



# Enjeux environnementaux des projets nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération

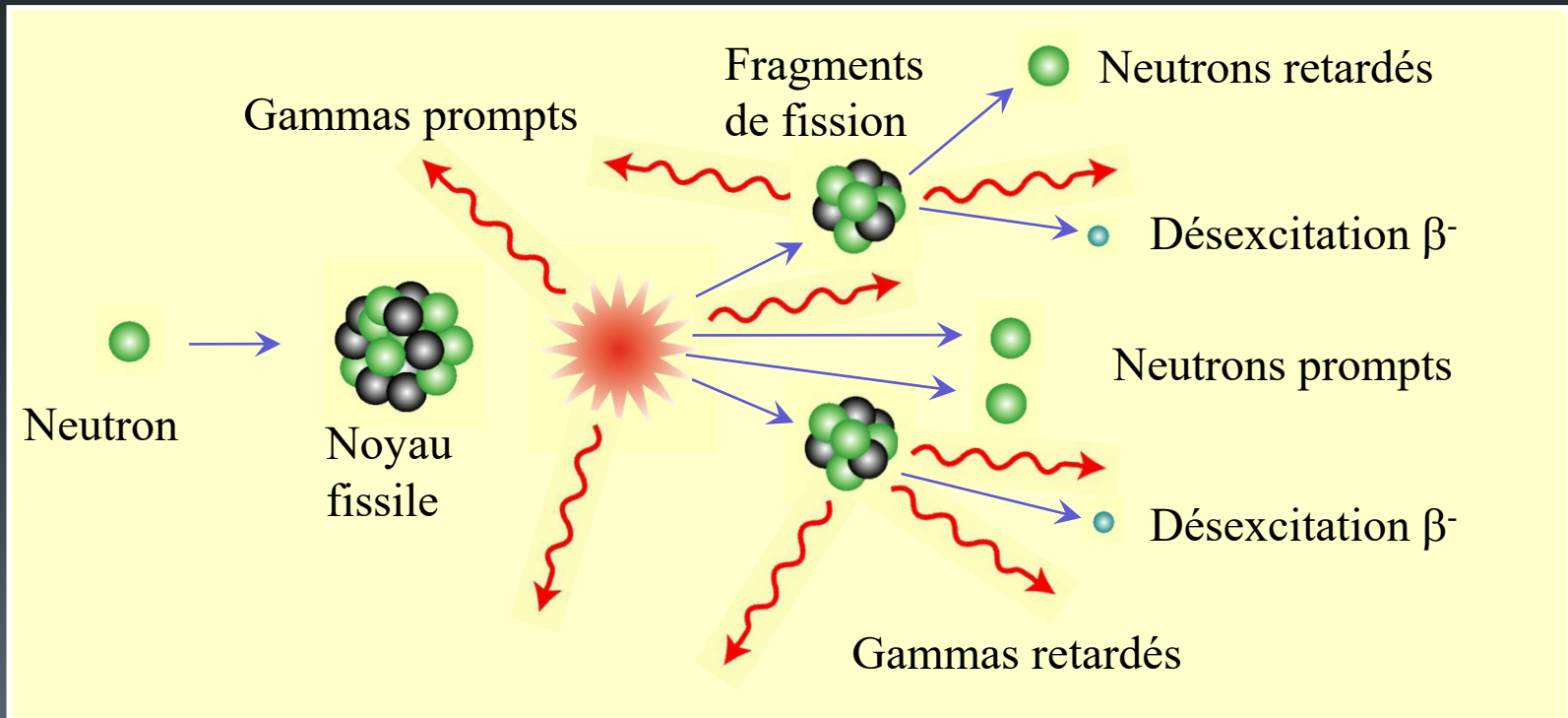
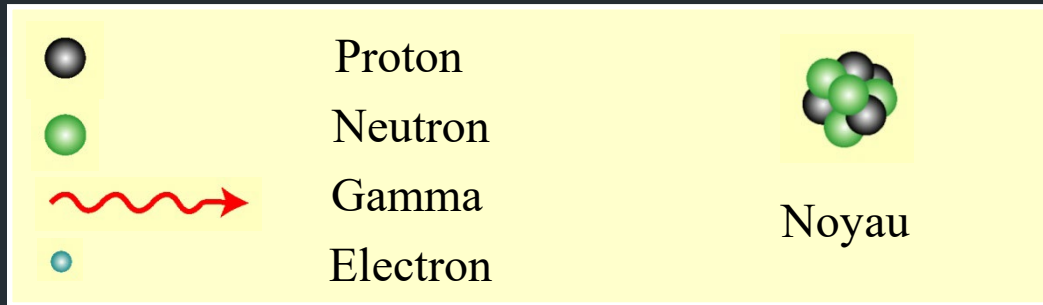
Daniel Heuer  
Directeur de recherche émérite au CNRS  
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie  
[Daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr](mailto:Daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr)



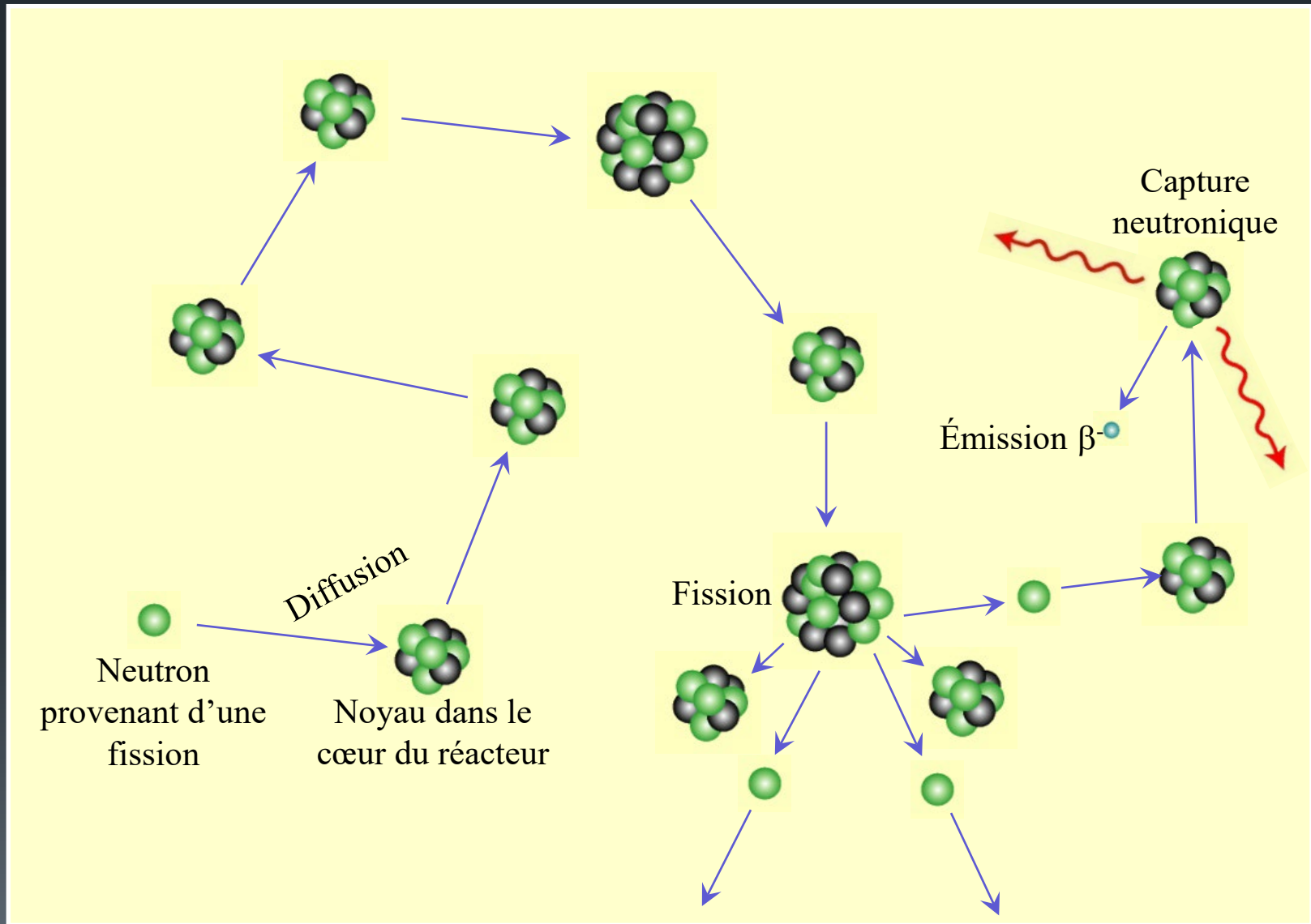
Un peu de physique pour bien comprendre

# Physique des réacteurs nucléaires

# Qu'est-ce qu'une fission ?



# La réaction en chaîne



# La réactivité

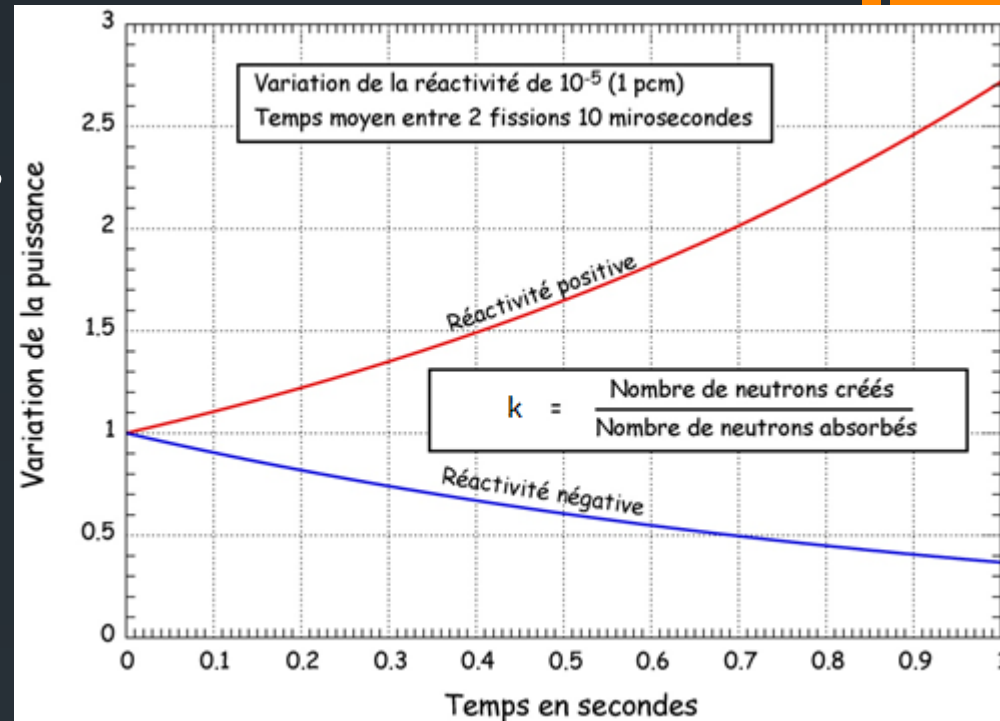
- Il faut ajuster le nombre de noyaux fissiles pour qu'en moyenne 1 neutron et 1 seul provenant d'une fission provoque une autre fission
  - On définit le coefficient de multiplication comme le rapport entre le nombre de neutrons créés et le nombre de neutrons absorbés

$$k = \frac{\text{Nombre de neutrons créés}}{\text{Nombre de neutrons absorbés}}$$

- On définit la réactivité par  $\rho = \frac{k-1}{k}$ 
  - Cette réactivité doit être nulle pour que la réaction en chaîne soit stabilisée

# Que se passe-t-il si la réactivité varie ?

- La variation de puissance est extrêmement rapide
  - Dans ces conditions, un réacteur nucléaire ne serait pas pilotable
- Les neutrons retardés permettent de temporiser l'évolution de la réactivité d'un réacteur
  - Ils sont émis jusqu'à quelques dizaines de secondes plus tard



Tant que la réactivité ne devient pas critique prompte\*  
le réacteur reste pilotable

- Si on ne considère que les neutrons prompts, la réactivité est négative
  - Les neutrons retardés rajoutent quelques centaines de pcm (partie pour 100 000) à la réactivité avec une évolution de leur nombre beaucoup plus lente

\* Critique prompte = les neutrons prompts suffisent à avoir une réactivité positive

# Les coefficients de contre réaction

- Ce sont les coefficients de contre réactions qui stabilisent, ou déstabilisent, le réacteur
  - Lorsque le réacteur s'éloigne de son point de fonctionnement nominal, les probabilités moyennes de création et d'absorption des neutrons changent, ce qui change la réactivité
- On s'arrange à ce que ces variations de réactivité entraînent un retour au point de fonctionnement nominal. Les coefficients de contre réaction sont alors négatifs
- Les coefficients de contre réactions principaux sont
  - Thermique (effet Doppler, dilatation)
  - De vide (passage de bulles, vidange)
  - Géométrique (compaction)

$$k = \frac{\text{Nombre de neutrons créés}}{\text{Nombre de neutrons absorbés}}$$

Pour que le réacteur soit intrinsèquement stable, les coefficients de contre réaction doivent être tous négatifs

# Cycles du combustible et déchets radioactifs

- Les captures neutroniques et les décroissances font apparaître des noyaux radioactifs

- Les transuraniens

- Neptunium

- $^{237}\text{Np}$  : 2 144 000 ans

- Plutonium

- $^{238}\text{Pu}$  : 87,7 ans
  - $^{239}\text{Pu}$  : 24 110 ans
  - $^{240}\text{Pu}$  : 6 561 ans
  - $^{241}\text{Pu}$  : 14,29 ans
  - $^{242}\text{Pu}$  : 375 000 ans

- Américium

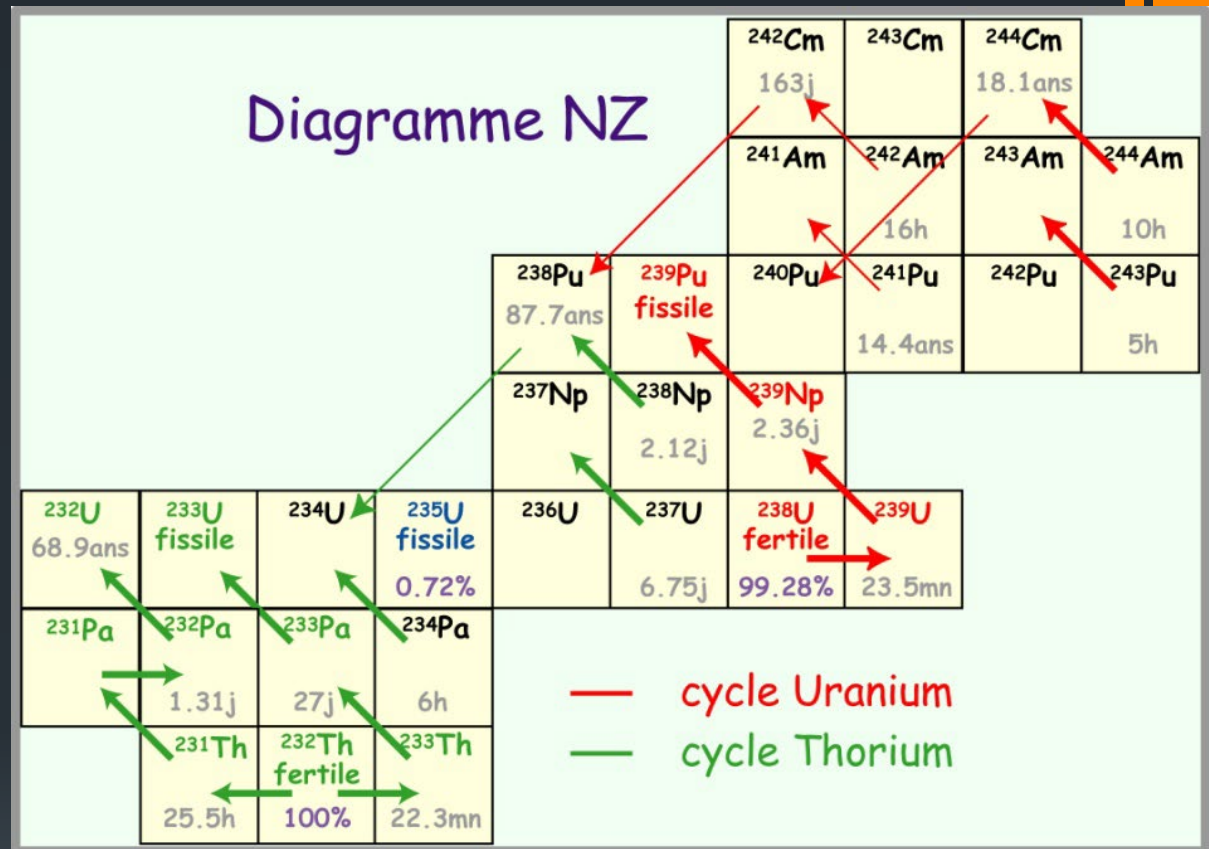
- $^{241}\text{Am}$  : 432,2 ans
  - $^{242\text{m}}\text{Am}$  : 141 ans
  - $^{243}\text{Am}$  : 7370 ans

- Curium

- $^{244}\text{Cm}$  : 18.1 ans
  - $^{245}\text{Cm}$  : 8500 ans
  - $^{246}\text{Cm}$  : 4760 ans
  - $^{247}\text{Cm}$  : 15 600 000 ans
  - $^{248}\text{Cm}$  : 348 000 ans

- Les produits d'activation comme

- $^{36}\text{Cl}$  : 301 000 ans
  - $^{94}\text{Nb}$  : 20 300 ans



- Les produits de fission

- À vie moyenne

- $^{85}\text{K}$  : 10,7 ans
    - $^{90}\text{Sr}$  : 28,9 ans
    - $^{137}\text{Cs}$  : 30,03 ans

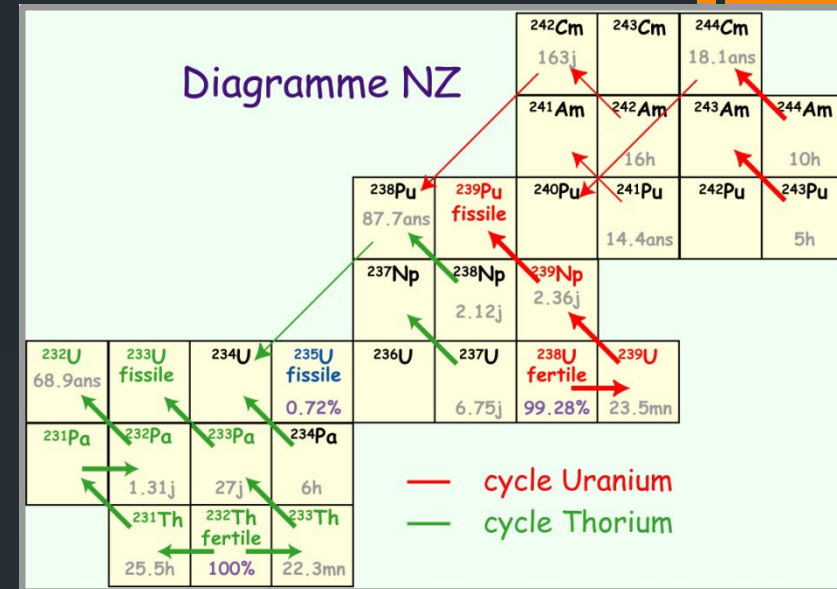
- À vie longue

- $^{79}\text{Se}$  : 295 000 ans
    - $^{93}\text{Zr}$  : 1 530 000 ans
    - $^{99}\text{Tc}$  : 211 100 ans
    - $^{129}\text{I}$  : 15 700 000 ans
    - $^{135}\text{Cs}$  : 2 300 000 ans



# La régénération du combustible

- La réaction en chaîne utilise 1 neutron sur les 2 à 3 produits par chaque fission
  - Le but est d'utiliser les autres neutrons pour régénérer les noyaux fissiles au fur et à mesure qu'ils sont consommés
- Il n'y a que deux façons de le faire
  - Le cycle U-Pu
    - Possible uniquement avec des neutrons rapides
  - Le cycle Th-U
    - Possible quelle que soit l'énergie des neutrons
- Cette régénération demande de recycler le combustible à chaque rechargement du cœur
  - Les transuraniens sont alors réinjectés dans le cœur jusqu'à ce qu'ils fissionnent
  - Les seuls déchets fortement actifs de ces réacteurs sont les produits de fission
- Le prix à payer est une augmentation importante du transport de matière radioactive
  - Sauf si le retraitement du combustible a lieu sur place



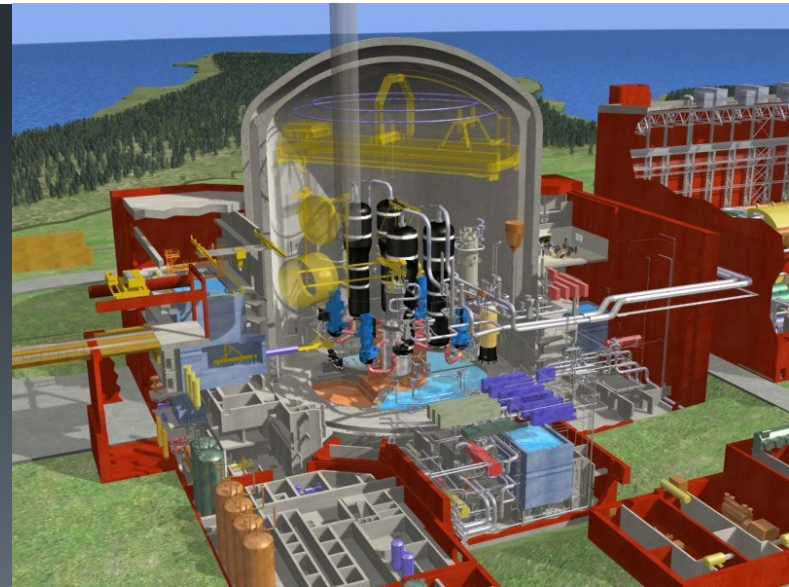
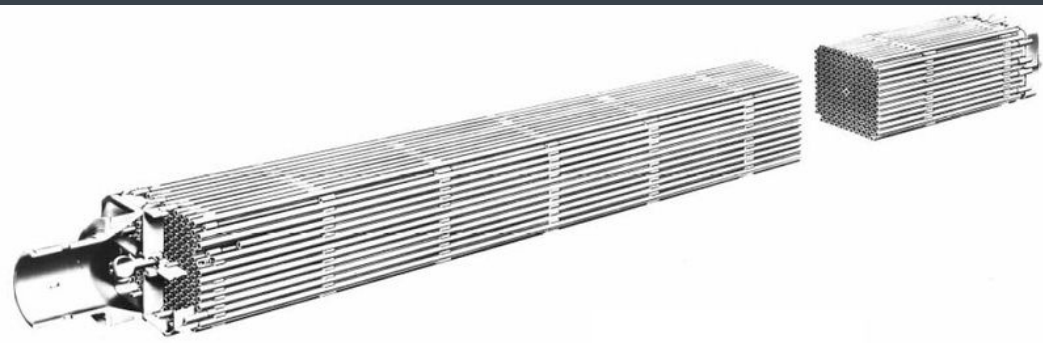
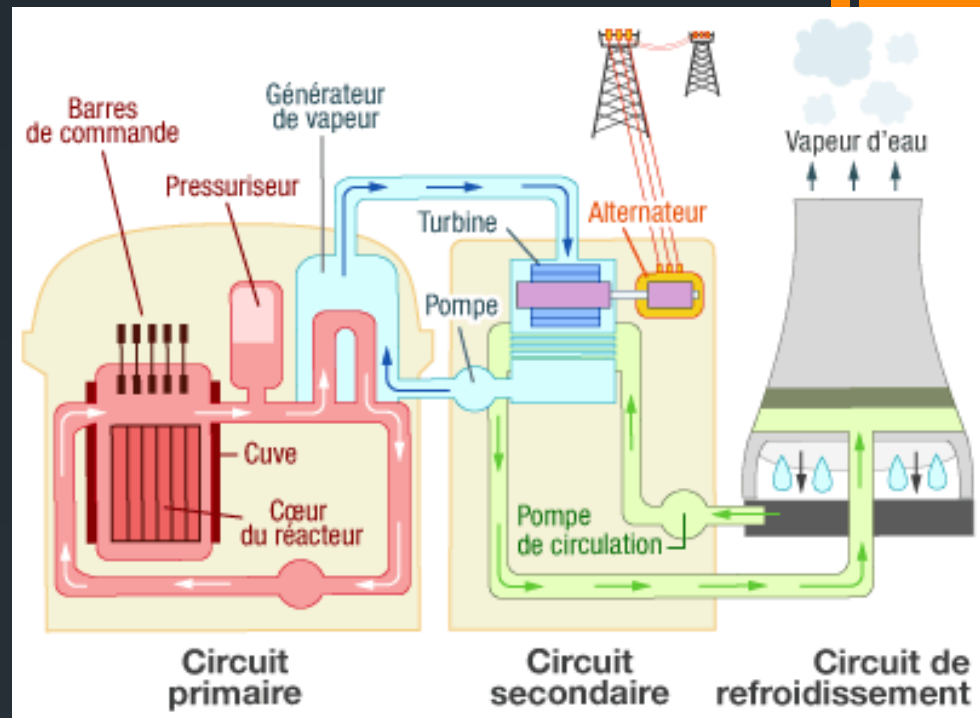
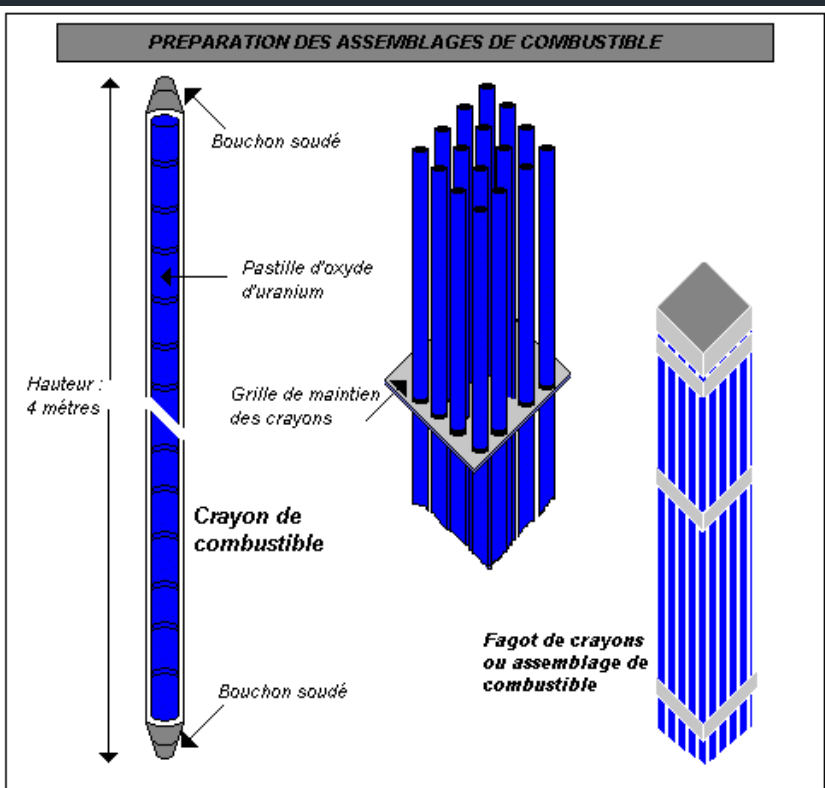
- En combustible solide il faut, à chaque retraitement
  - Détruire le combustible
  - Réaliser le retraitement
  - Refabriquer le combustible
- En combustible liquide le retraitement peut être réalisé sur place sans changement d'état du combustible

# Comment obtenir la régénération

- Il faut disposer de suffisamment de neutrons à chaque fission
  - 1 neutron sert à entretenir la réaction en chaîne
    - Malheureusement le noyau fissile ne fissionne pas toujours ce qui gaspille  $\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$  neutrons
  - $1 + \alpha$  neutrons servent à régénérer les noyaux fissiles consommés par les fissions et captures
- Au total il faut  $2(1 + \alpha)$  neutrons sur les  $\nu$  émis par fission pour entretenir la réaction en chaîne et régénérer la matière fissile
- Le nombre de neutrons restant disponibles,  $N_d = \nu - 2(1 + \alpha)$ , doit être positif
  - Pour le cycle U/Pu seuls les neutrons énergétiques assurent cette condition. La régénération n'est alors possible qu'en spectre rapide obtenu en évitant les noyaux légers dans le cœur
  - Pour le cycle Th/U, cette condition est assurée quelque soit l'énergie des neutrons mais le nombre de neutrons disponibles est toujours faible. Il faut donc limiter le plus possible les captures parasites

Le plus souvent, pour obtenir la surgénération il faut entourer le cœur d'une couverture fertile

# Réacteurs nucléaires à combustible solide



# Réacteurs nucléaire à combustible liquide

## ■ Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

- Transparence aux neutrons
- Température de fusion pas trop élevée
- Température d'ébullition suffisamment élevée
- Tension de vapeur faible
- Bonnes propriétés thermiques et hydrauliques
- Stabilité du liquide sous irradiation
- Solubilité des éléments fissiles et fertiles suffisante
- Pas de production de radio-isotopes difficilement gérables
- Possibilité d'un retraitement du combustible
- ...

Les fluorures de lithium ou chlorures de sodium fondus sont les meilleurs candidats



Réacteurs à sels fondus



## ■ Quels sont les avantages d'un combustible liquide ?

- Homogénéité du combustible
  - Plus besoin de gérer un plan de chargement
  - Pas de fabrication complexe du combustible
- Chaleur produite directement dans le caloporteur
  - Pas de délai pour les contre-réactions
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
  - Une première configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
  - Une deuxième configuration permet un stockage avec refroidissement passif
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur
  - Pas de réserve de réactivité
  - Meilleure gestion des produits de fission neutrophages
  - Besoin d'un seul inventaire fissile initial

Les propriétés neutroniques et chimique du fluor sont défavorables au cycle uranium



Cycle Th/U en fluorure

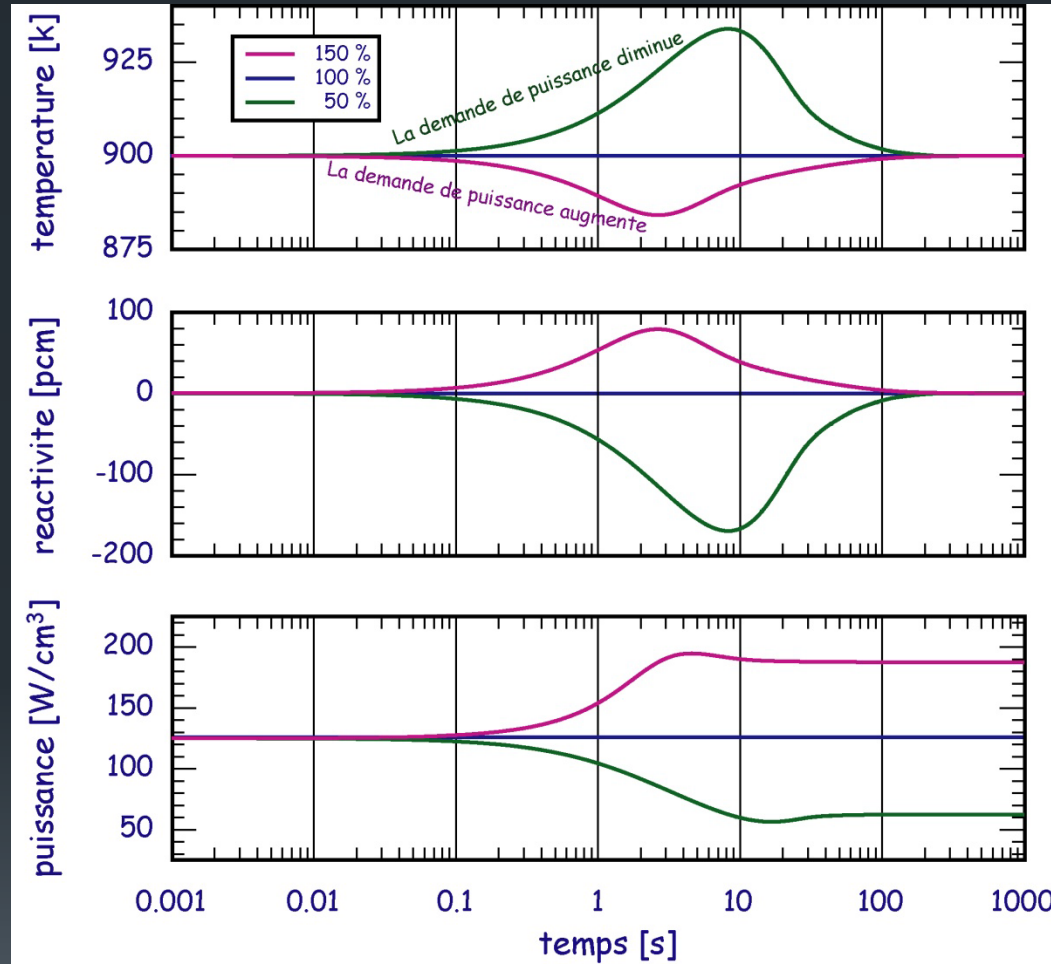
Les chlorures demandent de plus grands volumes et augmentent les dégâts aux matériaux




Cycle U/Pu en chlorure

# Comment piloter un réacteur à combustible liquide par la demande ?

- Si on augmente la demande de puissance, le combustible est trop refroidi et donc sa température diminue
- Ce refroidissement provoque une augmentation de la réactivité
- Il s'ensuit une augmentation de la puissance fournie par le combustible jusqu'à un niveau supérieur à la demande
- La température peut alors remonter jusqu'à revenir à son niveau initial
- Ce qui ramène la réactivité à zéro
- Au final, la puissance fournie est devenue égale à la puissance demandée
- Il se produit la même chose mais en miroir si on diminue la puissance demandée



La réactivité finit toujours par revenir à son niveau de prédilection c'est-à-dire 0



Le nucléaire peut-il jouer son rôle dans la lutte contre le changement climatique ?

## Les enjeux du nucléaire

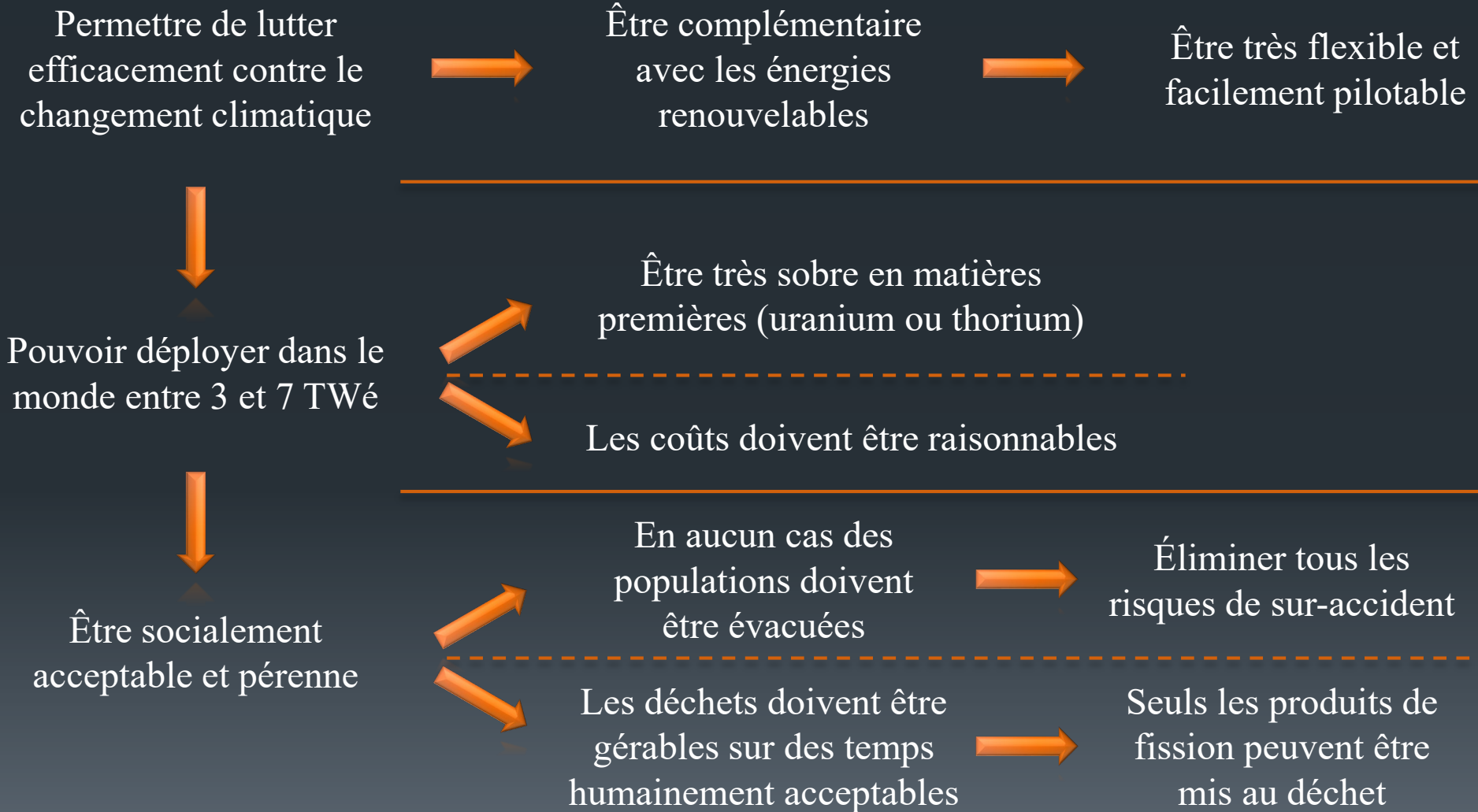
# Tentative de répartition de la production d'énergie primaire mondiale en 2050



- On suppose, en 2050 :
  - une demande de 20 Gtep (inclut une amélioration de l'efficacité énergétique de plus de 50%)
  - une division par 2 par rapport à 2000 de la production des énergies fossiles
  - Une équipartition entre nucléaire et renouvelables

Source [Gtep] Données IEA	Production totale en		Scénario 20 Gtep en 2050	Commentaires
	2000	2017		
Fossile (gaz, pétrole, charbon)	8	11,5	4	On sera neutre en CO <sub>2</sub> si capture et séquestration
Biomasse Traditionnelle	1,1	1,4	2	Essentiellement du bois
Hydraulique	0,57	0,92	1,3	doublement
Nucléaire	0,68	0,61	6,35	Facteur 10 par rapport à 2017
Nouveaux Renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0,03	0,47	6,35	Facteur 13,5 par rapport à 2017
Total	10,38	14,9	20	On est sur un chemin au-delà des 20 Gtep en 2050

# Quels sont les critères d'évaluation d'un réacteur nucléaire de fission du futur ?





# Disponibilité de la matière fissile

- Même régénératrice une filière nucléaire a besoin de matière fissile pour démarrer
  - Les RNR-Na (Réacteur à Neutrons Rapides caloporté sodium) ont besoin de 10 à 20 tonnes de plutonium par GWè
  - Le MSFR (Molten Salt Fast Reactor) a besoin par GWè
    - Soit de 3 tonnes d' $^{233}\text{U}$  qu'il faudra produire par ailleurs
    - Soit, par exemple, de 20 tonnes d'uranium enrichi à 13%, 5 tonnes de Pu et 0,7 tonnes d'actinides mineurs
      - Ce qui correspondant à 2,5 tonnes d' $^{235}\text{U}$  provenant de plus de 400 tonnes d'uranium naturel.
- Les REL actuels produisent environ 240 kg/an/GWè de plutonium et actinides mineurs
  - Soit 14,4 tonnes s'ils fonctionnent 60 ans.
    - En supposant que le plutonium n'est pas recyclé dans les REP (MOX)
    - En oubliant que du Pu de 30 ans est bien moins efficace que du Pu récent (décroissance du  $^{241}\text{Pu}$ )
  - Ceci avec la consommation d'environ 12 000 tonnes d'uranium naturel par réacteur.
- On a tout juste de quoi renouveler le parc avec des RNR-Na ou le tripler avec des MSFR au prix d'une consommation supplémentaire d'uranium naturel.

Le plutonium généré par les réacteurs actuels est très largement insuffisant pour assurer un facteur 10 sur la puissance installée

# Peut-on compter sur la régénération ?

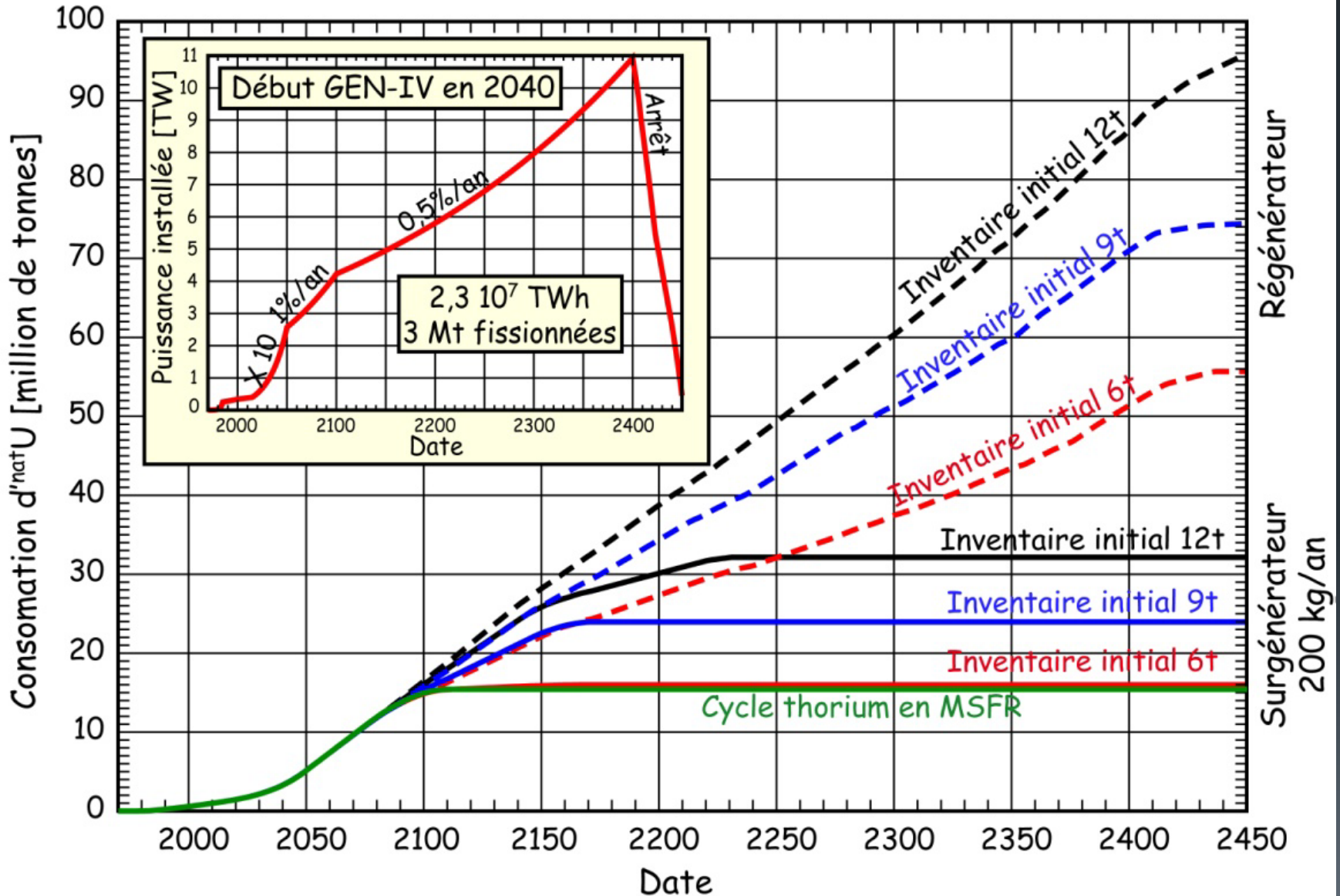
## Exemple avec le Déploiement des RNR-Na



- Les capacités de déploiement vont dépendre des inventaires initiaux en matière fissile et des quantités sur-générées
  - L'inventaire en plutonium d'un RNR-Na va de 6 tonnes (Superphénix) à plus de 12 tonnes si on veut assurer un coefficient de vide négatif
  - Un réacteur en combustible solide a besoin d'au moins 2 inventaires pour fonctionner
    - Le premier est chargé au démarrage. Il restera en cœur environ 5 ans (temps d'irradiation)
    - Le deuxième est chargé pour permettre le retraitement du premier
      - On suppose que le temps de retraitement est identique au temps d'irradiation ce qui est optimiste
  - La quantité sur-générée peut être nulle s'il n'y a pas de couverture fertile et peut atteindre plusieurs centaines de kg/an dans le cas contraire
- Le plutonium est produit dans des REL qui consomment de l'uranium naturel
  - La limite de déploiement dépend des ressources en uranium naturel
  - Mais aussi du moment et du rythme de la demande parce qu'il est difficile d'augmenter très rapidement la production en uranium naturel

# Peut-on compter sur la régénération ?

Exemple avec le Déploiement des RNR-Na

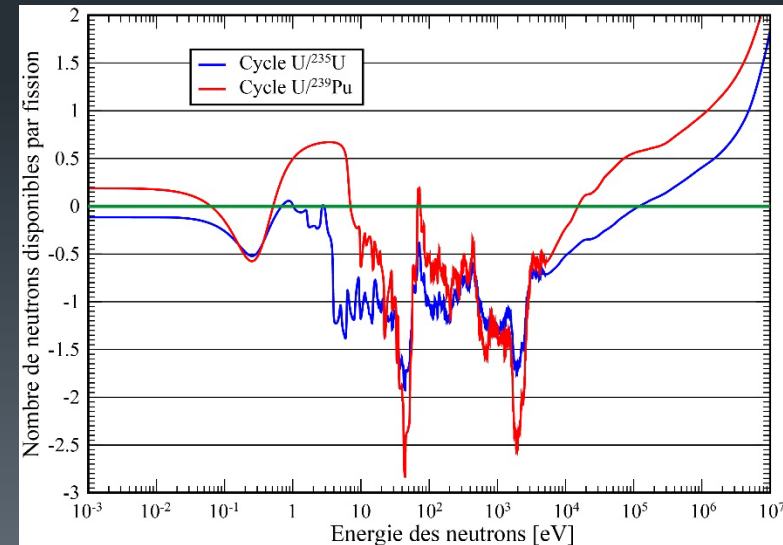


# Utilisation directe de l' $^{235}\text{U}$

- Pour minimiser la demande en uranium naturel on pourrait démarrer les réacteurs surgénérateurs directement à l'uranium enrichi
  - Un REP de 1 GWé consomme 200 t/an d' $^{\text{nat}}\text{U}$ , soit 1,44 tonnes d' $^{235}\text{U}$  pour ne produire qu'environ 240 kg de plutonium et actinides mineurs
- Les propriétés neutroniques de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{239}\text{Pu}$  ne sont pas favorables à la régénération
  - Le nombre de neutrons disponibles par fission, après entretien de la réaction en chaîne et régénération du fissile, s'écrit :  $N_d = \nu_{235\text{U}} - 2 - \alpha_{235\text{U}} - \alpha_{239\text{Pu}}$  ( $\alpha = \frac{\sigma_{\text{Capture}}}{\sigma_{\text{Fission}}}$ )

Il n'est pas possible d'atteindre la régénération uniquement avec de l' $^{235}\text{U}$

- Soit on démarre avec une part de plutonium
  - Soit on injecte régulièrement du plutonium
- Dans tous les cas on a besoin du plutonium produit par les REP



# Déploiement massif et rapide

- Pour lutter efficacement contre le changement climatique il faudrait déployer mondialement plusieurs  $TW_e$  en moins de 30 ans
  - Un tel déploiement se heurte à la disponibilité de suffisamment de matière fissile
    - On ne dispose pas d'assez de plutonium pour faire ce déploiement uniquement avec lui
    - La surgénération n'est pas suffisamment efficace sur un temps si court pour être déterminante
  - Il faudrait donc faire ce déploiement avec de l'uranium enrichi
- Les propriétés neutroniques de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{239}\text{Pu}$  ne sont pas favorables à la régénération
  - Il n'est pas possible d'atteindre la régénération uniquement avec de l' $^{235}\text{U}$
  - Il faut ajouter du plutonium pour augmenter le nombre de neutrons par fission

La construction d'un important parc de REP pourrait s'avérer indispensable pour permettre un déploiement massif et rapide

Merci pour votre  
attention

