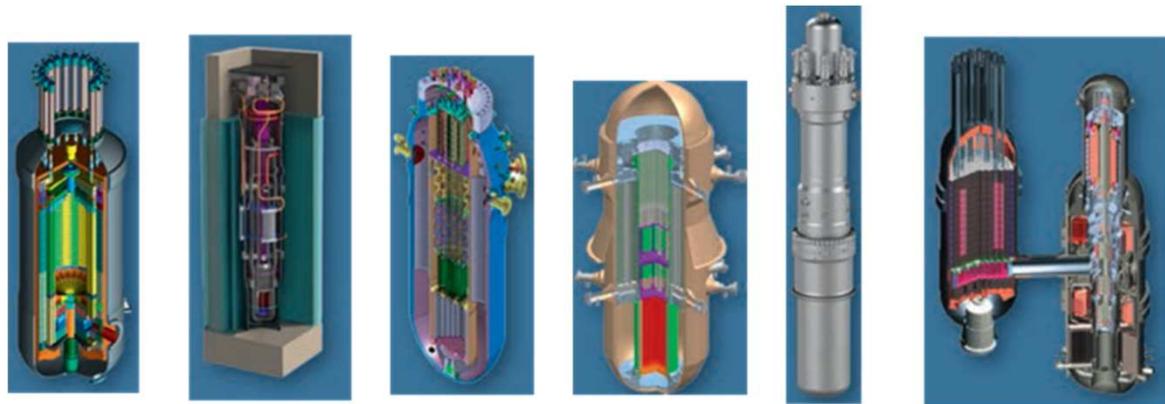


Les SMR

Les différents modèles

L'approche française

JACQUES CHÉNAIS



Contexte

- **Demande énergétique croissante et contraintes climatiques**

- L'approvisionnement en énergie: un enjeu politique, économique et environnemental pour l'avenir de la planète.
- Le Nucléaire source décarbonée: une solution incontournable avec les énergies renouvelables.



- **Large déploiement des réacteur à eau légère**

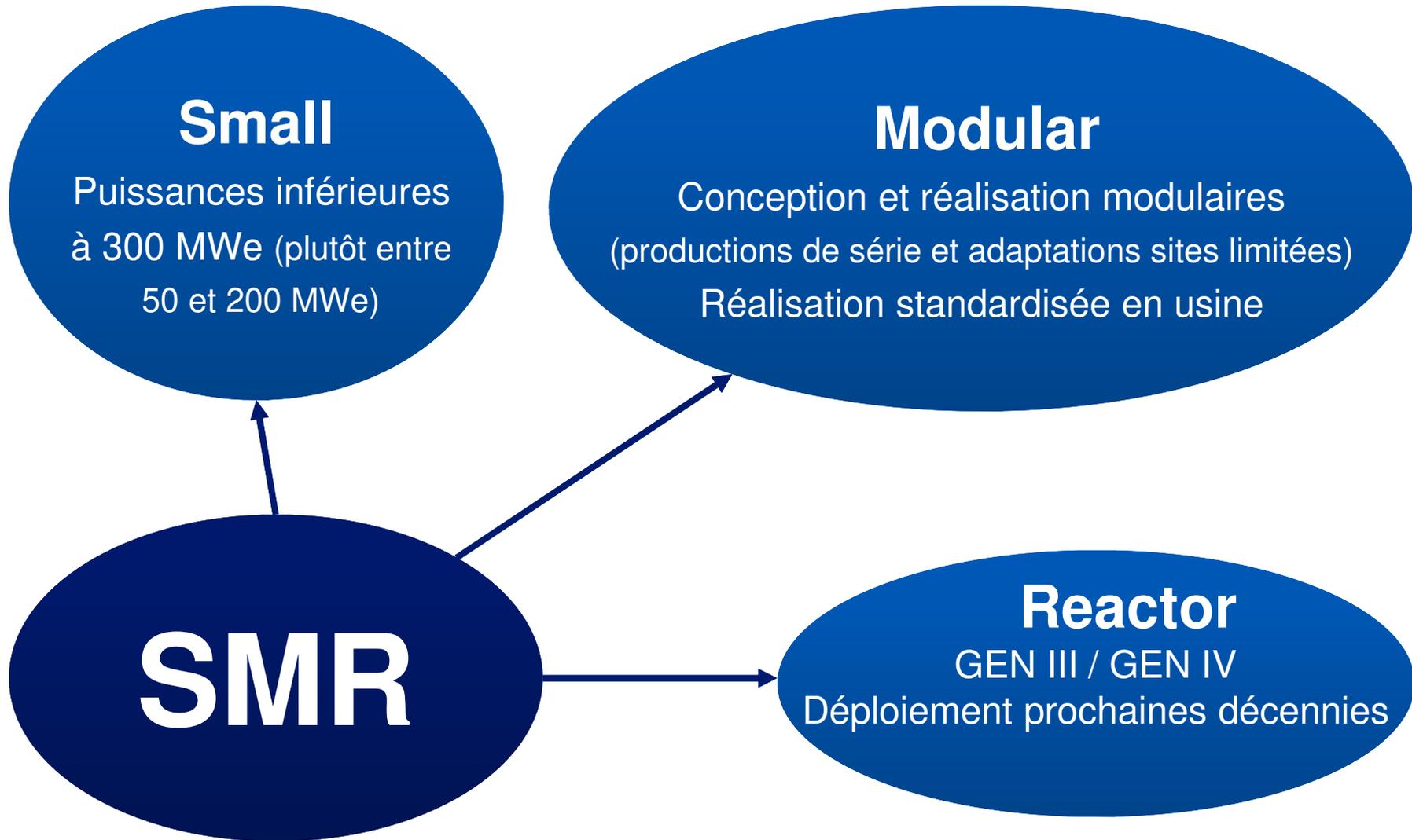
- Développement en parallèle pour les centrales électrogènes et la propulsion navale militaire (des REP pour l'essentiel).
- Le facteur d'échelle a conduit au développement de réacteurs de forte puissance pour la production d'électricité mais trouve ses limites



- **Un marché potentiel pour des petites unités nucléaires si prise en compte des :**

- Contraintes de taille de réseau et contraintes économiques des Etats/Opérateurs pour la production électrogène
- Besoins spécifiques pour sites isolés, la production de chaleur, la production d'eau douce,...
- Besoins d'unités plus manoeuvrantes (du fait des intermittents)
- **Exigences de sûreté et de compétitivité**

Une nouvelle conception de réacteur



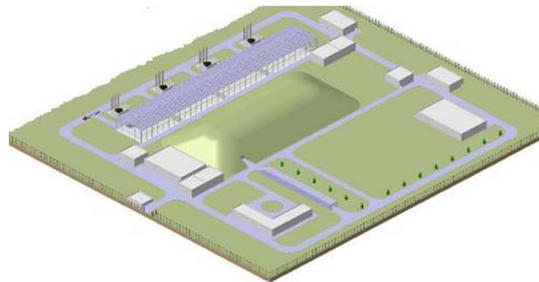
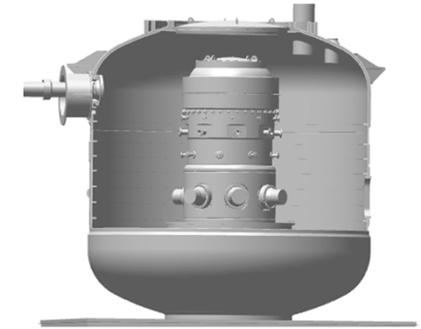
Intérêt des SMR

- **Faible puissance permettant une conception simple et sûre**

- Architecture compacte et simplifiée, limitant les initiateurs et scénarios d'accidents
- Puissance résiduelle limitée, systèmes passifs

- **Un réacteur modulaire, pour une construction plus aisée**

- Modules en nombre limité, fabriqués en usines spécialisées
- Réduction des contraintes de construction sur site
- Réduction de la durée de construction



- **Une production nucléaire abordable**

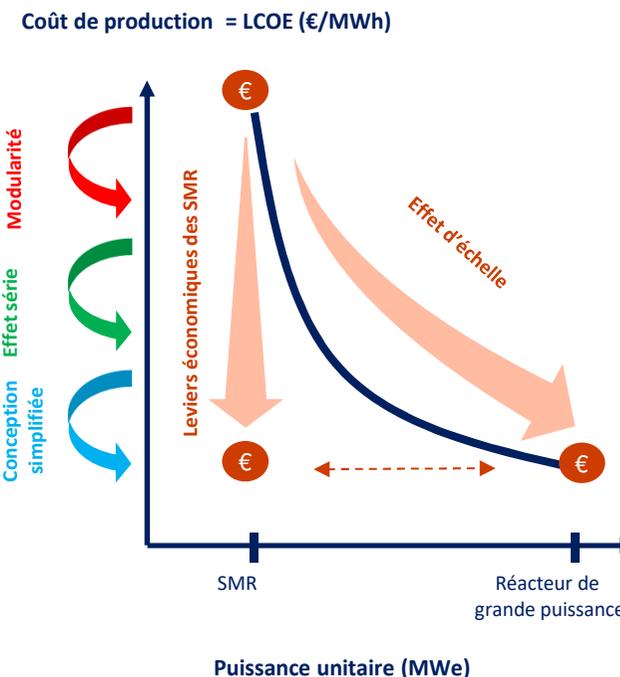
- Investissement modéré pour un réacteur
- Réduction des frais financiers avant la production de premiers MWh
- La production des premiers réacteurs finance la construction des suivants

- **Intégration dans le réseau**

- Du réacteur isolé à la centrale multi-réacteurs, selon les besoins
- Production multi-réacteurs flexible et manoeuvrante, adaptée à l'émergence des ENR intermittents

Challenges – défis à relever

- **Réacteur modulaire :**
 - Modules polyfonctionnels, fabriqués et testés en usine
 - Une réduction des risques liés à la construction sur site
 - **Effet de série :**
 - Production en série des équipements et modules, en usine
 - Standardisation des réacteurs et des composants
 - **Conception simplifiée d'un réacteur de petite taille**
 - Architecture compacte, simplifiée pour le fonctionnement en conditions normales et accidentelles, pour un niveau de sûreté équivalent
 - Un investissement réduit avant la production des premiers MWh
 - Empreinte réduite sur le site, environnement, réseau
- **Standardisation pour un développement international**
- Exigences réglementaires adaptées aux SMR et harmonisées entre pays
 - Certification des usines de fabrication



Des avantages spécifiques, en leviers économiques pour contrer l'effet d'échelle

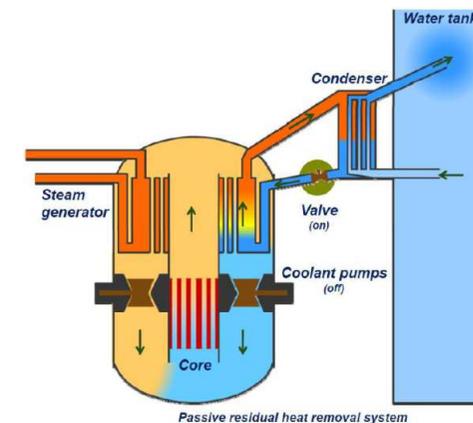
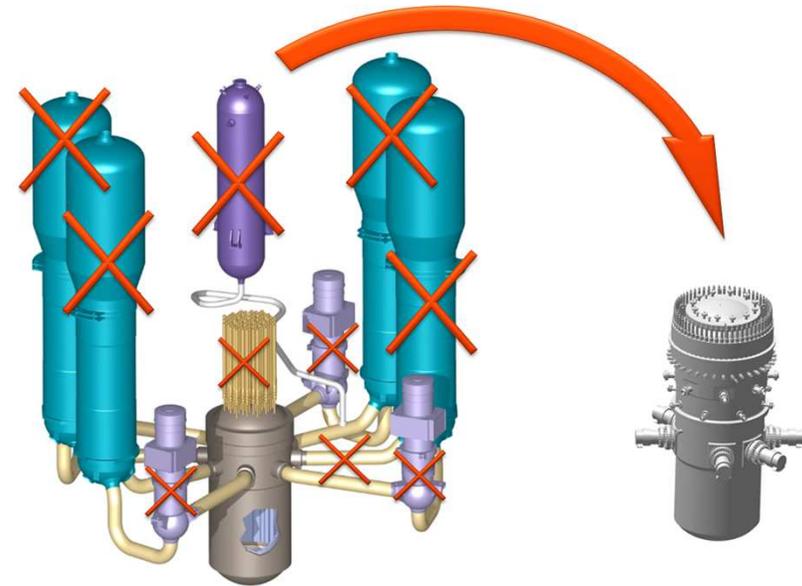
L'ouverture à un marché distinct de celui des gros réacteurs et potentiellement important



Solutions éprouvées et en rupture

- « **LWR v.s. non LWR** »
 - Offre très vaste, couvrant GEN III et GEN IV
 - La filière REP est la plus mature, la plus répandue, compatible avec une réalisation à court terme
 - Elle dispose d'un tissu industriel établi, mondial et concurrentiel (supply chain, construction, exploitation, cycle du combustible)
- **Réacteur intégré**
 - Tous les composants primaires sont intégrés au réacteur
- **Sûreté**
 - Exigences GEN III+, Fukushima
 - Résistance aux agressions
 - Systèmes passifs de sûreté, délai opérateur important
 - Gestion des accidents graves (EPZ limitée aux barrières du site)

VERS UN RÉACTEUR INTÉGRÉ



Exemples de SMR technologie GHTR

Source AIEA Tunis Octobre 2017

HTR-PM

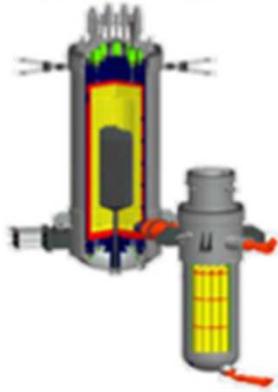


Image Courtesy of INET, China

Modular Pebble Bed High Temperature Gas Cooled Reactor

Helium/Graphite cooled

- 210 MW(e) / 500 MW(th)
- Core Outlet Temp: 750°C
- Fuel Enrichment: 8.5% UO₂ TRISO coated particle
- No. of fuel spheres: 420,000 /module
- Modules per plant: 2
- Advanced stage of construction- **expected to be commissioned by 2018**

GTHTR300

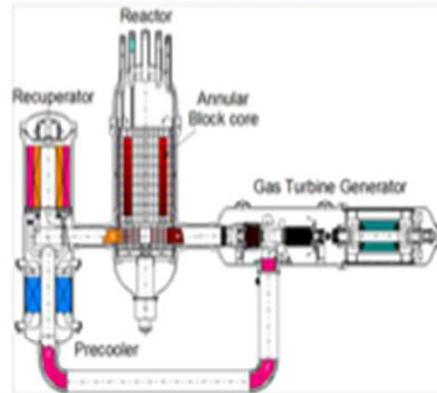


Image Courtesy of JAEA, Japan

Prismatic High Temperature Gas Cooled Reactor

Helium/Graphite cooled

- 100-300 MW(e) / 600 MW(th)
- Core Outlet Temp: 850-950°C
- Fuel Enrichment: 14 % UO₂ TRISO ceramic coated particle
- Fuel temperature limit: 1600°C
- Modules per plant: 4
- Inherent safety features
- Multi-purpose application: power generation, hydrogen production, process heat, steelmaking, desalination and district heating

HTMR100



Image Courtesy of STL, South Africa

High temperature Gas Cooled Reactor

Helium cooled / graphite moderated

- 35 MW(e) / 100 MW(th) per module
- Core Outlet Temp: 750°C
- Fuel Enrichment: 15% Th/Pu, <10% U₂₃₅ Th/LEU and Th/HEU
- Module per plant: (4-8) pack
- Number of Fuel units: ~150,000 pebbles
- Better load following capability and flexibility in multi-module configuration

EM²

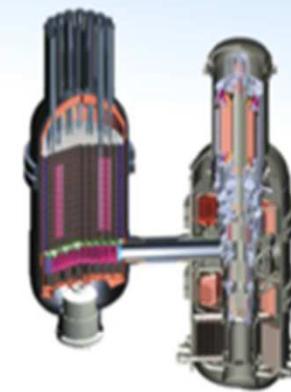


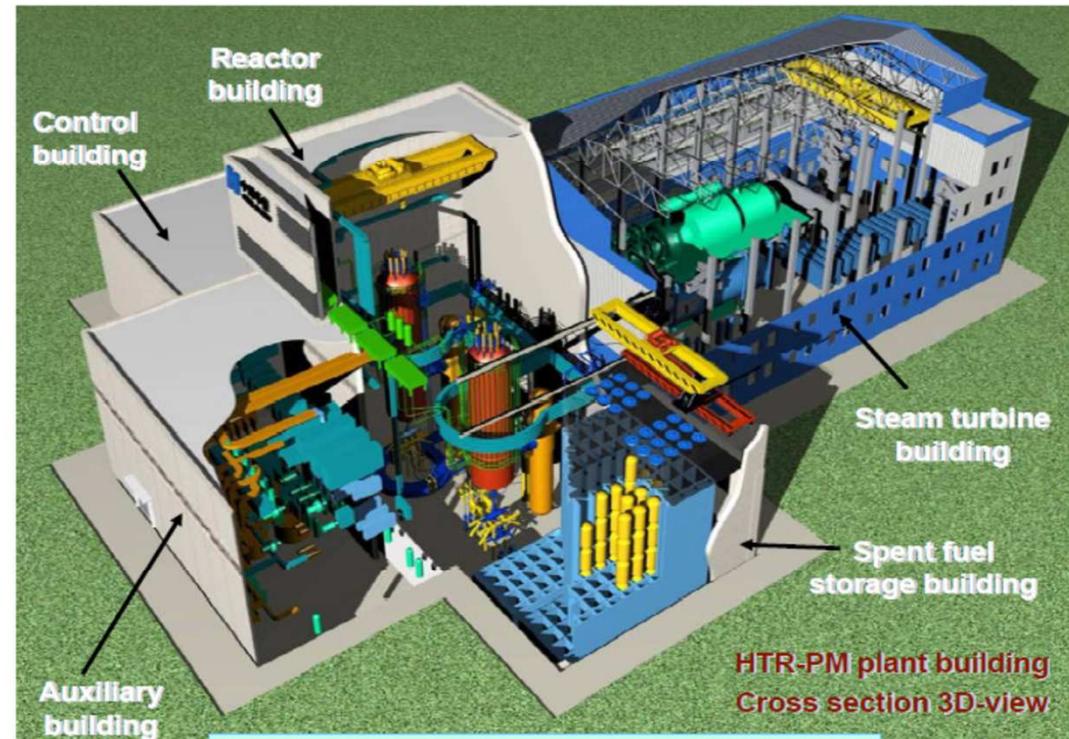
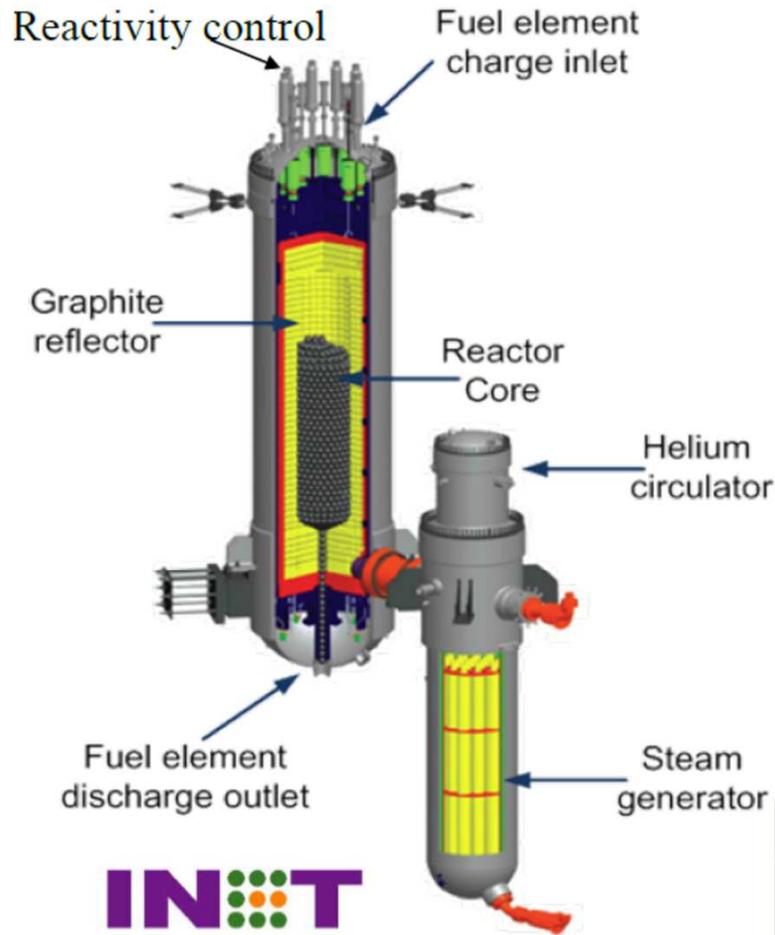
Image Courtesy of General Atomics, USA

High Temperature Gas Cooled Fast Reactor

Helium cooled

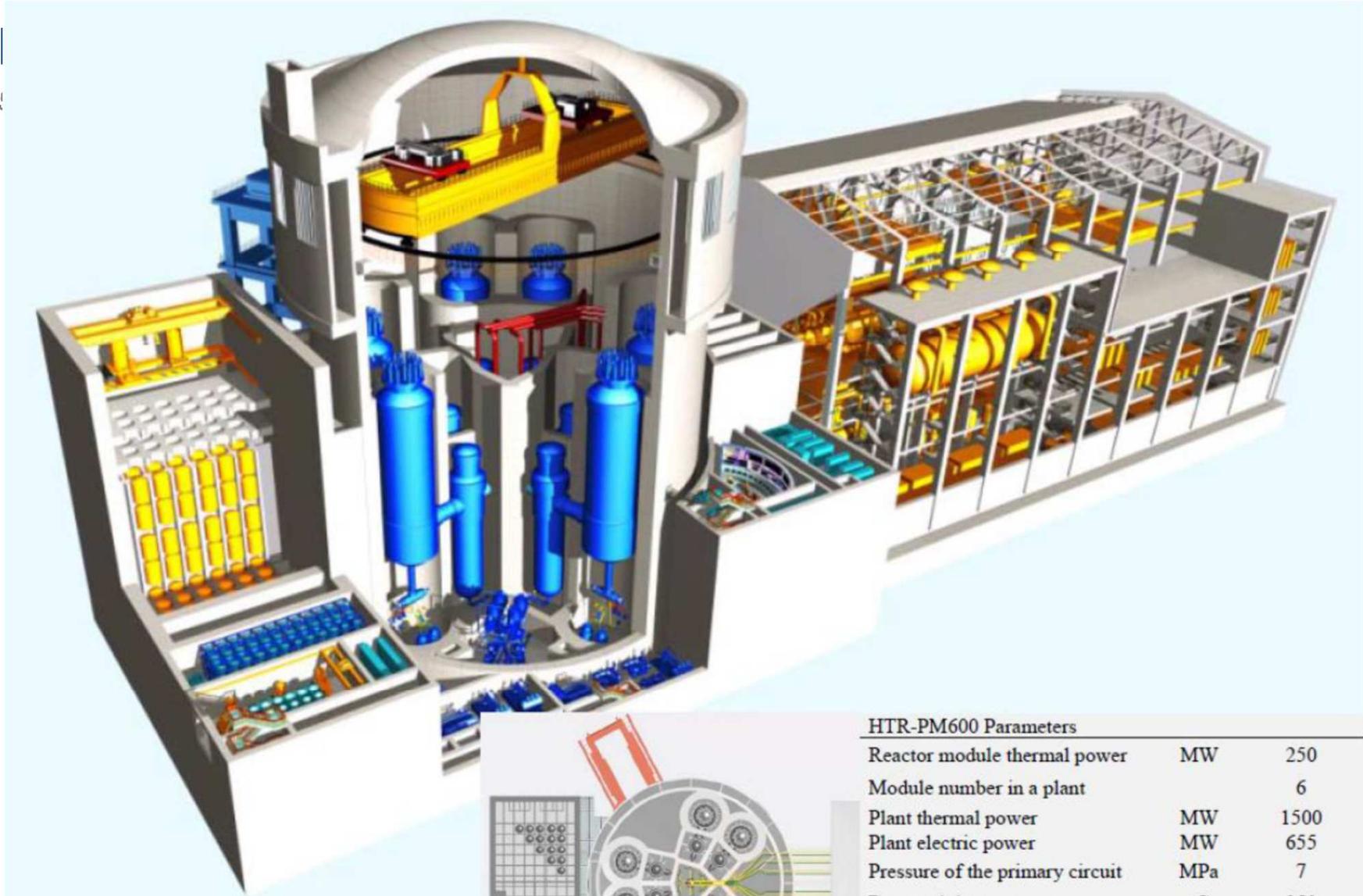
- 240 MW(e) and 500 MW(th)
- Refuelling cycle: 30 years
- Core Outlet Temp: 850°C
- Fuel enrichment: 1% U₂₃₅ - 1% Pu, MA coated particle
- Efficiency: 48%
- Fully enclosed in an underground containment
- Utilization of spent fuel
- Simplified power conversion system and 30% reduction in material requirements than that of current NPPs

Overview of HTR-PM Design

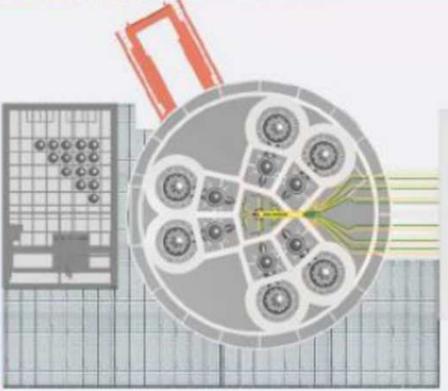


Final technical solution in 2006

<i>Reactor & SG</i>	2 X 250 MW	<i>Fuel enrich.</i>	8.5%
<i>Primary helium</i>	250/750°C, 7 MPa	<i>Avg. burn-up</i>	90 MWd/tU
<i>Plant life-time</i>	40 a	<i>Main steam</i>	567 °C/13.25 MPa



HTR-PM600



HTR-PM600 Parameters		
Reactor module thermal power	MW	250
Module number in a plant		6
Plant thermal power	MW	1500
Plant electric power	MW	655
Pressure of the primary circuit	MPa	7
Reactor inlet temperature	°C	250
Reactor outlet temperature	°C	750
Feed water temperature	°C	205
Steam temperature	°C	566
Steam pressure	MPa	13.24



Exemples de SMR technologie GEN IV

Source AIEA Tunis Octobre 2017

PRISM

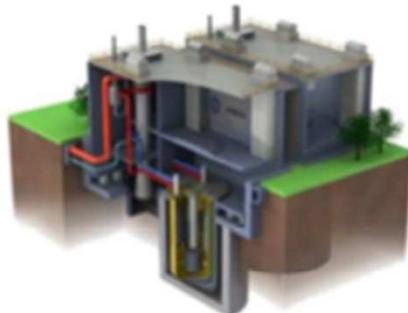


Image Courtesy of GE Hitachi, USA

Power Reactor Innovative Small Modular

Liquid Sodium-cooled Fast Breeder Reactor

- 311 MW(e) / 840 MW(th)
- Core Outlet Temp: 485°C
- Fuel Enrichment: 26% Pu, 10% Zr
- Underground containment on seismic isolators
- For complete recycling of plutonium and spent nuclear fuel

4S

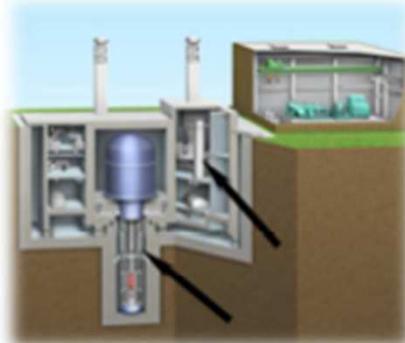


Image Courtesy of TOSHIBA, Japan

Super Safe Small Simple

Sodium-cooled Fast Reactor

- Fuel Cycle: 30 years
- 10 MW(e) / 30 MW(th)
- Core Outlet Temp: 510°C
- Fuel Enrichment < 20%
- Negative sodium void reactivity
- Hybrid of active and passive safety features
- Designed for remote locations and isolated islands, close to towns

SVBR100



Image Courtesy of AKME Engineering, Russia

Heavy Metal Liquid Cooled Fast Reactor 100 MW

Lead Bismuth Eutectic cooled Fast Reactor

- 101 MW(e) / 280 MW(th)
- Core Outlet Temp: 490°C
- Fuel Enrichment 16.5%
- Fuel Cycle: 8 years
- Hybrid of active and passive safety features
- Prototype nuclear cogeneration plant to be built in Dimitrovgrad, Ulyanovsk

IMSR



Image Courtesy of Terrestrial Energy, Canada

Integral Molten Salt Reactor

Molten Salt Reactor

- 80, 300 and 600 MW(th)
- Core Outlet Temp: 700°C
- Fuel Cycle: 7 years
- MSR-Burner: **Efficient burner of LEU**
- MSR-breeder: **Thorium breeder**
- **Ideal system for consuming existing transuranic wastes (Long lived waste)**
- Passive decay heat removal in situ without dump tanks

Water cooled SMRs (Examples)

CAREM

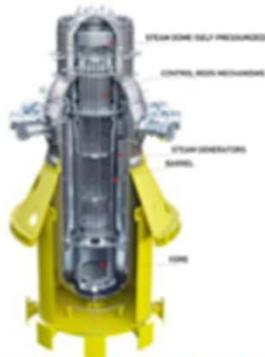


Image Courtesy of CNEA, Argentina

Under Construction

Integral PWR type SMR

Naturally circulation

- 30 MW(e) / 100 MW(th)
- Core Outlet Temp: 326°C
- Fuel Enrichment: 3.1% UO₂
- In-vessel control rod drive mechanisms
- Self-pressurized system
- Pressure suppression containment system
- Target commissioning: **October 2018**

SMART

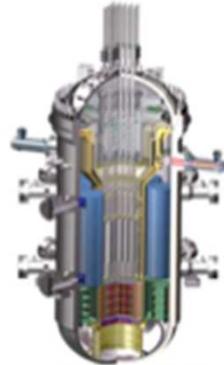


Image Courtesy of KAERI, Korea

Licensed/Certified

Integral PWR type SMR

Forced circulation

- 100 MW(e) / 330 MW(th)
- Core Outlet Temp: 323°C
- Fuel Enrichment: 5% UO₂
- Multi-purpose application: electricity production, sea water desalination, district heating and process heat for industries
- Passive safety systems along with severe accident mitigation features
- **Standard Design Approval: 4 July 2012**

ACP100



Image Courtesy of CNNC, China

Basic Design

Integral PWR type SMR

Forced circulation

- 100 MW(e) / 310 MW(th)
- Core Outlet Temp: 323°C
- Fuel Enrichment: (2-4)% UO₂
- Underground nuclear island and spent fuel pool-enhanced protection against external hazards
- Containment vessel installed in water pool with fully passive safety facilities
- Modules per plant: (1 – 8)
- **Undertaking IAEA's Generic Reactor Safety Review.**

NuScale



Image Courtesy of NuScale Power, USA

Under development

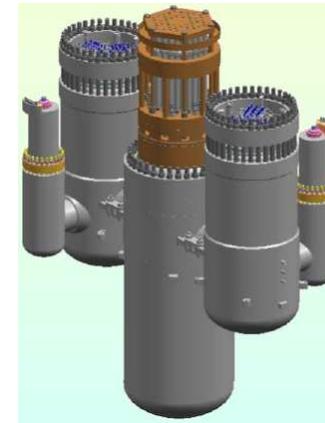
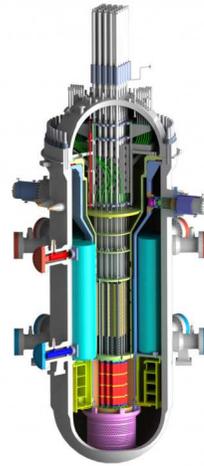
Integral PWR type SMR

Naturally circulation

- 50 MW(e) / 160 MW(th) per module
- Core Outlet Temp: 302°C
- Fuel Enrichment: 4.95% UO₂
- Modules per plant: 12
- Containment vessel immersed in reactor pool that provide unlimited coping time
- Underground installment of containment vessel
- **Submit Design Certification Review Application: 12/2016**

Les principes de conception – Les tendances REP

- Architecture intégrée / multipots
- Circulation naturelle / forcée
- Enceinte de confinement métallique, refroidissement par volume d'eau
- Systèmes passifs
- Construction semi-enterrée



Panorama international des principaux SMR REP



PROJET	PUISSANCE
mPower (Bechtel + B&W)	N x 180 MWe
NuScale	N x 50 MWe
Westinghouse SMR	225 MWe
Holtec SMR-160	160 MWe
Rolls Royce	220MWe
KLT-40S (OKBM)	2 x 35 MWe
VBER 300 (OKBM)	300 MWe
SMART (Kaeri)	100 MWe
ACP 100 (CNNC)	100 MWe
ACPR 100 / ACPR-50S (CGN)	100 / 50 MWe
CAP 150 (SNPTC)	150 MWe
CAREM (CNEA)	25 MWe



USA B&W- mPower

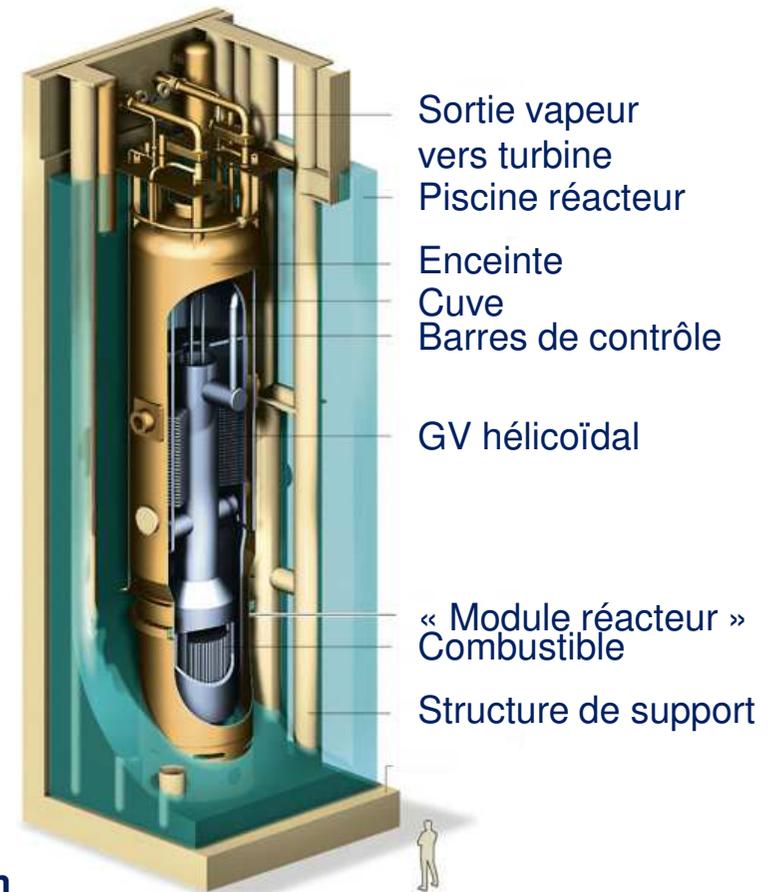
- **Puissance 180 MWe, 530 MWth**
- **Réacteur intégré**
 - contenant pompes primaires, pressuriseur
 - GV simple passe à tubes droits,
 - cuve : Ø 4 m - hauteur 25,3 m
- **Systèmes de sûreté passifs**
- **Cœur**
 - 69 assemblages 17x17
 - contrôle réactivité par 69 grappes de contrôle,
 - fonctionnement normal sans bore soluble
 - longueur de cycle 4 ans
- **Enceinte de confinement métallique**
- **Configuration : 2, 4, 6... unités**
- **Projet arrêté à ce stade**



Présentation SFEN Lyon le 17 janvier 2018

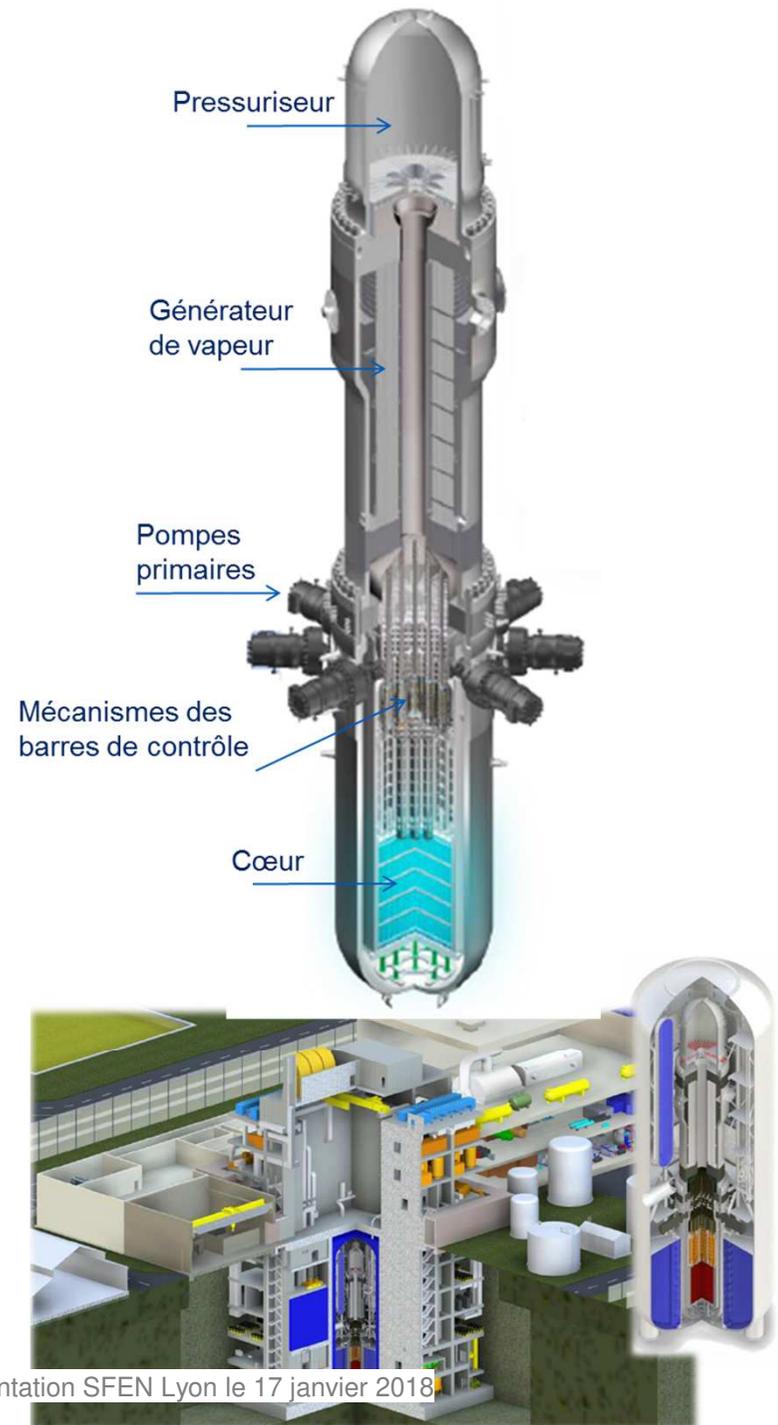
USA - NuScale

- **Puissance : 45 MWe, 160 MWth**
- **Réacteur intégré**
 - 2 GV à tubes hélicoïdaux,
 - absence de pompes primaires
⇒ circulation naturelle
 - cuve : Ø 2,7 m - hauteur 19,8 m
- **Systèmes de sûreté passifs**
- **Cœur**
 - assemblages 17x17 - 1,8 m (6 ft)
 - contrôle réactivité : grappes de contrôle + bore soluble, longueur de cycle 2 ans
- **Enceinte de confinement métallique Ø 4,6 m / hauteur 25 m**
 - immergée dans une piscine enterrée à l'intérieur du BR
- **Configuration multiréacteurs : jusqu'à 12 unités**
- **En cours de certification par NRC pour une première réalisation (12 unités) sur le site DOE de l'Idaho.**



USA - WESTINGHOUSE SMR

- **Puissance : 240 MWe, 800 MWth**
- **Réacteur de type intégré**
 - 8 pompes primaires,
 - GV à tubes droits à recirculation
 - cuve du réacteur : Ø ext 3,5m - hauteur 27,7m
- **Systemes de sûreté passifs**
- **Cœur**
 - 89 assemblages 17x17 – 2,45 m (8ft)
 - 37 grappes de contrôle + bore soluble
 - longueur de cycle 24 mois
- **Enceinte de confinement métallique**
 - Ø ext 9,8m / hauteur 27,7m
 - Enterrée
- **Projet revitalisé suite intérêt UK**



USA - HOLTEC

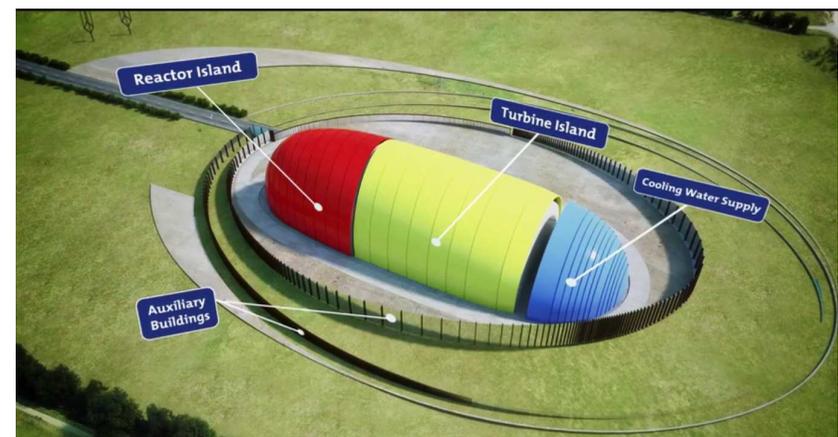
- **Puissance : 160MWe, 525 MWth**
- **Cuve connectée à 1 GV vertical**
 - absence de pompes primaires
 - circulation naturelle
- **Systèmes de sûreté passifs**
- **Cœur**
 - 37 assemblages 17x17, 4,3 m (14 ft) + 8 assemblages partiels
 - contenus dans une « cartouche » unitaire (fuel cartridge)
 - contrôle réactivité : 37 grappes de contrôle
 - absence de bore soluble en fonctionnement normal
 - longueur de cycle 4 ans
- **Enceinte de confinement métallique**
 - Ø13,7m / hauteur 59,7m partiellement enterrée
 - entourée d'une structure anti-missile pour la partie non-enterrée

➤ **Projet peu avancé**



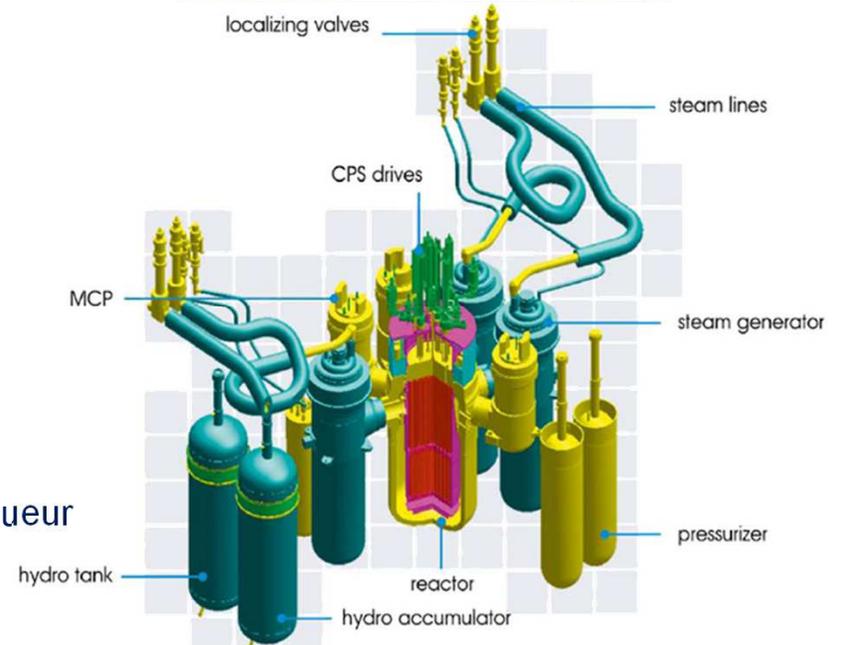
UK - ROLLS ROYCE SMR

- Réacteur multipots, 2, 3 ou 4 boucles
- Puissance : 220 à 440MWe
- Construction modulaire
 - Composants primaires h:16m, \varnothing 4m
 - Durée de vie 60 ans
 - MSI annoncée 2028
- Révélation récente du projet RR suite intérêt gouvernement UK



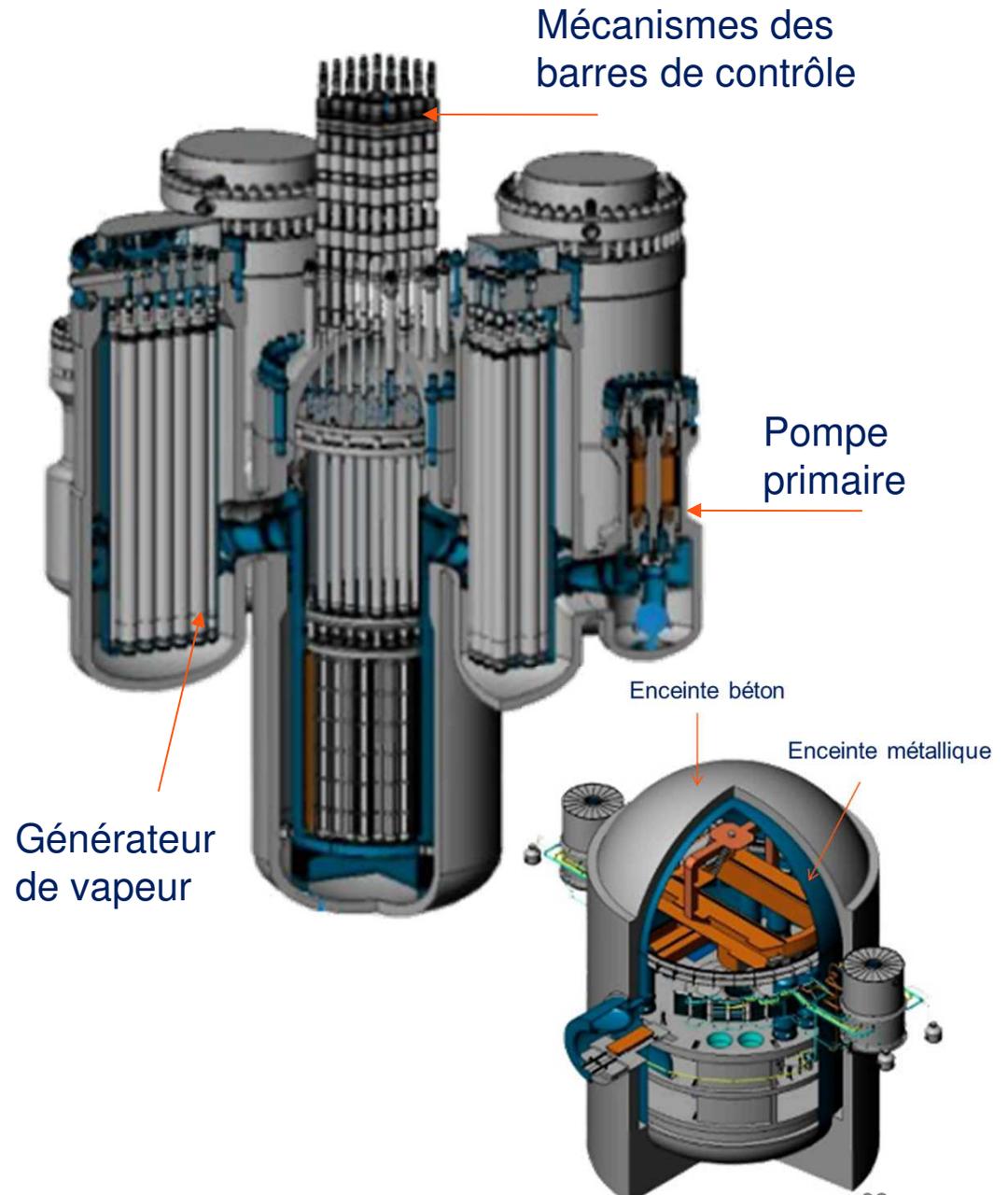
RUSSIE - KLT – 40S

- **Puissance 35 MWe, 150 MWth**
 - production d'électricité couplée éventuellement à chauffage urbain/déssalement
 - **Conçu sur la base du KLT40**
 - propulsion navires brise-glace
 - **Réacteur multipots**
 - 4 boucles courtes, 4 GV à tubes, 4 pompes primaires
 - **Systèmes de sauvegarde actifs + passifs**
 - **Cœur**
 - 121 assemblages hexagonaux de 1,2m
 - enrichissement U5 18,6%
 - absence de bore soluble en fonctionnement normal, longueur de cycle 2,5 à 3 ans
 - **Configuration par paire sur barge**
- **Barge Akademik Lomonosov (deux réacteurs) en fin de construction pour un couplage au réseau en 2019.**



RUSSIE - VBER-300

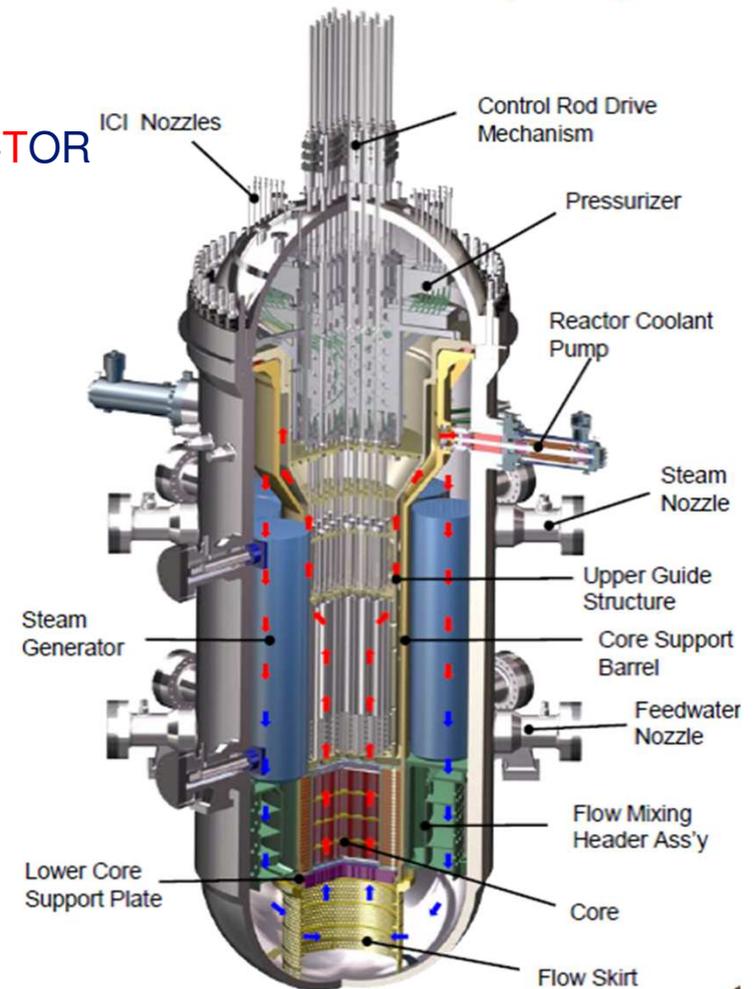
- **Puissance** : 300 MWe, 917MWth
 - **Utilisation** sur barges ou à terre
 - **Réacteur multipots**
 - Tubulures primaires très courtes
 - 4 GV à tubes droits
 - 4 pompes primaires à rotor noyé
 - **Dimensions « cuve + GV + pompes »**
 - hauteur 14,5 m - Ø 11,3 m
 - **Cœur**
 - pas d'information
 - longueur de cycle 1 à 2 ans
- **Projet au stade d'un conceptual design**



CORÉE – SMART

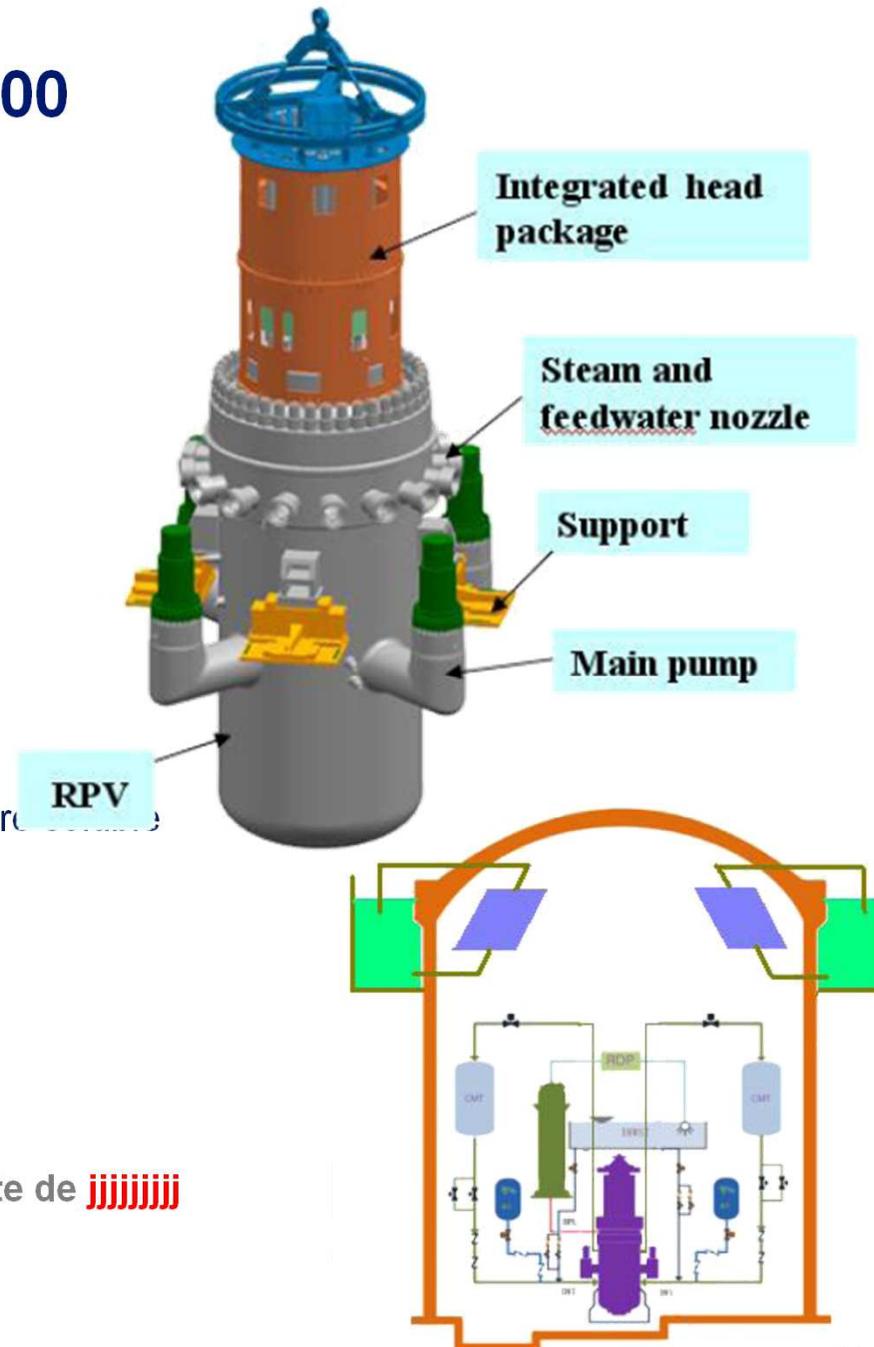
SYSTEM-INTEGRATED MODULAR ADVANCED REACTOR

- **Puissance : 100 MWe, 330 MWth**
- **Réacteur intégré**
 - 8 GV à tubes hélicoïdaux
 - 4 pompes primaires à rotor noyé dans la cuve
 - cuve : Ø 6,5 m / hauteur 18,5 m
- **Systèmes actifs + passifs**
- **Cœur**
 - 57 assemblages 17x17
 - longueur active 2 m
 - contrôle réactivité : 25 grappes de contrôle + bore soluble
 - longueur de cycle 3 ans
- **Enceinte de confinement monocoque en béton précontraint + liner**
- **Accord de coopération avec l'Arabie Saoudite pour deux premières réalisations et commercialisation**



CHINE NPIC / CNNC - ACP 100

- **Puissance** : 100 MWe, 310 MWth
- **Réacteur intégré**
 - 4 pompes primaires à rotor noyé,
 - GV simple passe,
 - le pressuriseur n'est pas dans la cuve
- **Systèmes de sûreté passifs**
- **Cœur**
 - 57 assemblages de longueur active 2,15 m
 - contrôle réactivité : 25 grappes de contrôle + boron
 - longueur de cycle 2 ans
- **Configuration**
 - par paire
 - dans un bâtiment réacteur enterré
- **Projet de construction de deux unités sur le site de jijiijijij**



CHINE CGN - ACPR 100 / ACPR-50S

- **ACPR 100**

- ◻ Réacteur intégré d'environ 100MWe
- ◻ Systèmes de sûreté passifs
- ◻ Configuration multi-unités (1 à 6), réacteur enterré

- **ACPR-50 – 50S**

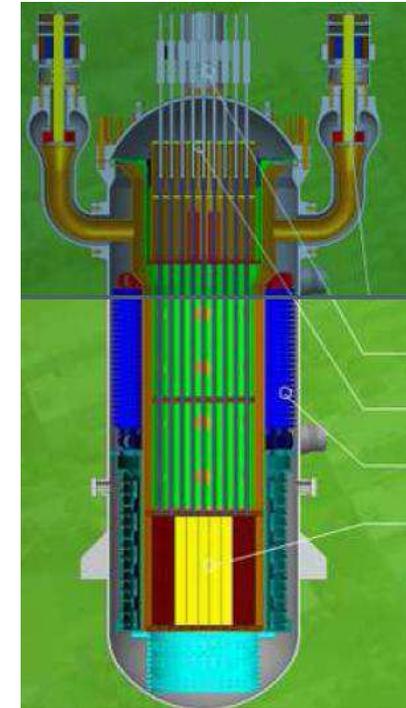
- ◻ Réacteur à boucles courtes
- ◻ Systèmes de sûreté actifs + passifs
- ◻ Installation sur barge

- **Calendrier de développement :**

- ◻ Pré-faisabilité 2010-2013
- ◻ Avant-projet sommaire 2014-2015
- ◻ Avant-projet détaillé 2016-2018
- ◻ Projet de démonstrateur 2017-2022



ACPR 50



ACPR100



ACPR 50S

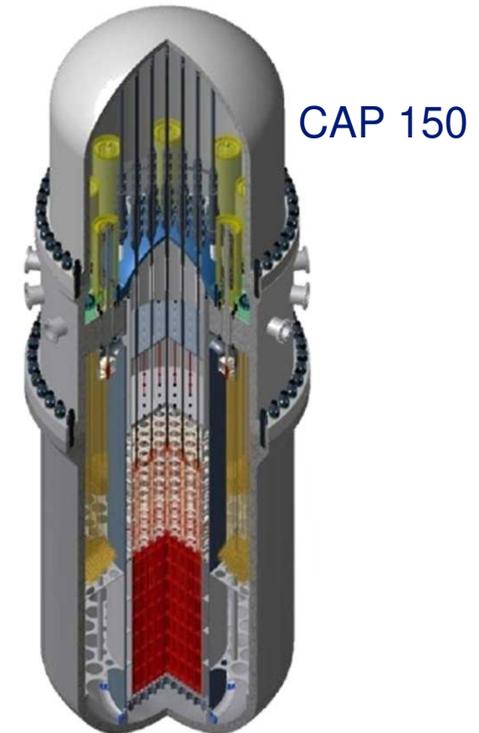
CHINE SNERDI / SNPTC CAP 150 / CAP-FNPP

▪ CAP150

- Nouveau projet de SMR sur la base du CNP300
- caractéristiques suivantes (à confirmer) : 150MWe, 450 MWth
- réacteur intégré
- 8 pompes primaires, 8 GV à tubes
- systèmes de sûreté actifs+passifs

▪ CAP-FNPP

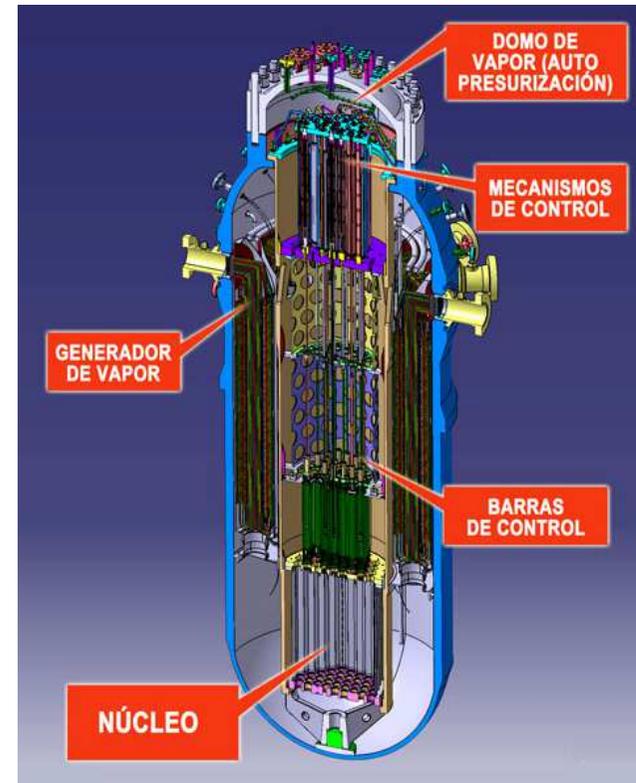
- Développement d'une centrale flottante
- pour la production d'électricité et d'eau potable
- Réacteur à boucles, 40 MWe, 200 MWth
- cycle combustible > 5 ans



ARGENTINE - CAREM

CENTRAL ARGENTINA DE ELEMENTOS MODULARES

- **Démonstrateur - 25 MWe**
 - **Réacteur intégré**
 - 12 GV hélicoïdaux simple passe
 - absence de pompes primaires
 - ⇒ convection naturelle
 - **Dimensions cuve**
 - Ø 3,4 m / hauteur 11 m
 - **Systèmes de sauvegarde passifs**
 - **Cœur**
 - 61 assemblages hexagonaux
 - faible enrichissement ($\leq 3,1\%$)
 - Sans bore soluble
 - longueur de cycle 14 mois
- Réalisation en cours sur le site de xxxxxx (premier béton : 08/02/2014)



Présentation SFEN Lyon le 17 janvier 2018

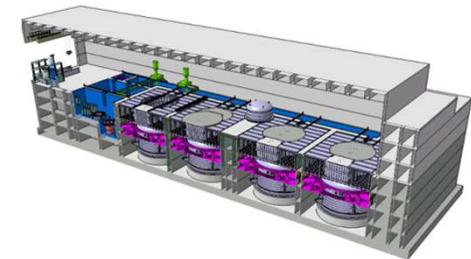
L'approche française

Un consortium soutenu par les services de l'Etat et réunissant le CEA, AREVA, EDF et DCNS en place de 2012 à 2015 pour une étude technico-économique des SMR

- Le design (phase faisabilité) d'une chaudière REP intégrée .
 - Le recours à des systèmes de sauvegarde passifs
 - Un aménagement enterré pour une centrale à terre (multi unités)
 - Une version immergée (concept Flexblue)
 - Une étude économique avec pour cible des LCOE de 100€/MWh
 - Une étude de marché associée
- Au vu des résultats positifs, encouragement des services de l'Etat à lancer un APS dans une version terrestre

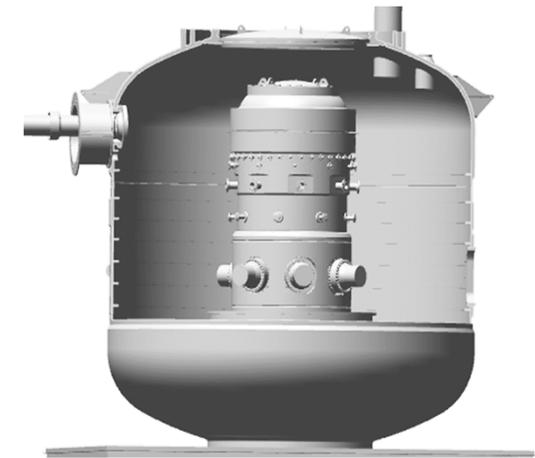
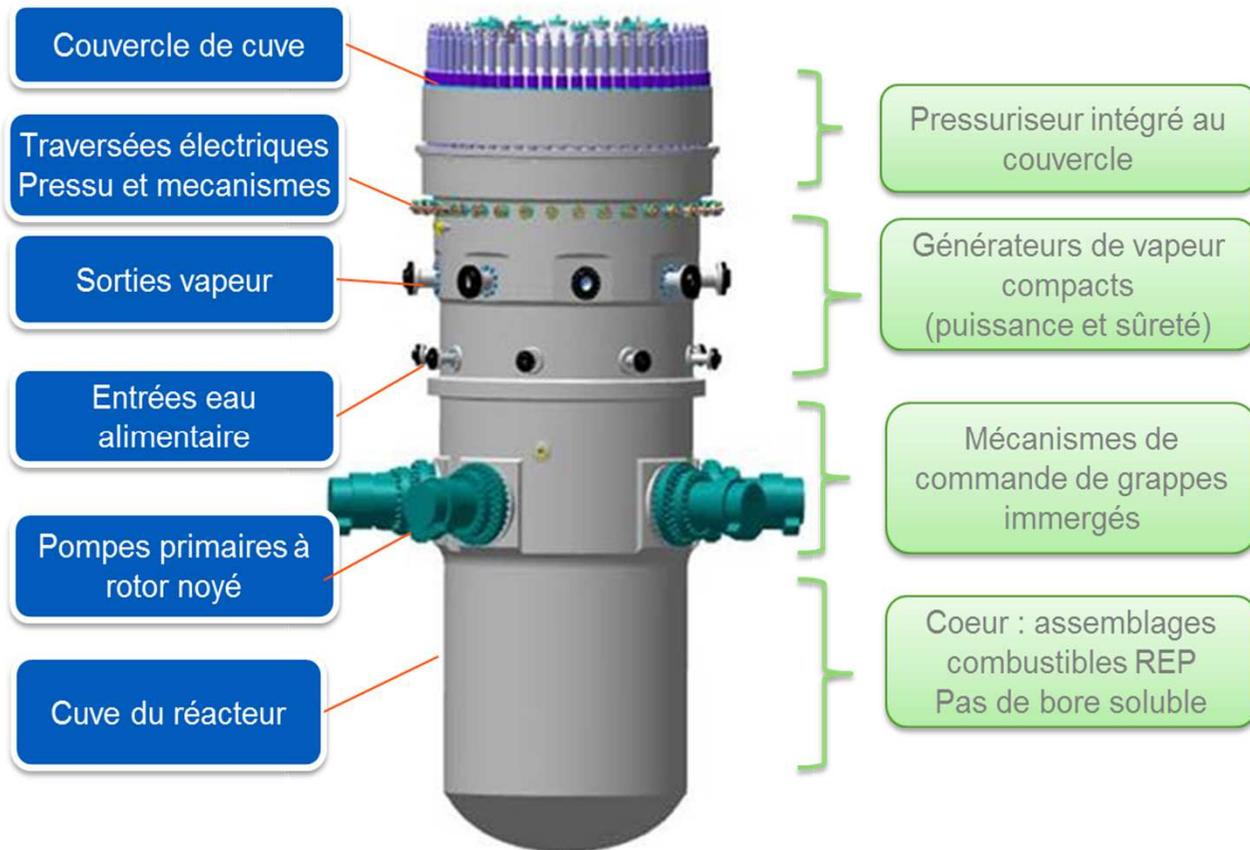
Dans le contexte UK favorable aux SMR tentative d'élargissement en 2016 du partenariat à EDF Energy et autres partenaires britanniques, sans suite à ce stade.

Lancement en 2017 d'une phase de préfaisabilité avec les seuls partenaires français et le soutien des services de l'Etat

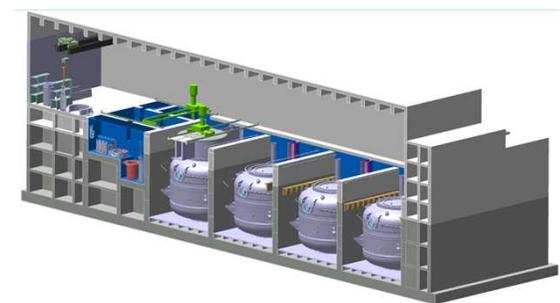


FRANCE – SMR 170MWe

- Architecture intégrée – compacte – multi-réacteurs



Enceinte métallique compacte (H 15m) immergée dans un bassin d'eau



Architecture multi-réacteurs

Un nouveau réacteur, en rupture technologique et industrielle...

Une chaudière nucléaire innovante

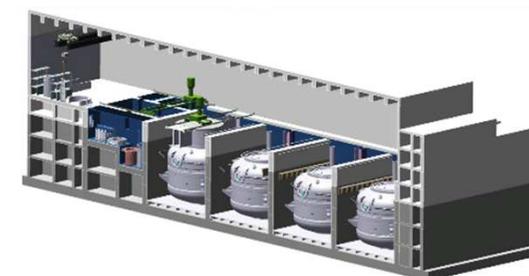
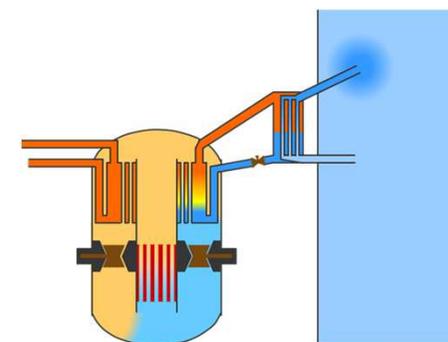
- Architecture totalement intégré (ensemble très compact)
- Conduite et maintenance simplifiées
- Recours à des systèmes de sauvegarde passifs

L'architecture multi réacteurs

- Plusieurs réacteurs pouvant être dans des états de fonctionnement, maintenance (rechargement) ou de construction différents
- Mutualisation des bâtiments, des systèmes auxiliaires
- Mutualisation de l'exploitation, de la salle de commande

Les défis industriels de fabrication et de la construction

- Modules intégrés (multifonctionnels), fabriqués, testés en usine et transportés sur le site
- Méthodes de fabrication innovantes et avancées en usine (ateliers spécialisés et centralisés)
- Architecture GC simple et régulière, permettant les techniques de construction conventionnelles ou modulaires



... pour un nouveau marché mondial, émergent et concurrentiel.

Une offre pour répondre à une attente forte.

Une réponse pertinente et abordable pour de nouveaux usages de la production nucléaire

- Exploitants ou pays en accession à l'énergie nucléaire,
- En remplacement d'installations existantes à énergie fossile
- Solution adaptée aux sites éloignés, réseaux isolés, réseaux de chaleur, vapeur industrielle et désalinisation

Compatible et complémentaire à un parc nucléaire installé

- Exigences d'installation réduites en termes de foncier (site existants), accès au réseau, source froide,
- Production électrique en semi-base, intermédiaire entre le gros nucléaire installé fonctionnant en base et le renouvelable par nature intermittent,

Le marché des SMR est complémentaire de celui des gros réacteurs.