



SMR/AMR

Panorama et perspectives

Paul Gauthé

25/05/2023

IRESNE | *Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone*

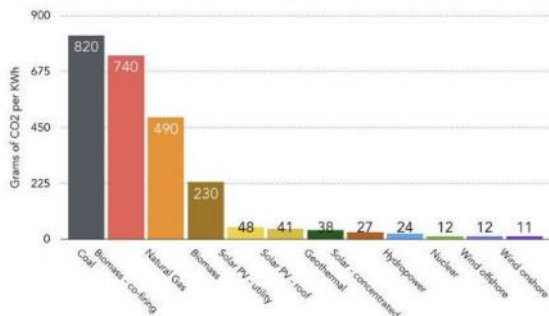
1. Les réacteurs de 4^{ème} Génération
2. Contexte et panorama
3. Le cas de la France
4. Conclusion

1.

Les réacteurs de 4^{ème} génération

PAS DE REDUCTION MAJEURE DES EMISSIONS DE CO2 SANS DEVELOPPEMENT DU NUCLEAIRE...

Nuclear is Very Low-Carbon

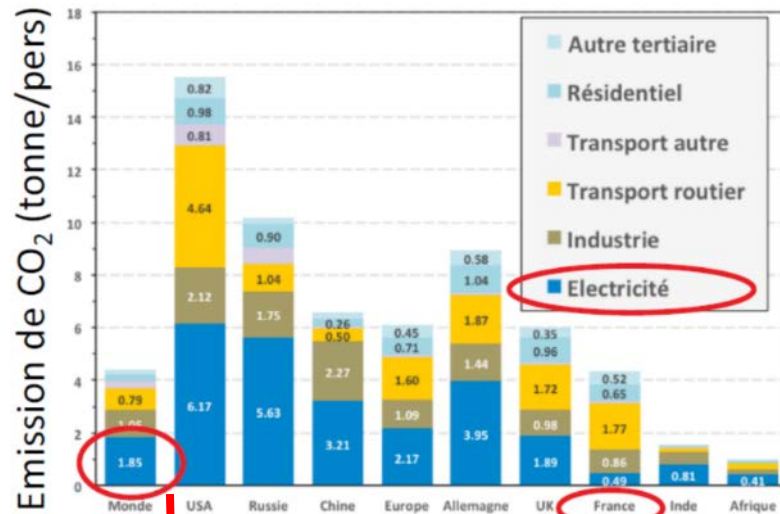


Potentiel énergétique

1 tonne de pétrole = 1 tep

1 tonne de charbon = 0,7 tep

1 tonne d'uranium = 10000 tep



1/3 du CO2 mondial : centrales fossiles pour la production d'électricité !



Drax
Royaume-Uni 4000MW
Janschwalde Allemagne
3000MW

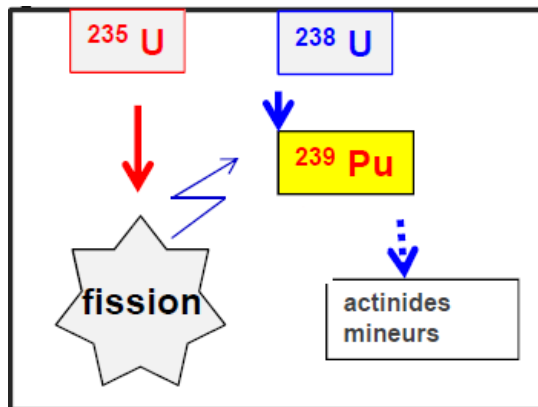


		260\$/kgU	réserves probables
	ktU/an	8000	15000
consommation actuelle	60	133	250
projection 2050	120	67	125

Entre 60 et 250 ans de stock
suivant les hypothèses

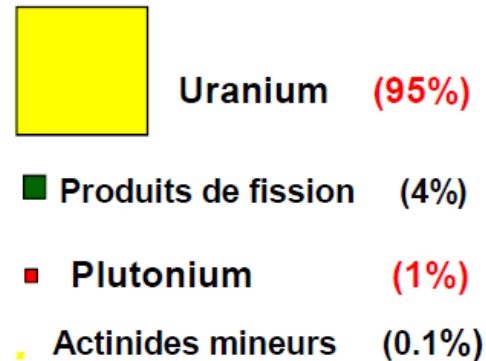
Dans les REP, environ 5% de l'uranium initial mis en réacteur (U enrichi) est consommé pour produire de l'énergie électrique

Cela représente seulement 0,5-0,6% de l'uranium naturel de départ

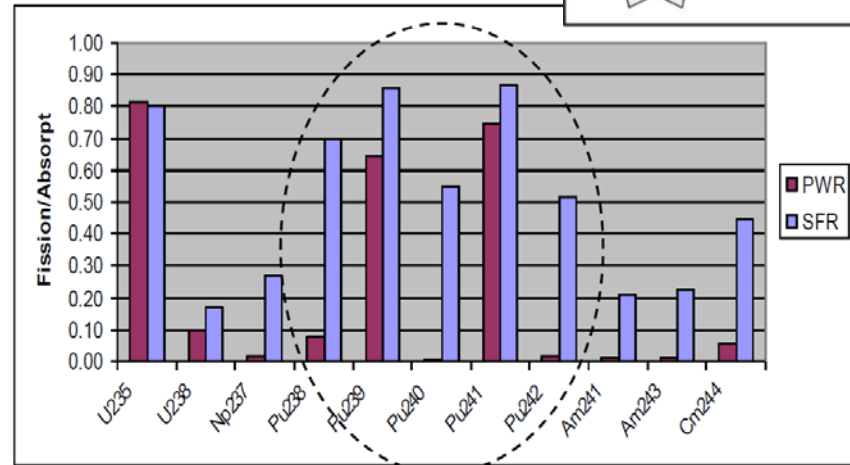
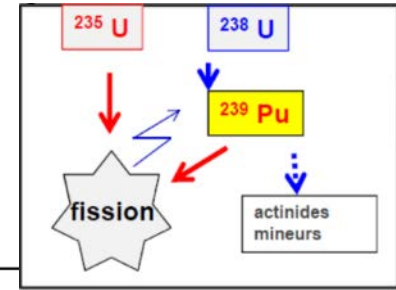
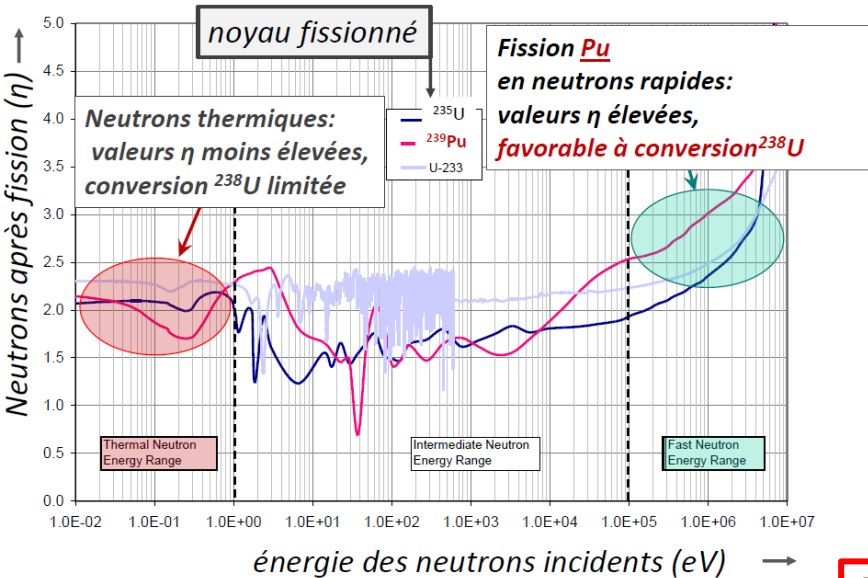
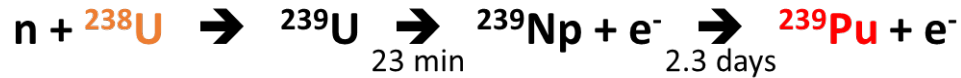


- Cas actuel : 450 réacteurs REP ou équivalents dans le monde
- Combustible : Uranium
- Modérateur : eau
- Spectre thermique (énergie des neutrons)

Combustible utilisé

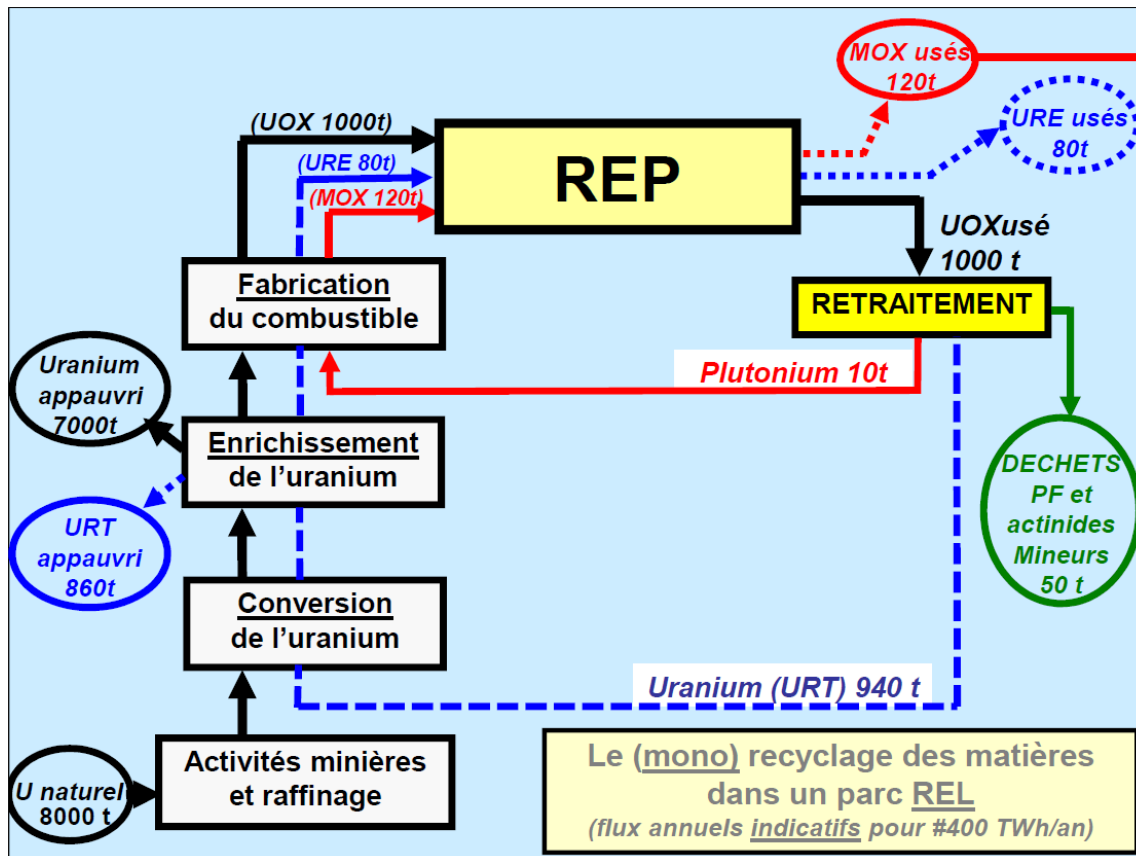


La capture neutronique sur l' ^{238}U produit du Pu^{239}



Problème : pour que les neutrons soient rapides, ils ne doivent pas être ralentis par un modérateur

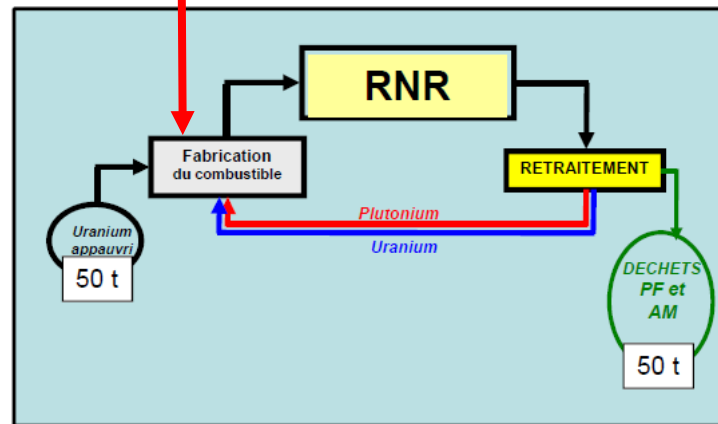
- impossible d'utiliser l'eau comme caloporteur pour un RNR
- Métaux liquides, gaz ou sels comme caloporteurs



MOX usé:

2013: 1500 tonnes (+ 120 tonnes/an)

2035 : 4000 tonnes (# 250t Pu)



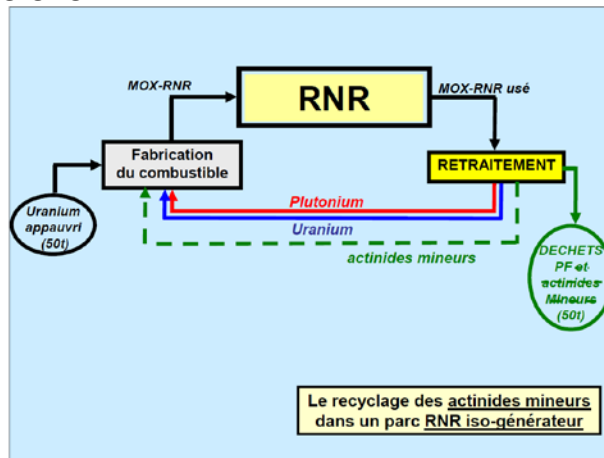
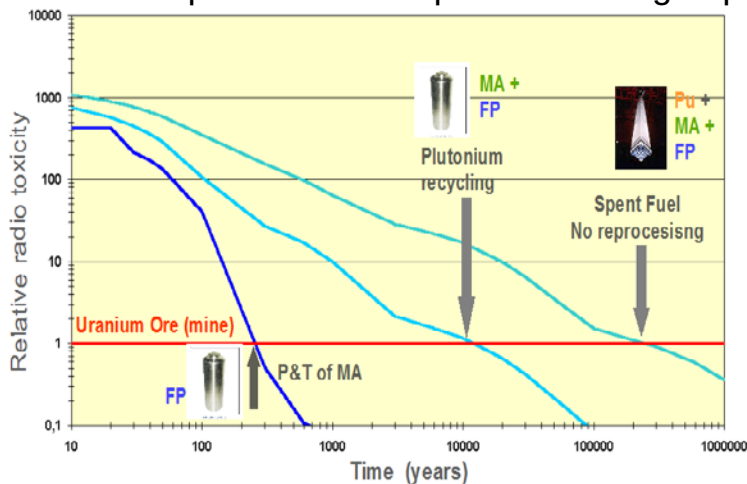
Gen4 fait passer la chaîne de valeur de l'amont du cycle à l'aval

Minimisation des déchets par le recyclage avancé des actinides

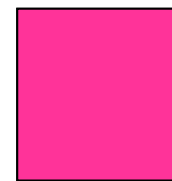
Le plutonium est à la fois le problème et la solution :

- Le plutonium contribue majoritairement à la radiotoxicité long terme du combustible utilisé
- Le plutonium a un potentiel énergétique élevé

→ **Multirecyclage du plutonium**



Radiotoxicité après 1000 ans



Plutonium



Actinides Mineurs(AM)

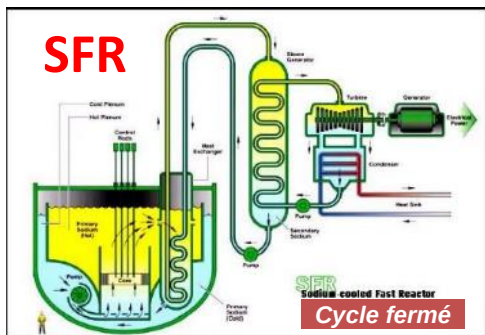


Produits de Fission (PF)

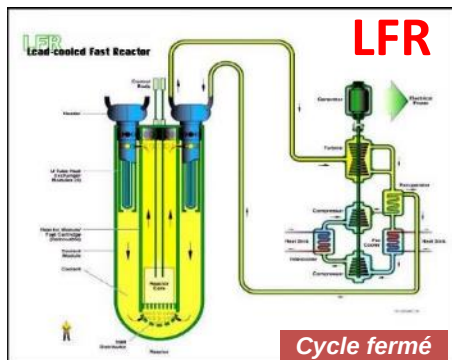
Après le plutonium, les actinides mineurs ont l'impact majeur sur la radiotoxicité long terme

→ **Transmutation des AM**

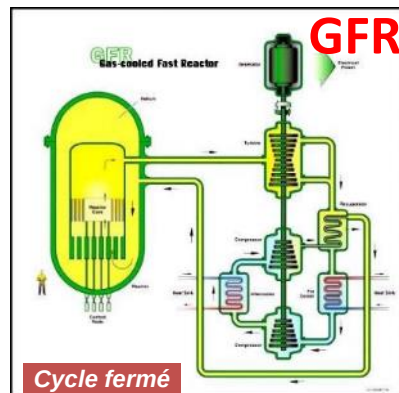
Des favoris... et des outsiders



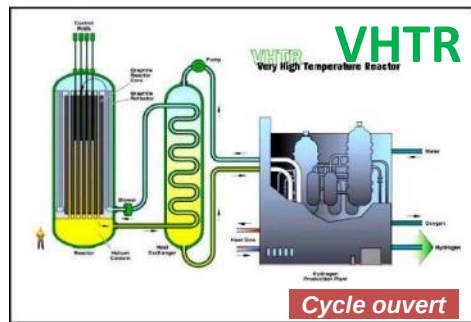
Réacteur Rapide au Sodium (RNR-Na)



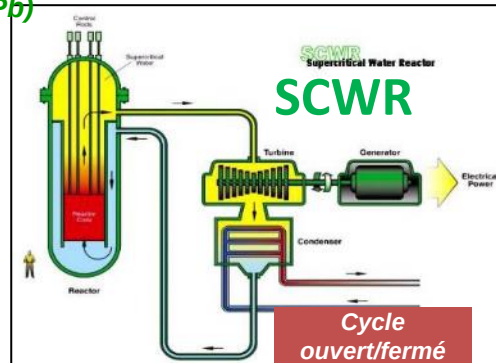
Réacteur Rapide au Plomb (RNR-Pb)



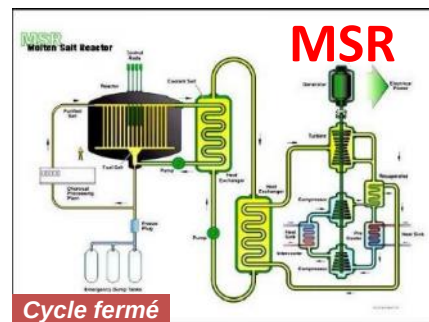
Réacteur Rapide à Gaz (RNR-G)



Réacteur à Très Haute Température (RTHT)



Réacteur à Eau Supercritique (RESC)



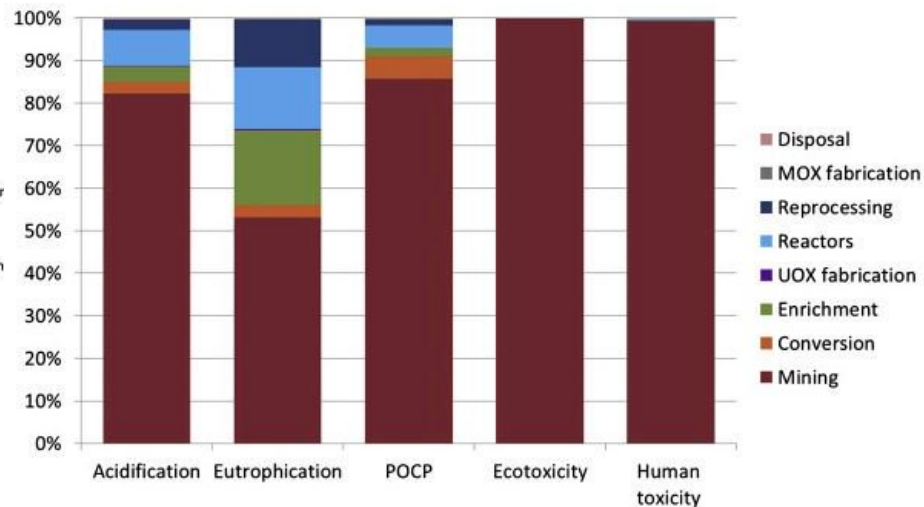
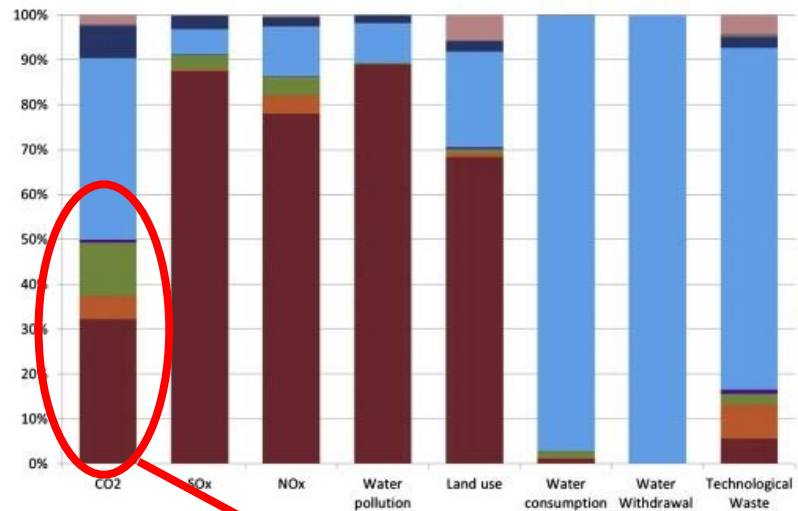
Réacteurs à Sels Fondus (RSF)



	SFR	LFR	GFR	VHTR	SCWR	MSR	PWR
Neutron spectrum (T/F)	F	F	F	T	T/F?	T/F	<i>T</i>
Moderator				graphite	H ₂ O (or D ₂ O)	graphite (or none)	<i>H₂O</i>
Coolant	Na	Pb (or Pb-Bi)	He	He	H ₂ O	molten salt	<i>H₂O</i>
Fuel type	MOX (pins)	nitride (pins)	carbide	carbide (particles)	UOX, MOX	liquid fuel (U, Pu, Th)	<i>UOX, MOX</i>
Core outlet t° (°C)	550	500	850	> 900	550	700	<i>330</i>
Primary pressure (MPa)	0.1	0.3-0.4	7	5-8	25	0.1-0.2	<i>15.5</i>
Core power density (MW/m ³)	240	140	100	4-6	100	20-300	<i>100</i>

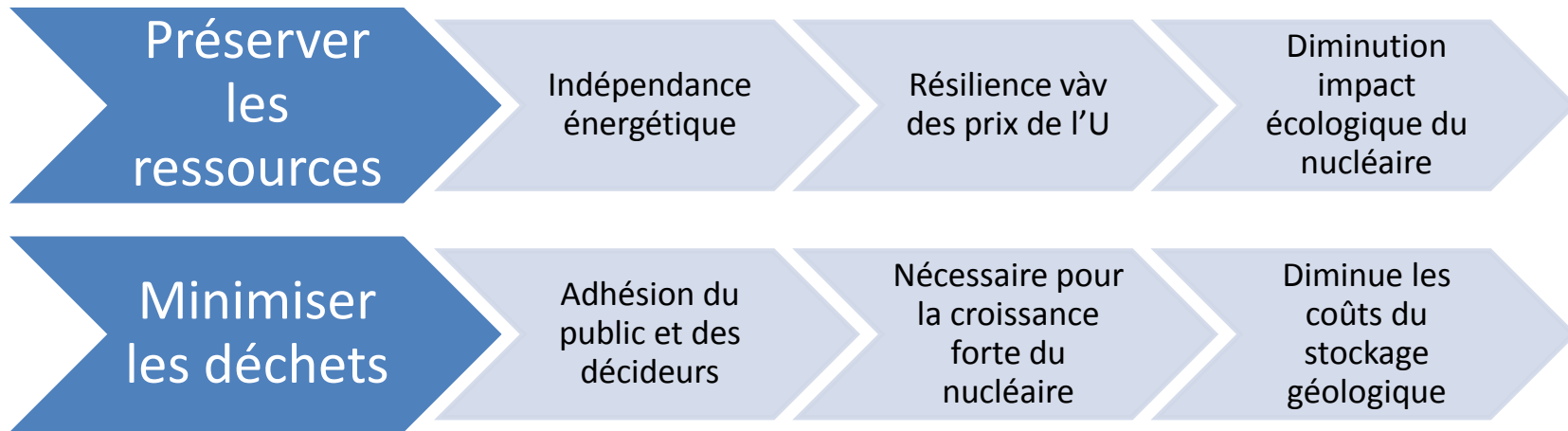
Potentialité de Gen4 : utiliser la chaleur pour d'autres applications décarbonées (chaleur industrielle, désalination eau de mer, hydrogène, cogénération, stockage thermique...)

se passer des mines d'uranium (et de l'enrichissement) = éliminer une bonne partie des problèmes environnementaux de la filière



Notamment diviser par 2 le CO2

Gen4 français est à 2,3gCO2/kWh (comparé à 4gCO2/kWh pour le parc REP)



Mais **surcoût d'un RNR = +35 à +50% d'un REP** dans un contexte de ressource en uranium encore abondant

- >> le développement du RNR n'est pas (encore) une décision économique juste pour le cycle du combustible
- >> décision politique et géostratégique : leadership technologique, indépendance énergétique, adhésion de l'opinion, anticipation de hausses de prix d'uranium...
- >> autres business model -> HEXANA

2.

Contexte et panorama

RNR : Réacteurs à Neutrons Rapides : plusieurs technos, tailles, Gen4 ou non

SMR / AMR / Microréacteurs

- **SMR = Small Modular Reactor** : réacteur de faible/moyenne puissance (50 à 300 MWe)

Un **modèle économique** pour contrer l'effet de taille

Modularité et fabrication en usine, simplification du design, ouverture de marchés spécifiques

- **AMR = Advanced Modular Reactor** : réacteurs de faible/moyenne puissance (idem SMR) et présentant des ruptures technologiques de type GEN-IV (Sels fondus, Na, Pb, Gaz)

SMR ≠ AMR => une convention adoptée au CEA : Appellation non standardisée (AIEA : Different/Novel reactors...)

-
- **Microréacteurs terrestres (MMR : Micro Modular Reactor, vSMR = Very Small Modular Reactor)**

Réacteurs nucléaires électro- et/ou calo-gènes **de 1 à 20 MWe**.

Usage/marché : alimentation de bases militaires, communautés isolées en cogénération électricité/chaleur

- **Microréacteurs spatiaux**

Réacteurs nucléaires électrogènes, de **1** à quelques **100 kWe**

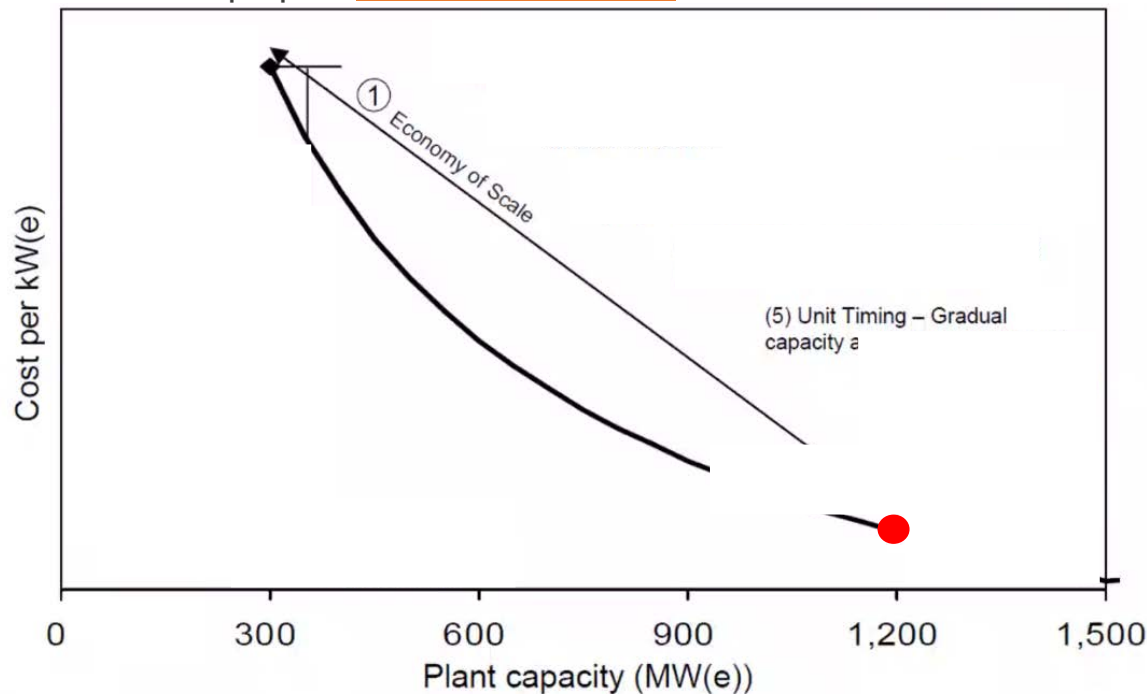
-
- **MSR**

Molten salt Reactor, réacteur à sels fondus >> une techno indépendante du niveau de puissance

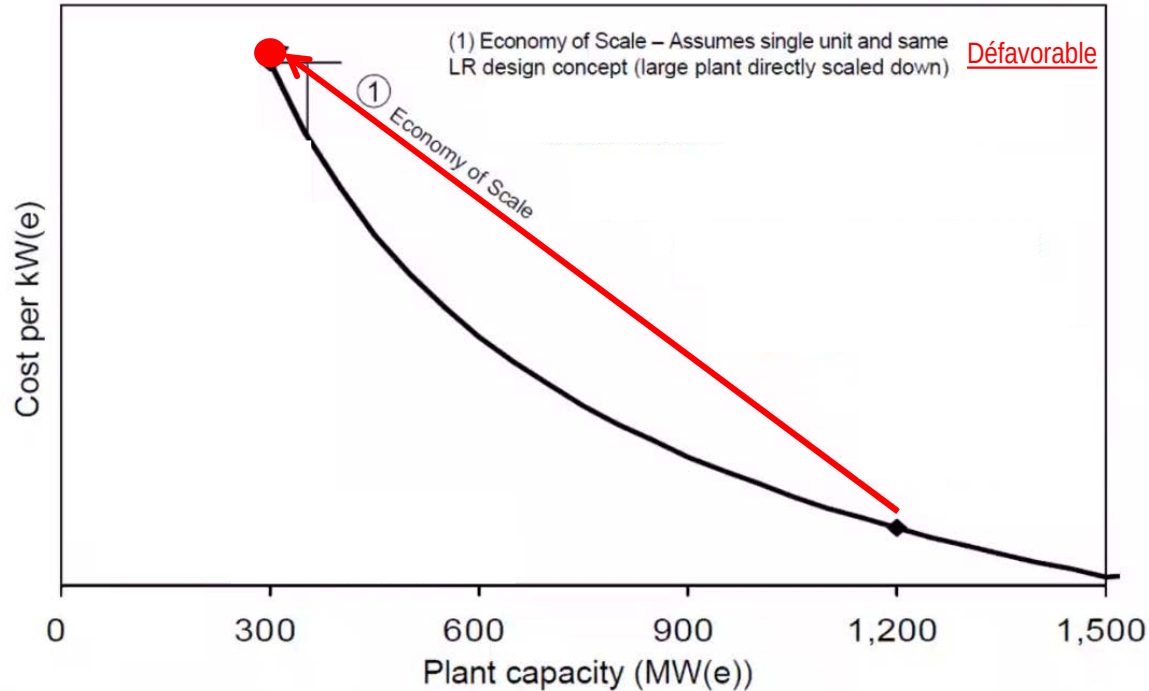
Deux **drivers** principaux de développement des réacteurs avancés :

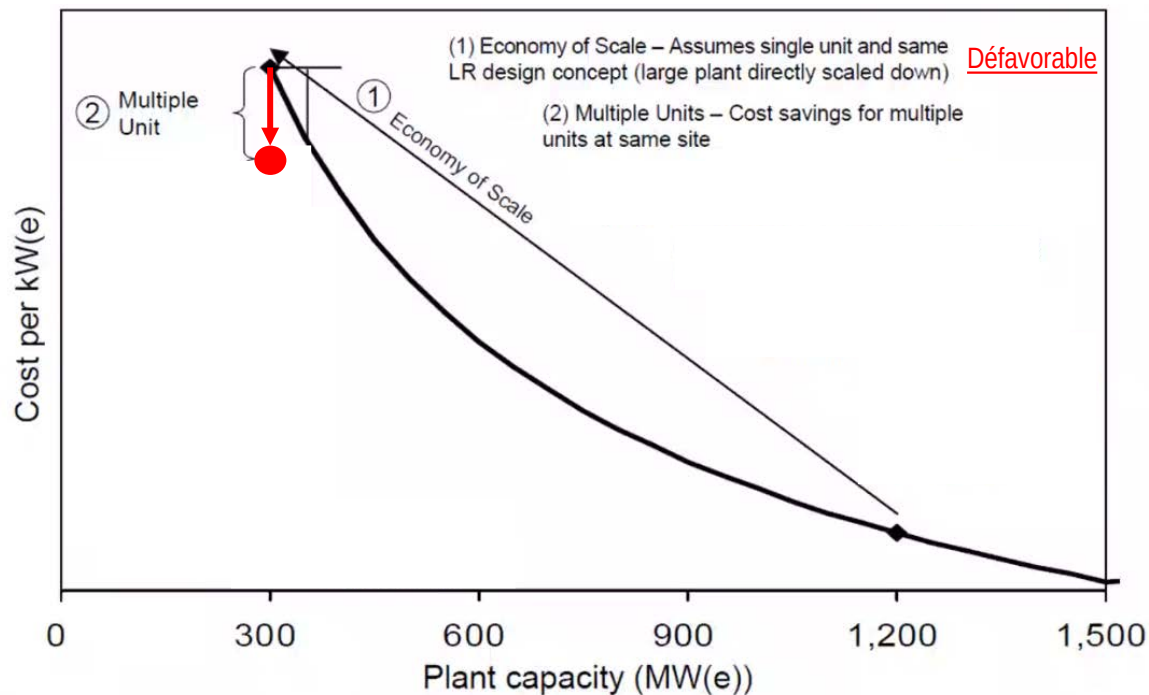
- la question des **ressources et de la souveraineté** >> RNR dont AMR petite puissance
- la question des **nouveaux usages** pour la décarbonation >> chaleur, MMR, flexibilité

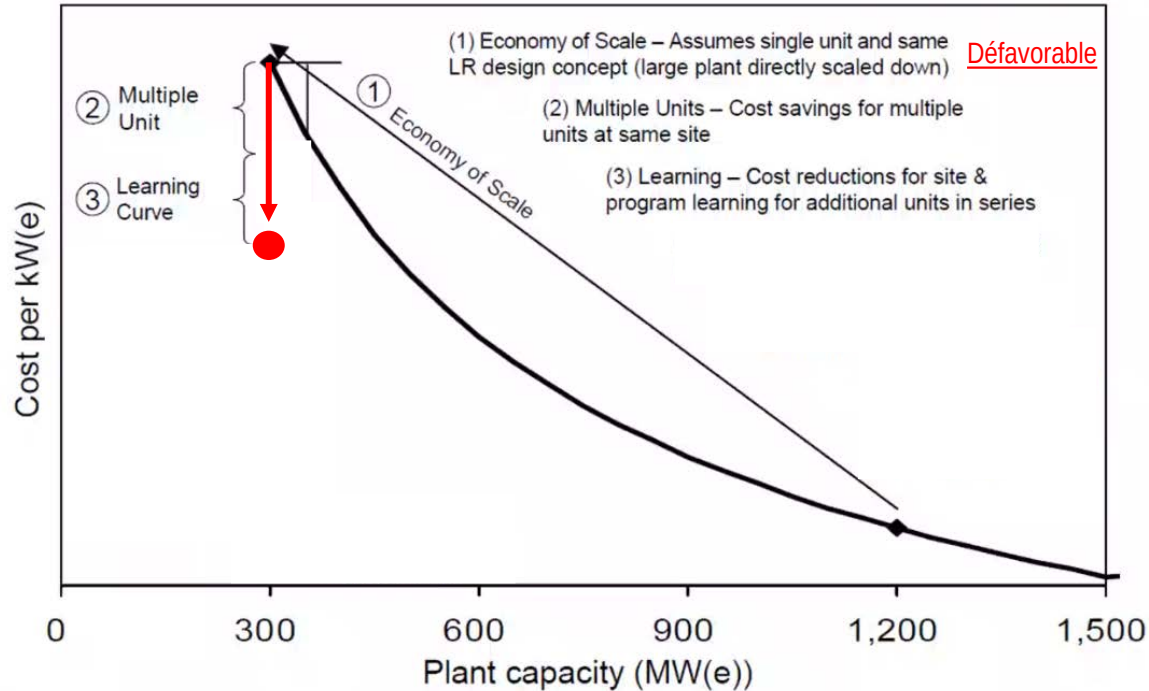
Une demande du marché : remplacement centrales thermiques ~300MWe, décarbonation industrielle, petits réseaux
La nécessité d'un modèle économique pour contrer l'effet de taille

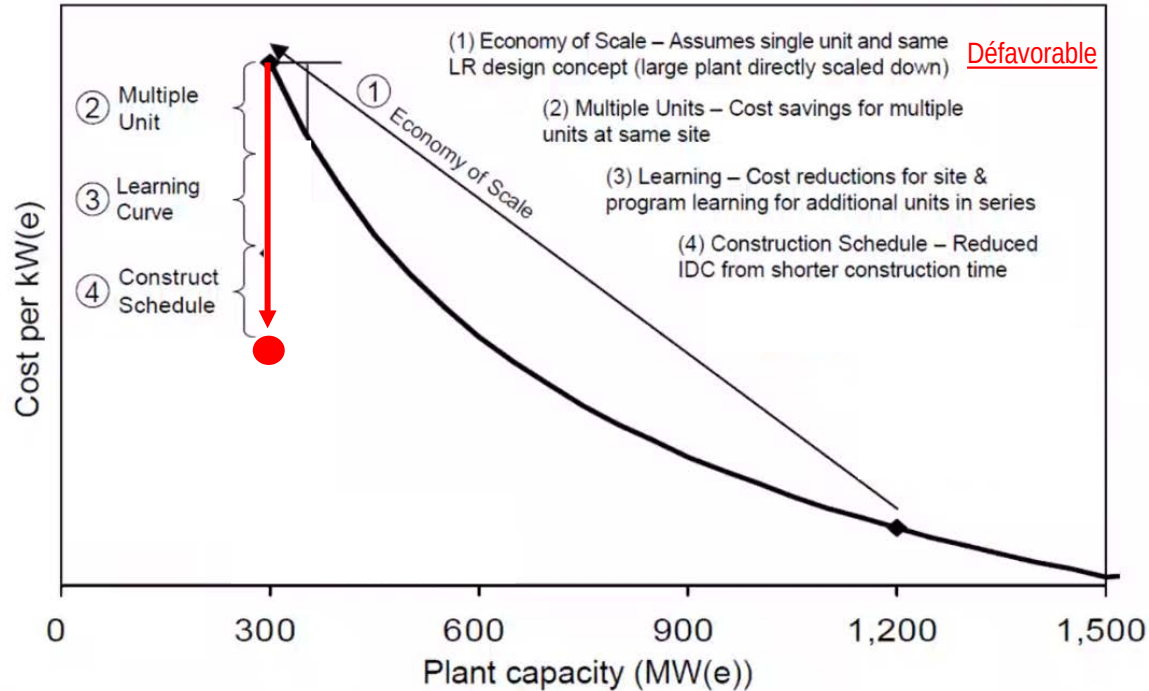


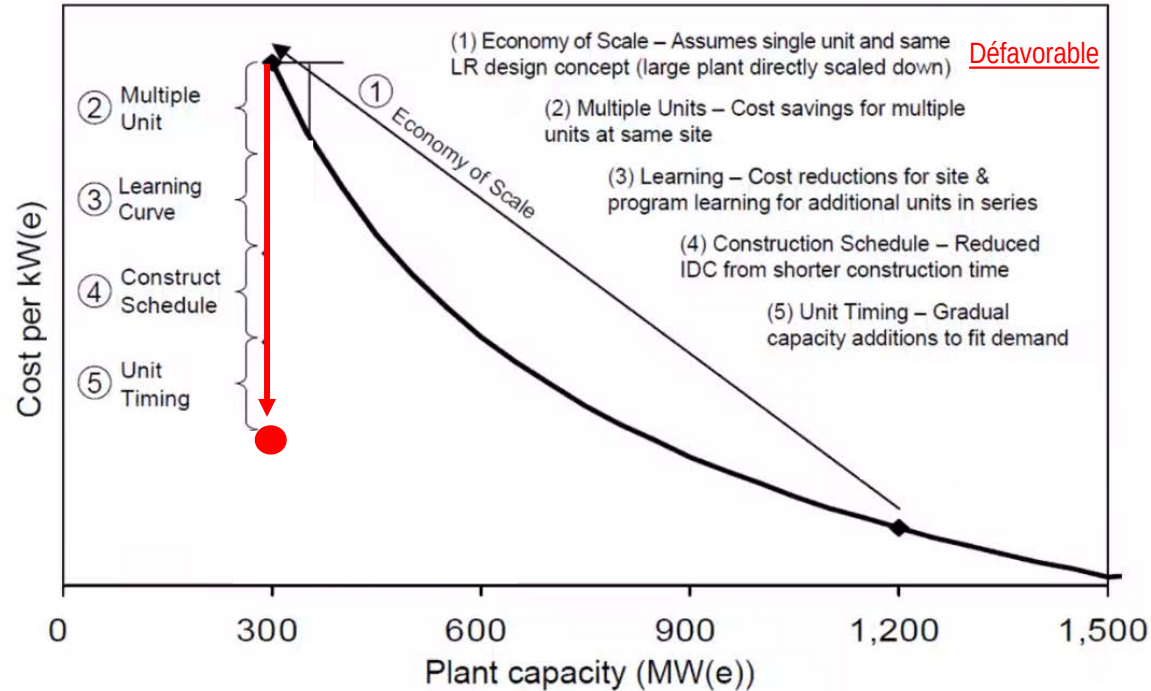
Une demande du marché : remplacement centrales thermiques ~300MWe, décarbonation industrielle, petits réseaux
La nécessité d'un modèle économique pour contrer l'effet de taille

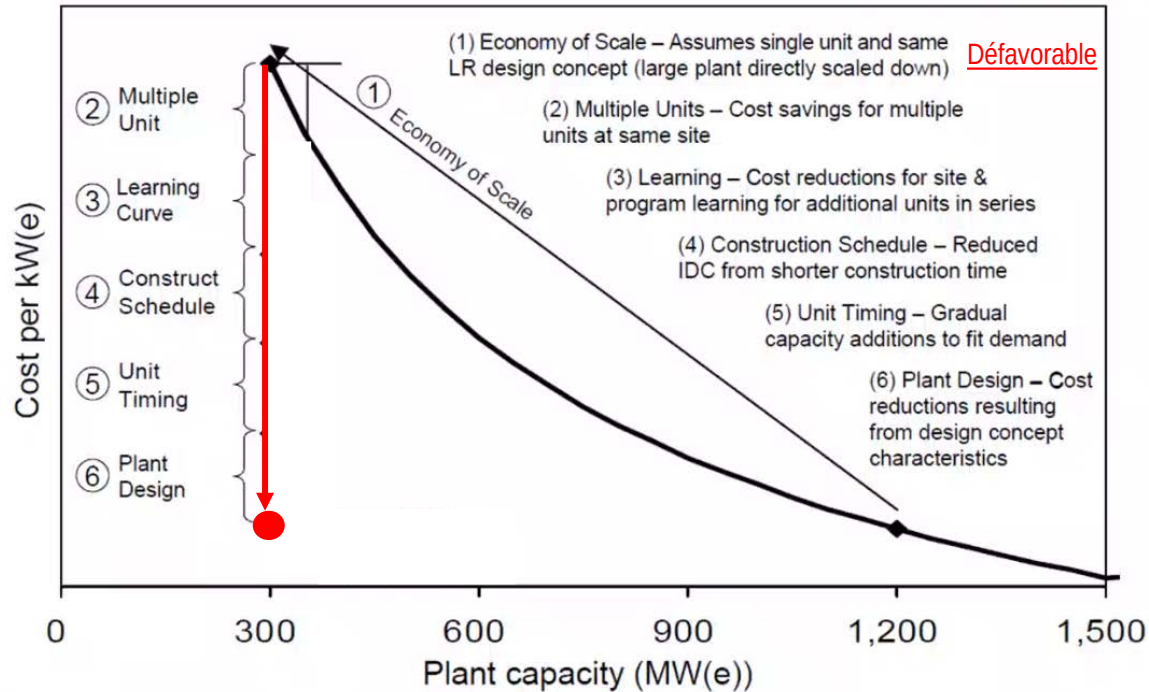


Un modèle économique pour **contrer l'effet de taille**

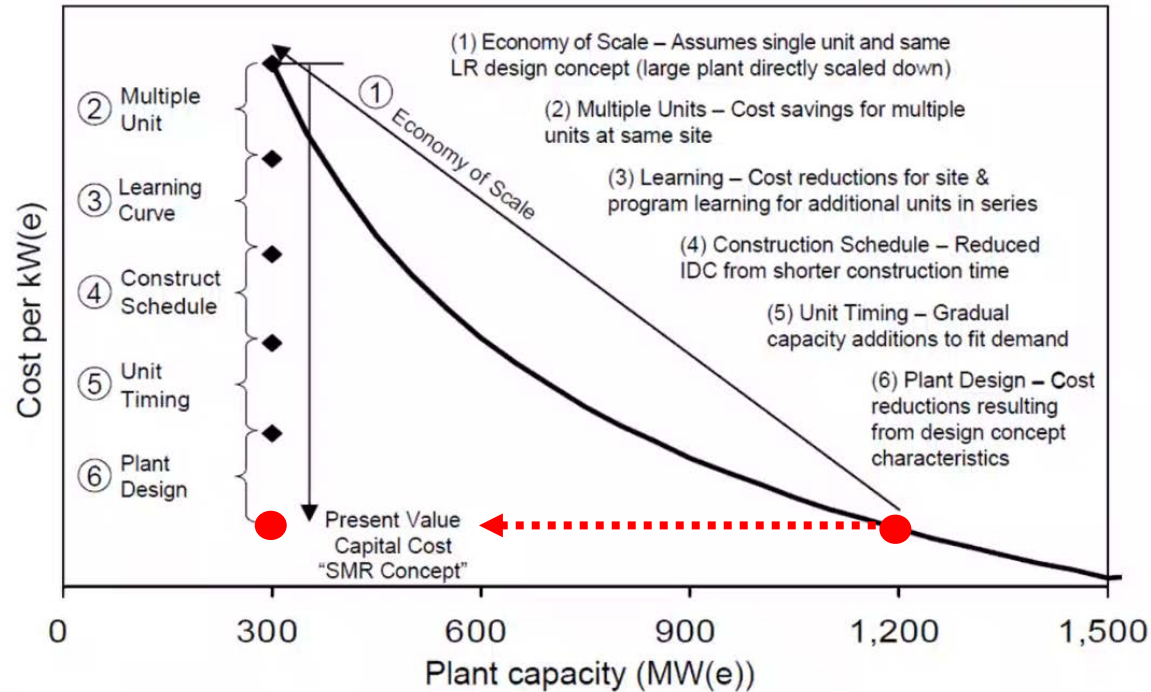
Un modèle économique pour **contrer l'effet de taille**

Un modèle économique pour **contrer l'effet de taille**

Un modèle économique pour **contrer l'effet de taille**

Un modèle économique pour **contrer l'effet de taille**

Un modèle économique pour contrer l'effet de taille

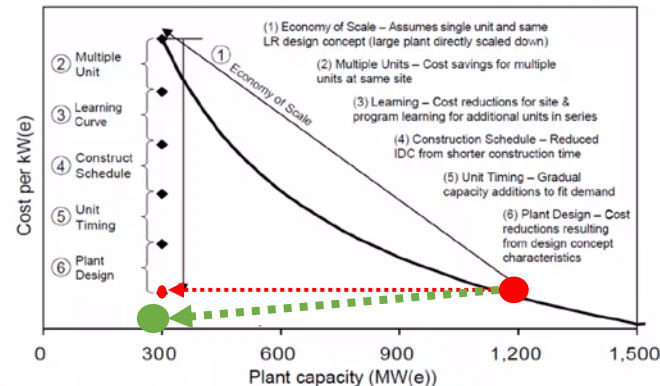


Un modèle économique pour contrer l'effet de taille basé sur :

- ☐ La construction de nombreuses unités (effet de nombre + mutualisation)
- ☐ L'effet d'apprentissage
- ☐ Les calendriers de construction réduits
- ☐ La progressivité de la construction
- ☐ Les spécificités de design

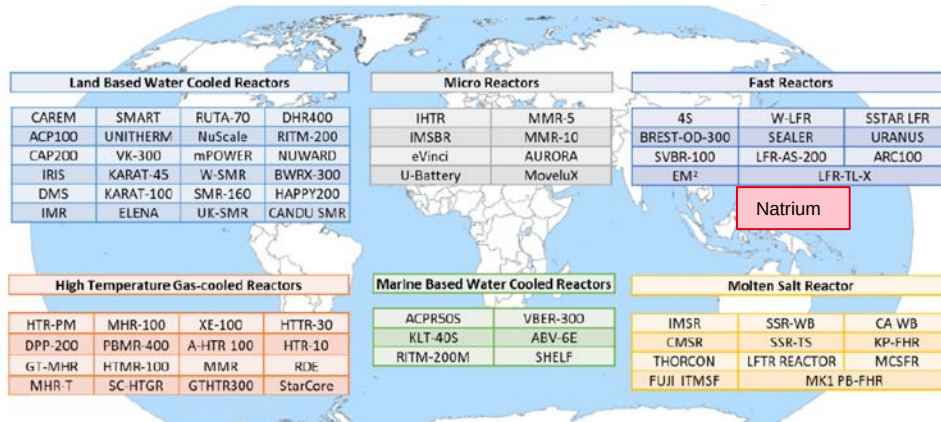
Et...

- ☐ Fabrication en usine (réduction des temps et coûts de construction)
- ☐ Ouverture de nouveaux marchés (applications non électriques ?)
- ☐ Nouveaux éléments de contexte (REX supplémentaire, progrès de R&D, perspectives de déploiement...)

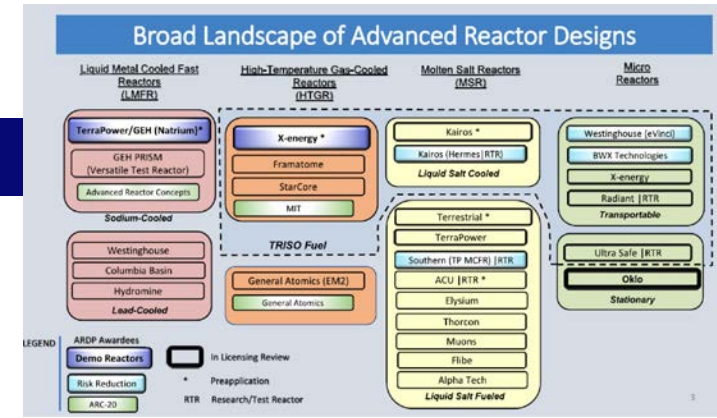


SMRs/AMRs - depuis les années 2010, une offre nouvelle qui a relancé l'attrait du nucléaire

Panorama



Startups



Startups

En France

NAAREA (MMR MSR)
 Jimmy (MMR calogène HTR)
 Transmutex (ADS)
 HEXANA (SFR)

...

En Europe

Seaborg (MSR)
 Copenhagen Atomics (MSR)
 MOLTEX (MSR)
 CorePower (MSR)
 DualFluid (MSR)
 UbiSunt Energy (MSR)
 NewCleo (LFR, suite de Hydromine)
 LeadCold (LFR)
 USNC (HTR)

• Un foisonnement de projets dans le monde

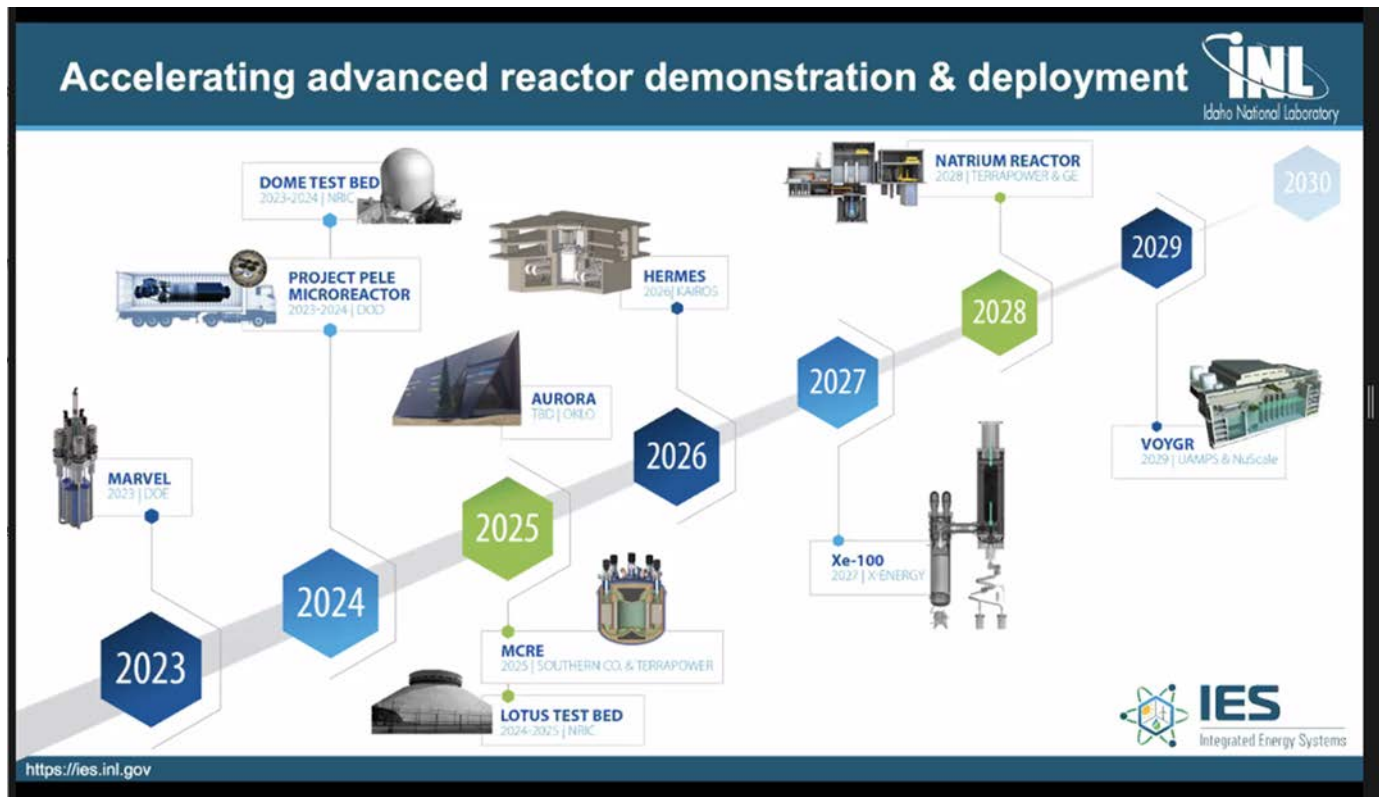
- ❑ Des créations de startups dont le rythme ralentit sur les AMR/SMR mais se maintient sur les MMR
- ❑ Tous les projets ne se concrétiseront pas **et la phase la plus simple s'achève** pour ceux qui continuent
- ❑ Les questions de **licensing** et de **cycle** (fourniture de combustible, déchets) **semblent sous-estimées** dans les projets en cours
- ❑ Une orientation marquée et en croissance sur les **usages finaux non électrogènes** (chaleur, H₂, e-fuels, NH₃)
- ❑ Contexte VTR et incertitude sur l'avenir des collaborations avec la Russie=> l'irradiation expérimentale en neutrons rapides va être difficile d'accès et donc **peu de capacités pour de la qualification de nouveaux matériaux et combustibles**



Un foisonnement certain ! Intelligence économique pour trier les projets :
Qui a du financement ? Qui demande un licensing aux AS ? Qui se soucie du combustible ?



Le CEA mène une veille active sur l'ensemble des projets et solutions techniques.
En complément des REP de puissance, quels sont les réacteurs nécessaires à la décarbonation profonde (Net Zero 2050) et à la souveraineté énergétique ?



Nuclear

NRC Moves to Issue Final Design Certification for NuScale Nuclear Module

The Nuclear Regulatory Commission (NRC) has indicated it will certify NuScale's 50-MWe (150 MWth) small modular reactor (SMR) design, marking another definitive milestone for the reactor vendor and its technology prospects.

The NRC on July 29 said it directed staff to issue a final rule that certifies the standard SMR design, for which NuScale submitted an application in December 2016. The certification, which means the design meets the agency's applicable safety requirements, will be effective 30 days after the NRC publishes that rule in the *Federal Register*.

When published, NuScale's SMR will become only the seventh reactor design certification that the regulatory body has issued for use in the U.S. Other reactor designs certified by the NRC include the

DOE marks milestone as Xe-100 basic design completed

23 August 2022



The US Department of Energy (DOE) awarded USD40 million in funds for the six-year project to complete the basic design of the high-temperature gas-cooled reactor, which it says is instrumental in paving a path towards X-energy's multi-billion-dollar demonstration project and the USA's first commercial facility to produce high-assay low-enriched uranium (HALEU)-based fuel for next-generation reactors.



Eric Béveillard

Activité de Veille et L... - il y a 2 jours



Pilot TRISO fuel manufacturing plant opens in Tennessee

22 August 2022

Ultratech Nuclear Corporation (USNC) has declared open the Pilot Fuel Manufacturing (PFM) facility which will produce the first fuel for testing and qualification for use in the company's advanced Micro Modular Reactor (MMR). The plant will be the USA's first producer of private-sector TRISO and USNC's patented fully Ceramic Microencapsulated - or FCER - fuel.



Accueil > L'essentiel de l'actualité > Brèves AFP >

Pour Washington, l'Europe a « une opportunité énorme » de se défaire de sa dépendance énergétique russe



ENERGY

Fate of Sodium nuclear plant may depend on turning bombs into fuel

TerraPower's nuclear power facility in Kemmerer will need its first fuel delivery in 2025, years before a domestic fuel supply will be available.



Stéphane Cathalau

Activité de Veille et L... - il y a 17 jours



La Maison Blanche demande au Congrès d'approuver le doublement de crédit (à 1,5 Md\$ supplémentaires) sur la production de combustible à U enrichi > 5% (et < 20) - "HALEU"

Après avoir prévu 700 M\$ dans le cadre de l'IRA (Inflation Reduction Act de fin août), nouvelle demande de la Maison Blanche auprès du Congrès de 1,5 milliards de \$.

Article de Nuclear Newswire du 8 septembre ci-dessous.

<https://www.ans.org/news/article-4297/white-house-would-send-the-doe-15-billion-to-set-up-reliable-leu-haleu-supply/>

TVA Unveils Major New Nuclear Program, First SMR at Clinch River Site

The Tennessee Valley Authority (TVA) will invest in a major program that will explore the construction of multiple advanced nuclear reactors—starting with a GE-Hitachi BWRX-300 small modular reactor (SMR) at its Clinch River site in Tennessee.

SMALL MODULAR REACTORS

Canada / SaskPower Chooses Two SMR Sites With Final Decision Due In 2024

By David Dalton
22 September 2022

If approved, a first reactor could be operational by 2035

OPG, TVA partner to advance SMRs

20 April 2022



Ontario Power Generation (OPG) and the Tennessee Valley Authority (TVA) have announced plans to work together to develop advanced nuclear technology including small modular reactors (SMRs) in both Canada and the USA, creating a North American energy hub.



ategy calls for country to become 'world-leader' in advanced nuclear technology



OPG is planning the first grid-scale GEH BWRX-300 SMR plant at Darlington in Ontario by 2028. Courtesy GEH.

Canadian review of eVinci design begins

28 September 2022



Westinghouse Electric Company has signed a service agreement with the Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), initiating a pre-licensing vendor design review (VDR) of its eVinci microreactor design.



CHINE : Le rythme effréné du développement nucléaire chinois ne ralentit pas, mais la locomotive reste les REP de Puissance, même si les GENIV ne sont pas négligés. Et pourtant cela ne suffit pas !

2 HTR démarrés fin 2021 : 200MWe



Essais menés à Shidaowan [photo:CNNC]



Site du démonstrateur HTR [photo:CNNC]

Progress on conventional island of Chinese SMR

19 August 2022



The final tank of concrete has been poured into the underground retaining walls of the conventional island at the ACP100 small modular reactor (SMR) demonstration project at the Changjiang nuclear power plant on China's island province of Hainan.



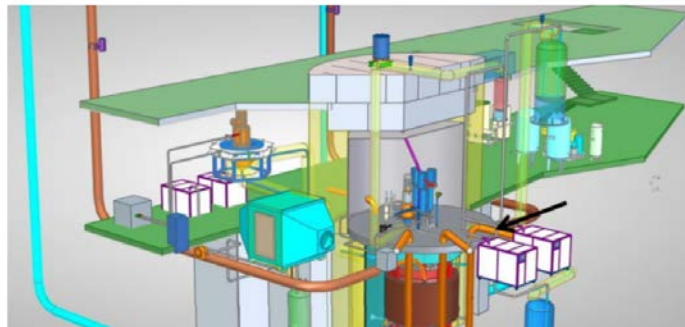
Concrete is poured into the conventional island's inner retaining wall (Image: CNNC)

Chinese molten-salt reactor cleared for start up

09 August 2022



The Shanghai Institute of Applied Physics (SIAP) - part of the Chinese Academy of Sciences (CAS) - has been given approval by the Ministry of Ecology and Environment to commission an experimental thorium-powered molten-salt reactor, construction of which started in Wuwei city, Gansu province, in September 2018.



China / Politics

China aims to expand nuclear power programme amid threat of global energy crisis following Ukraine invasion

- The country's energy plan for 2025 aims to build more plants as part of its pledge to reach peak carbon by 2030 and ensure energy security
- Proposals call for the development of next-generation technology, including nuclear fusion



Echo Xie

FOLLOW

Published: 6:00pm, 24 Mar, 2022

Why you can trust SCMP



Stéphane Cathalau

Activité de Veille et L... - il y a 17 jours



Rolls Royce propose à SKODA JS de collaborer pour essayer de déployer son SMR en République Tchèque voire de fabriquer sur place,

Rolls-Royce SMR travaillera avec Skoda JS pour identifier les opportunités de collaboration qui pourraient conduire au déploiement de ses petits réacteurs modulaires en République tchèque et dans d'autres régions d'Europe centrale. "En tant que produit fabriqué en usine - avec 90 % de l'ensemble de la centrale électrique Rolls-Royce SMR construite dans des conditions d'usine - avoir les bons partenaires dans des endroits clés du monde entier est un aspect important de notre modèle de livraison international", a déclaré Rolls. -Royce SMR Directeur du développement commercial et de la stratégie, Alan Woods.

Article de Nuclear Newswire ci-dessous.

<https://www.ans.org/news/article-4295/rollsroyce-mulls-smrs-for-czech-republic/>

Rolls-Royce narrows search for site of first SMR factory

04 July 2022



Rolls-Royce SMR has shortlisted six potential locations in the UK for the first of three factories for the manufacture of its small modular reactor (SMR) power plants. The first plant will produce the vessels for the 470 MWe pressurised water reactor.



A rendering of a plant based on the Rolls-Royce SMR (Image: Rolls-Royce SMR)



Isabelle Morlaes (guest)

Activité de Veille et L... - il y a un mois



Rolls Royce collabore avec la startup ULC pour déployer ses SMR aux Pays Bas



Rolls-Royce SMR & ULC-Energy collaborate to bring...

Rolls-Royce SMR has signed an exclusive agreement with the Dutch development company ULC-Energy to work together to deploy Rolls-Royce Small Modular R...

<https://www.rolls-royce-smr.com/press/rolls-royce-smr-...>



| PAGE 30

- La Russie : des projets aboutis (barges type Akademik Lomonossov) et en devenir sur des marchés nationaux, mais la guerre en Ukraine change la donne, et durablement.
- L'Europe : pas de démarche unifiée à ce jour mais des initiatives nationales : Suède (Sealer), Finlande, République Tchèque, Pays-Bas, Pologne, Estonie, Roumanie, Ukraine... **et surtout des contacts avec les vendors US => L'Europe, le terrain de jeu du marché de la concurrence => Pologne avec Westinghouse, Roumanie, Ukraine (Projet Nuscale)...**
- En France : Projet NUWARD + études CEA + Eclosion de start-up françaises pour France 2030**
- Asie, hors Chine => Le Japon est plus dans une approche de coopération internationale via ses industries HITACHI, MHI, TOSHIBA. Caractère insulaire = peu de place = privilégier les fortes puissances.
- Le nouveau président Sud-Coréen élu le 10/03/2022 (M. YOON Suk-yeol) est pro-nucléaire => Nouvel acteur à considérer dans le nucléaire intl

Poland expands cooperation on SMRs and large reactors

23 June 2022



Polish state-owned energy company Enea SA has signed an agreement with US small modular reactor (SMR) developer Last Energy to cooperate on the deployment of SMRs, potentially in Poland. Meanwhile, France's EDF has signed further cooperation agreements with Polish companies to support its offer to supply 4 to 6 EPRs in Poland.



Home > News

Seoul officially includes nuclear energy in green taxonomy

2022.06.20 14:26:18 | 2022.06.20 17:00:00



(Photo by Yonhap)

The government under President Yoon Suk-yeol is set to undo reactor phase-out policy of the past administration is officially classifying nuclear energy as green and sustainable taxonomy.

MOST READ	
1	How to proceed inflation battle
2	Korean firms' return to normal
3	Market Rally as South Korea's GDP growth
4	K. Economy delays global venture deal
5	Edi Vukobratovic's arrival in Seoul
6	Seoul's digging in near capital
7	Summitting Shikoku and Tokyo's profile
8	Korean car prices continue to rise
9	Korean economy hit by 2000
10	Five days to open new era with

- Tant qu'il n'y avait pas de financement le combustible était le sujet sur lequel les start-up communiquaient le moins
- Ensuite arrive la phase de prise de conscience : Qui fabrique ? Qui détient de la matière ? Quelle est la supply chain ? Quel est le TRL du combustible ?
- Pour ces thématiques l'heure est à la recherche d'alliance pour des chaînes d'approvisionnement commune : TRISO (X-Energy, USNC, Kairos), Combustible spécifique aux SMR (HALEU)
- On a réalisé aux USA que le combustible sera un vrai chemin critique de ces AMRs (mais sûrement pas le seul) => notion de goulot d'étranglement
- DOE commence les investissements mais pas (encore) à la hauteur des besoins



Stéphane Cathalau
Activité de Veille et L... - il y a un mois

La guerre Russo-Ukrainienne a des conséquences importantes aux US pour l'approvisionnement en combustible (X-energy entre autres...)
Diversifier la chaîne d'approvisionnement de HALEU plus facile à dire qu'à faire
Malgré tous ses efforts, X-energy n'a pas d'alternative à la Russie en tant que fournisseur d'approvisionnement en uranium faiblement enrichi (HALEU), mais la société peut continuer à concevoir son projet d'usine de réacteurs avancés et à construire son installation de fabrication de combustible pour l'instant malgré l'obstacle. Bien que le problème n'ait pas directement affecté le déploiement, "cela a été le risque n°1 sur lequel nos clients nous ont posé des questions, donc en termes, vous savez, de construction du carnet de commandes et d'être une entreprise prospère, cela nous a gênés sur le côté commercial", déclare Benjamin Reinke, directeur principal de la stratégie d'entreprise de X-energy.
 Article du Washington Examiner ci-dessous

Inflation Reduction Act makes 'down payment' on HALEU

23 August 2022



Centrus and GLE have welcomed the USD700 million support package to develop high-assay low-enriched uranium (HALEU) included in the US Inflation Reduction Act to develop the infrastructure needed to fuel next generation of nuclear reactors.



DOE Awards \$36 Million to Reduce Waste from Advanced Nuclear Reactors

MARCH 16, 2022

FUEL

White House would send the DOE \$1.5 billion to set up reliable LEU/HALEU supply

Thu, Sep 8, 2022, 10:06PM Nuclear News



Name	Vendor	Country	Electrical capacity	MOUs and other partnerships	
BWRX-300	GEH	 	~300 Mwe	FOAK	MOUs
NuScale	NuScale Power Inc		4x77 Mwe to 12x77 Mwe	MOUs	Industrial Partnerships
SMR 160	Holtec		160 Mwe	MOUs	Industrial Partnerships
Sodium Power	Terrapower and (GEH)		345 Mwe	Industrial Partnerships	
XE-100	X-Energy		4x80 Mwe	Industrial Partnerships	

Name	Vendor	Country	Electrical capacity	MOUs
RITM 200N	Afrikantov OKBM		2x55 MWe	  

Name	Vendor	Country	Electrical capacity	MOUs
HTR-PM	Tsighua University		210 Mwe	   
ACP 100	CNNC		125 Mwe	N/A

Name	Vendor	Country	Electrical capacity	MOUs	
RR SMR	Rolls Royce		470 Mwe	MOUs	Industrial partnerships
NUWARD	EDF		2x170 MWe	MOUs	International NUWARD Advisory Board (INAB)

Name	Vendor	Country	Electrical capacity	MOUs
I-SMR	KHNP KAERI		~100 Mwe?	N/A
SMART	KHNP KAERI		~100 Mwe	   

-  Probable SMR interest expressed through MOU(s) or government driven processes with technology vendors
-  Potential SMR interest

- Des alliances stratégiques se nouent
- Des partenariats industriels et financiers se consolident sur l'axe US, Can, UK, JPN, Kor
- Europe représente un marché stratégique pour la plupart des développeurs
- De nouvelles opportunités de marchés émergent

► Des aleas dus aux « paris scientifiques »

-  **TRANSATOMIC** fondée par des diplômés du MIT est dissoute au bout de 7 ans car les calculs de principe sont faux
- Elle avait pourtant gagné en 2013 le premier prix du “U.S. Department of Energy awarded ARPA-E Future Energy innovation contest”
 - *“Ms. Dewan mentioned briefly that she anticipated that Transatomic Power would require four years from November 2015 to reach its first working prototype 520MW molten salt reactor (i.e. circa 2020), for a total of ten years from founding to first working prototype. Commercial deployment might not happen until eight years from November 2015 (i.e. circa 2024)”.*

► et au changement des réglementations

- *Terrapower and the China National Nuclear Corporation plan to build a 600MW working prototype reactor in China between 2018 and 2022, with commercial deployment of 1150MW commercial-scale reactors in Asia in the late 2020s.*
- fin 2018, les nouvelles réglementations américaines sur les transferts de technologie à destination de la Chine ont forcé TerraPower à renoncer à ce partenariat et à rechercher un autre partenaire
- La fin de la possibilité russe pour se fournir en HALEU
- Le 6 janvier 2022, OKLO n’obtient pas sa licence de la NRC pour le réacteur Aurora
- *“The denial is based on Oklo’s failure to provide information on several key topics for the microreactor Aurora design,” the NRC said in a statement. “*



3.

Le cas de la France

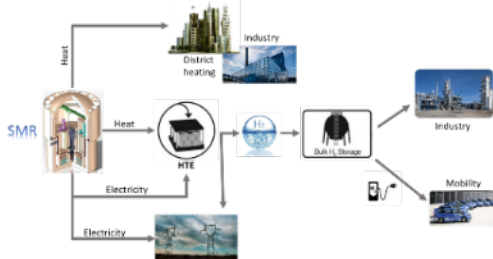
Small Modular Reactors



EDF, CEA,
TA, Fra,
Naval Group
+



+ innovations dans les **usages**

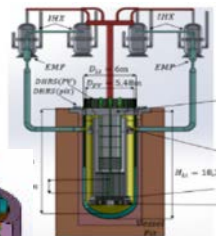
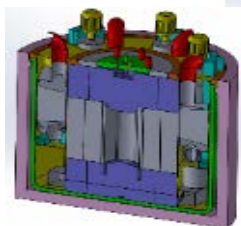


Nouveaux marchés à court et moyen terme

Advanced Modular Reactors

Concepts à neutrons rapides

ATRIUM (RNR-Na)
ANAIS (RNR-Na)



ARAMIS (MSR)



R&D RNR-Na

Matériaux, combustible, accident grave,
technologies, simulation

Energie durable et nouveaux usages

Plan de relance
« gestion des déchets »

ISAC
Innovative System for Actinides
Conversion
Transmutation en MSR
(CEA, EDF, Fra, Orano, CNRS)



Intelligence économique

Micro-réacteurs
Spatial

Concepts en rupture

Soutien aux startups



Jimmy



France 2030 : 500 M€ pour l'innovation dans les réacteurs pour financer des startups.

accompagnera les startups qui en feront la demande
essaimera des concepts de réacteur et cas d'usage



Un projet industriel

nuward



REP Gen 3+, 2 x 170 MWe,
destiné à remplacer les centrales à
combustibles fossiles à l'**export**



Intégrant **dès la conception** les
meilleurs **standards**
internationaux



Compétitivité assurée par une
conception simple, modulaire et
standardisée et issue d'une
combinaison optimisée de
technologies éprouvées et
d'innovations spécifiques



Adapté aux **besoins du réseau** et
à des **usages complémentaires** :
cogénération, production
d'hydrogène, désalinisation,
capture et valorisation du CO₂.

Pré-APS 2017-2019



APS 2019-2022



APD 2022-2025



Etudes détaillées,
licensing, qualif
composants
2025-2030

Nuclear Forward

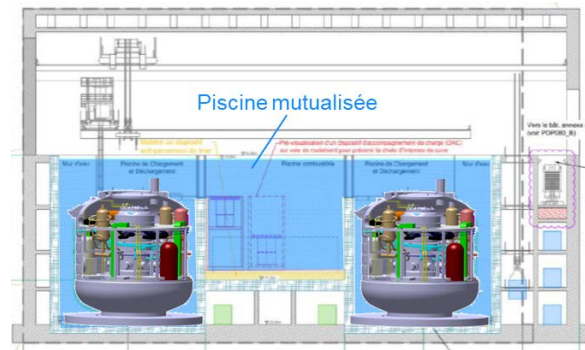
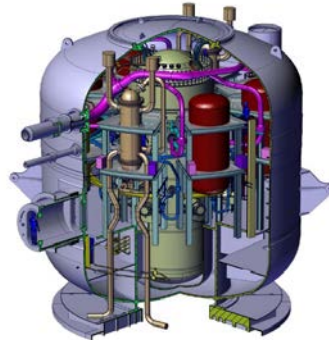


EPR



Un réacteur
intégré...

...dans une enceinte métallique
immergée dans un bassin d'eau



... installé dans un îlot nucléaire
comprenant 2 réacteurs de 170MWe
et une piscine d'entreposage

Une centrale de 340 MWe comprenant 2 réacteurs intégrés

nuward

Sûreté



- Evacuation de puissance résiduelle
- Comportement naturel
- Accident grave

Fermeture du cycle

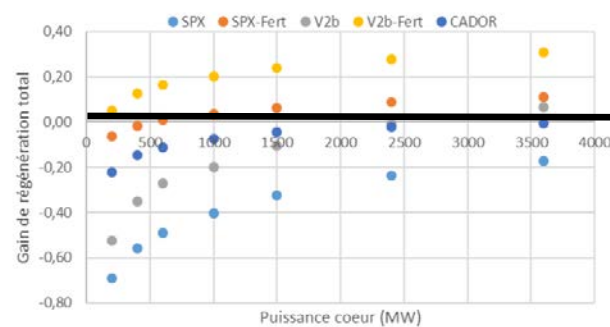


- Gain de régénération interne diminue !
- Teneur Pu augmente
- Vers des AMR « pas trop petits »

Economie



- Des simplifications certaines
- Suffisantes pour battre l'effet d'échelle ?
- Quid de la modularité ?

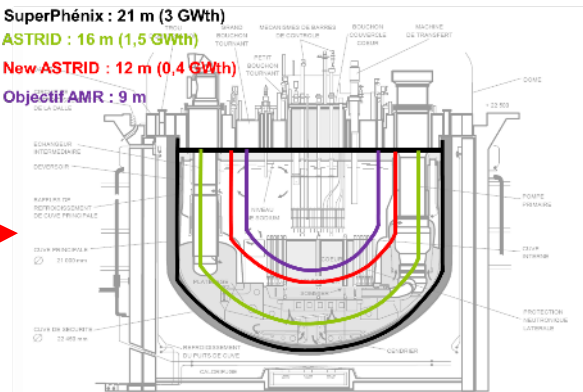


SuperPhénix : 21 m (3 GWth)

ASTRID : 16 m (1,5 GWth)

New ASTRID : 12 m (0,4 GWth)

Objectif AMR : 9 m



Avantages potentiels



Gestion des matières

- Utilisation du Pu
- Transmutation

Sûreté intrinsèque

- Pas d'accident énergétique
- Contre-réactions fortement négatives
- Pas de pression
- Solidification du sel en cas de fuite

Flexibilité

- Suivi de réseau facilité

Verrous technologiques



Chimie du sel

- Problèmes de solubilité, de précipitation

Matériaux

- Corrosion
- Haute température
- Irradiation (la cuve est la première barrière)

Sûreté en fonctionnement

- Procédures d'exploitation/maintenance
- Gestion des fuites, des PF, de la radioprotection

Technologies

Intérêt commun avec ORANO : programme de R&D et d'esquisses pour juger de la faisabilité du concept, hiérarchiser et lever les verrous

Le choix du sel dépend des objectifs visés !

Sels fluorures souvent choisis

REX du MSRE
FHR (combustible solide TRISO refroidi par un sel)
Spectre thermique + cycle TH/U

Contexte français de fermeture du cycle

Investigations autour de la capacité du MSR à fonctionner avec différents Pu et actinides mineurs

Sels chlorures privilégiés

Base NaCl-PuCl₃

+ MgCl₂ (chimie) + AmCl₃ (transmutation) + UCl₃ (isogénérateur)



Spectre neutronique rapide

Pour optimiser la conversion des actinides et minimiser la production d'actinides mineurs
Élimine les éléments de faible nombre de masse, modérateur de neutrons (Li, Be, F)

Procédés de traitement

Chlorures solubles dans l'eau >> compatibilité avec le retraitement hydrométallurgique à La Hague

Solubilité suffisante des actinides

Faible solubilité du Pu en fluorures

Comportement sous flux des éléments du sel

Nécessité d'enrichir en ³⁷Cl pour limiter la formation de ³⁶Cl* et élimine le K (³⁶Cl*, ⁴⁰K*) et le Ca (⁴¹Ca*)

Basse température de fusion

Mais : aucune réalisation de MSR ni en chlorure, ni en spectre rapide, ni avec du Pu, ni avec du retraitement >> on se place bien dans une innovation de rupture >> STELLARIA

Octobre 2021



« Faire émerger en France, d'ici à 2030, des réacteurs nucléaires de petite taille innovants, avec une meilleure gestion des déchets »

Février 2022
Discours de Belfort



10 FÉVRIER 2022 - SEUL LE PRONONCÉ FAIT FOI

REPRENDRE EN MAIN NOTRE DESTIN ÉNERGÉTIQUE !

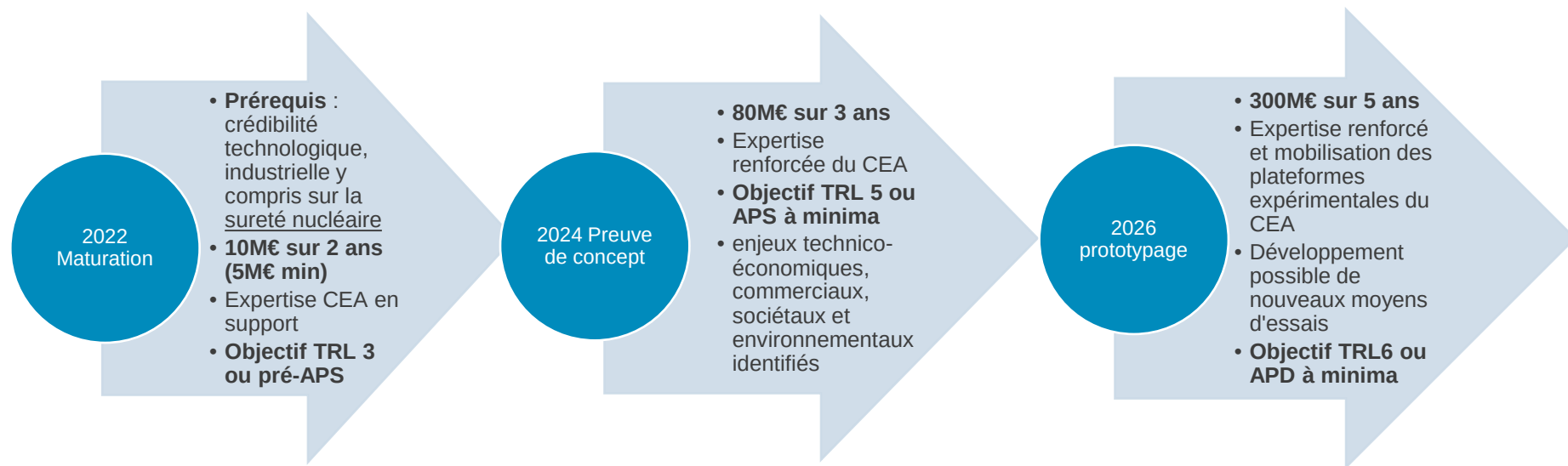
Mars 2022

Publication de l'AAP Réacteurs Innovants

Juin 2023

Clôture de l'AAP

- **Appel à projet en 3 phases** pour accompagner le développement des startups de la maturation jusqu'au prototype
- L'appel à projet est ouvert à partir du 2 mars 2022 et se clôture le 28 juin 2023 à 12h00
- « Soutien possible du CEA lors de la préparation du dossier de candidature »_entre le 02/03/2022 au 31/12/2022 (date de sollicitation) ; **le CEA ne souhaite pas être dans le système d'évaluation des projets.**
- La cible de cette première phase c'est **la maturation de projets crédibles**
- **Phase finale du déploiement et de la commercialisation non incluse** mais qui se fera en lien avec l'Etat français



Le CEA dans l'AAP France 2030 : accompagnement des SU

- Un même besoin d'accompagnement par le CEA pour répondre à l'appel à France 2030



- Des plannings et des verrous technologiques qui questionnent
- + celles créées en 2023 : HEXANA, Stellaria, Thorizon, USNC, Renaissance Fusion...

Le CEA dans l'AAP France 2030 : force de propositions

- 11 projets innovants présentés en interne CEA en mars 2022
- HEXANA : AMR sodium flexibilité/chaueur
- STELLARIA : un projet MSR pour monter en TRL et aller vers un réacteur démo (POC)

Naarea	MSR MMR
Jimmy Energy	HTR MMR
Transmutex	ADS Pb-Bi
Newcleo	LFR (brevets Hydromine)
Renaissance Fusion	Fusion (Stellarator)
Neext Engineering	LFR (brevets Westinghouse)
Calogena	REP calogène
Stellaria	MSR AMR
Hexana	SFR AMR
Blue Capsule	HTR sodium
Otrera	SFR AMR
Archeos	Rep calogène
Thorizon (Pays-Bas)	MSR
USNC (Canada)	HTR MMR
Marvel Fusion (Allemagne)	Fusion

Société existante, qui a postulé ou va le faire

Société à créer, dans le but de postuler

Société étrangère qui pourrait créer une filiale pour postuler

4.

Conclusion

Les réacteurs avancés complètent l'offre française pour atteindre nos objectifs de souveraineté et de décarbonation

- 1 – Souveraineté énergétique et industrielle
- 2 – Sûreté améliorée
- 3 – Flexibilité dans les mix à forte proportion d'ENR
- 4 – Nouveaux co-produits grâce à la haute température
- 5 – Regain d'attractivité de la filière nucléaire
- 6 – Laboratoire d'idées innovantes



Au sens large : au-delà du combustible, quelle **durabilité** des technos de réacteurs ? (**ACV, matériaux critiques...**)



Un sujet qui monte : au-delà de l'électricité, quel apport du nucléaire pour la **décarbonation** profonde de nos sociétés ?

Des verrous à surmonter :

MSR : matériaux, corrosion, chimie, exploitation, licensing, retraitement...

AMR : modèle économique, matériaux, licensing

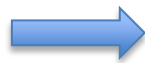
Pour chaque problème il y a une solution qui est simple, claire et fausse.



H. L. Mencken

www.citation-celebre.com

Course mondiale à l'innovation de rupture sur les réacteurs avancés



Le CEA est un acteur clé pour accompagner l'industrie et les startups, pour conseiller les pouvoirs publics (veille) mais aussi pour proposer de l'innovation et des concepts



IRESNE | Institut de recherche sur les systèmes nucléaires

