

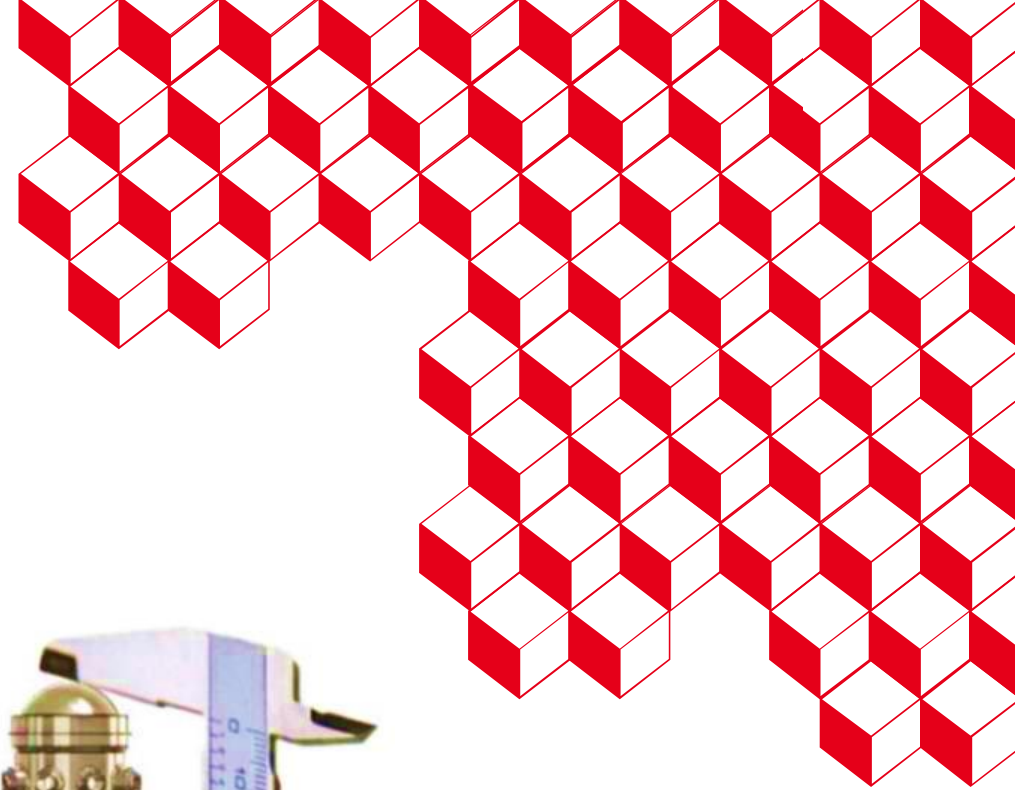


iresne

Le nucléaire (de fission) de demain

Jean-Michel Ruggieri

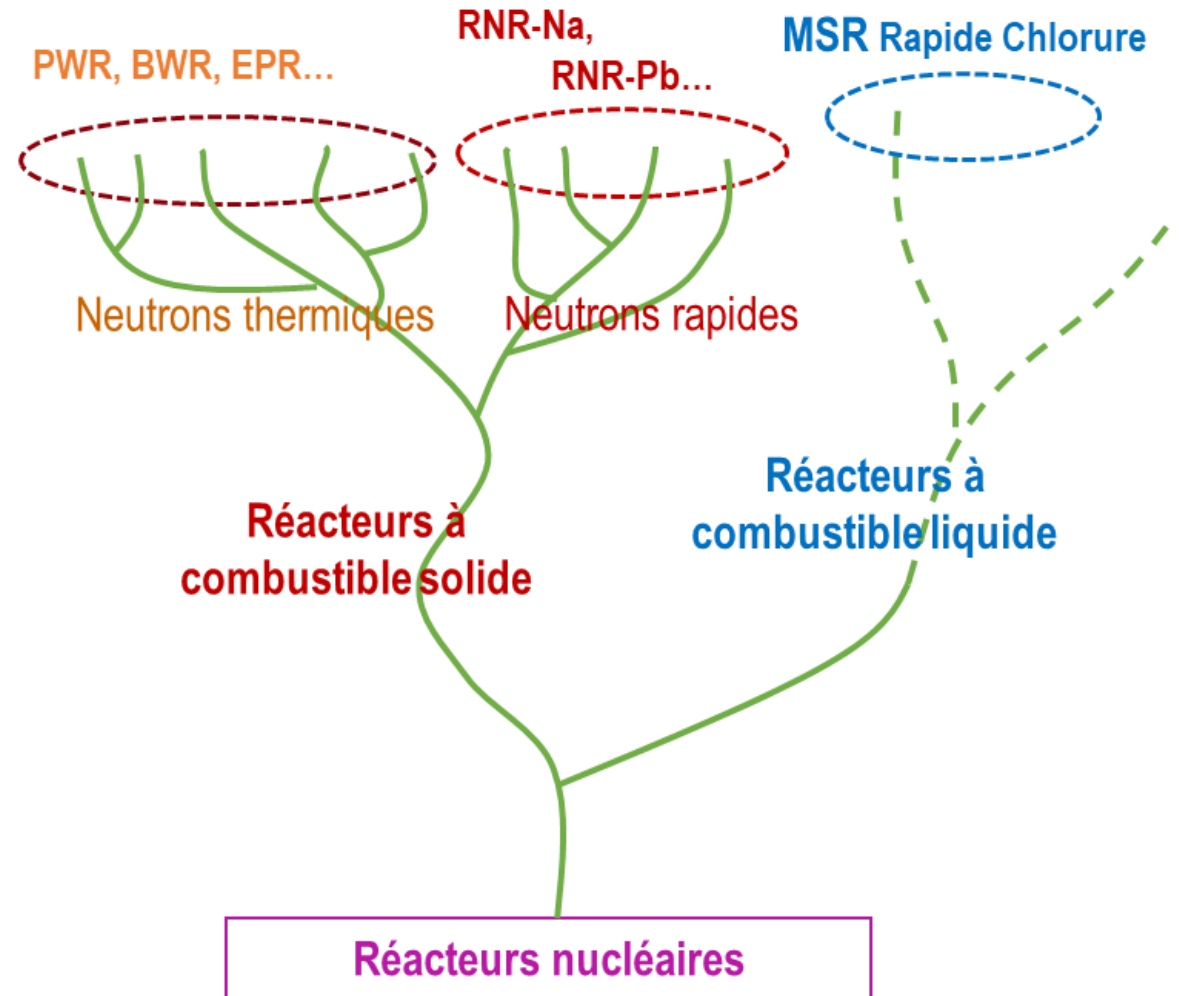
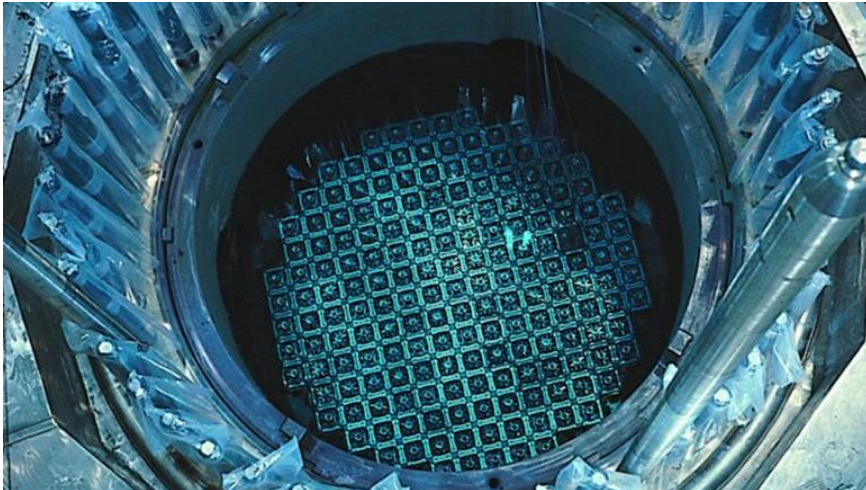
Directeur de l'IRESNE | Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone



La grande famille des réacteurs

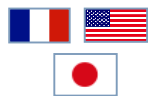
Des embranchements technologiques portés par des choix de conception :

- le combustible,
- le caloporteur,
- l'ajout d'un modérateur

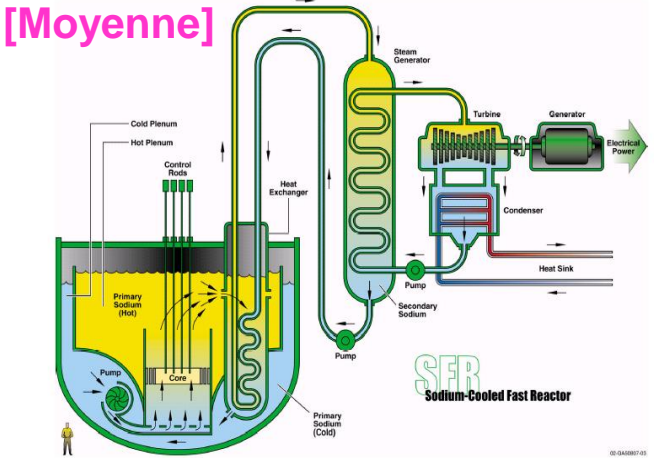
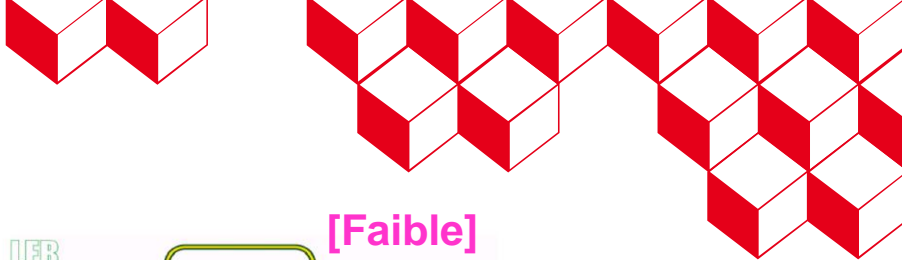


Les différentes filières nucléaires

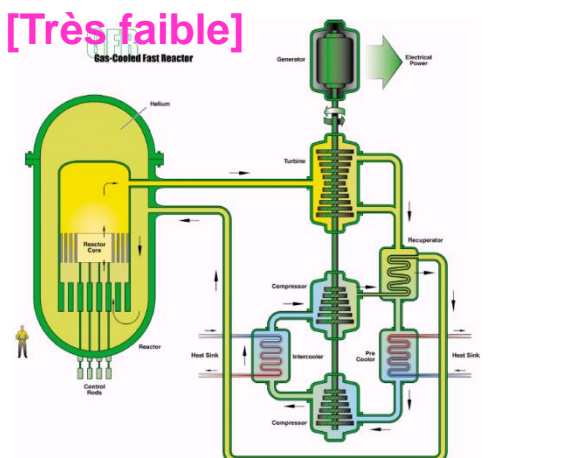
| | REP (PWR) | REB (BWR) | CANDU (PHWR) | UNGG- MAGNOX - AGR | RBMK (LWGR) | RNR |
|--------------------|-------------------|------------------------|--------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| Combustible | U enrichi 3% | U un peu moins enrichi | U nat | Unat/Uenrichi 2.6% | U enrichi (1.8%) | Uret ou Uapp ou Unat Pu |
| Caloporteur | Eau sous pression | Eau bouillante | Eau lourde | Gaz carbonique (CO2) | Eau sous pression | Sodium, Plomb, Gaz |
| Modérateur | Eau | Eau | Eau lourde | Graphite | Graphite | |



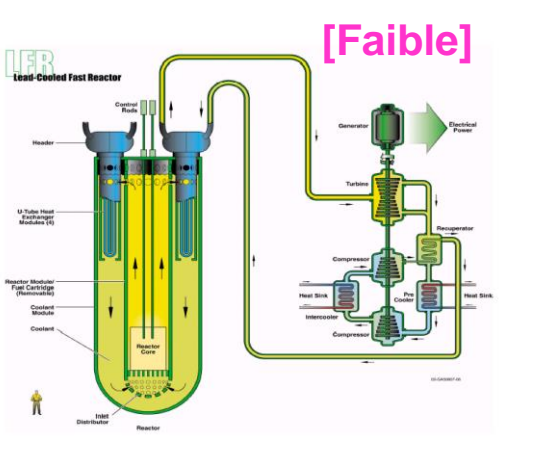
Réacteurs de génération 4 et leur maturité



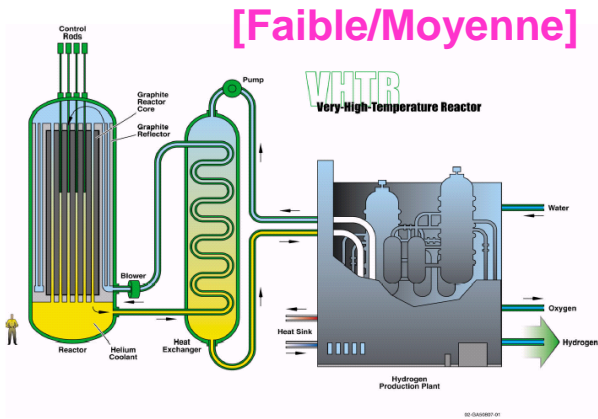
SFR
Sodium-cooled fast reactor



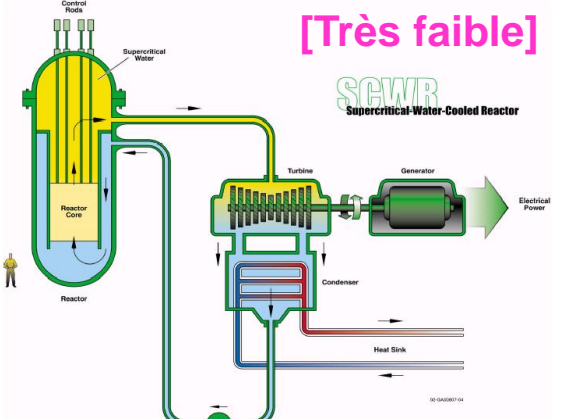
GFR
Gas-cooled fast reactor



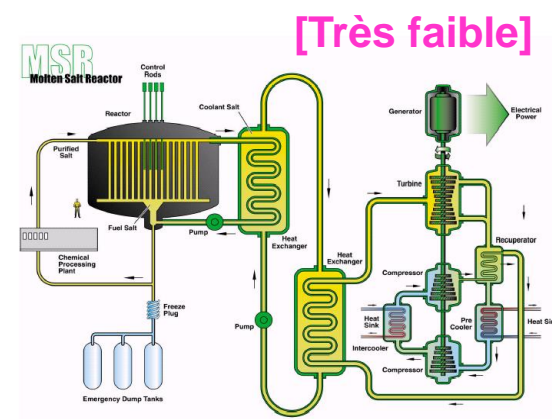
LFR
Lead-cooled fast reactor



VHTR
Very high temperature reactor



SCWR
Supercritical water-cooled reactor



MSR
Molten salt reactor

[Maturité]

Réacteurs nucléaires, le parc mondial

ELECTRICITY SUPPLIED BY TYPE OF REACTORS

Source :
IAEA Releases 2019 Data on
Nuclear Power Plants
Operating Experience



PWR = Pressurized Water Reactor
BWR = Boiling Water Reactor
PHWR = Pressurized Heavy Water Reactor
LWGR = Light Water Graphite Reactor
FBR = Fast Breeder Reactor
GCR = Gas Cooled Reactor

Réacteur à Eau Pressurisée (REP) est **la technologie dominante** pour la production électrique le + standard : **1000 MWe / unité**

Table 1. Operable nuclear power reactors at year-end 2022 (change from 2021)

| | Africa | Asia | East Europe & Russia | North America | South America | West & Central Europe | Total |
|-------|--------|----------|----------------------|---------------|---------------|-----------------------|----------|
| BWR | | 20 | | 33 | | 8 | 61 |
| FNR | | | 2 | | | | 2 |
| GCR | | | | | | 8 (-3) | 8 (-3) |
| HTGR | | 1 | | | | | 1 |
| LWGR | | | 11 | | | | 11 |
| PHWR | | 23 | | 19 | 3 | 2 | 47 |
| PWR | 2 | 104 (+5) | 40 | 61 (-1) | 2 | 98 | 307 (+4) |
| Total | 2 | 148 | 53 | 113 | 5 | 116 (-3) | 437 (+1) |

Source: World Nuclear Association, IAEA PRIS

SMR : Késako ?

SMALL

**Puissances inférieures
à 500 MWe**
Plutôt entre 50 et 200 MWe

MODULAR

**Conception et réalisation
modulaires**
Productions de séries et adaptations
sites limitées
Réalisation standardisée
en usine

REACTOR

De différentes technologies
Déploiement prochaines décennies

SMR

Quelques définitions : SMR | AMR | MMR

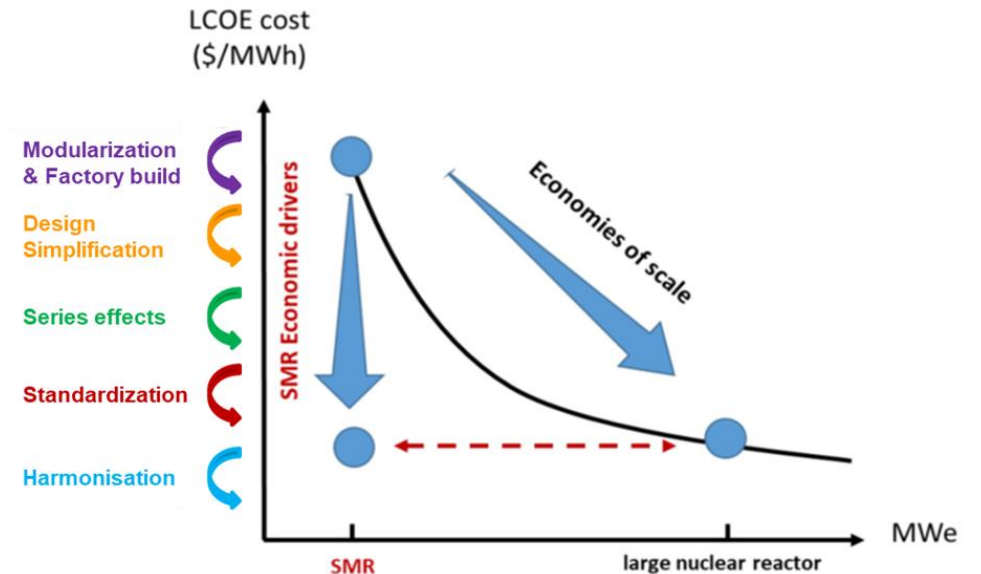
- **SMR : Une philosophie de conception permettant de contrer l'effet de taille en tirant partie de la petite puissance** entre 50 à 200 MWe
 - Simplification du design
 - Modularité et fabrication en usine (réduction des délais et coûts de construction)
 - Vise l'ouverture de marchés spécifiques => nouveaux entrants/substitut aux centrales à charbon, **applications non électrogènes (cogénération, chaleur ou H2)**
- **SMR** à base de GEN3 (REP et Bouillant principalement)
- **AMR : Advanced Modular Reactor** : réacteurs de faible/moyenne puissance (idem ci-dessus) et présentant des ruptures technologiques qui s'apparentent **à la GEN-IV** (Sels fondus, Na, Pb, Gaz)
- **SMR ≠ AMR** : une convention adoptée par les britanniques¹ et utilisée au CEA

- **Microréacteurs terrestre (MMR : Micro Modular Reactor, VSMR = Very Small Modular Reactor)**
 - Réacteurs nucléaires électro- et/ou calogènes **de 1 à 20 MWe**.
 - Usage/marché : alimentation de bases militaires (autonomies), communautés isolées en cogénération électricité/chaleur, autres ?

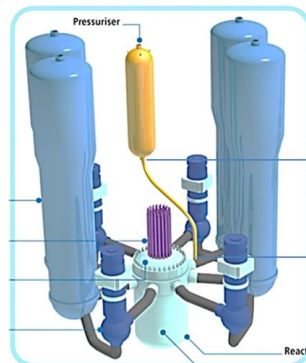
SMR : Les clés du succès – à la main des concepteurs

Leviers économiques pour contrer l'effet d'échelle

- **Conception et fabrication modulaires**
diminution du coût de construction, réduction de la durée de construction
- **Conception simplifiée**
architecture, matériels, structure de génie civil, facilité et rapidité de construction
- **Effet de série**
fabrication en série des composants, standardisation, normalisation, grand programme de construction...



Conception de REP à boucle



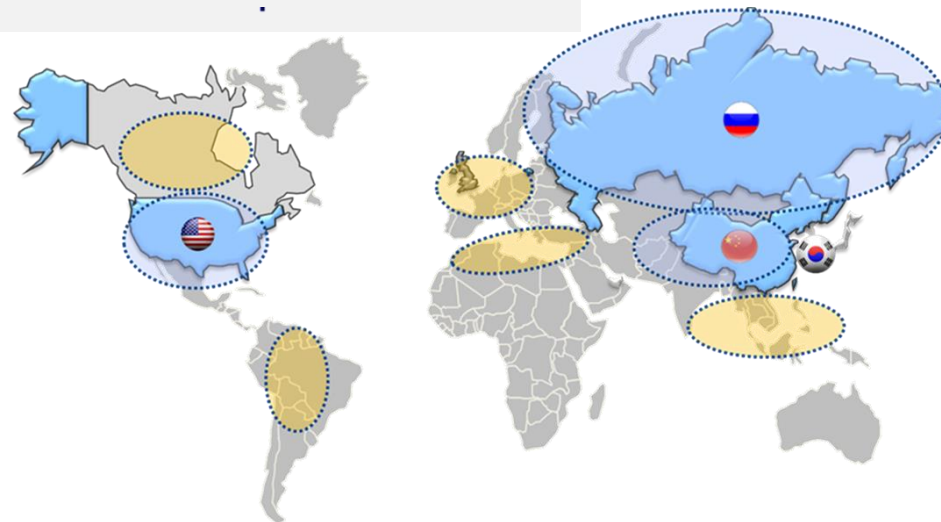
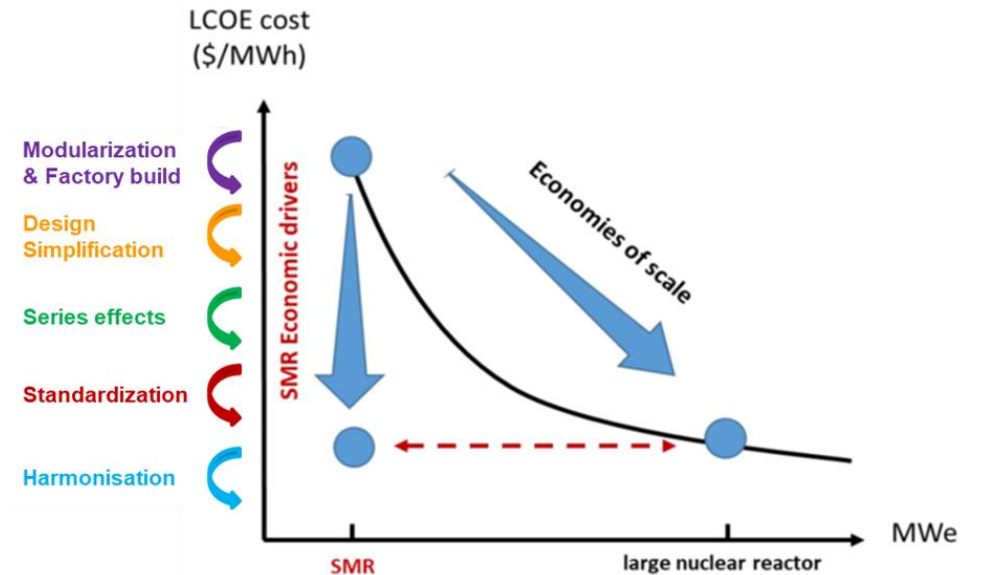
Conception REP intégrée



SMR : Les clés du succès – hexogènes

Leviers économiques pour contrer l'effet d'échelle

- **Standardisation / Harmonisation pour un développement international**
- **Approche de la sûreté**
 - exigences réglementaires
 - qualification de systèmes passifs
 - harmonisation internationale
- **Sécurité et Garanties**
- **Certification d'usine de fabrication**



Les SMR pour contribuer à la décarbonation du système énergétique

Des réponses adaptées à plusieurs défis de la transition énergétique.

01

Les réseaux électriques qui ne peuvent pas accueillir une grande capacité nucléaire.

En remplacement de centrales à charbon

02

La fourniture d'énergie aux sites isolés.

Qui ne font pas des grandes lignes de réseaux électriques

03

Une production d'électricité nucléaire flexible.

Pour équilibrer la production ENR intermittente

04

La décarbonation du chauffage ou de l'industrie.

En remplacement de chaudières industrielles

05

L'accompagnement du financement de la décarbonation.

Par un investissement progressif

L'offre mondiale des SMR

SMR Book 2020 de l'AIEA

https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

SMR

- 25 modèles à eau pressurisée ou bouillante terrestres
- 6 modèles à eau pressurisée maritimes

AMR

- 14 modèle à haute température
- 11 modèles à neutrons rapides
- 10 modèles à sels fondus

MMR

- 6 micro-réacteurs



Dont la barge russe (2x35MWe)



**AKADEMIK LOMONOSOV
FNPP**

2 x KLT-40S
Reactors

| | |
|---------------------|-------------|
| Electrical capacity | Up to 77 MW |
| Thermal capacity | 300 MW |
| Fuel enrichment | < 20% |
| Fuel cycle | 3 years |
| Design life | 40 years |
| Mobility | towed |

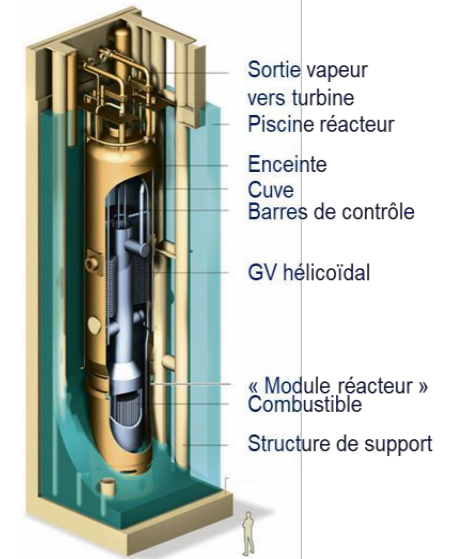
April 2019
Comprehensive testing of the FPU was completed

June 2019
Operation license is issued

December 2019
FNPP was connected to the grid

January 2020
FNPP delivered its first 10 min kWh of electricity to the Chukotka grid

Dont NuScale (6x77MWe)



Dont NUWARD (2x170MWe)



USA : une dynamique soutenue par le DOE

ARDP : Advanced Reactor Demonstration Program (call 2020)

2 projets sélectionnés pour le Demo Program (2 x 80M\$ de dotation DOE):

- **Xe-100** – X-Energy (High Temp Reactor)
- **Sodium** – Terrapower (Sodium Fast Reactor)

+ 5 projets sélectionnés pour le Risk Reduction Program :

| Concept | Vendor | Type | Quoi ? | Budget sur 7 ans | DOE Share |
|-----------------------------------|---------------------|---------|------------------------------|------------------|-----------|
| Hermes Reduced-Scale Test Reactor | Kairos Power | FHR | Réacteur expérimental | 629 M\$ | 303 M\$ |
| eVinci | Westinghouse | MMR | Qualif matériaux et caloducs | 9.3 M\$ | 7.4 M\$ |
| BANR | BWXT | MMR | Qualification - TRISO | 106.6 M\$ | 85.3 M\$ |
| Holtec-160 | Holtec | SMR PWR | Basic design | 147.5 M\$ | 116 M\$ |
| MCRE | Southern/Terrapower | MSR | Réacteur expérimental | 113 M\$ | 90.4 M\$ |

+ 3 projets sélectionnés pour le ARC-20 (Advanced Reactor Concepts)

| Concept | | | Budget sur 4 ans | DOE share |
|------------------------|---------------------------------|--------------|------------------|-----------|
| ARC-100 | ARC (Advanced Reactor Concepts) | SFR – 100MWé | 34,4 M\$ | 27,5 M\$ |
| FMR | General Atomics | GFR – 50 MWé | 31,1 M\$ | 24,8 M\$ |
| Modular Integrated HTR | MIT | HTR - MMR | 4,9 M\$ | 3,9 M\$ |

Depuis 2011, le DOE a investi 1,2 G\$ dans les programmes de SMR/AMR (source IFRI)

NuScale



Xe-100 80 MWe



Sodium

350 MWe, 500 MWe en pointe

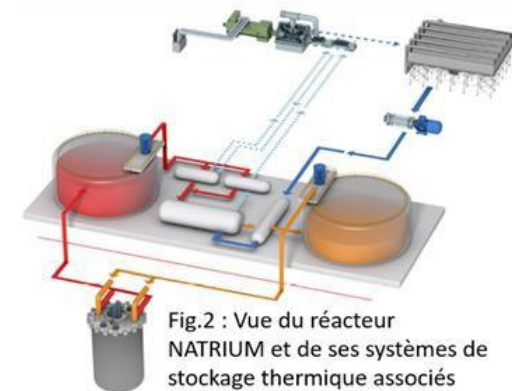


Fig.2 : Vue du réacteur NATRIUM et de ses systèmes de stockage thermique associés

CANADA : Un écosystème extrêmement dynamique

Canadian National Lab initiative : SMR demonstration projects

3 concepts ont passé la phase 1 (pre-qualification) :

- StarCore Nuclear 14 MWé HTR
- Terrestrial Energy 195 MWé MSR
- U-Battery – 4 MWé HTR

1 concept a passé la phase 2 (début licensing) :

- USNC 5 MWé HTGR (avec Ontario Power Generation OPG)

4 projets sont soutenus par la R&D nationale :

- Moltex (MSR)
- Kairos Power (FHR – Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactors / Combustible solide)
- USNC (HTR)
- Terrestrial Energy (MSR)

3 projets sont sélectionnés par Ontario Power Generation :

- **Xe-100** – X-Energy (High/He Temp Reactor)
- **IMSR** – Terrestrial Energy (Molten Salt Reactor)
- **BWRX-300** – GE (Boiling Water Reactor)



Three letters that can help solve climate change

Ontario's nuclear know-how is helping lead the way for this real solution to climate change.

We recognize the potential value and benefits of SMRs to augment Canada's energy supply mix which will be a significant contributor in the climate change solution.

Ken Hartwick, President and CEO of OPG

Forte synergie entre Autorité de Sûreté, R&D nationale, les régions, les électriciens, et les startups

CHINE : des projets et des programmes de développement

Projets

| Entreprise | Réacteur | Type | Puissance | Utilisation |
|------------|------------|------|-------------------|----------------------------|
| CGN | ACPR-50 | REP | 60 MWe | Electricité, Maritime |
| CNNC | ACP-100 | REP | 125 MWe | Electricité, Terrestre |
| CGN | NHR-200-II | REP | 200 MWt | Chauffage |
| CNNC | DHR-400 | REP | 400 MWt | Chauffage |
| SPIC | Happy 200 | REP | 200 MWt | Chauffage |
| CNNC | HTR-PM | RGHT | 250 MWt / 105 MWe | Electricité / Industrie |

Source : *Advances in Small Modular Reactor Technology Development, AIEA, 2018.*

MSR thorium : TMSR-LF1 (Sinap, divergence 2021)

-> en projet, un réacteur de 168 MWe, source de chaleur HT dans un hub énergétique ...

RNR : SFR (CEFR+CFR600 par CIAE/Rosatom),

LFR (CGN) : des démonstrateurs, évolution vers des réacteurs de grande puissance

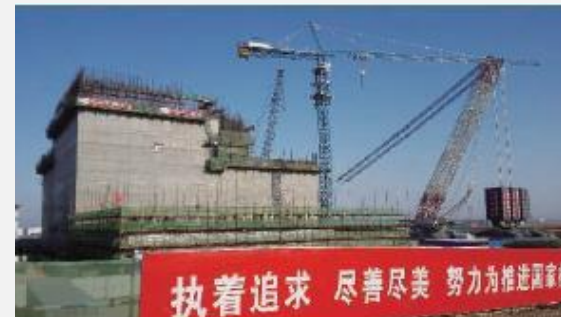
La filière HTR

Un démonstrateur (HTR-PM), divergence réalisée en 2021

HTR-PM

2 chaudières nucléaires reliées à une unique turbine de **210 MWe**

+ ligne de fab du combustible, « made in Germany »



RUSSIE : des projets aboutis et en devenir sur des marchés nationaux de niches



**AKADEMIK LOMONOSOV
FNPP**

2 x KLT-40S Reactors

| | |
|---------------------|-------------|
| Electrical capacity | Up to 77 MW |
| Thermal capacity | 300 MW |
| Fuel enrichment | < 20% |
| Fuel cycle | 3 years |
| Design life | 40 years |
| Mobility | towed |

April 2019
Comprehensive testing of the FPU was completed

June 2019
Operation license is issued

December 2019
FNPP was connected to the grid

January 2020
FNPP delivered its first 10 mln kWh of electricity to the Chukotka grid

FNPP: optimized mobile solution for coastal areas power supply

2xRITM-200M

OPTIMIZATION RESULTS COMPARED WITH FNPP AKADEMIK LOMONOSOV

- by **28 m** – length reduction
- by **5 m** – beam reduction
- by **9 000 t** – displacement reduction
- 30%** – electrical capacity increase

TECHNICAL PARAMETERS

| | |
|---------------------|----------------|
| Electrical capacity | 100 MW |
| Fuel cycle | up to 10 years |
| Design life | 60 years |
| Displacement | 12 000 tons |
| Length | 112 m |
| Beam | 25 m |
| Draught | 4.5 m |

Electricity Heat Desalination

BREST-0D-300

Réacteur électrogène, 300 MWe :

- RNR-plomb
- Combustible (U,Pu)N
- Un démonstrateur technologique (réacteur+cycle du combustible), Pas la tête de série d'un concept AMR

Contexte Russe = compétition LFR/SFR existe depuis plus de 30 ans



Le cas des microréacteurs (MMR) : un marché de niche où le prix du kWh n'est plus le seul paramètre

AURORA (Oklo) et **eVinci (Westinghouse)** semblent être **les 2 projets les plus prometteurs** :

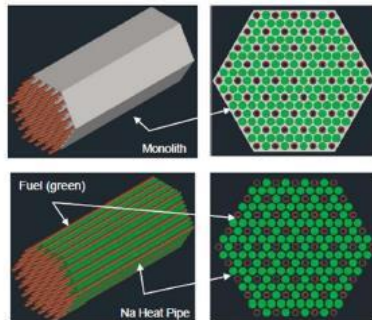
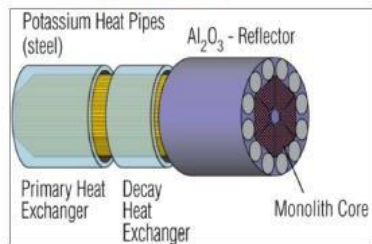
Heat-pipe réacteurs extrapolés de concepts de réacteurs spatiaux



| Réacteur | Fabricant, pays | Type | Puissance | Design status | Licensing |
|----------------|------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|-------------------|
| eVinci DeVinci | Westinghouse, USA | rapide, heat-pipe | 0,2 – 15 MW _e | Detailed | pré-A (USA, 2019) |
| Aurora | OKLO, USA | rapide, heat-pipe | 1,5 MW _e | Detailed | B (USA, mai 2020) |
| NuScale micro | NuScale, USA | heat-pipe | 1 – 10 MW _e | Conceptual | --- |
| MoveluX | Toshiba, JPN | thermique, heat-pipe | 10 / 4 MW _{t/e} | Conceptual | --- |
| U-Battery | Urenco consort., UK | HTGR prismatique | 10 / 4 MW _{t/e} | Detailed | A (CDA) |
| MMR-5 | UltraSafe Nuclear, USA | HTGR prismatique | 15 / 5 MW _{t/e} | Detailed | B (CDA, 2019) |
| Starcore | Starcore Nuclear | HTGR prismatique | 36/20 MW _{t/e} | Detailed | pré-A (CDA) |
| Holos Quad | HolosGen, USA | HTGR prismatique | 22/13 MW _{t/e} | Conceptual | --- |
| XE-Mobile | X-energy | HTGR à boulets | > 1MW _e | Conceptual | --- |
| GA-vSMR | General Atomics, USA | HTGR prismatique | inconnue | inconnue | --- |
| SEALER | LeadCold | rapide à plomb | 8/3 MW _{t/e} | inconnue | A (CDA, en cours) |

Du Kilo- au Megapower

Proposition d'ANL

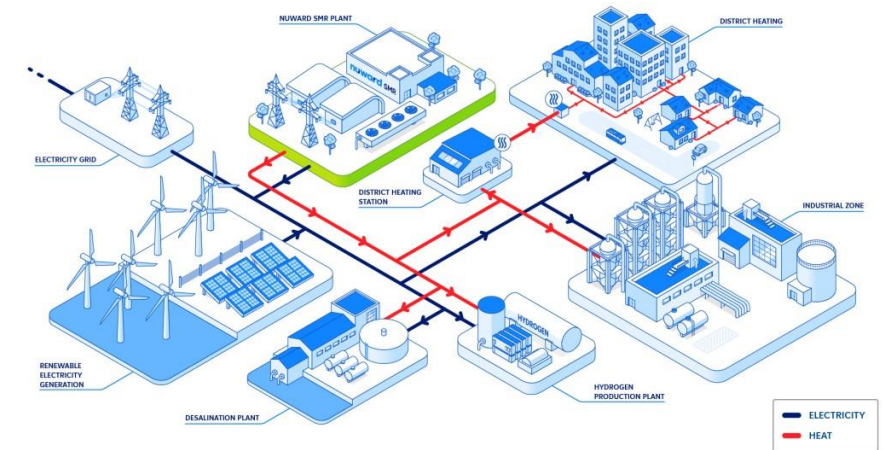


Cœur monolithique avec corps prismatique, 0,9 m en diamètre et 1,5 m de longueur, 3700 canaux cylindriques abritant les caloducs à sodium et le combustible dans un rapport 1:2.

→ eVinci (Westinghouse)



FRANCE : le projet NUWARD et des start-up



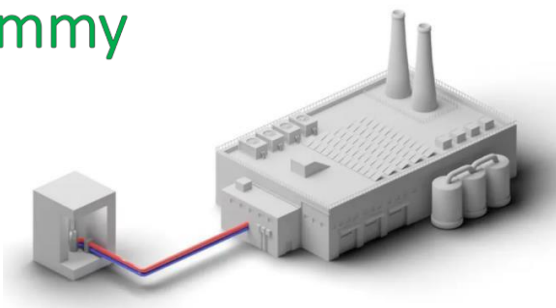
- ❖ NUWARD – SMR REP
- ❖ JIMMY – MMR HTR Calogène
- ❖ NAAREA – MMR MSR
- ❖ NEWCLEO – LFR

LesEchos

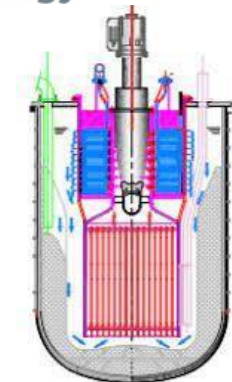
Jimmy, la start-up du nucléaire qui décarbone l'industrie

La jeune pousse veut concevoir des générateurs thermiques qui reposent sur un micro-réacteur nucléaire, et les installer dans les usines. La société vient de lever 2,2 millions d'euros.

Jimmy



LUSINENOUVELLE
[L'instant tech] Comment la start-up française Naarea compte faire fonctionner son SMR recycleur de déchets nucléaires



Lauréats de l'AAP RNI



- Réacteur dérivé du HTR
- Puissance : 150 MWth
- Applications : chaleur industrielle et électricité



- Réacteur à eau
- Puissance : 30 MWth
- Application : chaleur urbaine

Jimmy

- Réacteur HTR
- Puissance : 15 MWth
- Application : chaleur industrielle



- Réacteur RNR Na
- Puissance : 400 MWth et 150 MWe
- Applications : chaleur industrielle et électricité



- Réacteur RNR à sels fondus
- Puissance : 80 MWth et 40 MWe
- Applications : chaleur industrielle et électricité



- Réacteur RNR Pb
- Puissance : 30 ou 200 MWe
- Applications : électricité, chaleur, radio-isotopes



- Réacteur RNR Na
- Puissance : 110 MWe
- Applications : chaleur industrielle et électricité



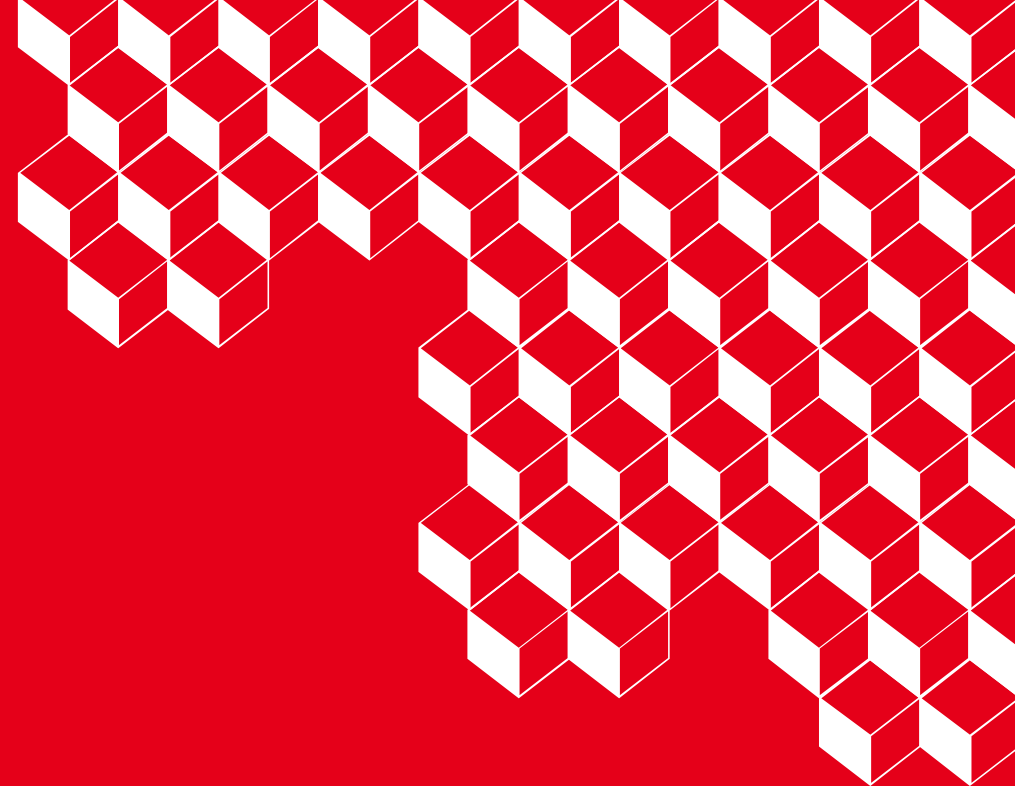
- Réacteur à sels fondus
- Puissance : 250 MWth
- Applications : chaleur industrielle et électricité



- Réacteur à sels fondus
- Puissance : 250 MWth
- Applications : chaleur industrielle



iresne



Merci de votre attention

CEA IRESNE

13115 Saint-Paul-lez-Durance

France

iresne@cea.fr | www.cea.fr/energies/iresne | www.linkedin.com/company/cea-iresne