

ATELIER « SMALL & ADVANCED MODULAR REACTORS »

Congrès des Actuaires

Paris 30 mais 2024

Small Modular Reactors: le nouveau paradigme du nucléaire? demain

Le **besoin croissant d'énergie décarbonée dédiée aux activités industrielles** – consommation électrique mondiale x2 en 2050, tirée par les industries lourdes - favorise un (énième) **retour en grâce du nucléaire**, cette fois-ci par la proposition de **petits réacteurs modulaires** : une innovation de rupture en termes d'usages et de technologies, particulièrement intéressante pour les pays primo-accédants, mais qui se concrétiserait seulement à **horizon 2030**. La **filière nucléaire française est mise au défi de se redynamiser afin de saisir cette opportunité à l'export**

1. SMR vs AMR: deux classes de solutions technologiques distinctes pour des usages différents



Réacteurs à fission, de **petite taille** (<100m3) et **puissance réduite** (jusqu'à 300MWe), avec **assemblage modulaire** permettant des **coûts modérés**, et **sécurité intrinsèque**.

NB: Pas de fusion nucléaire

1 **SMR type Gen III+** : *downsizing* des REP/REB déjà en service, transposant technologies militaires (sous-marins). **Têtes de série en 2030**.

2 **SMR type Gen IV ou AMR (Advanced Modular Reactors)** utilisant des technologies en développement depuis les années '60. **Prototypes prévus pour 2040**

Atouts: Souplesse de pilotage et plus d'usages que les réacteurs standards: électro-génération en zones isolées, sites industriels, transports, désalinisation d'eau de mer, chaleur industrielle et réseaux de chauffage, production d'hydrogène...

2. Une nouvelle dynamique mondiale du nucléaire : forte compétition et nécessité d'alliances

Les SMR répondent à des **besoins industriels spécifiques des pays nucléarisés** (Canada, USA, UK, FR) et à la **nécessité d'énergie décarbonée de petits pays ou primo-accédants** avec un réseau électrique peu dense: **Europe de l'Est, Asie du Sud-Est, Moyen-Orient, Afrique**.

Les **acteurs historiques** sont mobilisés pour le **leadership technique, commercial et réglementaire**, avec une stratégie de 1^{er} exemplaire domestique pour viser ensuite les marchés extérieurs:

 **Russie et Chine déjà opérationnels (2022). Horizon temporel proche (2030) pour les SMR USA, UK, FR**

3. Un nouveau paradigme de l'énergie nucléaire...encore à valider

- **Le licensing:** déterminant pour le succès des différents modèles SMR/AMR, nécessité de financement public des études et d'une harmonisation de la réglementation internationale.
- **La rentabilité de la chaîne d'approvisionnement en composants modulaires en série:** dépendra du nombre de réacteurs installés et/ou de la capacité des équipementiers à se diversifier et évoluer leur offre.
- **Le fort besoin de financement:** de fonds d'investissement privés, porteurs d'accélération et de risque. Coût d'un premier SMR ~3Mds€, prototype AMR ~2 Md€ (réacteur + usine de combustible).
- **Le modèle économique à l'export :** complexité technique, financière, réglementaire, géopolitique, avec des modèles économiques très différents en concurrence.
- **L'acceptabilité sociétale:** confortée par les designs à sûreté intrinsèque, mais inquiétée pour des SMR localisés sur des sites industriels classés.

4. Une nécessaire métamorphose pour la filière nucléaire française

- **Une team nucléaire France unique au monde** car elle maîtrise toute la chaîne de valeur
- **Une complémentarité EPR2+SMR** sur les territoires excentrés
- **Un tissu d'équipementiers à pérenniser et dynamiser** pour maintenir le parc existant, réaliser les EPR2, déployer des SMR via un accompagnement et un accélérateur d'innovation pour les PME/ETI
- **Une présence sur les marchés étrangers à construire**, via un accompagnement à l'export pour une offre intégrée type « BOOT ».
- **Des choix technologiques et financiers pour soutenir les start-up AMR**, par Fonds d'investissement en partenariat public-privé dédié, avec portefeuille sur l'ensemble des technologies en cours de maturation.

Définition : Réacteurs nucléaires à fission, de petite taille (~100m³) et puissance réduite (jusqu'à 300MWe), réalisés par assemblage modulaire.



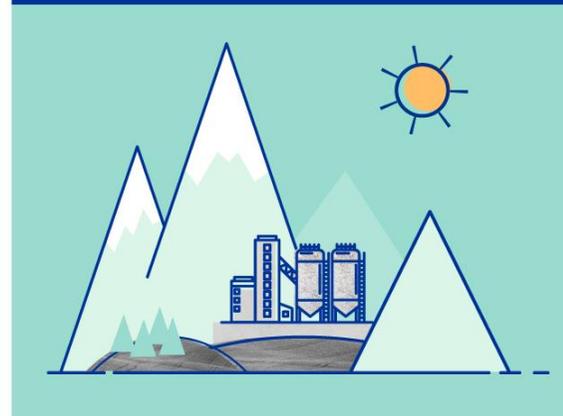
LARGE, CONVENTIONAL REACTOR
700+ MW(e)



SMALL MODULAR REACTOR
Up to 300 MW(e)



MICROREACTOR
Up to ~10 MW(e)



- 90+ concepts différents (AIEA)
- Deux classes de petits réacteurs à distinguer :

1 SMR à eau de type «Génération III+»:

- réacteurs à eau pressurisée (par ex. NuScale, ou **NUWARD de EDF**) ou bouillante (BWRX GE-Hitachi).
- Miniaturisation des technologies couramment utilisées dans les réacteurs en fonctionnement dans le monde, et basées sur des technologies militaires (sous-marins nucléaires)
- **Commercialisation des têtes de série : 2030.**
- *Le premier réacteur SMR à eau pressurisée est déjà en fonction sur le navire Akademik Lomonosov (par Rosatom), tiré d'un design issu des réacteurs pour applications navales*



FPU Akademik Lomonosov

2 AMR (Advanced Modular Reactor) ou XMR (Extra-small Modular Reactor):

- Réacteurs de puissance entre 15 et 300 MWe, basés sur une grande variété de technologies de type « Génération IV », issues de recherches menée dans les années '60
- **Avantage** : fermeture du cycle du combustible avec une durée d'opération sans recharge pendant plusieurs années
- **Verrous** : matériaux résistants à la corrosion, pilotage, approvisionnement en combustible, gestion des déchets ultimes
- **Premiers prototypes: 2040.**
- Typologies :
 - réacteurs HTGR (« High Temperature Reactors», de type gaz-graphite): un entré en fonction en Chine
 - réacteurs à neutrons rapides à caloporteur Sodium (type Superphénix...) ou Plomb
 - réacteurs à sels fondus
 - réacteurs de transmutation pilotés par un accélérateur de particules

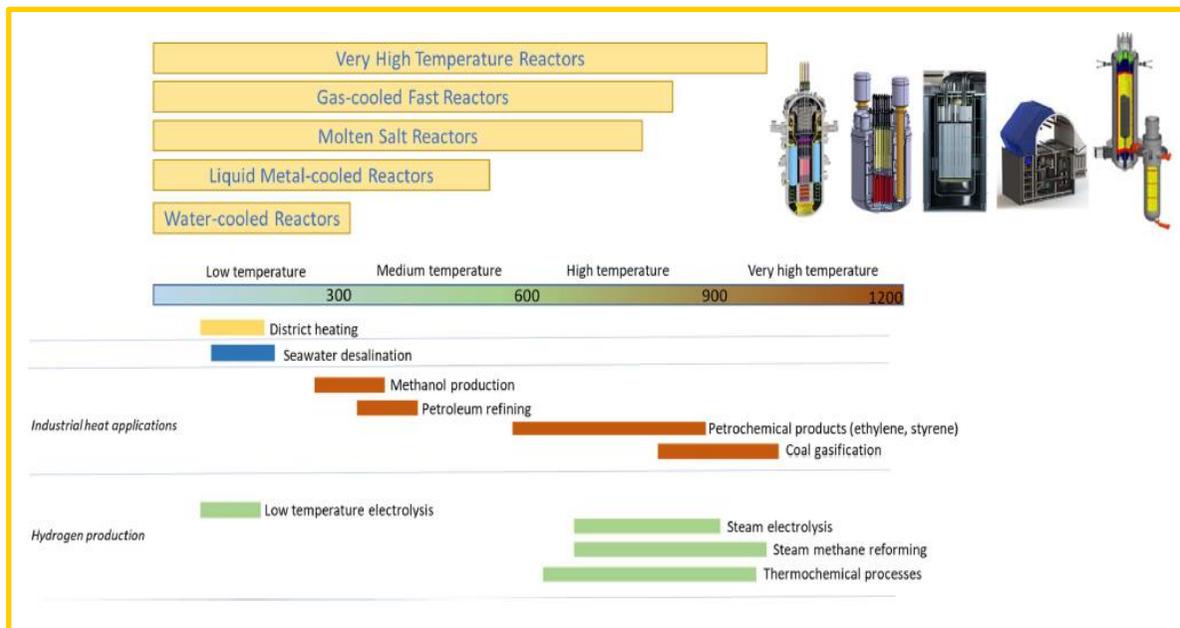


Render « e-Vinci » de Westinghouse



Le marché international pour les SMR est estimé être plus large que pour les réacteurs courants, notamment pour les différentes applications possibles grâce à leur petite taille :

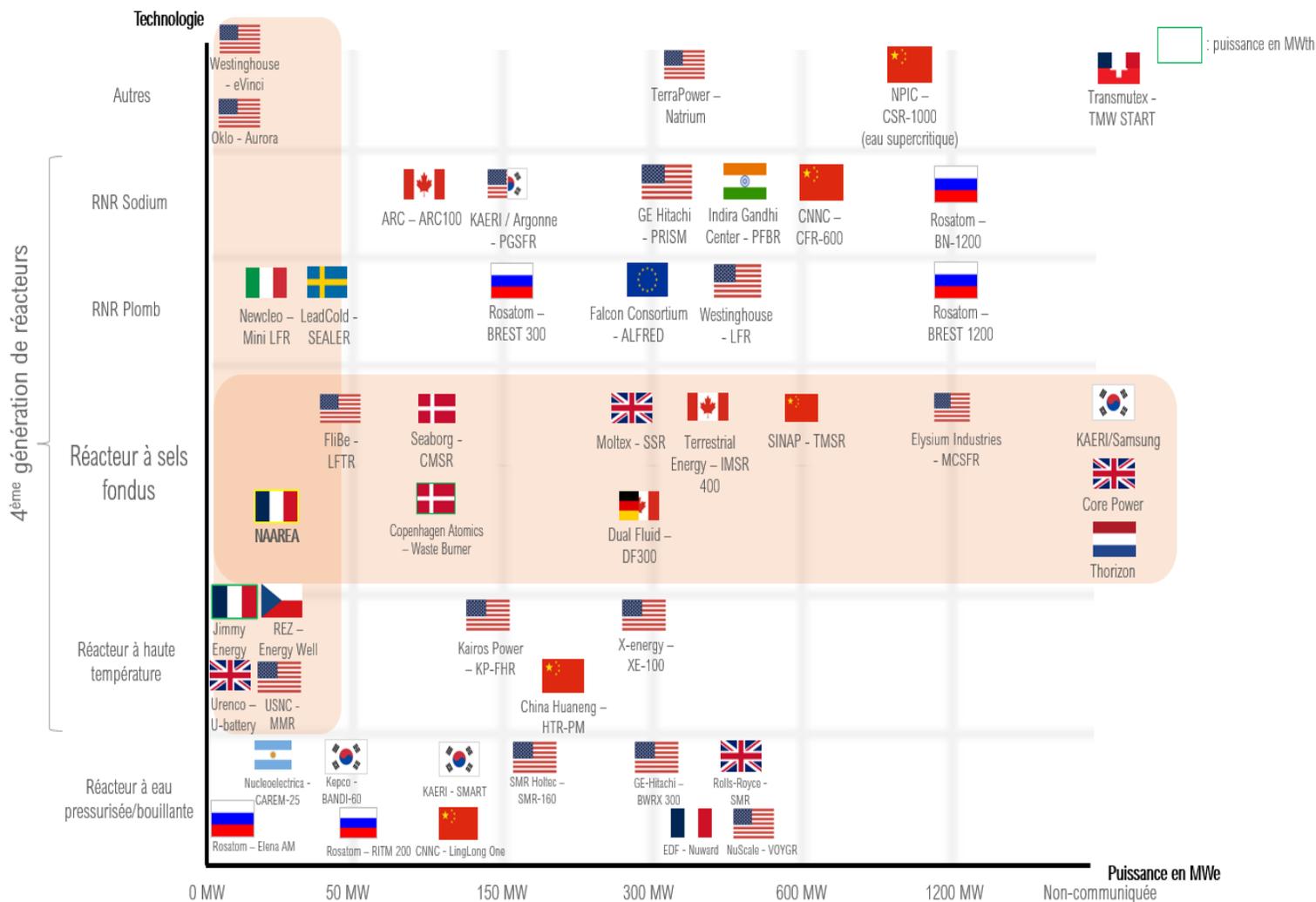
- **Usage électrogène**, notamment en zones isolées ou pays avec un réseau électrique peu développé (cf. Canada) ou en substitution de centrales à combustible fossiles (Europe de l'Est)
- Alimentation **dédiée à sites industriels** (aciéries) ou systèmes de transports (une rame RER, navires cargo...)
- Production de **chaleur industrielle** (industries alimentaire ou chimiques) ou cogénération et réseaux de chauffage urbain
- **Désalinisation** de l'eau de mer
- Alimentation **d'électrolyseurs haute température pour production d'hydrogène**, avec couplage technologique très avantageux (y compris en termes d'horizon temporel de réalisation)



Source: *Small Modular Reactors: A new nuclear energy paradigm, pre-print IAEA edition 2022*

➤ **Chacun de ces usages doit prévoir un aménagement du design du réacteur, et peut imposer des contraintes techniques empêchant des réacteurs « multi-usages » et donc déterminant des spécificités et des modèles économiques différents**







- Vraie nouveauté dans le secteur du nucléaire.
- Financement attiré par une volonté de « verdissement » des portefeuilles (et éloignement du pétrole)
- Des coûts importants mais moindre qu'un réacteur classique :
 - **Coûts prototype AMR : 1 Md€ pour le réacteur + 1 Md€ pour l'usine de production du combustible.**
- Des levées de fonds entre 15M€ et 300M€ (visant 1Mds€) sont en cours de réalisation, y compris par des SU françaises.
- Au vu de la faible maturité technologique/industrielle/commerciale/réglementaire des SMR, le risque d'investissement reste important



Trois modèles économiques concurrents semblent émerger, tous orientés vers l'export:

① Le modèle « **vendors** » : l'acteur vend uniquement un design, nécessitant ensuite une « **utility** » locale pour l'exploitation, et une série de **partenaires industriels locaux** pour la construction (approche typique EDF).

+ : Cette approche évite les obligations légales et réglementaires liées à l'exploitation de la centrale

② Le modèle « **buy-own-operate** » : l'acteur (plutôt bien établi, et avec une présence étatique) **vend** le réacteur, **finance** la construction, en reste **propriétaire et exploitant**, s'occupant également du cycle de combustible et de la formation des opérateurs locaux.

+ : C'est le modèle porté par Rosatom et qui présente un avantage commercial important

③ Un **modèle intermédiaire** « **buy-own-operate-transfer** » (cf expérience *KEPCO* aux EAU) avec un **transfert à terme** de la centrale **aux opérateurs locaux**, pourrait être le choix commercial des acteurs français **dans les pays primo-accédants** au nucléaire, compte tenu des compétences fortes de la filière française sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

bpi**france**



La réalisation de réacteurs modulaires implique la présence d'une supply chain capable de produire en usine les modules nécessaires, préalablement optimisés et qualifiés. Cela exige des actions conséquentes:

1- Une montée en compétence des acteurs industriels de la filière nucléaire existante, voire l'apparition de nouveaux acteurs (équipementiers, sous-traitants, fournisseurs d'éléments support ou de génie civil) sachant s'approprier des techniques plutôt orientées industrie du futur.

- *Les SMR peuvent être un vecteur fort de dynamisation de la filière*
- *Des nouveaux acteurs peuvent apporter des pratiques nouvelles et en rupture (ex fabrication 3D), et/ou avec des actions de transfert techno pour assurer une transformation du tissu industriel sur place*

2- La formation de personnel qualifié, améliorant l'attractivité professionnelle de la filière (y compris au niveau EU) et la mise en place du cadre normatif et réglementaire associé (les usines seront des INB ?)

- *Une telle filière sera économiquement viable seulement avec un nombre minimum de commandes de SMR/AMR d'une techno donnée, ou alors si l'ensemble des acteurs de la supply chain sont capables d'approvisionner des modèles différents de SMR/AMR*
- *Pour les SMR, seulement un consortium industriel de filière peut être en mesure de construire un FOAK pour des coûts équivalents à un NOAK (nth-of-a-kind)*
- *Quelles assurances pour le personnel ?*



La construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire (y compris SMR) sont conditionnées aux autorisations de licence par les autorités nationales, les organismes internationaux (notamment IAEA et OCDE-NEA) ayant uniquement un rôle d'orientation et partage d'information. Il s'agit d'un verrou majeur, car c'est l'exploitant qui doit être licencié, pas le « vendor », de surcroît souvent étranger.

Au **niveau international**, un fort besoin d'harmonisation des pratiques de licensing est préconisé par les acteurs industriels et les organismes internationaux. Cependant, les tentatives d'« export » du licensing de pays plus nucléarisés vers des primo-accédants semblent avoir échoué car le sujet de la prise de responsabilité au niveau national reste rédhibitoire ; à cela se rajoutent les difficultés liées au transport des modules (p.ex. noyaux de réacteur intégrés avec combustible)

- ***En raison des nouveautés techniques de ces « objets » nucléaires, les pays ayant le plus fort potentiel de déploiement des SMR/AMR sont souvent peu ou pas nucléarisés, d'où un besoin de montée en compétences partagé à l'international***
- ***Pour les SMR, le premier acteur qui pourra réaliser un FOAK, influencera la réglementation, et consolidera sa position sur le marché***
- ***Orientation export : nécessité d'évaluation ex-ante des pays visés pour l'installation de SMR/AMR***



Au **niveau national**, une appropriation des technologies développées par les Autorités de sûreté nucléaire est essentielle pour permettre le licensing

- ***En particulier pour les AMR, un besoin important de financement public de plateformes de tests expérimentaux et codes de calcul, à ce stade très peu développées et ne permettant pas la réalisation des « assessments », sont nécessaires au licensing***
- ***De plus, il existe un réel problème d'identification de nouveaux sites avec autorisations INB ou de réalisation de prototypes/FOAK sur des sites existants classés***

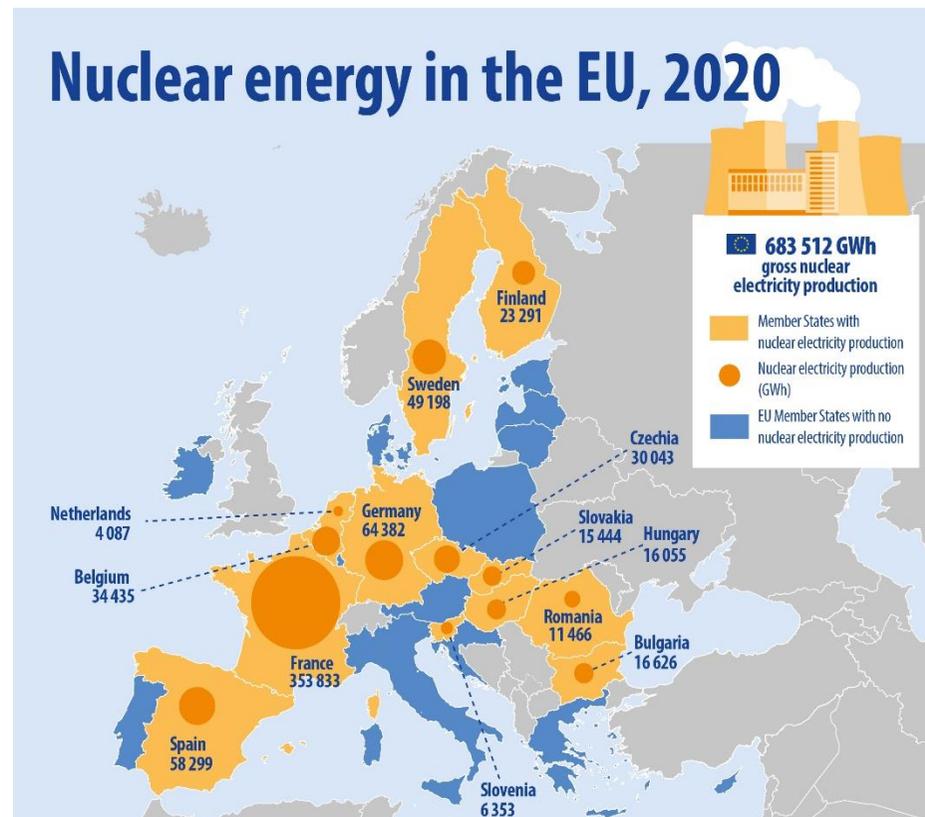


Compte tenu des enjeux radiologiques sur le très long terme du nucléaire, l'**opposition de l'opinion publique** peut se révéler un obstacle conséquent.

Les SMR/AMR visent « by-design » une sûreté intrinsèque, permettant de réduire voire éliminer les zones d'exclusion autour des centrales, amenant un impact psychologique sur les populations avoisinantes.

L'utilisation des SMR/AMR comme fournisseurs dédiés à l'énergie pour des installations industrielles (notamment chimiques, p.ex. classés SEVESO) peut engendrer des inquiétudes fortes dans la population.

- *Un travail de pédagogie et formation des populations reste incontournable, en mettant également en avant les avantages liés à la lutte au changement climatique, et à une gestion améliorée du cycle du combustible par les AMR*
- *L'acceptabilité sociétale du nucléaire en France est favorisée du fait de la production d'énergie décarbonée contribuant à la lutte contre le changement climatique*



Les travaux de conception de SMR et AMR s'appuient sur les enseignements tirés de plus de 70 ans d'expérience dans le secteur de l'énergie nucléaire pour renforcer la sécurité et améliorer la flexibilité opérationnelle. Les conceptions SMR incluent une approche de **sûreté intrinsèque** :

- Des cœurs de réacteur **plus petits** avec de plus petites quantités de matières nucléaires ;
- L'utilisation de **combustibles tolérants aux accidents** et/ou capables de maintenir leur intégrité structurelle même à des températures plus élevées ;
- Fonctionnement à des pressions plus basses et utilisation de **systèmes de sécurité passive** ne nécessitant pas de sources d'électricité ou intervention humaine pour maintenir la sécurité.

La mise en œuvre de telles caractéristiques de conception pourrait contribuer à atteindre les objectifs de sécurité tout en réduisant les le recours à l'intervention humaine et aux mesures opérationnelles, permettant des simplifications de conception et des coûts réductions.

Les avantages de quantités moindres de matières nucléaires dans les cœurs des réacteurs, combinés à des dispositifs de sécurité peuvent également conduire à des **zones d'exclusion** plus petites (voir nulles).

Du point de vue des exigences de **sécurité et non-prolifération**, les concepts en cours de développement intègrent une approche « safeguard by design », notamment dans la gestion du cycle du combustible.

Source: NEA SMR Dashboard, second edition 2024



La France dispose d'une **filière nucléaire intégrée**, ayant toutes les compétences nécessaires sur l'ensemble de la **chaîne de valeur** : recherche, radioprotection, conception, construction, cycle du combustible, gestions des déchets, jusqu'au licensing, par des acteurs essentiellement étatiques, avec des sous-traitants privés.

Les lauréats France 2030 pour des technologies fission sont les suivants:

Acteur	Technologie	Puissance	Combustible	Applications	Situation sociétaire connue à date
NAAREA	<i>réacteur type sels fondus</i>	40MWe	Sels chlorures	Électrogène; sites isolés, transports	Start-up.
Jimmy Energy	<i>réacteur type HTR</i>	20 MWth	TRISO	<i>production de chaleur industrielle</i>	Start-up.
Stellaria	<i>réacteur type sels fondus</i>	200MWe	Sels chlorures	Électrogène	Spin-off CEA
HEXANA	RNR-Sodium à boucles	200 MWe	MOX	Électrogène	Spin-off CEA
OTRERA Nuclear Energy	<i>RNR-Sodium intégré</i>	200 MWe	MOX	Électrogène	Start-up
Blue Capsule	<i>réacteur mixte HTR/Sodium</i>	150MWth	TRISO	Électrogène, chaleur industrielle	Start-up
newcleo	<i>RNR-Plomb</i>	200MWe	MOX	Électrogène; sites isolés, transports	Start-up.
Thorizon	<i>réacteur type sels fondus</i>	200MWe	Sels chlorures	Électrogène	Start-up. Spin-off NRG (Pays-Bas)
CALOGENA	<i>réacteur type TRIGA</i>	10 MWth	<i>Crayons UZrH</i>	<i>production chaleur urbaine</i>	Filiale groupe Gorgé
NUWARD	Réacteur Eau pressurisée	340 MWe	Standard UO2	Électrogène, chaleur industrielle	Filiale EDF

