

**EXPLORONS  
LES POSSIBLES**

Pour une **Transition Énergétique  
Soutenable et Économique**

## **Les applications potentielles et enjeux technico-économiques associés aux programmes SMR**

*LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES MODULAIRES DE PETITE TAILLE  
QUELLE CONTRIBUTION À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?*

CEEM et AEE 21 Septembre 2023

**David Prout, CEA I-Tésé** - [david.proult@cea.fr](mailto:david.proult@cea.fr)

<https://www.cea.fr/energies/i-tese>

# I-Tésé, l'Institut de recherche et d'études en économie de l'énergie du CEA

25 chercheurs basés à Saclay et à Grenoble

## Notre ambition :

Développer une vision systémique de la transition des systèmes énergétiques vers la neutralité carbone sous l'angle de l'économie et de la soutenabilité

## Nos thématiques de recherche :

Technologies bas carbone de production et de stockage

Ressources clés de la transition énergétique

Demande et modes de consommation d'énergie

Régulation et design des marchés

# SMR/AMR

## Small

L'AEN qualifie précisément de SMR les réacteurs d'une puissance comprise entre 10 et 300 MWe et de Micro-Modular Reactor (MMR) ceux ne dépassant pas 10 MWe.

## Advanced

Par opposition aux réacteurs à eau on qualifie d'AMR les réacteurs de 4<sup>eme</sup> génération de petite taille

## Modular

- La modularisation : ces réacteurs sont de par leur conception décomposables en différents modules qui peuvent être fabriqués en usine, transportés et assemblés sur le site.
- La modularité : plusieurs réacteurs identiques (modules) de puissance réduite peuvent être installés sur même site.

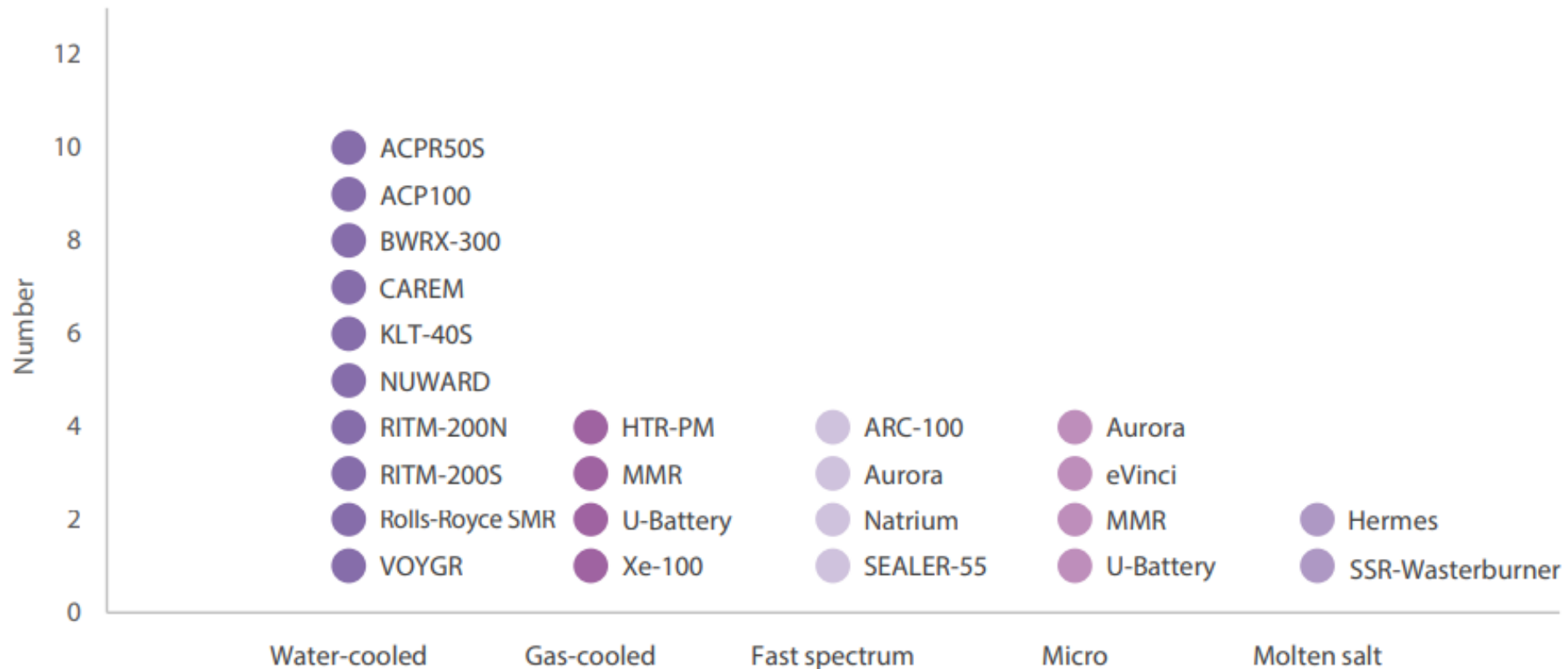
(B. Mignacca, G. Locatelli 2020).« Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda » B. Mignacca, G. Locatelli. Renewable and Sustainable Energy Reviews 118 (2020) 109519

Un concept large qui **regroupe plus de 80 designs de réacteurs différents...**

# Des technologies différentes



Figure 7. Reactor concepts

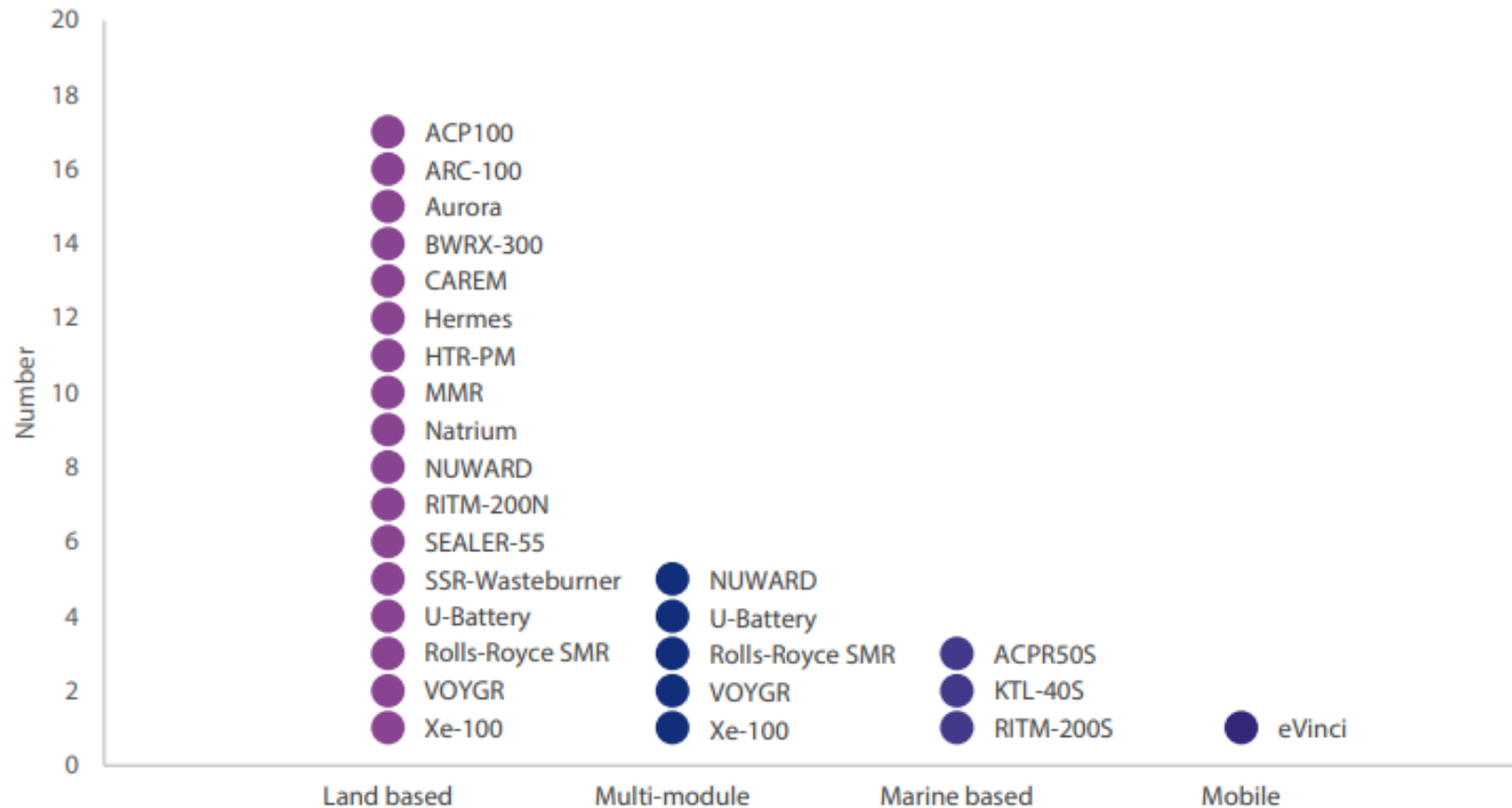


THE NEA SMALL MODULAR REACTOR DASHBOARD, OECD 2023

# Des configurations différentes



Figure 8. Reactor configurations



THE NEA SMALL MODULAR REACTOR DASHBOARD, OECD 2023

# Des puissances, des températures et des niveaux d'enrichissement différents



**Des puissances thermiques** qui vont de **quelques MW** (13 MW pour « e-vinci » de Westinghouse) à **plusieurs centaines** (870 MW pour le BWRX ou même 1400 pour le SMR de Rolls-Royce)

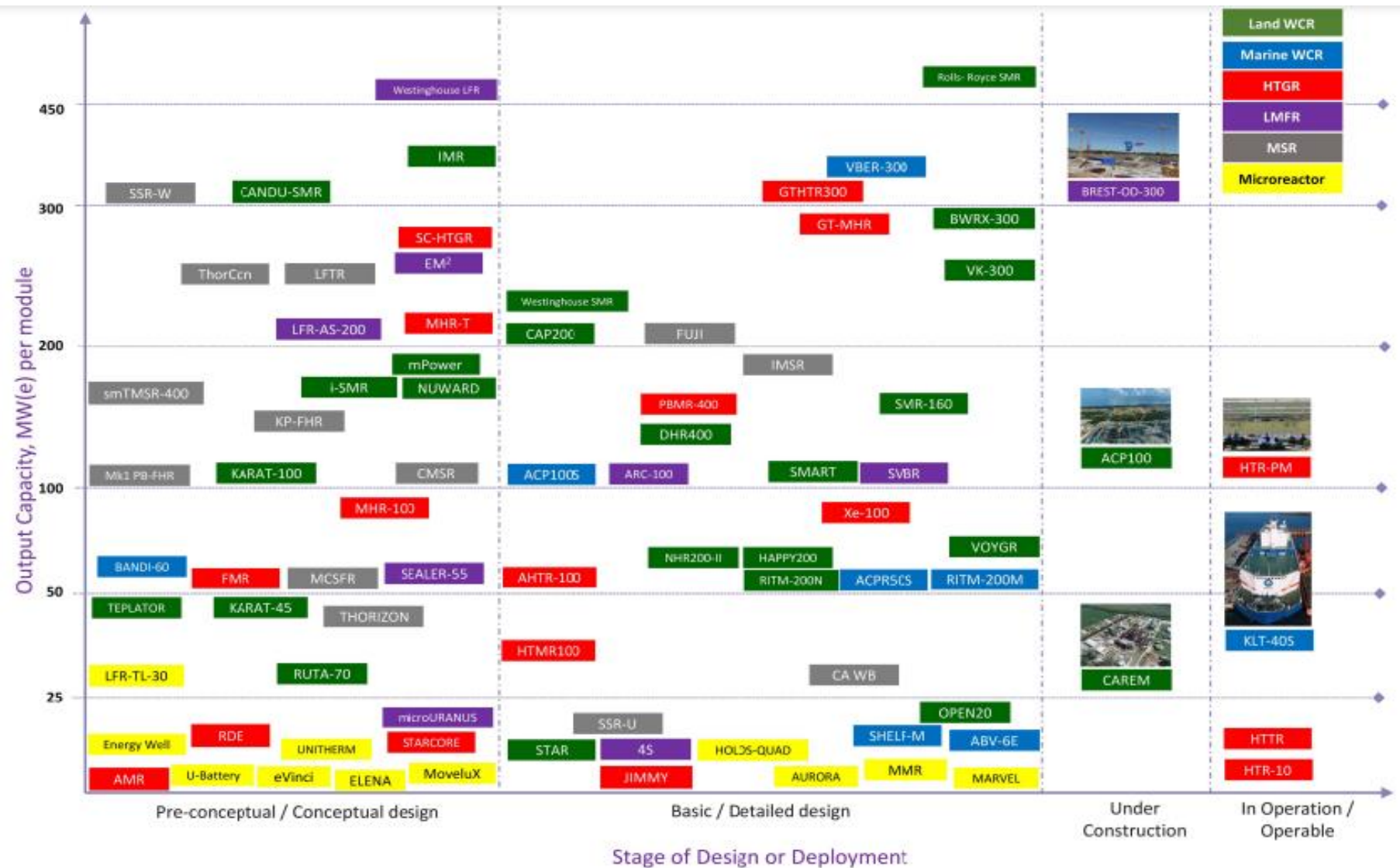


**Des températures de sortie du réacteur** qui sont autour de 300°C pour les réacteurs à eau, à pratiquement **800 °C pour les réacteurs à haute température**



**Des niveaux d'enrichissement** inférieurs à **5 %** pour les réacteurs à eau mais aussi proche de **20 %** pour les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération

# Des niveaux de maturité très différents

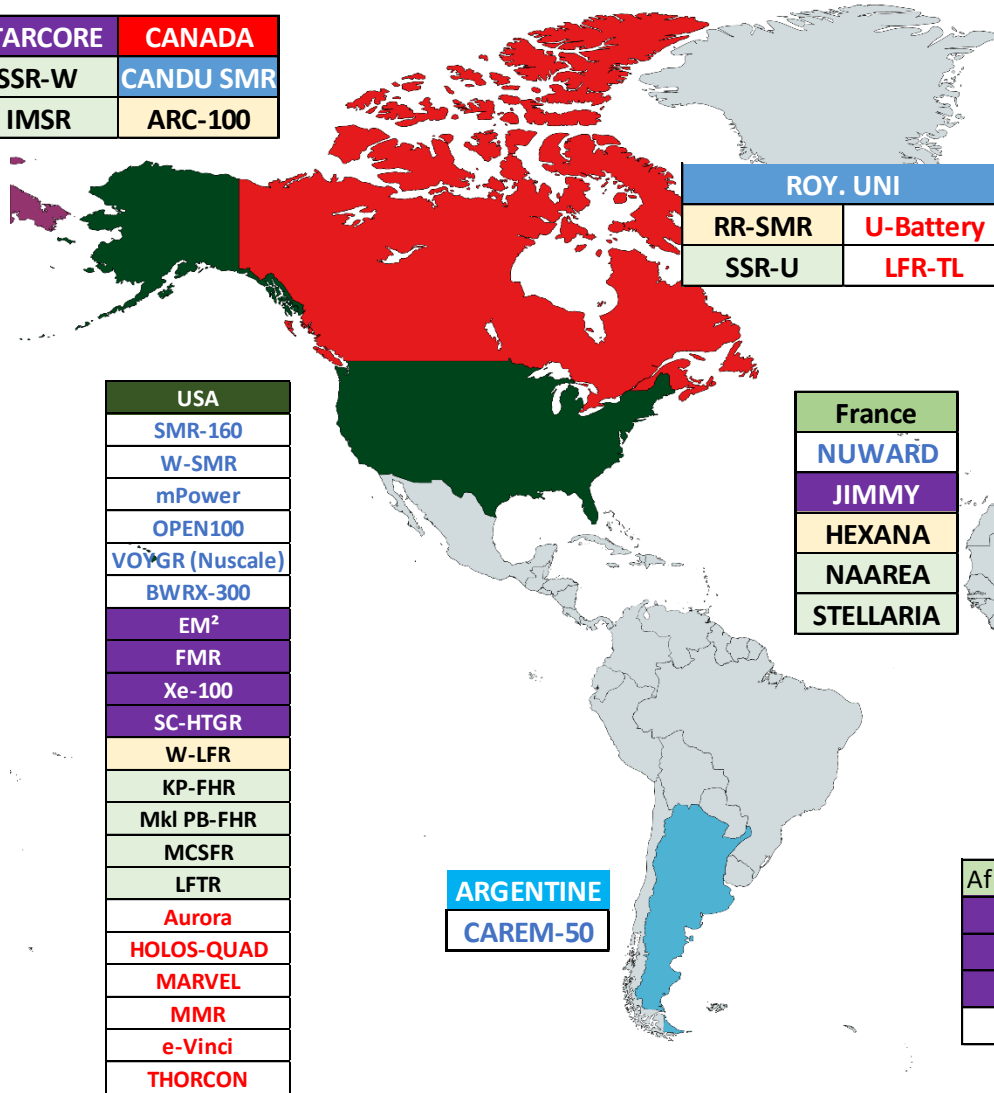


- 2 en fonctionnement
- 3 en construction

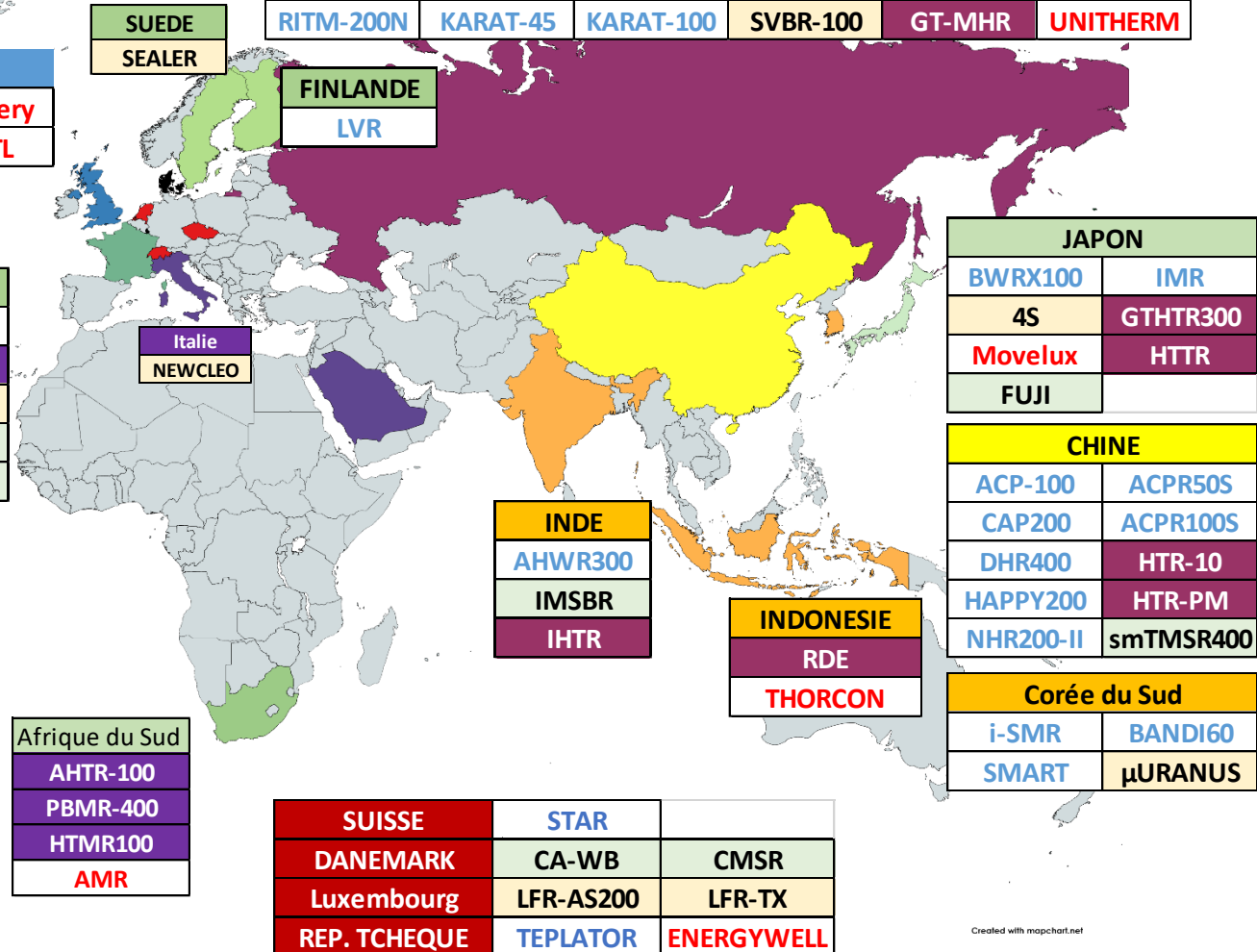
“ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS” AIEA 2022 Edition

# Qui développe des SMR dans le monde ?

|          |           |
|----------|-----------|
| STARCORE | CANADA    |
| SSR-W    | CANDU SMR |
| IMSR     | ARC-100   |



|           |          |           |          |           |          |
|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| RUSSIE    | VK-300   | VBER-300  | SHELF    | BREST-300 | MHR-100  |
| RITM-200M | KLT-40S  | ABV-6E    | RUTA-70  | MHR-T     | ELENA    |
| RITM-200N | KARAT-45 | KARAT-100 | SVBR-100 | GT-MHR    | UNITHERM |



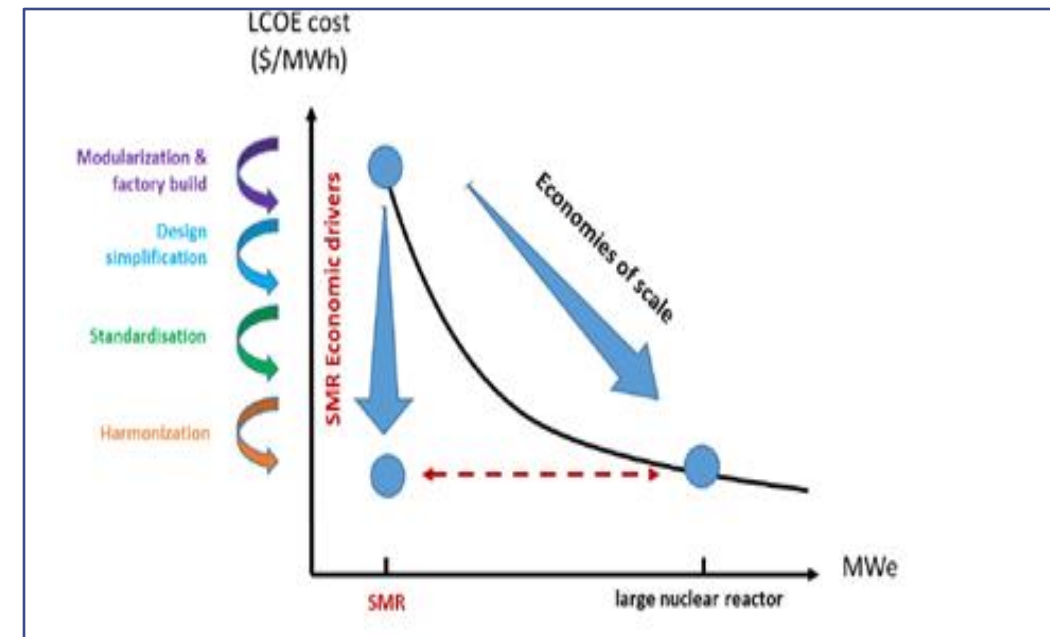
Created with mapchart.net



# Les SMR/AMR, la promesse d'un nouveau modèle économique

Tirer parti de la taille réduite :

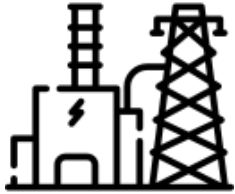
- **Effet de série contre effet d'échelle pour faire baisser les coûts**
  - Simplification (sûreté passive, circulation naturelle)
  - Standardisation
  - Maximisation de la fabrication en usine
  - Taux d'apprentissage (learning rate) important
- **Besoin en capital réduit et baisse du coût du capital (réduction des risques et du temps de construction) par rapport aux réacteurs de fortes puissances**



THE NEA SMALL MODULAR REACTOR DASHBOARD, OECD 2023

# Les SMR/AMR, la promesse d'un nouveau modèle économique qui élargit le marché potentiel

Tirer parti de la taille réduite :



**Adaptés aux marchés libéralisés de l'électricité,**  
« *merchant business case* »  
(≠ « *supported business case* »)



**Nouveaux acteurs**  
(start-up ...)



**Nouveaux marchés pour le nucléaire**

- **Pays ou opérateurs (avec des capacités financières moins importantes)**
  - Remplacement des centrales à charbon ou à gaz (pour la flexibilité)
- **S'affranchir des limites des réseaux de transport (zones isolées...)**
- **Cogénération (chaleur/électricité) ou uniquement calogène pour les besoins de l'industrie**
  - Réseaux de chaleur
  - Désalinisation
  - Production d'hydrogène par couplage avec des électrolyseurs haute température



# Un exemple de couplage

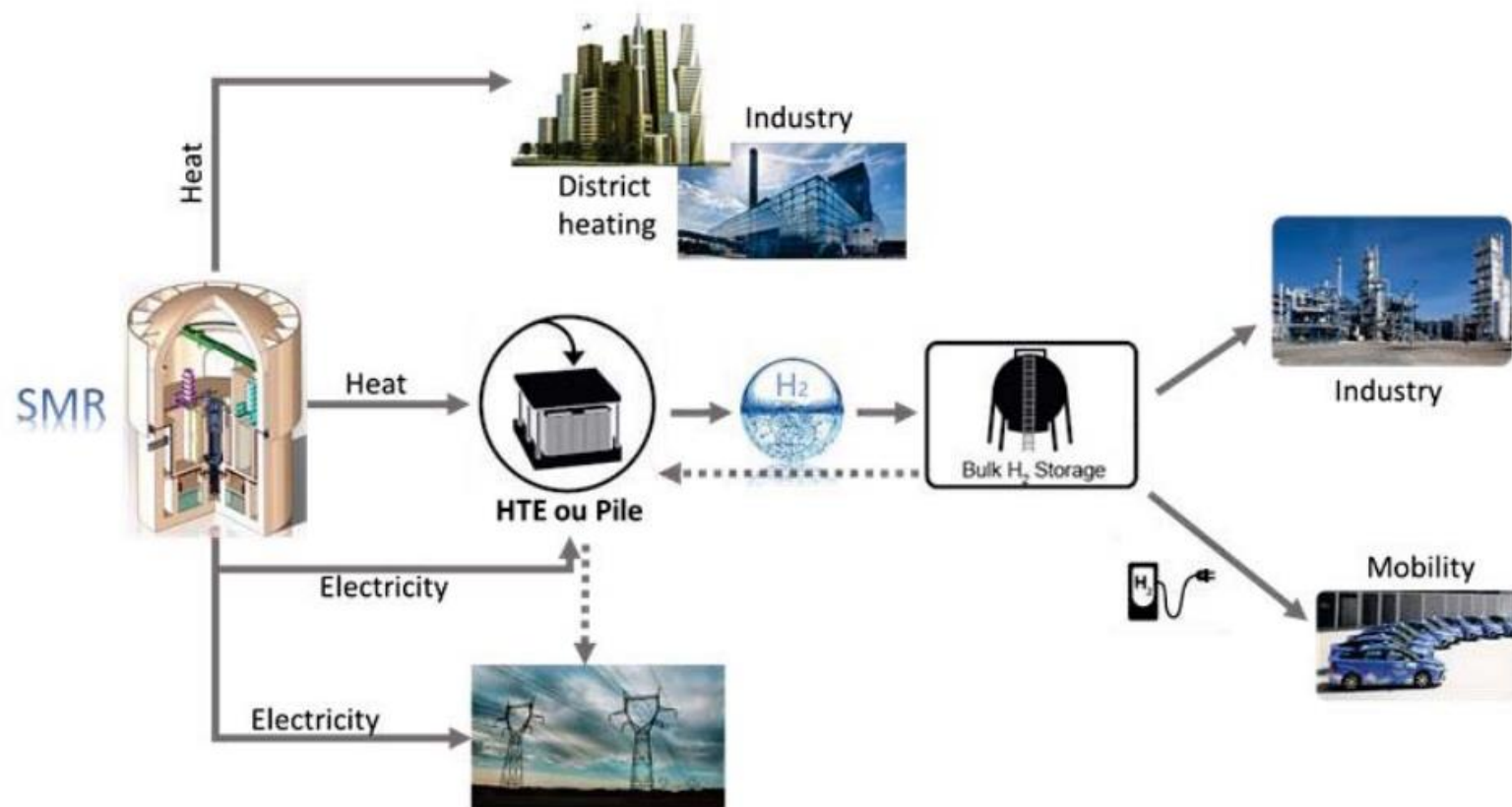


Figure 8 : Potentialités d'un système de couplage SMR-EHT pour répondre aux besoins d'un territoire

Source CEA « IDNES »

# Les défis à relever pour un déploiement des SMR



## CAPEX

### Un effet de série qui compense l'effet d'échelle

- Quel learning rate ? Quelle doit-être la taille de la série pour compenser l'absence d'effet d'échelle ?
- Vers un marché oligopolistique ? (courses aux engagements)
- Besoin d'harmonisation des réglementations internationales

## OPEX

### Cible 15-35 €/MWh (“Literature Review of Advanced Reactor Cost Estimates “ IES/DOE 2023)

- Les dépenses d'exploitation et de maintenance diminuent-elles en proportion de l'énergie produite pour maintenir un opex autour de 20 €/MWh (Cour des Comptes 2012) ?
- Peut-on rester autour 0,4-0,5 personne/MWe ?  
← Solutions alternatives (contrôle à distance...)

## Le combustible

- Consommation d'uranium ? (cœur plus petit donc fuites plus importantes : plus de combustible pour la même énergie produite. Inverse de l'EPR )
- Disponibilité des combustibles hautement enrichis pour certains réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération (HALEU/dépendance Russe)