



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



LA FRANCE DANS LA COURSE AUX RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS

février / 2024

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
L'ÉCOSYSTÈME NUCLÉAIRE FRANÇAIS EN ÉBULLITION	4
▪ PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES : QUELLES TECHNOLOGIES POUR QUELS USAGES ?	4
▪ « NOUS NOUS INSCRIVONS DANS UN ÉCOSYSTÈME EXISTANT »	6
▪ « LE REFROIDISSEMENT À L'AIR NOUS ASSURE UNE TOTALE AUTONOMIE ET UNE PLUS GRANDE SÛRETÉ »	9
▪ « AVOIR UNE APPROCHE DURABLE EN FERMANT LE CYCLE DU COMBUSTIBLE »	12
LES PETITS RÉACTEURS COMME VECTEUR D'INNOVATION	14
▪ JIMMY VA INDUSTRIALISER SES CHAUDIÈRES NUCLÉAIRES DÈS 2026	14
▪ L'ÉQUIPE DE FRANCE DU NUCLÉAIRE DÉVOILE SON PETIT RÉACTEUR MODULAIRE	16
▪ « FRANCE 2030 EST UN SIGNAL FORT POUR LE PROJET DE SMR FRANÇAIS NUWARD »	18
LA RELANCE DU NUCLÉAIRE EN FRANCE	22
▪ NUCLEAR VALLEY INTERVIENT EN APPUI DU DISPOSITIF FRANCE 2030 DANS LE NUCLÉAIRE	22
▪ COP28 : MACRON SIGNE SUR LE NUCLÉAIRE ET LES ENR CONTRE LE CHARBON	24
▪ LE NUCLÉAIRE RECONNU COMME SOLUTION DE DÉCARBONATION LORS DE LA COP28	26
▪ UN PROGRAMME ÉNERGÉTIQUE QUI MISE SUR LE NUCLÉAIRE, ENTRE AUTRES	28
▪ LA SUÈDE VA INVESTIR MASSIVEMENT DANS LE NUCLÉAIRE	30
▪ QUELLE PLACE POUR LE NUCLÉAIRE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?	32
▪ LES THÈSES DU MOIS : "LA FRANCE DANS LA COURSE AUX RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS"	33

INTRODUCTION

A l'heure actuelle se déroule au niveau mondial une course à l'innovation, pour mettre en œuvre des prototypes, puis des produits industriels à base de technologies nucléaires, capables de fournir de l'énergie sous différentes formes - électricité, chaleur, vapeur... - aux industriels. A cette fin, les réacteurs en cours de développement sont de taille réduite par rapport aux réacteurs actuellement en fonctionnement en France et à travers le monde.

Cette taille réduite permet aux réacteurs de fournir une puissance adaptée aux besoins d'un site industriel. Mais cela permet également de mettre au point des outils industrialisables, et de les produire ainsi en série. C'est pour soutenir les projets tricolores que via le plan d'investissement France 2030, un volet "Réacteurs nucléaires innovants" a été mis en place, avec d'ores et déjà plusieurs projets soutenus.

Le premier d'entre eux est le projet européen de réacteur NUWARD, un petit réacteur modulaire dont la première tête de série est prévue pour 2030.

D'autres projets sont aujourd'hui poussés.

Porté par la start-up NAAREA, le XAMR est un micro-générateur de quatrième génération, qui produit de la chaleur et de l'électricité à partir de combustible nucléaire usagé. Technologiquement, il s'agit d'un réacteur à neutrons rapides, utilisant des sels fondus comme fluide caloporteur.

L'entreprise Newcleo travaille également sur le développement d'un réacteur à neutrons rapides, utilisant cette fois le plomb comme fluide caloporteur, avec pour objectif de mettre en service dès 2030 un démonstrateur LFR de 30 MWe.

HEXANA fait partie de ces start-up lauréates de l'APP "Réacteurs nucléaires innovants". L'entreprise développe un système de réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium, avec deux réacteurs modulaires de 400 MW thermique chacun. L'ensemble est associé à un dispositif de stockage d'énergie, permettant de fournir de la chaleur à 500°C et de produire de l'électricité. Enfin, Blue Capsule travaille aussi sur le développement d'un réacteur nucléaire de 150MWth à caloporteur sodium, utilisant le combustible TRISO.

Tous ces projets, on le constate, misent sur la miniaturisation des réacteurs, et des technologies déjà éprouvées et mûres, pour être en mesure de développer industriellement ces prototypes, dans un laps de temps - horizon 2030 - qui permettent à ces innovations de jouer un rôle prépondérant dans les objectifs de décarbonation des activités humaines.

L'ÉCOSYSTÈME NUCLÉAIRE FRANÇAIS EN ÉBULLITION

PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES : QUELLES TECHNOLOGIES POUR QUELS USAGES ?

Le développement de réacteurs nucléaires modulaires est destiné à fournir aux industriels des solutions pour décarboner leurs activités, notamment en ce qui concerne la production de chaleur et d'électricité nécessaire aux procédés.

Il convient tout d'abord de définir ce qu'est un réacteur modulaire. Deux types de solutions technologiques sont aujourd'hui développées, à travers la centaine de projets actuellement en cours à travers le monde : les **SMR (Small Modular Reactor)** et les **AMR (Advanced Modular Reactor)**.

Les AMR, comme les SMR, sont de petits **réacteurs nucléaires** modulaires. Par modulaire, il faut comprendre que ces réacteurs peuvent être industrialisés pour être produits à grande échelle. C'est là la première révolution par rapport au nucléaire historique : Les petits réacteurs modulaires sont destinés à être utilisés dans des contextes très spécifiques, pour répondre à des besoins en énergie - chaleur, vapeur, électricité - très locaux. Cela peut concerner les besoins d'un site industriel gourmand en énergie, œuvrant dans des secteurs tels que la sidérurgie, la chimie ou l'aciérie par exemple. Cela peut aussi concerner un groupement d'industriels, de bâtiments publics, regroupés sur une zone géographique et ayant des besoins énergétiques pouvant être comblés par un (ou plusieurs) réacteur de petite taille. On l'aura compris, les AMR et SMR fournissent moins de puissance qu'un réacteur nucléaire classique, et sont destinés à être produits en série pour être utilisés massivement, afin de **décarboner des usages industriels aujourd'hui fortement émetteurs de CO2**. Ils pourraient à cet effet être très utiles pour alimenter des procédés de production d'hydrogène par exemple, ou de carburants verts.

En termes de fonctionnement, les AMR utilisent des tech-

nologies développées dans les années 1960 regroupées sous le terme de nucléaire de quatrième génération. Parmi ces technologies, **trois font l'objet actuellement de travaux pour le développement des futurs AMR** :

- Les réacteurs à neutrons rapides à caloporteurs sodium ou plomb, dont la particularité est leur capacité à consommer pour leur fonctionnement des matières nucléaires issues du retraitement des combustibles.
- Les réacteurs à haute ou très haute température, capables de fournir à l'industrie de la chaleur jusqu'à 900 degrés.
- Les réacteurs à sels fondus, qui regroupent de nombreux concepts, dont la possibilité d'utiliser des matières issues du retraitement de combustibles usés.

Les SMR, à la différence des AMR, sont refroidis à l'eau. La stratégie liée au déploiement de ces petits réacteurs est basée sur trois piliers : D'abord la volonté d'utiliser les **combustibles et plus généralement les matières nucléaires** avec plus d'efficacité, pour faciliter leur retraitement et produire moins de déchets. Ensuite, les petits réacteurs en développement doivent permettre de produire des unités ayant un haut degré de sûreté, mais aussi une compétitivité économique accrue.

En France, le programme d'investissement **France 2030, et plus particulièrement son volet « réacteurs nucléaires innovants »**, ont permis à plusieurs start-up françaises d'être soutenues pour développer des SMR et des AMR, alors que la **compétition mondiale sur ces outils industriels innovants** est extrêmement forte.

Ainsi, parmi les projets français, portés par des jeunes pousses comme **NAAREA**, **NEWCLEO**, **JIMMY ENERGY**, **RENAISSANCE FUSION**, **CALOGENA**, **HEXANA**, **OTRE-RA NUCLEAR ENERGY** ou encore **BLUE CAPSULE**, toutes lauréates de l'appel à projet porté par France 2030,

travaillent d'arrache pied pour développer et faire valider leurs concepts, sur des échelles de temps assez courtes, étant donné les impératifs européens et mondiaux en matière de réduction des émissions carbone.

La tête de gondole européenne sur ce secteur industriel restant **NUWARD**, qui doit produire, via deux réacteurs, 340 MWe de puissance.

Avec toutes les compétences accumulées au travers de décennies de recherche et d'exploitation des technologies nucléaires, notamment Superphénix et **Astrid**, la France a un avantage certain dans la **course internationale actuelle au développement et au déploiement des petits réacteurs modulaires nucléaires**.

22/02/2024

« NOUS NOUS INSCRIVONS DANS UN ÉCOSYSTÈME EXISTANT »

Spin-off du CEA, HEXANA est une start-up industrielle fondée en juin 2023 et lauréate de l'appel à projet France 2030 « Réacteurs Nucléaires Innovants ».

Cet **appel à projets** vise à promouvoir l'émergence de nouveaux acteurs tricolores capables de concevoir des **réacteurs nucléaires de quatrième génération**, permettant, entre autres, d'améliorer la gestion du cycle de vie des substances radioactives.

La spécificité d'HEXANA, qui veut industrialiser des réacteurs modulaires avancés (AMR) à cogénération, s'illustre par le parcours des trois ingénieurs à la base du projet.

Sylvain Nizou, CEO d'HEXANA, est un ingénieur qui a longtemps évolué dans le domaine de l'énergie. Il est spécialiste des questions énergétiques et en particulier des questions de captage et de valorisation du CO₂, mais aussi de la décarbonation de l'industrie en général. Partant du constat que l'innovation allait permettre, à terme, de développer des technologies de valorisation du CO₂ efficaces, de production d'hydrogène ou de nouveaux carburants pour le secteur aérien par exemple, la problématique pour ces dernières consiste à bénéficier d'un accès à des quantités considérables d'énergie décarbonée, sous la bonne forme et en continu.

Paul Gauthé, CTO d'HEXANA, est aussi ingénieur, expert de la filière nucléaire à neutrons rapides, et a travaillé sur l'exploitation de Phénix et sur le projet ASTRID (prototype de réacteur de quatrième génération rapide refroidi au sodium). Enfin, Jean-Baptiste Droin, CIO d'HEXANA, est également un ingénieur expert en sûreté, conception et fonctionnement des réacteurs nucléaires avancés et de leurs couplages à de nouveaux usages au service des besoins industriels.

C'est de la rencontre entre la compréhension des besoins

énergétiques nécessaires à la décarbonation de l'industrie et les technologies du nucléaire de quatrième génération en capacité de répondre à ces besoins qu'a émergé HEXANA.

Sylvain Nizou nous explique en quoi consiste le projet de réacteur nucléaire avancé porté par HEXANA, et comment ce dernier peut répondre spécifiquement aux enjeux de décarbonation de l'industrie tout en offrant un modèle de développement durable de l'**énergie nucléaire**.

Techniques de l'Ingénieur : Quels sont les concepts à la base de la solution technologique développée par HEXANA ?

Sylvain Nizou : **HEXANA** travaille sur la conception d'un système de réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium, dit RNR-Na, associé à un dispositif de stockage d'énergie, qui permet de fournir à la demande de la chaleur jusqu'à 500 degrés et de l'électricité pour l'industrie.

La technologie des RNR-Na (réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium) est connue depuis plus de soixante-dix ans dans les grands pays leaders de l'énergie nucléaire. La France a exploité pendant 35 ans le réacteur expérimental Phénix, puis développé, construit et exploité le plus gros RNR-Na au monde - (Superphénix), démontrant ainsi qu'il était possible de développer la technologie RNR à l'échelle industrielle et en grande puissance.

Ensuite, le projet ASTRID visant à développer un démonstrateur de réacteur de quatrième génération a permis de relancer cette filière RNR-Na, de renouveler les compétences, les moyens de calculs, et de se remettre à niveau en vue d'un déploiement industriel.

Si le projet ASTRID ne s'est pas poursuivi en 2019, tout ne s'est pas arrêté là : des analyses, des stratégies internationales, et des designs de nouveaux réacteurs ont été développés à partir des connaissances accumulées sur le projet ASTRID, et poursuivis depuis 2019.

Nous avons donc travaillé, pendant trois années au sein du CEA, sur un nouveau concept, pour aboutir à la création d'HEXANA. Il y a donc une forme de continuité sans la volonté de refaire ASTRID, puisque HEXANA bénéficie de tout le travail réalisé en amont par la filière nucléaire sur les RNR-Na depuis des décennies.

Notre volonté est de développer un objet innovant, un SMR avancé (AMR), avec toutes les promesses que cela véhicule en termes de temps de construction, de maîtrise des coûts, de compétitivité, d'utilisation beaucoup plus large par rapport aux réacteurs traditionnels destinés à produire de l'électricité pour un réseau national. Et en particulier cette capacité à produire directement et en même temps de la chaleur à haute température et de l'électricité de manière flexible, selon les besoins : le monde industriel a besoin d'électricité mais aussi de chaleur. Et à l'heure actuelle cette chaleur est massivement générée à base de combustibles fossiles. Il est donc très pertinent d'extraire cette chaleur des RNR-Na, avec une valorisation qui est comprise entre 95 et 98%.

Comment la chaleur produite est-elle stockée ?

La chaleur est stockée au sein de sels fondus, c'est une technologie très spécifique empruntée au monde de l'énergie solaire à concentration, que nous sommes les seuls à développer en France et à intégrer à un AMR. Ce stockage de chaleur qui offre une flexibilité sur la puissance délivrée va alimenter soit une turbine pour produire de l'électricité, soit directement l'industriel qui a besoin de cette chaleur.

Quel combustible est utilisé ?

Le réacteur utilise du [combustible nucléaire MOX](#) pour son fonctionnement. Il s'agit d'un mélange entre du plutonium et de l'uranium appauvri. Il est fabriqué à partir de matières issues du retraitement des combustibles usés d'EDF et de coproduits de la filière d'enrichissement. Cette démarche permet d'engager la fermeture du cycle du combustible nucléaire et de réduire la dépendance de la filière nucléaire aux ressources minérales importées.

Quels sont les défis en termes d'innovation ?

Nous faisons le choix de valoriser les acquis du passé et

d'innover là où cela est nécessaire. Il y a un immense défi sur le passage à l'industrialisation d'un réacteur RNR-Na modulaire standardisé : il y a des composants nouveaux, un design également totalement nouveau et une organisation industrielle dont la filière nucléaire n'a pas encore l'expérience.

Mais nous faisons le pari de ne pas innover sur les aspects du projet qui fonctionnent et qui ont déjà été validés par les autorités de sûreté : un réacteur de conception intégrée comme Phénix et Superphénix, un combustible MOX qualifié, des aciers aussi qualifiés pour tous les composants. Nous reprenons ainsi certaines briques technologiques mûres, que l'on intègre dans notre réacteur, qui produit une puissance de 400 MW thermiques. Il est possible de convertir cette puissance thermique en électricité, avec un rendement de 42%, soit environ 300 MW électriques pour une paire de réacteurs fournissant un total de 800 MW thermiques.

Nous avons décidé d'associer ces réacteurs par deux (ou par quatre selon les besoins du client) pour être en mesure d'assurer une continuité de service. Quand l'un des réacteurs doit être rechargé en combustible ou mis en maintenance, l'autre assure au moins la moitié du besoin énergétique. Cela permet au client de bénéficier d'un approvisionnement continu en énergie, et nous offre la possibilité de mutualiser certains systèmes pour faire des économies sur les coûts de construction. Nous n'innovons que là où cela est nécessaire pour aller vite. D'abord parce que cela nous permet de concentrer nos efforts d'ingénierie sur le défi de l'industrialisation d'un objet modulaire que l'on peut produire en série, mais aussi car nous ne disposons pas d'outils de R&D pour faire des irradiations de nouveaux matériaux, de nouveaux systèmes. Nous ne pouvons donc pas nous engager sur la qualification de nouveaux objets, ce qui nécessite beaucoup de temps. Pour autant, une fois les premiers réacteurs démarrés, nous serons les premiers à disposer de capacité de R&D pour améliorer notre technologie et accroître notre compétitivité avec notre tête de série.

Vous vous appuyez également sur des acteurs histo-

riques de la filière nucléaire.

En effet. Nous nous inscrivons dans un écosystème existant, avec une supply chain qui, même si elle a besoin d'être renforcée et renouvelée, existe déjà : nous travaillons avec EDF, avec le CEA, avec Framatome, ORANO, BOUYGUES CONSTRUCTION et EGIS, entre autres, pour valoriser ce savoir-faire prisé et la propriété intellectuelle historique.

En capitalisant sur les acquis du passé, quand bien même nous avons d'énormes défis sur des nouveaux composants comme des échangeurs, des pompes, des designs, des procédés de fabrication et d'industrialisation, nous sommes en mesure d'avancer vite. Notre première tête de série industrielle est prévue pour 2035, et nous n'avons pas besoin de passer par un prototype et un démonstrateur nucléaire. Nous passons directement à une tête de série industrielle, ce qui va nous faire gagner du temps par rapport à d'autres acteurs de la filière qui doivent faire approuver tous les nouveaux éléments nucléaires de leur système et passer avant tout par des prototypes nucléaires voire non-nucléaires.

De nombreux acteurs internationaux du nucléaire s'intéressent aujourd'hui aux RNR-Na...

En effet. Aujourd'hui, tous les grands pays qui font du nucléaire sont dans la course au RNR-Na. Les Etats-Unis ont lancé il y a dix ans TerraPower, qui développe le projet Natrium, dont le système de stockage de la chaleur sous forme de sels fondus est assez similaire. Il ne s'agit pas là d'un SMR, mais d'un réacteur de 350 à 500 MW électriques pas particulièrement destiné à fonctionner en cogénération, nous ne sommes donc pas en concurrence avec eux.

La Chine dispose d'un réacteur expérimental et construit actuellement 2 réacteurs de 600 MW thermiques. L'Inde est également en train de développer des RNR-Na tout comme le Japon.

Enfin, la Russie reste leader sur ce créneau : elle exploite aujourd'hui un réacteur expérimental, et deux réacteurs industriels de 600 et 800 MW électriques, appuyés par une filière MOX et continue de développer d'autres RNR de puissance.

Nous ne sommes donc pas les seuls sur ce créneau, mais

nous disposons aujourd'hui en France de compétences et de connaissances sur ces RNR-Na que le monde entier nous envie.

Comment travaillez-vous avec les industriels qui pourraient être amenés à utiliser la solution que vous développez ?

Notre système particulier du stockage de chaleur, et de conversion d'énergie en aval, est conçu pour être spécifiquement adapté et flexible par rapport aux différents usages identifiés. C'est un travail que nous menons en très grande proximité avec le monde industriel. Nous engageons des études de cas d'usages avec les acteurs des secteurs de la chimie, de l'aérien, du maritime, de l'acier, du ciment, de l'hydrogène et des carburants de synthèse. Nous travaillons avec eux pour identifier comment HEXANA peut répondre à leurs besoins. Quel est leur rythme de consommation, la part de chaleur et d'électricité dont ils ont besoin ? A quelle température utilisent-ils la chaleur ? Est-ce que leur consommation électrique est continue ? Y a-t-il des variations fortes de consommation ? Un tel système peut-il offrir d'autres solutions comme la capture de CO2 ou le dessalement d'eau de mer ?

Nous nous adressons aussi, en termes de clients, au réseau électrique de manière globale : dans les projets que nous imaginons, le fait de pouvoir revendre de l'électricité au réseau au moment où il en a le plus besoin représente une vraie valeur, a fortiori dans un contexte où les énergies renouvelables intermittentes vont prendre une place de plus en plus importante dans les mix énergétiques appelant des capacités de flexibilité comme celles offertes par le système HEXANA.

A ce niveau, notre système de stockage d'énergie est un service rendu au réseau, très complémentaire, en faveur de l'intégration forte des énergies renouvelables et à la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

26/02/2024

« LE REFROIDISSEMENT À L'AIR NOUS ASSURE UNE TOTALE AUTONOMIE ET UNE PLUS GRANDE SÛRETÉ »

Blue Capsule travaille à la conception d'un PRM - petit réacteur modulaire nucléaire à haute température - fournissant de la chaleur industrielle à 700 degrés, et utilisant l'air ambiant comme source froide.

Lauréat du dispositif "Réacteurs Nucléaires Innovants" mis en place via le plan d'investissements France 2030, Blue Capsule, fondé fin 2022, développe un [réacteur nucléaire à haute température](#) de 150 MWth, basé sur un caloporteur en sodium. Le projet couple deux technologies matures, afin d'associer pour la première fois le combustible intrinsèquement sûr des réacteurs nucléaires à haute température, constitué de microparticules Triso, au sodium liquide à haute température (supérieure à 700 °C) comme caloporteur.

Edouard Hourcade, Président et co-fondateur de Blue capsule, et Domnin Erard, architecte de Blue Capsule, ont expliqué aux Techniques de l'Ingénieur ce qui fait la spécificité du projet de réacteur par la start-up, ainsi que les applications industrielles envisagées.

Techniques de l'Ingénieur : pouvez-vous revenir sur la genèse de Blue Capsule ?

Edouard Hourcade : [Blue Capsule](#) est un « enfant » d'Astrid, qui était le prototype GEN 4 réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium du CEA, programme sur lequel j'ai travaillé durant 5 ans en tant que responsable sûreté notamment. Quand le projet Astrid s'est terminé, j'ai été sollicité pour réfléchir aux moyens de valoriser la chaleur produite directement, et non pas l'électricité comme cela était prévu initialement. La chaleur produite par Astrid était à 550 degrés : développer des [réacteurs à haute tempé-](#)

[rature](#), entre 650 et 1000 degrés, me paraissait donc plus adapté aux besoins des industriels.

Cela correspondait aussi à une période de renouveau du nucléaire dans le monde, et de nombreux nouveaux concepts sont apparus, j'ai donc étudié tout cela pour proposer le concept de Blue Capsule, qui est un mélange entre deux technologies mûres qui existent déjà : les HTR et les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-NA).

Comment fonctionne ce réacteur ?

Domnin Erard : L'idée derrière Blue Capsule est de tirer la quintessence de technologies qui existent déjà, à savoir les RNR-NA et les HTR, avec l'objectif de garder la haute température.

La modération se fait par des blocs de graphite hexagonaux, assemblés de manière géométrique. Nous n'utilisons pas le sodium comme un réfrigérant direct du combustible. Nous le faisons circuler autour des enveloppes protectrices du graphite, et par sa très bonne capacité de réfrigération, il nous permet de concevoir un réacteur plus petit, plus ramassé. Cela nous permet à la fois d'obtenir des hautes températures, adaptées aux besoins des clients industriels, tout en ayant un cœur de taille raisonnable.

L'autre ingrédient essentiel au niveau du cœur est le [combustible](#). Dans la matrice graphite nous utilisons le combustible Triso, déjà produit en grandes quantités et qualifié de manière assez large. Ce sont de toutes petites billes d'environ un millimètre de diamètre, constituées de trois couches qui leur confèrent une grande robustesse, et assemblées dans de petites pastilles que l'on vient empiler les unes sur les autres pour les glisser dans la matrice de graphite.

Le combustible est refroidi via le sodium, même si ce dernier n'est pas directement en contact avec le graphite. Le sodium vient ensuite, grâce à un échangeur sodium-air, réchauffer l'air jusqu'à 700 degrés.

Quel est l'avantage d'utiliser l'air comme source froide en boucle ouverte ?

Domnin Erard : La boucle en air est ouverte pour des raisons de simplicité, de sûreté, et car cela confère des avantages au niveau industriel. Nous prélevons de l'air ambiant dans l'environnement, qui est réchauffé, et c'est cet air chaud qui est valorisé directement en tant que tel, soit en tant que capacité de génération d'électricité, si le client a besoin d'un mix chaleur-électricité. Cet air chaud peut également permettre la production de vapeur.

Le produit que nous vendons est donc un mix entre air chaud, vapeur à différentes conditions de pression et de température, et électricité, selon les demandes des clients industriels.

Même si l'électricité n'est pas le cœur du produit, il est important de pouvoir la produire, pour être indépendant énergétiquement et que le cœur, d'un point de vue électrique, n'ait pas besoin d'un raccordement au réseau. De même, le refroidissement à l'air nous assure une totale autonomie et une plus grande sûreté - l'air est disponible partout -, par rapport aux réacteurs refroidis à l'eau, qui sont la norme aujourd'hui, sachant que l'accès à l'eau pour les clients industriels n'est pas toujours aisé.

Quels sont les challenges technologiques inhérents au développement de Blue Capsule ?

Edouard Hourcade : La plupart des composants qui constituent notre réacteur sont matures technologiquement, par contre leur niveau d'intégration est plutôt bas, puisque c'est la première fois qu'un réacteur Triso refroidi au sodium est développé.

C'est à ce niveau que se situe notre plus gros challenge, notamment lié à notre choix de séparer le sodium du combustible et d'utiliser une convection naturelle.

Domnin Erard : Dans les démonstrations de sûreté, ce

ne sont pas tant les composants qui peuvent poser problème mais plutôt les systèmes. Ces derniers sont très complexes, interconnectés, et il n'est pas toujours facile de faire la démonstration de leur parfaite robustesse.

Pour remédier à cela, nous avons fait le choix de mettre au point des systèmes les plus simples possibles. Par exemple, le choix de la convection naturelle, s'il assure une grande robustesse par rapport aux risques de pannes et en termes de variabilité de la défaillance, doit faire l'objet d'une démonstration qui prouve cela sur l'ensemble des conditions de fonctionnement.

Quelle est votre stratégie pour réaliser cette démonstration ?

Domnin Erard : Nous mettons actuellement en place une installation expérimentale à court terme, qui doit démontrer notre compréhension sur une gamme relativement large de fonctionnement de la convection naturelle du circuit primaire sodium. Il nous faut prouver que nous sommes capables de modéliser cette convection, de la calculer de manière réaliste et de la mesurer.

Avec l'objectif de montrer que le circuit primaire, qui n'a ni pompe ni système de réglage, se comporte naturellement correctement, et de manière robuste. Cela inclut le fait que si l'on change une donnée d'entrée, il y a un rééquilibrage automatique propre à la convection naturelle.

A la suite de cette expérience, qui va s'étendre sur près d'un an, nous passerons à la seconde étape qui consiste à mettre au point un prototype non nucléaire, proche de l'échelle un du réacteur. Il ne sera pas à l'échelle un en termes de puissance, puisque nous visons environ 10% (de la puissance) du réacteur que nous vendons, qui sera de 150 MWth. Ce prototype doit nous permettre de montrer que nous sommes en capacité de créer des systèmes simples, suffisamment peu dépendants les uns des autres pour éviter des effets complexes d'interactions entre ces derniers.

Toute la partie nucléaire sera simulée, afin que les futurs opérateurs soient en capacité de se former et que l'exploit-

tant puisse avoir une vision quasi complète de l'installation.

Quels sont les clients industriels pour Blue Capsule ?

Edouard Hourcade : Nous visons des clients ayant besoin de puissances de l'ordre de la centaine de MW ainsi que de hautes températures.

Cela peut donc concerner des marchés de type plug in, où notre installation vient remplacer un produit déjà utilisé sur site afin de décarboner le procédé. Par exemple sur des sites où l'on produit de la soude, ce qui nécessite des quantités très importantes de vapeur. Un autre exemple caractéristique est le vaporeformage du méthane, qui est aujourd'hui le moyen le plus utilisé pour produire de l'hydrogène, et qui nécessite beaucoup de chaleur également.

Cela concerne plus généralement des clients industriels qui ont besoin de vapeur et d'électricité décarbonée.

Nous avons ensuite des marchés plus prospectifs, comme les déserts énergétiques où les sources froides sont inexistantes, ou les activités de dessalement de l'eau. Il s'agit là de marchés à horizon 20/30 ans.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

27/02/2024

« AVOIR UNE APPROCHE DURABLE EN FERMANT LE CYCLE DU COMBUSTIBLE »

La start-up Newcleo a pour challenge de développer, construire et opérer des réacteurs à neutrons rapides innovants de quatrième génération, utilisant le plomb comme fluide caloporteur.

Lauréate de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants », Newcleo veut, à travers le développement d'un [réacteur à neutrons rapides innovant](#), mettre en oeuvre une technologie permettant de fermer le cycle du combustible nucléaire, et d'optimiser l'utilisation des ressources.

Ludovic Vandendriesche, directeur général de Newcleo SA, a répondu aux questions des Techniques de l'Ingénieur.

Techniques de l'Ingénieur : Pouvez-vous revenir sur la genèse de Newcleo ?

Ludovic Vandendriesche : [Newcleo](#) a été cofondé en septembre 2021 par notre PDG Stefano Bueno – précédemment fondateur d'Advanced Accelerator Application, une biotech cotée au Nasdaq et vendue à Novartis – Elisabeth Rizzotti, physicienne de formation et Directrice des opérations, et notre Chief Scientific Officer Luciano Cinotti, un expert mondialement reconnu de la technologie des [réacteurs à neutrons rapides](#), il est ainsi l'auteur de la plupart des brevets liés aux réacteurs à neutrons rapides au plomb (Lead Fast Reactor - LFR) dans le monde.

Depuis notre fondation, nous avons levé 400 M€ de capitaux privés et avons une levée de fonds de 1 milliard d'euros en cours. En mai 2023, Newcleo a annoncé un investissement de 3 Mds € dans l'Hexagone à l'horizon 2030, pour

réaliser un réacteur de démonstration et une unité pilote de fabrication du combustible. Notre concept de réacteur est lauréat de l'appel à projets « [Réacteurs nucléaires innovants](#) » du plan d'investissements France 2030. Newcleo est aujourd'hui une société européenne comptant plus de 600 collaborateurs, présente en Italie, France et Angleterre. Avec des centres de recherche et développement en Italie, au Royaume-Uni et en France, ainsi qu'un centre expérimental à l'ENEA-Brasimone, la collaboration internationale fait partie de notre ADN.

Comment fonctionnent les réacteurs rapides refroidis au plomb que vous développez et qui utilisent un combustible recyclé ?

Nous nous sommes donnés pour mission d'apporter au monde une énergie sûre, économique et durable, en associant de manière radicalement innovante les technologies existantes. Nos réacteurs refroidis au plomb fonctionnent à pression atmosphérique. Les propriétés du plomb (capacités thermiques, point d'ébullition, propriétés chimiques et de blindage), associées aux systèmes de sûreté passive de Newcleo, garantissent un niveau de sûreté très élevé. Nos réacteurs rapides sont capables de « brûler » (ou fissionner) efficacement du plutonium, des actinides mineurs et de l'uranium appauvri. Alimentés par un combustible issu du retraitement des [matières nucléaires valorisables](#), ils permettent non seulement d'avoir une approche durable en fermant le cycle du combustible, mais contribuent également à renforcer l'indépendance énergétique française et européenne. L'offre Newcleo s'appuie sur une expérience industrielle démontrée et unique en France : le retraitement à grande échelle des matières nucléaires, et le développement des réacteurs rapides de quatrième génération type

Phénix et Superphénix.

Quels sont les freins technologiques et industriels que vous devez lever ?

Newcleo vise la réalisation en France d'un démonstrateur LFR (Lead Fast Reactor) de 30 MWe en 2030, en y associant l'installation pilote de fabrication du combustible. Pour tenir les engagements, il est urgent que l'Etat prenne une décision sur l'attribution de sites pour les nouveaux réacteurs innovants. Il est nécessaire que ces décisions soient prises au plus tard au second trimestre 2024, avec des indications prévisionnelles espérées dès le Conseil de politique nucléaire de février afin de ne pas bloquer les études de conception en cours.

D'ici la fin de l'année, nous visons également la finalisation du basic design de notre LFR et de notre unité de production de MOX RNR, et nous agissons parallèlement pour sécuriser notre chaîne d'approvisionnement avec des fournisseurs clés. Nos partenariats stratégiques avec des acteurs éminents tels que le CEA, Framatome, Assystem, Ingérop, ou Onet Technologies, renforcent nos compétences techniques et témoignent de notre engagement envers l'excellence dans l'ingénierie nucléaire française. En début d'année 2024, nous avons annoncé avec enthousiasme notre partenariat stratégique et industriel avec **NAAREA**, marquant une étape cruciale. Cette collaboration vise à mutualiser nos efforts en tant que lauréats de l'appel à projets « Réacteurs Nucléaires Innovants » de France 2030, accélérant ainsi l'innovation dans le domaine du nucléaire de quatrième génération. Ensemble, nous aspirons à gagner en efficacité et à renforcer notre impact, en particulier vis-à-vis des pouvoirs publics au niveau européen. Nous sommes impatients de voir les fruits de ces collaborations se concrétiser dans la prochaine phase de notre développement.

Quels sont vos concurrents sur cette technologie (réacteur rapide refroidi au plomb), en France et à l'international ?

Plusieurs projets de réacteurs de petite taille (SMR – Small Modular Reactor) et de réacteurs de 4ème génération

(AMR – Advanced Modular Reactor) sont en cours à travers le monde, notamment en France et ailleurs en Europe, aux Etats-Unis et en Chine. Les SMR/AMR apportent tous quelque chose de différent qui leur permettra de jouer un rôle important dans la satisfaction de nos besoins énergétiques. Il y a beaucoup d'espace sur le marché, nous ne sommes pas en concurrence les uns avec les autres. Cela s'explique en partie par le fait que ces technologies ouvrent une variété d'opportunités au-delà de l'alimentation du réseau. Ensemble, ces technologies ont le potentiel pour décarboner le chauffage, alimenter les parcs énergétiques, fournir une production intégrée avec des micro-réacteurs... Notre mission est de travailler aux côtés d'autres pour contribuer à la décarbonation mondiale, ce n'est pas quelque chose qui peut être fait seul.

Quelle est la typologie des clients industriels pour les AMR que vous développez ?

La demande d'électricité va doubler, voire tripler en Europe d'ici à 2050. Les SMR proposent une électricité décarbonée, fiable, pilotable, avec une flexibilité que n'ont pas les grosses centrales : ils peuvent se construire vite et s'assemblent en groupe selon la puissance désirée. Les nôtres peuvent servir à produire de l'hydrogène et autres carburants durables, pour la cogénération ou pour remplacer les centrales à charbon ou à gaz, polluantes.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

28/02/2024

LES PETITS RÉACTEURS COMME VECTEUR D'INNOVATION

JIMMY VA INDUSTRIALISER SES CHAUDIÈRES NUCLÉAIRES DÈS 2026

La start-up Jimmy conçoit et opère des générateurs thermiques basés sur la fission nucléaire pour fournir aux industriels une chaleur décarbonée.

Pour générer cette chaleur, la start-up a conçu un micro-réacteur de type HTR (réacteur à haute température), qui utilise l'uranium comme combustible, le graphite en tant que modérateur de fission et où le fluide caloporteur est l'hélium.

Dès 2026, Jimmy veut industrialiser son premier générateur et équiper son premier client, un industriel de l'agroalimentaire, en chaleur industrielle bas carbone. Une aubaine pour de nombreux secteurs industriels désireux de produire la chaleur nécessaire à leurs process en limitant leur impact carbone. La solution développée par Jimmy pourrait leur permettre de se passer des actuelles chaudières à gaz ou au fioul.

Antoine Guyot, co-fondateur de Jimmy, a répondu aux questions des Techniques de l'Ingénieur.

Techniques de l'Ingénieur : Quel cheminement vous a conduit à co-crée Jimmy en 2020 ?

Antoine Guyot : Après avoir été diplômé d'une école d'ingénieurs en 2018, j'ai travaillé dans le domaine du conseil en stratégie. Domaine que j'ai quitté car je ressentais l'envie de créer quelque chose. La problématique climatique s'est rapidement imposée à moi, et le constat qui va avec : aujourd'hui, le devenir écologique va à l'encontre des marges. En poussant cette réflexion, l'idée de développer une énergie peu chère et décarbonée s'est vite imposée comme étant le moyen le plus efficace de limiter les émissions de CO2 dans l'atmosphère. En ce sens, la fission nucléaire présente un intérêt particulier, puisqu'elle produit une très grande quantité de chaleur, avec un coût du combustible très faible. Il faut donc être en capacité de mettre

en œuvre des réacteurs nucléaires à bas prix, pour que les industriels n'aient plus à choisir entre économie et écologie. C'est l'objet même de la genèse de Jimmy.

Les chaudières nucléaires développées par Jimmy ciblent spécifiquement les industriels. Pour quelles raisons ?

Fournir une grande quantité de chaleur grâce au nucléaire permet de résoudre plusieurs contraintes rencontrées par certains secteurs industriels. En effet, ces derniers consomment de la chaleur en grande quantité, leurs besoins sont prévisibles et ils ne sont pas mobiles.

Aussi, ils sont prêts à assumer des risques, puisqu'ils en gèrent au quotidien sur les sites industriels. Ainsi, les besoins des industriels correspondent pleinement aux atouts d'une chaudière nucléaire.

Après avoir identifié les clients potentiels, l'enjeu a consisté à être en mesure de réaliser l'outil en tant que tel, et notamment la réaction nucléaire. Nous avons étudié les différentes filières de réacteurs existantes, et nous nous sommes arrêtés sur le HTR, dont la chaîne industrielle est mature. La maturité de la chaîne industrielle est un facteur clé pour espérer développer un outil sûr et performant. Aussi, le HTR est un réacteur qui a des propriétés de sûreté intrinsèques, ce qui est intéressant pour en faire usage dans différents contextes industriels.

Enfin, les réacteurs HTR fournissent de la chaleur à plus haute température, ce qui permet d'aller conquérir de nombreux marchés.

En quoi le fait de recourir à des technologies déjà mûres était important pour développer Jimmy ?

Cette approche constitue l'ADN de Jimmy. Une fois le choix du réacteur HTR arrêté, notre démarche, qui caractérise notre vision du projet, a été de reprendre toutes les briques

technologiques existantes pour créer un réacteur low tech. Nous ne voulions pas entrer dans un travail de requalification des technologies que nous aurions développées à partir de ce qui existe. L'idée est d'utiliser des techniques déjà éprouvées, pour être en mesure de fournir une offre énergétique sûre, économique et écologique.

Où en êtes-vous aujourd'hui ?

Nous sommes actuellement en phase de conception et nous préparons aujourd'hui la demande d'autorisation de création. Notre design est conçu pour optimiser l'industrialisation du générateur et de son réacteur, avec l'objectif de proposer un modèle le plus évolutif possible.

Quelles sont les contraintes auxquelles vous faites face ?

La première contrainte est de développer un outil sûr. La deuxième est que cet outil sûr soit rentable.

Le travail scientifique est mature dans notre projet, puisque les combustibles et les matériaux utilisés sont déjà qualifiés. Les enjeux se situent surtout sur notre capacité à simplifier suffisamment nos réacteurs et à les industrialiser. Ainsi, toutes les pièces constituant l'intérieur de notre réacteur seront fabriquées en série.

Et la contrainte de sûreté ?

En termes de sûreté, notre interlocuteur est l'ASN, avec qui nous échangeons très régulièrement. L'évaluation de la sûreté de nos réacteurs est pour l'ASN une mission qui diffère un peu de ses prérogatives habituelles. De notre côté, nous sommes un acteur privé, nouveau dans le monde du nucléaire et nous devons faire nos preuves. Il y a donc des deux côtés - Jimmy et l'ASN - un travail à faire pour évaluer de manière pertinente et efficace la sûreté de notre outil.

Plus largement, l'ASN a initié une démarche d'actualisation de ses procédures pour répondre au mieux aux nouveaux enjeux et spécificités que recouvrent les SMR. Les tailles, formes et puissances de ces nouveaux réacteurs sont en effet très différentes (et moindres) de celles des réacteurs opérationnels traditionnels.

Quand est prévue la phase d'industrialisation à proprement parler ?

Le démarrage du chantier est prévu pour début 2026 et doit prendre fin la même année, c'est l'objectif. Pour être en mesure de réaliser cela, la structure du bâtiment est conçue de façon à pouvoir assembler rapidement les réacteurs puis les générateurs.

De même, nous voulons mener le plus grand nombre de tests possibles au sein de nos installations, afin de limiter au minimum les tests à effectuer sur le site du client.

Avez-vous des concurrents sur la technologie des chaudières nucléaires ?

En réalité, nos principaux concurrents, à l'heure actuelle, sont le gaz et la biomasse. Au niveau technologique, des projets similaires sont en développement aux Etats-Unis, sur des niveaux de chaleur moins élevés. Nous n'avons pas de concurrents au niveau européen sur les micro-réacteurs HTR. Des projets sont en cours sur des réacteurs à sels fondus, mais nous sommes là sur du long terme, puisqu'il faut tout réinventer technologiquement.

Enfin, prévoyez-vous de recruter d'ici à 2026 et le passage à l'industrialisation du projet ?

Nous sommes actuellement 60 salariés. Nous prévoyons de doubler ce chiffre d'ici 2026, pour atteindre les objectifs et passer concrètement à une phase d'exploitation où l'entreprise devient de plus en plus industrielle. Cela passe par la construction d'une plateforme industrielle, c'est l'ambition qui nous anime actuellement.

Propos recueillis par Pierre Thouverez

11/12/2023

L'ÉQUIPE DE FRANCE DU NUCLÉAIRE DÉVOILE SON PETIT RÉACTEUR MODULAIRE

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), EDF, Naval Group et TechnicAtome, ont dévoilé mardi 17 septembre, Nuward, le projet de petit réacteur modulaire français (Small Modular Reactor ou SMR), en marge d'une conférence de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à Vienne.

La technologie retenue est fondée sur celle des [réacteurs à eau pressurisée](#) (REP) qui équipent le parc actuel français. L'objectif des SMR (ce sont les initiales anglaises qui sont les plus utilisées) est de répondre aux besoins croissants en électricité décarbonée, dans le monde entier. C'est pourquoi ce REP devrait avoir une puissance comprise entre 300 et 400 MW, afin de pouvoir être intégré dans n'importe quel taille de réseau électrique, indique un communiqué de presse des quatre entités le 17 septembre. Loïc Rocard, PDG de TechnicAtome, et pilote de ce consortium français, a rappelé à Vienne que la solution développée reposera sur des REP de 340 MW, composés de deux réacteurs de 170 MW chacun, fonctionnant à l'image des réacteurs actuels du parc d'EDF (par deux), rapporte la Société française d'[énergie nucléaire](#) (SFEN).

Très en avance sur ce sujet, le Canada dispose d'une feuille de route visant à développer ces solutions pour des sites éloignés, voire isolés du réseau, notamment pour l'industrie minière.

C'est également un moyen de remplacer de nombreuses centrales au charbon, dont la puissance, par « module » est souvent de 400 MW, plus particulièrement pour les plus anciennes et donc les plus polluantes et émettrices de CO2.

L'expérience de la « team France »

Ce projet de SMR va bénéficier de 50 ans d'expérience et de l'équivalent de 2 000 années-réacteur de ses concepteurs, soit la durée cumulée de fonctionnement des réacteurs actuels du parc français, et des installations de recherche. Les porteurs du projet espèrent pouvoir proposer une offre commerciale pour la fin de la prochaine décennie.

Basé sur la technologie éprouvée de REP, Nuward sera une solution modulaire qui intégrera plusieurs innovations majeures, au bénéfice de l'opérateur et de la compétitivité du produit. Les concepteurs ont déclaré qu'il offrirait *«la simplicité et la compacité d'une conception intégrée, la flexibilité dans les phases de construction et d'exploitation, ainsi qu'une approche innovante en matière de sécurité, conformément aux normes mondiales les plus strictes.»*

Le CEA apportera *« ses compétences en matière de conception de cœurs de réacteurs, de développement et de validation d'outils de calcul, d'analyses de sûreté, de qualification de systèmes et de composants en mettant à disposition ses installations de test pour des actions de R&D »*, insiste Christian Jacq, administrateur général du CEA.

EDF mettra à profit son expérience d'architecte-ensemblier et d'opérateur de tranches nucléaires.

Spécialiste des sous-marins et des porte-avions à propulsion nucléaire, Naval Group fournira son expertise en matière de structures nucléaires modulaires et petites. Hervé Guillou ajoute que *« Naval Group est ainsi engagé dans les plus hauts standards de sécurité, de compétitivité et d'innovation dans le domaine nucléaire. Cette coopération est une belle opportunité et offre d'intéressantes synergies*

avec notre cœur de métier dans la propulsion nucléaire. »

Et TechnicAtome apportera son savoir-faire en matière de conception de réacteurs compacts, acquis grâce à la conception de plus d'une vingtaine de réacteurs nucléaires pour le parc de sous-marins français.

20/09/2019

Nécessaire coopération internationale

Les quatre partenaires se sont déclarés ouverts, le 17 septembre, à la coopération internationale en matière d'harmonisation de la réglementation, de normalisation, de conception et d'optimisation. Jean-Bernard Lévy a rappelé, à Vienne, que « travailler sur l'harmonisation et la normalisation est aussi essentiel pour la viabilité des SMR. En effet, compte tenu de leur petite taille, ils ne peuvent pas être repensés pour chaque projet afin de répondre à la demande spécifique de chaque organisme de réglementation de chaque pays. La viabilité de l'analyse de rentabilisation des SMR réside dans la perspective d'une certaine harmonisation future. Le rythme auquel une telle harmonisation sera gérée déterminera la capacité de la première génération de SMR à faire partie de la transition énergétique. Je crois que le centre de Vienne de l'AIEA, qui délivre les normes de sécurité, est le meilleur endroit, selon moi, pour appeler à cette harmonisation ! », rapporte la SFEN.

Le CEA et EDF ont déjà entamé un dialogue avec Westinghouse Electric Company afin d'étudier une telle coopération pour développer des SMR, ont expliqué les quatre partenaires le 17 septembre. Le design du SMR de Westinghouse « intègre la seule technologie de « sûreté passive » en exploitation », signale un communiqué des parties prenantes, publié le 17 septembre également.

« Dans le cadre de cette coopération internationale, les parties s'engagent également à coopérer pour la standardisation de la réglementation et l'harmonisation des normes relatives au design, condition essentielle pour une mise en œuvre réussie de la technologie SMR, » ajoute le communiqué commun du CEA, d'EDF et de Westinghouse, qui présenteront une feuille de route détaillé du projet au début de l'année 2020.

« FRANCE 2030 EST UN SIGNAL FORT POUR LE PROJET DE SMR FRANÇAIS NUWARD »

La société TechnicAtome est à l'origine de la conception et la réalisation du premier réacteur à eau pressurisé français pour la propulsion navale, au tout début des années 70. Aujourd'hui, c'est son cœur de métier, et la société assure toujours la conception, la réalisation et le maintien en conditions opérationnelles des chaufferies nucléaires des bâtiments de la Marine Nationale à propulsion nucléaire, porte-avions et sous-marins.

À côté de ce pilier, l'entreprise mène des activités connexes, notamment dans le domaine des petits réacteurs nucléaires électrogènes. En effet, TechnicAtome joue un rôle central dans le projet de SMR (small modular reactor, en français petit réacteur modulaire) **NUWARDTM**, qui fait l'objet d'un développement conjoint entre EDF, le CEA, Naval Group, Framatome et **TechnicAtome**, la société ayant la responsabilité de la conception du réacteur lui-même.

Le plan de relance France 2030 prévoit un investissement d'un milliard d'euros consacré au **développement des SMR**. Plusieurs acteurs de cette filière vont ainsi bénéficier d'un appui financier important pour les accompagner dans leur projet durant les prochaines années.

Thierry Grenier, directeur des infrastructures et réacteurs civils chez TechnicAtome, a expliqué à Techniques de l'Ingénieur comment le développement de petits réacteurs modulaires pouvait répondre à des enjeux de marchés, et comment le plan France 2030 vient impacter la stratégie de développement de NUWARD.

Techniques de l'Ingénieur : En quoi consiste le projet NUWARD, développé par plusieurs acteurs majeurs de la filière nucléaire française ?

Thierry Grenier : Le projet NUWARD est un projet de petite centrale nucléaire modulaire qui regroupe les principaux acteurs de la **filiale nucléaire française**. EDF est le leader du projet, en partenariat avec le CEA, Naval Group, Framatome et TechnicAtome.

Nous sommes aujourd'hui encore sur la phase avant-projet sommaire, dans un contexte français voué à s'élargir à des acteurs européens dans les phases qui vont suivre. L'idée de travailler sur des centrales de petite puissance n'est pas nouvelle. Cela fait près de 50 ans que TechnicAtome développe des réacteurs compacts, notamment pour la propulsion navale. Historiquement nous n'étions pas les seuls à travailler sur ces petits réacteurs, mais nous sommes les seuls à avoir continué à développer notre savoir-faire sur le long terme, sur des technologies qui sont différentes de celles utilisées dans les réacteurs de grande taille installés aujourd'hui. Actuellement, environ 70 projets de SMR sont en développement dans de nombreux pays.

Pour quels marchés sont développés ces petits réacteurs ?

Dans un premier temps, l'usage envisagé était d'apporter l'électricité vers des zones géographiques isolées, un marché nécessairement limité. Plus récemment, EDF a fait émerger l'idée de produire des petits réacteurs pour remplacer les centrales à charbon, qui vont fermer les unes après les autres dans les prochaines décennies pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de carbone. Cela change la donne, puisque c'est un marché beaucoup plus important, qui permet d'envisager un effet de série beaucoup plus intéressant pour réduire le coût d'une centrale, avantage très important au niveau concurrentiel.

De plus, il y a des zones où le réseau électrique ne permet pas l'implantation de grosses centrales. Ce n'est pas forcément le cas en France, mais la problématique se présente dans certains pays, là où ça coûte énormément d'argent et nécessite un temps considérable pour modifier le réseau. Ainsi, la possibilité d'installer, en lieu et place d'une centrale à charbon un SMR raccordable au réseau existant, présente beaucoup d'avantages, dont celui de la simplicité. C'est donc ce marché qui est visé en priorité.

Nous sommes partis sur le développement de réacteurs d'une capacité de production de 170 MW, c'est la limite technologique que nous nous sommes fixée. En en couplant deux, on arrive à 340 MW, ce qui correspond à la cible commerciale fixée par EDF. Notre volonté est de réaliser la commercialisation de ces petits réacteurs au début de la décennie 2030.

Quel est le paysage concurrentiel au niveau international sur les SMR ?

L'AIEA [Agence internationale de l'énergie atomique, NDLR] a dénombré environ 70 projets, au niveau international, de développement de ces petits réacteurs. Il y a donc une grande diversité de modèles et de technologies étudiés à l'heure actuelle : des réacteurs de très petite taille, des **réacteurs à eau pressurisée** comme le nôtre, des réacteurs à eau bouillante, au sodium, à sels fondus, à gaz... Au final, toutes les technologies nucléaires de 3ème et 4ème génération font l'objet de projets, en attendant de voir quelle va être la nature exacte des besoins.

Prenons l'exemple de ce qui se passe au Canada, qui est un pays très moteur en ce moment sur la volonté d'implantation de différents types de SMR. Les canadiens sont à la recherche de SMR pouvant fournir de 15 à 500 MW, pour des usages variés : extraction de schistes bitumineux, production de vapeur à haute température pour l'industrie lourde, fourniture d'énergie dans les zones reculées, elles sont nombreuses au Canada... Il s'agit là d'un bon exemple des potentialités multiples des SMR. Le besoin du client va donc avoir une influence cruciale sur le type de SMR adapté au besoin exprimé.

Qu'est-ce qui va faire la différence en termes de débouchés, parmi tous les produits SMR développés ?

Il y a tout d'abord un effet de timing, qui va étaler dans le temps la mise en place des **différentes technologies de SMR**. Les produits développés à partir des réacteurs de génération 3 et 3+ vont être prêts à l'horizon 2030, car ce sont des technologies qui sont déjà maîtrisées à l'heure actuelle.

Ensuite, il y a le choix du réacteur. Aujourd'hui les réacteurs les plus performants sont les réacteurs à eau pressurisée, c'est la technologie que nous avons choisie. Pour autant, certains concurrents choisissent de développer des réacteurs à eau bouillante, chaque acteur fait donc ses choix en fonction de différents paramètres et de son expérience. Forcément, au final, certains acteurs vont disparaître, car leurs projets auront échoué, le produit ne trouvera pas son marché, la technique développée ne sera pas la bonne... Au final, des appels d'offres vont sortir, et ce sont les technologies les plus adaptées et les plus avancées qui reflèteront la mise à ce moment-là.

Ce qui est certain, c'est que la concurrence va être très importante sur le marché des SMR.

Pour revenir au contexte français, notre passé industriel sur le nucléaire et l'expérience de notre filière constituent un avantage certain sur certaines phases de développement des SMR.

Ce qui ressort de ce plan France 2030, en ce qui concerne le sujet des SMR, c'est que l'Etat veut soutenir la filière. C'est un signal très important pour nous. Ce soutien, l'Etat l'avait déjà acté à travers le financement à hauteur de 50 millions d'euros de l'avant-projet sommaire, qui est pourtant une phase très en amont du projet. France 2030 vient confirmer l'intérêt de l'Etat, de façon massive puisque c'est un milliard d'euros qui devrait être injecté pour soutenir les acteurs de la filière SMR, dont, nous l'espérons, une partie pour le projet Nuward.

De notre côté, nous nous projetons sur la réalisation d'un

premier de série. C'est une phase cruciale du projet, à travers laquelle nous devons faire la démonstration de notre technologie et des performances de notre centrale auprès des clients potentiels. La question de l'endroit où sera implanté ce premier de série est donc très importante.

Bien évidemment, il y aurait beaucoup d'avantages à installer ce premier de série sur le sol français pour tout un tissu d'entreprises plus petites, pour lesquelles ce type de projet est une opportunité unique en termes d'activité et d'emplois. Cependant, si un pays étranger finance la construction sur son sol d'un NUWARD, cela représente également une opportunité intéressante. Aujourd'hui, cette question n'est pas actée.

Propos recueillis par Pierre Thouverez.

Image de une : Le développement du SMR se fait en partie grâce à la réalité virtuelle ©YohanBrandt-TechnicAtome ©EDF2021

24/01/2022

LA RELANCE DU NUCLÉAIRE EN FRANCE

NUCLEAR VALLEY INTERVIENT EN APPUI DU DISPOSITIF FRANCE 2030 DANS LE NUCLÉAIRE

Depuis le lancement de France 2030, le pôle de compétitivité Nuclear Valley se positionne en soutien de ce plan d'investissement qui vise à favoriser le développement de la filière nucléaire en France. Son action porte sur la labellisation de briques technologiques, le soutien aux entreprises du secteur et l'aide à la formation aux métiers du nucléaire.

Plus de 15 ans après sa création, Nuclear Valley poursuit ses missions qui visent à favoriser le développement de solutions innovantes et compétitives pour la **filière nucléaire** en France. Ce pôle de compétitivité, dont le siège est situé à Chalon-sur-Saône, fédère aujourd'hui près de 450 adhérents (PME, ETI, grands groupes), dont près de la moitié est installée dans les régions Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne-Rhône-Alpes. Depuis le lancement de France 2030, il est également en appui de ce plan d'investissement, dont l'objectif est notamment de faire émerger de nouveaux réacteurs nucléaires de petite taille et favoriser la formation aux métiers du nucléaire.

« Sur les quinze dossiers déposés dans le cadre de l'appel à projets « **Réacteurs nucléaires innovants** » de France 2030, tous les porteurs de projets sont membres de notre association, se réjouit Jean-François Debost, directeur général de Nuclear Valley. Et nous en avons accompagné 11, certains sur la labellisation de leurs briques technologiques, d'autres sur la recherche de fonds propres ou encore la recherche de partenaires industriels. »

À travers son conseil scientifique, composé d'une vingtaine d'experts indépendants, Nuclear Valley a pour mission de labelliser certains projets d'innovation dans le nucléaire. Pour cela, ceux-ci doivent respecter deux conditions : démontrer leur caractère **innovant** et leur capacité à créer

des emplois en France. « Un projet labellisé a ensuite trois fois plus de chances d'obtenir une subvention, révèle Jean-François Debost. Les financeurs publics n'ont pas les compétences techniques pour évaluer tous les projets, et en quelque sorte, ils nous sous-traitent ce service pour lever les risques. »

Une autre mission de Nuclear Valley, qui prend de plus en plus d'ampleur, consiste à aider les entreprises dans la recherche de **fonds propres**. Pour percevoir des subventions publiques, comme celles attribuées dans le cadre du dispositif France 2030, elles doivent en effet respecter le principe d'un pour un, qui signifie que pour un euro de subvention perçu, l'entreprise doit disposer d'un euro de fonds propre. Nuclear Valley a donc créé un club investisseurs, baptisé Nuc Tech, qui fédère quinze fonds d'investissement, parmi lesquels des fonds souverains, régionaux et bancaires. « Nos entreprises adhérentes ont beaucoup de difficultés à trouver des investisseurs, ajoute Jean-François Debost. Nous les aidons à préparer leurs dossiers, à les entraîner à pitcher leurs projets, puis nous soumettons leurs dossiers à nos quinze investisseurs. Ils sont prêts à investir dans le nucléaire, et ce malgré toutes les contraintes de ce secteur, notamment le fait de devoir faire face à une industrie du temps long et fortement capitalistique. »

Ce soutien aux entreprises peut aussi prendre la forme d'un appui aux adhérents dans leur recherche de futurs partenaires industriels ou pour les aider à accroître leur chiffre d'affaires. Pour cela, Nuclear Valley organise régulièrement des rencontres entre tous les acteurs de la filière nucléaire. La dernière en date, baptisée Les rendez-vous Nuclear Valley, a réuni plus de 650 personnes et un peu plus de

300 entreprises lors de sa septième édition en novembre dernier.

Alors que le soutien à la formation aux métiers du nucléaire est le deuxième axe fort porté par France 2030 dans ce secteur, Nuclear Valley intervient dans ce domaine à plusieurs niveaux. Il est membre fondateur de l'Université des métiers du Nucléaire (UMN), une association qui a pour vocation de dynamiser les dispositifs de formation du secteur [nucléaire](#), aux échelles régionale, interrégionale et nationale et d'apporter des réponses aux besoins de recrutement sur des métiers essentiels à la filière.

Dans le cadre du dispositif « Compétences et métiers d'avenir (CMA) » mis en place par France 2030, le pôle de compétitivité intervient également en appui de certains organismes de formation qui ont déposé des dossiers à cet « Appel à manifestation d'intérêt » (AMI) ». « Nous sommes partenaires d'un certain nombre d'initiatives pour attirer les jeunes dans les écoles, complète Jean-François Debost. Par exemple, nous relayons les nouvelles formations proposées pour les faire connaître auprès de notre écosystème d'adhérents. Nous nous rendons aussi dans des écoles et organisons des forums, pour faire entrer les entreprises dans les écoles afin qu'elles présentent leurs activités aux élèves, et certains d'entre eux peuvent décrocher des offres d'emploi ou des stages. L'enjeu de la formation est important, car la filière nucléaire française aura besoin de 100 000 compétences de plus dans les dix années à venir. »

02/01/2024

COP28 : MACRON SIGNE SUR LE NUCLÉAIRE ET LES ENR CONTRE LE CHARBON

Emmanuel Macron était à Dubaï pour la COP28 les 1er et 2 décembre. Il y a notamment signé une déclaration appelant à tripler les capacités nucléaires au niveau mondial d'ici 2050, et invité à mettre fin au charbon dans tous les pays « le plus vite possible ».

Les scénarios du GIEC qui permettent de limiter le réchauffement climatique à +1,5°C impliquent de réduire la consommation de **charbon** de 95 %, du pétrole de 60 % et de gaz de 45 % en 2050 par rapport à l'année 2019. En déplacement à la COP28 à Dubaï les 1er et 2 décembre, Emmanuel Macron a détaillé les messages portés par la France en matière d'énergie pour avoir une chance de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C. « *Le cœur de la priorité, c'est que les pays les plus consommateurs de charbon en sortent le plus vite possible* », a-t-il estimé en conférence de presse.

Emmanuel Macron appelle ainsi tous les pays du G7 à montrer l'exemple et sortir du charbon d'ici 2030 (la France le fera avant 2027). L'objectif pour la France est de tourner la page du pétrole « d'ici 2040-2045 » et celle du gaz en 2050. Emmanuel Macron appelle à ce « *que tous les pays du G20 fassent de même le plus vite possible* » et à couper « *progressivement les financements au charbon* ». Il s'agira en parallèle d'aider les pays émergents à faire de même. Pour cela, la France entend concentrer ses aides publiques sur les projets nucléaires et renouvelables et les programmes de « juste transition énergétique » (Just Energy Transition Partnership – JETP). Ces partenariats lancés avec l'Afrique du Sud, l'Indonésie, le Vietnam et le Sénégal depuis la COP26 à Glasgow ont pour but d'aider ces pays à la **transition énergétique** et à la sortie du charbon.

Tripler les capacités nucléaires d'ici 2050

Pour la France, sortie du charbon et développement du nucléaire font bon ménage. Le 2 décembre 2023 à la COP28, elle a signé une déclaration, aux côtés de 21 autres pays, dont les États-Unis, les Émirats arabes unis, et le Japon, appelant à tripler les capacités de production nucléaire mondiales d'ici 2050 par rapport à 2020. À la fin de cette année-là, la capacité nucléaire installée s'élevait à 393 gigawatts (GW), selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Tripler les capacités de production nucléaire d'ici 2050 reviendrait donc à atteindre 1 179 GW à cet horizon.

Emmanuel Macron s'en réjouit. « *Cet engagement et l'objectif de tripler l'énergie nucléaire d'ici 2050 que nous approuvons aujourd'hui envoient un message extrêmement puissant au Monde : l'énergie nucléaire est de retour et est une solution indispensable à la lutte contre le changement climatique* », a assuré Emmanuel Macron à la tribune. La déclaration invite d'autres pays à les rejoindre dans cet effort. La Chine et la Russie, les premiers constructeurs de réacteurs nucléaires dans le monde aujourd'hui, n'ont toutefois pas signé la déclaration.

La Belgique, qui a repoussé sa sortie nucléaire de dix ans (de 2025 à 2035), accueillera à Bruxelles le premier sommet sur l'énergie nucléaire les 21 et 22 mars 2024, en partenariat avec l'AIEA. La participation d'environ 30 pays, dont la France, est attendue. « *Pour la première fois, [cette rencontre] va mettre autour de la table les gouvernements, les entreprises, les investisseurs et les régulateurs du secteur pour organiser une stratégie cohérente pour permettre ce triplement du nucléaire à 2050* », s'est félicité Emmanuel Macron.

Greenpeace dénonce de son côté une vision « *déconnec-*

tée de la réalité ». « Entre retards, surcoûts et dépendance à la Russie, l'industrie nucléaire perd chaque jour du terrain dans le *mix énergétique mondial* et se marginalise un peu plus au profit des énergies renouvelables. Bien moins chères, rapides à déployer et accessibles aux pays en développement, ces énergies font quant à elles consensus sur la scène internationale », déclare Pauline Boyer, chargée de campagne Transition énergétique à Greenpeace France, dans un communiqué.

Énergies renouvelables et investissements

Le même jour à la COP28, la France s'est aussi engagée, parmi 116 pays, au triplement des capacités d'énergies renouvelables (ENR) d'ici 2030. L'objectif : atteindre 11 000 gigawatts, contre environ 3 400 aujourd'hui. « *Le bon mix, c'est l'efficacité énergétique, plus de renouvelable et plus de nucléaire* », a défendu Emmanuel Macron.

Le chef de l'État entend s'attaquer à la rémunération des banques privées pour encourager le développement des énergies renouvelables et l'arrêt du financement de nouvelles centrales à charbon. « *Si vous êtes investisseur, vous payez le même taux d'intérêt pour un projet charbon, un projet gaz ou un projet renouvelable* », a regretté le président, suggérant de mettre en place des taux d'intérêt différenciés suivant les énergies financées. Le projet d'un « *gold standard* », sorte de « *classification financière de ces types d'investissement* », doit être piloté et mis en place par la Banque mondiale, a avancé Emmanuel Macron.

04/12/2023

LE NUCLÉAIRE RECONNU COMME SOLUTION DE DÉCARBONATION LORS DE LA COP28

Le 2 décembre 2023, lors de la COP28, une vingtaine de pays dont la France ont appelé à tripler la production d'énergie nucléaire d'ici 2050, dans le but de sortir de notre dépendance aux énergies fossiles. Un appel qui a abouti à l'inscription du nucléaire comme solution de décarbonation dans le texte de l'accord final de la COP. En plus de marquer la fin d'un tabou, cette reconnaissance officielle intervient dans un contexte de relance mondiale de l'énergie atomique, alors que l'AIEA prévoit au moins un doublement de la capacité nucléaire installée d'ici 2050.

« Nous savons par la science, la réalité des faits et des preuves qu'on ne peut pas atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 sans nucléaire ». Tels sont les mots de John Kerry, envoyé spécial de Joe Biden lors de la COP28. Si plusieurs pays d'Europe, comme [la Suède](#) ou la France, comptent également sur le nucléaire pour décarboner, [des signaux forts de relance du nucléaire](#) sont aussi envoyés depuis la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée du Sud ou encore le Canada.

Un contexte international favorable au développement de la filière nucléaire

Cet appel au développement [du nucléaire](#) n'a pas été lancé par hasard lors de la COP28. D'une part, on ne peut nier la portée symbolique de faire une telle annonce dans un pays qui demeure le 7e plus grand producteur de pétrole, mais qui [mise de plus en plus sur le nucléaire](#) pour soutenir sa croissance.

En effet, l'histoire du pays avec l'atome est récente, puisqu'elle a démarré en 2009, avec la signature d'un

contrat de quatre réacteurs avec le consortium sud-coréen Korea Electric Power Company, qui a abouti à la mise en service du premier réacteur du monde arabe en 2021.

D'autre part, le fait de mentionner pour la première fois la contribution du nucléaire à la lutte contre le réchauffement climatique dans le texte d'une COP a un caractère historique indéniable, qui représente pour la France et les États-Unis une [victoire diplomatique dont ils se félicitent](#).

Mais au-delà de la [reconnaissance du nucléaire](#), qui n'est désormais plus un sujet tabou, cet accord intervient dans un contexte plus global de [développement de la filière nucléaire au niveau mondial](#).

Bientôt un premier sommet mondial sur l'énergie nucléaire

En mars 2024, le tout premier sommet international sur l'énergie nucléaire aura lieu à Bruxelles. [Cet événement organisé par l'AIEA et la Belgique](#) réunira une trentaine de pays, des leaders industriels du secteur ainsi que des experts, des représentants de think tanks et des membres de la société civile.

Ce sommet sur l'énergie nucléaire abordera de nombreuses thématiques de haut niveau :

- des débats scientifiques au sujet des technologies de réacteurs, des systèmes hybrides nucléaire+ENR, du cycle de vie des installations, etc. ;
- un débat politique sur les obstacles au déploiement rapide des technologies nucléaires et les solutions identifiées pour les surmonter ;
- un débat autour des défis : approvisionnement en combustible, démantèlement des centrales, sécurité, etc.

L'initiative Atom4NetZero de l'AIEA

Pour l'AIEA, le sommet sera aussi l'occasion de présenter l'initiative [Atom4NetZero](#), dont le but est « *d'exploiter le potentiel de l'électronucléaire pour un futur énergétique propre* ». Cette initiative fournira notamment « *une expertise technique et des données scientifiques sur le potentiel de l'électronucléaire afin de décarboner la production d'électricité ainsi que les secteurs difficiles tels que l'industrie et les transports.* »

Tous ces signaux indiquent la fin de la traditionnelle opposition entre énergie nucléaire et [énergies renouvelables](#), une nécessité pour relever les défis énergétiques à venir.

11/01/2024

UN PROGRAMME ÉNERGÉTIQUE QUI MISE SUR LE NUCLÉAIRE, ENTRE AUTRES

A peine réélu, Emmanuel Macron va devoir mettre en place, en cohérence avec ce qu'il a annoncé durant la campagne présidentielle, un programme énergétique ambitieux mais risqué. Explications.

L'urgence climatique, une énième fois rappelée dans le [dernier rapport du GIEC](#), en février 2022, est bien sûr intimement liée à la question énergétique. Les problématiques de consommation et de [production d'énergie](#) dans l'hexagone font donc partie des prérogatives importantes du président, et sur ce point Emmanuel Macron a fait des [propositions nombreuses](#), visant à développer conjointement plusieurs types de productions électriques : nucléaire, éolien offshore, hydrogène... une telle diversification peut laisser penser que le pari est risqué, et il l'est. D'un autre côté, miser sur plusieurs énergies permet aussi d'envisager un échec sur l'une d'entre elles plus sereinement. Si les autres voies aboutissent.

Il est également important de rappeler qu'au vu de la situation actuelle avec la Russie, le [développement d'une autonomie énergétique doit être accéléré au niveau européen](#). D'ailleurs, l'ensemble des candidats à l'élection présidentielle étaient d'accord sur ce point. Il s'agit aujourd'hui d'une priorité politique et donc stratégique.

Devenir le leader européen sur l'hydrogène

C'est le premier pari : Emmanuel Macron veut faire de l'hexagone le champion continental de la production d'hydrogène bas carbone. Un plan de sept milliards d'euros, sur dix ans, sera mis en place pour accompagner une filière émergente aujourd'hui, qui pourrait créer, selon le programme du candidat Macron, 100 000 emplois.

Les ambitions françaises sur l'hydrogène synthétisent bien

le mot d'ordre : il faut décarboner. C'est pour cela que le nouveau président élu s'est engagé pendant la campagne présidentielle à faire construire de nouveaux réacteurs nucléaires, plus modernes et plus sûrs, selon le programme du candidat. 6 nouveaux [EPR](#) seront construits ([le chiffre de 14 au total est évoqué](#)), et les recherches sur les réacteurs modulaires de petites tailles se poursuivront, [en cohérence avec les investissements du plan France 2030](#). Le programme d'Emmanuel Macron précise également, sans plus de détails, que des solutions pour améliorer la gestion des déchets seront étudiées.

Faciliter le développement des énergies renouvelables

En simplifiant administrativement la mise en place de projets d'[énergies renouvelables](#), notamment sur les [délais de mise en œuvre](#), Emmanuel Macron cherche à booster des secteurs qui fonctionnent aujourd'hui en dessous de leur potentiel sur le sol français, que ce soit pour l'[éolien](#) et le solaire. [Sous le dernier quinquennat, la capacité de production pour l'éolien et le solaire a progressé de 20 % \(voir les chiffres de RTE\)](#). La simplification administrative vise donc à accentuer cette tendance, un effort particulier étant porté sur l'éolien en mer, avec quatre grands chantiers qui sont d'ores et déjà en construction. [50 seront implantés au total](#), d'après le programme du candidat.

Une fin du charbon en 2024 ?

C'est une des ambitions pour ce nouveau quinquennat : en finir avec le charbon, d'ici à 2024. Alors que trois centrales ont été fermées lors des cinq dernières années, l'arrêt des dernières centrales doit coïncider avec la [mise en service du nouveau réacteur de Flamanville](#).

Au niveau des investissements, le nouveau président fran-

çais s'est engagé à ce que l'Etat ne soutienne plus financièrement de projets d'énergies fossiles à l'étranger, dans la mesure où ils ne seraient pas compatibles avec les accords de Paris.

Dernière mesure d'ampleur, l'obligation d'installer du photovoltaïque ou des toits végétalisés lors de la construction, l'extension ou la rénovation lourde de tous les bâtiments à usage commercial, industriel ou des bureaux de plus de 500 mètres carrés.

Ainsi, si la relance de la construction de centrales nucléaires est considérée comme la mesure phare de son programme - [en accord avec un des scénarios envisagé par RTE](#) - Emmanuel Macron, en misant sur la diversification du mix énergétique, tente un pari qui, s'il ne pourra probablement pas être totalement gagnant, limite le risque pour l'hexagone de se retrouver dans une situation de dépendance énergétique trop prononcée dans les années qui viennent.

Par Pierre Thouverez

16/05/2022

LA SUÈDE VA INVESTIR MASSIVEMENT DANS LE NUCLÉAIRE

La Suède a annoncé sa volonté d'investir massivement dans l'énergie nucléaire, afin de réussir sa transition énergétique et satisfaire l'évolution de la demande en électricité. Une stratégie qui fait écho à la proposition de la France d'appeler au développement du nucléaire lors de la COP28.

La déclaration de la France, qui sera dévoilée le 2 décembre, a d'ores et déjà reçu le soutien de cinq pays : Royaume-Uni, États-Unis, Corée du Sud, Émirats arabes unis, sans oublier la Suède, particulièrement impliquée dans la relance du nucléaire à l'échelle européenne et mondiale.

La Suède : un exemple à suivre en termes de décarbonation

Ce n'est pas un secret. La Suède fait figure d'exemple en matière de décarbonation. C'est même le pays de l'OCDE qui affiche les meilleures performances !

En Suède, le secteur du bâtiment, habituellement l'une des principales sources d'émission^[1] de CO₂, est également très en avance sur ses voisins, puisque les émissions de CO₂ des modes de chauffage ont diminué de 90 % entre 1990 et 2019. Cet exploit, pour un pays proche du cercle polaire, est lié à une particularité suédoise : la construction généralisée de réseaux de chaleur dans les villes, qui sont en partie alimentés par la combustion de déchets forestiers, l'incinération de déchets, mais aussi par des pompes à chaleur ou la chaleur fatale.

Il faut aussi rappeler que la Suède a entrepris d'améliorer l'efficacité énergétique de ses bâtiments dès les années 1960 et qu'elle a cherché à réduire sa dépendance au pétrole suite aux chocs pétroliers des années 1970. La Suède décida alors de miser sur le nucléaire, les énergies renouvelables et le charbon, jusqu'à l'instauration d'une taxe carbone en 1991, dont le coût augmente depuis

30 ans, ce qui pénalise à la fois charbon et pétrole.

De quoi est composé le mix électrique suédois ?

Le mix électrique^[2] suédois est composé en majorité de nucléaire (à 43 %) et d'hydroélectricité (à 31 %). L'histoire de la Suède avec le nucléaire ne date donc pas d'hier, puisque le pays exploite actuellement six réacteurs nucléaires, répartis dans deux centrales.

Le mix est par ailleurs complété par la cogénération (9 %) et par l'éolien, une source d'énergie qui s'est fortement développée dans le pays (16 % du mix) ces dernières années.

Cette électricité bas carbone et compétitive a permis à la Suède :

- de devenir le plus grand exportateur européen d'électricité en 2022, avec 20 % de production exportée ;
- d'attirer et développer de nombreuses industries électro-intensives, notamment en lien avec les objectifs de décarbonation (gigafactories, électrolyseurs, etc.).

Victime de son succès énergétique, la Suède prévoit ainsi un doublement de la consommation électrique du pays d'ici 2040 !

Si la Suède veut être en mesure de « suivre la cadence », tout en conservant une production électrique bas carbone, elle n'a donc pas le choix que de soutenir le développement du nucléaire.

Des annonces attendues à la COP28

Des études de faisabilité ont déjà été lancées par Vattenfall, l'énergéticien public détenu à 100 % par l'État, pour la construction de deux réacteurs modulaires (SMR) à Ringhals, dans le but de commencer à produire vers 2035.

Mais selon les estimations du gouvernement, la Suède aura besoin de bien plus : l'équivalent de dix nouveaux

réacteurs d'ici 2045 ! Et comme pour tous les pays[3] qui se lancent dans des chantiers de cette ampleur, les questions de coûts, de délais et de compétences disponibles vont s'avérer cruciales.

La déclaration initiée par la France et qui sera dévoilée le 2 décembre à la COP28 prévoit d'appeler à un triplement des capacités de production nucléaire d'ici 2050, ce qui nécessiterait d'importants efforts d'investissements. Cet appel à [développer le nucléaire](#) sera donc aussi un appel aux banques de développement et à la Banque mondiale à soutenir financièrement le nucléaire.

[1] Selon un rapport de 2020 du Haut conseil pour le climat, le secteur du BTP produit plus du tiers des émissions de CO2 en Union européenne, plus du quart en France !

[2] Chiffres de 2021

[3] Notamment la France, la Finlande et le Royaume-Uni

Pour en savoir plus

[La stratégie bas carbone de la Suède - sauvonsleclimat.org](#)

[L'exemple de la stratégie bas carbone de la Suède - Observatoire de l'Industrie Electrique](#)

[En Suède, la décarbonation du bâtiment a une longueur d'avance - Up to Us Véolia](#)

[Pays moteur dans la relance du nucléaire, la Suède va investir fortement dans l'atome - La Tribune](#)

29/11/2023

QUELLE PLACE POUR LE NUCLÉAIRE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

Les combustibles fossiles fournissent depuis environ deux siècles de l'énergie bon marché et concentrée. Mais l'humanité est confrontée aujourd'hui à un défi énergétique qui consiste, d'une part à réduire ses émissions de CO₂, d'autre part à substituer progressivement lesdits combustibles par des sources d'énergie durables et décarbonées, comme les énergies renouvelables ou le nucléaire.

Un extrait de « [Analyse et perspectives énergétiques](#) » par Christian NGÔ

L'intérêt de l'énergie nucléaire est de produire de l'électricité à bas niveau carbone, en continu et à un coût compétitif. Cependant, cette énergie demande de gros investissements (analogue d'ailleurs, par kilowatt installé, à d'autres énergies renouvelables) et des délais assez longs de mise en œuvre. La maîtrise du nucléaire requiert aussi un niveau technologique élevé, et nécessite la gestion des déchets associés. Elle se heurte dans un certain nombre de pays, et notamment en Europe, à l'opposition d'une partie des populations concernées en raison des risques qui lui sont prêtés. L'accident de Fukushima en 2011 a aggravé ces craintes et contribué à renforcer les dispositifs de sécurité, augmentant ainsi les coûts. De son côté, la [fusion thermonucléaire](#) fait l'objet d'intenses recherches avec une forte coopération au niveau international depuis des décennies. Le nouveau réacteur international ITER, en construction à Cadarache près d'Aix-en-Provence, permettra de faire avancer les connaissances sur le plasma de fusion. Mais on est encore loin d'une application industrielle...

Les compromis inhérents à la transition énergétique

La transition énergétique vise à réduire la consommation de combustibles fossiles et à émettre moins de CO₂ dans l'atmosphère. Mais les moyens mis en œuvre pour atteindre ces

objectifs vont parfois à l'encontre de ceux-ci. Ainsi, l'éolien et le solaire, qui sont des [énergies intermittentes](#), demandent des moyens complémentaires émetteurs de CO₂ pour fournir de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de vent ou de soleil. Rien ne sert de remplacer une centrale nucléaire, qui n'émet pas de CO₂ en fonctionnement, par des éoliennes car ces dernières ont besoin de centrales thermiques complémentaires en l'absence de vent. Par contre, si l'on dispose d'une centrale au charbon, il est intéressant dans une première étape de la remplacer par une centrale au gaz naturel. Ainsi, on divise les émissions de CO₂ par deux. Puis, on peut y ajouter des éoliennes ou des panneaux solaires afin de limiter l'emploi de la centrale à gaz.

Il va également falloir plus d'électricité pour recharger les batteries des véhicules hybrides rechargeables ou électriques. Ces batteries serviront à lisser la consommation et donc à réduire les moyens de production. Il faut toujours avoir une approche globale des problèmes, notamment en ce qui concerne l'environnement. Ainsi, un véhicule électrique n'émet pas de CO₂ localement. Tout dépend de la manière dont on fabrique l'électricité. En France, où seulement 10 % est produite avec des combustibles fossiles, la quantité de CO₂ émise est d'environ 15 g/km (et sans doute moins si la batterie est rechargée pendant les heures creuses). Dans un pays produisant entièrement son électricité avec des centrales au charbon, les émissions seraient en revanche supérieures à 150 g de CO₂ par km, c'est-à-dire plus que certains véhicules thermiques d'aujourd'hui.

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 14 mars 2024 !

[Analyse et perspectives énergétiques](#), par Christian NGÔ

29/02/2024

LES THÈSES DU MOIS : "LA FRANCE DANS LA COURSE AUX RÉACTEURS NUCLÉAIRES INNOVANTS"

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier du mois de février, "La France dans la course aux réacteurs nucléaires innovants", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur le [site de notre partenaire](#).

Méthodologie d'étude de l'intégration de Small Modular Reactors dans des réseaux électriques dans le cadre de la transition énergétique Charly Boudo Thèse de doctorat en Génie électrique. Soutenue le 18-10-2023. *Laboratoire de génie électrique*

Optimisation du cycle de Rankine pour le fonctionnement flexible d'un petit réacteur modulaire : apport de l'admission partielle par secteurs dans les corps de turbines au suivi de charge et à la cogénération. Guilherme Vescovi Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement. Soutenue le 14-12-2023. *Laboratoire de génie chimique*

Développement d'un schéma de calcul neutronique pour la modélisation du pilotage des SMR (Small Modular Reactors) sans bore soluble Pierre Devaux Thèse de doctorat en Mécanique des fluides, procédés, énergétique. Soutenue le 14-01-2022 *Laboratoire de simulation des combustibles (CEA Cadarache)*

Nuclear in decarbonized power systems with renewable energy : Flexibility assessment, modeling framework, and role in the French and Western European electric transition Arthur Lynch Thèse de doctorat en Ingénierie éco-

nomique. Soutenue le 13-12-2022. *Laboratoire Génie Industriel*

Normaliser l'apocalypse : organisations et recompositions du secteur nucléaire face aux accidents Valerie Arnhold Thèse de doctorat en Sociologie. Soutenue le 31-01-2022. *Centre de sociologie des organisations*

Nuclear safety, nuclear liability, and the role of the State : lessons from the Fukushima accident Ryoko Kusumi Thèse de doctorat en Droit public. Soutenue le 13-01-2023. *Centre d'études et de recherches internationales et communautaires*

Contribution à la démonstration de sûreté nucléaire dans un contexte d'ingénierie basée sur des modèles : Proposition méthodologique Emir Roumil Thèse de doctorat en Systèmes Automatiques et Micro-électroniques. Soutenue le 07-12-2022. *Laboratoire des Sciences des Risques*

Du salut énergétique au sauvetage de la filière nucléaire française : enquête sur l'évolution des visions du futur au cœur d'un système sociotechnique Martin Denoun Thèse de doctorat en Sociologie. Soutenue le 22-11-2022. *École des hautes études en sciences sociales*

L'adaptation du droit (interne et international) aux petits réacteurs nucléaires innovants Valentina Akopian Projet de thèse en Droit, depuis le 01-09-2023. *Université Paris-Panthéon-Assas*

Pilotage Cloud-Edge du control optimal des réseaux électriques Yara Abdul samad el skaff Projet de thèse en Génie électrique, depuis le 19-12-2022. *CEA-Liten*

Synthèse de chlorures/oxychlorures de lanthanides et d'actinides pour les réacteurs nucléaires à sels fondus Hugo Cuvilliers Projet de thèse en Chimie des matériaux, depuis le 01-10-2022. *Unité de Catalyse et Chimie du Solide*

29/02/2024

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Génie nucléaire

Parce que les enjeux énergétiques et environnementaux requièrent une information impartiale
Ref : TIP180WEB

PRÉSENTATION

L'ensemble des données scientifiques et techniques nécessaires à la production de l'énergie nucléaire,
Une description détaillée **des différents types de réacteurs et leur fonctionnement**: technologies, conception, fonctionnement, instrumentation et contrôle-commande,
Les principes essentiels de **sûreté nucléaire et de protection de l'environnement**,
Des éléments sur le **cycle du combustible et les possibilités de retraitement**,
Le **stockage des déchets**.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP180WEB	Génie nucléaire	1 562 €	1	1 562 €
Total H.T en €				1 562 €
T.V.A : 5,5%				85,91 €
Total TTC en €				1 647,91 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.