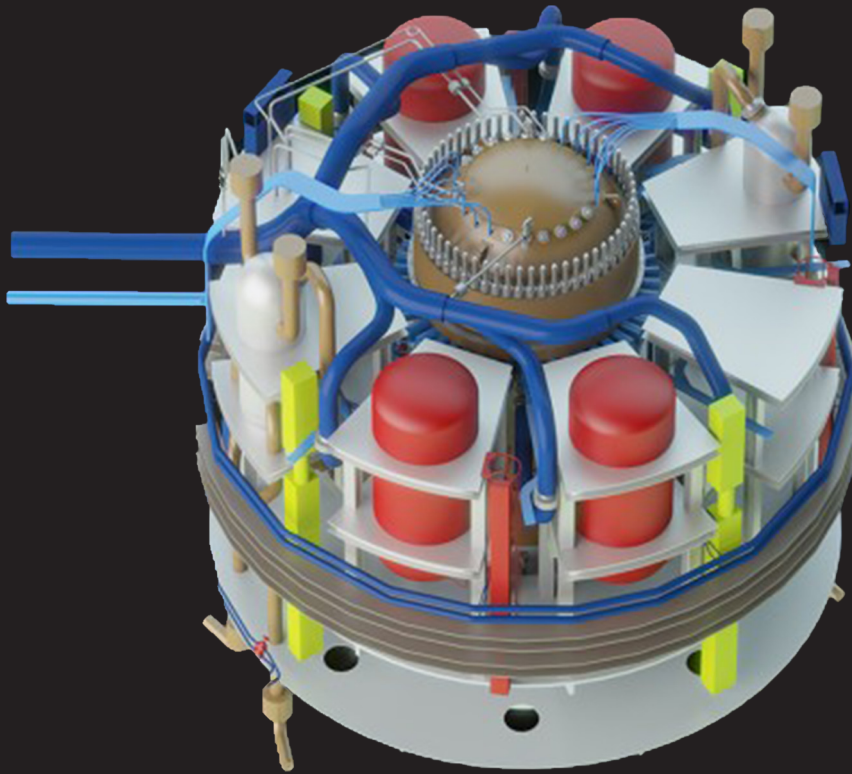


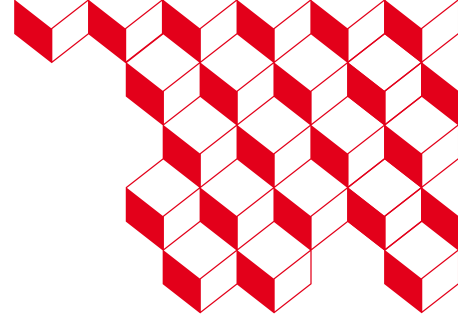
# SMR

Petits réacteurs modulaires



Réacteur NUWARD SMR  
© EDF 2021





# INTRODUCTION

Le défi du changement climatique est principalement orienté vers l'énergie. Dans ce contexte, les dirigeants du monde entier cherchent à accélérer la mise en œuvre de technologies énergétiques propres, à faciliter une transition vers des industries énergétiques durables, à favoriser l'inclusion et l'équité, ainsi qu'à maintenir la sécurité énergétique.

De plus en plus de pays s'engagent à réduire leurs émissions avec pour objectif le zéro émission nette de CO<sub>2</sub> d'ici 2050. « Le monde dispose d'une voie viable pour construire un secteur énergétique mondial, mais elle est restreinte et nécessite une transformation sans précédent de la manière dont l'énergie est produite, transportée et utilisée dans le monde », a déclaré l'Agence internationale de l'énergie dans un rapport spécial qui fait date.

Ayant connaissance de ces données, nous n'avons pas la possibilité de renoncer à une source d'énergie à faible teneur en carbone. Nous devons chercher tous les moyens dans les énergies renouvelables, y compris l'énergie nucléaire. Tous les leviers de la décarbonisation doivent être déployés pour atteindre les objectifs de neutralité carbone.

Aujourd'hui, les combustibles fossiles représentent plus de 60 % de la production totale d'électricité dans le monde. La demande d'électricité augmentant rapidement, la principale source de production doit changer, et une augmentation significative du rythme de déploiement des sources à émissions faibles ou nulles doit être mise en œuvre.

*Source: IEA*

Vérification des capteurs de température sur le condenseur de la boucle EVEREST (SACO).  
© A.Aubert/CEA



# SOMMAIRE

---

- 04 Quels défis pour l'industrie nucléaire française ?
- 06 Qu'est-ce qu'un petit réacteur modulaire ?
- 07 SMR vs AMR
- 08 Pourquoi développer le SMR ?
- 11 Les SMR : un choix pour le monde entier
- 12 CEA et SMR
- 15 Le SMR français : NUWARD™
- 16 Le projet Archeos
- 18 L'émergence des start-ups

# Quels défis pour l'industrie nucléaire française ?

L'industrie nucléaire française est confrontée à trois défis majeurs :

- Maintenir : prolonger la durée de vie des réacteurs de manière sûre et rentable.
- Renouveler le parc nucléaire par de nouvelles constructions.
- Innover : nouvelles technologies (SMR, AMR), nouveaux usages, nouveaux modèles d'investissement.

Le 10 février 2022, le Président de la République française a annoncé le lancement de la construction de 6 EPR2, le premier en 2035, et l'étude de 8 autres à l'horizon 2050. Les 6 premiers EPR seront complétés par des petits réacteurs modulaires (SMR) et des réacteurs «innovants» produisant moins de déchets.

Pour accompagner cette décision, un plan d'investissement «France 2030» a été créé. Le gouvernement a lancé le premier appel à projets pour développer de nouvelles technologies dans le secteur de l'énergie nucléaire. 500 millions d'euros pour le projet SMR NUWARDTM et 500 millions d'euros pour les réacteurs nucléaires innovants, également appelés AMR (Advanced Modular Reactor) seront distribués.





*Discours du président de la République française à  
l'Assemblée générale des Nations unies.  
Publié le 20 septembre 2022.  
© France/OTAN*

# Qu'est-ce qu'un SMR ?

Les SMR sont des réacteurs nucléaires dont la taille et la puissance sont inférieures à celles des réacteurs nucléaires traditionnels. Ils sont conçus pour être plus compacts, portables et flexibles, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans des zones reculées ou des endroits où la demande d'électricité est plus faible.



## SMALL

Puissances inférieures à 300 MWe.



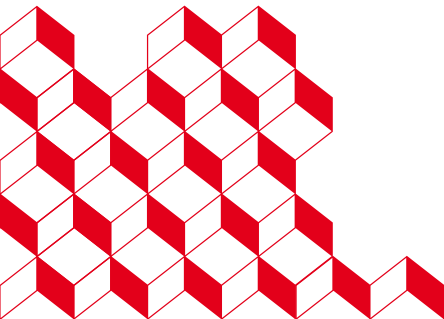
## MODULAR

Conception et construction modulaires (production en série limitée et adaptation au site). Production standardisée en usine.



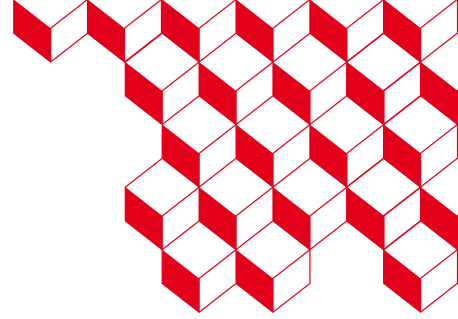
## REACTOR

Déploiement au cours de la prochaine décennie des REP GEN III.





# SMR vs AMR



Les AMR sont également des réacteurs de faible/moyenne puissance, mais ils présentent des avancées technologiques similaires à celles des réacteurs GEN-IV (sels fondus, Na, Pb, gaz). Il s'agit de réacteurs dont l'horizon temporel est légèrement plus long que celui des réacteurs GEN III.

Le développement de la technologie AMR (réacteur à neutrons rapides) nous permettrait de déployer une énergie nucléaire plus durable. En effet, le grand avantage des réacteurs à neutrons rapides réside dans leur capacité à produire autant ou plus de matière fissile qu'ils n'en consomment.

Les réacteurs à neutrons rapides peuvent donc, par recyclages successifs, utiliser la quasi-totalité de l'énergie contenue dans l'uranium, soit cent fois plus qu'un réacteur à eau ordinaire.

# Pourquoi les développer ?

Le projet de petits réacteurs nucléaires modulaires était initialement destiné uniquement à remplacer des centrales thermiques, notamment au charbon, pour l'exportation. Le remplacement des centrales à énergie fossile est possible en raison de la nature de leurs installations et de leurs infrastructures. La puissance émise par ces centrales est équivalente à celle produite par les SMR (300 à 500 MWe).

Au-delà de l'électricité, les SMR et AMR permettent d'accéder à tous les vecteurs énergétiques. Les SMR pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres systèmes pour produire de la chaleur, de l'hydrogène, des e-carburants ou dessaler de l'eau de mer et ainsi décarboner nos activités (industrielles, etc.). Ils peuvent être déployés en même temps sur un même réacteur. Ces SMR polyvalents sont des systèmes nucléaires hybrides et vont au-delà de la production d'électricité.

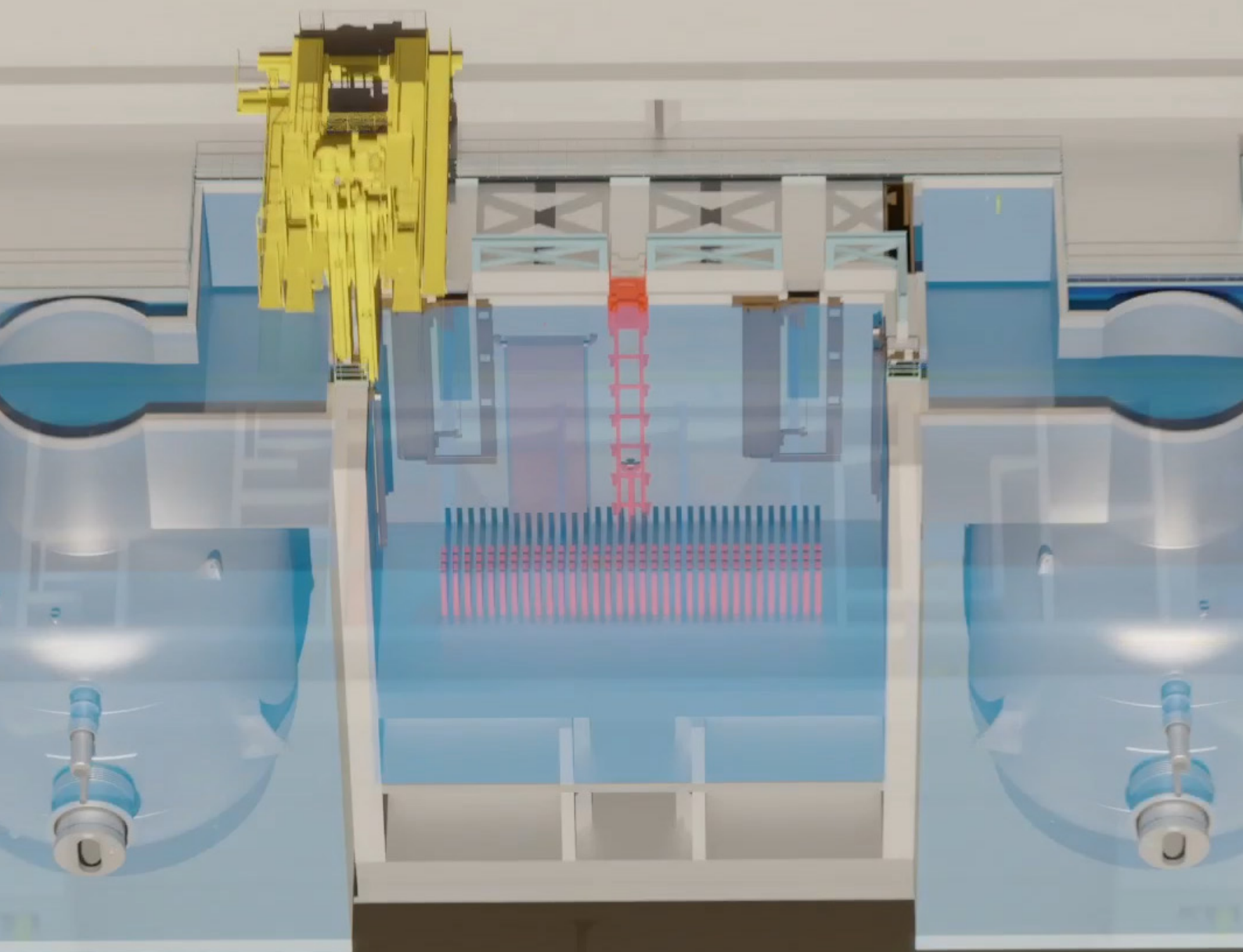
Les conceptions de SMR recherchent les avantages d'un réacteur de plus petite taille, en compensant la perte d'économies d'échelle.

## **Comment compenser la perte d'économies d'échelle pour être compétitif ?**

- L'effet de série : Des réacteurs plus petits mais plus nombreux sur le territoire. → Grande production standardisée de composants pour obtenir une économie d'échelle.
- Conception simplifiée : Une architecture, des matériaux et une structure de génie civil simplifiés, ainsi qu'une construction rapide et facile, permettent de réaliser des économies budgétaires importantes. De surcroît, le cœur du réacteur étant 10 fois plus petit qu'un EPR actuel, la grande quantité d'eau disponible permet un refroidissement passif du réacteur. Cela implique une conception simplifiée et donc des économies possibles.
- Conception et fabrication modulaires : fabrication en usine moins coûteuse que sur site, construction plus rapide.
- Mutualisation des points communs des sites et proximité des servitudes/infrastructures.
- Réduction des risques et des coûts financiers (temps de construction plus court).

Toutefois, pour que cela fonctionne, les projets doivent être identiques dans tous les pays. Il est donc nécessaire d'harmoniser les processus de certification des exigences réglementaires afin de bénéficier d'un effet de série complet.

NUWARD™:  
A l'intérieur de l'enceinte nucléaire, 2 réacteurs dans le même  
bâtiment nucléaire avec des équipements communs.  
© EDF





# Les SMR : un choix mondial

Les projets de SMR se multiplient en :

- Europe (Danemark, Pays-Bas, République tchèque, Suède, Italie, Suisse et France),
- Royaume-Uni,
- Canada,
- États-Unis,
- Argentine,
- Japon,
- Corée du Sud,
- Indonésie,
- Russie,
- Chine,
- Afrique du Sud,
- Arabie Saoudite.

On dénombre actuellement :

## SMR

25 petits réacteurs modulaires refroidis à l'eau (basés à terre).

8 petits réacteurs modulaires refroidis à l'eau (en mer).

## AMR

17 SMR refroidi au gaz à haute température.

8 SMR à spectre de neutrons rapides refroidi par métal liquide.

13 SMR à sel fondu.

## MMR

(Micro Modular Reactor)

12 microréacteurs.

Source : Système d'information sur les réacteurs avancés (ARIS) : *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022)*.



# Le CEA et les SMR

Le CEA a lancé plusieurs programmes de R&D sur les technologies SMR et AMR en s'appuyant sur ses différentes briques technologiques : électrogénique et calogénique.

Dans le domaine des SMR, le CEA participe au développement de NUWARD™, qui sera principalement utilisé pour produire de l'électricité. Le CEA étudie également un concept appelé Archeos, une unité de production de chaleur de 20 MWth destinée aux collectivités locales et aux industriels.

Un autre projet de SMR de 500 MWth en cogénération est à l'étude afin d'utiliser les capacités de chaleur et d'électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse à haute température, voire, dans une vision plus lointaine, pour produire des e-molécules à partir de ces nouveaux modèles de réacteurs.

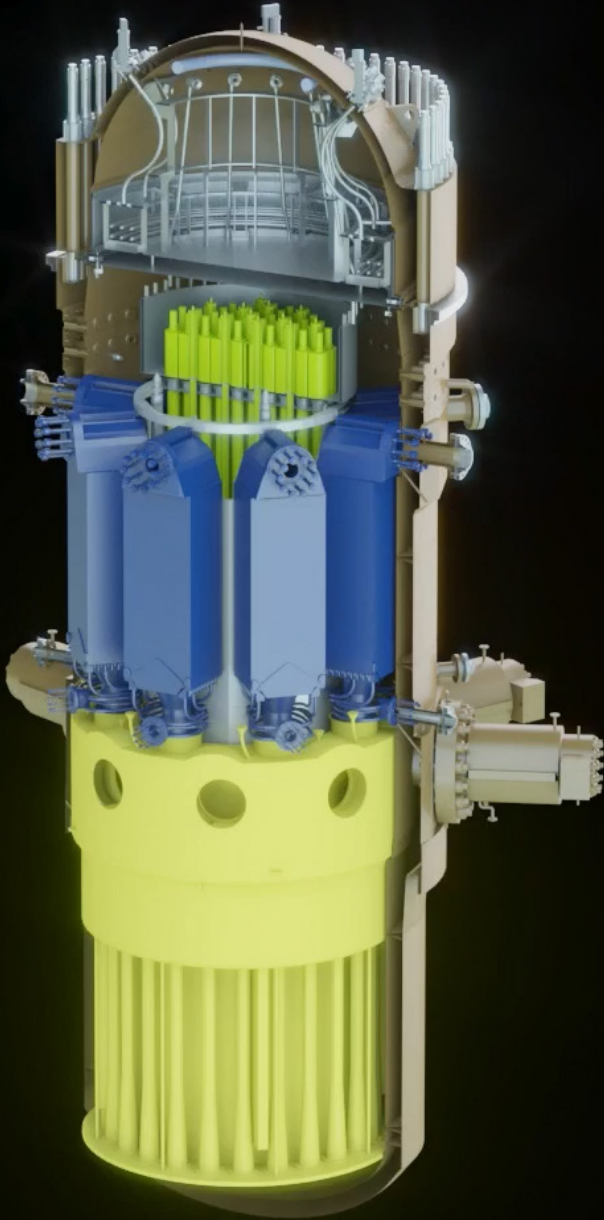
Des études sur la conception des réacteurs AMR sont également menées au CEA. Elles concernent soit les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (AMR-Na), qui permettraient de brûler davantage de déchets nucléaires, soit les réacteurs à sels fondus (MSR), plus avancés technologiquement.

Le développement des réacteurs à sels fondus a conduit à la création du projet de start-up STELLARIA et les technologies des réacteurs refroidis au sodium ont conduit à la création de trois projets de start-up : HEXANA, OTRERA & Blue Capsule.

Plateforme POSEIDON au CEA IRESNE :  
Boucle COLENTEC pour l'étude du  
colmatage des générateurs de vapeur.  
© A.Aubert /CEA







# Le SMR français : NUWARD™

Sous la direction d'EDF, TechnicAtome, Naval Group, Tractebel-Engie et le CEA travaillent au développement d'une technologie française appelée NUWARD™ (« nuclear forward »). Il s'agit d'un projet de réacteur à eau pressurisée intégré qui produit 340 MWe à partir de deux réacteurs indépendants de 170 MWe chacun, logés dans un seul bâtiment nucléaire permettant l'utilisation d'équipements partagés. Le réacteur SMR est développé pour remplacer les centrales thermiques de 300 à 400 MWe, fournir de l'électricité aux municipalités isolées et aux sites industriels à forte consommation d'énergie, ainsi qu'aux réseaux électriques dont la capacité est limitée.

NUWARD™ viendra compléter un portefeuille de réacteurs riche et diversifié en combinant technologies éprouvées et innovation pour gagner en constructibilité, en compétitivité opérationnelle et en performance environnementale :

- Un réacteur à eau pressurisée de génération III+ avancé, entièrement intégré et répondant aux normes de sécurité les plus strictes.
- La conception privilégie la normalisation, la construction modulaire et la simplicité pour permettre une production de masse efficace en usine. Elle offre une grande flexibilité pendant les phases de construction et d'exploitation, tout en respectant les normes de sécurité les plus strictes.
- Une conception développée pour encourager le suivi de la charge et adaptée aux utilisations non génératrices d'électricité.

Jusqu'à présent, le CEA a contribué à NUWARD™ par :

- Contribution à la conception de composants innovants pour Nuward (générateurs de vapeur).
- Études neutroniques pour la conception de base.
- Fournir une expertise sur le code du système thermohydraulique.
- Études transitoires thermo-hydrauliques et feuille de route de validation pour les systèmes innovants.
- Boucles expérimentales pour soutenir la performance des composants et la validation du code.

2030 est l'objectif du premier béton.

# Le projet Archeos

Le projet Archeos est un concept de réacteur calogène développé par le CEA, visant à répondre aux défis de la neutralité carbone d'ici à 2050 en produisant de la chaleur; le plus gros consommateur d'énergie primaire.

Archeos est un générateur nucléaire thermique, fonctionnant à l'eau légère, fournissant de 20 à 50 MW de chaleur jusqu'à 150°C. La solution est basée sur 4 grands axes de conception tirés des besoins marché :

- Une sûreté intrinsèque forte pour convaincre les politiques locales.
- Une simplicité de conception pour faciliter la démarche de sûreté et baisser les coûts,
- Une facilité d'implantation et de financement.
- Une rapidité de déploiement en réutilisant des briques technologiques déjà éprouvées.

Pour répondre aux besoins énergétiques français, Archeos se distingue par sa disponibilité imminente (dans les 10 ans), son absence de besoin en source froide, une surface d'implantation limitée à 1 hectare (100m x 100m suffisent) et une sûreté intrinsèque (pas de scénario de fusion du cœur).

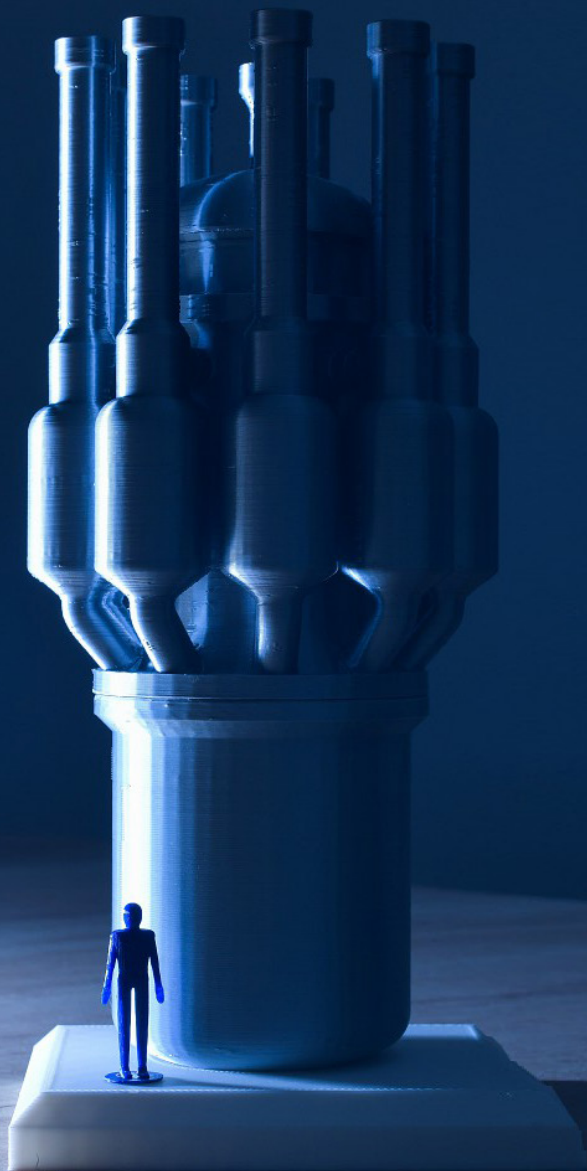
Sur le marché de la décarbonation, Archeos se positionne face au gaz et identifie quatre acteurs concurrents (la biomasse, la géothermie, les pompes à chaleur et le nucléaire du futur). L'analyse du marché identifie également un potentiel de 100 sites en France, avec des écosystèmes cibles tels que l'agroalimentaire, l'industrie et les collectivités.

Archeos vise à répondre aux besoins essentiels des Français (boire, se chauffer, manger) et ambitionne d'exploiter un parc de 10 réacteurs d'ici 2040 en France.

Pour cela, Archeos passera en 2024 d'un projet de R&D à un projet industriel en regroupant de nouveaux partenaires pour le développement de la solution.



Réalisation par impression 3D d'une conception  
de petit réacteur modulaire calogène de 3ème  
génération - Projet Archeos  
© A.Aubert /CEA



# L'émergence des start-ups

En tant qu'industrie lourde, très sensible, hautement qualifiée et ultra-réglémentée, l'énergie nucléaire semblait réservée aux gouvernements et aux grandes entreprises du secteur. Toutefois, le changement climatique a suscité un regain d'intérêt pour les technologies climatiques parmi les investisseurs. Les caractéristiques des SMR ont rendu les projets nucléaires accessibles aux start-ups. Il existe aujourd'hui un nombre croissant de jeunes entreprises dans le monde qui travaillent à la production d'une énergie nucléaire sûre, propre et durable en développant des réacteurs de génération IV.

L'industrie ne dépend plus uniquement de la recherche et du financement public, mais adopte un état d'esprit entrepreneurial et fait preuve d'un dynamisme accru, ce qui attire des investissements privés substantiels. Toutefois, les startups s'appuient toujours sur une base scientifique solide et sur les connaissances et le savoir-faire d'ingénieurs et de chercheurs hautement qualifiés. Le fait d'opérer dans l'industrie nucléaire représente un défi de taille pour les start-ups, malgré le potentiel qu'elles représentent. Le secteur accorde une importance primordiale à la sûreté et à la sécurité, ce qui le rend très réglementé. En outre, les exigences réglementaires internationales contribuent à la nature complexe de ce domaine. Dans les années à venir, l'écosystème des jeunes pousses du secteur nucléaire est appelé à se développer davantage. Nous pouvons nous attendre à l'émergence de nouvelles start-up dans les secteurs de la fusion et de la fission, accompagnée d'investissements substantiels provenant de sources privées et publiques.

En 2023, le CEA a présenté au public 4 nouvelles start-ups dédiées aux SMR et AMR. Ces start-ups développent des petits réacteurs nucléaires innovants dédiés à la décarbonation des industries électro-intensives. Fort d'une expérience de plus de 50 ans dans la création d'entreprises, le CEA a mis en place un programme d'accélération dédié pour accompagner ces entreprises.

## BLUE CAPSULE

### Blue Capsule

- BLUE CAPSULE conçoit un SMR haute température, réaliste au regard de la technologie de la chaîne d'approvisionnement, qui fournit de la chaleur industrielle à 700°C en utilisant l'air ambiant comme source de froid.
- Les composants clés ont déjà été utilisés dans l'environnement de réacteurs.environment.



### HEXANA

- HEXANA développe un réacteur nucléaire modulaire à neutrons rapides, refroidi au sodium et pouvant être construit en usine, d'une puissance de 150 MWe ou 400 MWth.
- L'association du réacteur à une unité de stockage thermique permet de découpler l'énergie thermique de l'énergie fournie aux utilisateurs.



### OTRERA

- OTRERA conçoit un réacteur de type AMR d'une capacité de 110 MWe et offrant 105 MW de chaleur utilisable en cogénération.
- L'AMR est basé sur les technologies les plus matures de la 4e génération de réacteurs rapides au sodium, tout en intégrant ses propres avancées technologiques développées dans le cadre du programme ASTRID.



### STELLARIA

- STELLARIA conçoit des réacteurs rapides à sels fondus avec un objectif de puissance de 250 MWth et une capacité de production d'électricité allant jusqu'à 120 MWe.
- La cuve de la capsule est conçue pour être multicom bustible et pour pouvoir régénérer jusqu'à 100 % de son combustible.

# Contact



iresne@cea.fr



04 42 25 20 71



[fr.linkedin.com/company/cea-iresne](https://fr.linkedin.com/company/cea-iresne)

**IRESNE - bâtiment 707**

Centre CEA de Cadarache  
13115 Saint-Paul-lez-Durance

