les plus matures, de la génération III, les placent en bonne position parmi les moyens de production d'électricité décarbonée. Les cibles



Figure 2. Vue d'une centrale $NUWARD^{TM}$ dans un environnement périurbain

de coût overnight — la métrique la plus utilisée par les développeurs — sont entre 2200 €/ kW et 6000 €/kW selon les modèles. La borne basse correspond à un coût complet très compétitif, de 40 à 60 €/MWh, tandis que la borne haute peut conduire à 70-100 €/MWh pour l'Europe (ceci pour un coût du capital de 4 à 6 %, la conversion entre coût d'investissement overnight et coût complet annualisé restant très dépendante du coût du capital accessible pour un SMR). Il reste difficile de distinguer à ce stade, derrière les annonces des développeurs. les annonces marketing des cibles réellement atteignables. Cependant les bénéfices cumulés de la simplicité du design, la modularisation, la standardisation et l'effet de série permettent d'envisager un coût de série compétitif sur le marché européen, comme indiqué plus loin.

- C'est aussi par l'accès facilité à un financement bon marché que les SMR comptent tirer une partie de leurs arguments économiques, grâce à deux effets majeurs :
- Un simple effet de taille unitaire qui situe l'ordre de grandeur du financement recherché au niveau du milliard d'euros pour un SMR, un niveau plus largement accessible et plus facilement diversifiable que les projets d'unités de grande taille;
- Un modèle d'industrialisation, de modularisation et de standardisation qui doit permettre de réduire les risques industriels de manière très significative, avec des pièces forgées de plus petite taille et en localisant une part importante de la fabrication de chaque centrale sous forme de modules préassemblés dans des ateliers dédiés. Les durées attendues des chantiers de construction eux-mêmes sont réduites à trois ou quatre ans maximum. La part de dépenses anticipées en amont du chantier sera alors plus importante pour les approvisionnements et les montages des modules. Globalement, la prime de risque et le coût du capital seront d'autant plus faibles que la démonstration de la maîtrise industrielle se concrétisera.
- La multiplicité des débouchés possibles pour l'électricité ou la chaleur produites par les SMR nourrit aussi l'attente d'un marché

profond pour les décennies à venir, même si cela est entouré d'incertitudes. La plupart des développeurs mettent ainsi en évidence la possibilité d'implanter leur modèle sur des réseaux plus modestes que les grands réseaux interconnectés, ou encore l'intérêt de la cogénération pour la production d'hydrogène décarboné, le dessalement, la fourniture de chaleur industrielle. Cela se concrétise d'ailleurs déjà aujourd'hui par de multiples prises de contact, par des acteurs très divers (électriciens, industriels, zones portuaires, collectivités locales) pour élaborer des études préliminaires de business plan. Ces perspectives résonnent aussi avec l'exploration croissante des concepts de hubs énergétiques et les réflexions sur le couplage sectoriel des vecteurs énergétiques décarbonés.

Revenons sur les conditions de succès économique qui font souvent l'objet de débats. Elles sont bien identifiées au sein de la filière et dans la littérature spécialisée. Pour atteindre la compétitivité par une autre voie qu'en allant chercher l'effet puissant des économies d'échelle liées à la taille de l'installation, le projet NUWARDTM cumulera les leviers suivants :

- La recherche systématique de la simplification dans les spécifications de la centrale et des systèmes qui la composent, puis dans les choix de conception et d'équipements pour y répondre. La puissance limitée d'un SMR doit permettre de réduire le nombre de systèmes, ou encore de requestionner des surexigences accumulées par le passé. Cette recherche de simplicité ne se fait pas au détriment de la sûreté; elle peut même servir la sûreté lorsqu'elle concourt à réduire le nombre de défaillances à prévenir ou à la simplicité de l'exploitation elle-même.
- La modularisation de la conception⁶, qui est un levier puissant pour réduire et simplifier l'activité sur les chantiers, en réalisant une partie des montages en amont dans des ateliers dédiés. Des gains importants en planning et en coût ont été engrangés dans les secteurs qui ont emprunté ce chemin avant le nucléaire pour la conception de leurs installations complexes (construction navale, oil & gas, spatial) ou chez les concepteurs nucléaires

qui ont commencé à proposer des designs plus modularisés sur certaines parties de centrales [Wrigley et al., 2021]. La construction navale utilise ainsi la règle du pouce 1-3-8 : une activité donnée qui prend 1 heure en étant optimisée dans une chaîne de production d'une usine dédiée prendra 3 jours sur une aire d'assemblage sur site ou 8 jours en montage direct sur le chantier [Maronati et al., 2018]. La littérature fait ainsi état de gains de 12 à 15 % sur le coût d'investissement et de 20 à 25 % sur le planning concernant les parties de centrales modularisées. Même si cette approche n'est pas applicable à 100 % de l'installation, elle est donc susceptible de contribuer largement à la compétitivité des SMR.

- La standardisation du design doit permettre de réduire au minimum le besoin d'adaptation au site, de reprise du design ou de la démonstration de sûreté à chaque projet dans chaque nouveau pays «client». Cette standardisation nécessite à la fois un travail du côté des concepteurs et aussi une harmonisation internationale progressive des approches de sûreté nationales, des équivalences de normes et standards, voire des procédures d'évaluation conjointe (joint assessment) qui permettent de dé-risquer un design standard en amont. Cela peut et doit se faire sans rien enlever à la souveraineté et la responsabilité de chaque autorité de sûreté dans les autorisations qu'elle instruira et délivrera in fine. Les institutions internationales y travaillent, mais ne peuvent guère qu'énoncer des principes englobants tant que quelques autorités de sûreté ne les traduisent pas concrètement sur un design particulier pour œuvrer vers une harmonisation en profondeur.
- Enfin, l'effet de série est nécessaire et aussi possible sur des SMR fabriqués et installés en plus grand nombre. Il peut prendre plusieurs formes : *learning-by-doing* lié au nombre croissant d'exemplaires livrés, gains liés à la colocalisation sur le même site de plusieurs unités en chantiers successifs (tels qu'on les observe déjà quand on installe deux unités de grande puissance sur un même site comme à Hinkley Point), gains liés à l'optimisation d'outils industriels à pleine capacité. À l'échelle inférieure, l'effet de série provient

aussi du nombre d'équipements identiques sur une même installation : la centrale NUWARD™ comprend par exemple 2 réacteurs intégrés équipés chacun de 8 générateurs de vapeurs à plaque, 6 pompes primaires, etc.

Il est important de souligner que ces leviers sont à la fois dans nos mains de développeurs en ce qui concerne le design et la stratégie d'industrialisation, mais aussi dépendants des institutions publiques nationales et internationales, qui peuvent créer les conditions d'émergence d'un écosystème régulatoire adapté pour les SMR. Ce second volet «régulatoire» constitue d'ailleurs une condition nécessaire pour la réussite des SMR dans leur ensemble, et son absence peut constituer un frein pour que le marché décolle rapidement, puisque les développeurs de SMR devront se constituer une file d'attente de projets pour pouvoir engranger les effets d'industrialisation en série. Si le contexte international reste non standardisé, le marché est peu susceptible de croître rapidement d'ici 2030, même si les têtes de série de certains acteurs seront probablement mises en chantier avant. Cette situation donne un avantage clair aux développeurs qui peuvent compter sur une série «domestique» pour démarrer l'industrialisation, comme ce sera probablement le cas en Russie ou en Chine, peut-être au Royaume-Uni. En France, ce pourrait être le cas avec l'hypothèse d'une série de NUWARD™ complémentaires à un palier de grande puissance, comme le dessine le scénario N03 du rapport «Futurs énergétiques 2050» de RTE.

5. Les leviers du succès industriel et commercial du NUWARD™

Le développement de NUWARD™ va bénéficier pleinement de la dynamique de reconquête des compétences de la filière nucléaire bien entamée depuis 10 ans et le rebond des compétences d'ingénierie, de chantier, de fabrication. Cela fait partie des conditions de succès «intrinsèques» au projet, sous la responsabilité d'EDF et de ses partenaires industriels :

- Le recours aux meilleures méthodes d'ingénierie et de pilotage de projet. En ce domaine, le projet NUWARD™ bénéficie du retour d'expérience de multiples projets ces dix dernières années, enrichi par la diversité des expériences des différentes ingénieries partenaires, de la transformation digitale de l'ingénierie nucléaire, des axes de transformation transverses du plan EXCELL⁷, du *benchmark* d'autres grands secteurs industriels. Le paradigme SMR simple, standard, modulaire nous pousse précisément à intégrer tous ces enseignements sur l'industrialisation dès la conception et à valoriser encore plus les bénéfices de l'usage de standards industriels.
- Une connexion très forte avec les fournisseurs d'équipements, très en amont dans la conception : comme c'est déjà le cas systématiquement dans d'autres industries, les fabricants doivent être associés au plus tôt dans les choix de conception, sollicités à travers des préétudes en parallèle, ou dans des schémas d'innovation ouverte partant de l'usage final et de la fabricabilité.
- Le renforcement de la dimension partenariale entre les contributeurs du projet, avec des conditions favorisant la coopération à tous les étages contractuels ou organisationnels.
- Le bon dosage entre l'agilité organisationnelle, et l'appui sur des compétences existantes solides. Le phénomène «Elon Musk» alimente de multiples commentaires sur la recette qui garantirait le succès, mettant en avant l'agilité, l'autonomie, la prise de risques des start-ups, et arguant que les grands groupes ou institutions ne sont pas organisés pour cela, voire même qu'ils sont inadaptés dans leur culture. Cette réalité nous met au défi, et elle nous inspire très fortement. Le projet

NUWARD™ privilégie la vitesse d'exécution, la prise de risques sur les bons sujets, la capacité à échouer rapidement pour réorienter tout aussi rapidement le travail («fail fast»), les dérogations utiles aux processus administratifs complexes, avec un schéma d'organisation ramassé, très horizontal, et un haut niveau d'autonomie. Ne perdons pas de vue cependant que l'adossement à de grands acteurs du nucléaire apporte la robustesse et le «droit au but» dont nous avons besoin, grâce à leurs compétences solides et profondes sur les technologies liées aux réacteurs compacts, au fonctionnement des centrales à eau pressurisée et à leur exploitation, ainsi qu'aux exigences de licensing dans différents pays.

Par ailleurs, le succès requiert aussi des conditions externes :

- Une aide publique à l'innovation importante et avec de la visibilité : dans tous les pays concurrents, l'accélération de l'innovation industrielle (spatial, aéronautique, défense, énergie, etc.) jusqu'à l'industrialisation est massivement et directement subventionnée, parfois soutenue par la commande publique ou les programmes de défense, ou encore adossée à des institutions publiques fournissant la propriété intellectuelle. En France, le récent plan France 2030 prévoit une dotation de 1 milliard d'euros pour son premier objectif visant l'émergence des petits réacteurs modulaires et les technologies permettant de réduire les déchets, dont une enveloppe de l'ordre de 500 M€ pour soutenir le développement de NUWARD™ jusqu'à la tête de série. Ce soutien hisse le soutien public français au projet à un niveau comparable aux montants mobilisés pour d'autres projets concurrents.
- Une coordination renforcée des acteurs publics (administrations, régulateur, collectivités) et privés (NUWARD™ et ses partenaires industriels), de manière à fluidifier les échanges très denses et les prises de décisions multiples tout au long du projet. Le chemin critique du projet pour atteindre son objectif planning 2030 passe non seulement par le développement technologique, mais aussi par les démarches administratives et le processus de *licensing*. La volonté politique d'aller vite et

de figurer parmi les meilleurs dans la compétition internationale doit se traduire, en miroir d'une organisation industrielle optimisée, dans un «mode projet» aussi du côté des acteurs publics, qui doivent être intéressés au succès de ce projet, porteur d'innovation, d'emplois en France et de souveraineté technologique et énergétique. Cette efficacité et cette coordination des parties prenantes seront décisives dans de multiples domaines impliquant les autorités publiques et administratives tout au long du projet : financement, contrôles des exportations, diplomatie nucléaire, licensing, choix du site, étapes réglementaires, concertation publique, etc. De ce point de vue, l'annonce récente de la mise en place d'un délégué interministériel aux nouveaux projets nucléaires est un signe très encourageant.

• Les actions nécessaires à l'émergence de l'écosystème des SMR en Europe, que nous avons évoquées plus haut : convergences des exigences spécifiques à chaque pays, équivalences dans les normes et standards utilisés, processus d'évaluation conjointe et simultanée par plusieurs régulateurs de plusieurs pays, accords entre pays sur l'équivalence de certaines étapes des processus d'examen et d'autorisation. Malgré les efforts des organisations internationales, à travers de multiples initiatives, un travail très important reste nécessaire pour déboucher sur des mesures concrètes qui faciliteront l'émergence de centrales de conception standardisées pour plusieurs pays à la fois.

Le projet NUWARD™ s'inscrit dans un mouvement mondial très dynamique sur les petits réacteurs modulaires, ouvrant de nouvelles perspectives d'utilisation économique et sûre de l'énergie nucléaire civile au service du climat et de la sécurité énergétique. Il dispose d'atouts technologiques et industriels avérés vis-à-vis de ses concurrents, du fait de son assise sur un partenariat solide au sein de la filière nucléaire française, qui s'étoffera progressivement avec un schéma industriel de plus en plus européen. Son succès dépendra bien sûr des choix d'options de conception, d'industrialisation et de réalisation à faire au cours de son développement à venir, de manière à conforter sa compétitivité pour les

futurs clients. Il dépendra aussi, comme pour ses concurrents directs, de l'avènement d'un écosystème favorable aux SMR d'ici 2030, enjeu majeur qui concerne au premier rang les institutions publiques nationales et les organismes internationaux.

RÉFÉRENCES

AIEA, 2020. Advanced Reactors Information System, https://aris.iaea.org.

Barenghi, S., Boarin, S., Ricotti, M.E., 2012. In: Investment in Different Sized SMRs: Economic Evaluation of Stochastic Scenarios by INCAS Code. Proceedings of ICAPP'12, paper 12322, Chicago.

Carelli, M. D., Garrone, P., Locatelli, G., Mancini, M., Mycoff, C., Trucco, P., Ricotti, M. E., 2010. Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors, *Progress in Nuclear Energy*, 52, 403-414.

DOE, 2003. IRIS Final Technical Report, Report number: STD-ES-03-40, led by Mario D. Carelli.

GIEC, 2001. Third Assessment Report, Working Group III. IEA, 2021. *World Energy Outlook*, Agence Internationale de l'Énergie, 386 p.

Maronati, G., Petrovic, B., Van Wyk, J. J., Kelley, M. H., White, C. C., 2018. EVAL: a methodological approach to identify NPP total capital investment cost drivers and sensitivities. Prog. Nucl. Energy 104, 190–202. https://doi.org/10.1016/j. pnucene.2017.09.014.

Rosner R., Goldberg, S., 2001. *Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.*, Technical Paper, Energy Policy Institute of Chicago, prepared for US DOE through Argonne National Laboratory.

Todreas N., 2021. *Small Modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: An introduction*, Handbook of Small Modular Nuclear Reactors, pp. 3-27.

Touré, A., Piette, C. Monette, Ph., 2020. *The rise of Nuclear Technology 2.0, Tractebel's vision on Small Modular Reactors*, 34 p., Décembre 2020.

Wrigley P. A., Wood P., O'Neill S., Hall R., Robertson D., 2021. Off-site modular construction and design in nuclear power: a systematic literature review, *Progress in Nuclear Energy*, 134, 1-15.

NOTES

- 1. Cette distinction reprend la classification établie dans la roadmap SMR du Canada, qui a exploré les différents segments sur lesquels les SMR pouvaient être utiles dans la stratégie de décarbonation du pays.
- 2. Appel d'offres du DOE, modèle eVINCI développé par Westinghouse.
- 3. Par exemple en Finlande, où VTT développe ainsi un concept à eau pressurisée de 50 MW destiné à être inséré dans les systèmes de chauffage urbain.
- 4. «A viable US-centric SMR industry would enable the US to recapture technological leadership in commercial nuclear technology, which has been lost to suppliers in France, Japan, Korea, Russia, and, now rapidly emerging, China». [Rosner et Golber, 2011].
- 5. APS: avant-projet sommaire, ou conceptual design.
- 6. La sémantique autour de la modularité ou de la modularisation n'est pas vraiment stabilisée; pourtant on pourrait distinguer l'action de concevoir la centrale avec des gabarits de modules qui peuvent être pré-montés en usines et assemblés entre eux sur site, du fait qu'une centrale nucléaire SMR peut contenir plusieurs réacteurs sous formes de modules juxtaposés les uns aux autres, comme pour le design américain de NuScale.
- 7. Plan de la filière nucléaire pour reconquérir les compétences et la maîtrise des grands projets lancé à la suite du rapport Folz sur le retour d'expérience de l'EPR de Flamanville.

BIOGRAPHIE

Diplômé de l'École Polytechnique, ingénieur des Ponts, des eaux et forêts et docteur en économie, **RENAUD CRASSOUS** débute comme chercheur en économie de l'énergie. Il est membre de la délégation française auprès du GIEC en 2007. Il rejoint EDF en 2009 au sein de la Direction Stratégie et Prospective et fait partie du groupe des experts du débat national sur la transition énergétique en 2013. Puis il dirige l'exploitation des barrages du bassin de la Dordogne, avant de rejoindre l'ingénierie nucléaire au CNEPE, l'entité responsable de la partie conventionnelle des centrales. En 2020, il devient directeur du projet Nuward.

À lire également dans La Revue de l'Énergie

- Regards d'un pétrolier sur l'avenir des petits réacteurs modulaires, *Pierre-René Bauquis* $(n^{\circ} 651, juillet-août 2020)$
- Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire? Approche géopolitique et stratégique, *Michel Derdevet, Nicolas Mazzucchi (n° 657, juillet-août 2021)*
- Transport maritime et course aux SMR avancés, Samuel Furfari, Ernest Mund (n° 661, mars-avril 2022)

À retrouver sur **www.larevuedelenergie.com**.