

SITUATION ET PERSPECTIVES DES PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES (SMRs)

Dominique Vignon

Membre de l'Académie des technologies

Séance du 23 février 2022

Résumé

Dans l'énergie, le fait que plus la puissance augmente plus le coût spécifique diminue - tandis que les coûts de sûreté varient peu - a longtemps expliqué la tendance à la croissance de la taille des réacteurs. Toutefois, en parallèle des difficultés rencontrées sur des têtes de série de gros réacteurs, le développement des projets de petits réacteurs (Small Modular Reactors) est en pleine effervescence tant au niveau de la R&D que des développements pré-industriels et industriels. Ces SMRs présentent de nombreux atouts permis par l'optimisation du design, qui ouvre un vaste champ des possibles pour la sécurisation des systèmes, le coût intrinsèque des projets et leur acceptabilité sociale : haut niveau de sûreté passive, modules préfabriqués en usine, besoin réduit de financement par unité construite, simplicité, compétitivité, polyvalence d'utilisations, gestion vertueuse des déchets... Ils constituent aussi un terrain d'innovation itérative très prometteuse.

En France, plusieurs projets sont en développement ; compte tenu du temps disponible, la séance se limite à la présentation de deux d'entre eux : le SMR NUWARD et le mini-réacteur calogène Jimmy, lequel vient de conclure sa première levée de fonds et est candidat à « France 2030 ». Tous deux témoignent du dynamisme de la filière nucléaire et du renouvellement de son image.

Intervenants

Jacques Chénais

Ingénieur, ancien directeur de la propulsion nucléaire du CEA, conseiller de l'administrateur général du CEA pour les SMRs, directeur de l'ingénierie de TechnicAtome

Renaud Crassous

Ingénieur, directeur du projet SMR Nuward (Small Modular Reactor) chez EDF

Antoine Guyot

Ingénieur, CEO de Jimmy

Mathilde Grivet

COO de Jimmy, responsable du développement commercial.

Sommaire

Panorama du développement des SMRs dans le monde	2
Les challenges à relever et le projet français de réacteur de puissance : NUWARD	4
Les microréacteurs, un exemple très innovant :	
Jimmy, réacteur calogène de 10 MWth	6
Débats	7

Précisions sémantiques et technologiques

Un réacteur de fission produit de la chaleur à partir d'uranium. Exception faite des réacteurs à neutrons rapides, cette réaction impose de réduire la vitesse des neutrons avec un « modérateur ». La chaleur du cœur du réacteur doit être transférée grâce à un « caloporteur » (eau, gaz, métaux liquides, sels fondus...).

Tous les réacteurs sont contraints par des problématiques de sûreté, qui recouvrent le contrôle de la réaction nucléaire, le confinement des produits de fission et l'évacuation de la puissance.

On caractérise les réacteurs par les couples « modérateur/ caloporteur », et par leur taille :

- « mini » réacteur, 5 MW
- « petit » réacteur (SMR), entre 50 et 500 MW
- « gros » réacteur, entre 1 000 et 1 600 MW

Un particulier dispose généralement de 6 kW. Un MW correspond à l'appel maximum d'environ 150 ménages.

En France, la puissance installée effectivement disponible est un peu inférieure à 100 GW. Un gros réacteur représente donc environ 1,3% de la puissance installée française.



Panorama du développement des SMRs dans le monde

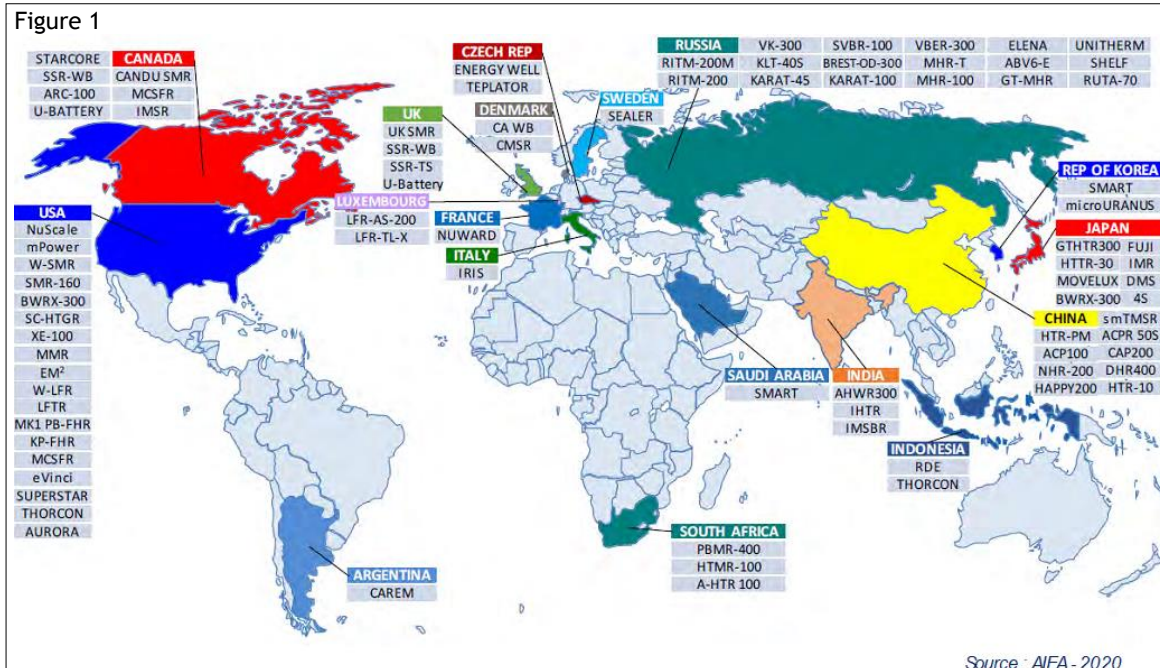
Renaud Crassous et Jacques Chénais

Renaud Crassous est ingénieur, il est le directeur du projet SMR NUWARD chez EDF.

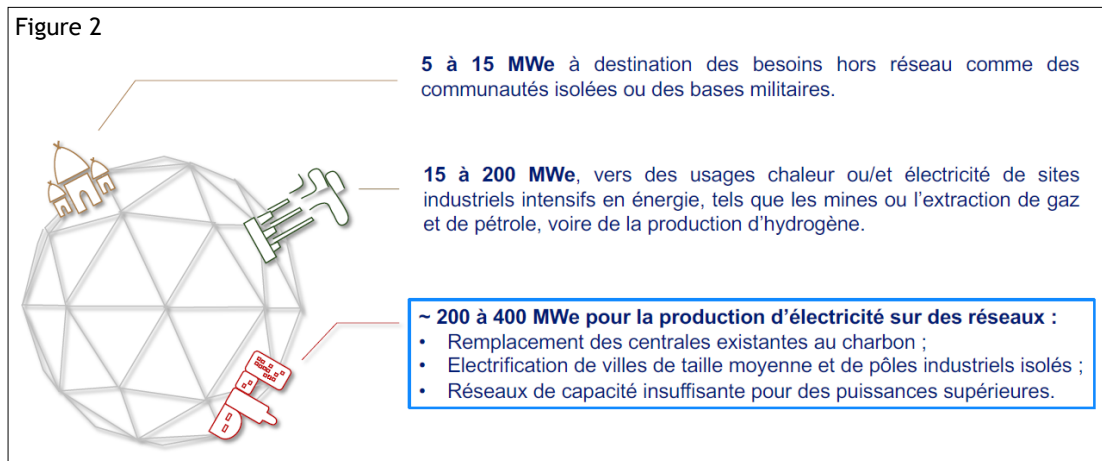
Jacques Chénais est ingénieur et ancien directeur de la propulsion nucléaire du CEA, conseiller de l'administrateur général du CEA pour les SMRs et directeur de l'ingénierie de Technicatome.

Décryptage du dynamisme des SMRs

La base ARIS 2020 de l'AIEA, qui recense 72 concepts de SMRs, fait ressortir une profusion dans les grands pays nucléaires que sont les États-Unis, la Chine et la Russie, mais aussi une émergence de concepts innovants dans des pays sans industrie nucléaire forte (figure 1).



Les deux principales clés d'analyse sont le type de réacteur et la taille, liée à la spécificité des besoins (figure 2).



Ce troisième segment, centré sur l'électrogène connecté aux réseaux, vise à décarboner le secteur électrique. Parmi les pays qui ont le plus avancé dans leur prospective énergétique, le Canada est le seul à avoir élaboré une roadmap complète en concertation avec les autorités publiques, les acteurs industriels et la société civile. En Europe, le livre blanc de Tractebel¹ souligne l'élan d'ouverture des usages civils du nucléaire à de nouveaux clients.

Dans les grands pays nucléaires, le soutien public se chiffre en centaines de millions pour les projets les plus matures. S'y ajoute le soutien des investisseurs privés, quasiment du même ordre. Il est trop tôt pour savoir s'il s'agit d'une bulle ou d'une tendance pérenne, mais cet engouement est encouragé par l'abondance de liquidités et par la nécessaire évolution des fonds investis dans l'Oil & Gas.

Un changement est aussi observé du côté des clients, avec la montée en puissance de grands industriels ou groupements. Le projet NUWARD, par exemple, est en discussion avec des industriels polonais et roumains. Ce *game changer* alimente la réflexion sur l'évolution du design des offres, pour apporter des SMRs à des clients sans spécificité nucléaire ni volonté de devenir exploitants.

Qui plus est, le marché potentiel des SMRs est d'ampleur, puisque dans les pays ouverts au nucléaire civil, plus de 3 300 tranches charbon devront être remplacées dans les vingt-sept prochaines années.

L'industrie nucléaire ne peut que se réjouir de ce foisonnement technologique et des initiatives de toute sorte, même si certaines s'arrêteront en route. Certes, les acteurs existants seront peut-être déstabilisés par la

concurrence, mais c'est aussi une opportunité de transformation.

Historique et principaux développeurs

Dans les années 1950, de petits réacteurs ont été construits pour répondre aux besoins spécifiques comme la propulsion navale. Quelques mini-centrales visant à alimenter des zones militaires ou des bases isolées doivent également être mentionnées. Puis, parallèlement à la montée en puissance des réacteurs électrogènes, les développements conceptuels des années 1980-90 ont été motivés par des gains potentiels en sûreté, avec une attention particulière portée aux conceptions intégrées. Cette voie du *safety by design* a connu un regain d'intérêt dans les années 2000, et de nombreuses contributions démontrent les synergies entre simplicité, sûreté et compétitivité.

La technologie des réacteurs à eau pressurisée (REP) ou bouillante (REB) est mature. C'est sur elle que se fonde l'offre internationale. Des têtes de série seront construites en vue d'un déploiement dans la décennie 2030. Au sein de cette catégorie, les principaux concurrents du projet NUWARD sont Nuscale (contrôlé par Fluor Daniel), Rolls-Royce ou GE Hitachi (BWRX 300) de, Nuscale étant le plus avancé. Les autres ont tous pour ambition d'accélérer pour être prêts avant 2030 et nouent des partenariats (par exemple GEH avec Ontario Power Generation).

La filière des réacteurs à neutrons rapides offre des performances élevées pour l'utilisation de l'uranium et le recyclage du combustible usé. Dans la filière des réacteurs à haute température, les succès industriels

¹ The rise of nuclear technology 2.0 - Tractebel's vision on Small Modular Reactors.

sont plus mitigés, mais les perspectives d'usages étendus sont intéressantes. Les réacteurs à sels fondus - la matière fissile est mélangée avec le caloporteur - ont aussi des perspectives prometteuses pour la sûreté et le cycle du combustible. Toutefois, il n'est pas certain que le déploiement de cette offre soit robuste, dès lors que l'usine de retraitement est couplée au réacteur.

A

Les challenges à relever et le projet français de réacteur de puissance : NUWARD

Renaud Crassous

Renaud Crassous est ingénieur. Il est le directeur du projet SMR NUWARD chez EDF.

De multiples attentes vis-à-vis des SMRs

Les avantages et les critères de performance attendus sont souvent présentés en miroir des difficultés rencontrées sur certaines têtes de série de la grande puissance : sûreté, compétitivité, réduction du besoin d'investissement initial, réduction des risques associés, adaptation aux réseaux de taille moyenne, polyvalence d'utilisation.

Les objectifs de sûreté de génération III+ (post-Fukushima) restent les mêmes, mais le chemin pour les atteindre évolue grâce à la simplicité, au *safety by design* et aux dispositifs de sûreté passive. Les projets crédibles sur la scène internationale prétendent avoir plusieurs jours d'autonomie de délai de grâce en cas de situation de coupure d'alimentation en eau et en électricité. D'aucuns affirment même qu'ils pourront toujours maintenir la capacité de refroidissement en eau puis en air au-dessus de la puissance résiduelle du réacteur. Cela nourrit des réflexions sur la localisation des SMRs, qui pourraient être implantés plus près des villes et des zones industrielles grâce à la réduction de la zone d'évacuation d'urgence, avec une meilleure acceptabilité - laquelle n'a toutefois pas encore été éprouvée par le débat public. Le *safety by design* permet aussi de réduire certains impacts potentiels sur l'environnement.

Par ailleurs, la métrique du coût overnight utilisée par les développeurs affiche des cibles marketing entre 2 250 et 6 000 €/kWe, soit un coût complet de l'électricité compris entre 40 et 100 €/MWh en base.

L'ordre de grandeur de l'investissement initial dans un SMR devrait être de l'ordre d'un milliard, ce qui rend le tour de table plus accessible. Il sera en outre moins risqué dans la mesure où la promesse des SMRs est celle d'un chantier simplifié d'une durée raccourcie, avec un produit standardisé et des pièces forgées plus petites.

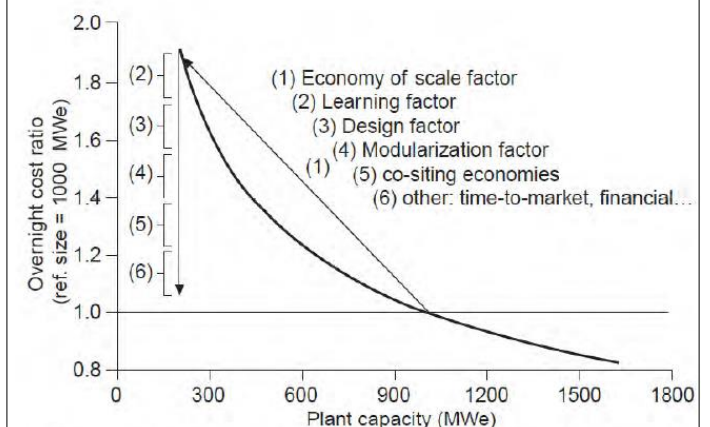
Enfin, les SMRs peuvent servir plusieurs usages : électricité, chaleur, hydrogène, désalinisation. Ce dernier usage intéresse tout particulièrement les pays du Golfe.

Les conditions de succès sont bien identifiées. Certaines sont à la main du développeur et de l'industriel (standardisation, approche modulaire, optimisation de l'assemblage et de la production en amont du chantier, simplicité et sûreté du design), et d'autres relèvent des régulateurs et de la réglementation (harmonisation des approches de sûreté, *joint licensing*, équivalence des codes et standards).

L'économie des SMRs

Dès les années 1990-2000, des études technico-économiques et économétriques ont démontré que les petits réacteurs peuvent faire aussi bien que les grands, en compensant les économies d'échelle grâce à des effets cumulés de design (simplicité, *safety by design*, *just needed*), de modularité, de série, de co-siting, de réduction du coût du capital et donc d'amélioration du financement du coût complet de l'électricité (figure 3).

Figure 3

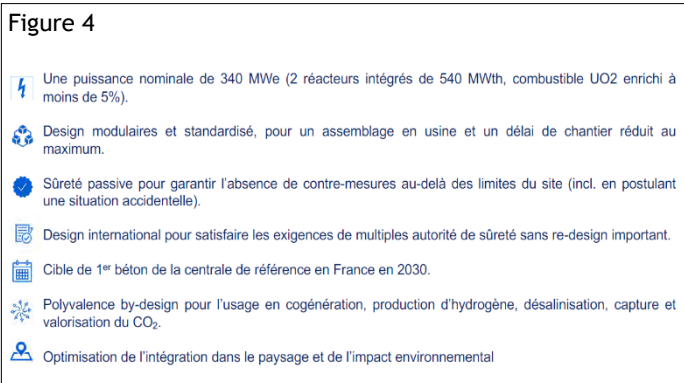


« Top-down estimation of overnight construction costs of SMR, qualitative trend » Barengi *et al.*, 2012.

Les gains de la modularité (juxtaposition de petits modules ou conception de la centrale en modules transportables pour un assemblage facilité sur site), largement déployée dans le spatial et le naval où la règle du 1-3-8² se vérifie, sont avérés pour le nucléaire également. La littérature économique fait ressortir des gains à deux chiffres tant pour le planning de réalisation que pour le coût d'investissement brut. Seule une modularisation massive des SMRs apporte ces gains significatifs, qui sont aussi des gains de qualité et de bon du premier coup. Aussi les équipes de NUWARD doivent-elles démontrer les raisons pour lesquelles elles ne souhaitent pas modulariser tel ou tel système.

Le projet NUWARD

NUWARD est un réacteur de génération III+ conçu à partir des meilleurs standards de sûreté (figure 4).



Le réacteur est intégré dans une enceinte métallique conçue et industrialisée en partenariat avec Naval

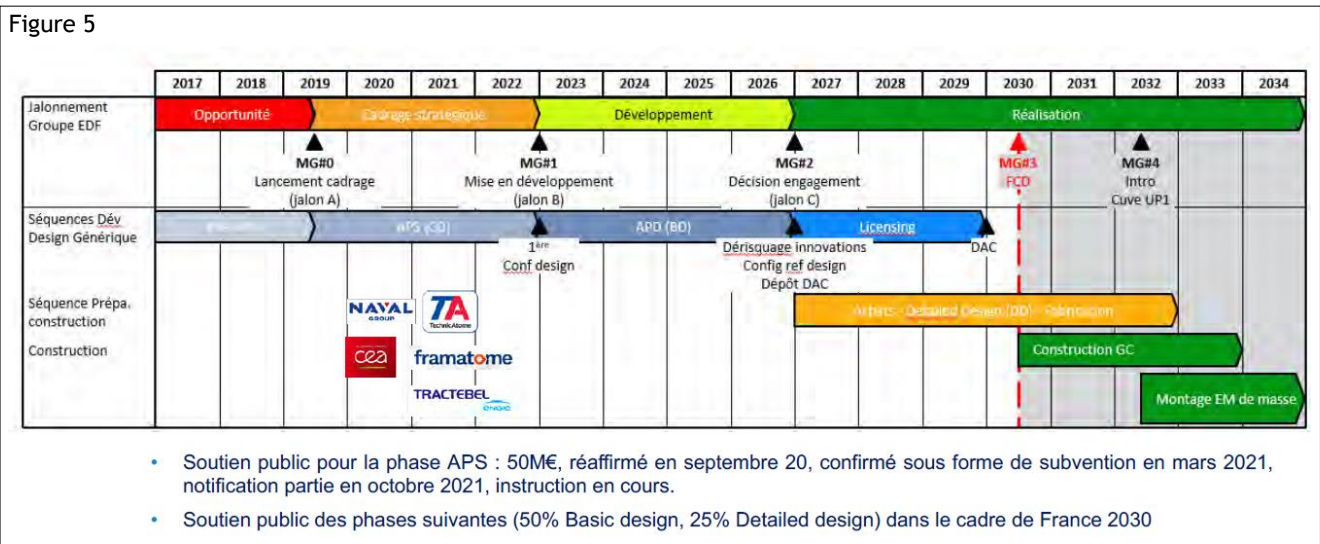
Group, immergée dans l'eau et installée dans un îlot nucléaire comprenant deux réacteurs de 170 MWe et une piscine d'entreposage. Cette cuve est plus complexe que d'autres designs, mais elle apporte des avantages de sûreté intrinsèque forts. Cette marque de fabrique restera « made in France » dans un cadre d'industrialisation globale de NUWARD qui sera largement européen

La cuve mesure moins de 16 mètres de haut, son diamètre est celui d'une cuve de 900 MW et la hauteur du cube d'eau représente 20 à 25 mètres de côté. L'enterrement de 60 % du bâtiment permet une intégration paysagère, mais offre aussi une protection contre les agressions extérieures.

Ce projet très collaboratif est conduit en mode start-up. Les principales innovations du produit sont des générateurs de vapeur compacts - inédits dans l'industrie nucléaire -, des mécanismes de commande de grappes immergés et un système de refroidissement passif. Les avantages sont également nombreux en matière de sûreté et de radioprotection. Ces spécificités techniques font déjà l'objet de discussions avec l'ASN et l'IRSN (figure 5).

Le scénario principal est celui d'une fabrication en France de la tête de série et d'un produit standardisé exportable. Un scénario de RTE (N03) laisse également entrevoir 3 à 4 GW complémentaires, par exemple sur des sites non EPR-isables, pour conserver dans la durée à minima 50 % de nucléaire dans le mix électrique français. Le business plan de NUWARD s'en trouverait renforcé. Le projet est également tiré par des clients internationaux.

Figure 5



² Une unité de temps métal pour fabriquer en modules en usine, trois unités de temps métal dans un atelier d'assemblage sur site, huit unités de temps métal directement sur un chantier.



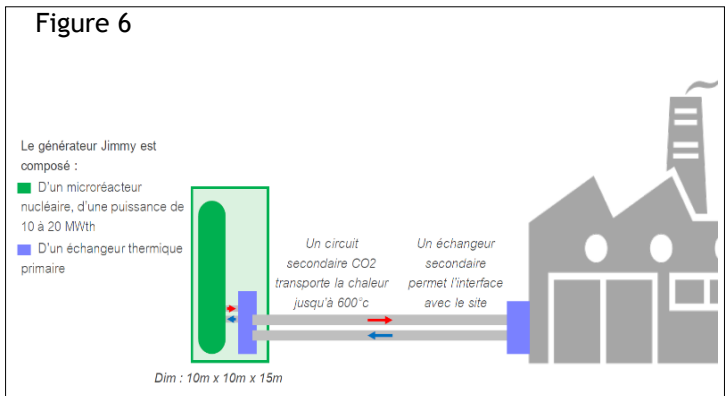
Les microréacteurs, un exemple très innovant : Jimmy, réacteur calogène de 10 MWth

Antoine Guyot et Mathilde Grivet

Antoine Guyot est ingénieur et CEO de Jimmy.

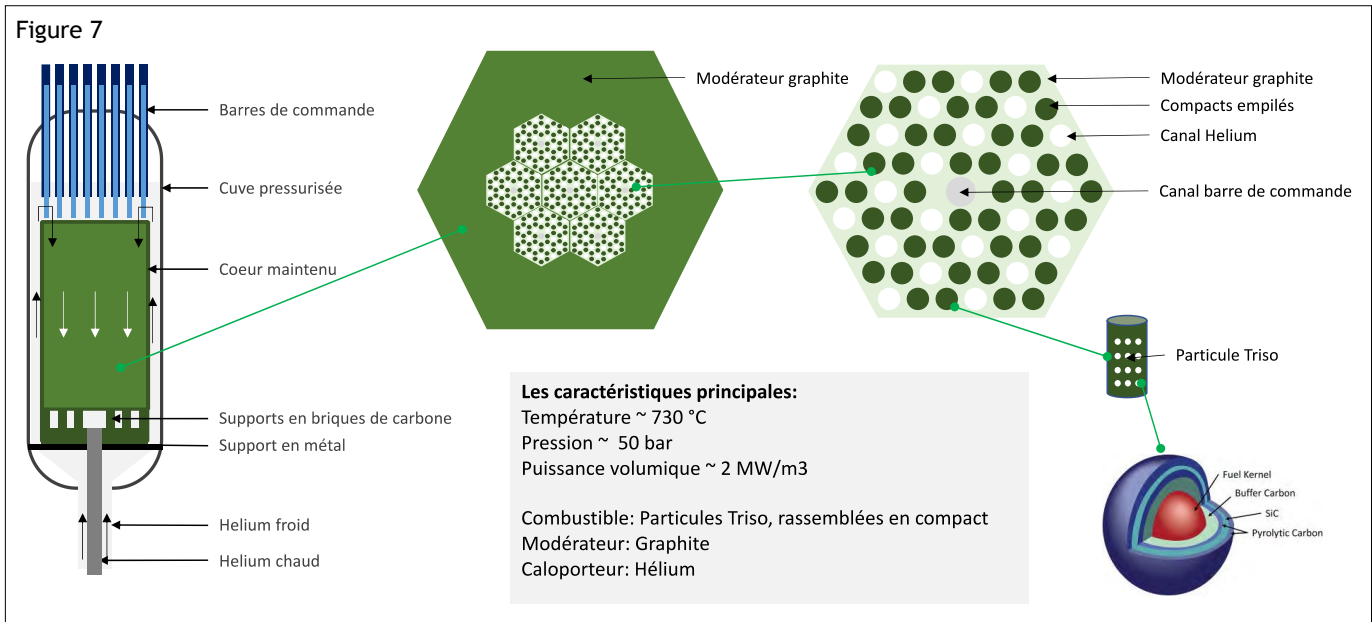
Mathilde Grivet est COO de Jimmy et responsable du développement commercial.

Jimmy est un fournisseur de chaleur industrielle décarbonée (figure 6).



Jimmy a une puissance 50 fois moindre que celle d'un SMR et 500 fois plus petite que celle d'un EPR. Il répond à trois grands défis technologiques, outre celui de la sécurité : proposer un système sûr passivement, proposer un système acceptable socialement et créer un cycle vertueux pour la société et la science nucléaire. Avec, à chaque fois, une déclinaison conception/industrialisation/qualification.

Pour relever le défi de la sûreté, le choix a été fait d'un réacteur à haute température à cœur prismatique, qui permet de délivrer à l'industriel une chaleur jusqu'à 600 degrés - donc de trouver un marché (figure 7).



Outre sa température, Jimmy présente trois points forts de sûreté : évacuation passive de la chaleur résiduelle, confinement des produits de fission et maîtrise de la

réactivité. Par ailleurs, grâce aux choix technologiques opérés, le système ne change pas les habitudes sur site et ne dérange pas les riverains : les barrières de

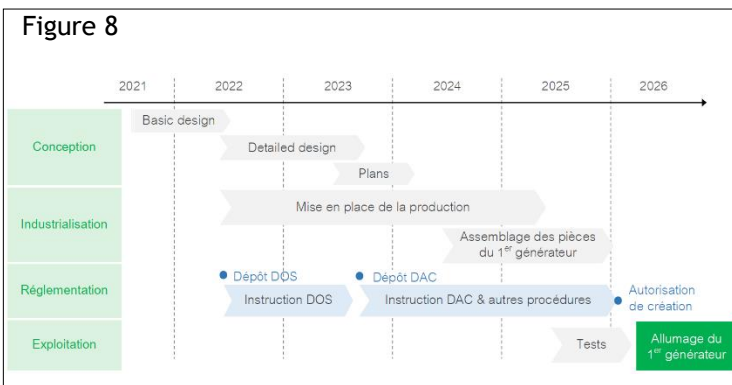
radioprotection sont suffisamment efficaces pour que le site industriel continue à opérer de manière normale ; le circuit CO₂ supplémentaire empêche certaines agressions, notamment à eau ; le système n'est pas visible et n'émet ni fumée, ni odeur, ni bruit, ni lumière. Enfin, Jimmy s'inscrira dans une politique de déchets vertueuse au fur et à mesure de son déploiement, grâce à son combustible à partir d'uranium, à son modérateur graphite retraitable et réutilisable, et à la matière des équipements qui pourra être réutilisée dans un second cycle.

Qui plus est, les petits systèmes comme Jimmy, simples à démontrer et industrialiser, sont particulièrement à même de créer une dynamique d'innovation itérative grâce à la multiplication des sites. À moyen terme, il devrait être possible d'insérer du plutonium dans le réacteur pour décarboner l'industrie française. À plus long terme, des briques technologiques pourront être développées (figure 8).

L'objectif est d'aller le plus vite possible en marché, en n'utilisant que des éléments qualifiés, afin de minimiser les problèmes de réglementation et d'industrialisation.

Le marché de demain sera à coup sûr celui de la chaleur : les industriels ne savent pas comment décarboner la chaleur ; l'alternative du renouvelable n'existe pas dans la chaleur ; la chaleur industrielle permet d'adapter la fission à d'autres usages (chaleur résidentielle, hydrogène propre...). Il est d'ailleurs très réactif et prêt à se positionner rapidement.

Une étude d'avant-projet est cours pour le premier client (industriel de l'agroalimentaire) avec un objectif de mise en service en 2026. Jimmy est également en contact avec d'autres industriels.



Panorama des SMRs dans le monde

Quel combustible utilisent les différents projets ?

Jacques Chénais : Les projets que j'ai évoqués utilisent du combustible standard dont la taille est ajustée. Dans le RITM 200 russe, les éléments combustibles sont ceux des brise-glaces, avec un enrichissement de 20 % (limite proliférante). NUWARD utilise un assemblage 17x17 classique, avec un enrichissement inférieur à 5 % et une hauteur de 2,20 mètres au lieu de 4. Pour des raisons économiques, nous ne voulons pas concevoir d'usines d'enrichissement spécifiques.

Quelle peut être la flexibilité d'un SMR dans les systèmes énergétiques complexes de demain ?

Renaud Crassous : NUWARD cherche à avoir des pentes comparables à celle des réacteurs du parc français (2 à 3 % par minute), avec les mêmes capacités de suivi de charge. Pour sa part, Nuscale envisage de modérer la puissance électrique en utilisant l'échappement vapeur et en contournant la turbine, ou d'utiliser des petits modules pouvant être coupés en fonction de la demande.

NUWARD

Quelle est l'emprise au sol, pour quelle puissance au mètre carré ?

Renaud Crassous : Par prudence, il a été décidé de conserver de l'espace libre pour les éventuelles modifications. Dans la première version du plan masse, la densité est 3 à 4 fois moindre qu'une centrale de grande puissance. Une deuxième passe est en cours, pour optimiser le plan masse et l'emprise au sol.

Les générateurs de vapeur étant en titane, maîtrise-t-on son approvisionnement en France ?

Jacques Chénais : Nous n'avons pas identifié de difficulté d'approvisionnement, cela représentera des volumes très faibles comparés aux besoins de l'industrie aéronautique. Le titane a de meilleures caractéristiques que l'acier inox pour cet usage.

Quelle est la flexibilité du design ? Peut-il aller en deçà ou au-delà de 540 MWt ?

Jacques Chénais : Le produit est standardisé, mais il peut y avoir deux fois deux briques de base sur un même site.

Quel est le planning des projets concurrents ?

Renaud Crassous : Le délai entre le début du *conceptual design* et le potentiel premier chantier se situe entre 9 et 15 ans selon les projets. Le planning du développement du produit NUWARD se déroule sur 10 ans.

Toutes les technologies du projet ne sont pas encore éprouvées.

Jacques Chénais : Des maquettes de faible puissance des générateurs de vapeur compacts ont déjà tourné sur des boucles, avec un circuit primaire et un circuit secondaire. Deux campagnes d'essai ont démontré que nous étions capables de faire de la vapeur aux caractéristiques spécifiées. Concernant l'encrassement et le nettoyage, les développements sont en cours.

Un réacteur zéro rejet est-il envisageable ?

Jacques Chénais : Le fait de ne pas borer le circuit primaire élimine tout rejet de tritium et de nombreux effluents liquides.

Quel est le business model à l'export ?

Renaud Crassous : Différentes offres pourront se déployer selon les clients : pour notre compte avec une maîtrise d'ouvrage EDF, pour un autre électricien capable d'être *intelligent customer* ou clé en main pour un industriel. Dans ce dernier cas, le business model reste à inventer. Par ailleurs, le déploiement sera progressif. Un nombre de deux centrales NUWARD par an peut se faire au départ avec des capacités industrielles existantes. Il sera ensuite possible de savoir s'il est pertinent d'optimiser et massifier la production, avec une usine dédiée. Il faudra aussi être prêt à construire une usine de modules dans certains pays, pour garantir le contenu local en emplois.

Jimmy

Où trouve-t-on du combustible Triso enrichi à 20 % ?

Antoine Guyot : Plusieurs pistes sont à l'étude pour capter l'offre mondiale en très forte croissance, mais aussi le savoir-faire européen, l'Europe ayant été un berceau du développement de ces particules.

Le graphite des UNGG et le Triso contiennent du 14C et du 36C, qui peuvent s'accumuler dans les déchets à stocker. Comment est traitée cette problématique ?

Antoine Guyot : Diminuer l'azote au démarrage du réacteur permet de réduire le 14C. Par ailleurs, s'il n'est pas soumis aux autres produits de fission, le graphite restera suffisamment propre pour être retraité. Ce ne sera pas simple, mais une R&D pourra être développée autour du modérateur.

Quelle est la température cœur de Jimmy ? Quelle chaleur Jimmy est vraiment capable de délivrer ?

Antoine Guyot : L'objectif est de remplacer le gaz par de la chaleur, moins chère et décarbonée. Le marché de la vapeur (jusqu'à 550 degrés) est suffisamment vaste pour créer une offre. Il est donc inutile de monter à des très hautes températures. Le cœur de Jimmy est à 750 degrés et des réflexions sont en cours pour le descendre à 700 degrés.

Quelle est la capacité de suivi de charge ?

Antoine Guyot : Le système est plus une pompe à chaleur qu'une centrale, et le site industriel sur lequel il est implanté consomme de la chaleur en permanence. Le suivi de charge rapide n'est pas effectué par Jimmy, qui apporte 10 MW et est donc en fond de panier. Le choix a été fait de créer un système puis de s'adapter au suivi de charge, plutôt que de partir du suivi de charge. En général, dans les HTR existants, la charge peut varier de 5 % par minute au maximum, soit 1,5 fois la puissance en vingt minutes - ce qui est convenable pour un site industriel.

Les petits réacteurs peuvent-ils être utilisés pour des mobilités ?

Antoine Guyot : Ce n'est ni l'objectif ni l'ambition à ce stade, d'autant que le HTR est très volumineux.

Mathilde Grivet : Le cas d'usage serait plutôt, dans une deuxième version du générateur, de produire des températures plus élevées et de l'hydrogène pour des usages de mobilité.

Qui seront vos premiers utilisateurs ? Ferez-vous des levées de fonds successives jusqu'à vos premières recettes ?

Antoine Guyot : Notre premier client est un utilisateur de vapeur dans l'agroalimentaire. Par ailleurs, notre but est d'aller au marché avec des levées de fonds successives, en minimisant les coûts. Dans cette optique, nous avons suivi les jalons de la Deep Tech.

Avez-vous intégré le temps d'approbation des sites par les différentes autorités ?

Antoine Guyot : Oui. Nous nous inscrivons dans l'arrêté INB de 2012.

Mots clés : caloporteur, construction en usine, économie d'échelle, modérateur, modulaire, nucléaire, petit réacteur, série, sûreté

Citation : Dominique Vignon, Renaud Crassous, Jacques Chénaïs, Antoine Guyot & Mathilde Grivet. (2022). *Situation et perspectives des petits réacteurs nucléaires (SMRs)*. Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr

Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteur : Voyelles Rédaction. N°ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.