

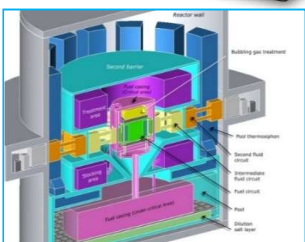
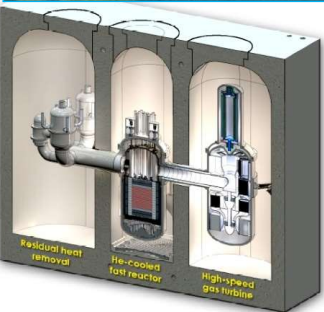
Atouts potentiels des nouveaux réacteurs nucléaires pour un développement durable

Frank CARRÉ (franck.carre@cea.fr)

Conseiller scientifique de la Direction des énergies du CEA

Colloque AEIS 2023
INTERDÉPENDANCE, PANDÉMIES et CHANGEMENT CLIMATIQUE
Institut Henri Poincaré, Paris – 23, 24 Novembre 2023

Colloque AEIS-2023 – INTERDÉPENDANCE, PANDÉMIES et CHANGEMENT CLIMATIQUE”
Institut Henri Poincaré, Paris – 23, 24 Novembre 2023



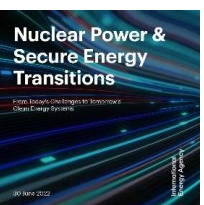
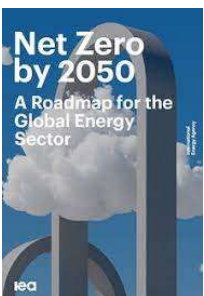
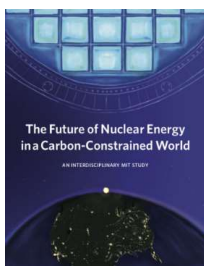
UN NOUVEAU NUCLÉAIRE CONÇU POUR UN DÉVELOPPEMENT DURABLE

Plan de l'exposé

- 1 – Apport essentiel de l'énergie nucléaire pour atteindre la neutralité carbone
- 2 – La France : laboratoire de recherche pour une énergie nucléaire durable
- 3 – Défis à relever pour déployer au plus tôt le potentiel de décarbonation du nouveau nucléaire dans le monde
- 4 – Recherche internationale pour inscrire l'énergie nucléaire dans le long terme et valoriser tout son potentiel pour une économie bas carbone durable
- 5 – Bref aperçu d'autres apports des sciences et technologies nucléaires au développement durable
- 6 – Coopération internationale et attractivité de la filière

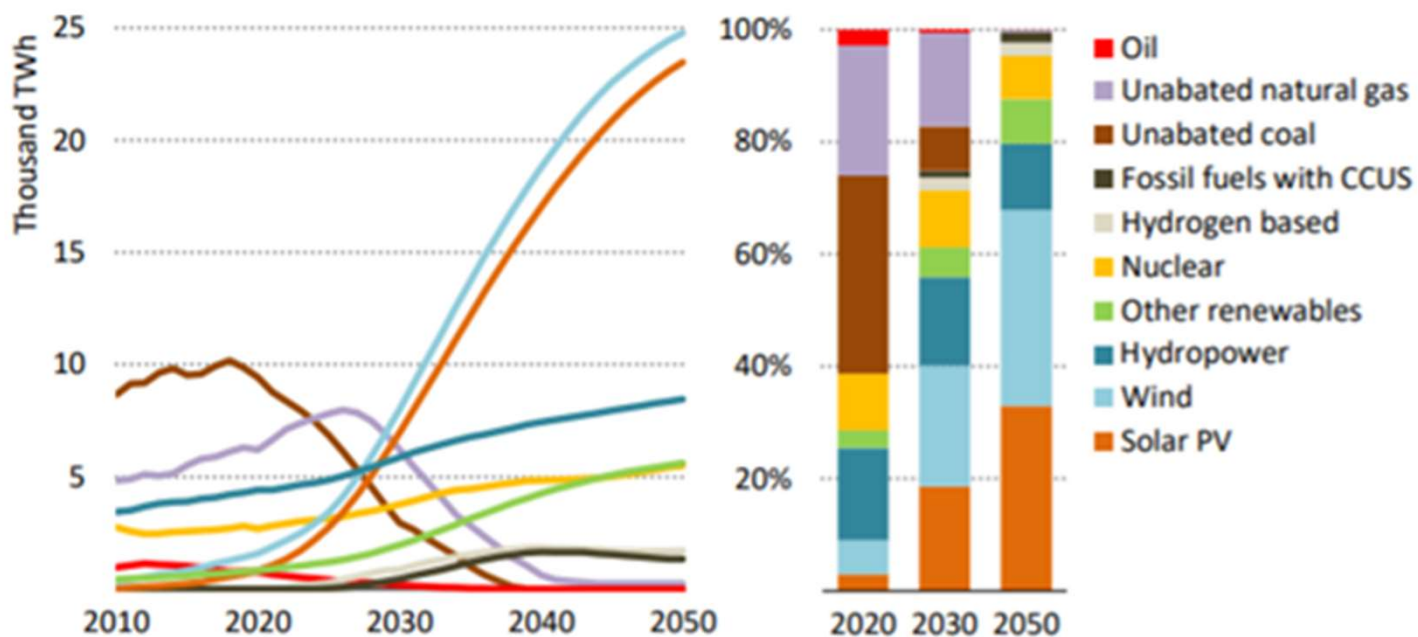
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE, RENOUVELABLES ET NUCLÉAIRE : 3 PILIERS DE LA TRANSITION VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE

Une ère nouvelle pour le nucléaire ?



- ▶ **MIT (Sept-2018) – The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World**
"Excluding nuclear implies investments in overcapacity and drives up the average cost of electricity in low carbon scenarios – Nuclear with two missions: Flexible electricity & Cogeneration of Heat"
- ▶ **Communication from the EU Commission to the Parliament & the Council (Nov-2018)**
"By 2050 more than 80 % of electricity will be coming from renewable energy sources. Together with a nuclear power share of ca. 15 %, this will be the backbone of a carbon-free European power system"
- ▶ **AIE (May 2021) – Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector**
"Examine in depth nuclear power's potential role as source of low emissions electricity that is available on demand to complement the leading role of renewables such as wind and solar in the transition to net zero emissions"
- ▶ **RTE (Feb-2022) – Futurs énergétiques 2050**
"Se passer de nouveaux réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables plus rapide que ceux des pays européens les plus dynamiques"
- ▶ **AIE (June-2022) – Nuclear Power & Secure Energy Transitions**
"Nuclear can help make the energy sector's journey away from unabatable fossil fuels faster and more secure"
- ▶ **EU Taxonomy (July-2022)**
"Members of the European Parliament do not object to inclusion of gas and nuclear in the list of environmentally sustainable economic activities"

Figure 3.10 ▶ Global electricity generation by source in the NZE



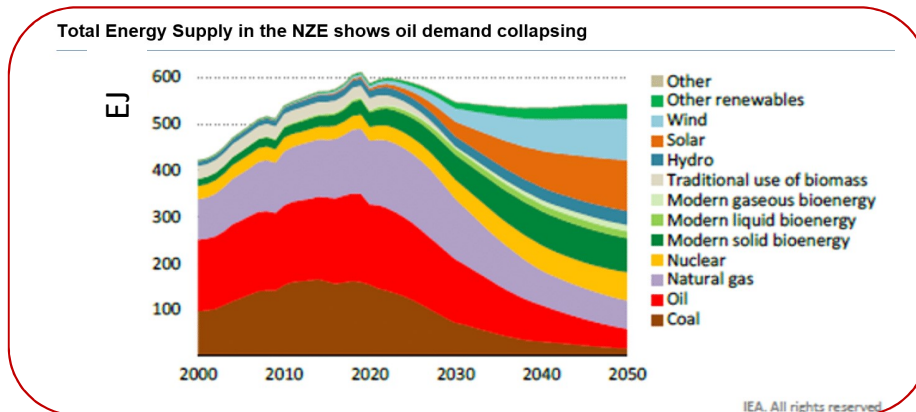
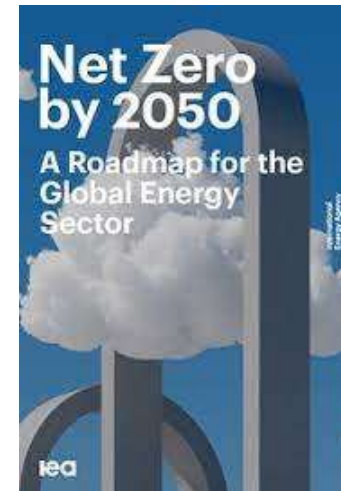
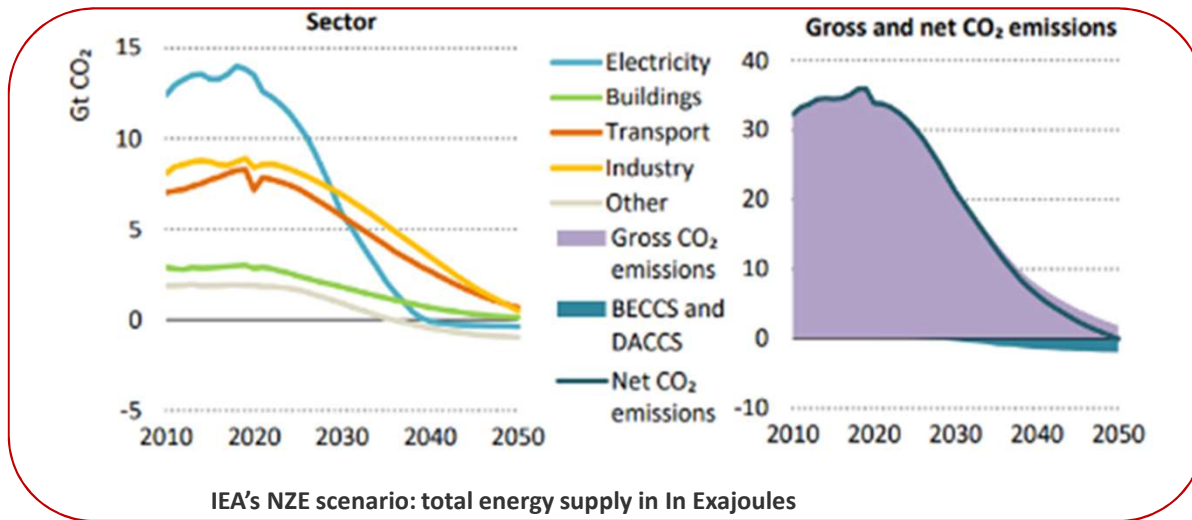
IEA. All rights reserved.

Solar and wind power race ahead, raising the share of renewables in total generation from 29% in 2020 to nearly 90% in 2050, complemented by nuclear, hydrogen and CCUS



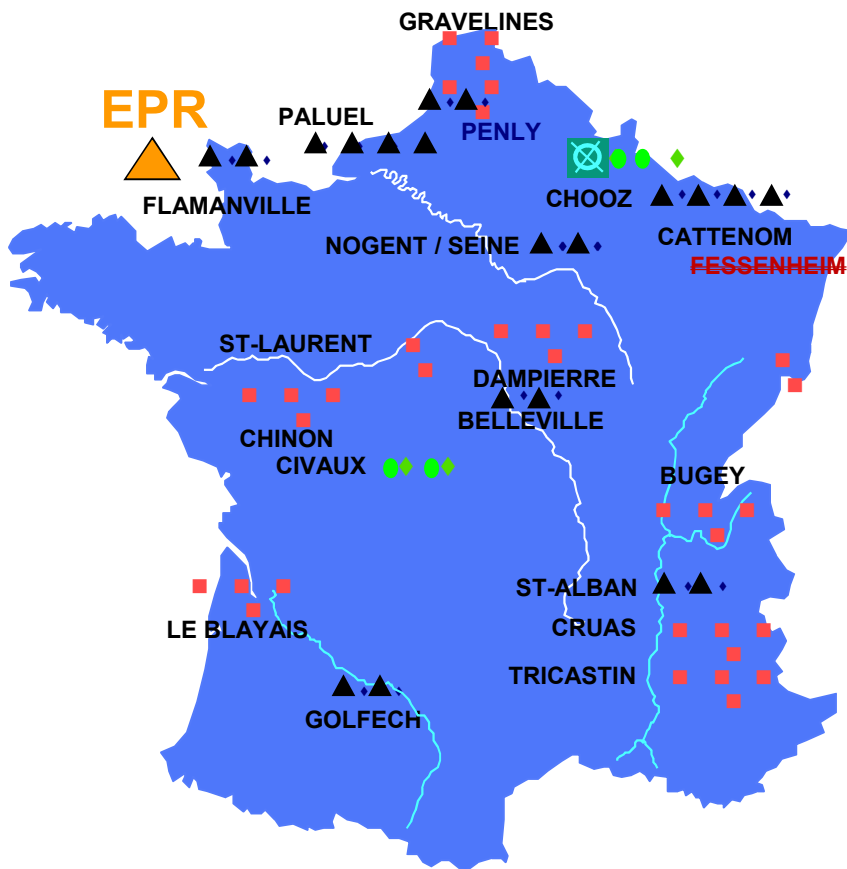


NET ZERO BY 2050 – TOTAL ENERGY SUPPLY



Renewables and nuclear power displace most fossil fuel use in the NZE scenario and the share of fossil fuels falls from 80% in 2020 to just over 20% in 2050

LA FRANCE : LABORATOIRE DE DÉCARBONATION DURABLE AVEC LE NUCLÉAIRE



- ▶ 58 -2 Réacteurs 900-1450 MW
63,1 → 61,3 GWe + EPR (2023)
- ▶ ~380/300 TWh (2019/2022)
- ▶ 72/60 % Electricité (2019/2022)
→ 660 TWh en 2035 (RTE 2023-2035)
- ▶ 148 €/MWh (2021) (vs 220 €/MWh UE)
- ▶ 4.7 t_{CO2}/h/y (vs 7.1 Europe 2021)
- 40 % Electricité renouvelable > 2030
- 55 % Réduction CO₂ d'ici 2030 (/ 1990)

EPR

- ▶ 2024 Mise en service FLA3

EPR2

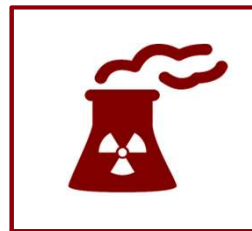
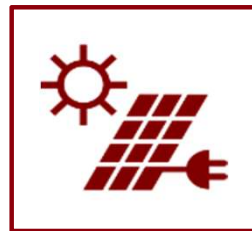
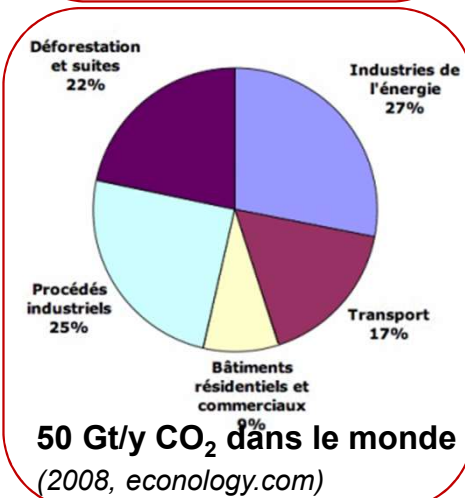
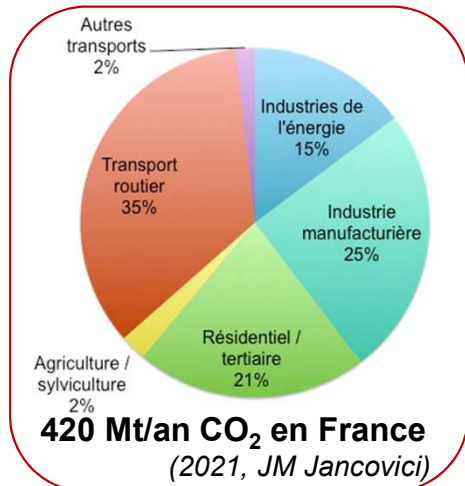
- ▶ 6 EPR2 (50 Md€):
 - 2 EPR2 (Penly)
 - 2 EPR2 (Gravelines)
 - 2 EPR2 (Bugey)
- ▶ + 8 EPR2 ? (<2050)

EPR1200 à l'export

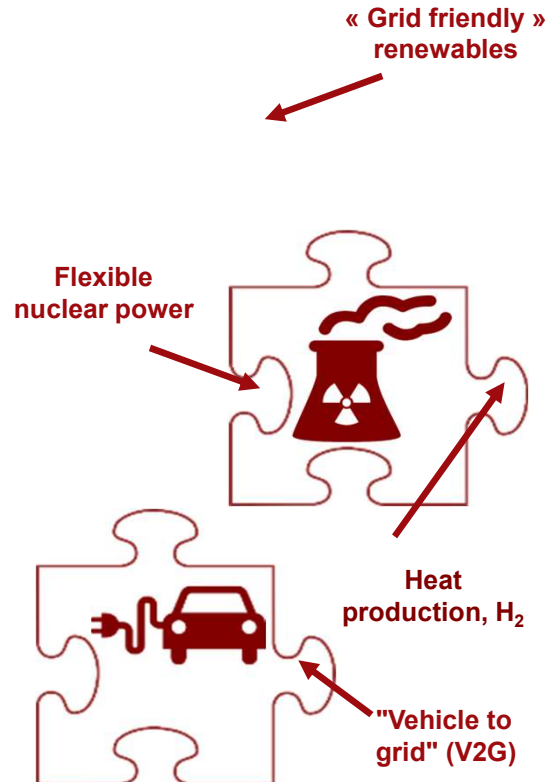
Enjeux du nucléaire pour une décarbonation durable

- ▶ Gestion durable des combustibles usés et des déchets radioactifs (Loi du 28 juillet 2006 - Site géologique pour déchets HAVL)
- ▶ Intégration avec les EnR pour une électricité décarbonée à > 90 %
- ▶ Production décarbonée de chaleur et d'énergie pour les transports
- ▶ Adaptation de l'industrie nucléaire aux principes du dvpt durable
- ▶ Inscription de l'énergie nucléaire dans une perspective de long terme (expérience du démantèlement, recherche sur les neutrons rapides...)

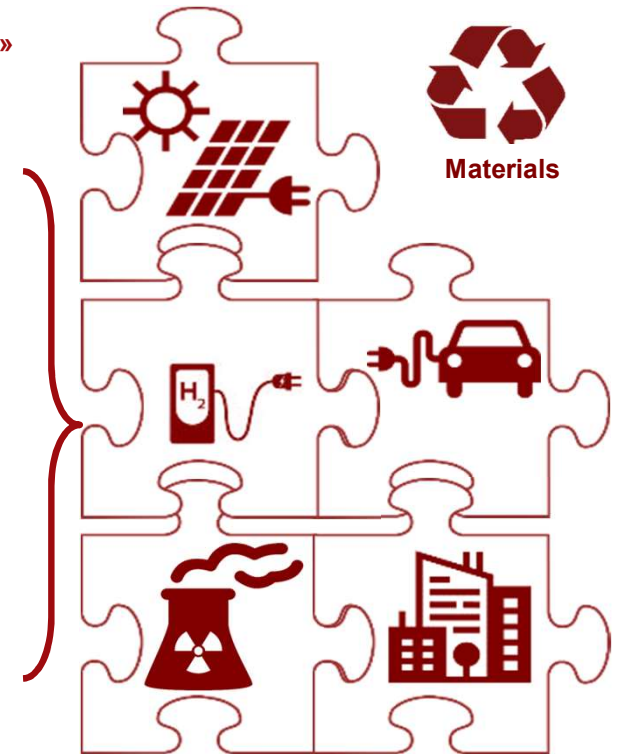
UNE APPROCHE INTÉGRÉE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES



R & D sur les nouvelles technologies



R & D sur les interactions



R & D sur les systèmes énergétiques (y.c. tech-éco & ACV)

ENJEUX DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE POUR CONTRIBUER À DÉCARBONER L'ÉCONOMIE À L'HORIZON 2050

Système **multi-vecteurs** électricité, chaleur, gaz / hydrogène

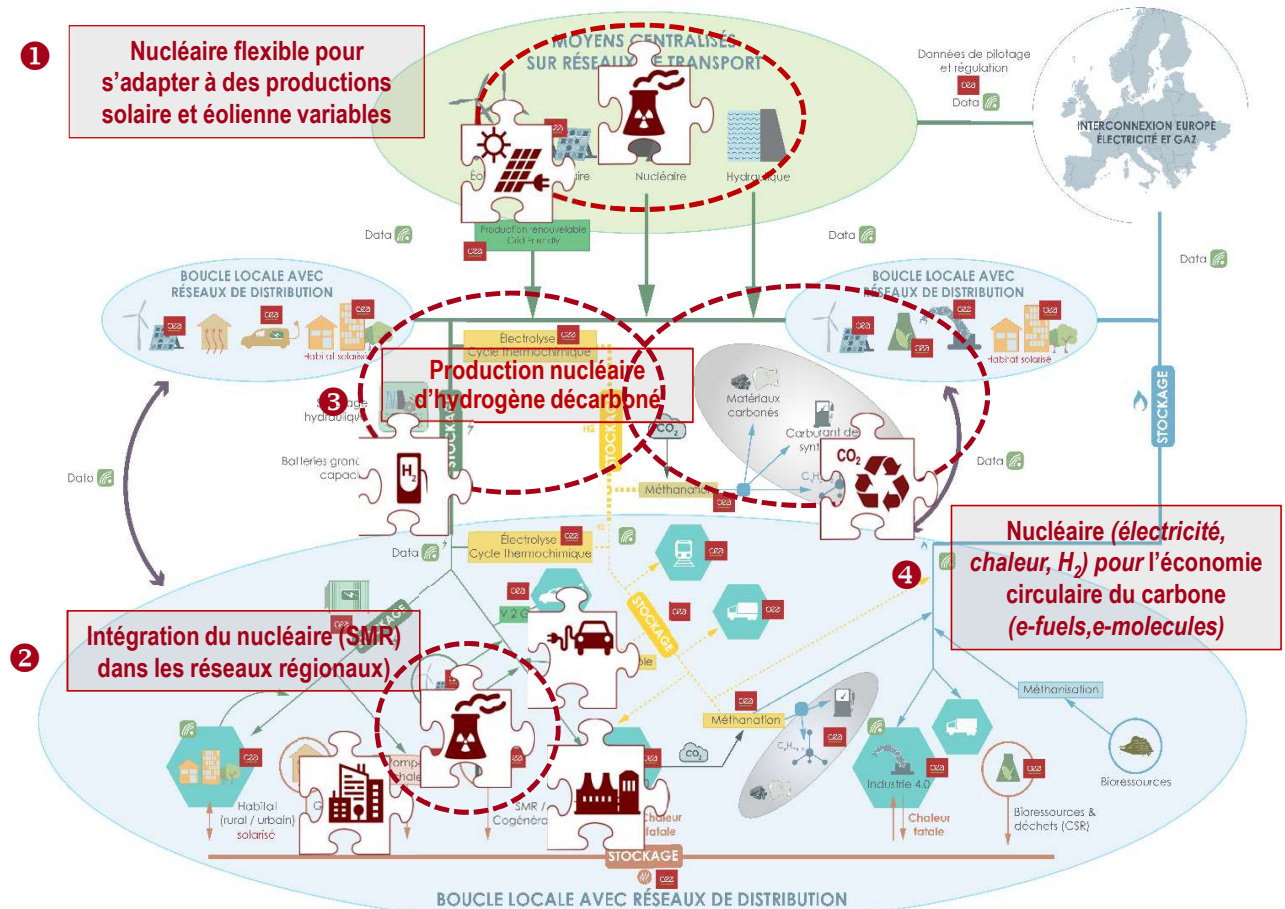
Système **multi-échelles** et **multi-agents** (de la boucle locale à l'échelle européenne)

Réseaux intelligents
digitalisation et instrumentation,
demande pilotée

Economie circulaire matières,
matériaux avancés, carbone

CONDITIONS DE RÉALISATION :

- ✓ Une « convergence » nucléaire et NTE
- ✓ Des innovations technologiques
- ✓ Des modèles industriels & économiques / régulation
- ✓ Un volet sociétal (diffusion, adhésion et appropriation)



BESOINS DE CHALEUR INDUSTRIELLE (<250°C) LOCALISATION DES BESOINS / CENTRES DE PRODUCTION NUCLÉAIRE

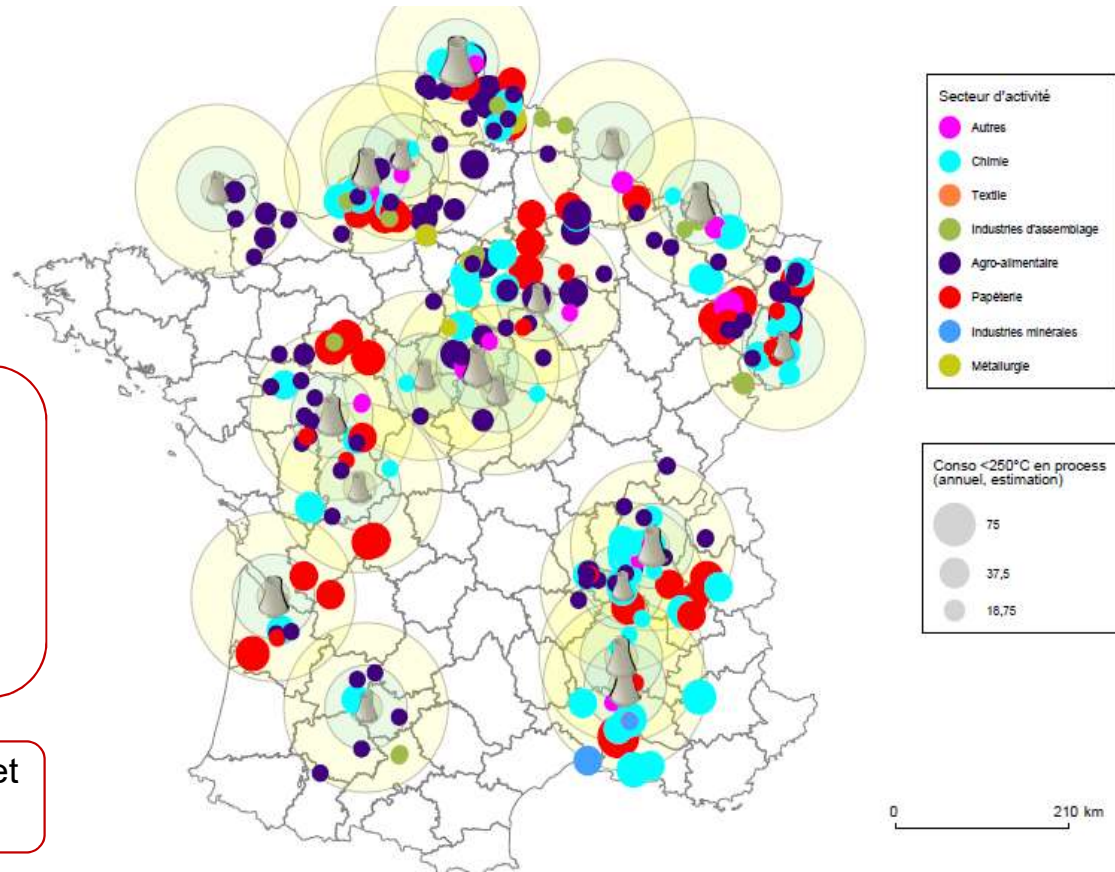
Etude de l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
ANCRE / CVT 2015 : « Potentialités de la cogénération nucléaire en France »

22 TWh/110 TWh
à une distance <100 km
d'un Centre de production
Nucléaire (CPN)

110 TWh/10 MTOE

- ▶ 30% Agroalimentaire
- ▶ 28% Chimie
- ▶ 18% Papier & Carton
- ▶ 24% Autres industries
(plastique, matériaux de construction,
automobile...)

- ▶ Etudes de viabilité technique et économique



nuward – PROJET DE SMR FRANÇAIS (170 MWe-540 MWth)

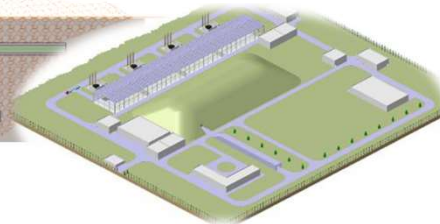
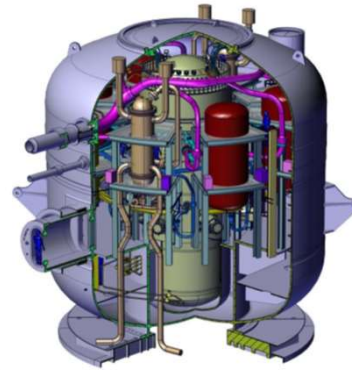


Conception de réacteur intégrée

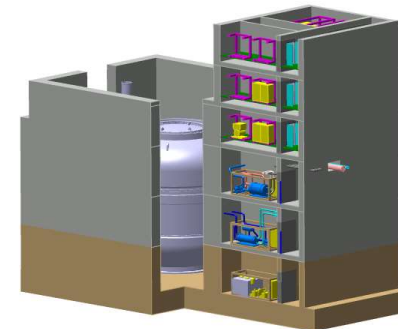


Réacteur semi-enterré

Systèmes de sûreté passifs



Conception et construction modulaire



ROADMAP	• Preliminary Design	2019-2022
	• Front-end Engineering Design	2022-2025
	• Detailed Design & Licensing	2025-2030



LOI DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE POUR LA CROISSANCE VERTE (17/8/2015) LOI ENERGIE ET CLIMAT – VERS LA NEUTRALITÉ CARBONE EN 2050 (8/11/2019)

Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)

- ▶ -30 % sur la demande en énergie en 2030 (/1990) et -50% en 2050
- ▶ -40 % sur les émissions de gaz à effet de serre en 2030 (/1990)
+ ajustement à -55 % (Loi européenne sur le climat, 2023)
- ▶ 40 % d'électricité renouvelable et 32 % d'énergie renouvelable d'ici 2030
- ▶ Confirmation de la stratégie de retraitement et recyclage du combustible usé jusqu'à la décennie 2040

Contrat stratégique de la filière nucléaire (28/1/2019 + 15/4/2021)

- ▶ Axe 1 : Emploi, compétences et formation
- ▶ Axe 2 : Transformation numérique
- ▶ Axe 3 : R&D et transformation écologique
 - **Promouvoir une économie circulaire dans l'industrie nucléaire**
Exigence du recyclage des combustibles usés pour la durabilité de l'énergie nucléaire
 - **Définition des réacteurs et des outils pour le futur**
Concevoir le "Réacteur du futur" avec EDF, CEA et Framatome et développer les technologies pour SMRs
- ▶ Axe 4 : Développement international
- ▶ Axe 5 : Renforcement de la solidarité entre PME et grandes entreprises

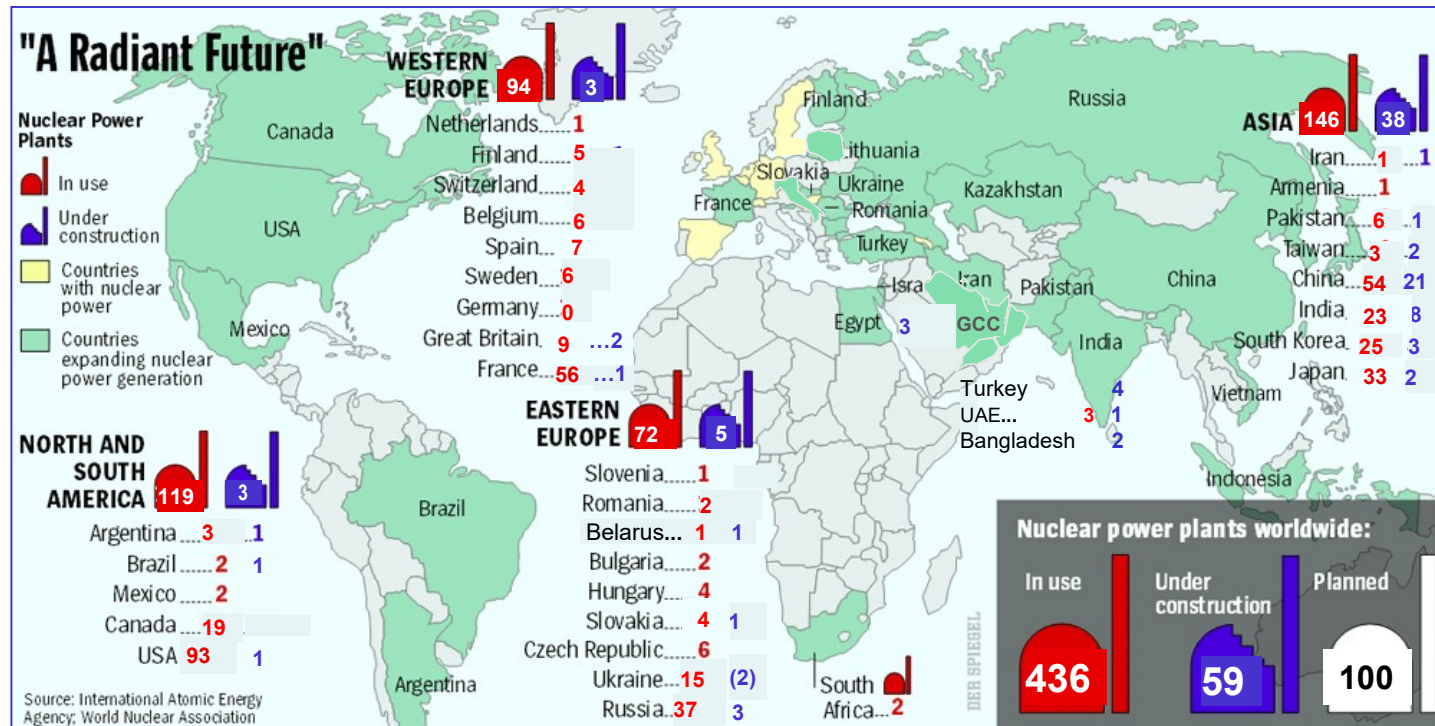


**Contrat stratégique de la
Filière Nucléaire**
2019-2022
+ Avenant 15/4/2021



PANORAMA MONDIAL DES RÉACTEURS EN EXPLOITATION ET EN CONSTRUCTION

~390 GWe (70 % PWR, 20 % BWR, 5 % PHWR, 5 % (GCR, RBMK, FBR))

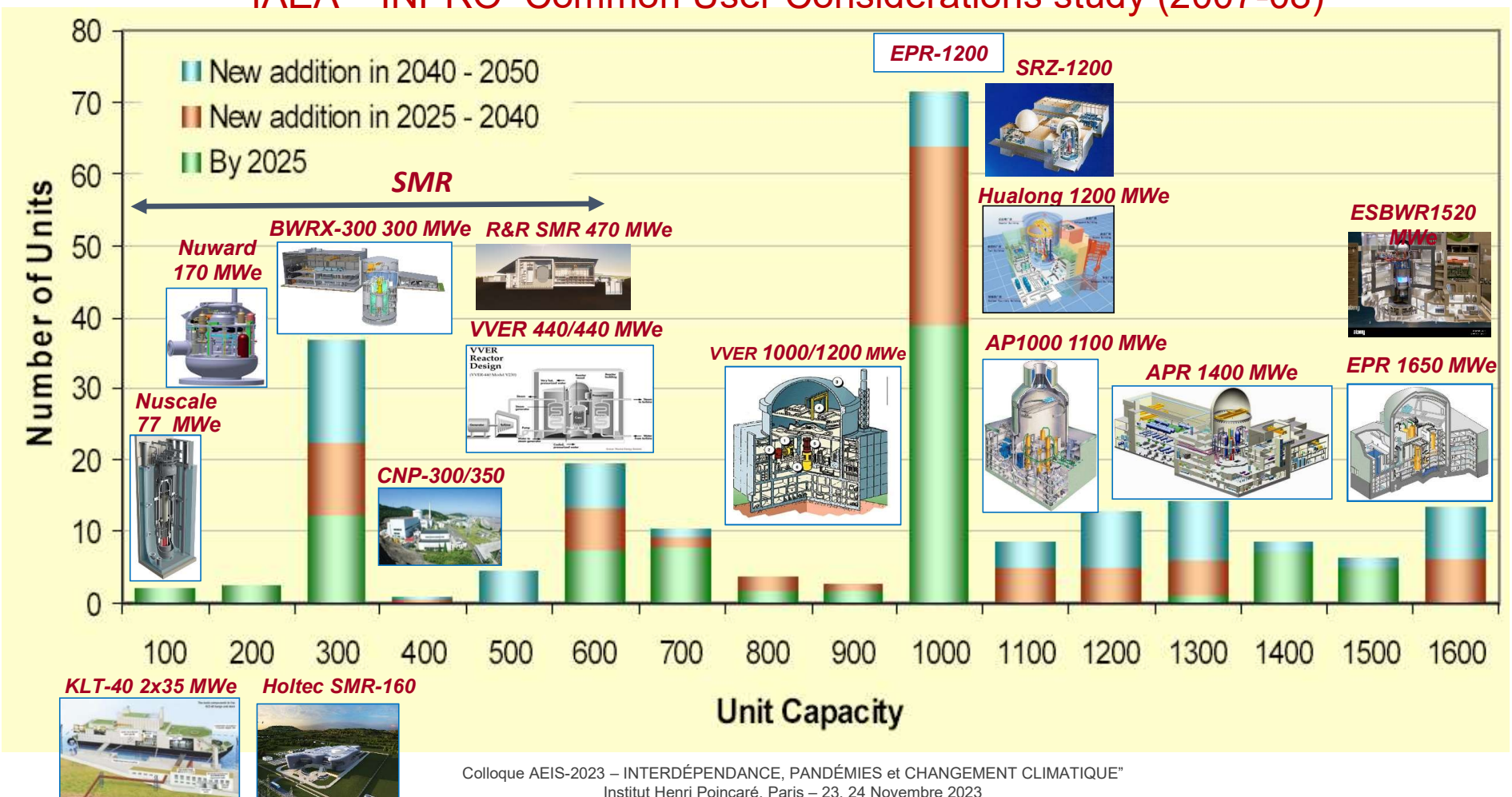


~390 GWe → ~916 GWe en 2050
 ~10 % de la production électrique mondiale



PUISSANCE UNITAIRE / MARCHÉ DES NOUVEAUX RÉACTEURS

IAEA – INPRO Common User Considerations study (2007-08)

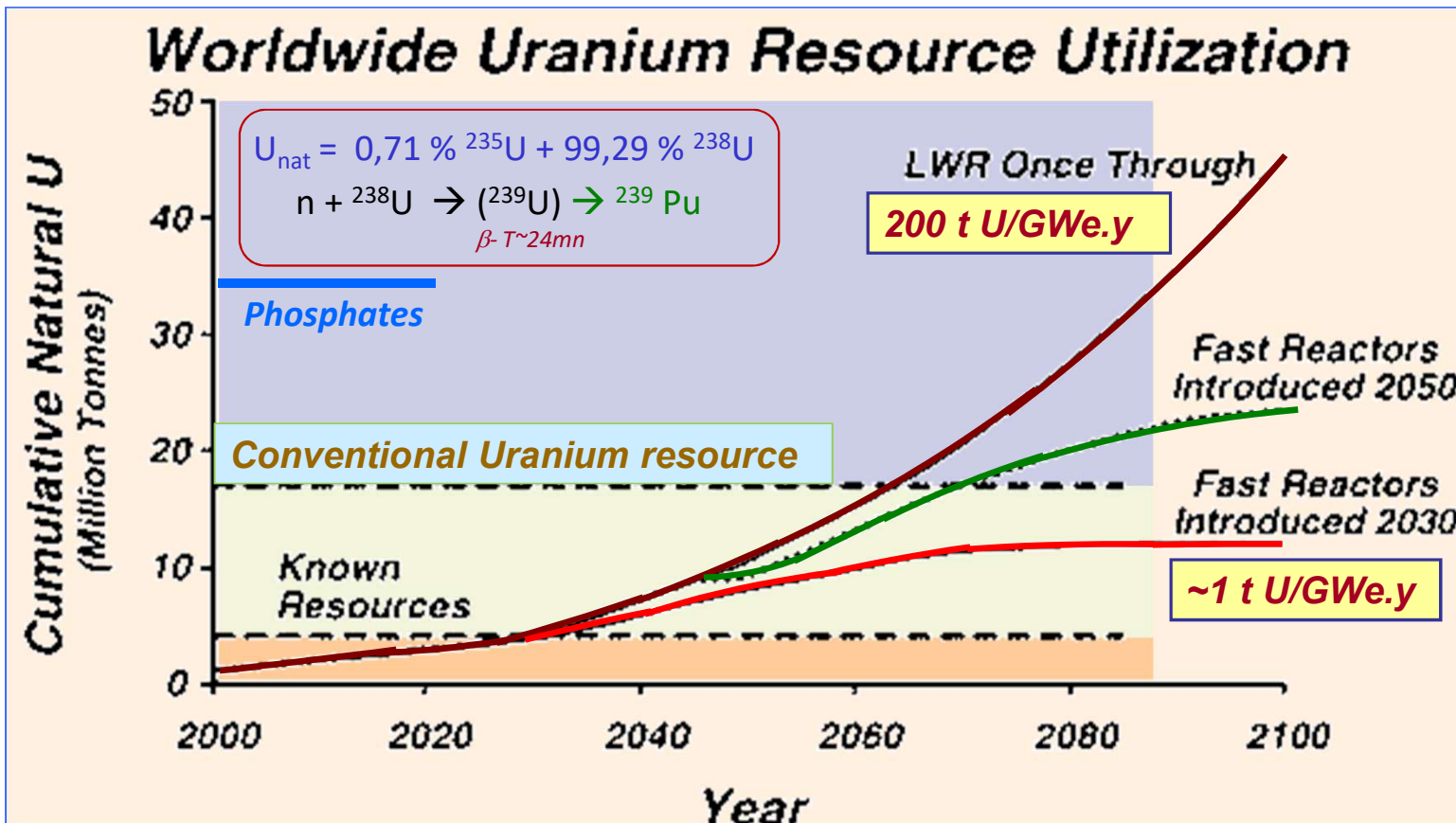


DÉFIS A RELEVER POUR RÉUSSIR LE DÉPLOIEMENT DES RÉACTEURS À EAU GEN-III

Initiatives nécessaires pour déployer les réacteurs Gen-III dans le monde
400 → 900+ GWe en 2050 ?

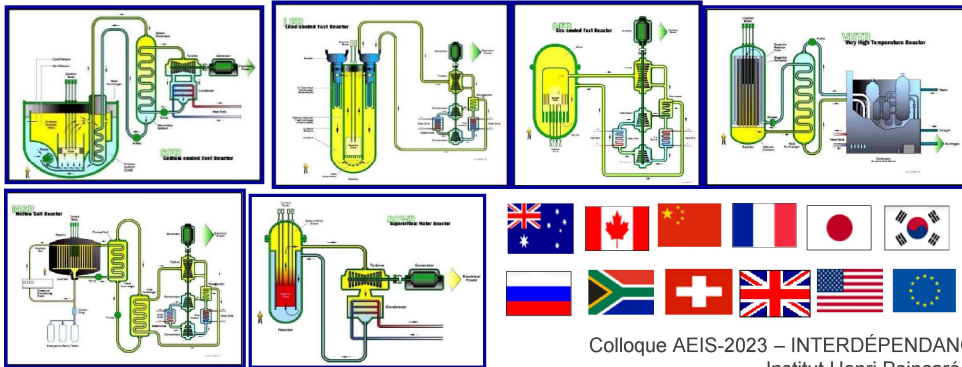
- ▶ **Tirer de façon visible les leçons des accidents nucléaires (1979, 1986, 2011...)**
- ▶ **Progresser vers un référentiel de sûreté harmonisé au plan international**
(MDEP & Cordel, WENRA, IAEA...)
- ▶ **Créer des services sécurisés pour le combustible** pour les pays primo-accédants au nucléaire :
fourniture de combustible neuf et reprise du combustible utilisé
- ▶ **Mettre en œuvre des stratégies nationales pour créer et exploiter des stockages géologiques de déchets radioactifs HAVL** *(selon un planning propre à chaque pays)*
- ▶ **Intégrer les énergies renouvelables, le nucléaire et d'autres énergies dans un parc de production énergétique bas carbone** (→ *Spécifications pour le stockage d'énergie et les réseaux*)
- ▶ **Evaluer la viabilité économique des petits réacteurs modulaires (SMRs) pour élargir la production nucléaire par les REP au-delà de la seule production d'électricité** *(Chauffage urbain, Hydrogène, Carburants de synthèse durables, Produits chimiques intermédiaires...)*

GESTION DES RESSOURCES EN URANIUM



Source: "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", December 2002

GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM



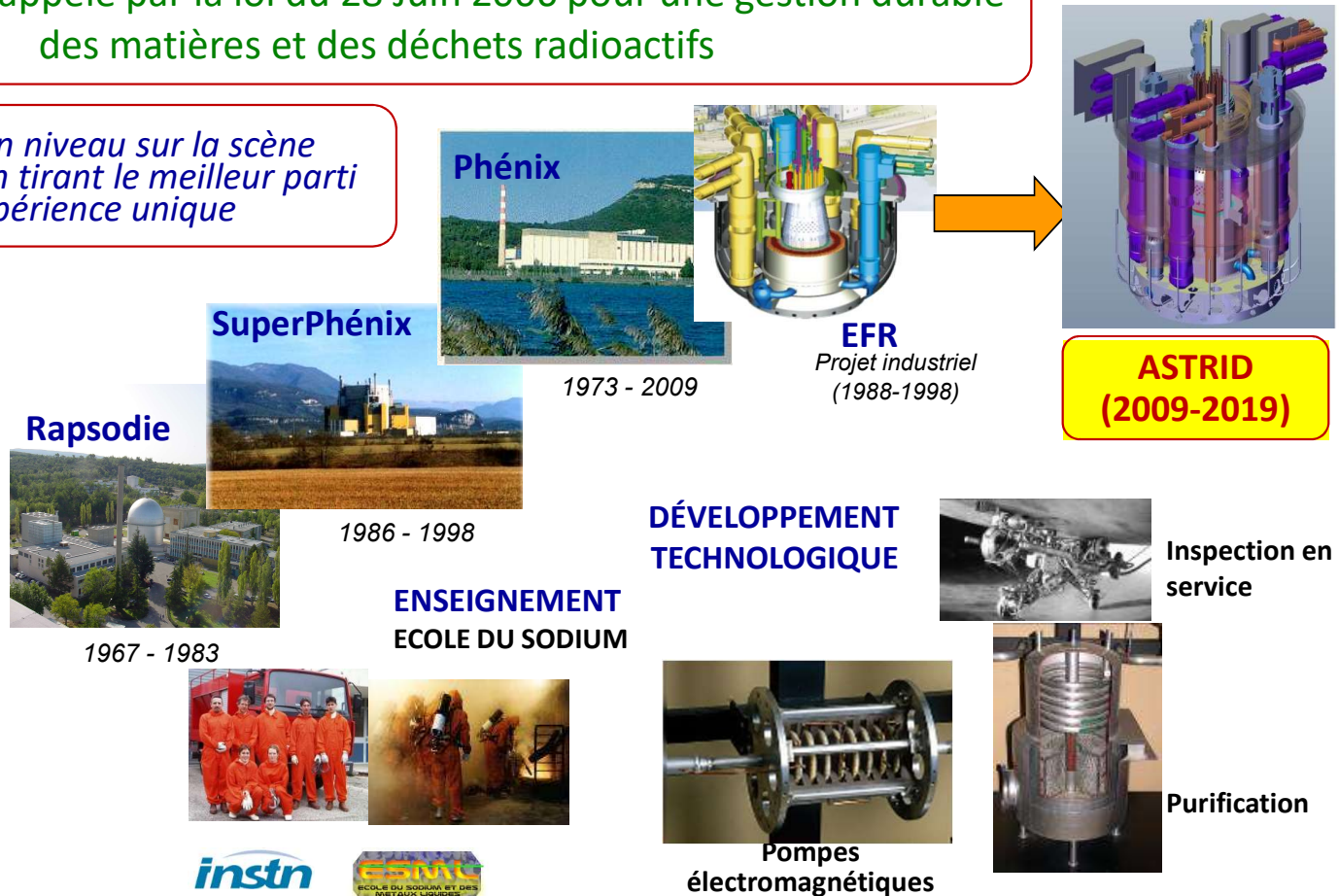
INNOVATIVE NUCLEAR REACTOR & FUEL CYCLE PROJECT (IAEA/INPRO)



LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES AU SODIUM (RNR-NA) EN FRANCE

Projet ASTRID appelé par la loi du 28 Juin 2006 pour une gestion durable des matières et des déchets radioactifs

Revenir au bon niveau sur la scène internationale en tirant le meilleur parti d'une expérience unique



instn

ESM
ECOLE DU SODIUM ET DES
MÉTALLS LIQUIDES

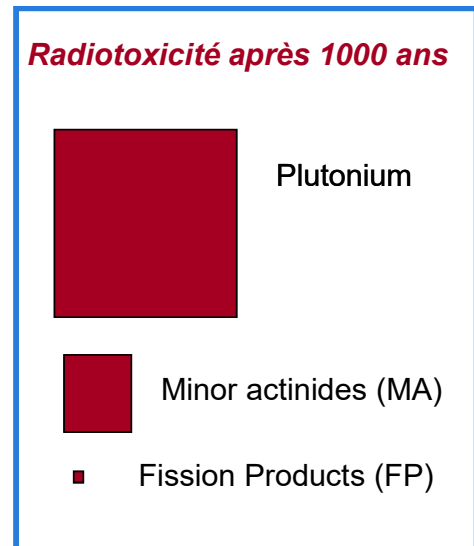
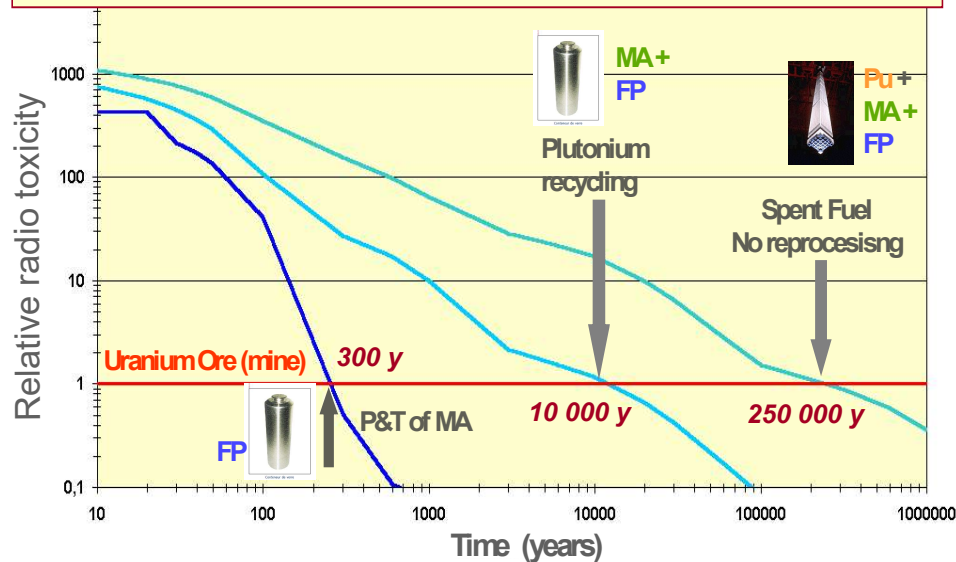
Colloque AEIS-2023 – INTERDÉPENDANCE, PANDÉMIES et CHANGEMENT CLIMATIQUE”
Institut Henri Poincaré, Paris – 23, 24 Novembre 2023

GESTION GLOBALE DES ACTINIDES EN RÉACTEURS À EAU ET À NEUTRONS RAPIDES

Minimisation des déchets radioactifs de Haute Activité et Vie Longue (HAVL)

- **Le plutonium est à la fois :**
 - ✓ la source majeure de radiotoxicité à long terme du combustible utilisé
 - ✓ un élément fissile à forte valeur énergétique

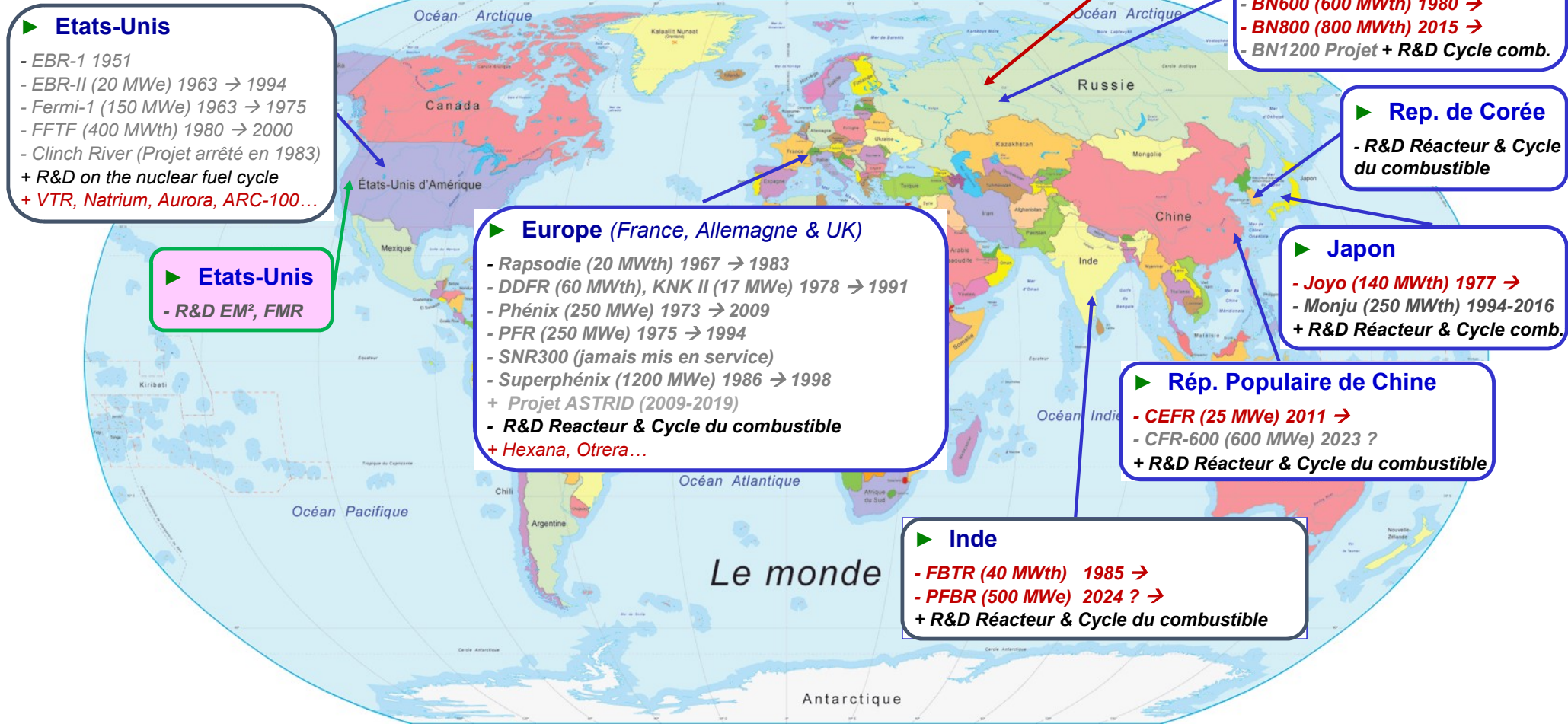
➔ **Recycler le plutonium**



- **Les Actinides Mineurs sont la 2^e source de radiotoxicité à long terme après le Pu**

➔ **Transmutation des AM ?**

LES RÉACTEURS A NEUTRONS RAPIDES (Na, Pb, He) DANS LE MONDE

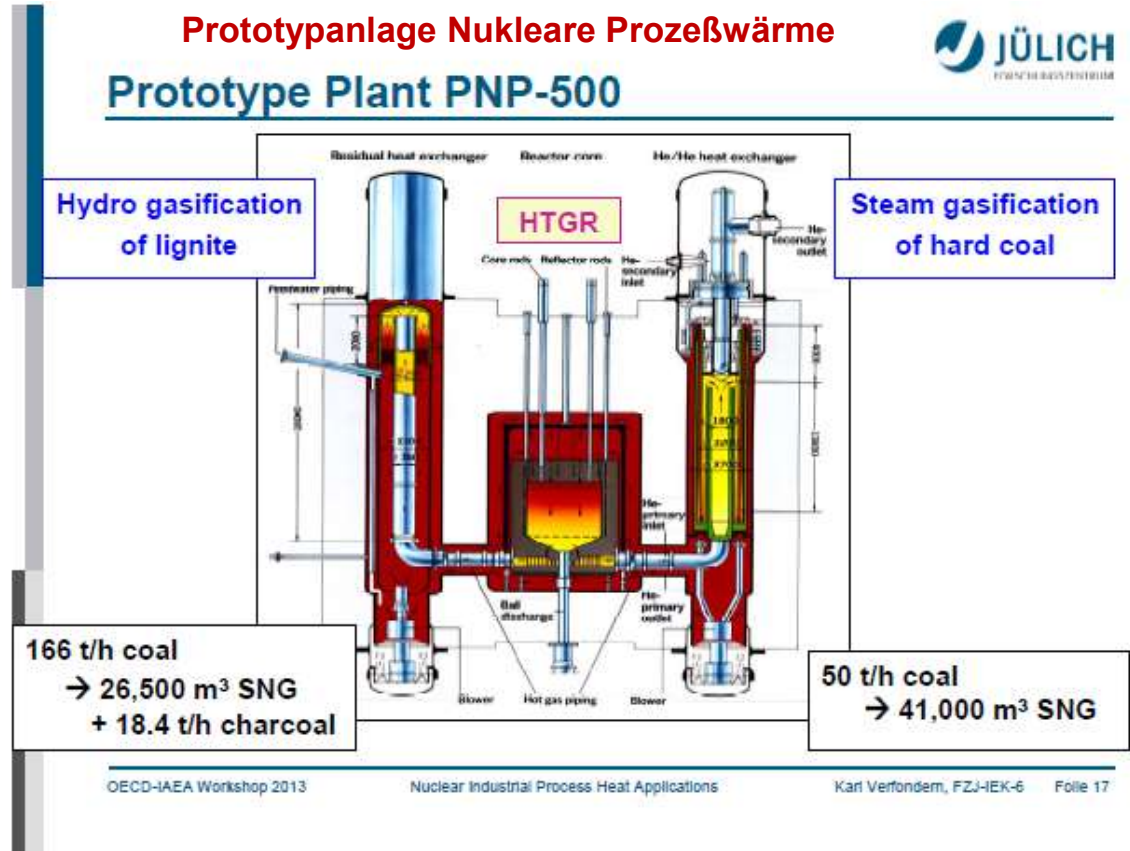
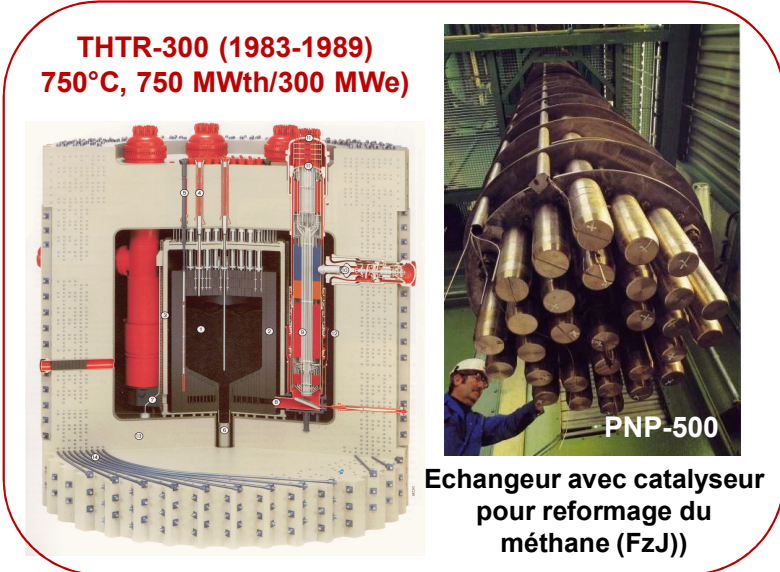
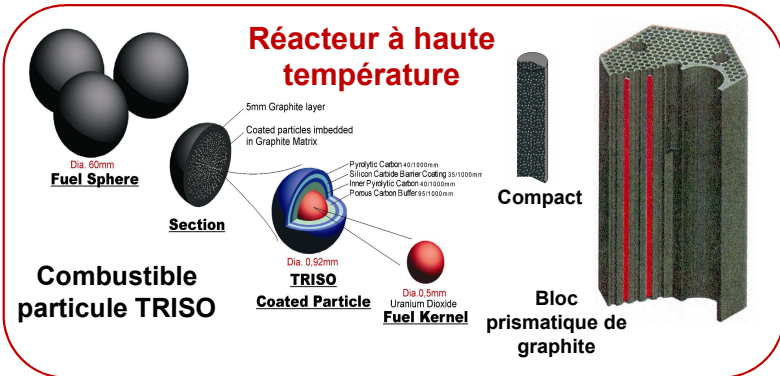


DÉFIS DE RECHERCHE A RELEVER POUR LES RÉACTEURS A NEUTRONS RAPIDES (GEN-IV) ET LE MULTI-RECYCLAGE DU COMBUSTIBLE

Réacteurs à Neutrons Rapides avec recyclage multiple du combustible

- ▶ Un **nucléaire durable** et une priorité institutionnelle pour les pays pauvres en uranium : **utilisation potentielle de tout l'uranium** et **minimisation des déchets radioactifs HAVL**
- ▶ Une capacité de “**brûleur d'actinides**” (TRU) comme première application ou dans la durée
- ▶ Innover pour **faire progresser la technologie et les performances de la filière RNR-sodium** au-delà des réacteurs en exploitation
- ▶ Tirer le meilleur parti de la coopération internationale pour **développer en parallèle d'autres technologies de RNR** : RNR-Plomb, RNR-Gaz, RNR-Sels fondus... pour le plus long terme
- ▶ **Diversité des stratégies nationales de transition entre REP/REB et RNR** avec cycle du combustible fermé
- ▶ Importance des démonstrations de technologies avancées pour RNR & Cycle pour **progresser vers une vision consensuelle des options à privilégier**
(→ *Standards internationaux pour le référentiel de sûreté, le recyclage, les déchets radioactifs, les risques de prolifération...*)

V/HTR : RÉACTEUR À (TRÈS) HAUTE TEMPÉRATURE



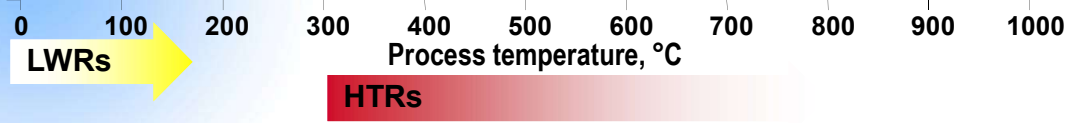
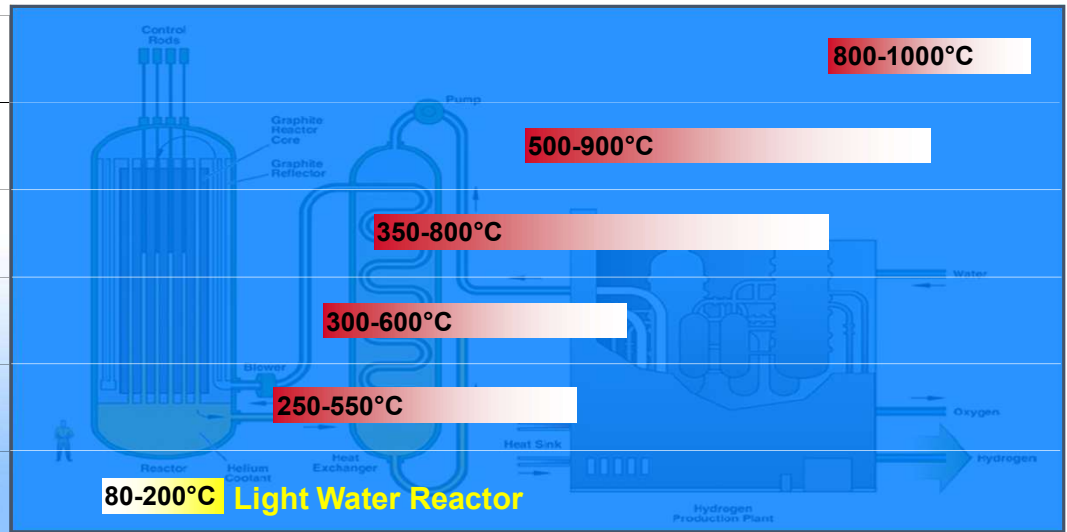
POTENTIEL DES RÉACTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE

Cogénération & Fourniture de chaleur industrielle

NGNP Industry Alliance
Clean Sustainable Energy for the 21st Century

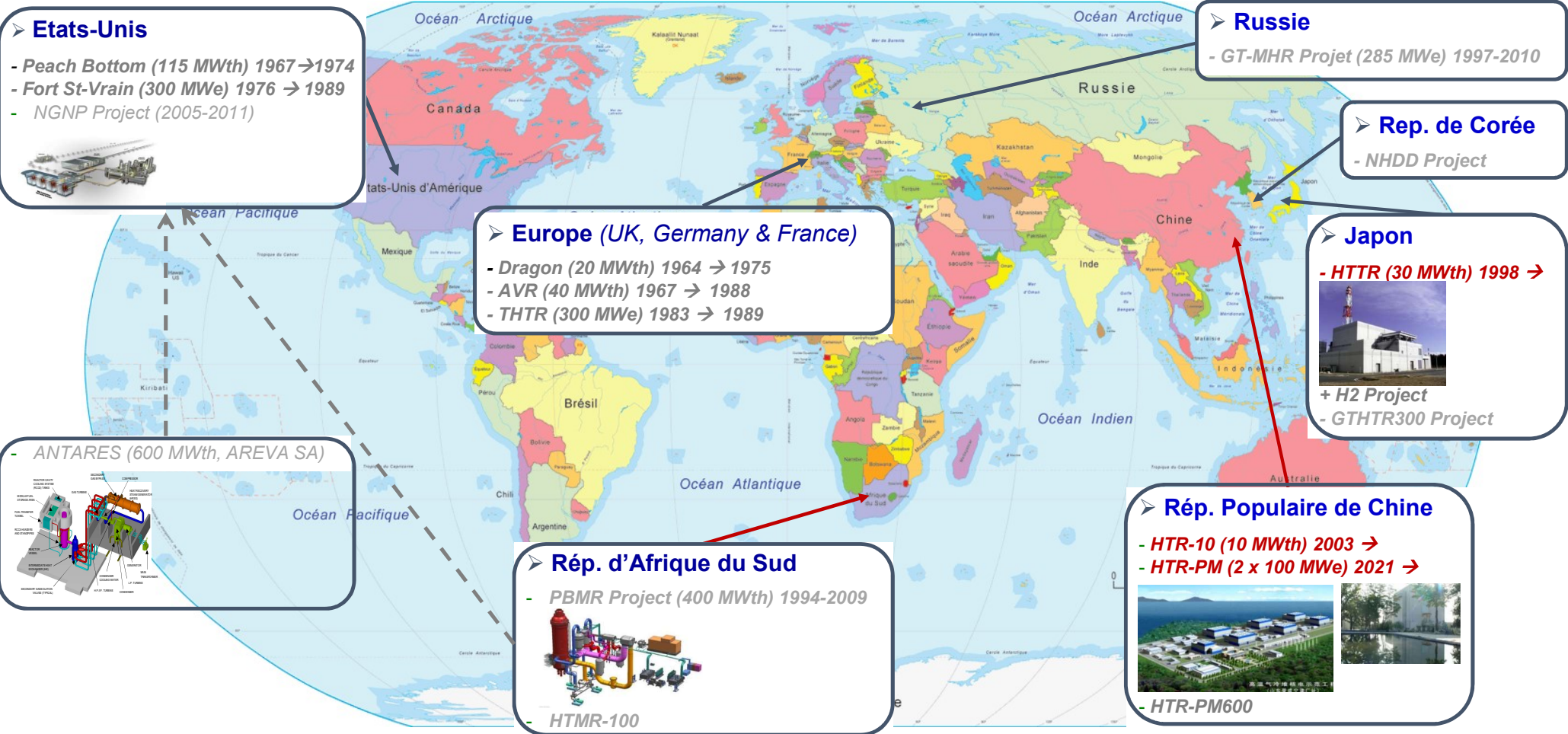
SNETP Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I)
Sustainable Nuclear Energy Technology Platform

- HTSE and thermo-chemical hydrogen production coal gasification
- Steam reforming of natural gas
- Cogeneration of electricity and steam
- Oil shale and oil sand processing
- Petroleum refining
- District heating seawater desalination



Certaines applications sont réalisables avec des réacteurs à eau...

LES RÉACTEURS À HAUTE TEMPERATURE DANS LE MONDE

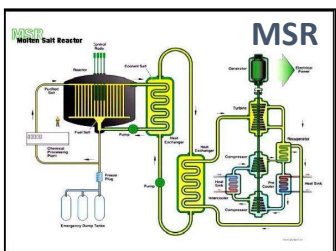
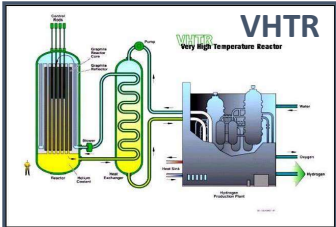
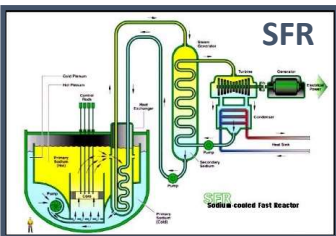


DÉFIS DE RECHERCHE À RELEVER POUR LES RÉACTEURS A HAUTE TEMPÉRATURE ET LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA CHALEUR NUCLÉAIRE

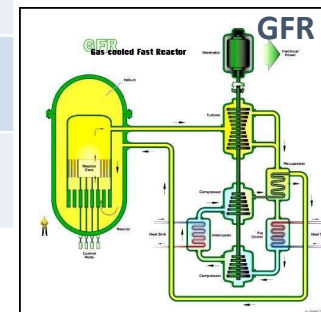
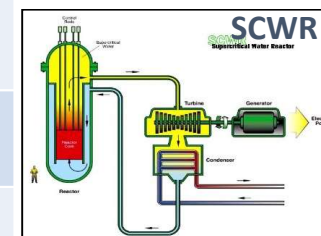
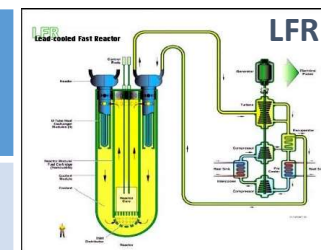
Diversification des fournitures énergétiques

- ▶ **Electricité ~20% de la demande en énergie**
- ▶ **Mieux intégrer le nucléaire dans un mix énergétique décarboné** (*EnR, stockage, réseaux intelligents...*) pour satisfaire l'ensemble des besoins : électricité, transport, habitat, industrie/agriculture...
- ▶ **Apports des réacteurs à haute température pour élargir la production nucléaire au-delà du potentiel des REP/REB et de la seule fourniture d'électricité** (*Hydrogène, carburants synthétiques durables, chaleur industrielle...*) → *Perspectives favorisées par les taxes carbone et le renchérissement du pétrole*
- ▶ **Regain d'intérêt suscité par la diversité des applications permises par les (V)HTR** et les réalisations récentes ou en projet : HTR-PM, NGNP... + Startups
- ▶ **Alliances entre industriels du nucléaire et utilisateurs des productions énergétiques des (V)HTR** pour susciter la réalisation de projets de démonstrations et de prototypes : NGNP-Alliance, NC2I, Gemini+...
- ▶ **RNR-Gaz (GFR)** : une vision de RNR au-delà du RNR-Na et de (V)HTR durable

GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM



	Australia	Canada	China	France	Japan	Korea	Russia	South Africa	Switzerland	United Kingdom	USA	EU
SFR			●	●	●	●	●			●	●	●
VHTR	●	○	●	●	●	●			●	●	●	●
MSR	●	●		●			●		●		●	●
LFR			●		●	●	●				●	●
SCWR		●	●		●		●					●
GFR				●	●							●



*Cooperative R&D is carried under System Arrangements or Memorandum of Understanding (LFR & MSR)



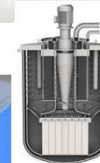
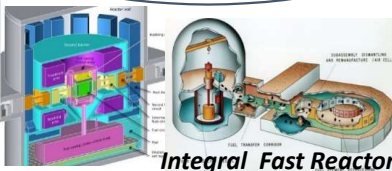
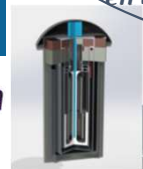
Are non-active members

SMRS, AMRS & MMRS POUR UN RENOUVEAU DU NUCLÉAIRE ?

SMR REP & REB

VOYGR/Nuscale, GE-Hitachi/BWRX-300, ANAEC/CAREM, Holtec/SMR-160
Nuward, CNNC-NPIC/ACP100, CNP-300, Rolls-Royce-SMR, Rosatom/RITM-200N

+
Réacteurs sur barge
 Rosatom/KLT-40S, RITM-200S, CGNPG/ACPR50S
SEABORG/CMSR

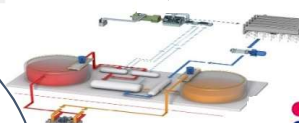


- ▶ Petits réacteurs de conception modulaire réalisables en série en usine (investissement moindre ou étalé sur un même site)
- ▶ Réacteurs transportables en régions isolées, sites industriels, ou remplacement de centrales à charbon...
- ▶ Réacteurs pour une production d'énergie décarbonée diversifiée (électricité, chaleur, H₂...) avec l'option d'un stockage thermique tampon
- ▶ Réacteurs capables d'optimiser par recyclage (y compris sur site) l'utilisation des ressources en combustible (U, Pu, Th) et la production de déchets radioactifs

RHT (& Stockage)

INET/HTR-PM, USNC/MMR, **Jimmy-Energy**, X-Energy/Xe-100, Urenco/U-Battery, Westinghouse/eVinci, HolosGen, HTMR-100, **Kairos/Hermes**, **CEA/Blue Capsule**

NATRIUM



HEXANA



RNR-Na (HALEU) (& Stockage)

TerraPower/Natrium, OKLO/Aurora, ARC-100

RNR-Pb (HALEU)

Leadcooled/Sealer-55

RNR-Na / Pb (UPu) (& Stockage)

CEA/Hexana, CEA/Otrera
 Newcleo, NEEXT-Eng./SPARTA

RSF (HALEU) (& Stockage)

Terrestrial Energy, Moltex/SSR-W, Kairos/Hermes

RSF (UPu & UTh)

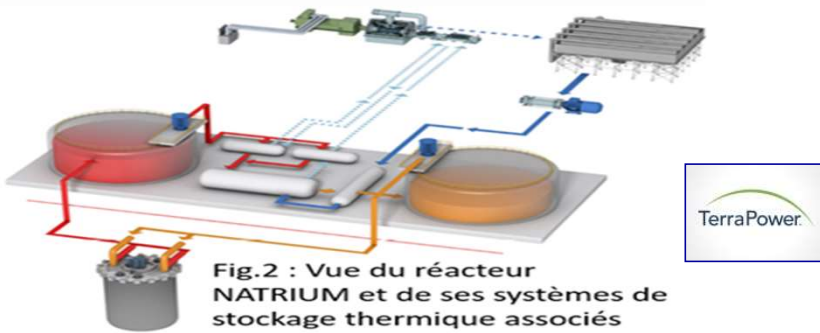
TMSR, NAAREA, CEA/Stellaria



DES RUPTURES TECHNOLOGIQUES PORTÉES PAR DES SMR POUR UN RENOUVEAU DU NUCLÉAIRE ?

- **Natrium** : Réacteur à neutrons rapides au sodium couplé à un stockage thermique pour une plus grande flexibilité

Natrium (345 – 500 MWe, $\eta \sim 40\%$)



- **SMR scellé transportable et récupérable à longue durée de vie** : Une option pour certains pays primo-accédants au nucléaire ?

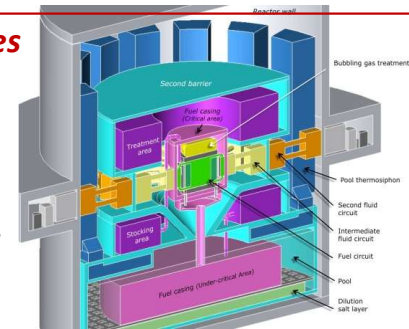
- **Integral Fast Reactor**

Sodium Reactor Evolution



Reacteur/recyclage sur un même site

- **Systèmes nucléaires intégrant réacteur et traitement du combustible usé** : IFR? MSFR?... Du combustible neuf aux déchets ultimes sur le même site ?



Molten Salt Fast Reactor

AUTRES APPORTS DES SCIENCES NUCLÉAIRES AU DÉVELOPPEMENT DURABLE (#SDG)

► FOURNITURE D'UNE ÉNERGIE DÉCARBONÉE ABORDABLE ET RESPECTUEUSE DE L'ENVIRONNEMENT (7 & 13)

► SANTÉ HUMAINE (3)

- Détection et traitement de cancers et de maladie infectieuses
- Radiothérapie : un outil essentiel de lutte contre le cancer
- Amélioration de la nutrition

► LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE (2) L'AGRICULTURE DURABLE (15)

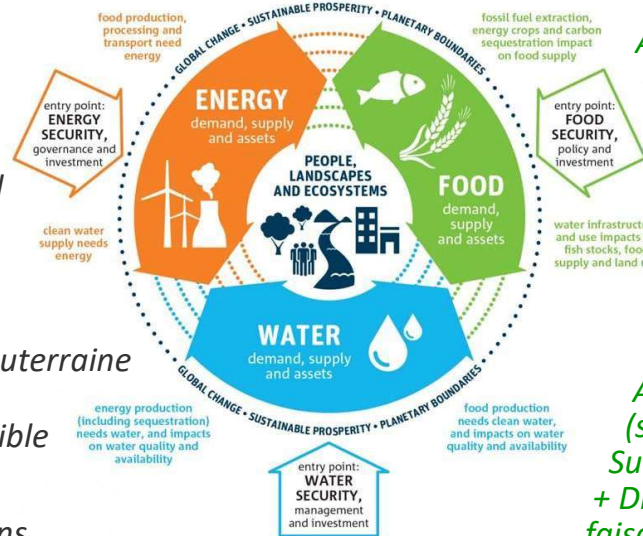
- Sélection de cultures améliorées
- Reproduction et alimentation du bétail
- Défense contre les insectes nuisibles
- Réduction des polluants

► EAU (6)

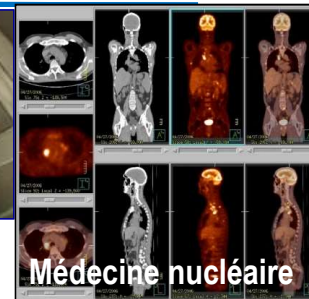
- Cartographie des ressources en eau souterraine
- Exploitation des aquifères
- Evaluation de la quantité d'eau disponible

► PROTECTION DES OCÉANS (14)

- Surveillance de l'acidification des océans
- Compréhension du changement climatique
- Prévention de la pollution marine
- Mesure de la radioactivité dans les océans



Radioisotopes
Radiothérapie
Traçage et imagerie
Marquage isotopique



Agriculture intelligente face au climat
Amélioration des denrées alimentaires,
des aliments pour animaux et des semences
Traçage par isotopes stables et radioéléments
Analyses par résonance magnétique
Analyses d'activation (n, p, X...)
Spectrométrie de fluorescence
Techniques de dépollution

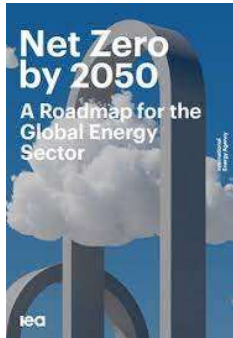
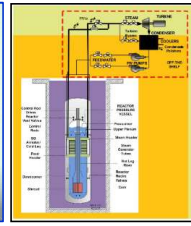
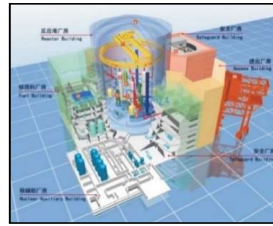
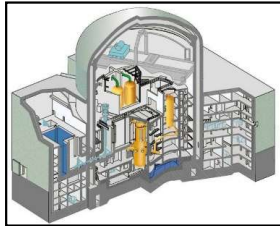
Techniques de traçage isotopique
Analyses des "archives" isotopiques
(sédiments, glace polaire, coraux...)
Surveillance de la pollution plastique
+ Distillation sèche par faisceau d'électrons



ENJEUX LA FILIÈRE NUCLÉAIRE POUR UN DÉVELOPPEMENT DÉCARBONÉ ET DURABLE

Synthèse et perspectives

- ▶ **Faire de l'énergie nucléaire une composante essentielle d'un approvisionnement énergétique bas carbone fiable et abordable**
- ▶ **Réussir la commercialisation des réacteurs à eau *Gen-III* et tirer parti des SMRs pour étendre les apports de la production nucléaire à la décarbonation de l'économie**
 - *Harmoniser au plan international des règles de sûreté et des services sécurisés pour la fourniture de combustible nucléaire et la gestion des combustibles usés*
 - *Evaluer le potentiel des SMRs pour étendre la production nucléaire à la fourniture décarbonée de chaleur, d'hydrogène, de carburants de synthèse durables...*
- ▶ **Poursuivre activement les recherches sur les réacteurs *Gen-IV* : Réacteurs à neutrons rapides, Réacteurs haute température et al.**
 - *Faire progresser les réacteurs à neutrons rapides avec un cycle du combustible fermé pour une production nucléaire durable et une production minimum de déchets radioactifs HAVL*
 - *Coopérer au développement des RNR-sodium et autres technologies RNR dans le monde, ainsi qu'aux démonstrations de productions diversifiées d'énergie par les Réacteurs à haute température*
 - *Explorer le potentiel de technologies de réacteurs plus prospectives en relation avec des startups*
- ▶ **Promouvoir la coopération internationale (*Gen-IV International Forum, IAEA/INPRO, EU-SNE-TP...*) et l'attractivité de la filière pour les jeunes générations**
 - *Pour partager les coûts de la R&D et des démonstrations/prototypes, et pour progresser vers des référentiels de sûreté et de sécurité harmonisés au plan international*
 - *Pour assurer la relève des générations et pour stimuler l'innovation dans les technologies et les pratiques dans un secteur rendu très conservateur par les coûts et délais de R&D ainsi que par la réglementation*



Merci de votre attention !

franck.carre@cea.fr

