



Upcycling nuclear for climate

Présentation, genèse, ambitions, développement

SFEN RAL le 14/02/2024

Une équipe complémentaire, dynamique et innovante



Sylvain Nizou
CEO

Développeur commercial

Expertise : économie circulaire du carbone, **décarbonation des industries**

Partenariats stratégiques
Innovation (10 brevets)



Paul Gauthé
CTO

15 ans d'expérience en RNR-Na, exploitation du réacteur Phénix

Chef de projet R&D RNR

Expert en sûreté et conception



Jean-Baptiste Droin
CIO

10 ans d'expérience sur **conception/sûreté réacteurs avancés**

Expert sur **flexibilité réacteurs et stockage thermique**

Innovation (8 brevets)





43% des émissions
mondiales de CO₂
sont générées par
l'industrie et le
transport

9.15Gt CO₂

Emitted by industry

€400bn

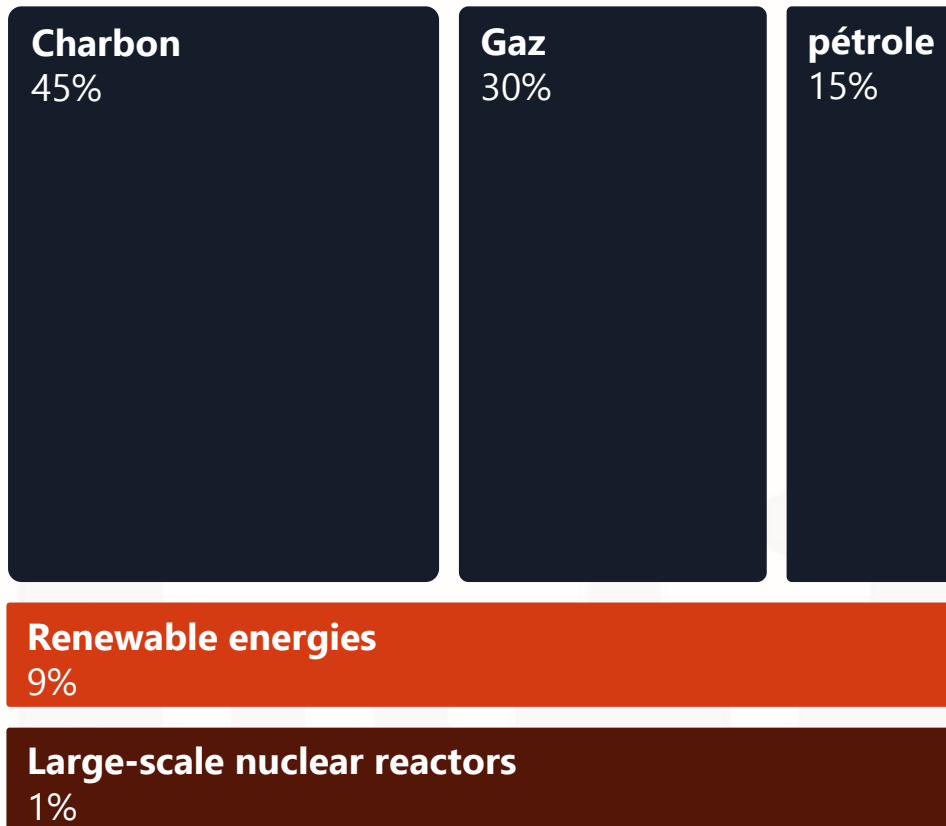
Air pollution damage per year in
Europe due to industry

50

Industrial sites are accountable for
10% of greenhouse gas emissions in
France

Les combustibles fossiles restent l'énergie majoritaire (à 90%) employée par l'industrie (mondiale)

Global industrial energy mix



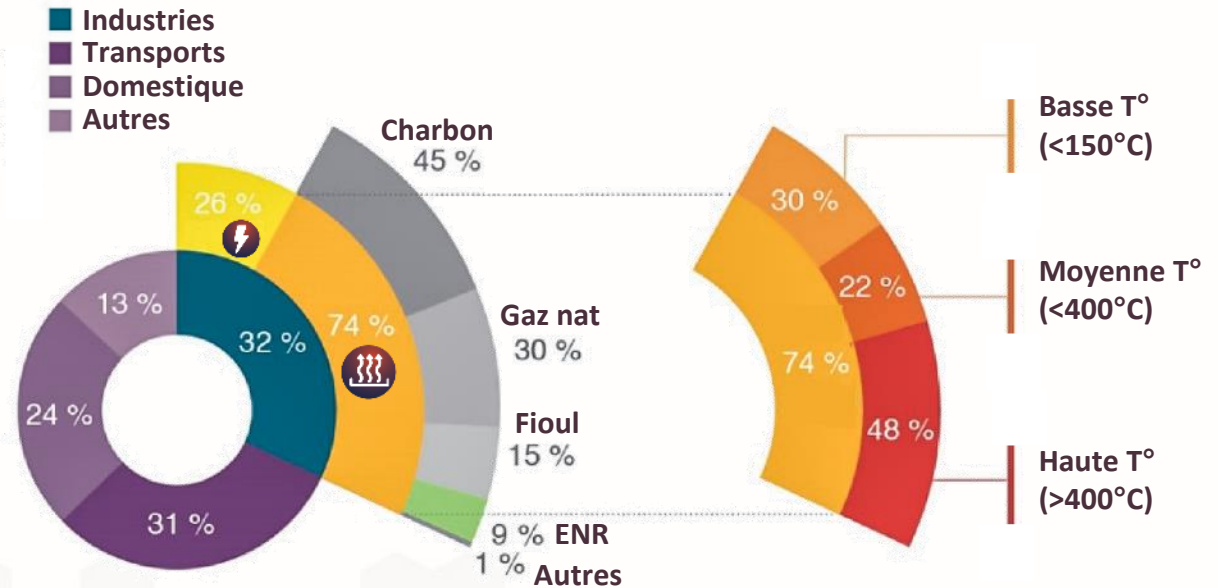
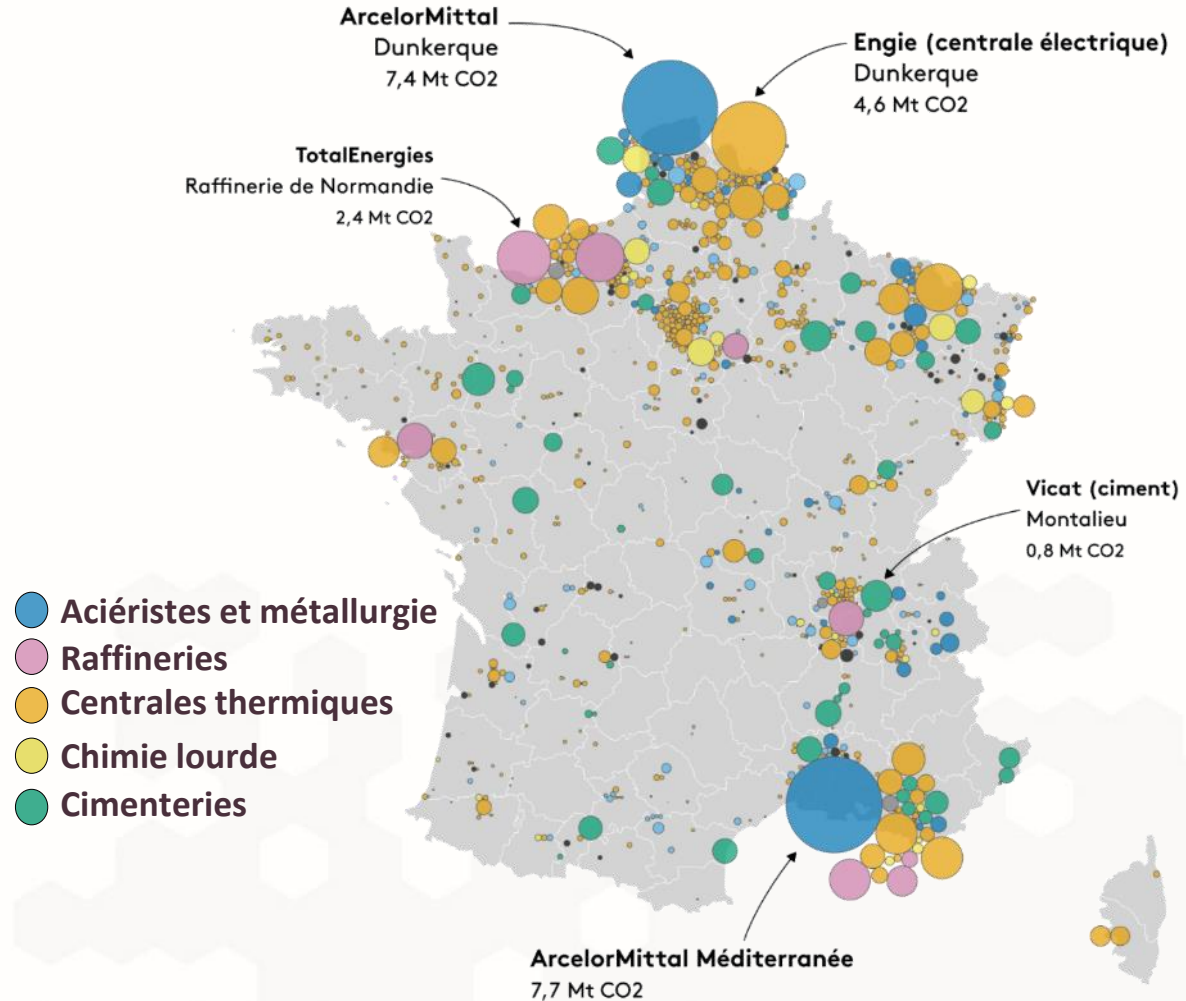
- 1 Combustibles fossiles**
Main source of high-carbon energy used by industry because it is pilotable, scalable and has the power standards required by industry
- 2 Energies renouvelables**
Major axis of decarbonization of energy but does not meet industry standards because it is unpredictable, and the power level is too low
- 3 Energie nucléaire**
Alternative solution for decarbonization but large-scale nuclear reactors are dedicated on electricity while not being able to provide heat according to industrial standards

Source: EIA

LA TRANSITION ENERGETIQUE N'A PAS VRAIMENT COMMENCE !!!

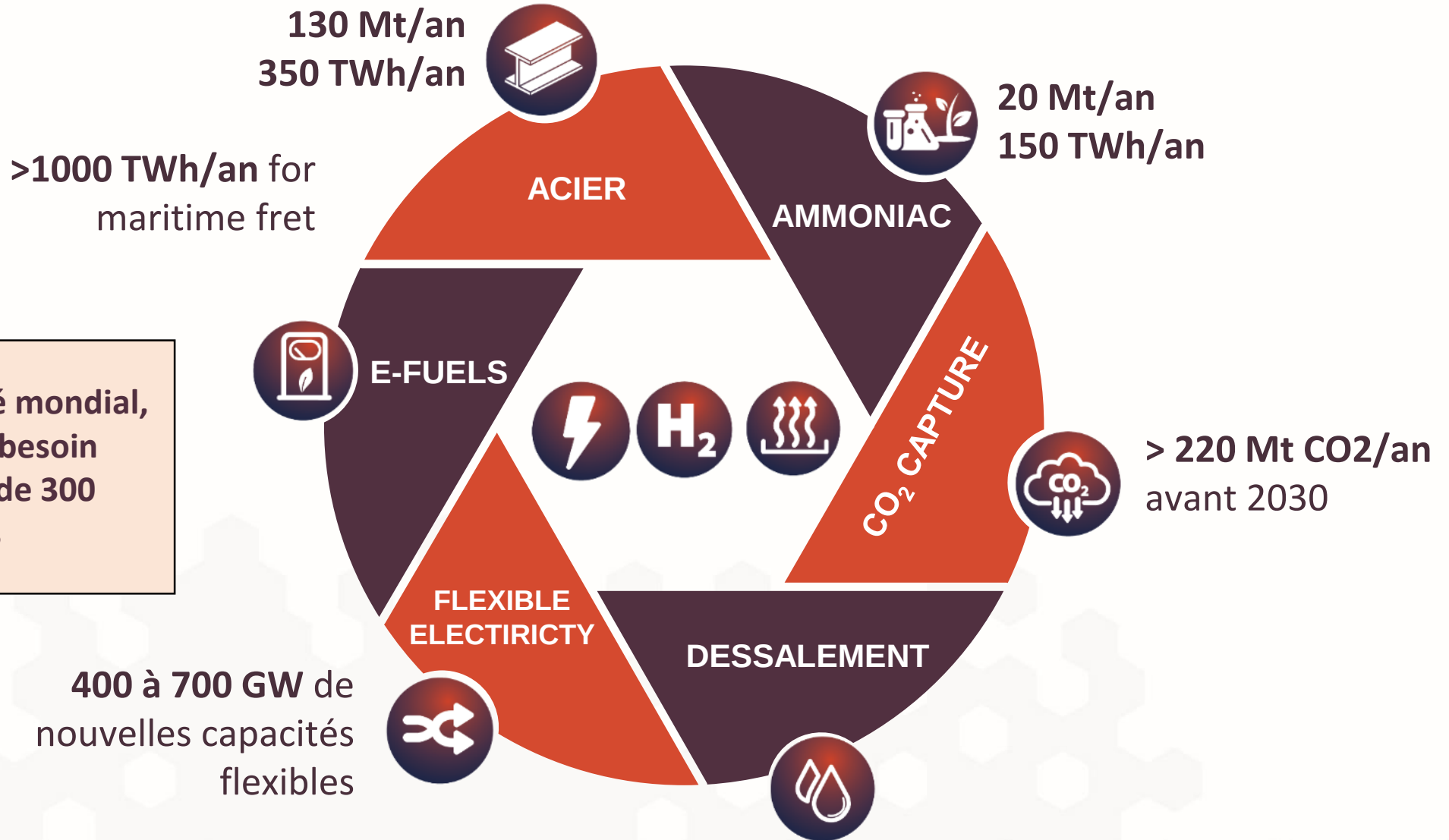
Qui sont ces industriels ?

Leur point commun : ce sont de gros consommateurs de ressources fossiles, sans solution de substitution suffisante et crédible

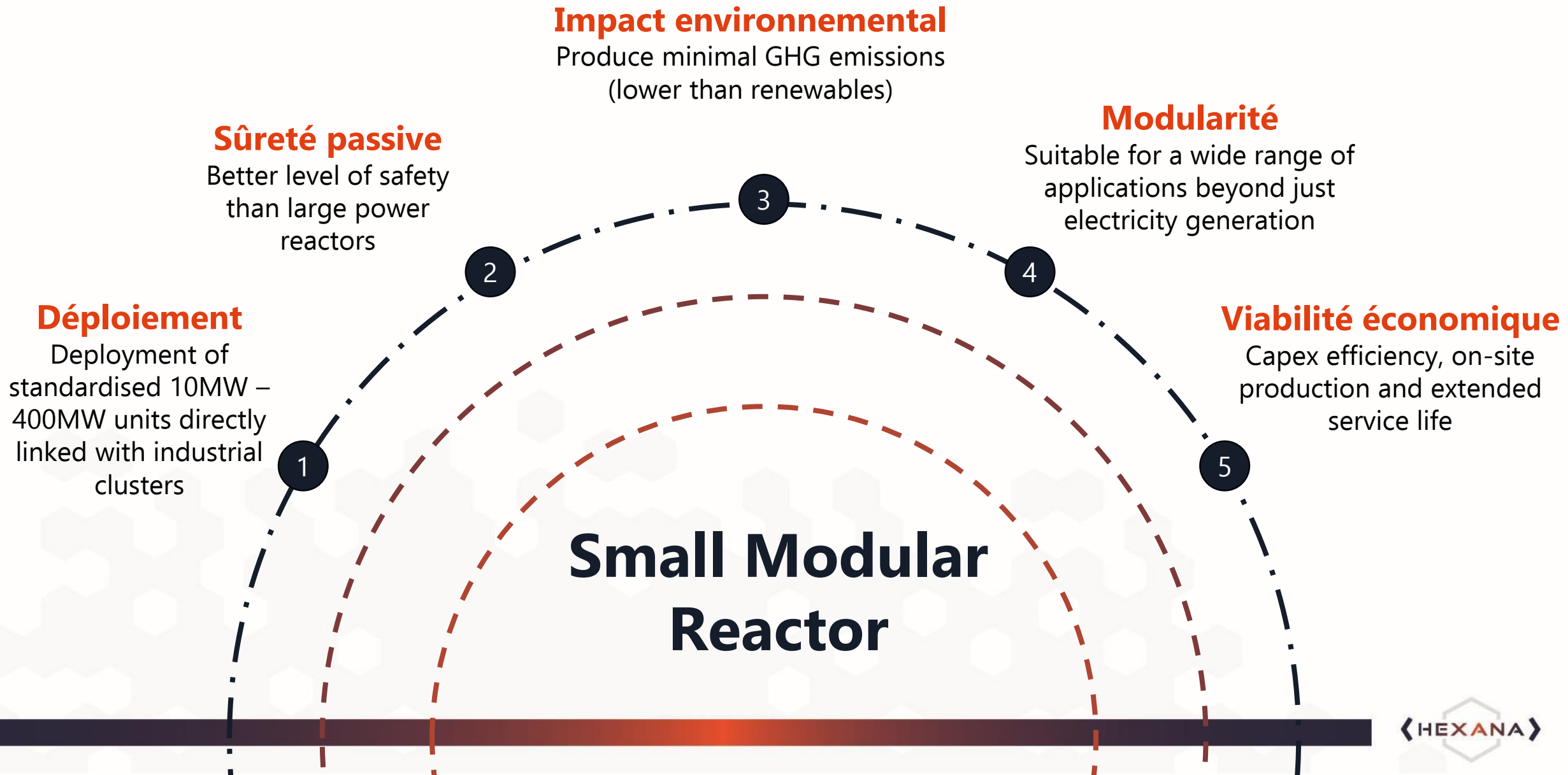


➤ L'approvisionnement énergétique de l'industrie mondiale dépend à 90% de sources carbonées

Marchés particuliers adressés par le système AMR HEXANA >300 MWth

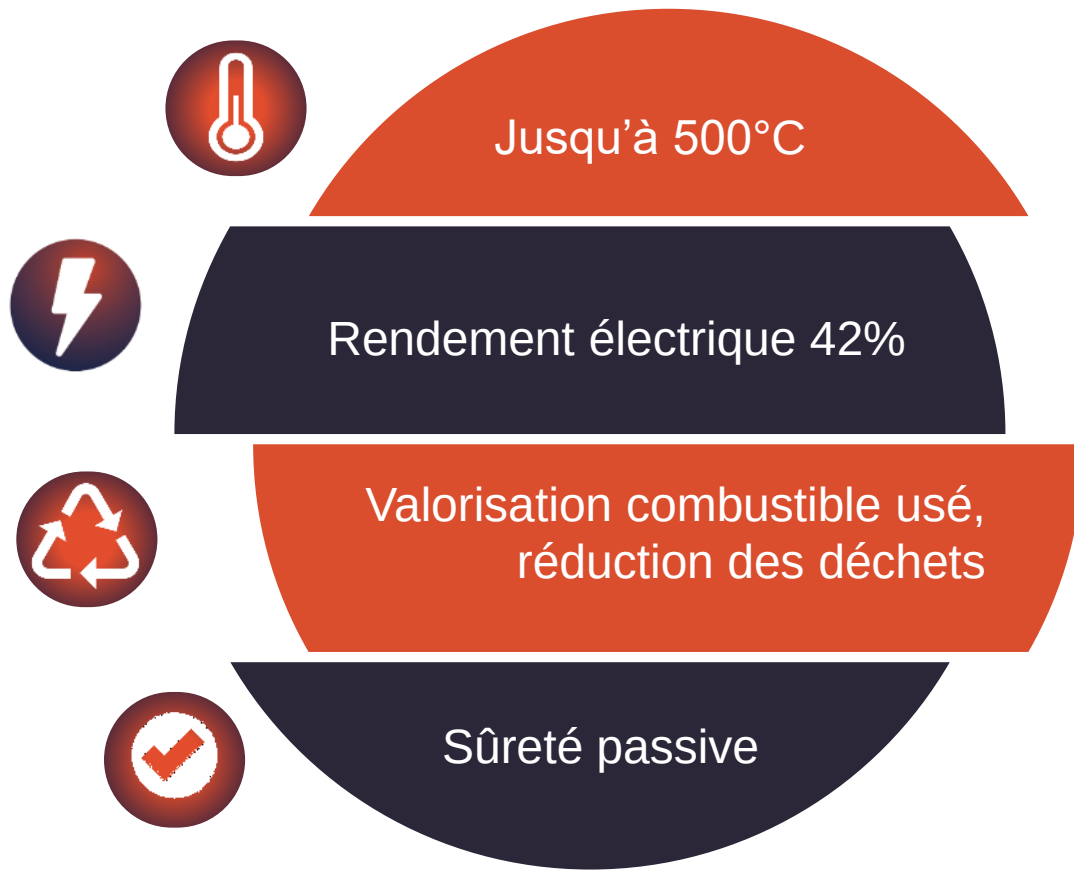


Les SMR “Small Modular Reactors” sont une option à considérer pour relever ce défi



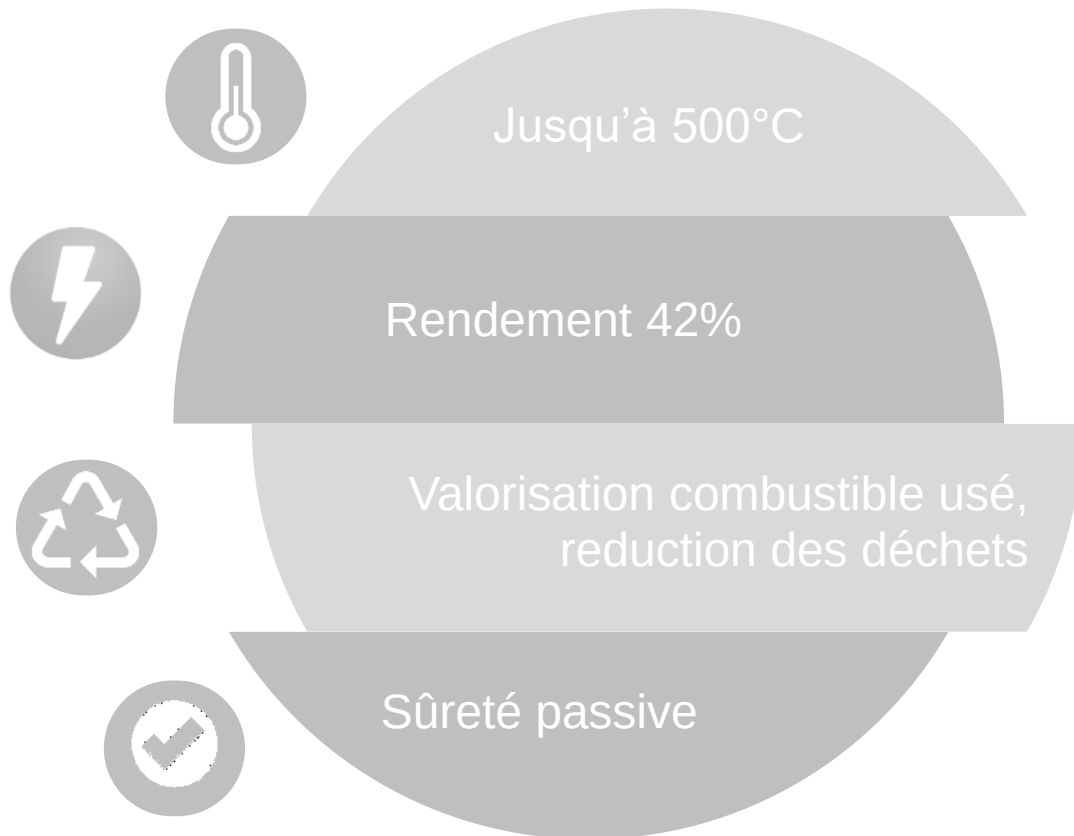
RNR sodium d'HEXANA : la seule technologie de 4^{ème} génération à pouvoir répondre aux enjeux dans les temps

Des spécifications techniques favorables...

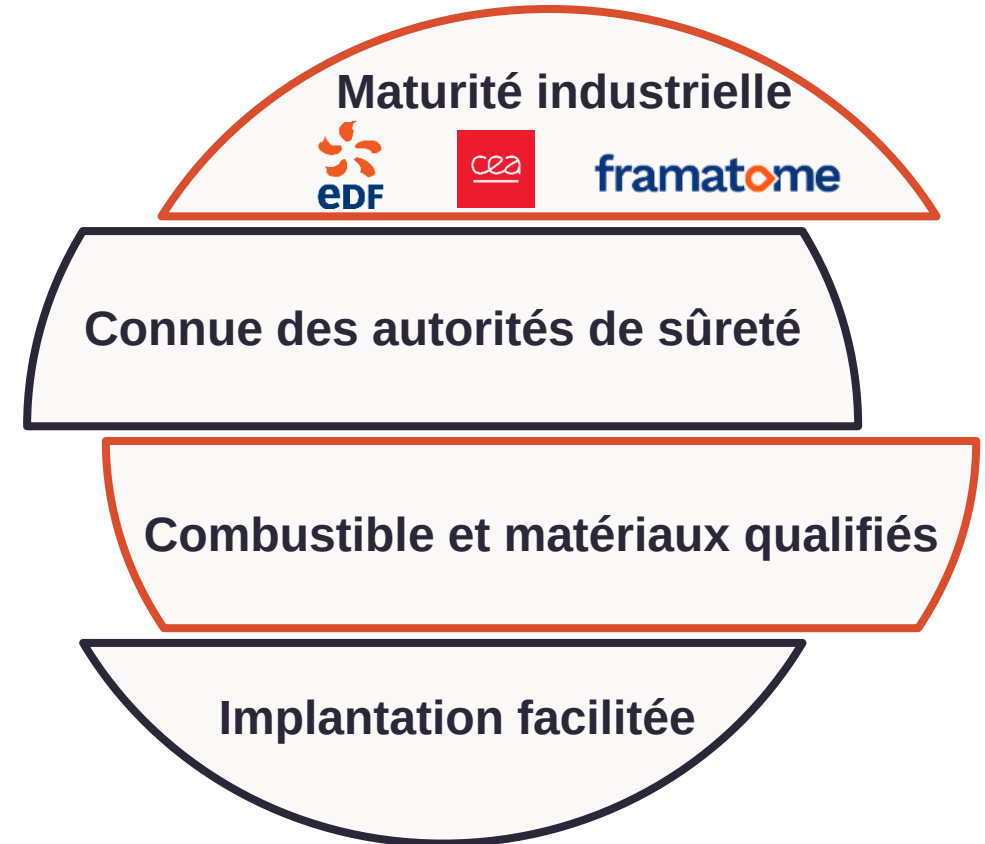


RNR sodium d'HEXANA : la seule technologie de 4^{ème} génération à pouvoir répondre aux enjeux dans les temps

Des spécifications techniques favorables...



... et surtout une filière **mature** et **crédible** !

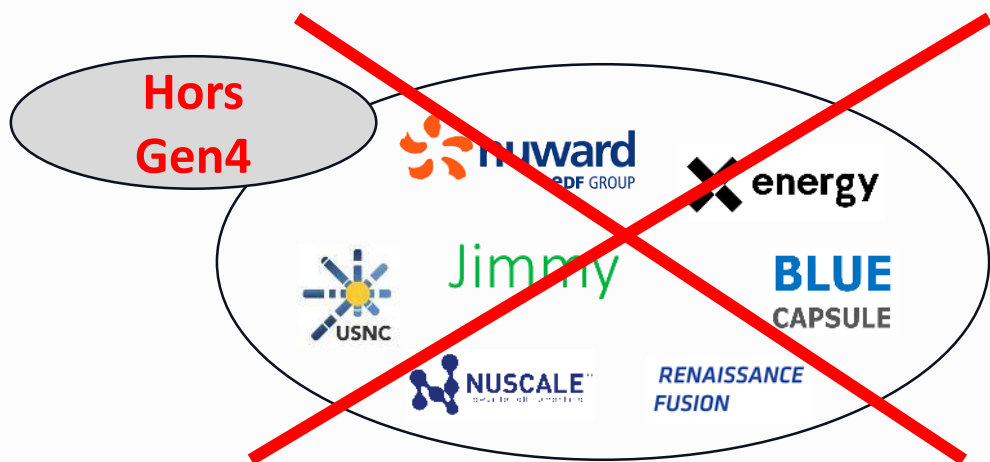


Nucléaire de 4^{ème} Génération: 6 technologies, 4 objectifs

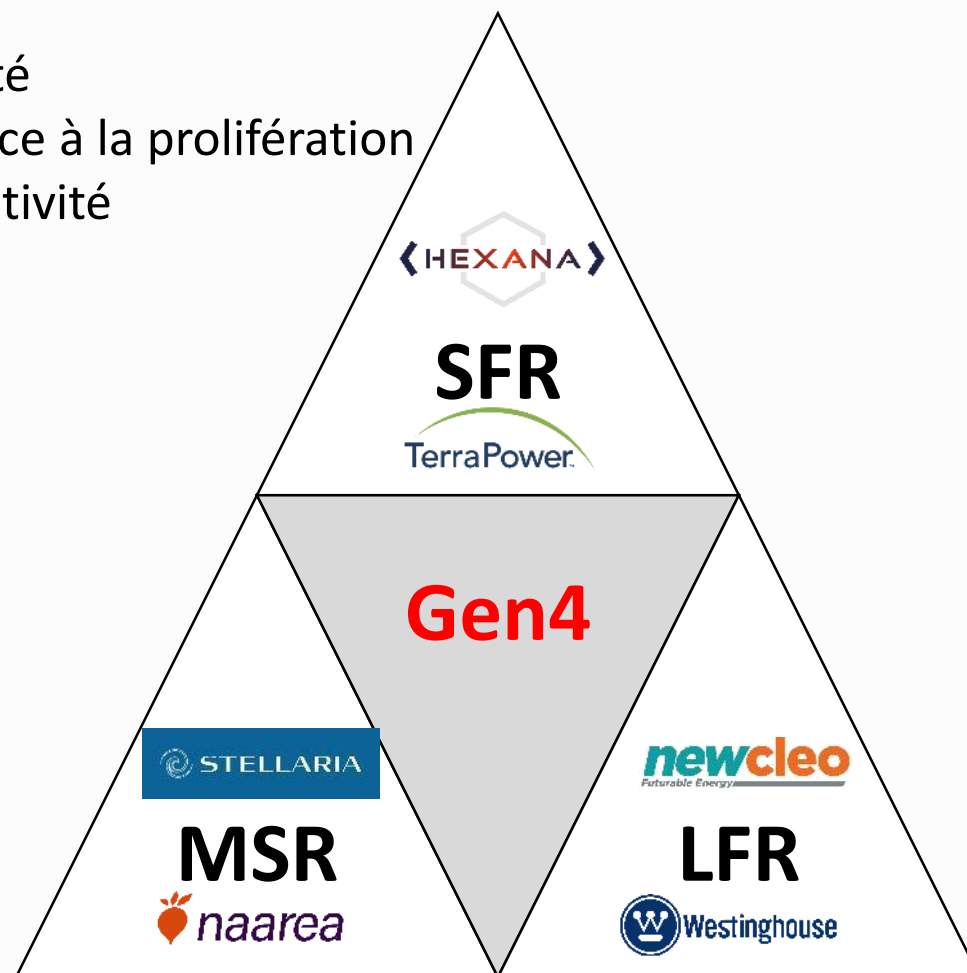
Il y'a 20 ans, le Forum Gen4 a sélectionné 6 technologies innovantes après 2 ans de benchmarks et d'analyses

1. Sodium Fast Reactor (SFR)
2. Lead Fast Reactor (LFR)
3. Molten Salt Reactor (MSR)
4. Gas Fast Reactor (GFR)
5. Supercritical Water Reactor (SCWR)
6. **Very** High Temperature Reactor (VHTR)

La critère « durabilité » exclut les REP et HTR de la taxonomie Gen4



1. Sûreté
2. Durabilité
3. Resistance à la prolifération
4. Compétitivité



RNR sodium : 400 années cumulées de REX

Year	Reactor	Country	Power	Coolant
1946	Clementine	USA	25 kW	Mercury
1951	EBR-1	USA	1,4 MW	NaK
1956	BR-2	USSR	100 kW	Mercury
1959	BR-5	USSR	5 MW	Na, NaK
1959	DFR	Great Britain	60 MW	NaK
1962	EBR-2	USA	62 MW	Na
1963	Enrico Fermi	USA	300 MW/60MWe	Na
1967	Rapsodie	France	20-40 MWe	Na
1969	BOR-60	USSR	60 MW	Na
1973	BR-10	USSR	8 MW	Na
1973	BN-350	USSR	1000 MW/250 MWe + Water	Na
1973	Phenix	France	250 MWe	Na
1974	PFR	Great Britain	250 MWe	Na
1977	Joyo	Japan	140 MW	Na
1978	KNK-II	Germany	20 MWe	Na
1980	BN-600	USSR	600 MWe	Na
1980	FFTF	USA	400 MW	Na
1985	SNR-300	Germany	300 MWe	Na
1985	FBTR	India	40 MW/13.2 MWe	Na
1986	Superphenix	France	1200 MWe	Na
1995	Monju	Japan	250 MWe	Na
2010	CEFR	China	65 MW/20 MWe	Na
2015	BN-800	Russia	800 MWe	Na



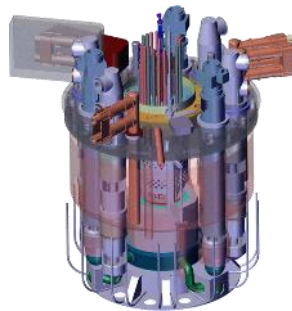
Phénix : 35 ans d'exploitation

- Héritage unique : matériaux, combustible, échangeurs et pompes
- Disponibilité > 60% pour un réacteur expérimental



SuperPhénix : plus grand RNR sodium jamais conçu, construit, exploité et démantelé

- REX industriel unique
- Excellente disponibilité de 96% en 1996 (3,7 TWhé d'électricité bas-carbone)



ASTRID : des compétences renouvelées

- Un bond dans les outils de calcul
- Des innovations et une démarche sûreté

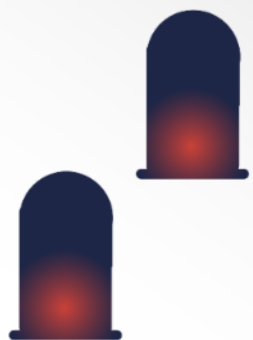
RNR sodium : le système Gen4 le plus mature

Trois ruptures dans les usages de l'énergie via une architecture innovante

Modulaire

2 modules nucléaires
de 400MW thermiques

Puissance constante



Chaleur

Flexible

Module de stockage
de chaleur

Variation de puissance assurée
par le stockage de la chaleur



Chaleur

Intégré

Sites industriels



Production flexible d'électricité

jusqu'à 20% P/min



Applications



400 à 500 MWth est le meilleur arbitrage

Assez petit



Construction en usine (cuve < 9m)

Simplifications

Systèmes passifs

Adaptation à des sites existants



400 MWth

Technico-économie
Besoins industriels
Cycle des matières
(isogénération visée)

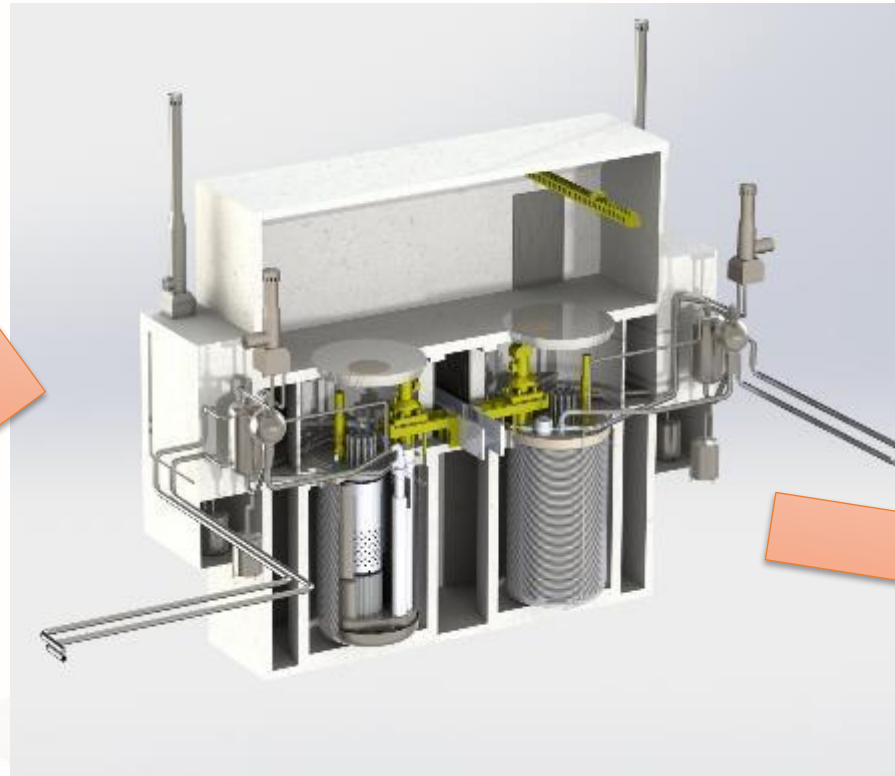


Pas trop petit

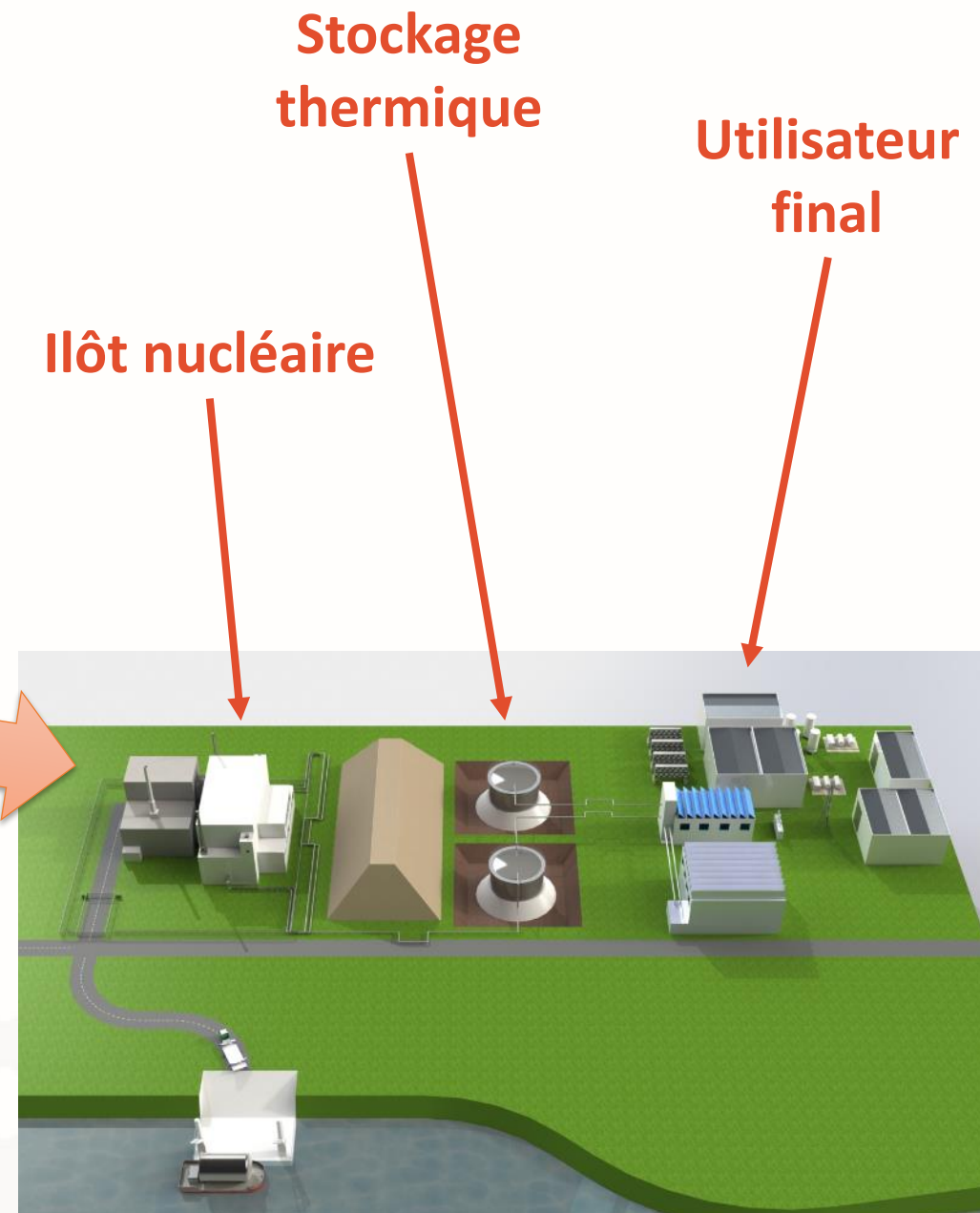
Design du système HEXANA



Module 400 MWth



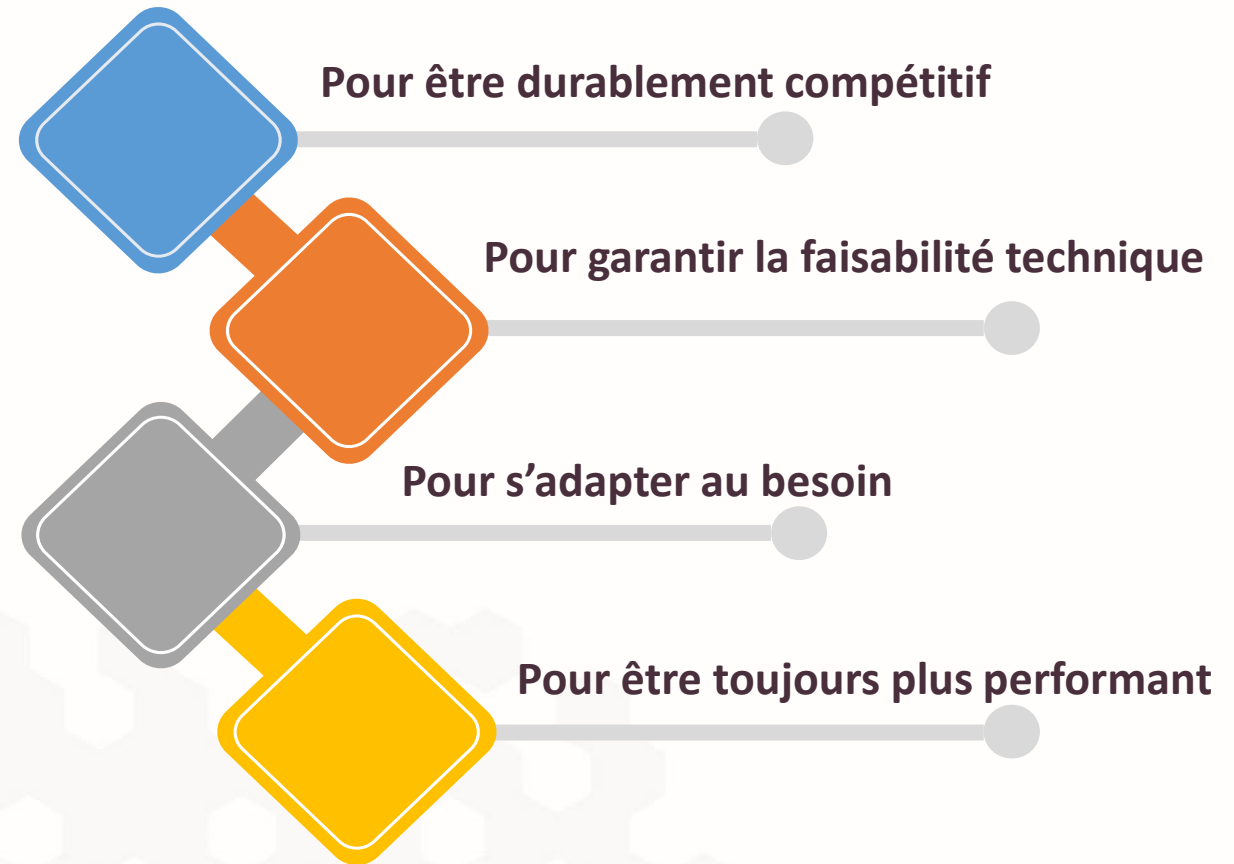
Bâtiment réacteur
2x400 MWth



Stratégie d'innovation HEXANA

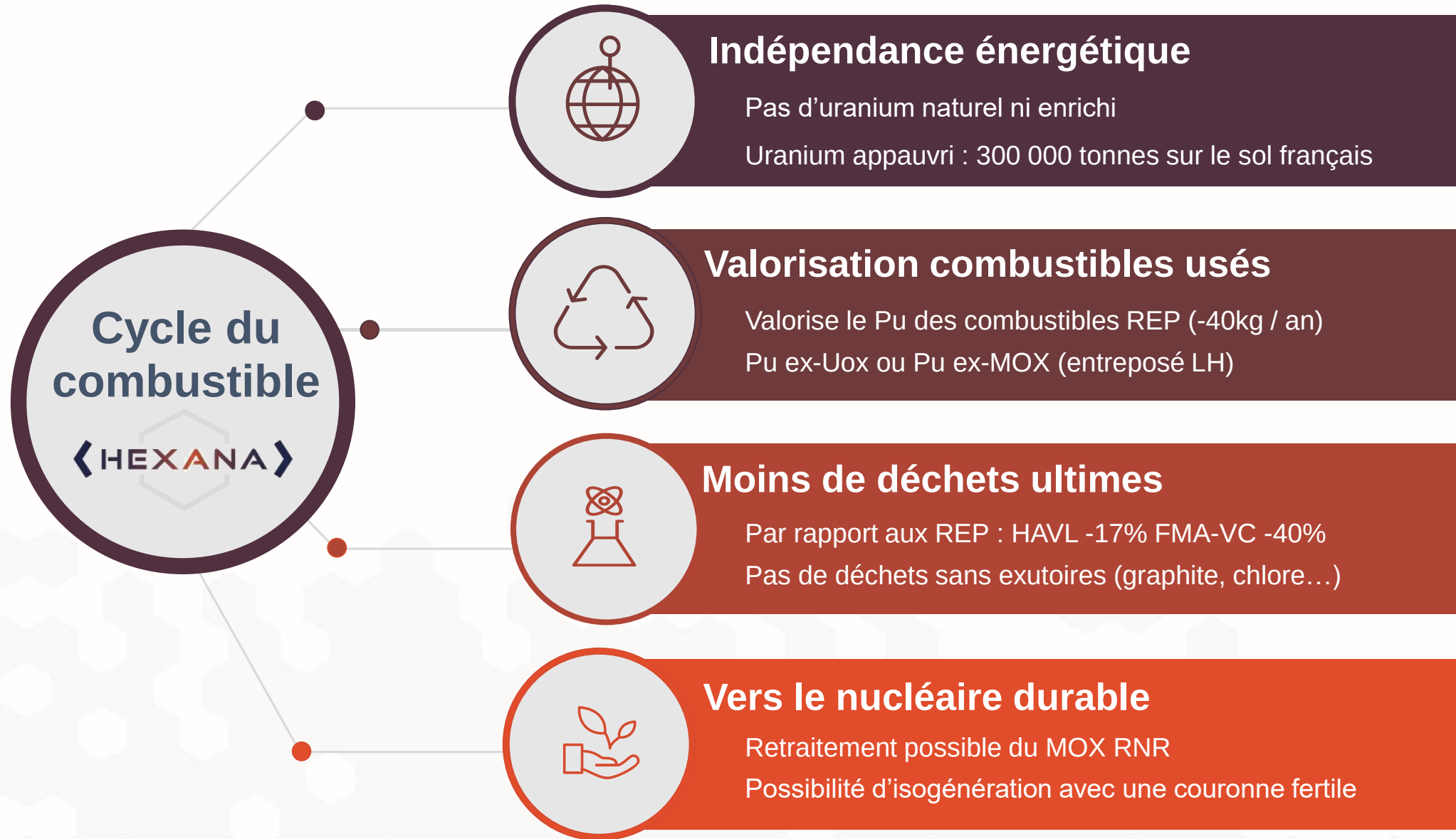
➤ Un parti pris sur l'innovation assumé **pour aller vite et réussir:**

- **NE PAS INNOVER** sur les sujets déjà éprouvés, matures, qualifiés (ASN)
- **INNOVER VITE ET FORT** sur les nouvelles briques propres au schéma de conception et d'industrialisation d'une fabrication modulaire + stockage + briques de couplage vers l'industrie



Tout en menant des activités de R&D au service des performances futures améliorées

Proposition de valeur – Engager la fermeture du cycle



Sûreté : « Le sodium : un bénéfice-risque largement favorable »

André-Claude Lacoste, ex-ASN, sur SuperPhénix : « *Le niveau de sûreté de l'installation est cohérent avec celui des réacteurs à eau sous pression qui constituent l'essentiel du parc nucléaire français* »

Le sodium, un métal liquide industriel, choix de raison pour un réacteur

- Excellent **caloporteur** : convection naturelle, refroidissement par air, inertie thermique
- Pas de **pression**, marges à l'ébullition (900°C)
- Un fabricant français leader (MSSA), un matériau de l'industrie (**solaire, batteries**)
- Une filière de référence du Forum Gen4 avec des critères de sûreté définis
- Un REX positif, y.c. en incidentel (Phénix : 35 fuites, max 2kg, zéro feu, zéro conséquence)

GEN IV International Forum		SDC-TF/2013/01
		May 1, 2013
Safety Design Criteria for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor System		

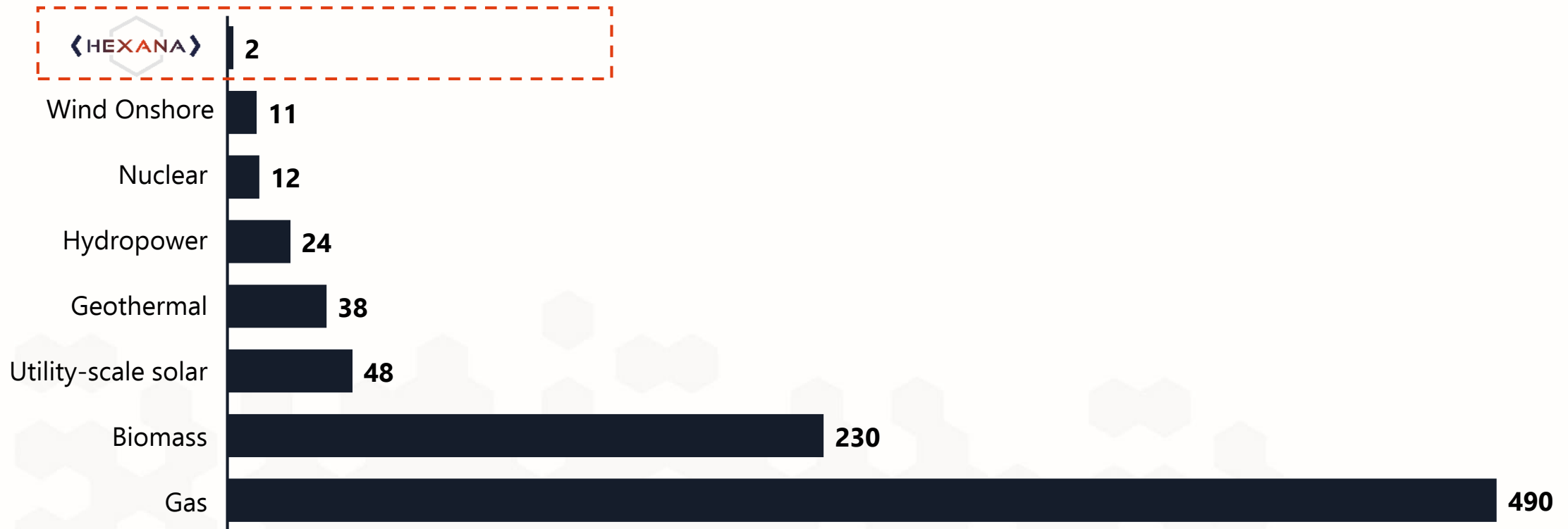
Caractéristiques de sûreté du design HEXANA

- Réaction sodium-eau : **éliminée par conception grâce au stockage thermique**
- **Petite puissance** : démonstration facilitée (accident grave, évacuation de la puissance résiduelle)
- Fusion du cœur considérée au titre du 4^{ème} niveau de la défense en profondeur
- **Systèmes passifs** d'évacuation de puissance résiduelle, diversification source froide
- Pilotage de la charge par le stockage : pas de variations de puissance neutronique

Projet présenté de
manière informelle
à ASN, IRSN et
HFDS

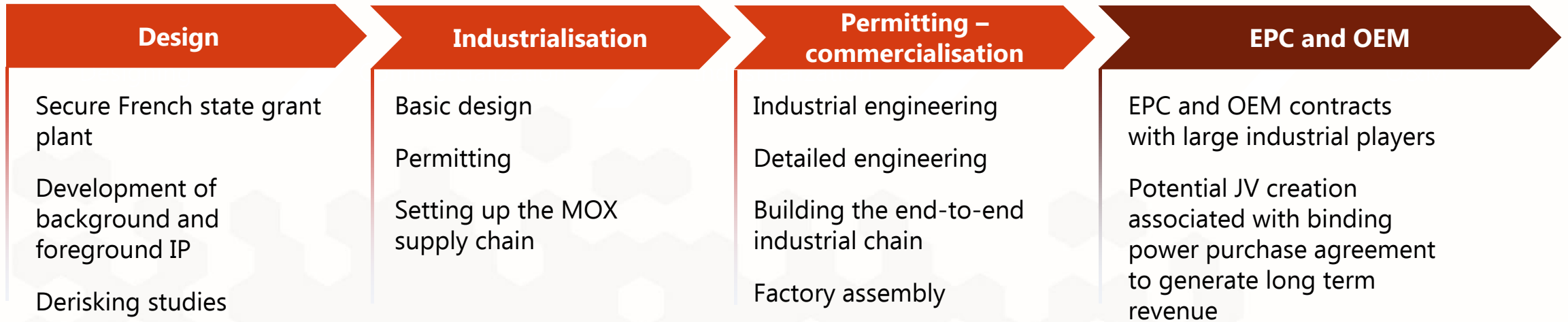
Energie ultra bas carbone

Greenhouse gases by energy sources (in gCO₂eq/kWhe)



Source: IPCC, CEA (Jérôme Serp, Christophe Poinssot, and Stéphane Bourg)

AGENDA du développement



Proposition de valeur – Une longueur d’avance

Une réflexion industrielle déjà engagée avec des partenaires stratégiques du nucléaire positionnés sur l’ensemble de la chaîne de valeur – design, sûreté, industrialisation, approvisionnement combustible, exploitation



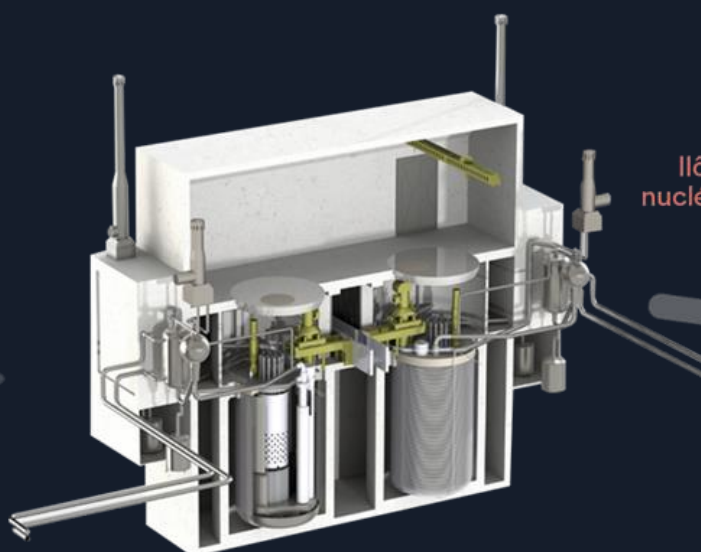
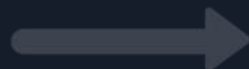
Hexana a une mission



Relancer la filière sodium française pour engager la fermeture du cycle du combustible tout en offrant une alternative crédible à aux combustibles fossiles pour la décarbonation des industries lourdes



Module 400 MWth



Bâtiment réacteur 2 x 400 MWth



Exemple d'implantation