

La sélection des start-up du nucléaire du programme France 2030

27 juin 2024, Aix en Provence

Groupe régional SFEN Provence

Eric Abonneau et Jean Christophe Bosq



Déroulé

- 1. L'appel à projets France 2030 « Réacteurs Nucléaires Innovants »**
- 2. Les missions de l'Agence de Programme Nucléaire Innovant (APNI) et le processus de sélection des start-up**
- 3. Les lauréats de l'étape 1 et leurs technologies**
- 4. Les perspectives**



1 ■ L'appel à projets France 2030 « Réacteurs Nucléaires Innovants »

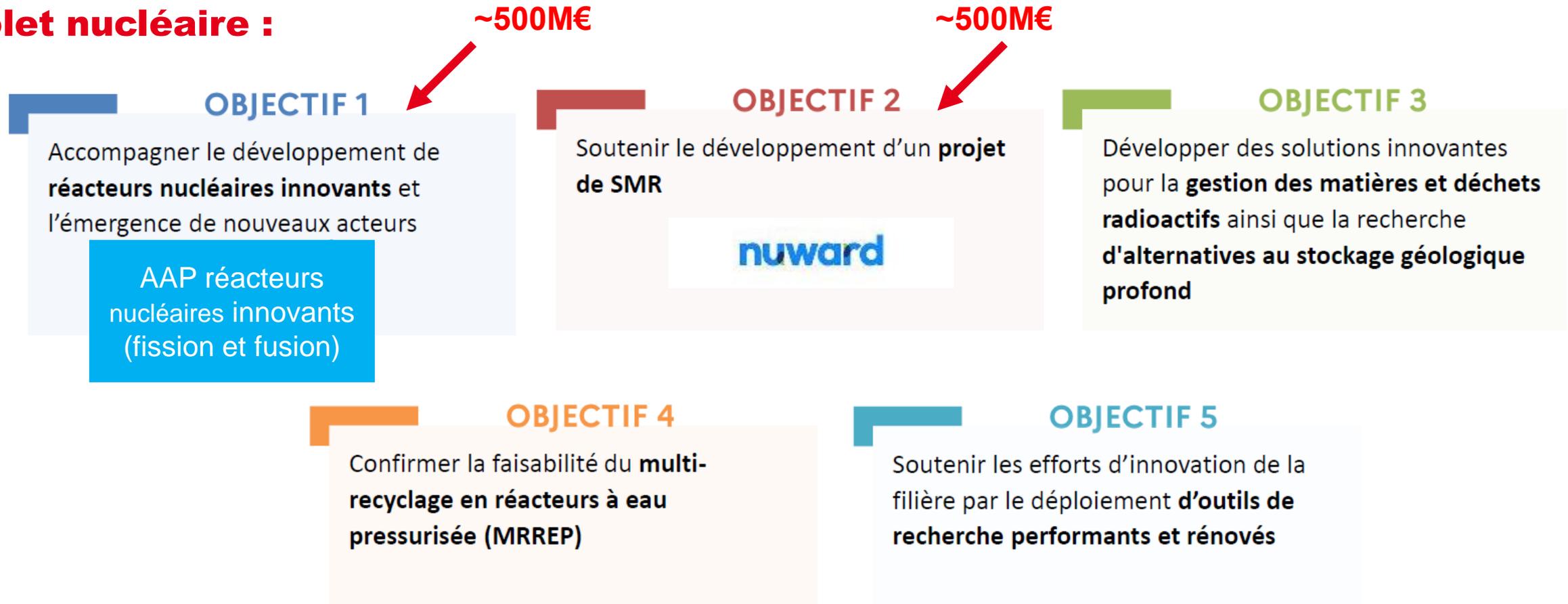
Qu'est-ce que France 2030 ?

Plan d'investissement de 54 milliards d'euros à la suite du plan France Relance pour :

- rattraper le retard de la France dans certains secteurs,
- créer de nouvelles filières industrielles et technologiques.



Volet nucléaire :



L'appel à projets Réacteurs Nucléaires Innovants (AAP RNI)

Cet appel à projets vise à **soutenir des projets de recherche et développement de concepts de réacteurs nucléaires en rupture**, répondant à un ou plusieurs des objectifs suivants :

- amélioration de la **compétitivité des réacteurs** ;
- amélioration de la **sûreté intrinsèque** de fonctionnement du réacteur ;
- amélioration de la **protection physique intrinsèque** de l'installation ;
- développement **d'applications non électrogènes** (hydrogène, chaleur, cogénération, radioéléments stratégiques...)
- **fermeture du cycle du combustible** nucléaire et valorisation des matières nucléaires ;
- **amélioration de la gestion des déchets radioactifs produits.**



AAP Réacteurs Nucléaires Innovants

AAP 1:

Projets en phase de
maturation initiale

10 M€ max /
projet

Prérequis :

Evaluation préliminaire de la crédibilité scientifique technologique et industrielle, y.c. de sûreté et sécurité nucléaires

AAP 2:

Projets en phase de
preuve de concept

80 M€ max /
projet

Prérequis :

Disposer d'un pré-APS et d'une analyse des perspectives industrielles à court et moyen termes

AAP 3:

Projets en phase de
prototypage

300 M€ max
/ projet

Prérequis :

Disposer d'un APS et d'une analyse des enjeux technico-économiques, commerciaux, sociétaux et environnementaux

Le premier AAP, lancé en mars 2022 et clôturé en juin 2023, cible préférentiellement des projets en phase 1, mais n'exclut pas des projets en phase 2.

Le calendrier de lancement et les modalités de la seconde étape sont en cours d'instruction.

Les candidats et les lauréats de l'AAP « Réacteurs Nucléaires Innovants » peuvent bénéficier de l'accompagnement et de l'expertise du CEA (aide indirecte)



2 ■ Les missions de l'APNI

Mise en place d'une équipe dédiée au sein du CEA (APNI) pour appuyer l'Etat

- ❑ Suite au Conseil de Politique Nucléaire du 3 février 2023, mise en place au sein du CEA de l'APNI: cellule en soutien à l'ensemble de l'écosystème des start-ups nucléaires, disposant d'une indépendance par rapport aux activités de recherche nucléaire menées par l'organisme et d'une vue d'ensemble sur la situation nationale dans le domaine de l'innovation nucléaire.
- ❑ L'APNI assure une animation et une coordination des actions de nature scientifique et technique pour le compte du Secrétariat Général Pour l'Investissement (SGPI), en accompagnement de l'opérateur de l'AAP RNI (Bpifrance) dans le cadre des actions d'innovation nucléaire de France 2030.



Composition de l'APNI



Fabrice LEGENDRE

Responsable APNI

fabrice.legendre@cea.fr

07 78 15 38 63



Eric ABONNEAU

*Responsable thématique
fission*

eric.abonneau@cea.fr

06 71 96 50 16



Jean-Christophe BOSQ

*Responsable thématique
fission*

jean-christophe.bosq@cea.fr

06 81 20 02 69



Thierry PUSSIEUX

*Responsable thématique
fusion*

thierry.pussieux@cea.fr

06 73 97 21 78



Alexandra BENDER

*Chargée de mission
Animation scientifique*

alexandra.bender@cea.fr

06 08 75 48 02

Missions de l'APNI

1. Développement et animation de l'écosystème de l'innovation nucléaire française

- Organisation de divers événements
- Lien entre les équipes de recherche du CEA et le monde académique
- Echanges réguliers avec différents acteurs, notamment industriels (EDF, FRAMATOME, ORANO), ASN, HFDS et ANDRA
- Invité permanent du « Club SU GIFEN / Nuclear Valley »

2. Contribution aux appels à projets « Réacteurs Nucléaires innovants »

- Contribution à la rédaction du cahier des charges des étapes ultérieures

3. Accompagnement à la préparation des dossiers de candidature

- Conseil, en termes d'éligibilité, pour la préparation des dossiers de candidature
- Aide des candidats pour la définition de l'accompagnement scientifique et technique demandé au CEA

4. Participation à l'évaluation des projets éligibles

- Rédaction d'avis scientifique et technique consultatifs
- Consolidation de l'accompagnement scientifique et technique du CEA
- Proposition de jalons et livrables techniques
- Participation aux instances de gouvernance de France 2030 qui procèdent au choix des lauréats

5. Suivi des lauréats

- Suivi régulier de l'avancement technique des projets

L'APNI est le point de contact :

- pour toutes les start-ups de l'écosystème nucléaire,
- pour les start-up candidates, en ce qui concerne leurs besoins d'accompagnement scientifique et technique du CEA,
- pour les start-up lauréates, pour leurs demandes d'accompagnement postérieures à leur notification.

Processus de sélection des lauréats (étape 1)

1. Chaque start up dépose au guichet de l'AAP son dossier de candidature :

- **Éléments techniques**
- Analyse des marchés
- Présentation de la start up (capitalisation, effectifs, perspectives d'évolution, etc...)

2. Analyse de ces éléments

- Par BPI pour les volets non techniques
- Par l'APNI pour les volets scientifiques et techniques (en appui du remontage fait par l'opérateur BPI) => **rédaction par l'APNI d'un avis scientifique et technique consultatif, avec proposition de jalons et livrables techniques pour suivre l'avancement du projet**

3. Audition des start up

- Chaque start up vient présenter son dossier devant un jury composé : de représentants des ministères de la gouvernance de l'AAP, d'un panel d'experts indépendants, de l'APNI
- Séance de questions/réponses en fin de présentation, puis délibération sans la start up sur la suite à donner : **passage du dossier en instruction approfondie ou dossier refusé**

4. Processus d'instruction approfondie

- Chaque start up fournit les compléments demandés en fin d'audition
- **L'APNI rédige un avis scientifique et technique consultatif final**
- **Prise de décision de retenir la start up prise par les ministères de la gouvernance de l'AAP**

**Pour l'étape 1 :
15 dossiers déposés et analysés
11 lauréats**



3 ■ Les lauréats de l'étape 1 et leurs technologies

Lauréats de l'étape 1 de l'AAP RNI

9 projets lauréats bénéficient
d'un accompagnement
scientifique et technique du CEA



Réacteur dérivé du HTR
Puissance : 150 MWth ou 50 MWe
Applications : chaleur industrielle & électricité
Essaimage CEA



Réacteur à eau
Puissance : 30 MWth
Application : chaleur urbaine



Réacteur à fusion (confinement inertiel)
Puissance : 1 GWth
Application : électricité



Réacteur RNR Na
Puissance : 2* [400 MWth ou 150 MWe]
Applications : électricité & chaleur
Essaimage CEA



Réacteur HTR
Puissance : 20 MWth
Application : chaleur industrielle



Réacteur RNR à sels fondus
Puissance : 80 MWth ou 40 MWe
Applications : chaleur industrielle & électricité



Réacteur RNR Pb
Puissance : 90 MWth ou 30 MWe puis 500 MWth ou 200 MWe
Applications : électricité & applications non électrogènes



Réacteur RNR Na
Puissance : 180 MWth + 110 MWe (cogén.)
Applications : électricité & chaleur
Essaimage CEA



Réacteur à fusion (confinement magnétique)
Puissance : 1 GWe
Application : électricité



Réacteur RNR à sels fondus
Puissance : 110 MWe (ou 250 MWth)
Applications : électricité (& chaleur industrielle)
Essaimage CEA



Réacteur RNR à sels fondus
Puissance : 250 MWth & 100 MWe
Applications : chaleur industrielle & électricité

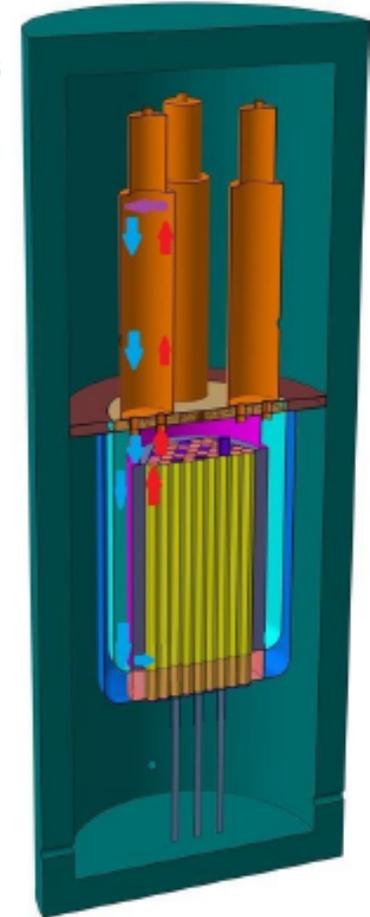
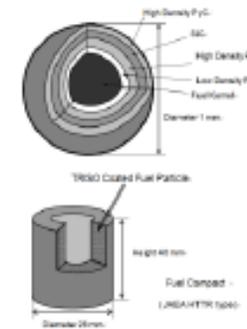
Plateforme haute température innovante

Croisement unique de concepts technologiques éprouvés
RNR-Na et HTR connus des régulateurs et des fournisseurs :
compatible avec un déploiement dans la décennie

BC utilise du micro-combustible TRISO intègre jusqu'à 1800°C
refroidi dans une piscine de sodium en convection naturelle

Manutention combustible innovante :
BC est le seul HTR prismatique à rechargement continu
BC permet des manutentions sans pollution au Na

Echangeurs
Sodium-air
brevet CEA



Le Sodium en convection naturelle
s'écoule autour des canaux
combustibles fermés (en jaune)

Le circuit de refroidissement du cœur est complètement intégré dans une cuve étanche et contient les éléments suivants :

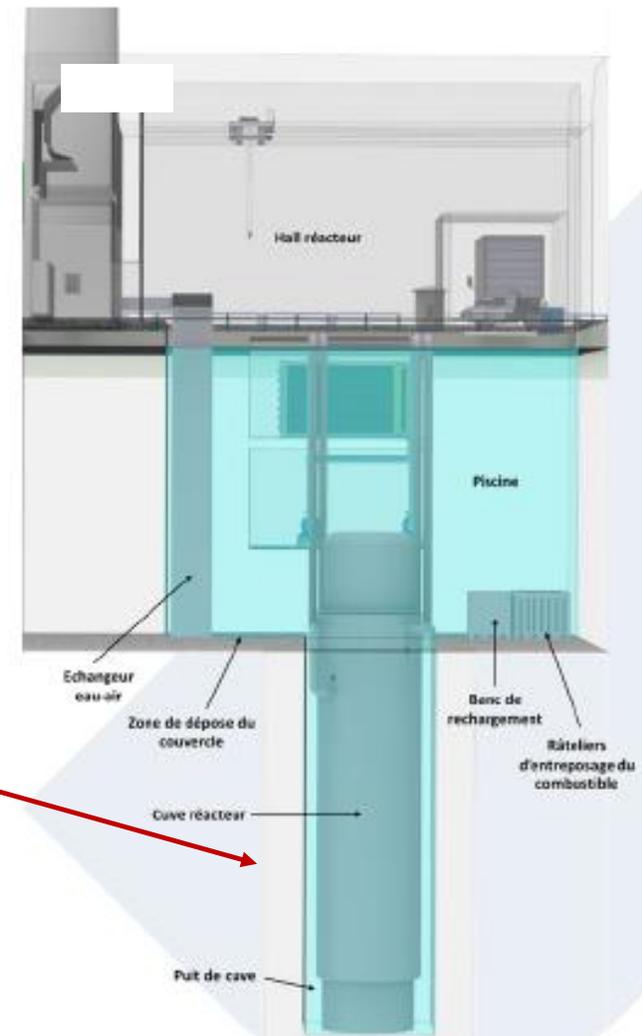
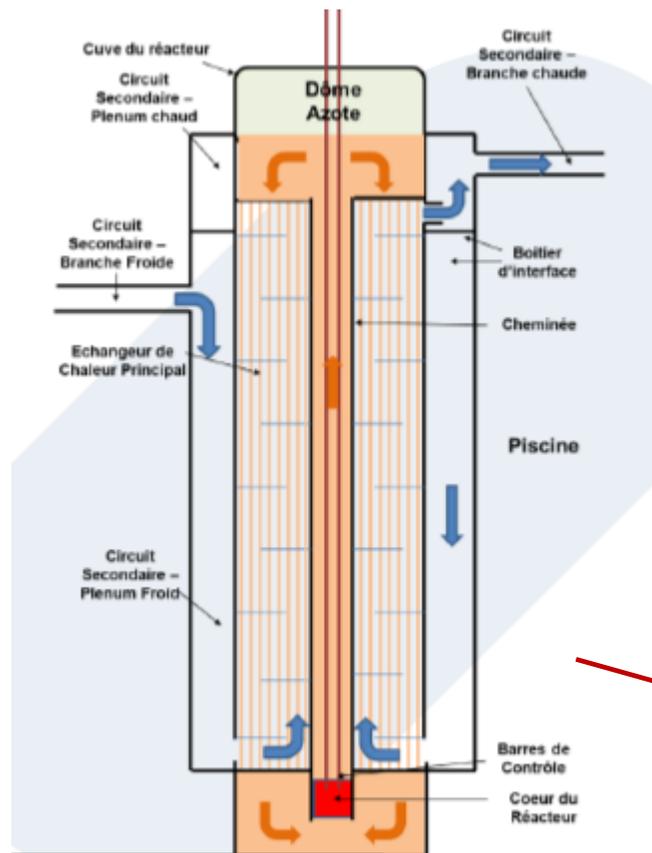
- Le cœur
- Une cheminée dans laquelle l'eau chaude s'élève
- Un échangeur à tubes dans l'anneau de descente et par lequel la chaleur est extraite
- Un dôme d'azote qui stabilise la pression et sert d'isolant thermique

La cuve est entourée d'un plenum chaud et d'un plenum froid qui guide l'eau du circuit secondaire vers les entrées dans l'échangeur et de ses sorties ; il sert de plus à récupérer la fuite thermique de la cuve.

Les mécanismes des grappes de contrôle sont placés au-dessus de la cuve et immergés dans la piscine.

La température de sortie du cœur est dans une plage 80-120 °C et la pression vers 5 bar, proche de la pression hydrostatique de la piscine à sa profondeur.

L'eau du circuit primaire, du circuit secondaire et de la piscine est déminéralisée, sans usage de bore soluble, les variations de réactivité étant faites par les grappes de contrôle.





Réacteur à fusion (confinement
inertiel)

Puissance : 1 GWth

Application : électricité

La société GenF ambitionne de développer et d'industrialiser la production d'énergie électrique issue de réactions de fusion nucléaire deutérium-tritium obtenues par confinement inertiel sous la pression de lasers à haute énergie.

Le projet TARANIS vise à démontrer la rentabilité économique de cette réaction à partir d'un schéma de fusion à fort gain.

Cette démonstration passe par le développement d'un réacteur intégré pour la génération puis la conversion d'énergie en électricité avec un objectif de 1000MWth.

Au-delà de son partenariat avec les deux unités mixtes de recherche LULI (CNRS-Polytechnique-CEA) et CELIA (CNRS-Université Bordeaux-CEA), le projet TARANIS bénéficiera d'un accompagnement du CEA.



Réacteur RNR Na
Puissance : 2* [400 MWth ou 150 MWe]
Applications : électricité & chaleur



Produit

HEXANA développe un **système énergétique innovant**, sûr et modulaire associant deux réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium de 400 MWth chacun, associé à un stockage thermique pour une fourniture flexible d'électricité et de chaleur sur une large gamme de température (de 500°C à 80°C), à ses clients industriels.

HEXANA fournit une solution **ultra bas-carbone, durable et souveraine**, le combustible étant composé de matières déjà présentes sur le sol national (uranium appauvri et combustibles usés), sans dépendance externe.

Showcase

Proposition de valeur

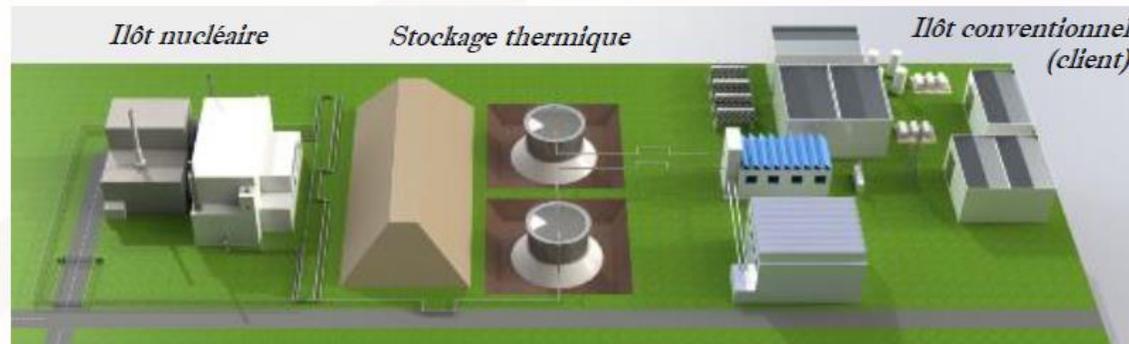
- Haute température (500°C) et rendement électrique élevé (42%)
- Sûreté passive (pas de pression, convection naturelle)
- Valorisation des combustibles usés et diminution des déchets, pour un nucléaire plus durable et plus acceptable
- Fourniture d'énergie en continu grâce au jumelage de 2 modules nucléaires sur un site
- Prix stables et garantis sur plusieurs décennies grâce à l'indépendance énergétique
- **Niveau de maturité et de crédibilité inégalé** : REX Phénix & SuperPhénix, plus de 400 années.réacteur de retour d'expérience dans le monde.
- Technologie connue des autorités de sûreté, combustibles et matériaux qualifiés



Module nucléaire
(400 MWth)



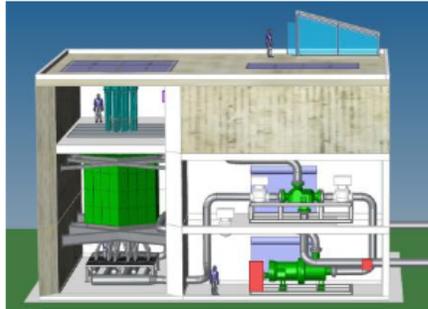
Bâtiment réacteur
jumelant 2 modules
nucléaires



Exemple d'implantation sur un site industriel



Le générateur Jimmy



| | |
|------------------------|--|
| Technologie | High Temperature Reactor de 20 MWth |
| Durée de vie | 2 fois une recharge de HALEU |
| Température fournie | 450°C |
| Caloporteur primaire | Hélium pressurisé |
| Caloporteur secondaire | CO ₂ pressurisé |
| Caloporteur industriel | Vapeur, air chaud, huile thermique... |
| Combustible | Uranium (HALEU sous forme de particules Triso) |
| Dimensions | 18m x 20m x 18m |
| Tonnes de CO2 évitées | Jusqu'à 700 000 tonnes par générateur |

Objectif : mise en service du 1^{er} de série en 2026

- Jimmy crée directement un **premier de série sur un site industriel**
- Ce premier client a été confirmé, il s'agit d'un site agroindustriel, qui fait partie des 50 sites les plus émetteurs de France
- La mise en service aura lieu en 2026, et plusieurs jalons ont déjà été validés :
 - Remise du DOS et échanges avec l'ASN, l'IRSN, la DGEC, la DGPR et le DSN pour préparer la demande de DAC
 - Design détaillé du générateur
 - Validation du plan de communication
 - Contrat en cours de signature
 - Ensemble des études réalisées pour l'étude d'impact et le raccordement process
 - 1^{ères} commandes passées pour les *long-lead* items
- Jimmy prévoit de déposer sa **Demande d'Autorisation de Création auprès de l'ASN en mars 2024**, et d'industrialiser le système en parallèle de l'instruction



NAAREA

Réacteur rapide et modulaire à sels fondus : XAMR®

L'objectif de NAAREA est de développer des réacteurs dont l'îlot nucléaire est contenu dans un volume faible.

 40 MWe ou 80 MWth

 **Combustible sel fondu : NaCl-PuCl₃-UCl₃**
Uranium appauvri ou naturel
Plutonium ex-UOX ou ex-MOX REP

 200 personnes début 2024

 10M€ de subvention France 2030 (éta
1)
50M€ de levée de fonds



Procédé sans eau

Longueur de cycle : 3 ans

Durée de vie cible : 40 ans

Pilotabilité : + ou - 33% PN/min

Emprise au sol de l'installation d'une unité : 1 hectare



NAAREA : producteur et exploitant
d'électricité et/ou de chaleur jusqu'à 650°
décarbonée (cogénération possible) en
réponse aux défis posés par le
changement climatique



Clients cibles : Industries, les
territoires isolés, les réseaux
urbains



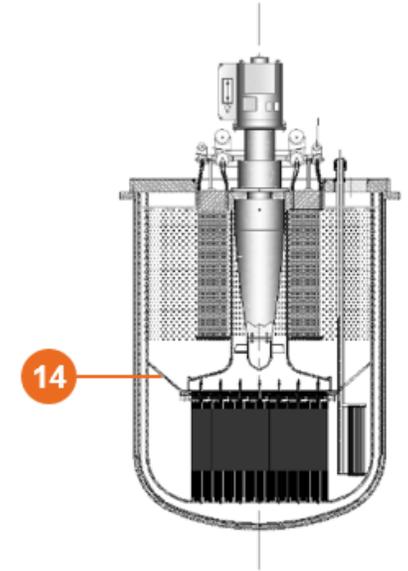
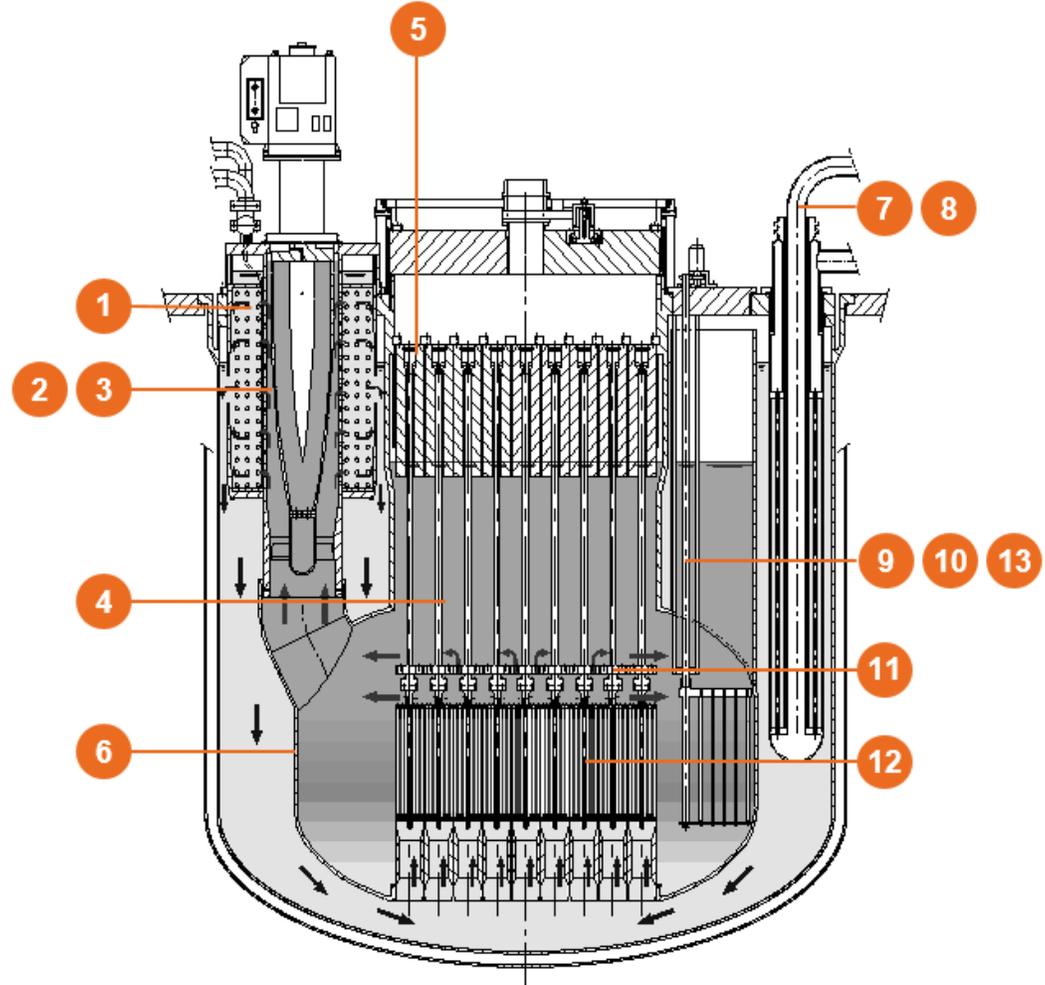
Cadence industrielle cible : 250
réacteurs par an, en Europe puis
à l'international

Confidentiel



International patents for our Gen-IV SMR designs

- Patent 1**
Spiral-tube Steam Generator 1
- Patent 2** and **Patent 3**
Pump/heat exchanger assembly 2 3
- Patent 4**
Extended stem FA 4
- Patent 5**
Self-supporting core 5
- Patent 6**
Amphora Shaped Inner Vessel 6
- Patent 7** and **Patent 8**
DHR passive systems 7 8
- Patent 9, 10** and **13**
Control and shut down rods 9 10 13
- Patent 11**
Expanders 11
- Patent 12**
FA with cooling ducts 12



14

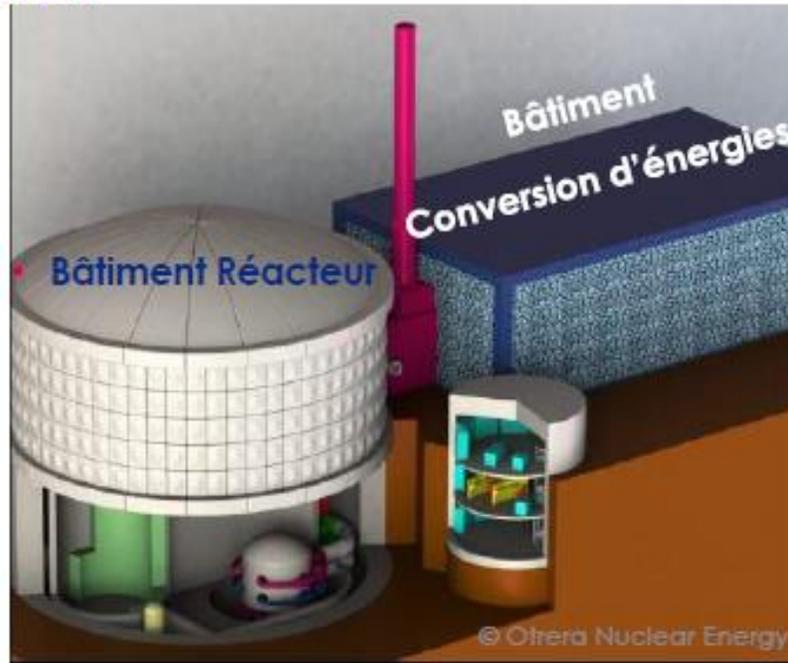
Patent 14
Support system of the core
of a nuclear reactor
Filed 13-06-2022

*Four additional patents
filed in 2023*



La conception de la centrale OTRERA est destinée à réduire la complexité, les coûts et le temps de construction

- Réacteur enterré (25 m de diamètre)
- Durée de Chantier 3 ans
- Emprise au sol <1 ha
- Tous les composants sont fabriqués en usine
- Taux de disponibilité >95 %



Réacteur Design

- Rendement de **97 %** (110 MWe et 180 MWth en cogénération)
- Fonctionne 10 ans sans rechargement
- Composants courts:
 - Echangeurs sodium/gaz
 - Pompes primaires électromagnétiques
 - Cuve compacte
- Circuit sodium non pressurisé
- Cuve compacte en inox fabriquée en usine
- Combustible MOX, Compatible avec les usines du cycle nucléaire
- Sûreté et sécurité très largement renforcée :
 - plus de réactions sodium/eau et sodium/air
 - 4 barrières de confinement
 - Mode de pilotage innovant

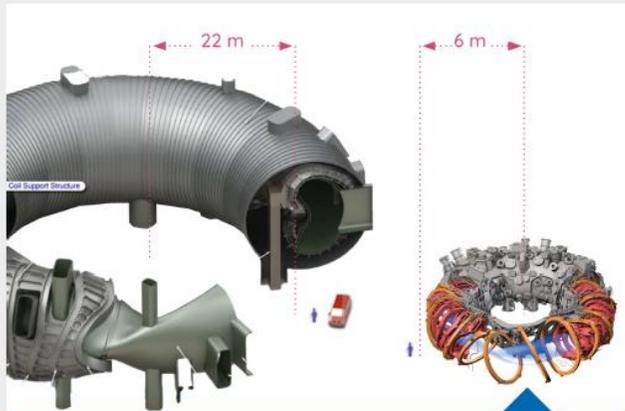


Pourquoi RF ?

3 solutions technologiques aux 3 derniers problèmes des stellarators D-T

PROBLEMES

Les tokamaks et stellarators à faible champ magnétique sont **grands et chers.**

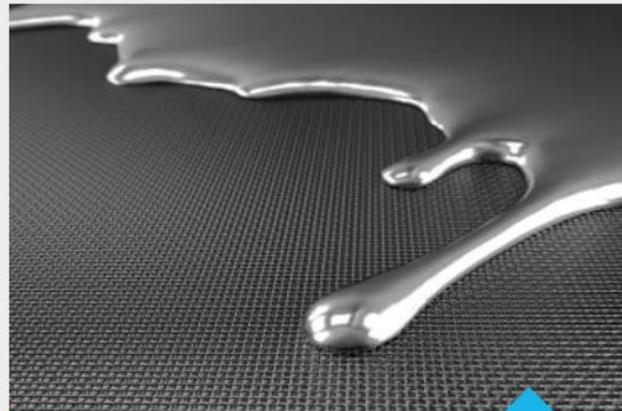


Supraconducteurs Haute température (HTS)



Les HTS génèrent des champs magnétiques intenses, libérant **plus de puissance** à partir de dispositifs plus petits.

Les neutrons issus de la fusion D-T induisent une **radioactivité** et des dommages aux parois solides.



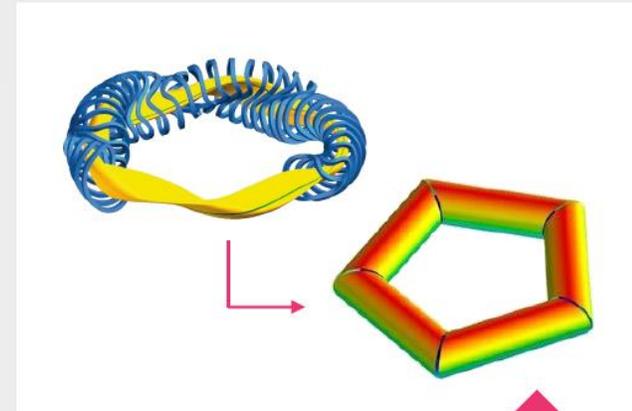
Métaux liquides (LM)



Des parois épaisses à base de lithium font face au plasma et absorbent les neutrons sans devenir radioactifs, rendant ainsi le réacteur plus sûr.

Bonus: résistant aux pertes non uniformes des particules alpha.

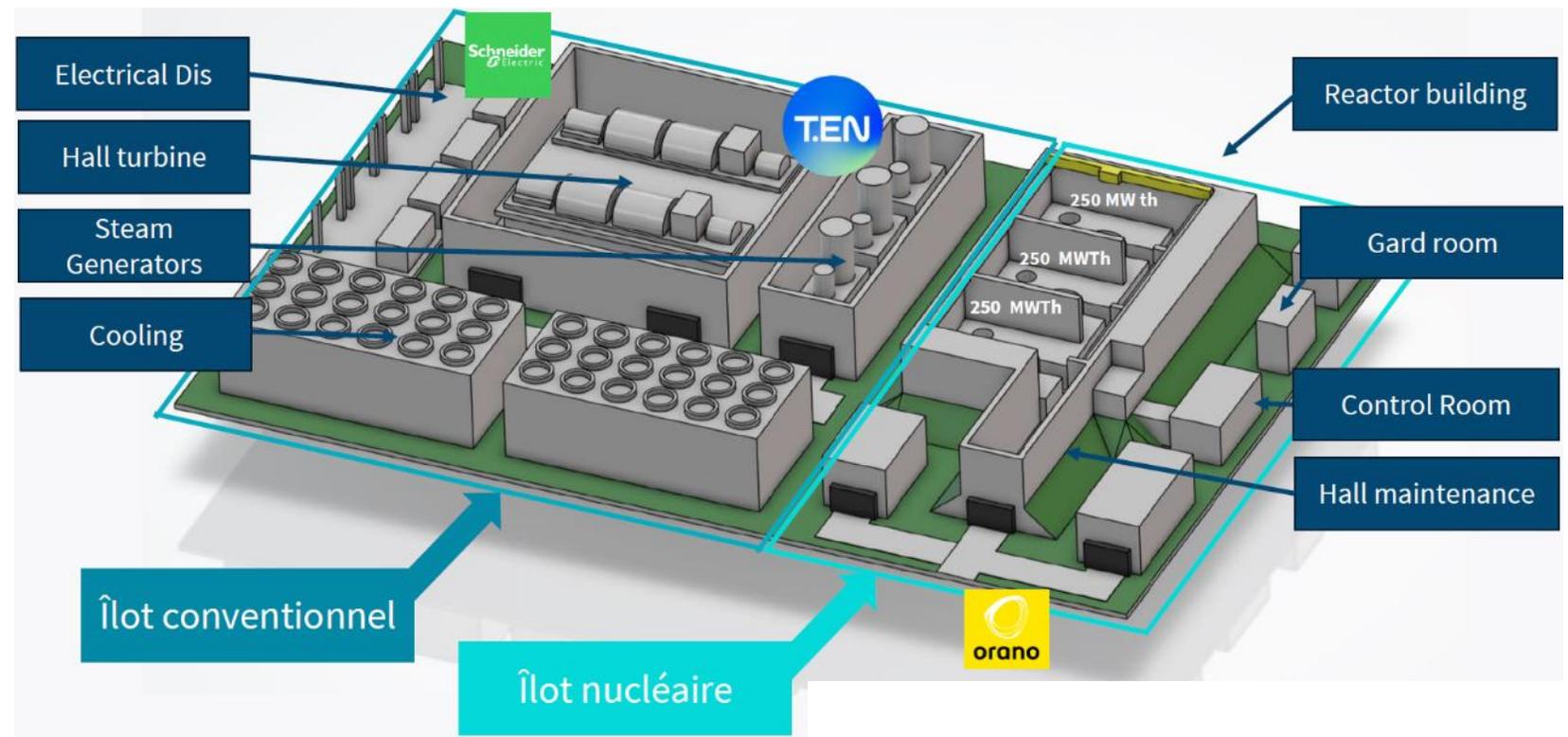
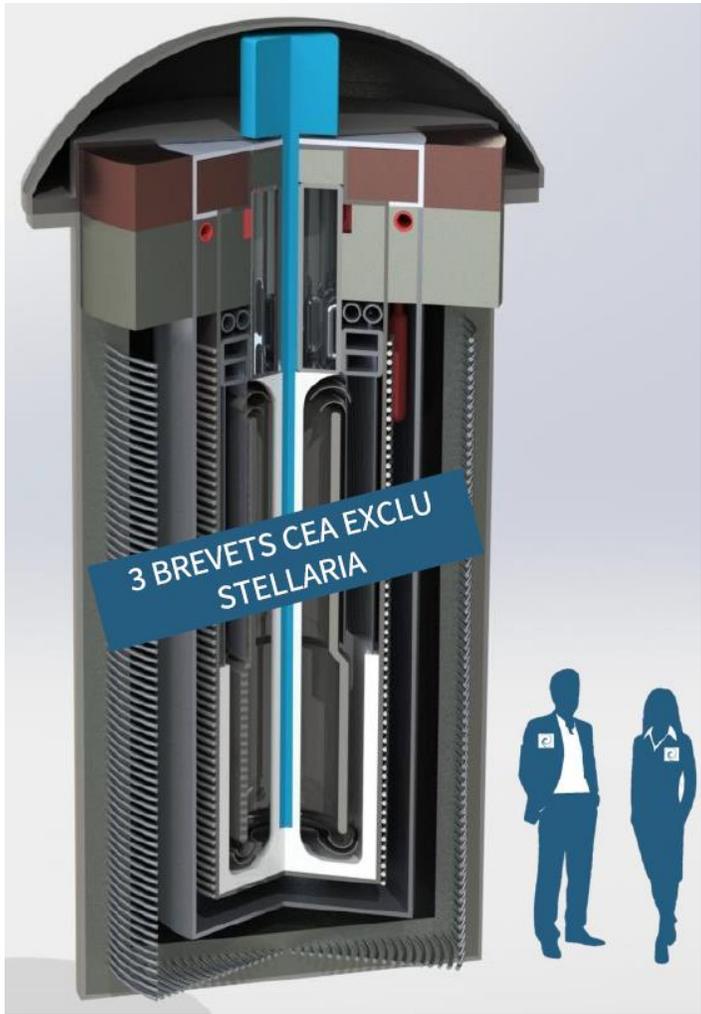
Les aimants du Stellarator ont des formes 3D **complexes.**



Stellarators simplifiés



Réalisé à partir de surface de bobinage simplifiée, ils sont **plus faciles à construire**, grâce à la déposition de HTS sur de grande largeur et à la gravure laser.



Enjeux principaux

Manipulation et transport des cartouches

Sûreté et performance en toutes conditions

Interaction entre le sel et les matériaux (corrosion)

Fabricabilité des cartouches et du sel

Viabilité financière

Approche de validation

- ✓ Conception du transport externe des cartouches et du sel
- ✓ Analyse du remplacement sur site et conception des stations de traitement
- ✓ Simulation numérique dans des conditions opérationnelles et transitoires
- ✓ Développement des systèmes de sauvegardes en situations incidentelles
- ✓ Analyse des sels, des matériaux, de l'interaction sel-matériaux sous irradiation
- ✓ Développement d'options d'atténuation de la corrosion
- ✓ Conception de la fabrication de cartouches et de la chaîne d'approvisionnement
- ✓ Conception d'une usine pilote de fabrication de sels d'actinides
- ✓ Affinement du business model et réseau de partenaires pour développer le RSF
- ✓ Vérification des coûts de fabrication

Double confinement



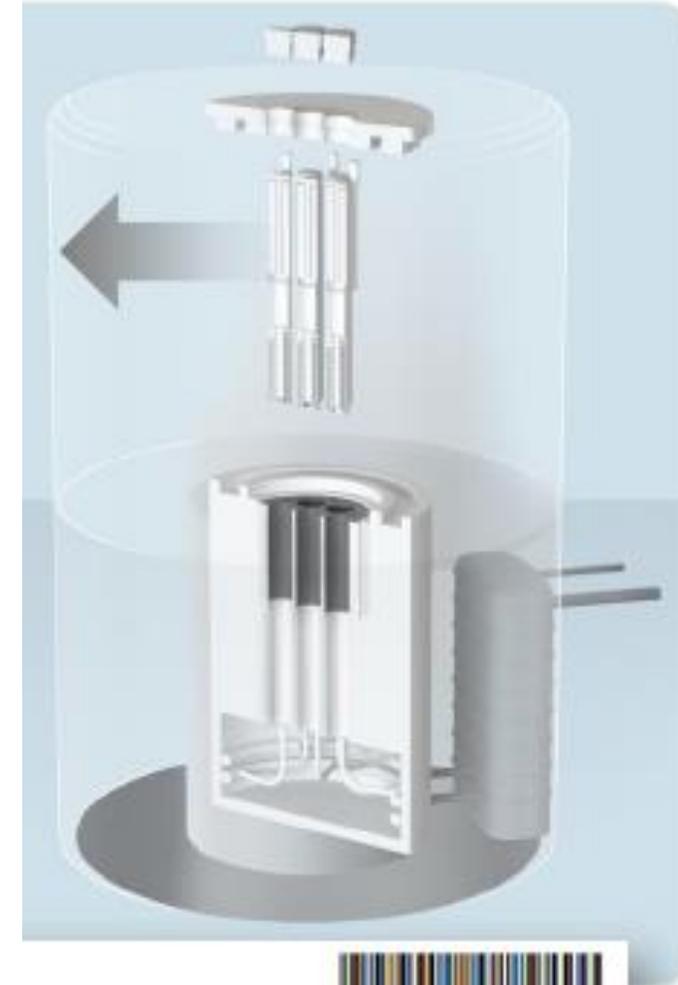
Section du cœur

Plénum gaz-sel

Échangeur de chaleur

Pompe

Raccordement au système de sel secondaire



(11) EP 3 963 603 B1

EUROPEAN PATENT SPECIFICATION

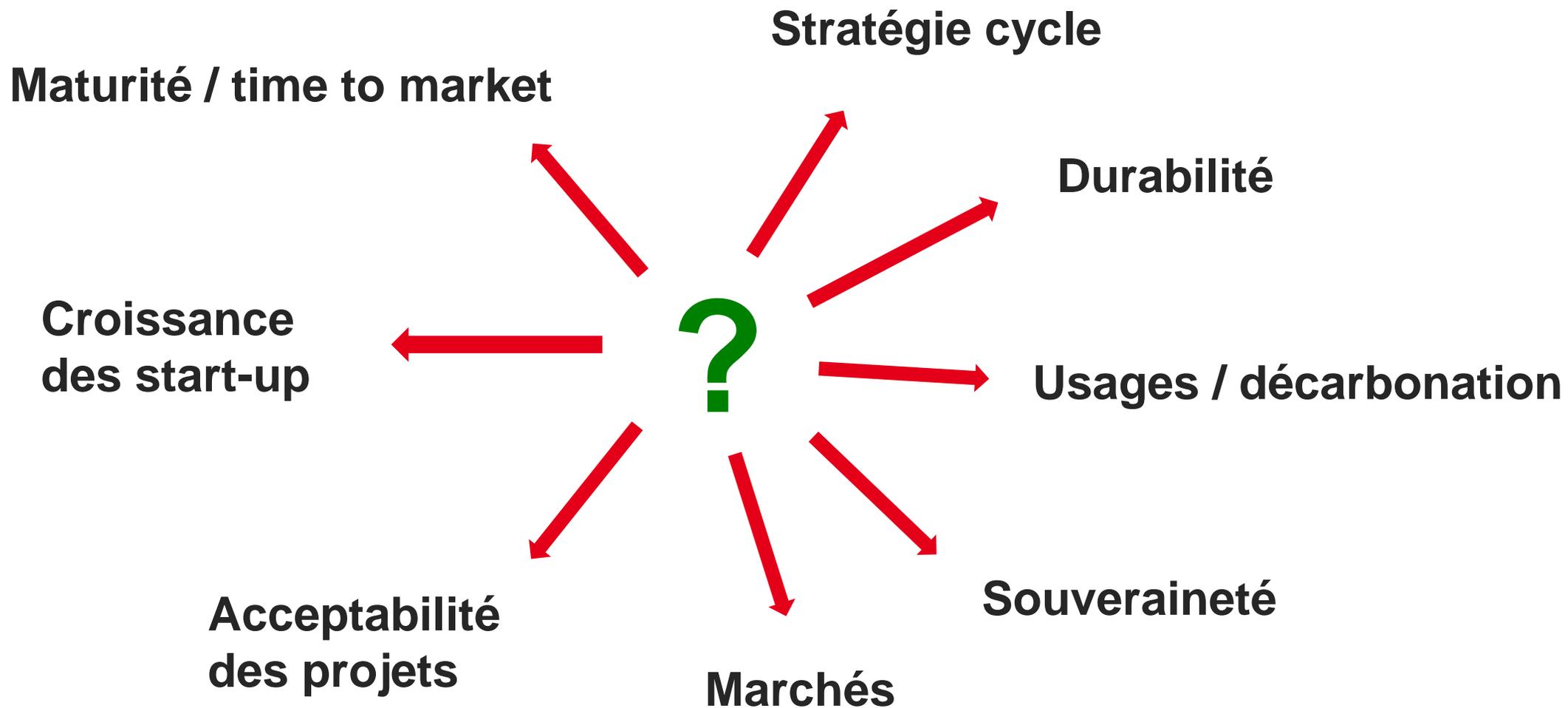


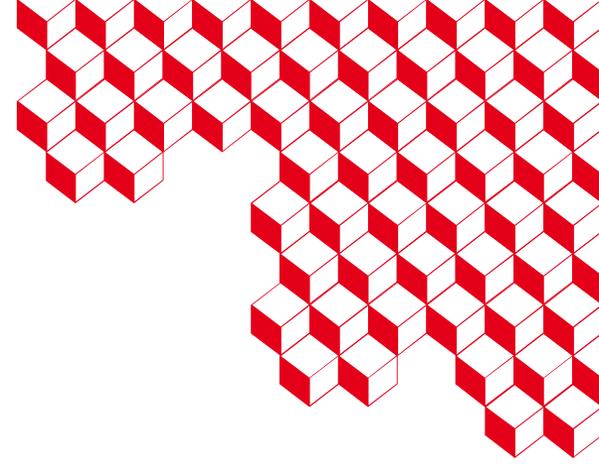
4 ■ Les perspectives ?

Axes de travail

- **Suivre les avancées des lauréats** de la première étape
- **Poursuivre le soutien public aux projets** de SMR/AMR dans le cadre de France 2030 (dont la préparation du cahier des charges de l'étape 2 de l'AAP RNI)
- **Identifier les sites d'implantation potentiels** des SMR et AMR
- **Mettre en œuvre les adaptations législatives et réglementaires** nécessaires pour accélérer les réalisations
- Identifier **les enjeux relatifs au cycle du combustible** pour les lauréats
- Anticiper **les modes d'intervention économique de l'Etat** adaptés aux évolutions des projets de SMR et d'AMR (partenariats public privé)
- Identifier les **enjeux liés aux compétences** dans la filière
- **Structurer les interactions entre les acteurs de la filière nucléaire (GDO) et les lauréats**
- **Poursuivre les travaux internationaux** relatifs au développement des SMR et AMR (GIF, AIEA, AEN...)
- Effectuer une **veille sur les technologies concurrentes**

Et le futur ?





Merci pour votre écoute !

Des questions ?

