

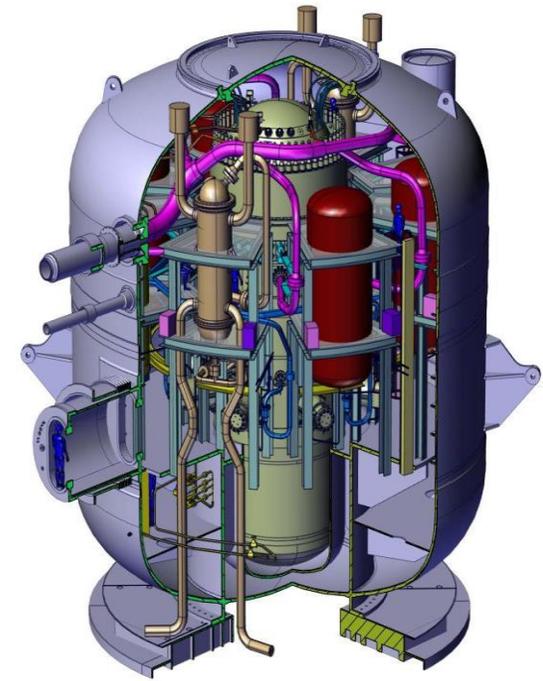
# ***POURQUOI DEVELOPPER DES PETITS REACTEURS MODULAIRES (SMR)?***

**Françoise TERNON-MORIN**



# SOMMAIRE

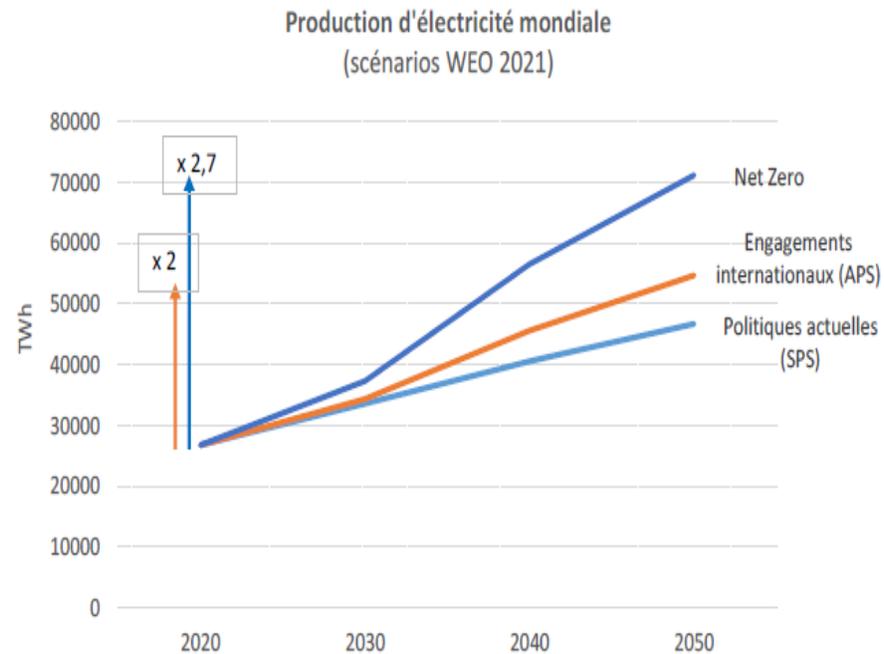
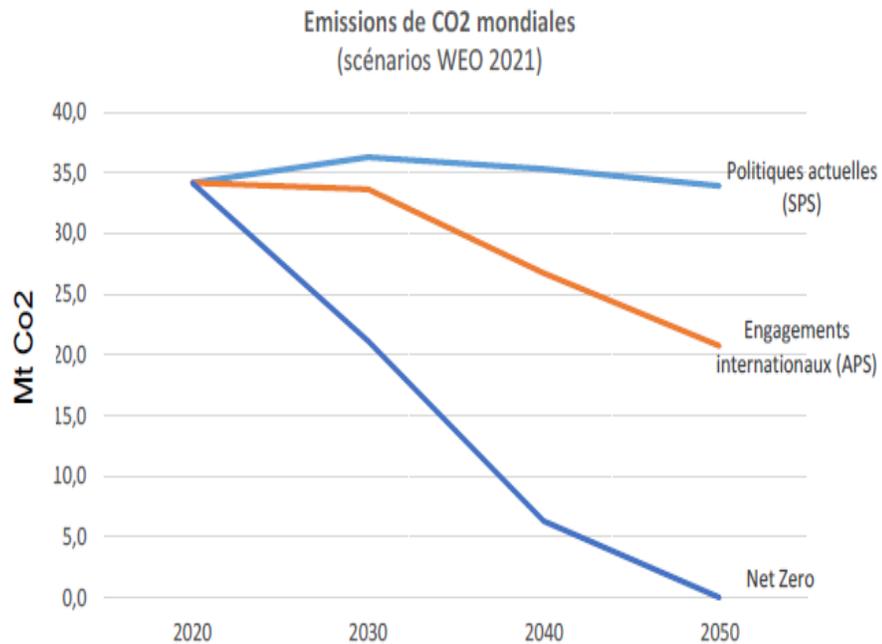
- Introduction : le contexte énergétique
- Qu'est qu'un SMR ?
  - Les différents types
  - Leurs objectifs
- Quelques exemples de SMR
- Le cas du projet Français NUWARD
- Conclusion
- Questions/réponses



# LE CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL

- L'urgence climatique nécessite une **croissance rapide de la production d'électricité décarbonée** avec une électrification massive des usages (chauffage, mobilité ..).

Pour rester en-dessous de +2°C, il faut passer de 27 000 TWh en 2020 à 37 000 TWh en 2030 et 71 000 TWh en 2050, soit +170% d'ici 2050. Cela nécessite des investissements massifs, sans commune mesure avec les 20 dernières années.



# LA PLACE DU NUCLEAIRE

- Dans ce contexte **le nucléaire** a une place essentielle aux côtés des ENR en permettant une production pilotable sans émissions de CO2 et en assurant une indépendance vis-à-vis des producteurs de gaz et de pétrole.
- **Pour la France** le récent rapport de RTE « **Futurs énergétiques 2050** » proposant 6 scénarios de mix de production permettant à la fois de garantir la sécurité d’approvisionnement et une électricité bas-carbone en 2050 aboutit aux conclusions suivantes :
  - **Les 3 scénarios comportant une part significative de nucléaire (scenarios N) et notamment ceux comportant de nouveaux réacteurs nucléaires présentent un intérêt économique par rapport aux 3 scénarios sans nouveau nucléaire (scénarios M).**
  - **Un scénario conservant une capacité de production nucléaire importante associé à un développement des renouvelables est le plus pertinent pour atteindre la neutralité carbone en 2050**



# LES SCENARIOS RTE de type N (avec nouveau nucléaire)



## Futurs Energétiques 2050

Flexibilités de la demande (hors V2G)  
Véhicule-to-grid  
Nouveau thermique décarboné  
Batteries

RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050

CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)\*

Solaire  
Éolien terrestre  
Éolien en mer  
Nucléaire historique  
Nouveau nucléaire

BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050

Scenario	Description	Production 2050 (%)	Solaire (GW)	Éolien terrestre (GW)	Éolien en mer (GW)	Nucléaire historique (GW)	Nouveau nucléaire (GW)	Flexibilités (GW)
N1 EnR + nouveau nucléaire 1	Lancement d'un programme de construction de nouveaux réacteurs, développés par paire sur des sites existants tous les 5 ans à partir de 2035. Développement des énergies renouvelables à un rythme soutenu afin de compenser le déclassement des réacteurs de deuxième génération.	74% EnR, 26% Nuc.	~118 GW (soit x11)	~58 GW (soit x3,3)	~45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)	15 GW (flexibilité), 1.7 GW (I,1 MVE), 11 GW (thermique), 9 GW (batteries)
N2 EnR + nouveau nucléaire 2	Lancement d'un programme plus rapide de construction de nouveaux réacteurs (une paire tous les 3 ans) à partir de 2035 avec montée en charge progressive. Le développement des énergies renouvelables se poursuit mais moins rapidement que dans les scénarios N1 et M.	63% EnR, 37% Nuc.	~90 GW (soit x8,5)	~52 GW (soit x2,9)	~36 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)	15 GW (flexibilité), 1.7 GW (I,1 MVE), 5 GW (thermique), 2 GW (batteries)
N03 EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR)	50% EnR, 50% Nuc.	~70 GW (soit x7)	~43 GW (soit x2,5)	~22 GW	24 GW	~27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)	13 GW (flexibilité), 1.7 GW (I,1 MVE), 1 GW (batteries)

Hypothèses communes

Hydraulique ~22 GW  
Énergies marines Entre 0 et 3 GW  
Bioénergies ~2 GW  
Imports 39 GW  
STEP 8 GW

# LES SCENARIOS RTE de type M (développement des ENR)

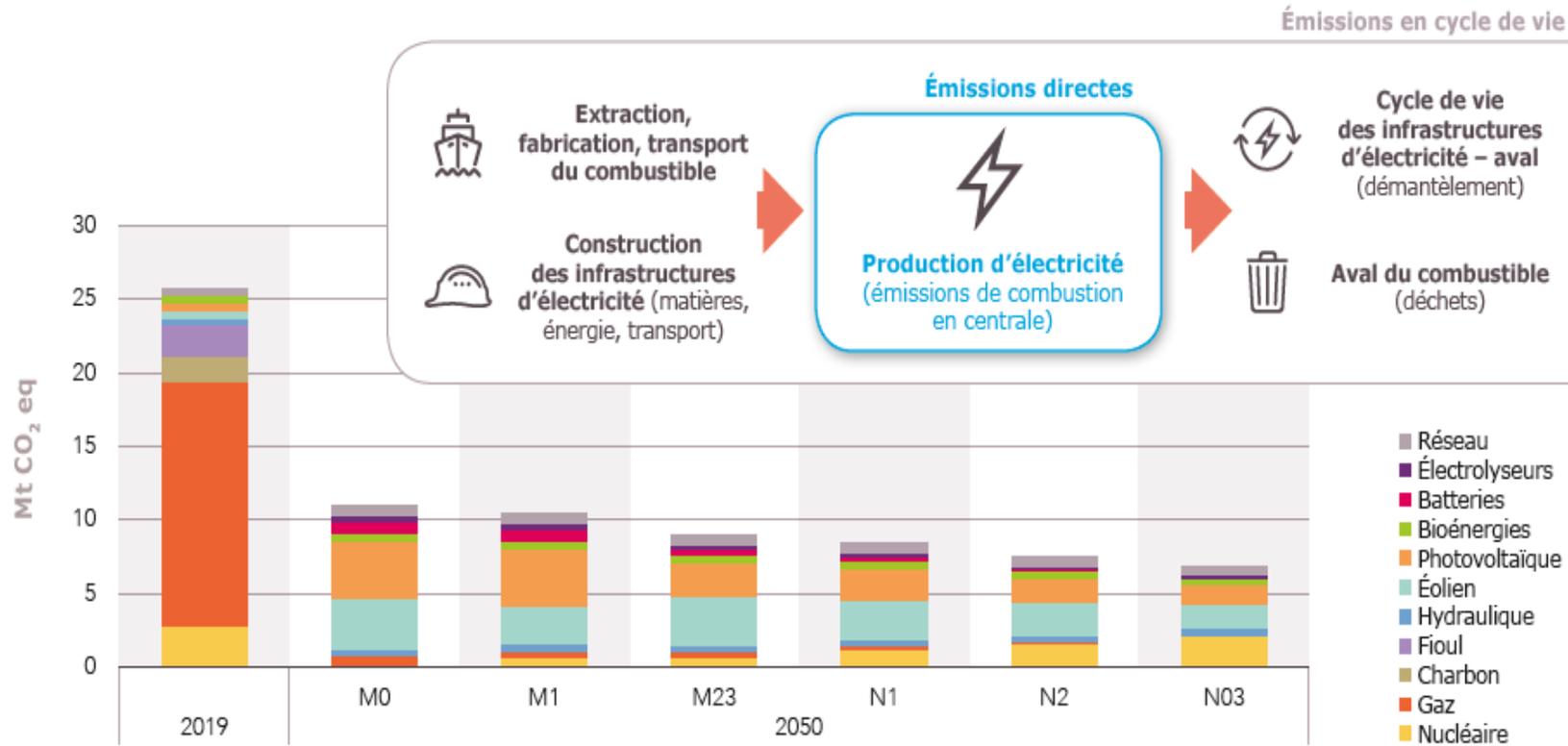
	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050
			Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire	
M0 100% EnR en 2050	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.	<p>100% EnR</p>	~ <b>208 GW</b> (soit x21)	~ <b>74 GW</b> (soit x4)	~ <b>62 GW</b>	/	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 29 GW 26 GW
M1 Répartition diffuse	Développement très important des énergies renouvelables réparties de manière diffuse sur le territoire national et en grande partie porté par la filière photovoltaïque. Cet essor sous-tend une mobilisation forte des acteurs locaux participatifs et des collectivités locales.	<p>87% EnR</p>	~ <b>214 GW</b> (soit x22)	~ <b>59 GW</b> (soit x3,5)	~ <b>45 GW</b>	<b>16 GW</b>	/	17 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 21 GW
M23 EnR grands parcs	Développement très important de toutes les filières renouvelables, porté notamment par l'installation de grands parcs éoliens sur terre et en mer. Logique d'optimisation économique et ciblage sur les technologies et les zones bénéficiant des meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.	<p>87% EnR</p>	~ <b>125 GW</b> (soit x12)	~ <b>72 GW</b> (soit x4)	~ <b>60 GW</b>	<b>16 GW</b>	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 13 GW



# LES SCENARIOS RTE “Futurs énergétiques 2050”

Enseignement n° 14

Émissions de gaz à effet de serre en cycle de vie du système électrique



- Ce sont les scénarios ayant plus de nucléaire qui émettent le moins de CO2

# POURQUOI LES SMR ?

- En complément des réacteurs de forte puissance, les SMR permettent d'élargir l'offre nucléaire et de répondre à des besoins spécifiques.
- Les SMR offrent de nouveaux usages adaptés aux enjeux actuels et futurs :
  - Répondre aux contraintes des **réseaux** insuffisants pour les fortes puissances
  - Réduire l'investissement initial pour certains états/ opérateurs
  - Alimenter **des sites isolés** non connectés au réseau électrique,
  - Assurer la diversité des besoins industriels :
    - **Production de chaleur**
    - **Désalinisation**
    - **Production d'hydrogène décarbonée**
  - Assurer les besoins de complément aux ENR intermittentes avec une base bas carbone pilotable et flexible
  - Remplacer des centrales au charbon vieillissantes et polluantes

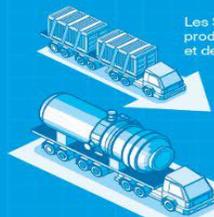


# LES SMR ET LEURS MULTIPLES USAGES

Sfen

## Un déploiement optimisé

Les SMR sont conçus pour être produits en série dans des usines et déployés rapidement.



## Une gamme de puissance répondant à de nouveaux besoins

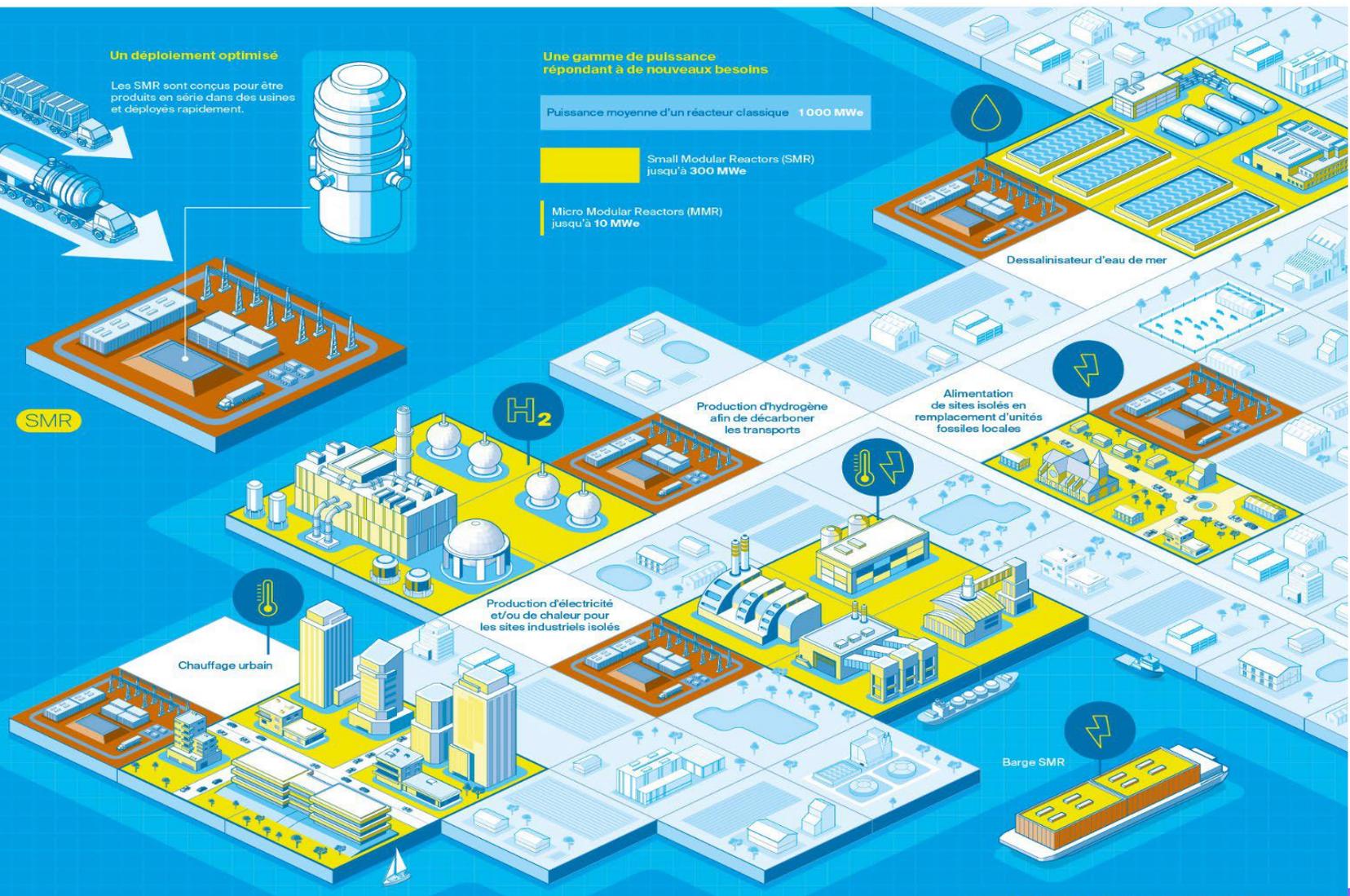
Puissance moyenne d'un réacteur classique 1 000 MWe

Small Modular Reactors (SMR) jusqu'à 300 MWe

Micro Modular Reactors (MMR) jusqu'à 10 MWe

## SMR et nouveaux usages du nucléaire

Une centrale SMR se composera de plus ou moins de modules de petite puissance afin de s'adapter parfaitement à un usage précis. Une installation pourra donc être dédiée à la production d'eau douce, d'hydrogène ou d'eau chaude que ce soit à proximité des villes ou au sein de territoires isolés du réseau électrique.



# QU'EST QU'UN SMR ?

**SMALL**  
Puissances electriques  
inférieure à 300 Mwe  
par réacteur

**SMR**

**MODULAR**  
Conception et réalisation  
modulaires  
Fabrication standardisée en  
usine

**REACTOR**  
Différentes technologies de  
réacteurs (GEN3/GEN4)  
Multi usages



# L'HISTORIQUE DES SMR

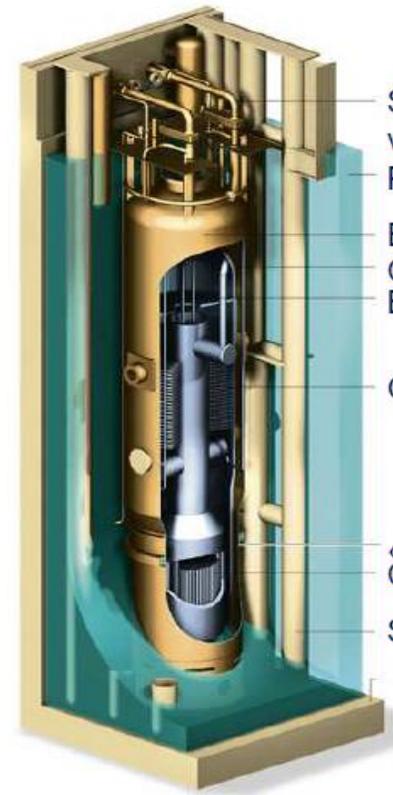
- La voie de la «petite taille» active depuis les années 60 :
  - Au service de **besoins spécifiques militaires ou de propulsion navale** ;
  - Dans le domaine de la recherche d'innovations en matière de sûreté et de compétitivité.
- En 2011 (après l'accident de Fukushima), nouvelle stratégie aux USA de soutien au développement de multiples technologies de réacteurs de petite taille en l'absence de perspectives pour les centrales de grande taille.
  - **Les USA souhaitent regagner leur leadership en matière de nucléaire**
- Aujourd'hui, un réel regain d'intérêt pour les réacteurs de petite taille
  - les initiatives industrielles foisonnent même si le marché est encore flou
  - **+ de 70 concepts recensés par l'AIEA** qui se distinguent par type de réacteur (génération III / génération IV) et par taille.



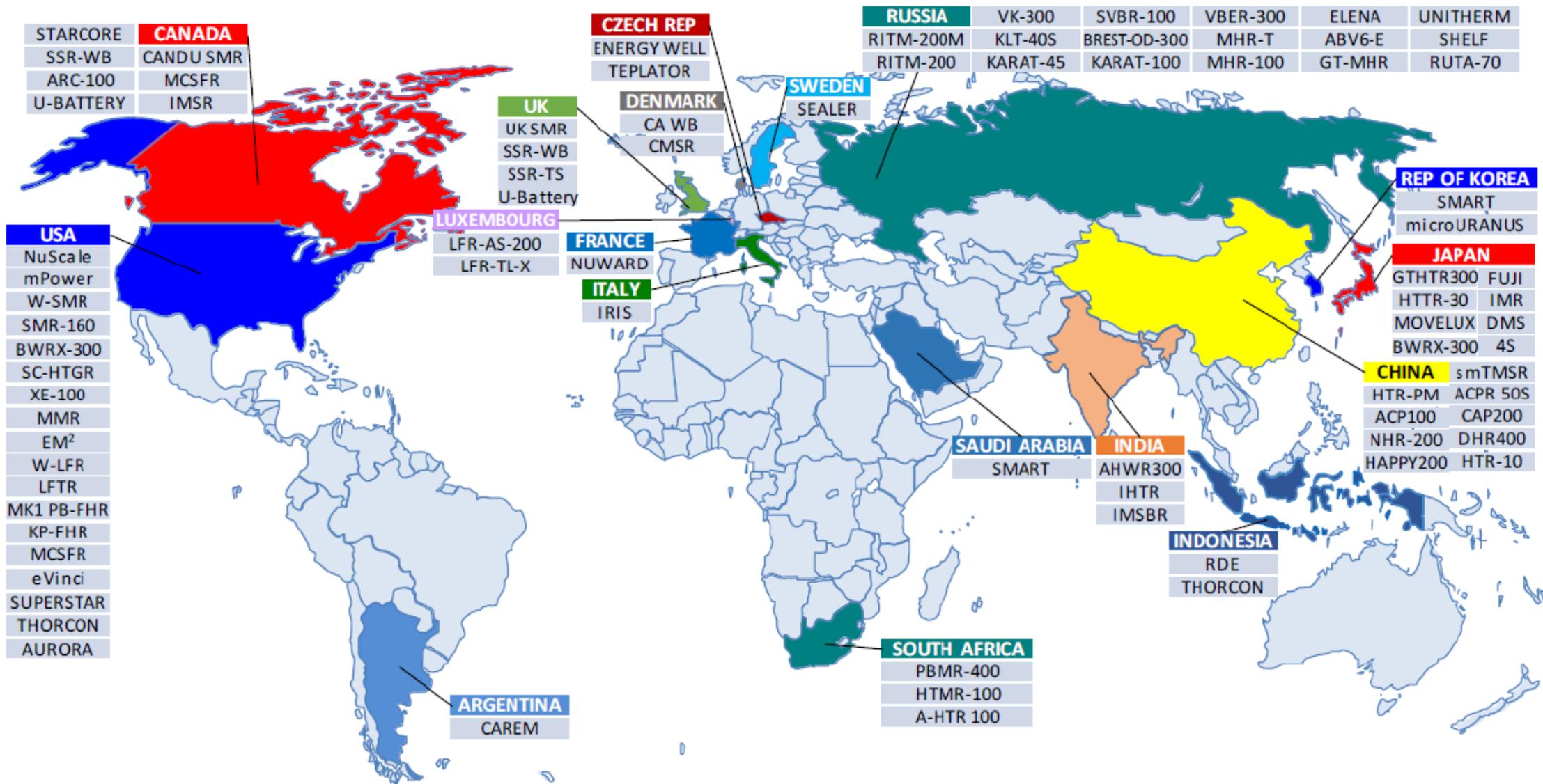
# LA DYNAMIQUE ACTUELLE

L'attrait pour les SMR continue de croître dans le monde même si ces modèles doivent prouver leur maturité industrielle et commerciale

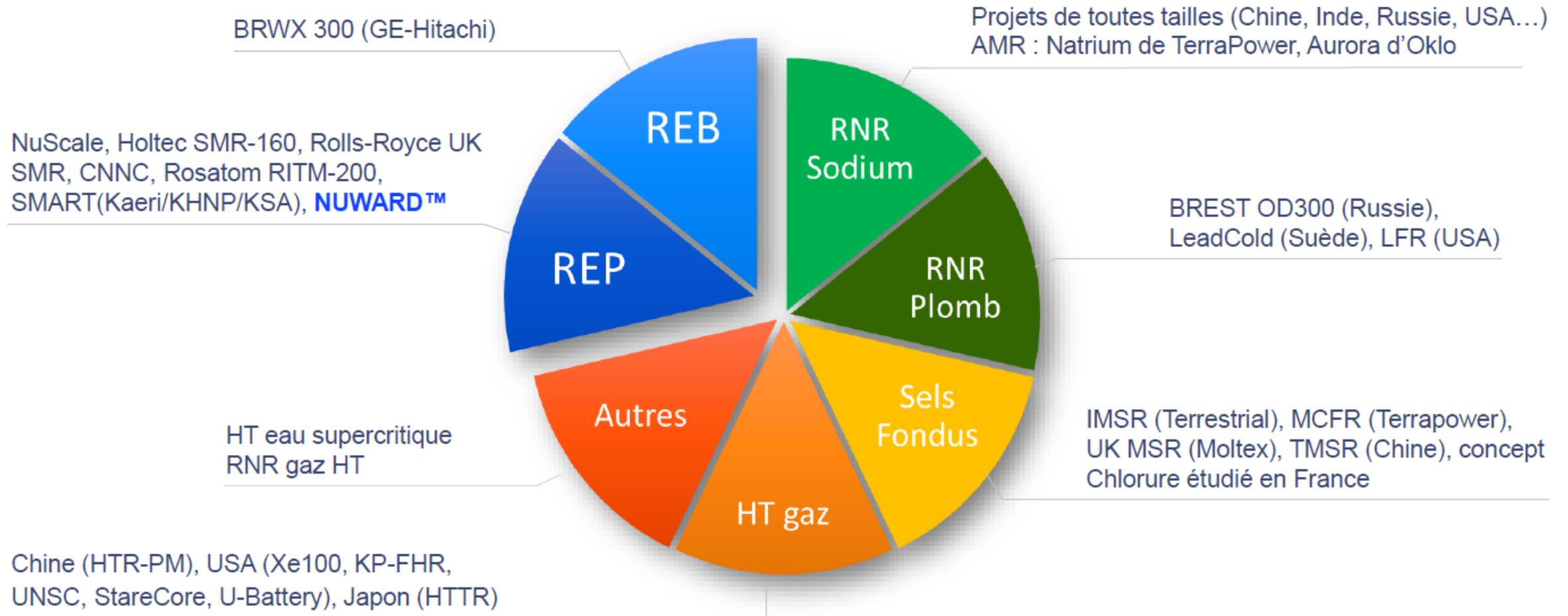
- La Russie exploite déjà une barge flottante en Sibérie orientale
- La Chine construit un SMR terrestre de 100 MWe (ACP 100) et a déjà mis en service un prototype HTGR
- Le SMR le plus avancé commercialement est celui de Nuscale même si le premier exemplaire ne sera mis en service aux États-Unis qu'en 2029.
- Le Royaume Uni et la France envisagent leur premier démonstrateur d'ici 2030
- **De nombreux pays instruisent l'option SMR** dans leur trajectoire énergétique sans CO2 au Canada (roadmap concertée avec les industriels), aux USA mais aussi en Europe (UK, Roumanie, Rep Tchèque, Pologne, Estonie, etc.) ;
- **Le potentiel des SMR est soutenu par des financements publics massifs** de l'innovation dans un contexte de forte concurrence complétés par des investissements privés
- **De nouveaux acteurs (start ups )** apparaissent dans le monde de l'industrie nucléaire.



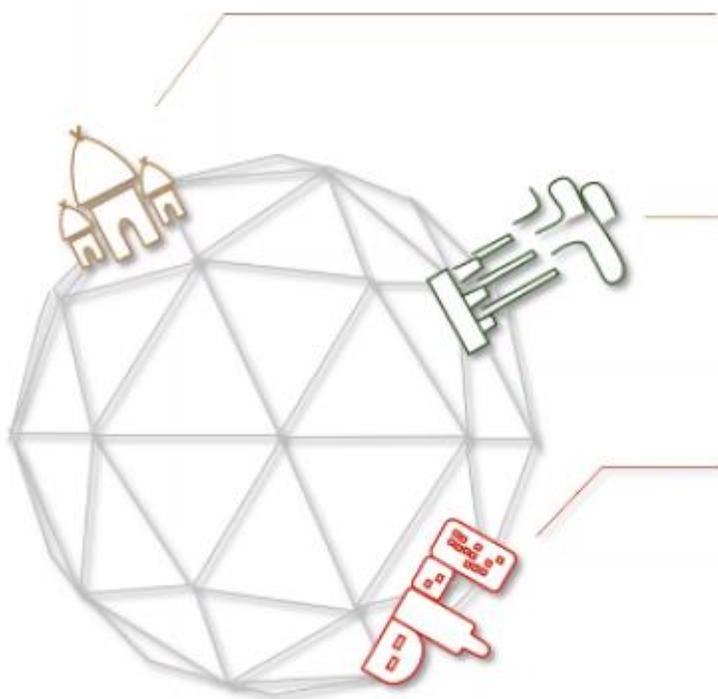
# PANORAMA DES SMR EN DEVELOPPEMENT DANS LE MONDE



# LE FOISONNEMENT DE TECHNOLOGIES



# L'HETEROGENEITE DE TAILLE



**5 à 15 MWe** à destination des besoins hors réseau comme des communautés isolées ou des bases militaires.

**15 à 200 MWe**, vers des usages chaleur ou/et électricité de sites industriels intensifs en énergie, tels que les mines ou l'extraction de gaz et de pétrole, voire de la production d'hydrogène.

**~ 200 à 400 MWe pour la production d'électricité sur des réseaux :**

- Remplacement des centrales existantes au charbon ;
- Electrification de villes de taille moyenne et de pôles industriels isolés ;
- Réseaux de capacité insuffisante pour des puissances supérieures.

# LA COMPETITIVITE DES SMR

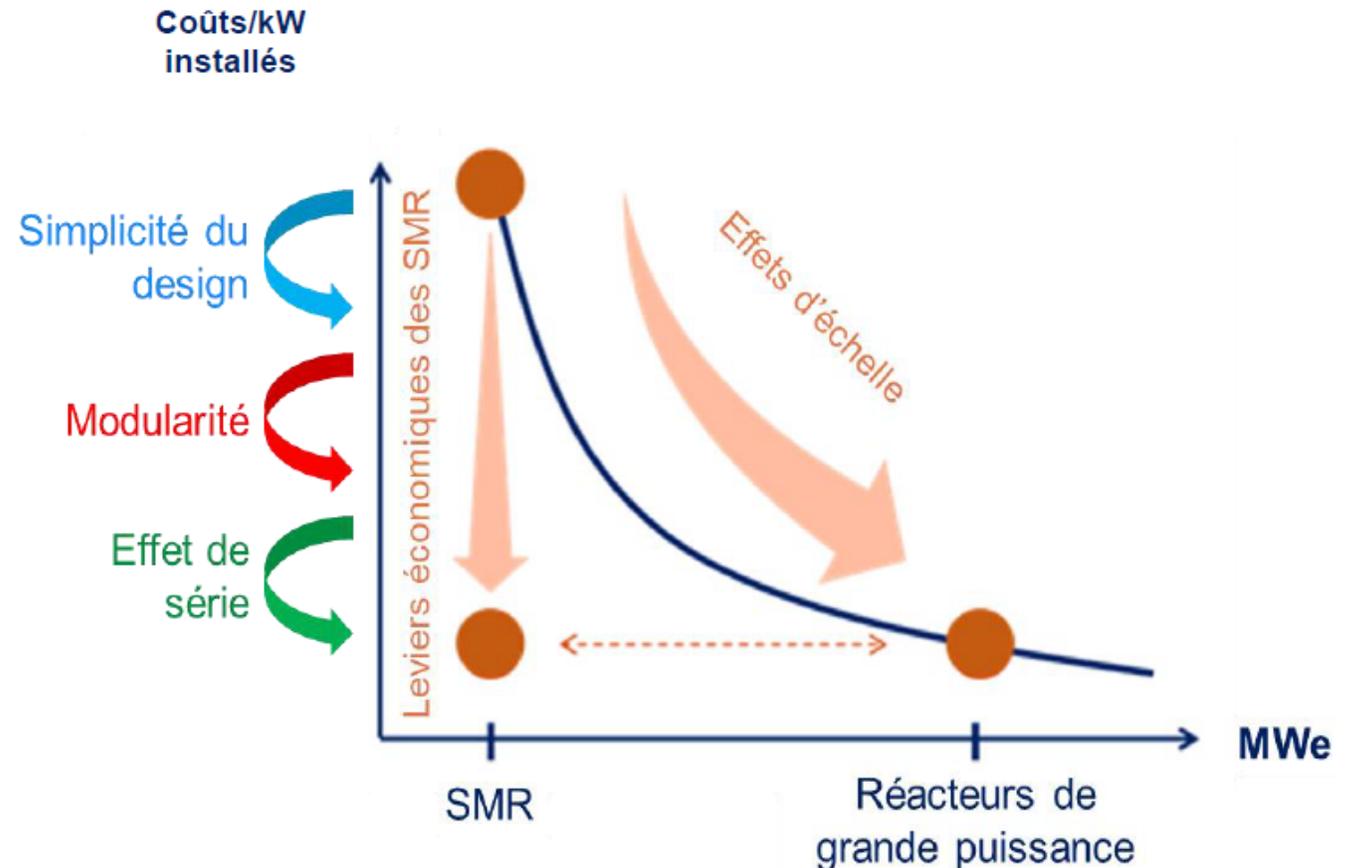
Tous les modèles SMR ont en commun de chercher les avantages d'une taille de réacteur plus modeste, en compensant les pertes d'économies d'échelle, même si la promesse économique est encore à tenir.

Une conception **plus simple** grâce à une taille plus modeste.

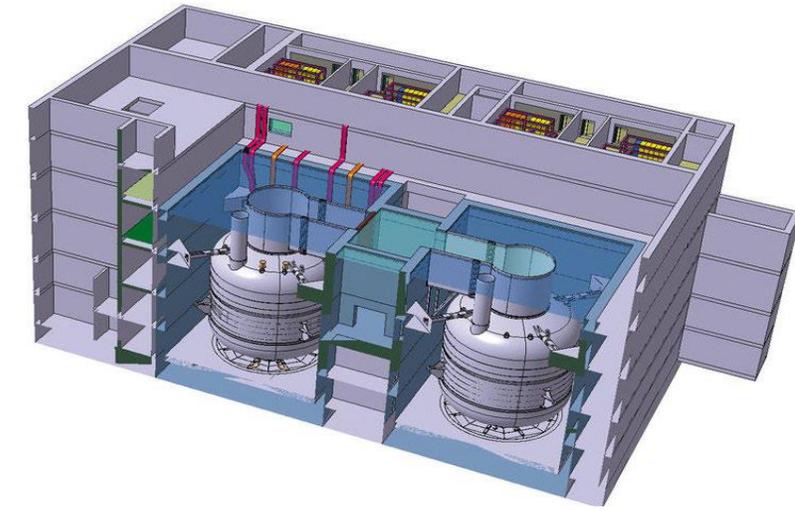
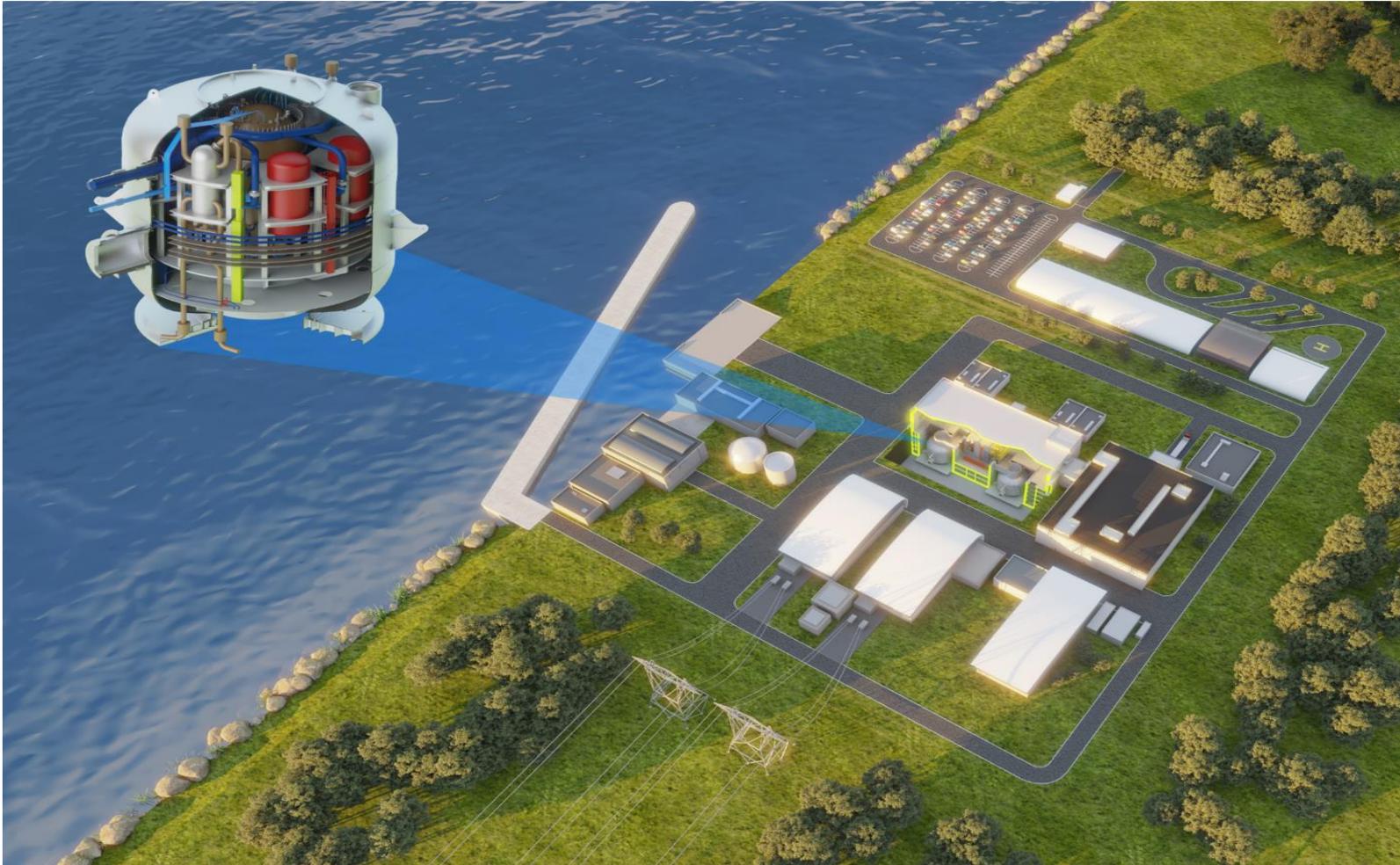
Une conception **modulaire** pour réduire les durées et les risques de chantier.

Une **standardisation** forte qui autorise les effets de série (usine & chantier).

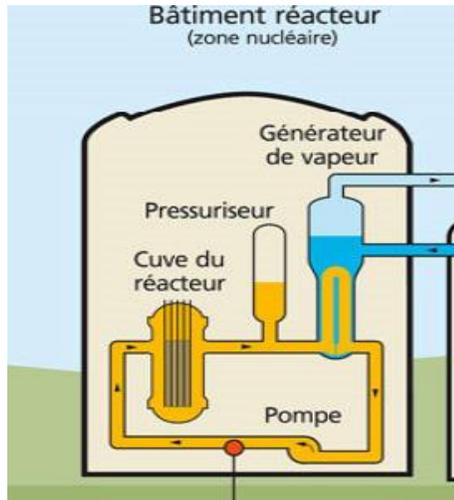
Des dispositifs de **sûreté passive**.



# LE PROJET FRANCAIS NUWARD™

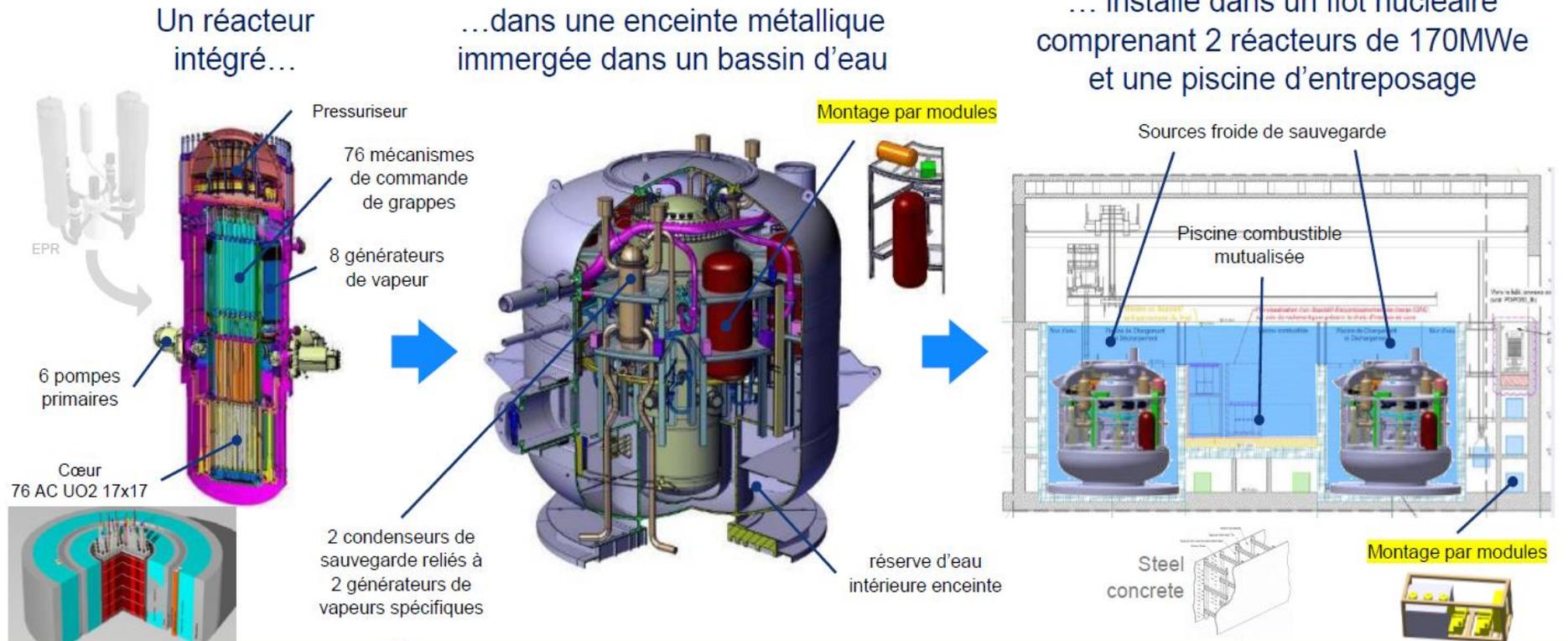


# LA DESCRIPTION DU PRODUIT



Un REP classique

## Le produit NUWARD™



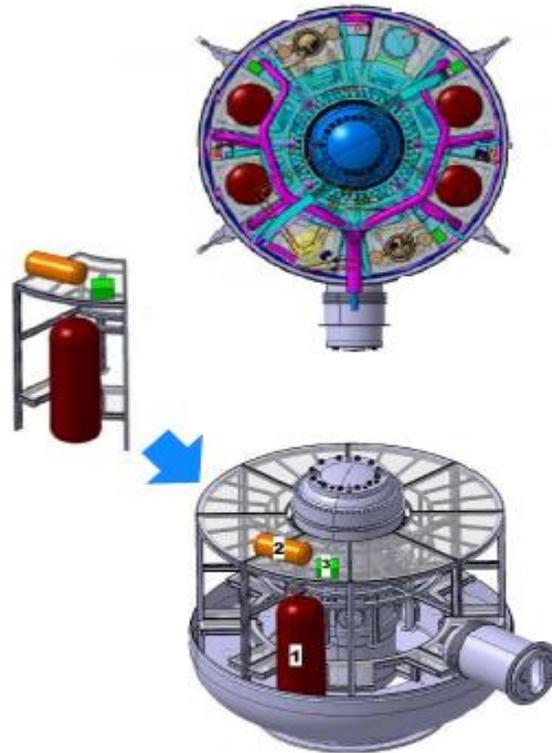
Une centrale de 340 MWe comprenant 2 réacteurs intégrés

# LA STANDARDISATION

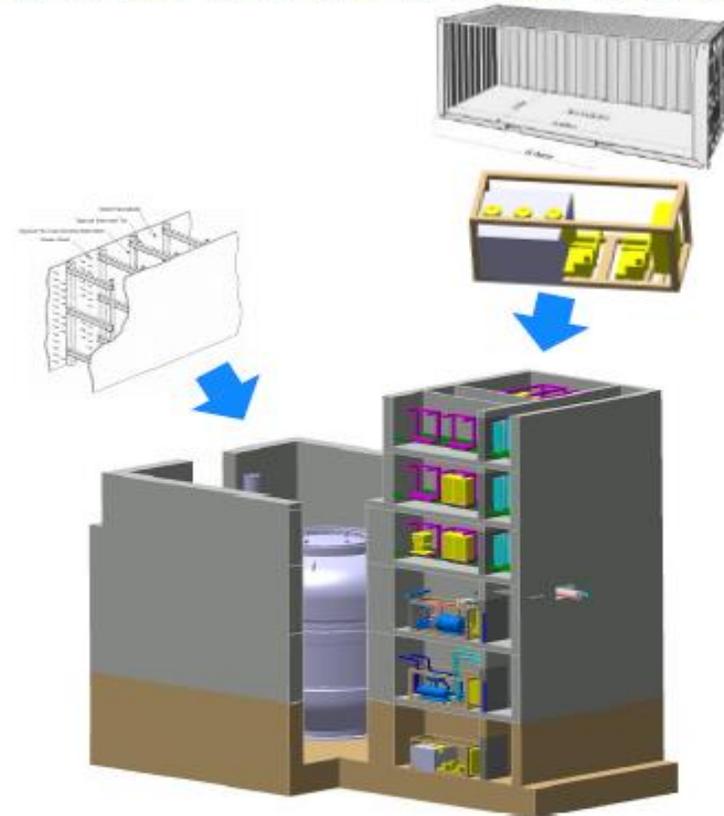
## Principes de modularité



**Enceinte et cuve**  
Assemblage sur site  
Transport non standard



**8 modules enceinte**  
Testés en usine  
Transport catégorie 2



**Modules BNI, CI et BOP**  
Testés en usine  
Transport standard skids 20'

# LE PLANNING DE DEVELOPPEMENT DU PROJET

NUWARD™ : un planning de développement qui s'appuie sur des acteurs et des savoir-faire industriels robustes



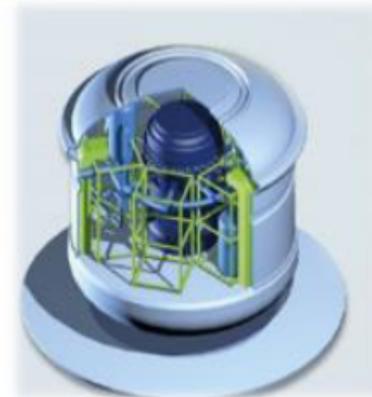
**Avant-Projet Sommaire + préparation  
au pré-licensing 2019-2022**



**Avant-Projet Détaillé, études détaillées  
et licensing**



**Commercialisation  
1er béton en France en 2030**



**Mise sur le marché du produit NUWARD™ à l'horizon 2030**

# L'OUVERTURE A LA COOPERATION EUROPEENE

Comité consultatif **INAB**  
(International NUWARD Advisory Board)

**Multi-usages** : cogénération, H<sub>2</sub>,  
désalinisation...

**Soutien financier** public : 50M€  
pour l'APS dans le cadre du Plan  
de Relance + 450 à 500M€ pour  
les phases suivantes dans le  
cadre de France 2030

**Centrale de référence en France  
à l'horizon 2030**

Cibler au  
mieux les  
attentes des  
clients

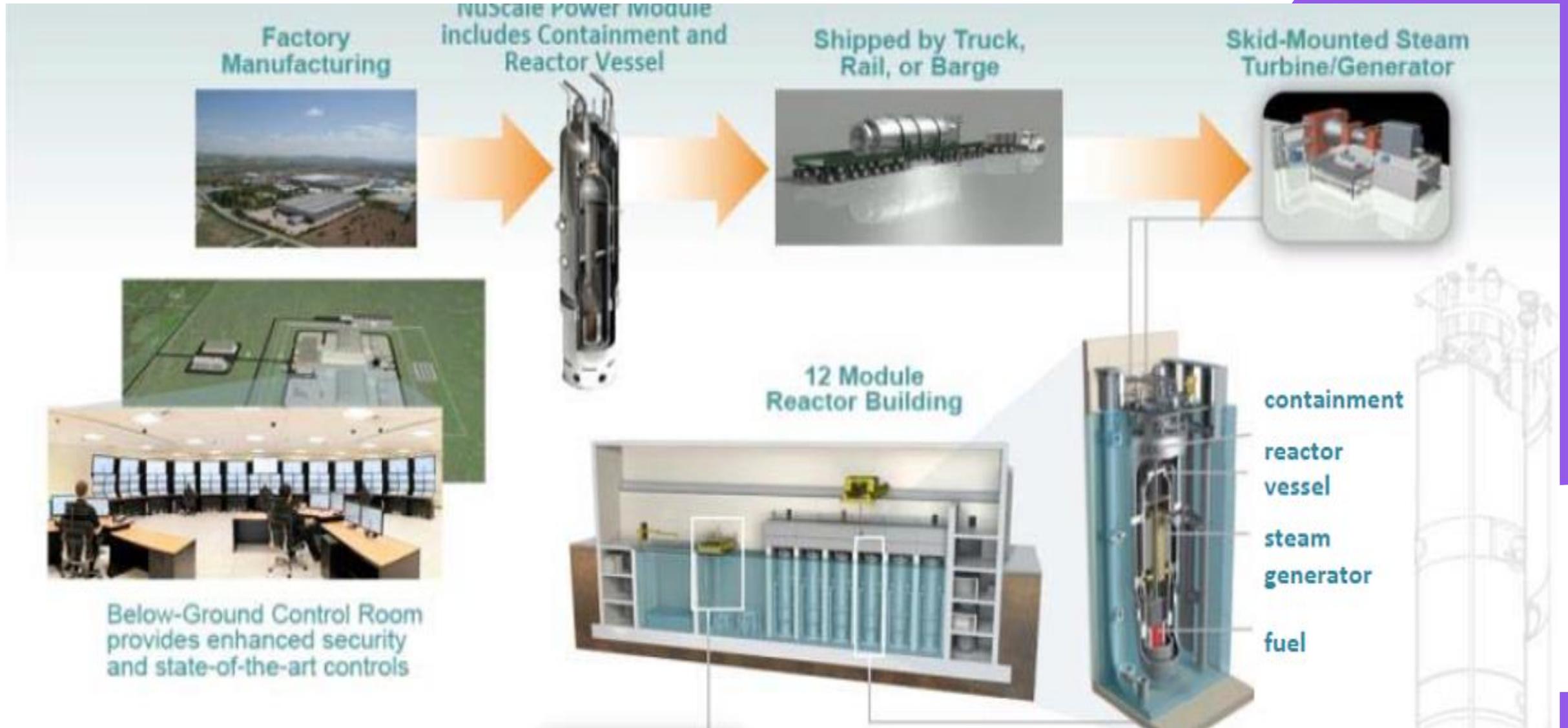
Sécuriser  
l'orientation  
export

Soutien  
institutionnel  
en France et  
en Europe

Développer  
un schéma  
industriel  
européen

- **Cible prioritaire** : pays européens devant fermer un parc fossile important
- Démarche lancée avec l'**ASN**, **STUK** et **SUJB** d'évaluation **conjointe** des options de design de NUWARD™
- **Collectif projet renforcé avec les partenaires**
- Recherche active de **partenaires européens** (design, fabrication, projets)

# LE PROJET NUSCALE (USA): un projet multi modules



# LE PROJET NUSCALE : un projet multi modules

## *A new scale for nuclear power*

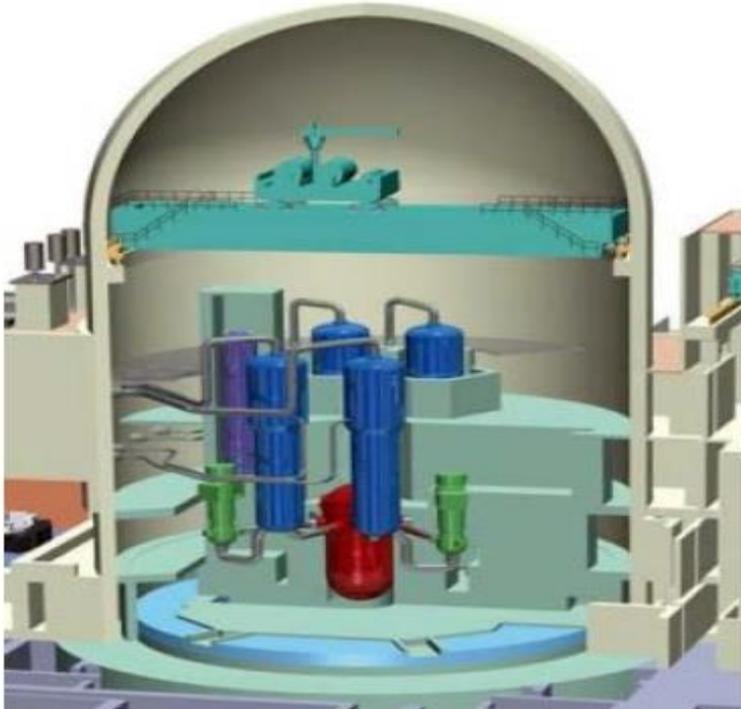


- **Réacteur intégré d'une puissance unitaire de 77 MWe**
  - 2 GV à tubes hélicoïdaux,
  - absence de pompes primaires  $\Rightarrow$  circulation naturelle
  - cuve :  $\varnothing$  2,7 m - hauteur 19,8 m
- **Systemes de sûreté passifs**
- **Coeur**
  - assemblages 17x17 - 1,8 m (6 ft)
  - contrôle réactivité : grappes de contrôle + bore soluble,
  - longueur de cycle 2 ans
- **Enceinte de confinement métallique  $\varnothing$  4,6 m / hauteur 25 m**  
immergée dans une piscine enterrée à l'intérieur du BR
- **Configuration : jusqu'à 12 modules unitaires (924 Mwe)**



# LE PROJET NUSCALE : la compacité

**Typical Pressurized-Water Reactor  
Containment & Reactor System**

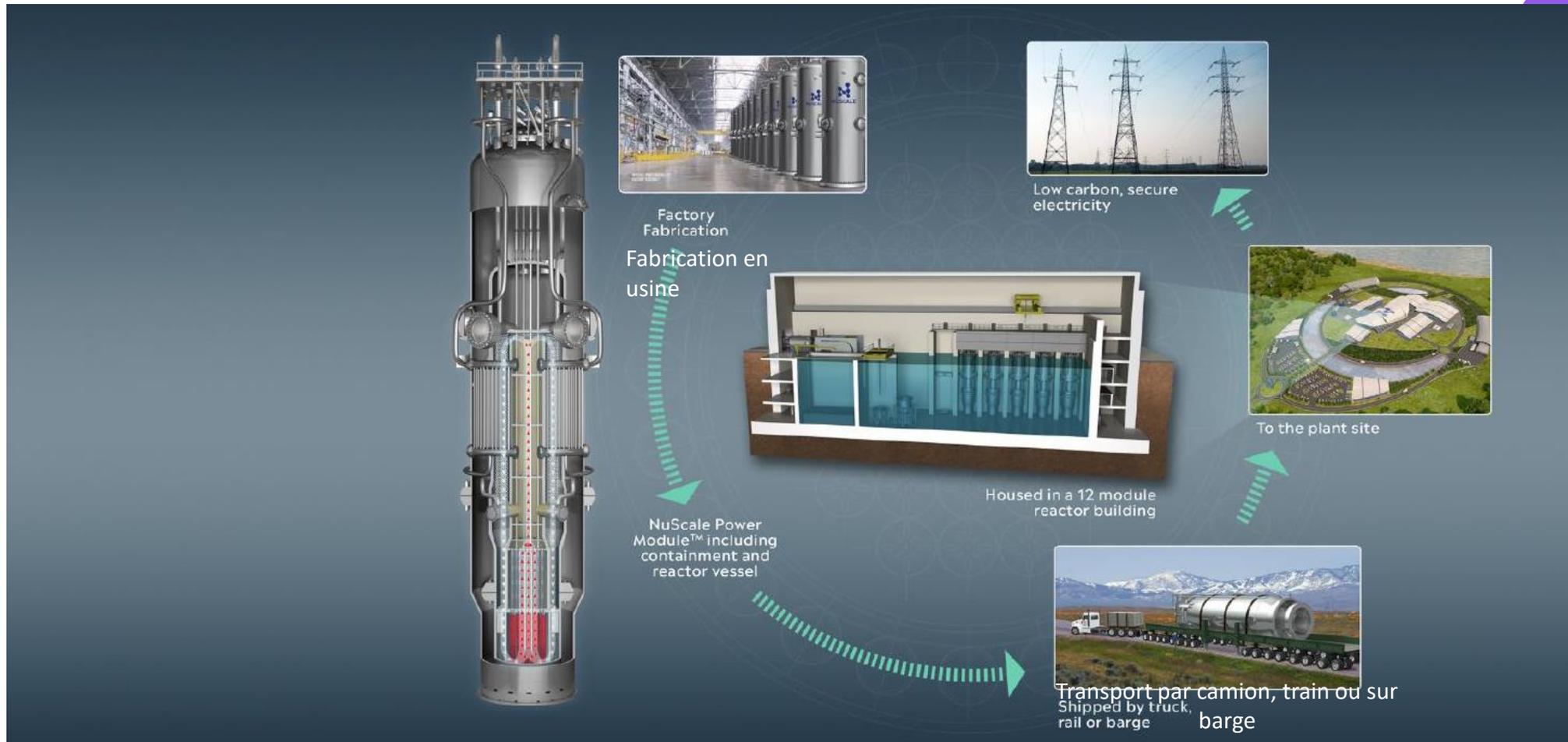


**NuScale Power Module  
Combined Containment Vessel and  
Integral Reactor System**

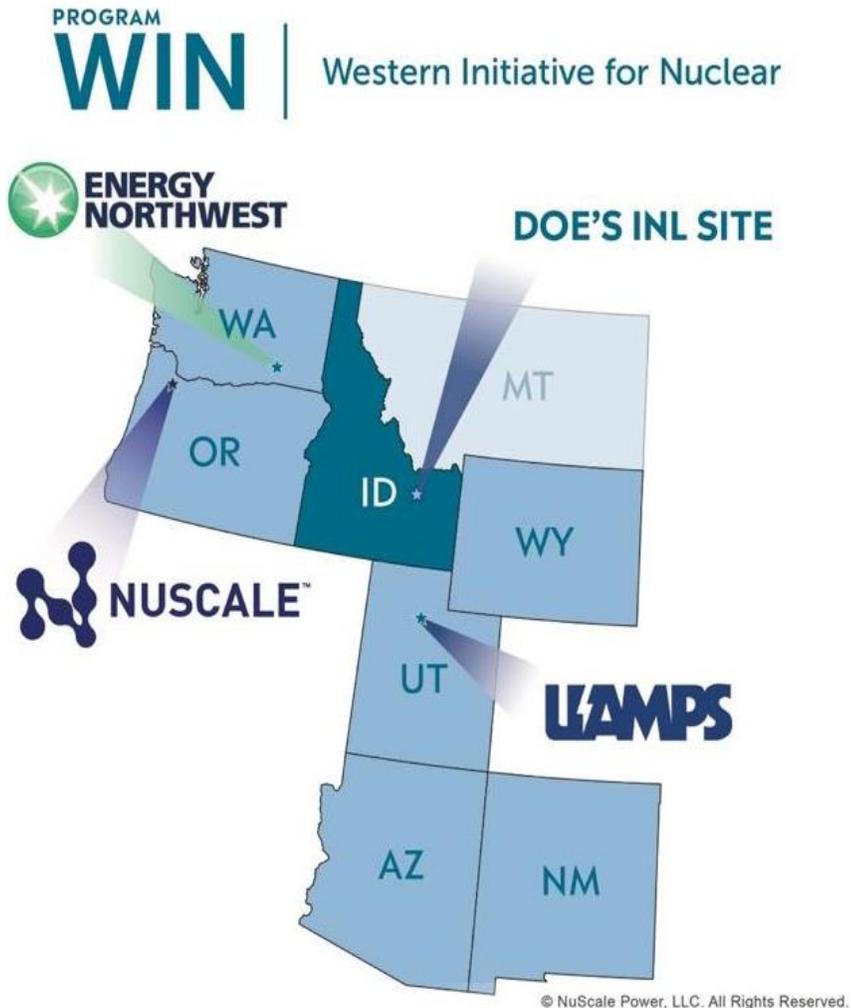


Comparaison de taille entre REP de forte puissance et SMR Nuscale

# LE PROJET NUSCALE : la modularisation



# LE PROJET NUSCALE : le déploiement



- Le premier déploiement se fera dans le cadre de l'**Idaho National Laboratory (INL)**
- Le premier module sera destiné à la R&D , le deuxième fournira de l'électricité à l'INL
- La mise en service du premier module est prévue **en 2029** .
- L'entreprise **Fluor** est l'investisseur principal sachant que le projet a bénéficié d'un important soutien financier du DOE.

# LES PROJETS CANADIENS

## 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

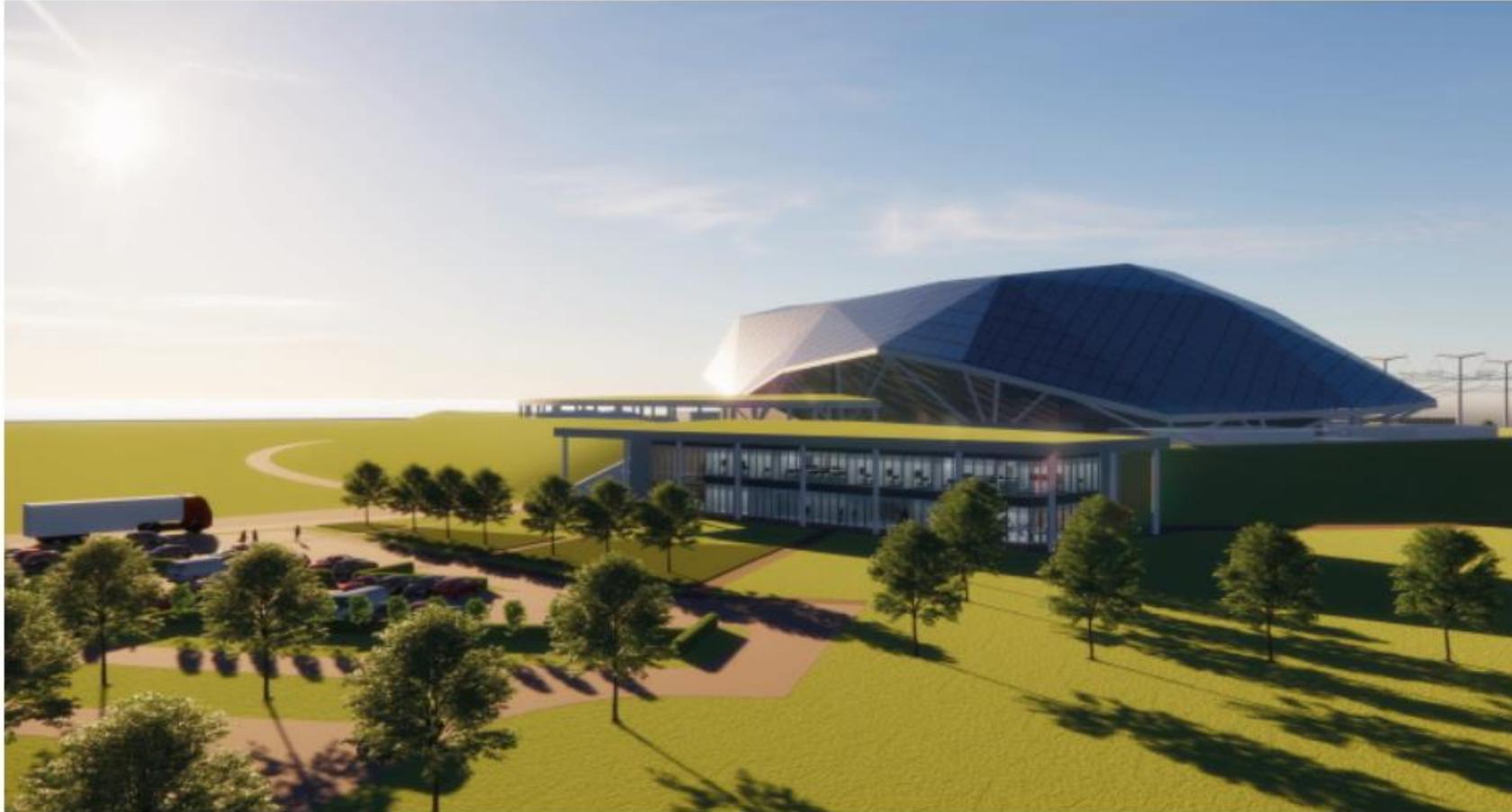
Ontario's nuclear know-how is helping lead the way for this real solution to climate change.

*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**

# LE PROJET ROLLS ROYCE (UK)



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

- Un SMR de type REP de 470MWe en cours de développement mais de conception mature
- Objectif : un premier démonstrateur en 2030 au UK sur un site existant
- Vise l'export du modèle en Europe (Pays Bas) mais aussi le remplacement de centrales fossiles au UK

# LES PROJETS CHINOIS

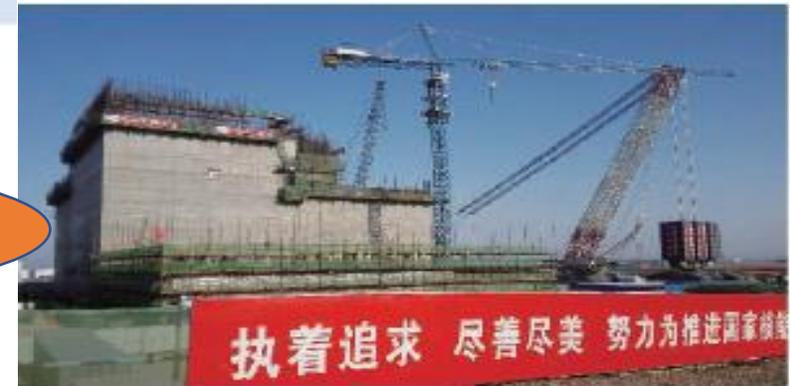
Entreprise	Réacteur	Type	Puissance	Utilisation
CGN	ACPR-50	REP	60 MWe	Electricité, Maritime
CNNC	ACP-100	REP	125 MWe	Electricité, Terrestre
CGN	NHR-200-II	REP	200 MWt	Chauffage
CNNC	DHR-400	REP	400 MWt	Chauffage
SPIC	Happy 200	REP	200 MWt	Chauffage
CNNC	HTR-PM	RGHT	250 MWt / 105 MWe	Electricité / Industrie

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



ACP 100  
En construction

HTR-PM  
Divergence en 2021



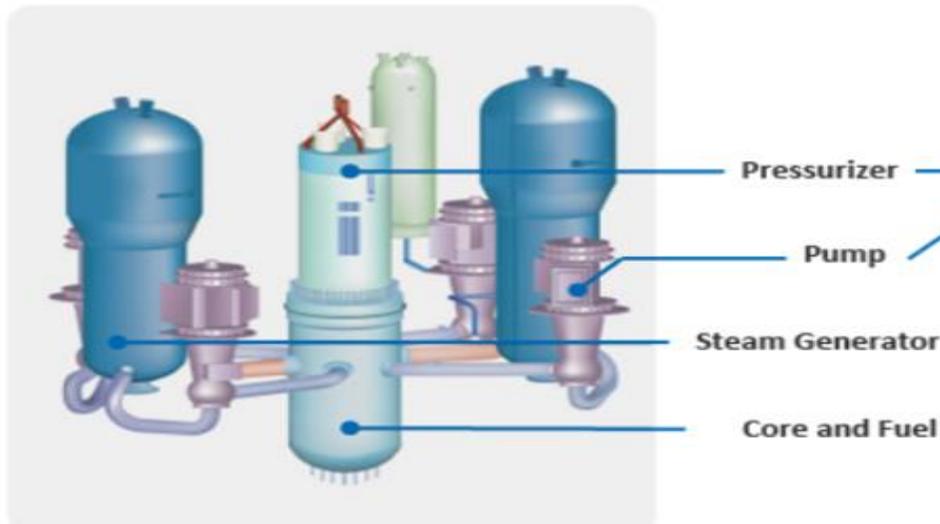
# LE PROJET SUD COREEN : SMART

## System-Integrated Modular Advanced Reactor

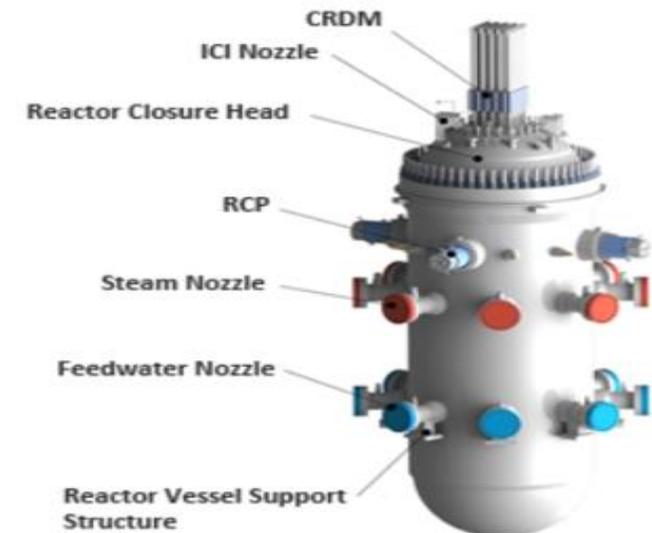
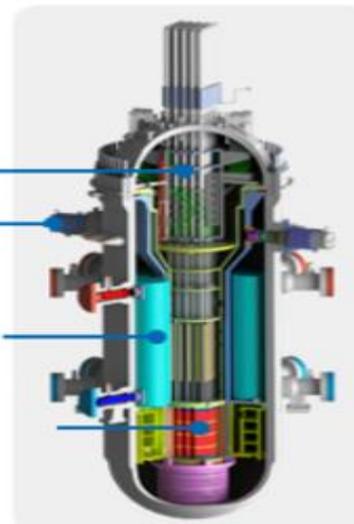
Key data	
Reactor Type	Integral PWR (8 steam generators, 4 primary pumps)
Design life	60 years
Thermal capacity	365 MW
Electrical capacity	110 MW
Core	57 Fuel assemblies-17*17 Square (UO <sub>2</sub> )
Refueling Cycle	30~36 months
Reactor Vessel	Height 18.5m, Diameter 5.99m
Plant Footprint	90 000 m <sup>2</sup>



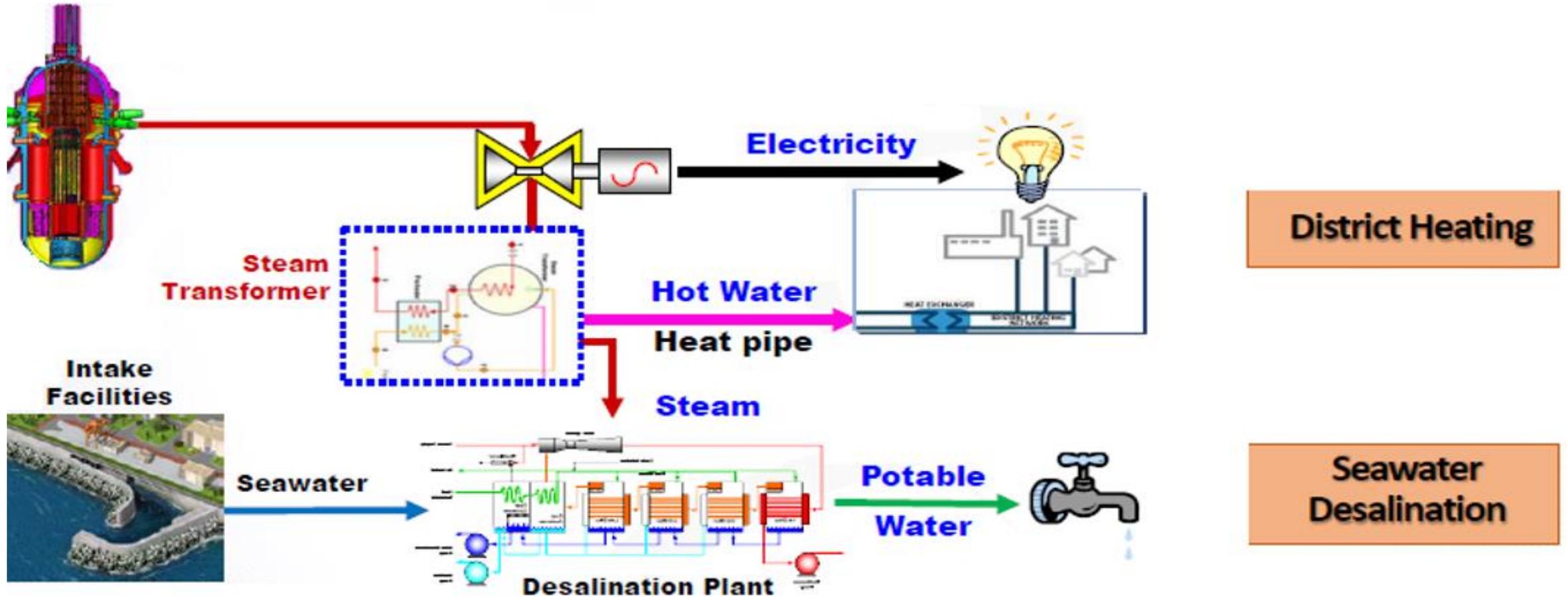
Conventional Type



SMART



# LE PROJET SUD COREEN : SMART



**Electricity and Water for a City of 100,000 ~ 500,000 Population**

# LES PROJETS RUSSES

Des projets aboutis pour des marchés de niches :

- Des barges flottantes pour alimenter des sites isolés en remplacement de centrales thermiques vieillissantes (Sibérie orientale) ou pour alimenter des brise – glaces



**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

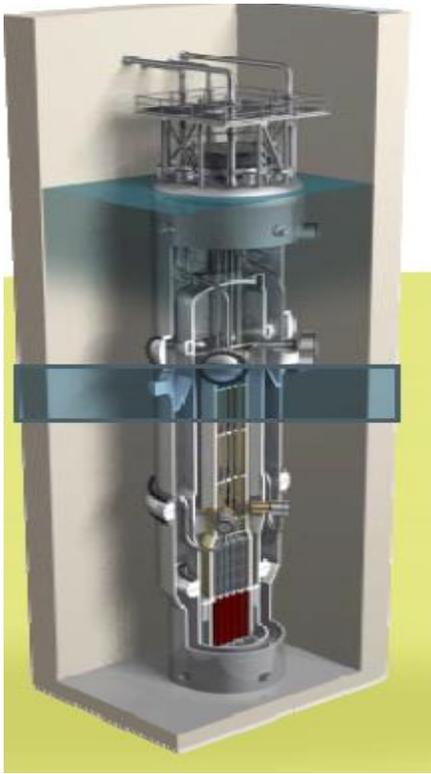
**TECHNICAL PARAMETERS**

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

# CONCLUSION

- Dans un contexte de besoins croissants en électricité, le nucléaire, en complément des énergies renouvelables intermittentes, permet une production pilotable et décarbonée.
- En complément des réacteurs de forte puissance, les SMR permettent de répondre à des besoins spécifiques et offrent de multiples usages.
- Le marché des SMR est encore flou mais les projets foisonnent dans le monde tant en terme de tailles que de technologies de réacteurs.
- Les plus matures restent les modèles à eau pressurisée dont fait partie le projet Français NUWARD <sup>TM</sup> conçu par un consortium et piloté par EDF. Ce projet permet à la France d'être présente sur ce marché avec un produit innovant destiné à l'export après la construction d'un démonstrateur en France vers 2030.



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

DES QUESTIONS ?



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

