

Energie nucléaire Réacteurs de fission neutronique

Par X. Chavanne

Univ. Paris Cité & Institut de Physique du Globe de Paris

Energie nucléaire : les réacteurs

Historique, principe et originalité

d'une source mystérieuse de rayonnements à la bombe
une énergie hyper-concentrée et “donc” efficace
principaux éléments et contraintes d'un réacteur

Différents réacteurs de fission

combustibles, modérateurs, caloporteurs
les sur-régénérateurs
réacteurs de petite taille

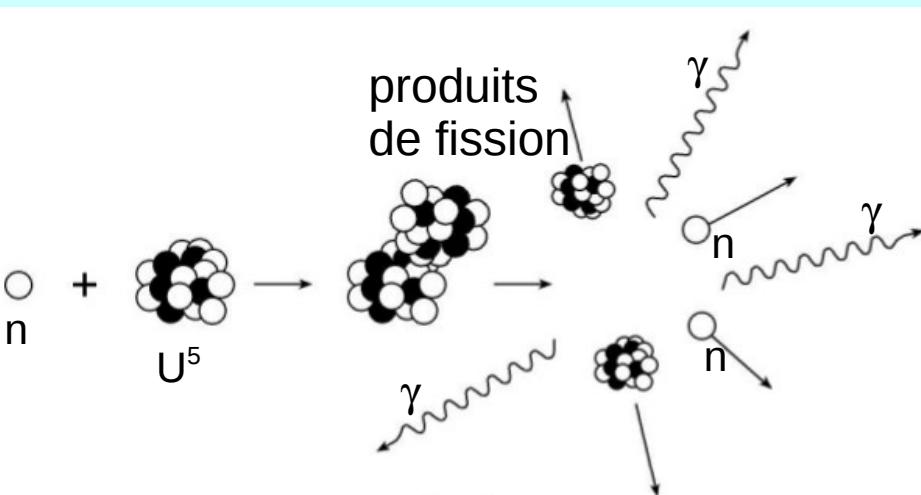
Présent et futur (2020 -> 2050)

Etat des lieux en 2020
Quelle perspective ?

Historique

En moins de 50 ans la Physique pose les concepts d'une nouvelle source d'énergie, la fission nucléaire par neutron, et procède aux réalisations : réacteurs et bombes

H. Becquerel Rayonnements α, β, γ d'un mineraï de U	A. Einstein $E=mc^2$	J. Chadwick Neutron n	O. Hahn, F. Strassmann, L. Meitner et O. Frisch Fission de U et énergie produite 200 MeV/atome	N. Bohr Fissile U ²³⁵ Fertile U ²³⁸
1896	1898	1905	1911	1932
M. et P. Curie Radioactivité Désintégration d'un atome (Po, Ra)	E. Rutherford l'atome = e- et son noyau+		1935	1939
			E. Fermi Bombardement de U avec n	1939
			F. Perrin et F. Joliot-Curie Auto-entretien (réacteur) et divergence (bombe)	1940
				1942
				E. Fermi, L. Szilard Pile/réacteur 1 W U nat. + graphite Criticité et n retardés



+ **Chaleur de fission** : 193 MeV/U
Ou 1 867 000 tep_{th} /t_U en fissionnant tous les noyaux
→ électricité ($\eta \sim 1/3$) ~ 620 000 tep_e /t_U ou 7 TWh_e /t_U

Réacteur classique ~ 11 000 tep_{th} /t_U U naturel
→ électricité ($\eta \sim 1/3$) ~ 3 700 tep_e /t_U ou 45 GWh_e /t_U

Energie hyper-concentrée et efficacité

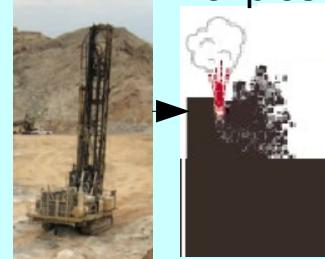


Mine à ciel ouvert de Rössing, Namibie

U/minerai : 280 ppm

2006 : $m_{\text{roche}} = 28,8 \text{ Mt}_{\text{roche}}$, $m_{\text{minerai}} = 12 \text{ Mt}_{\text{minerai}}$, $m_{\text{U}} = 3,07 \text{ kt}_{\text{U}}$

Forage trou de mine
Abattage explosif



$$r_{\text{for}} \sim 1,5 \text{ MJ}_e \cdot t_{\text{roche}}^{-1}$$

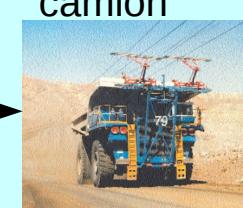
$$r_{\text{exp}} \sim 3,4 \text{ MJ}_{\text{NH}_3} \cdot t_{\text{roche}}^{-1}$$

Excavation
chargement



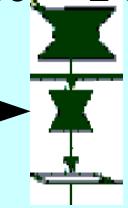
$$r_{\text{chr}} \sim 0,10 \text{ MJ}_e \cdot t_{\text{roche}}^{-1}$$

Transport camion



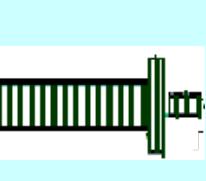
$$r_{\text{tr}} \sim 0,6 \text{ MJ}_e \cdot (\text{km} \cdot t_{\text{roche}})^{-1}$$

Concassage
50 > 2 cm



$$r_{\text{con}} \sim 2,8 \text{ MJ}_e \cdot t_{\text{minerai}}^{-1}$$

Broyage
> 0,3 mm



$$r_{\text{bro}} \sim 35 \text{ MJ}_e \cdot t_{\text{minerai}}^{-1}$$

Extraction physico-chimie



$$r_{\text{extr}} \sim 1 \text{ MJ}_e \cdot t_{\text{minerai}}^{-1}$$



Bilan énergie électrique

2006 : 740 TJ_e ou 23 MW_e en continu (7 % de la conso Namibie) ou 240 GJ_e · t_U⁻¹

Pour un réacteur classique **1 t_U ~ 160 TJ_e**

Une consommation < 1/1000 !

Idem pour l'aval du cycle, sauf à accumuler les contraintes

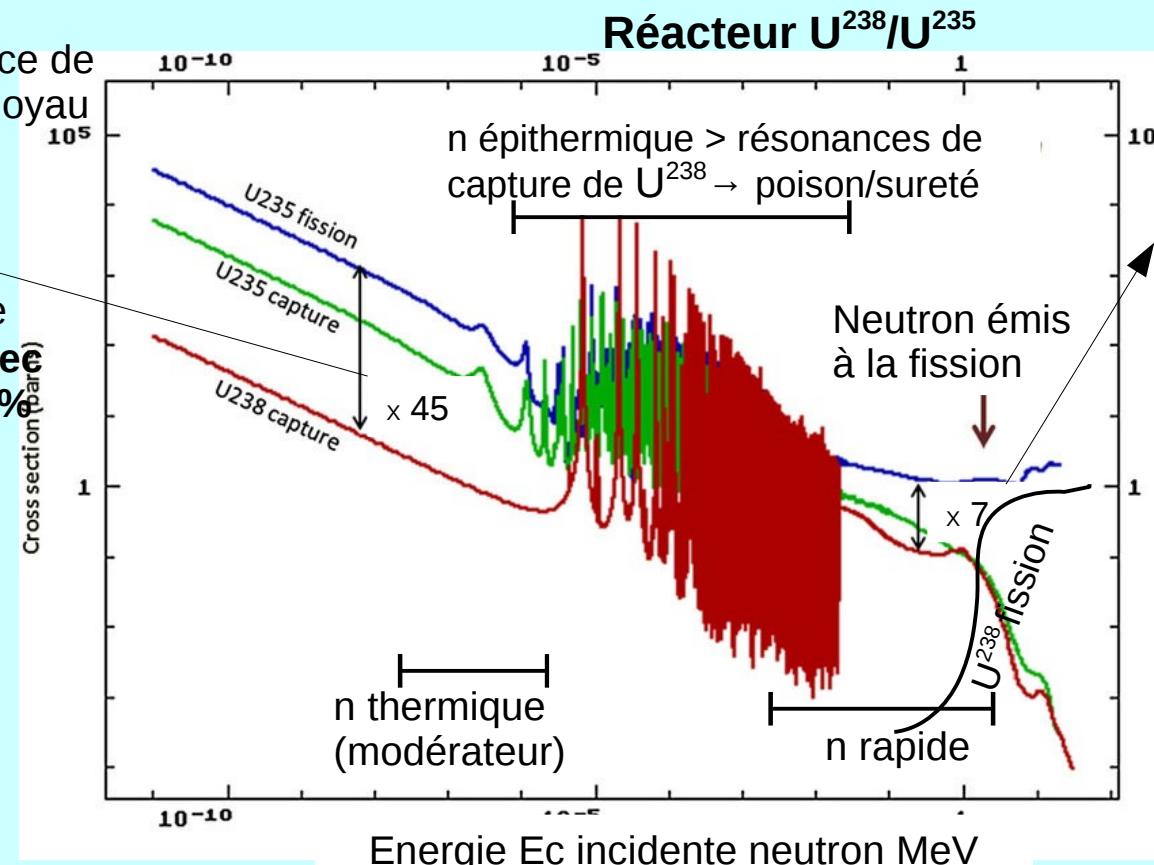
Réacteurs possibles : physique et géologie

La nature offre seulement **trois noyaux susceptibles de fissionner**, deux isotopes de U - **U²³⁸** à 99,3 % et **U²³⁵** à 0,7% (+ trace de U²³⁴) -, et **Th²³²**.

Réacteurs U à n modéré :
Fission U⁵ >> capture par U⁸ => **criticité avec enrichissement < 5%** voire sans.

Mais
Exclu la régénération

Section efficace de réaction par noyau



Réacteurs U à n rapide :
Fission U⁵ > capture par U⁸ => **criticité seulement si fort enrichissement (> 12 %)**

Mais
régénération de fissile par capture fertile sur U²³⁸
Fission complète possible

Seul U²³⁵ est fissile. U²³⁸ et Th²³² fissionnent trop peu.

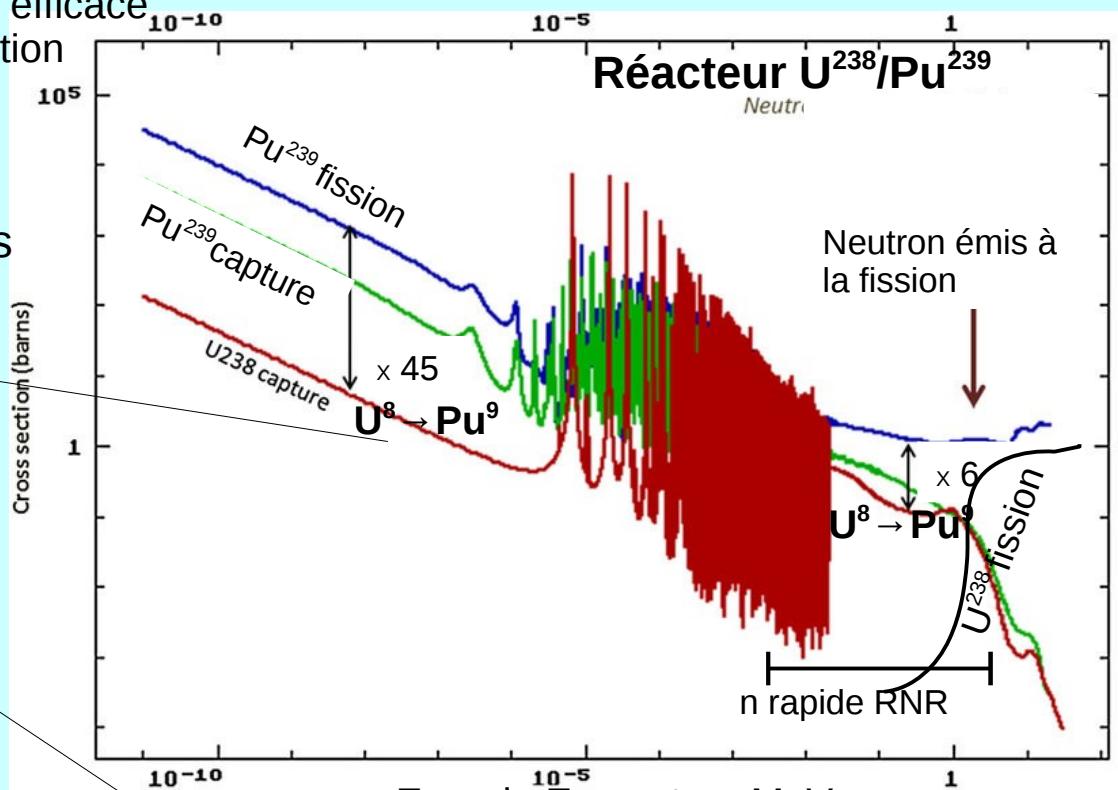
=> réacteur U⁵/U⁸ à n modéré la voie la plus facile. Modérateur : H₂O, D₂O et graphite

=> Mais seulement ~ 1/170 de U naturel est fissionné.

NB : U²³⁵ ne permet pas la régénération (pas assez de n produits, capture parasite).

Régénération de fissile

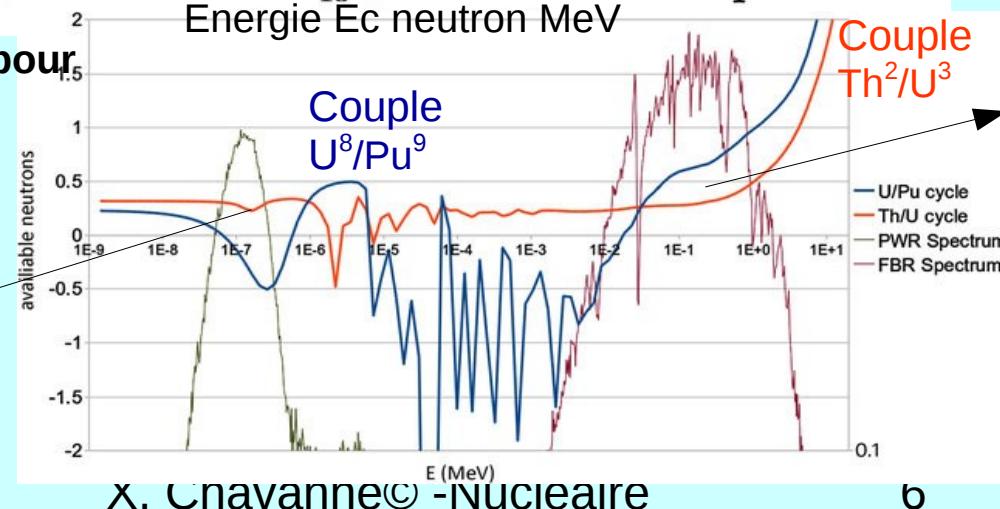
Section efficace
de réaction



Neutron disponible pour sur-régénération de noyaux fissiles

Régénération possible pour Th^2/U^3 en n modéré.
En pratique trop juste (captures parasites et fuites)

Réacteur régénérateur :
Couple fertile/fissile
- $\text{U}^{238}/\text{Pu}^{239}$
- $\text{Th}^{232}/\text{U}^{233}$
 U^{233} non présent doit être produit via U^{235}



Régénération pour U^8/Pu^9 et Th^2/U^3 avec n rapide.

Fondamentaux d'un réacteur

Criticité ou équilibre neutronique sur cycle émission/fission :

$$\text{génération } (\sim 2,5 \text{ n par fission}) = \text{captures} + \text{fuites} + \text{fission suivante}$$

Sections efficaces, taux d'enrichissement fissile, géométrie, cœur hétérogène....

Dans le temps : perte de fissiles et plus de captures sur produits de fission (n modéré)
→ taux de combustion/rechargement (+ limitation mécanique des gaines)

Régénération fissile (réacteur régénérant) :

$$\text{fissions} \leq \text{captures fertiles} \Rightarrow \text{plus de captures (fertiles)} \Rightarrow \text{bilan neutron plus strict}$$

Sûreté : 1/ criticité contrôlable (temps de réponse > 1 s) → taux de n retardé par noyau fissile.

2/ contre-réactions intrinsèques négatives en température, en perte caloporteur ou modérateur... Rôle des fuites, des captures épithermiques de U^{238} , dilatations...

! Criticité différée de captures parasites (cas n modéré) : transitoire Xe^{135} ...

3/ pilotage par poisons neutroniques : barres de contrôle, eau borée (réacteurs à eau)

Confinement radioactivité : - refroidissement du réacteur à l'arrêt (chaleur de désintégration) ou perte caloporteur

- barrières successives (gaine, cuve, enceinte)

Prolifération : - combustibles stockés ou usés non utilisables pour bombes (pas assez de fissiles extractibles ou trop radioactifs)-> Pas de réacteur U^{235}/Th^{232}

Déchets : produits de fission, produits d'activation, produits de capture (transuraniens)

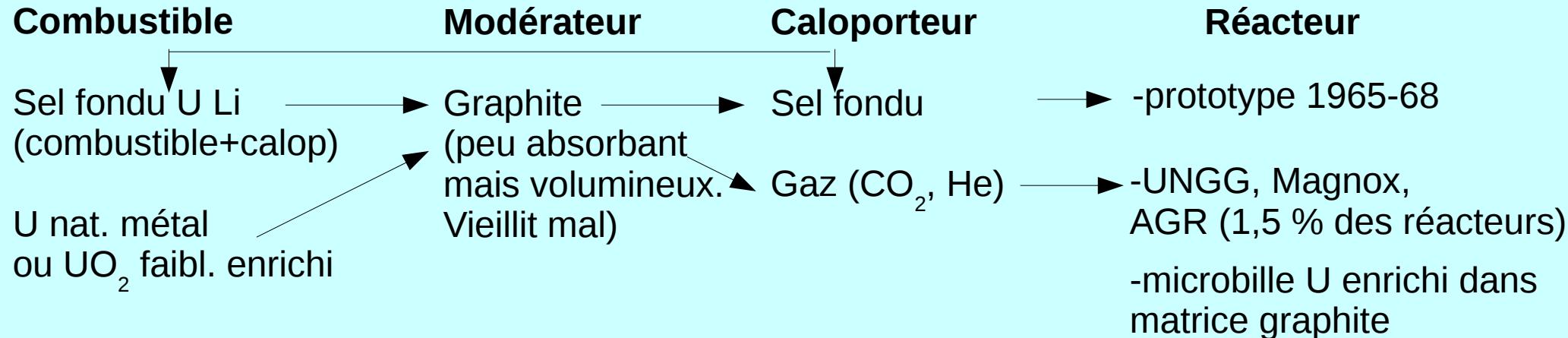
De la conception à la réalisation

L'amiral Rickover, père des premiers réacteurs civils aux USA au sujet des concepts sur papier - ou ordinateur – (1953) :

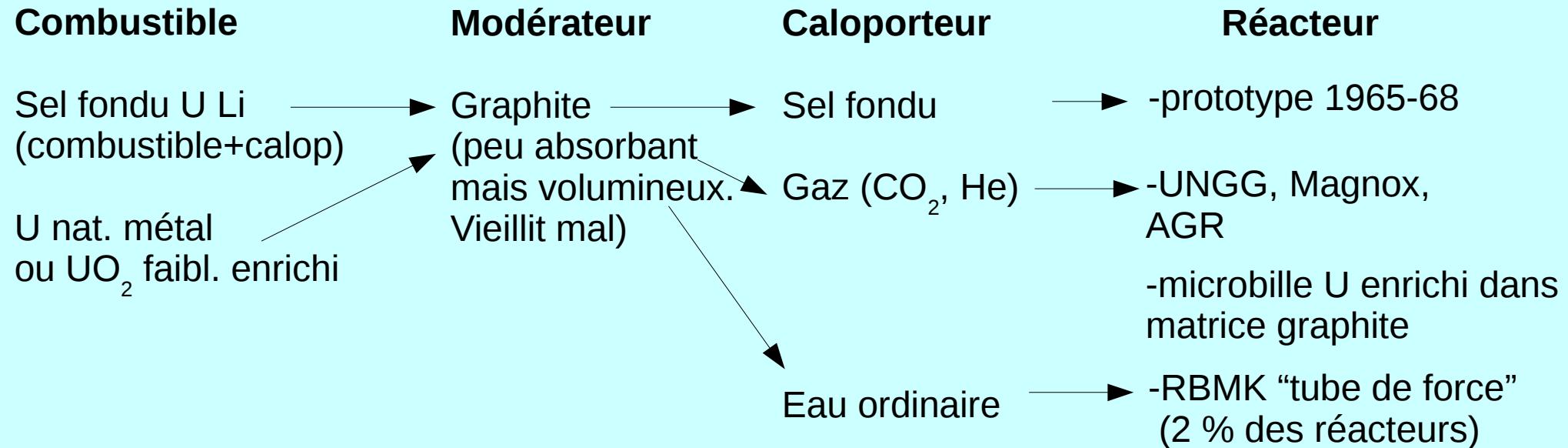
/“An academic reactor or reactor plant almost always has the following basic characteristics: (1) It is simple. (2) It is small. (3) It is cheap
(4) It is light. (5) It can be built very quickly.
(6) It is very flexible in purpose ('omnibus reactor').
(7) Very little development is required. It will use mostly off-the-shelf components.
(8) The reactor is in the study phase. It is not being built now./

/“On the other hand, a practical reactor plant can be distinguished by the following characteristics: (1) It is being built now. (2) It is behind schedule.
(3) It is requiring an immense amount of development on apparently trivial items. Corrosion, in particular, is a problem.
(4) It is very expensive. (5) It takes a long time to build because of the engineering development problems.
(6) It is large. (7) It is heavy. (8) It is complicated./

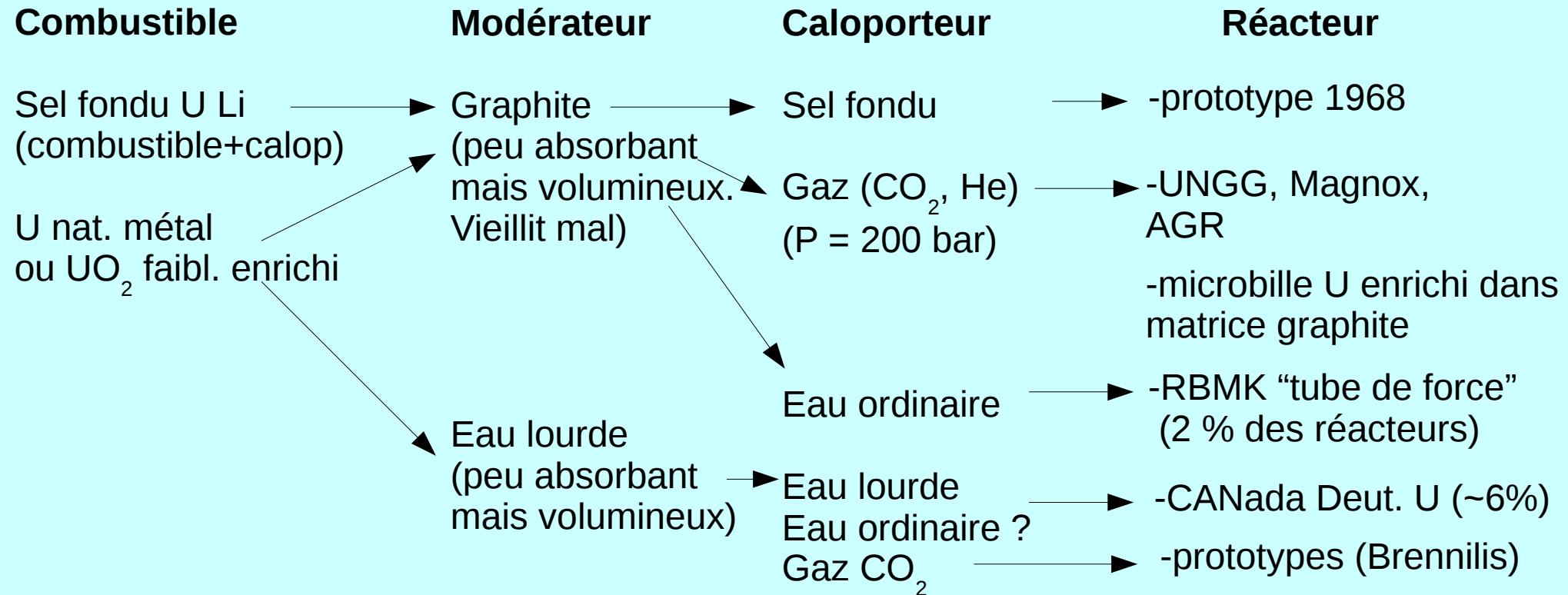
Réacteurs à n modéré



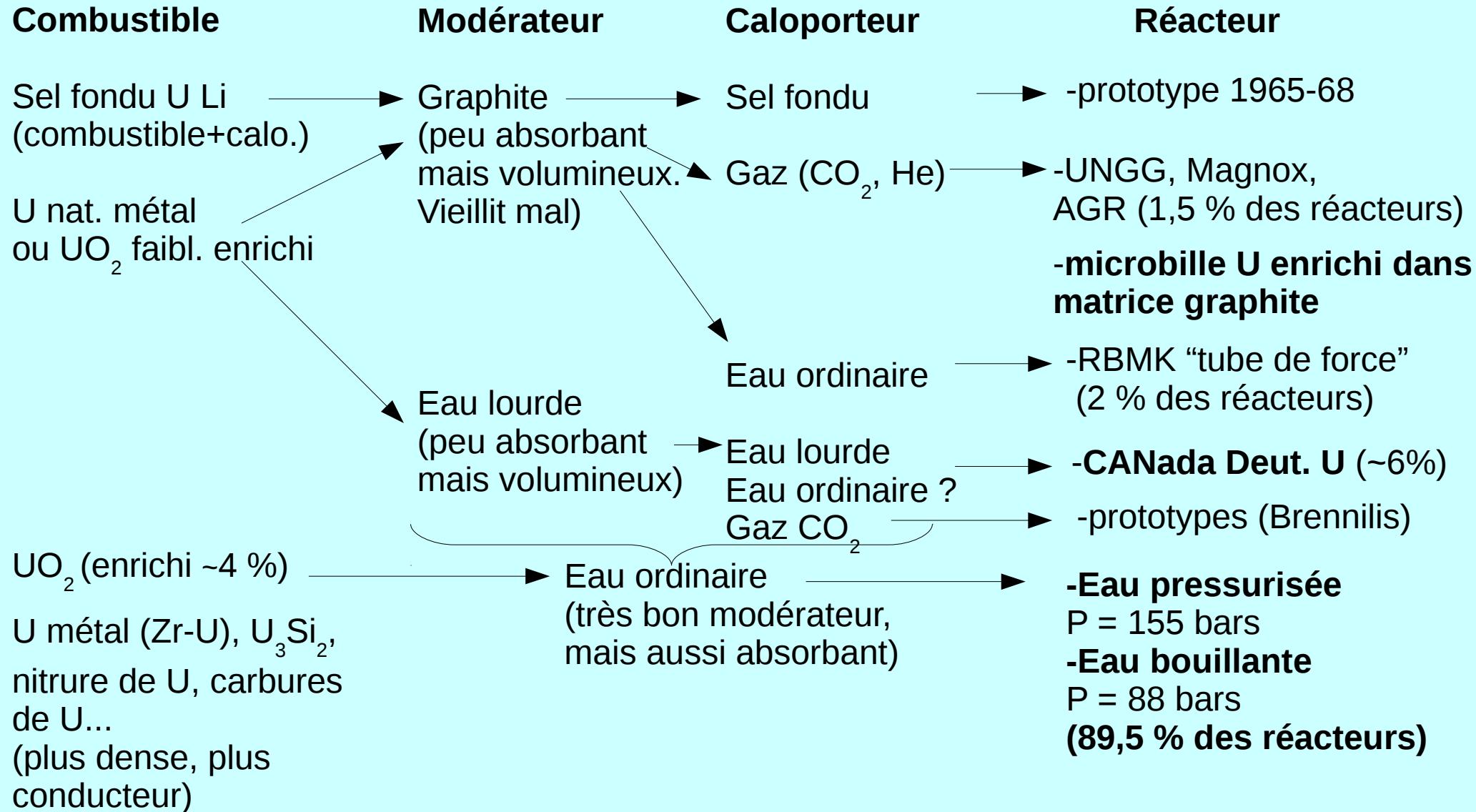
Réacteurs à n modéré



Réacteurs à n modéré



Réacteurs à n modéré



Réacteurs à n modéré au-delà 2020 ?

Taille de 700+ à 1 700 MW_e.

Presque exclusivement des **réacteurs U à eau ordinaire**, et majoritairement des REP.

Amélioration des réacteurs actuels par retour d'expérience (cas REP et REB):

- plus sûr : tous à coefficients négatifs, systèmes de refroidissement et confinement renforcés dont systèmes passifs ou intrinsèques, récupérateur de corium...,
- plus gros pour facteur d'échelle + standardisation + simplification (?) + séries => réduire temps et coûts de construction (annoncé : 4 ans, < 2,5 \$/W_e !?),
- utilise mieux la ressource U (+10 %) ; plus simple de conduite,
- cycle chargement/déchargement plus long (2 ans). MOX,
- plus flexible : changement de puissance plus rapide (2 - 5 % Wc/min pour EPR),
- longévité de 60 ans (et sans doute plus au final).

VVER1200, APR-1400, Hualong one/two, AP1000, EPR2, ESBWR...

Cas Indien : réacteurs 700 MW_e à U nat. et eau lourde (4 ans, 2 \$/W_e mais 40 ans de vie)

Réacteurs à n rapide (régénérateur)

Couples U²³⁸/Pu²³⁹ et peut-être Th²³²/U²³³.

Criticité nécessite un fort enrichissement en fissile (> 12%)

Réacteur très compact par la forte densité de n (plus de protection)=> intégration

Economie de n : fission/capture d'un noyau plus élevé, peu de captures parasites.

Sûreté : OK sauf en cas de perte de caloporteur, suivant géométrie => rôle des fuites stabilisantes de n → Astrid.

! Limiter certains transU (n retardés réduits).

Combustible : Pu+U appauvri oxyde, métal ? Nitre ? Gaines acier

Coeur + couverture régénérateur, pas le coeur => cycle du combustible => retraitement.

Mais taux de combustion plus élevé que REP (> x 2)

Caloporteur peu modérateur et peu absorbant :

- un métal liquide sous 1 atm. Assure un meilleur refroidissement + inertie thermique.

Sodium, quasi idéal (thermique, hydraulique, neutronique, corrosion). Seul problème : réactif à l'air, et surtout l'eau → Astrid (cycle thermodynamique à gaz N₂).

Variante au plomb liquide. Moins intéressant, mais peu réactif air/eau et T plus élevée,

- un sel fondu de F ou Cl et Li sous 1 atm avec ou sans combustible.

Pb solubilité transPu. HT. Etat de concept.

- gaz (He) sous pression. HT. Etat de concept.

Projets de réacteurs à n rapide ?

Réacteurs U/Pu refroidis au sodium

Depuis 1953 400 an.réacteurs d'expériences aux USA, France, Russie, R-U...

Programmes arrêtés ou ralentis en Occident. Les ressources en fissiles pas les préoccupations du moment. Reconversion en « brûleur » de transU.

- La Russie continue avec des réacteurs expérimentaux de 600 et 800 MW_e.
- Chine et Inde construisent chacune leur réacteur (500 à 600 MW_e).
- Terrapower (+ GE) : projet Natrium 345 MW_e réacteur simplifié avec réserve de sel fondu chaud pour flexibilité. Site sélectionné (US).
 - + Concept de régénération sans retraitement par réarrangement du combustible

Réacteurs U/Pu refroidis au plomb

- Russie : un prototype de 300 MW_e en construction.

Réacteurs U/Pu refroidis au sel fondu

- Moltex Energy (RU) : Stable Salt Reactor wasteburner (SSR-W) 300 MW_e. Sel de combustible séparé du caloporteur de FLi. Projet au Canada.
- Southern Co. (+Terrapower) : U dans sel fondu de chlorure. Pilote (US).

Réacteurs modulaires de petite taille (SMR)

De quelques MW_e (ou MW_{th}) à 300 MW_e .

Retour dans le passé, progrès de fabrication en plus.

Stade du démonstrateur au mieux.

- Intérêt pour des petits réseaux < 10 GW_e , hors réseaux (sites isolés, mines, grosses industries, bases militaires...), remplacement de centrales à charbon.
- Production d'électricité mais aussi de chaleur (divers usages suivant T).
- H_2 par électrolyse à haute température, dans le cas des réacteurs HT.
- Nouvelles sources de financement grâce à un coût unitaire réduit et les multi-usages.

Avantages :

- intrinsèquement plus sûr (criticité et refroidissement) car surface/volume plus élevé => plus compact et simple. Intégration poussée,
- principaux composants fabriqués et assemblés en usine. Faibles coût et temps d'installation,
- économie de **série** ; peu de modèles différents,
- association d'unités pour une puissance plus grande,
- exploitation simplifiée, voire autonome,
- long temps de cycle charge/décharge, 2 ans et plus (\rightarrow 20 ans). Combustible enrichi (4,5 à 19 %) \rightarrow ! prévoir au-delà de 5 %.

Réacteurs modulaires de petite taille (SMR)

Beaucoup de projets ; certains des prototypes pour de plus gros réacteurs.

REP U enrichi < 5 % (T < 400 °C) :

RTM-200 50 MW_e (Russie), ACP 100 MW_e (Chine), Carem 25 MW_e (Argentine), Nuscale 77 MW_e, Holtec 160 MW_e (US), Rolls-Royce 470 MW_e (R-U), Nuward 170 MW_e (France)...

REB U enrichi < 5 % (T < 400 °C) :

GE Hitachi BWRX-300 (projet au Canada),

R à n rapide et métal liquide (T < 600 à 700 °C) :

- avec Na : ARC-100 MW_e (US/Canada), Westinghouse (US) eVinci 13 MW_{th}/5 MW_e
- avec Pb : BREST 300 MW_e (Russie),

R à sel fondu (T < 800 °C) :

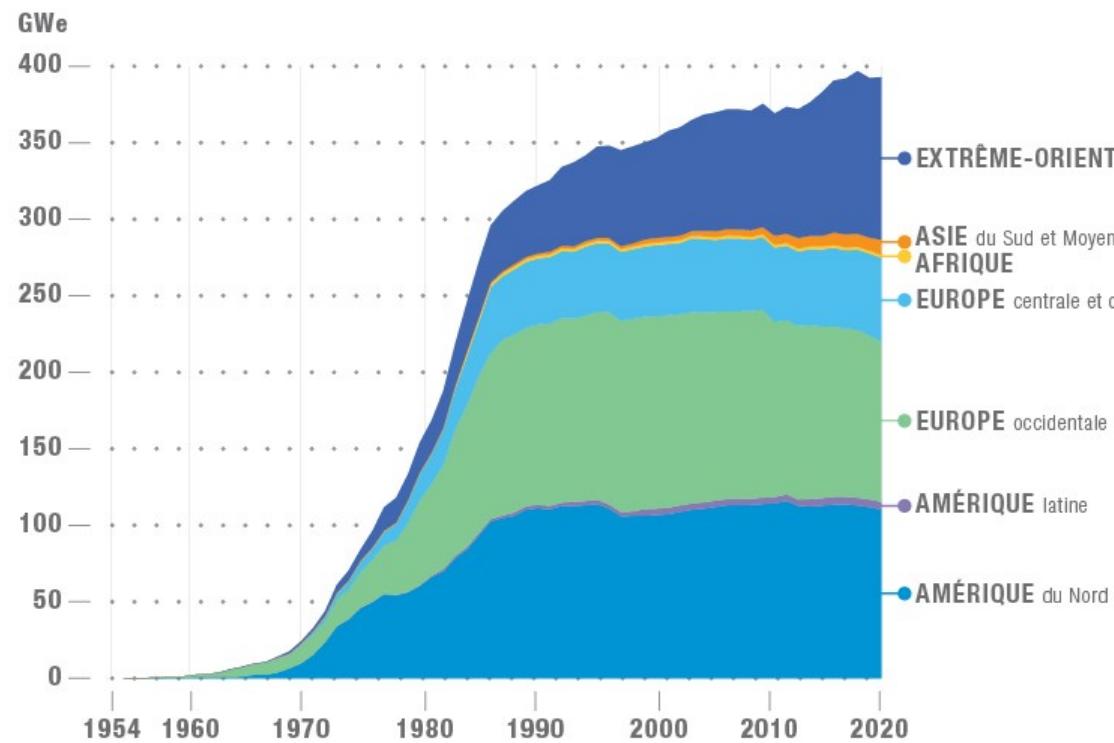
Terrestrial Energy : U dans sel modéré graphite 400 MW_{th}/190 MW_e (Canada/US),

R à n modéré (graphite) et gaz He (T de 600 à 1000 °C) :

- HTR 2x105 MW_e (Chine),
- Global First Power He (30 bars/650 °C) 15 MW_{th}/5 MW_e (projet au Canada), X-energy 100 MW_e, BWXT 50 MW_{th} (US).

Réacteurs en 2020

ÉVOLUTION DE LA CAPACITÉ ÉLECTRONUCLÉAIRE PAR RÉGION



Fin 2020 :
442 réacteurs pour 392 GW_e net.
En croissance faible.

En 2019 ont produit 2650 TWh_e net (10 % de la production mondiale d'électricité).
Facteur moyen de charge : 77 %

-Le Parc d'Amérique du Nord se maintient entre retrait et accroissement de puissance des réacteurs existants.

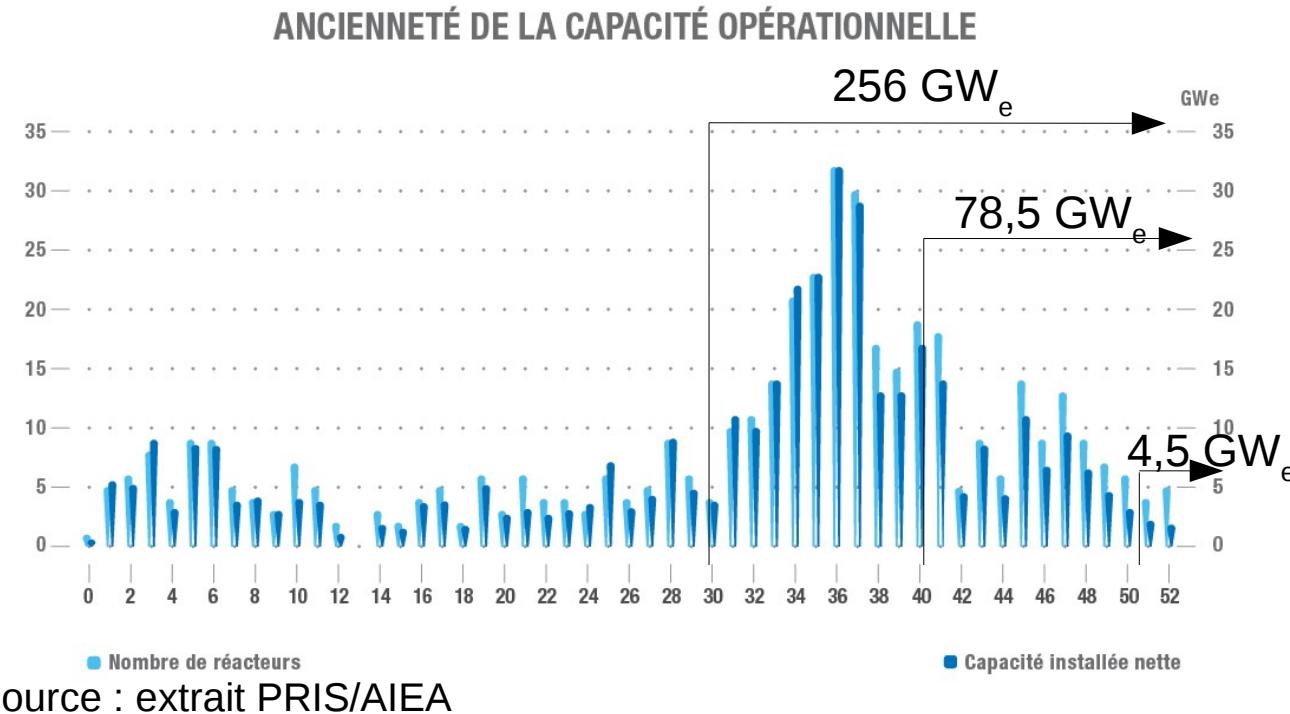
-L'Europe de l'ouest ferme plus qu'elle ne construit.

-Le reste du monde tend à construire, surtout en Asie

Source : extrait PRIS/AIEA

Réacteurs en service fin 2020

Ancienneté des 442 réacteurs en opération (392 GW_e)



Fin de 2020 :

Total de 634 réacteurs construits, pour 479,9 GW_e, dans 35 pays.

192 réacteurs ou 87,2 GW_e arrêtés

67 % de la capacité ou 256,3 GW_e, représente 296 réacteurs de plus de 30 ans.

20 % de la capacité ou 78,5 GW_e, 104 réacteurs de 40+ ans.

1 % de la capacité ou 4,5 GW_e, provient de réacteurs de +50 ans.

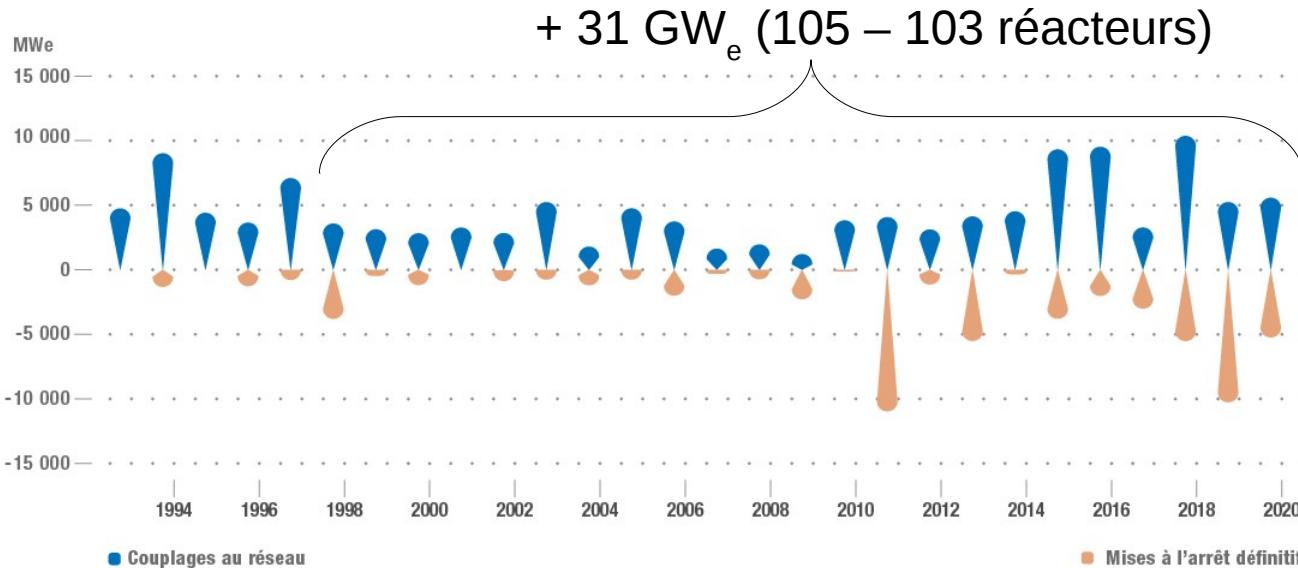
Arrêts à prévoir :

2020-30 : 5,6 GW_e AGR + 7,5 GW_e RBMK (< 50 ans d'age) + env 5 GW_e REP/REB de plus de 50 ans + env 12 GW_e prématûrés,

2031-50 : 220+ GW_e d'arrêts avec durée de vie moyenne de 60 ans, concentrés sur la période 2040-2050.

Bilan constructions/arrêts

CAPACITÉS AJOUTÉES ET CAPACITÉS OPÉRATIONNELLES RETIRÉES



Source : extrait PRIS/AIEA

En 2020,

- 5 réacteurs à eau sous pression (REP) pour 5,5 GW_e ont été connectés.
- 6 réacteurs - 5,2 GW_e - ont été arrêtés.

Et 52 réacteurs d'une capacité de 54,4 GW_e étaient en construction dans 19 pays.

Temps médian < 80 mois (6-7 ans). Ou env. 8 GW_e ajoutées par an.

Au-delà 2020 : quels pays ?

Une internationale du nucléaire sous l'égide de l'AIEA : recommandations, surveillances et inspections des réacteurs, banque du combustible...

Collaborations entre pays, échanges d'expérience + marché de services

Pays maîtrisant toute la technologie ou en cours. Capable d'exporter des réacteurs.

Russie, Chine, Corée du Sud, USA, Japon, France.... Inde et Canada (Candu) ?

Pays plus ou moins prêts à en importer si aides et délégation de la gestion combustible :

Pays ayant déjà des réacteurs :

Afrique du Sud, Argentine, Arménie, Bulgarie, Brésil, Finlande, Hongrie, Iran, République tchèque, Roumanie, Royaume-Unis, Slovaquie, Slovénie, Ukraine...

Pays-Bas, Espagne, Suède ?

Primo-accédants : Bangladesh, Biélorussie, Turquie, Émirats arabes unis

Pays sans réacteur, intéressés :

Pologne, Egypte, Jordanie, Nigeria, Croatie, Serbie, Philippines, Uzbekistan

Pays sans réacteur, indécis :

Indonésie, Australie, Nouvelle-Zélande, pays Baltes, Irlande, Kazakhstan, Irak, Arabie Saoudite, Kenya, Ethiopie, Algérie, Vietnam

Pour arrêt progressif des réacteurs existants, mais pas sûr (sinon nouveaux réacteurs) :

Belgique (7 réacteurs), Taïwan

La Russie

Compagnie (gère tout) : Rosatom et ses filiales

Renaissance depuis Tchernobyl et la fin de l'URSS. Quid de la guerre actuelle ?

Dispose de toute l'infrastructure pour le cycle de combustible depuis les mines jusqu'aux usines de retraitement et reconditionnement. Conception de nouveaux combustibles en particulier pour les sur-régénérateurs : métal, nitrule, carbure..

Construit et exporte des REP 1200 MW_e (VVER-TOI) : 35 réacteurs à différents stades.

Dispose et construit des petits réacteurs (démo) type REP ou à n rapide. Réacteurs flottants.

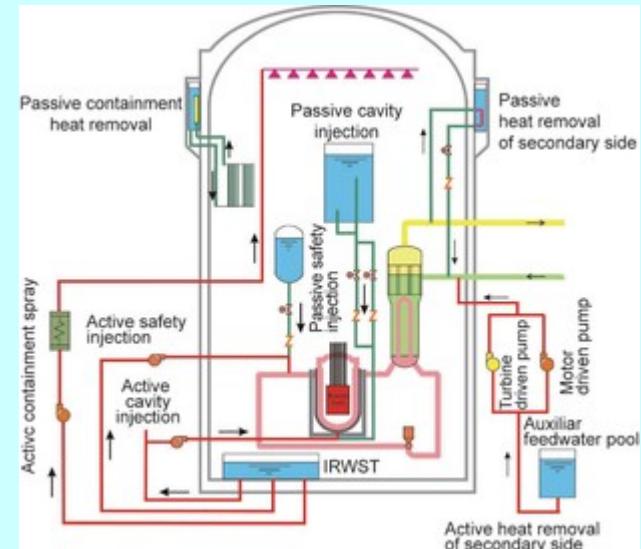
Pays le plus en avance sur les sur-régénérateurs (démo + recherche):

- en fonctionnement : 2 réacteurs refroidis au Na (600 et 800 MW_e) + BOR (60 MW_{th}),
- en construction : 1 réacteur refroidis au Pb (300 MW_e) + recherche MBIR (100 MW_{th}),

Chine

Principales compagnies : CGN, CNNC, SNPTC

Premiers réacteurs en 90s, mais a déjà un parc de 54 GW_e
Principalement REP importés (France, Russie, USA). Candu.
Maintenant a sa propre industrie.



CGN et CNNC : modèle indigène unifié de REP, Hualong one, pour production en série. Intérieur et export. Investissement : 5 ans, 3 \$/W_e → 4 ans, < 2,5 \$/W_e (Hualong 2)

SNPTC : AP1000 adapté en Chine. Déboires sur premiers AP1000.
Deux CAP 1400 MW_e en construction.

Petite taille : ACP100 380 MW_{th}/125 MW_e, HTRgaz 210 MW_{th}/105 MW_e

Programme sur-régénérateur : 2 réacteurs au Na en construction. 1 réacteur de recherche.

Corée du sud

Principale compagnie : Korea Hydro and Nuclear Power

Politique de nouveau favorable.

Parc de 23 GW_e + 5,4 GW_e en construction



REP APR-1400 (1345 MW_e net).

Intérieur et export. Succès aux Émirats arabes unis avec 4 unités.

Investissement : 5 ans, < 3 \$/W_e

Etats Unis (et Japon)

Compagnies (conception/fournisseur) : Westinghouse (REP), GE/Hitachi (REB)

Pays pionnier, avec utilisation tôt de U enrichi. Mais a perdu son avance.

Le plus grand parc de réacteurs (pour l'instant), 95 GW_e. Influence encore de TMI en 1979, + concurrence des autres filières (gaz, éolien terre) => peu de réacteurs construits depuis 1995. Retrait (- 15 GW_e) <-> accroissement puissance unitaire (+ 8 GW_e).

Durée vie systématique à 60 ans, voire 80 ans.

Westinghouse : simplification et systèmes passifs au maximum

Grande taille : Adv. Passiv. 1000 ; déboires aux USA. Chine ?

Petite taille : eVinci, réacteur portable 13 MW_{th}/5 MW_e à n rapide



GE/Hitachi : Adv. BWR 1200 MW_e → Eco. Simpl. BWR (systèmes passifs)

Petite taille : BWRX_300 MW_e

Programme sur-régénérateur avec des prototypes en cours (Na et sel fondu avec U).

France

Principale compagnie : EDF - framatom

61 GW_e installée. Politique de nouveau favorable (?)

-EPR 1700 (1650 MW_e net) → EPR 2

Systèmes actifs de refroidissement. Flexibilité.

Intérieur et export. Déboires en France et Finlande. Relatif succès en Chine. R-U ?

Mini réacteur : Nuward ?

Programme sur-régénérateur : ??

2020 – 2050 : projections

Capacité mondiale en GW_e. En 2020 392 GW_e (+ 7 à 8 GW_e/an - retrait)

Organisme/année	2030	2040	2050
IEA (WEO21) SPS			562
IEA (WEO21) SDS			669
AIEA (high case)	475	622	715
WNA (harmony)		530 (684-154)	1000 (1250-250)

Mes scénarios : capacités ajoutée et retirée par an

- 2020-33 : croissante à partir de 8 GW_e/an
- 2034-50 : constante suivant coût et investissement :

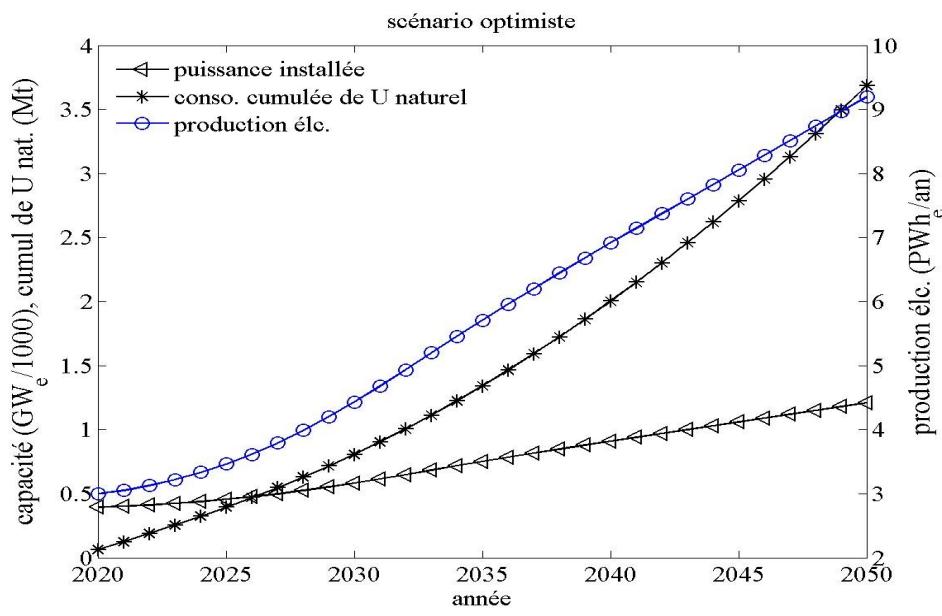
Scénario optimiste : coût 3 \$/W_e et investissement 120 G\$/an => 40 GW_e/an

Scénario pessimiste : coût 4 \$/W_e et investissement 90 G\$/an => 22 GW_e/an

- retraits suivant prévisions WNA (diapo 19)

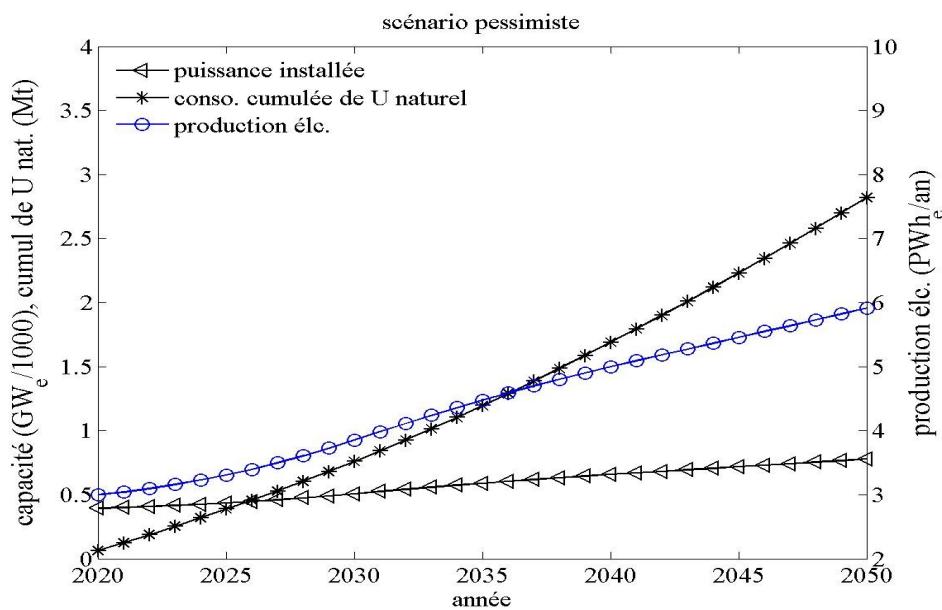
Auto financement : parc de 500 GW_e capacité -> 3900 TWh_e/an ; 120 G\$/an = 30 \$/MWh_e

2020 – 2050 : scénarios



Facteurs de conversion (constant)
 - 7500 h de pleine puissance/an
 - rendement th/élc de 36 %
 - 135 GWh_{th}/t_U U naturel

Optimiste, fin 2050
 parc de 1200 GW_e capacité
 -> 9000 TWh_e/an
 -> cumul U nat 3,8 Mt_U U nat.



Pessimiste, fin 2050
 parc de 778 GW_e capacité
 -> 6000 TWh_e/an
 -> cumul U nat 2,8 Mt_U U nat.

Conclusions sur les réacteurs de fission neutronique

- principes et nécessités (sûreté...) pour un réacteur établis ; beaucoup de données et de retours d'expérience,
- de là les principaux types de réacteurs,
- mais besoin de démonstrateurs à chaque nouvelle configuration,
- temps et coûts de mise au point toujours plus élevés que prévus,
- besoin de réacteurs de série rentables pour développer le nucléaire, et d'une volonté politique pour soutenir sur le long terme,
- quelques gros réacteurs ($> 1000 \text{ MW}_e$) dans ce cas, ou près, chacun porté par un pays et sa ou ses compagnies : Russie, Chine, Corée du Sud, USA+Japon et France. Canada et Inde ?
- destinés en interne, et export si une partie de l'investissement assurée,
- Intérêt des petits réacteurs, mais en phase de démonstrateur au mieux,
- Regain pour le nucléaire, avec le charbon proscrit, les approvisionnements en gaz menacés, et l'avènement du tout électrique,
- le seul à fournir de l'électricité quelque soit la météorologie,

**et s'affranchirait de limitations en ressources pour plusieurs millénaires
... avec un parc de réacteurs régénérateurs (de fissiles)**