



FRAMA

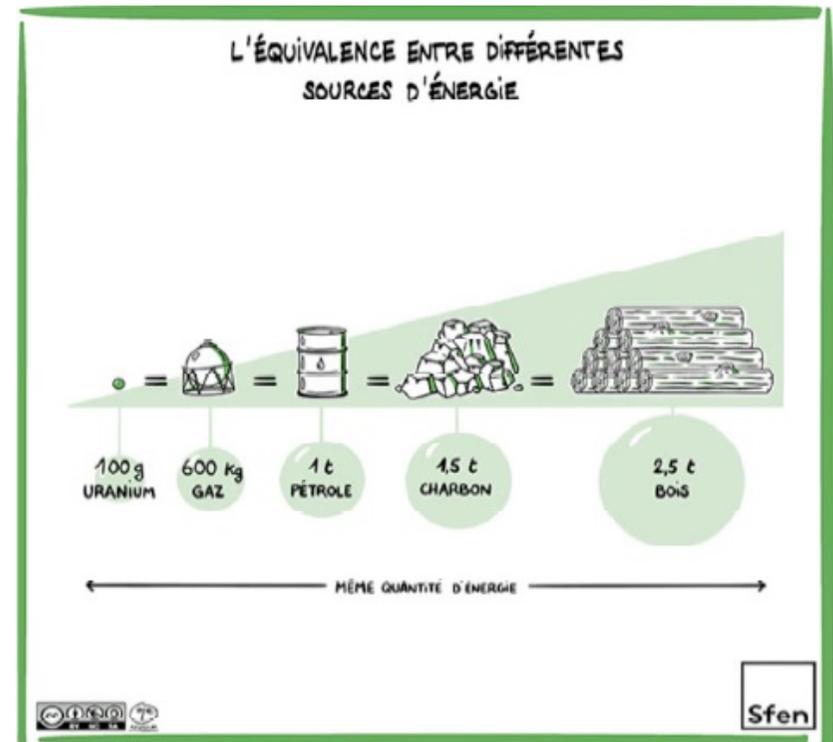
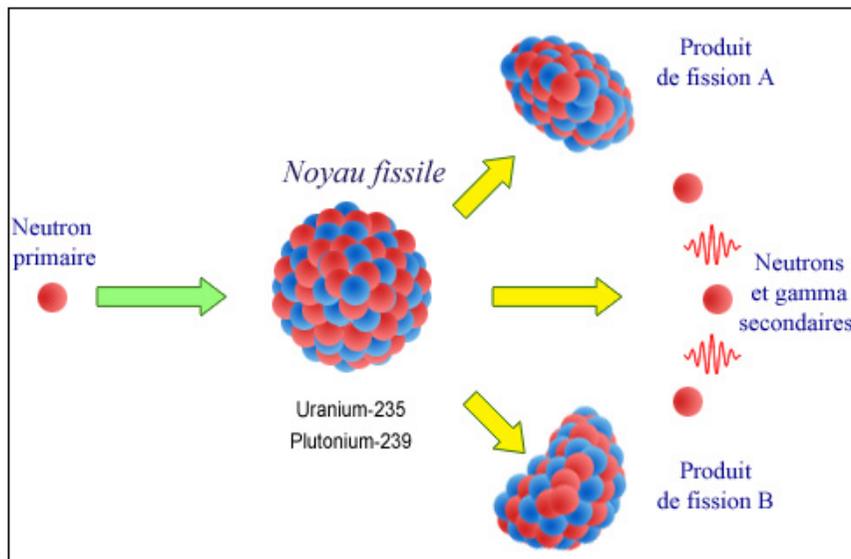


« Physique Chimie au Printemps 2023 : Le Défi Énergétique »

DEFI DE LA FISSION NUCLEAIRE

- **Processus de fission**
- **Un peu d'histoire**
- **Les 4 générations de réacteurs**
- **L'avènement des Startups**
- **Le contexte énergétique mondial**
- **Perspectives**

PROCESSUS DE FISSION



UN PEU D'HISTOIRE...

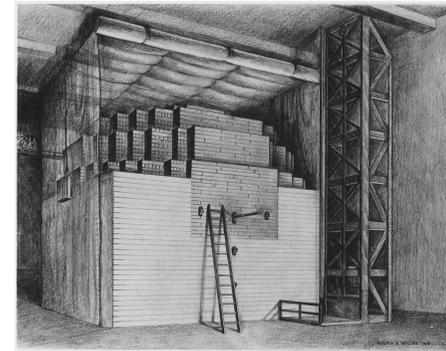
La dynamique des années pionnières

- **1932: découverte du neutron** (J. Chadwick)
- **1938: mise en évidence du phénomène de fission nucléaire** par deux chimistes allemands (Strassmann et Hahn)
- **1939: mise en évidence de la production de produits de fission, d'une grande quantité de chaleur et de 3 neutrons de haute énergie** par trois français (Joliot, Halban et Kowarski).
- **2 août 1939:** Lettre d'Einstein au Président Roosevelt exprimant sa crainte que l'Allemagne nazi se dote d'une bombe atomique

- **1^{er} septembre 1939:** seconde guerre mondiale
- **1939 – 1942: le Projet Manhattan**, dirigé par le général Groves et le physicien Oppenheimer → arme atomique (Hiroshima et Nagasaki été 1945)



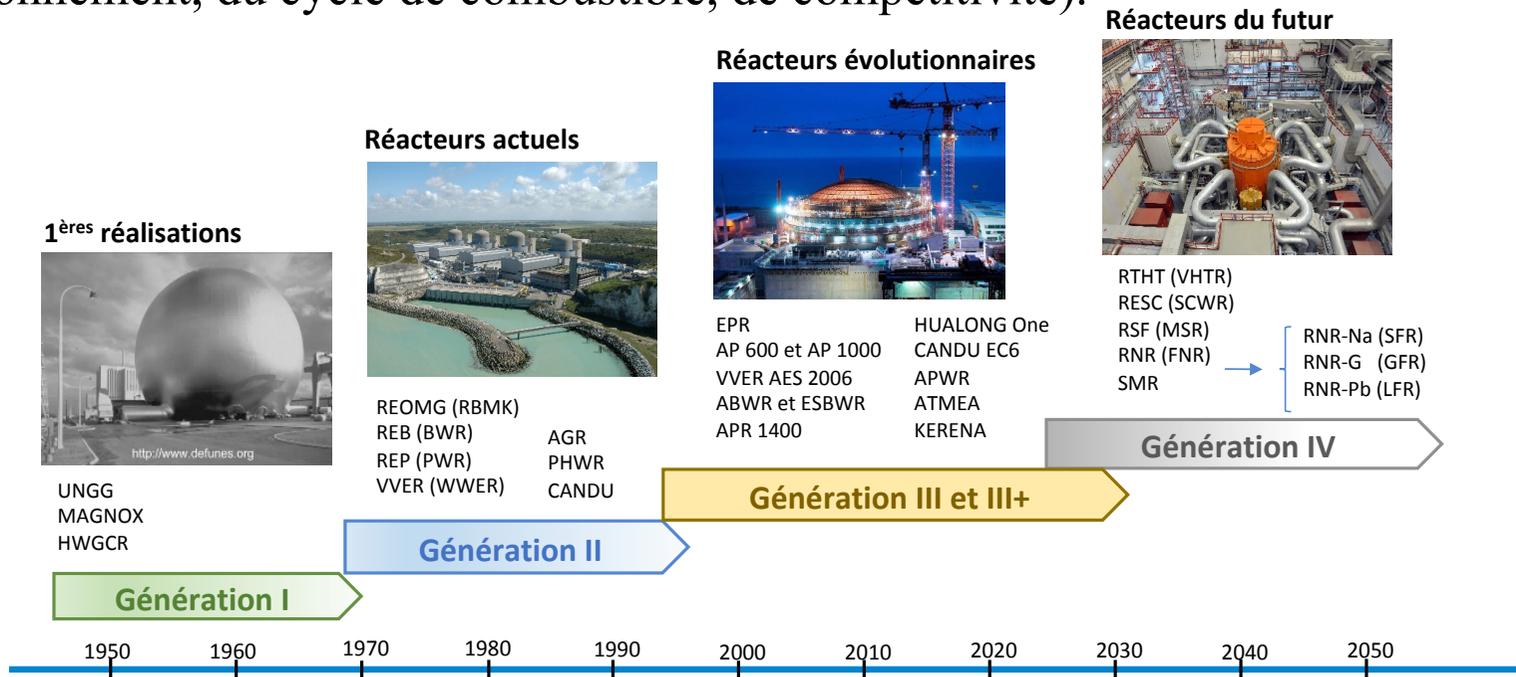
- **1942:** 1^{ère} pile atomique (Fermi-Chicago)
- **1951:** 1^{er} réacteur à neutrons rapides (FNR)
- **1965:** 1^{er} Réacteur à sel fondu (MSR)



Aujourd'hui encore, le nucléaire civil est associé au nucléaire militaire

L'essor de la filière nucléaire

Une **génération** correspond à un **saut technologique** (en matière de sûreté, de fonctionnement, du cycle de combustible, de compétitivité).



Chaque génération répond à des objectifs liés aux enjeux majeurs de l'époque de leur conception.

Précisions technologiques

- On trouve **plusieurs technologies dans chaque génération.**

- **Réacteur de fission**

Combustible: Uranium

Nécessité d'un modérateur et d'un caloporteur

(eau, gaz, métaux liquides, sels fondus...)

SAUF pour réacteurs à neutrons rapides

- Différentes familles de réacteurs selon les couples « modérateur/ caloporteur » et selon leur taille:
 - « **mini** » réacteur: 5 MW
 - « **petit** » réacteur: entre 50 et 500 MW
 - « **gros** » réacteur: entre 1000 MW (capacité d'adaptation) et 1600 MW (pour réseaux électriques de forte puissance très interconnectés)

➤ **Problématiques de sûreté**

Contrôle de la réaction nucléaire

Confinement des produits de fission

Evacuation de la puissance

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

1^{ère} génération

Conçue dans l'immédiat après-guerre 39-45

Démonstration du potentiel de la puissance atomique mise au service de l'énergie civile

Caloporteur: eau,

Modérateur: graphite

Combustible: uranium naturel (majorité des réacteurs)

Puissance comprise entre 50 et 500 MW



Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon (© IRSN / Jean Chipot)

➤ **UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) en France**

En cours de démantèlement

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

2ème génération

entrée en service à partir de 1970

raison de sécurité/souveraineté énergétique (1974: plan Mesmer, choc pétrolier).

- Caloporteur: eau
- Modérateur: eau
- Combustible: uranium enrichi (majorité des réacteurs)
- Puissance comprise entre 900 et 1500 MWe

➤ **REP (Réacteur à Eau Pressurisée) en France**



Bugey/Forget Patrick

LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

3ème génération

Conçue à partir des années 1990

- Risques climatiques: protocole de Kyoto (1997)  limitation des gaz à effets de serre
- 2008: politique intégrée de l'énergie et de lutte contre le changement climatique adoptée par l'Union Européenne

Prend aujourd'hui progressivement le relais

- améliorer la sûreté du réacteur (agressions internes et externes)
- augmenter la performance économique (l'EPR fournirait 22 % d'électricité supplémentaire qu'un réacteur traditionnel à partir de la même quantité de combustible !!)

 **Majorité des réacteurs actuellement en construction dans le monde**

3ème génération et 3+

Réacteurs dits « évolutionnaires »

tirent les enseignements

du retour d'expériences,

de l'exploitation des réacteurs de génération 2,

des accidents passés (*Three Miles Island - 1979, Tchernobyl - 1986, Fukushima - 2011*).

Les EPR (European Pressurized Reactor) dans le Monde

➤ France :

Flamanville 3 (démarrage prévu en 2024)

projet né d'un rapprochement franco-allemand à la fin des années 1980 (Framatome et Siemens) mais retrait de l'Allemagne en 1998
conçu pour une durée de fonctionnement de 60 ans
puissance de 1600 MWe

➤ Chine :

Deux réacteurs en fonctionnement (Taishan, mise en service 2018 et 2019)

➤ Finlande :

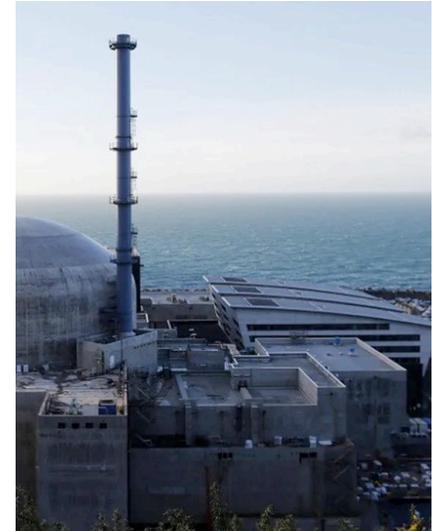
Un réacteur en service industriel (Olkiluoto, 2021)

➤ Royaume Uni :

Deux réacteurs en construction (Hinkley Point, mise en service prévue vers 2026)

➤ En projet :

Sizewell C (UK 2EPR)) - Jaitapur (Inde 6 EPR)



Flamanville

EPR2 : La version optimisée et industrialisée de l' EPR



Un réacteur nucléaire
qui reprend les atouts
de l'EPR



Qui intègre pleinement
le retour d'expérience



Conçu pour être exploité
dans un mix à forte composante
en énergies renouvelables



Dans un programme de
3 paires de réacteurs

Discours d' Emmanuel Macron le 10 février 2022:

- construction de **6 nouveaux réacteurs EPR2 en France** pour une mise en service à partir de 2035
 - trois paires pour optimiser les coûts et les délais de construction
 - implantation de la première paire sur le site de Penly
- 8 réacteurs supplémentaires sont à l'étude

Les SMR (Small Modular Reactor)

- **Small** → Puissance de 50 à 300 MWe
- **Modular** → Conception et réalisation modulaires
Fabrication standardisée en usine
- **Reactor** → Différentes technologies de réacteur (GEN3/GEN4)
Multi-usages

Naissance des projets SMR :

- Limiter les risques de dépassement de délais et de coûts de construction
- Besoin de soutenir la propulsion nucléaire navale

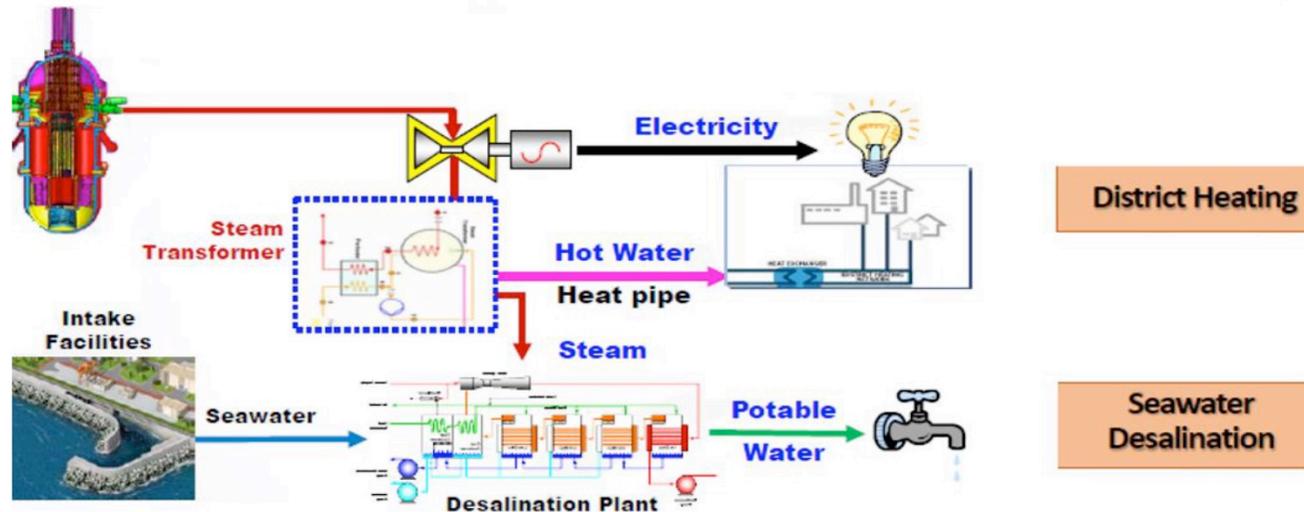
Avantages et critères de performances:

- Sûreté
- Compétitivité
- Réduction du besoin de l'investissement initial
- Réduction des risques associés

Nouveaux usages adaptés aux enjeux actuels et futurs

➤ Diversifier les usages du nucléaire :

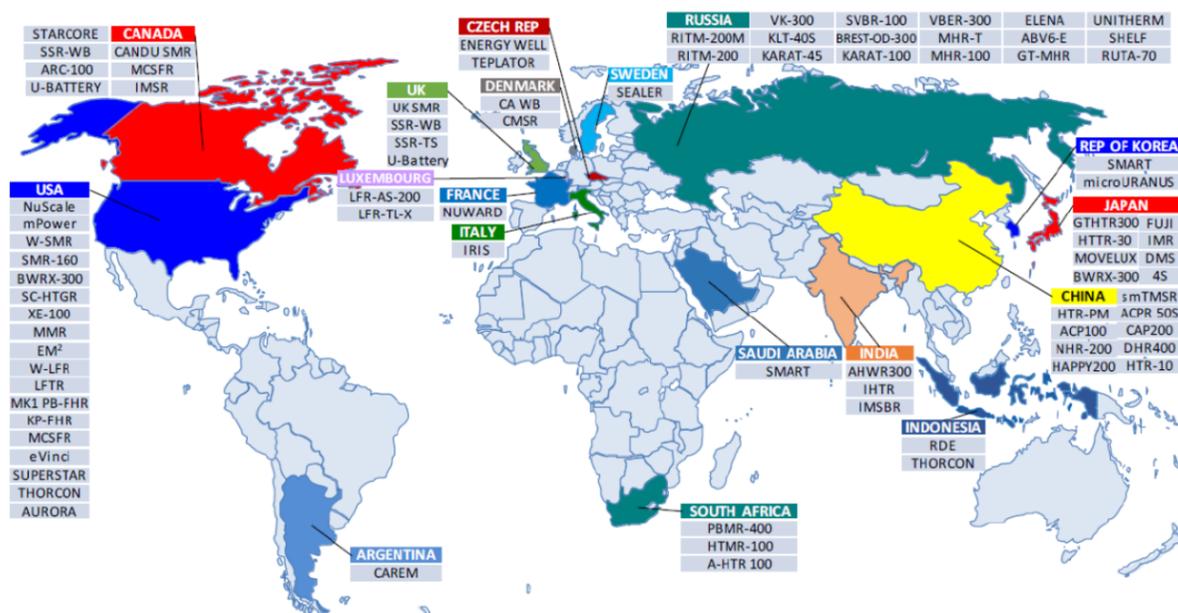
- Production de chaleur ➡ chauffage urbain et industrie
- Désalinisation
- Production (décarbonée) d'hydrogène et de carburants de synthèse durables (produits à partir de biomasse ou de CO₂)



Nouveaux usages adaptés aux enjeux actuels et futurs

- **Alimenter des sites isolés non connectés au réseau électrique**
- **Répondre aux contraintes des réseaux insuffisants pour les fortes puissances**
- **Assurer les besoins de complément aux énergies renouvelables intermittentes** avec une base bas carbone pilotable et flexible
- **Remplacer des centrales au charbon vieillissantes et polluantes**

Panorama des SMR en développement dans le monde



72 concepts identifiés dans le monde [base ARIS 2020 de l'AIEA]:
 profusion dans les grands pays nucléaires (USA, Chine, Russie)

Panorama des SMR en développement dans le monde

➤ En fonctionnement: en Chine, 125 MWe
en Russie, 2 de 75 MWe

➤ Bientôt:
en Europe (Roumanie et Pologne)
au Canada (Ontario)
330 MWe pour alimenter 300 000 foyers (fin 2028)



Three letters that can help solve climate change

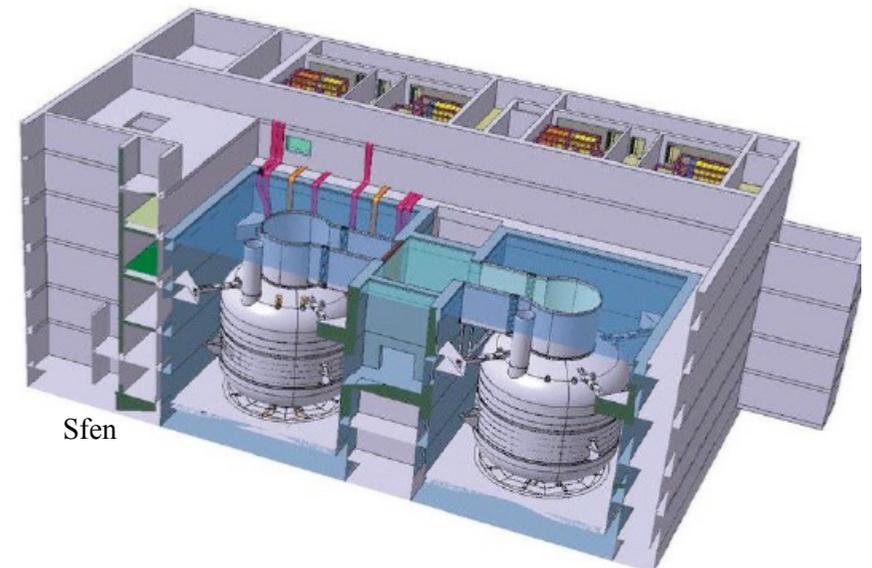
Ontario's nuclear know-how is helping lead the way for this real solution to climate change.

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

Le projet français NUWARD

- Nuward : une centrale de **340 MWe** comprenant **2 réacteurs intégrés**
Modèle à eau pressurisée
- Financement public de 1,1 milliards d'euros (premier démonstrateur en 2030)
- Ouverture à la coopération européenne



LES 4 GENERATIONS DE REACTEURS

4ème génération

- **Genèse:**

Forum Génération IV créé en 2000,

Aujourd'hui, rassemble 13 pays (Afrique du Sud, Argentine, Australie, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie et Suisse) et Euratom.

- **Objectifs:**

➤ durabilité,

par la surgénération (meilleure utilisation de la ressource uranium) et la consommation de certains déchets nucléaires produits

4ème génération

➤ non-prolifération et sécurité,

par l'impossibilité de produire la matière nécessaire à la fabrication d'armes nucléaires et par une meilleure résistance aux attaques terroristes

➤ sûreté nucléaire

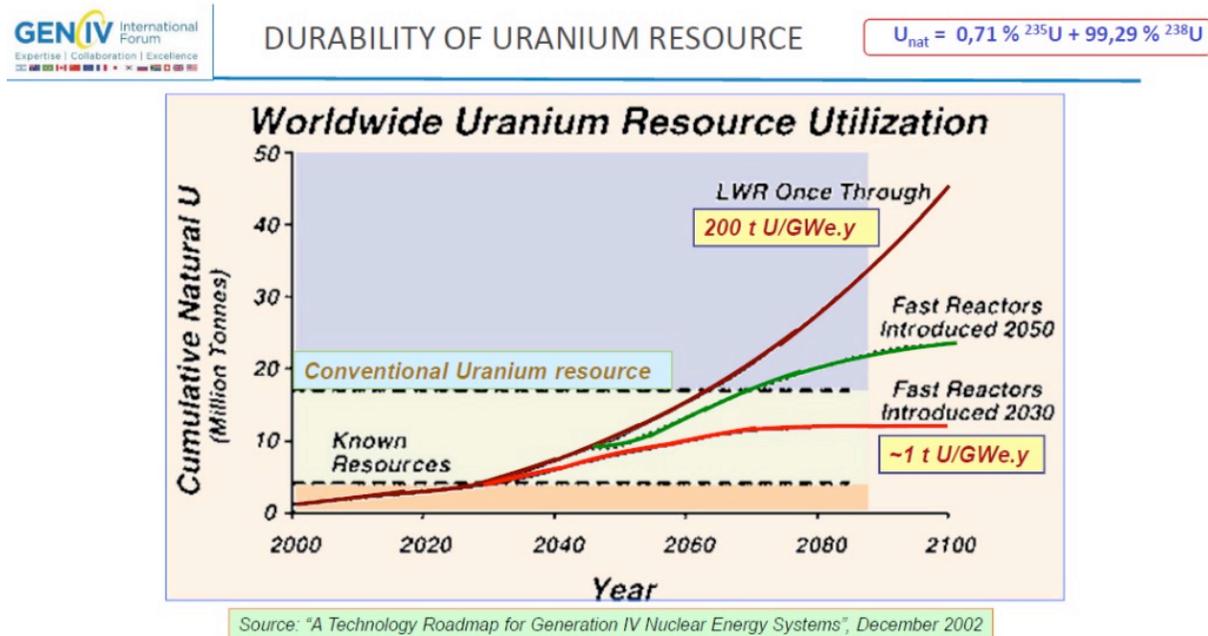
par la réduction des risques d'accidents graves et par le confinement des matières radioactives si un accident se produisait

➤ intérêt économique

par la diminution des coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement

Réacteurs à Neutrons Rapides

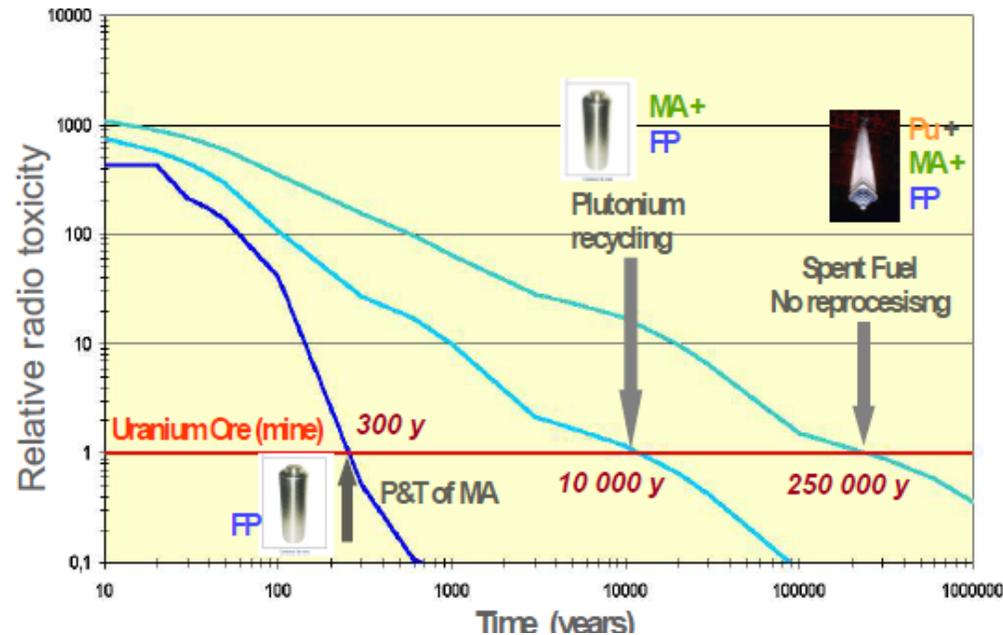
- Performances élevées pour l'utilisation complète de l'uranium et le recyclage du combustible utilisé → Technologie de « Nucléaire durable »



Réacteurs à Neutrons Rapides

- *Plutonium is the major contributor to the long term radiotoxicity of spent fuel*
- *Plutonium has a high energetic potential*

→ *Plutonium recycling*



Diminution de la radiotoxicité sur le long terme

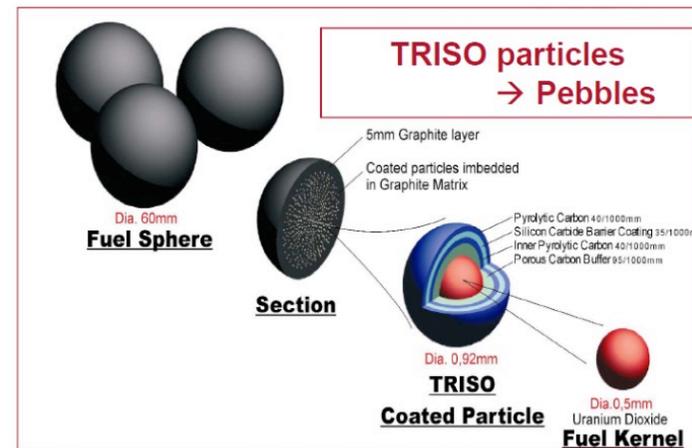
Réacteurs à Neutrons Rapides

- RNR-Na, refroidi au sodium
 - Filière née des besoins pour la défense et perspectives de durabilité: Phénix, Superphénix, projet ASTRID (2009-2019)
 - Evolution vers l'approche SMR: progrès en sûreté, capacité de fonctionner de longues durées sans rechargement
 - Projets de startups pour de petits réacteurs
- RNR-Pb, refroidi au plomb: réacteur BREST-300 en Russie
- RNR refroidi au gaz

Réacteurs à Haute Température - HTR

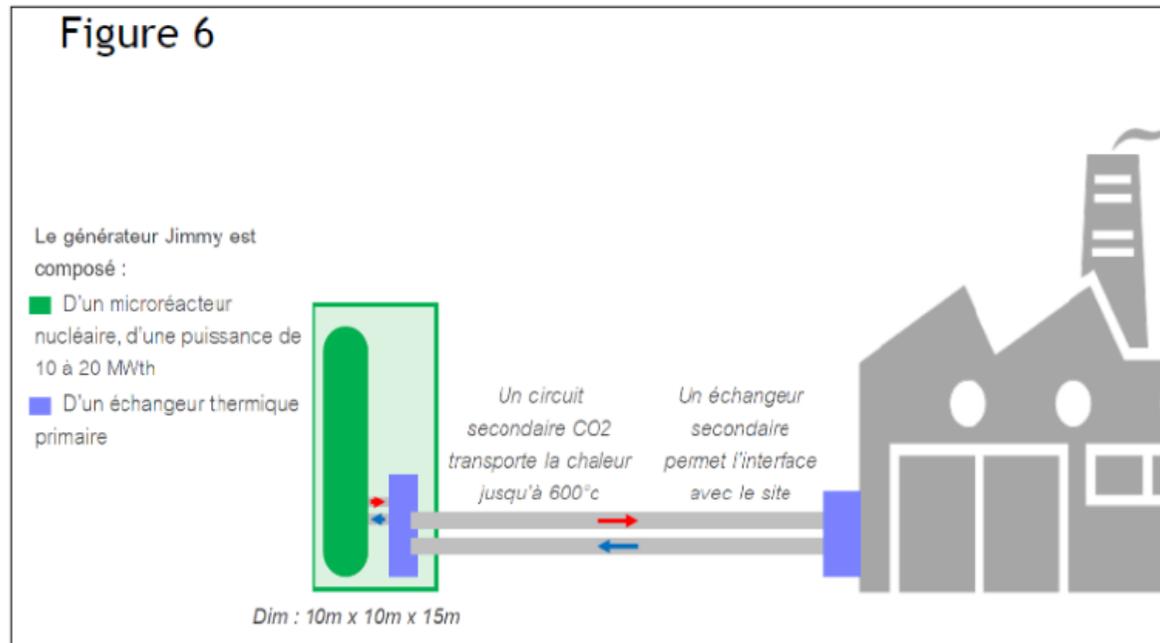
- Intérêt: production de chaleur industrielle à haute température (850°C)

- Technologie de combustible Triso



- Chine: mise en service en 2021 de l'installation HTR-PM
- Représentent 1/3 des projets des startups (ex: Jimmy Energy)

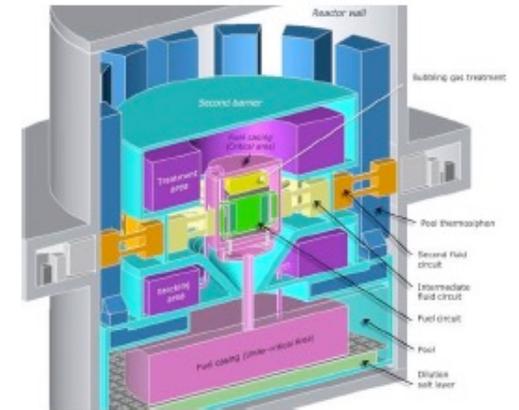
Jimmy : microréacteur calogène de 10 MWth



mise en service d'un démonstrateur industriel dès 2026

Réacteur à sels fondus - MSR

- Matière fissile mélangée avec caloporteur
- Neutrons épithermiques
- 1700 MWth – 800°C
- Perspectives prometteuses pour la sûreté et le cycle du combustible (combustible U-Th, consommation des actinides)
- Corrosion des matériaux de structure
- Traitement du sel usé
- Réacteur expérimental 1965-1969 au Laboratoire National d'Oak Ridge
- Chine: 1 réacteur
- Projets de startups



L'AVENEMENT DES STARTUPS

- **70 startups nucléaires** dans le monde
 - **Modification du cadre traditionnel de développement** des réacteurs nucléaires
 - **Renouveau des réflexions** sur les applications non exclusivement électrogènes du nucléaire:
 - fourniture de chaleur (décarbonée) pour des serres agricoles, des élevages, des logements, des bureaux, des industries...
 - Ex: Chine (Haiyang): besoin en chauffage et eau chaude de 650 000 habitants*
 - Chauffage urbain dans des pays exposés à des hivers froids (Russie, République Tchèque, Slovaquie...)*
 - Production (décarbonée) d'hydrogène et de carburants de synthèse durables
 - Stations de dessalement d'eau de mer (Japon, Inde)
- Dans le monde, **74 sur 444 réacteurs** nucléaires de la planète récupèrent cette chaleur « fatale »
En France, **7 sur 18 centrales** de l'hexagone redistribuent une petite partie de leur chaleur fatale.
- **Besoin de coopérations** étroites avec les grands acteurs de la filière et d'un **soutien financier**

LE CONTEXTE ENERGETIQUE MONDIAL

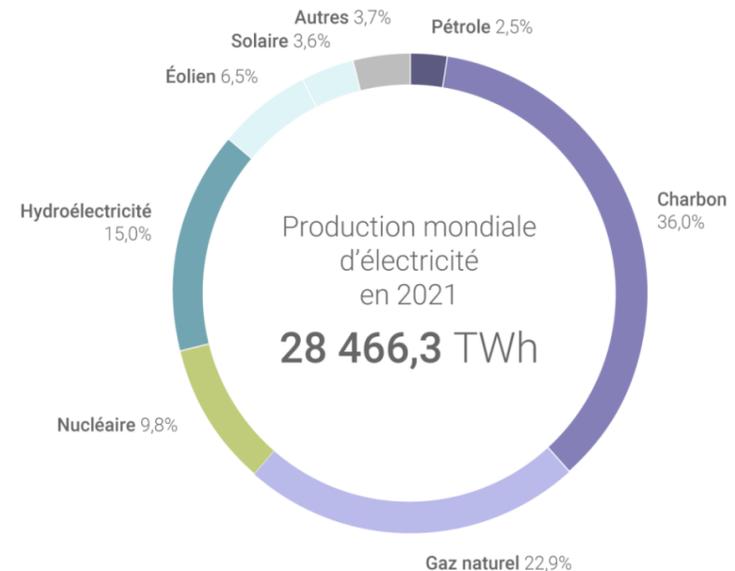
L'urgence climatique nécessite une **croissance rapide de la production d'électricité décarbonée** avec une électrification massive des usages (chauffage, mobilité..).

Pour rester en dessous d'une augmentation de la température de +2°C, il faut passer de **28 000 TWh en 2021 à 37 000 en 2030 et 71 000 TWh en 2050, soit +170% d'ici 2050.**



investissements massifs, sans commune mesure avec les 20 dernières années

Production mondiale d'électricité



Source BP statistical Review of World Energy

La place du nucléaire

- **Essentielle** aux côtés des Energies Renouvelables
- Permet une **production pilotable sans émissions de CO2** et assure une **indépendance vis-à-vis des producteurs de gaz et de pétrole**

- Rapport de RTE «**Futurs énergétiques 2050**» propose 6 scénarios de mix de production (pour la France)
 - Les **3 scénarios comportant une part significative de nucléaire** (scénarios 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

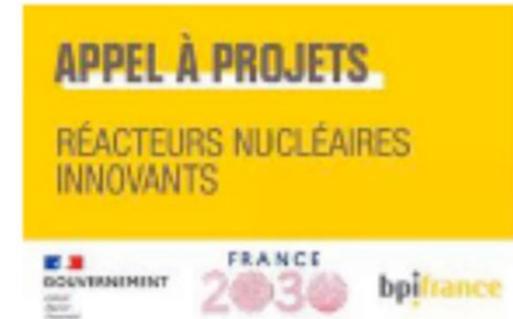
Soutiens par les plans

Financé par



GOVERNEMENT

Liberté
Égalité
Fraternité



- **Faire valoir l'expertise des acteurs nationaux sur la scène internationale**
 - pour les nouveaux réacteurs
 - pour les normes réglementaires (sécurité, sûreté, gestion des déchets radioactifs)
- **Développements précurseurs de procédés d'intérêt international pour la décarbonation (chaleur, carburants)**

PERSPECTIVES

Très important potentiel de progrès de l'énergie nucléaire

Energie nucléaire est un acteur vital dans un mix énergétique propre et respectueux du climat

➤ **A court et moyen termes**

- **Soutien des réacteurs de 2^{ème} génération aux meilleurs niveaux de sûreté et de performance**
- **Commercialisation des réacteurs à eau de 3^{ème} génération:** nouveaux modèles de réacteurs de forte puissance (faire la preuve d'une meilleure maîtrise du coût et du délai de construction)
- **Petits réacteurs modulaires:** diversification des usages nucléaires (fourniture de chaleur, hydrogène, carburants de synthèse)
- **Soutien aux Startups :** stimulation de l'innovation (technologies, de champs d'applications, de réglementation)
- **Industrialisation de l'assainissement et du démantèlement**



Dynamique de ce déploiement déterminera la part du nucléaire dans la réduction des émissions de CO2

➤ **A long terme, déploiement des réacteurs de 4^{ème} génération**

- **Réacteurs à neutrons rapides de différentes technologies** (sodium, plomb ou gaz)
- **Réacteurs à haute température:**
décarboner la chaleur et les carburants
- **Réacteurs à sels fondus** (filère plus prospective, rupture technologique):
évaluer les apports potentiels

- **Importance de la coopération internationale**
 - **Partage des coûts** de R&D et des démonstrations de prototypes
 - **Harmonisation** entre pays nucléaires **des règles de sûreté et de sécurité**
 - **Cahier des charges international d'une usine de retraitement des combustibles usés**

- **Apports des sciences nucléaires**
 - **Médecine nucléaire** (thérapies...), **optimisation de pratiques agricoles ou industrielles** (activation, traçage isotopique...), ...

- **Attractivité de la filière pour la jeune génération (en France: 10 000 recrutements/an jusqu'en 2030)**

Projets de réacteurs à fission pour le spatial

- **réacteur électrogène pour la propulsion électrique ou pour des bases lunaires habitées,**
Programme Artémis : développer un réacteur nucléaire d'une puissance de un kilowatt permettant de répondre aux besoins d'une future base lunaire.
- **réacteur nucléaire pour la propulsion nucléaire-thermique de fusées (le réacteur nucléaire chauffe le fluide propulsif),**
Programme DARCO « Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations »: mettre en orbite un réacteur nucléaire thermique.

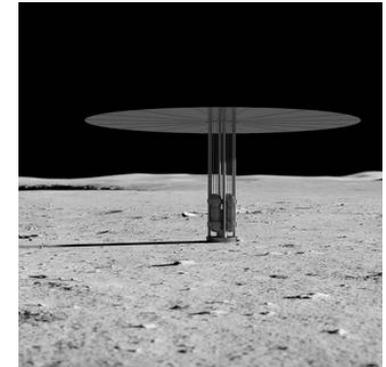
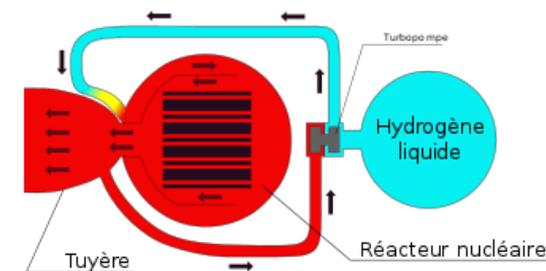


Illustration of a conceptual fission surface power system on the Moon.
Credits: NASA



Moteur nucléaire thermique

MERCI DE VOTRE ATTENTION !

Mes remerciements à

- *Frank CARRE, CEA et énergies alternatives*
- *Thierry CAILLON, Sfen*
- *Françoise TERNON-MORIN, Sfen*
- *Régis MILAN, Sfen*
- *Dominique VIGNON, Académie des technologies*