



# Stratégie de déploiement de la 4<sup>ème</sup> génération

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



Pourquoi déployer massivement et rapidement des réacteurs nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération ?

# Motivation

# 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 de la production par les énergies fossiles par rapport à de 2000
  - Une équipartition entre nucléaire et renouvelables

# 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 de la production par les énergies fossiles par rapport à de 2000
  - Une équipartition entre nucléaire et renouvelables

Source [Gtep] Données IEA	Production totale en			
	2000	2017		
Fossile (gaz, pétrole, charbon)	8	11,5		
Biomasse Traditionnelle	1,1	1,4		
Hydraulique	0,57	0,92		
Nucléaire	0,68	0,61		
Nouveaux Renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0,03	0,47		
Total	10,38	14,9		On est sur un chemin au-delà des 20 Gtep en 2050

# 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 de la production par les énergies fossiles par rapport à de 2000
  - 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	Réduction des émissions de 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 ?



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



Permettre de lutter  
efficacement contre le  
changement climatique

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



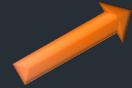
Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées



Éliminer tous les risques de sur-accident

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées



Éliminer tous les risques de sur-accident



Les déchets doivent être gérables sur des temps humainement acceptables

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées



Éliminer tous les risques de sur-accident



Les déchets doivent être gérables sur des temps humainement acceptables



Seuls les produits de fission peuvent être mis au déchet

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées



Éliminer tous les risques de sur-accident



Les déchets doivent être gérables sur des temps humainement acceptables



Seuls les produits de fission peuvent être mis au déchet



Être très sobre en matière première (uranium et thorium)

## Limitation du déploiement

# 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.

# 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 REP et REB actuels produisent environ 250 kg de plutonium par an et par GWè
  - Soit 15 tonnes s'ils fonctionnent 60 ans.
    - En supposant que ce 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.

# 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 REP et REB actuels produisent environ 250 kg de plutonium par an et par GWè
  - Soit 15 tonnes s'ils fonctionnent 60 ans.
    - En supposant que ce 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.

# 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 REP et REB actuels produisent environ 250 kg de plutonium par an et par GWè
  - Soit 15 tonnes s'ils fonctionnent 60 ans.
    - En supposant que ce 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 surrégénérées
  - 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 de 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 surrégénérée peut être nulle s'il n'y a pas de couverture fertile et peut atteindre plusieurs centaines de kg/an dans le cas contraire

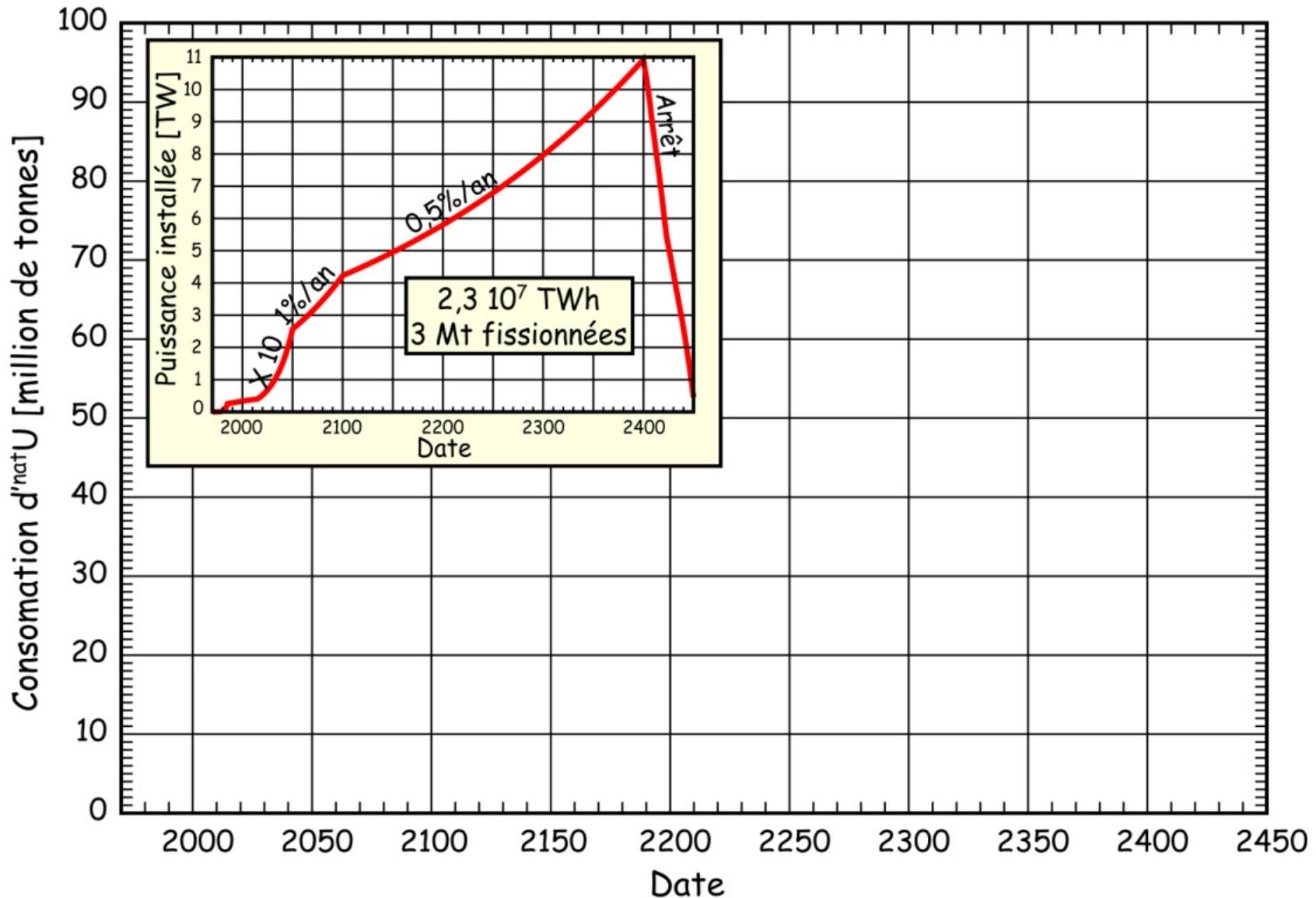
# Peut-on compter sur la régénération ?

## Exemple avec le Déploiement des RNR-Na

- Les capacités de déploiement vont dépendre des inventaires initiaux en matière fissile et des quantités surrégénérées
  - 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 de 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 surrégénérée 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 réacteurs à eau 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
  - Elle dépend aussi du profil de demande
    - Le cas le plus difficile est une demande constamment croissante même faiblement

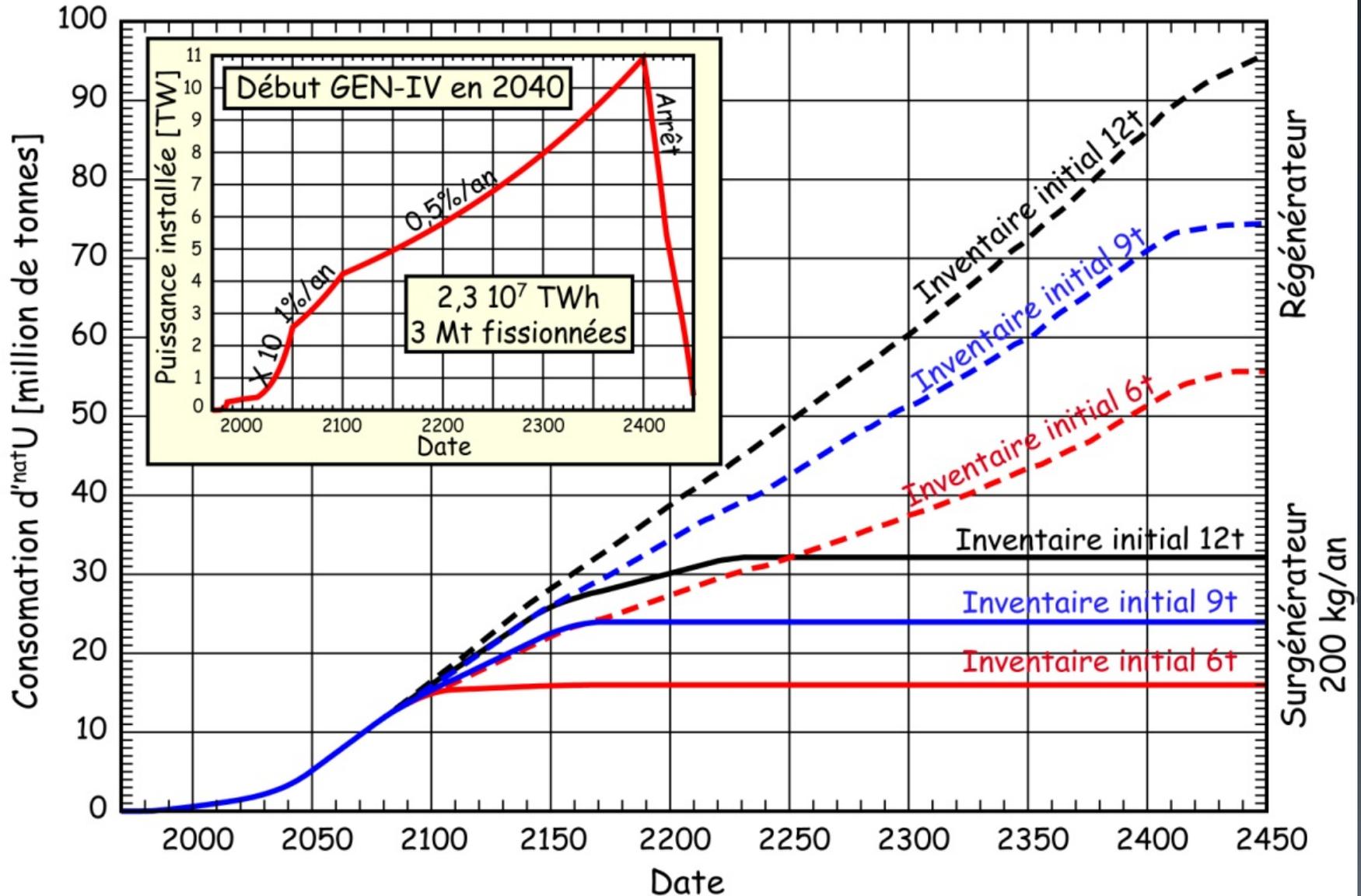
# Peut-on compter sur la régénération ?

Exemple avec le Déploiement des RNR-Na



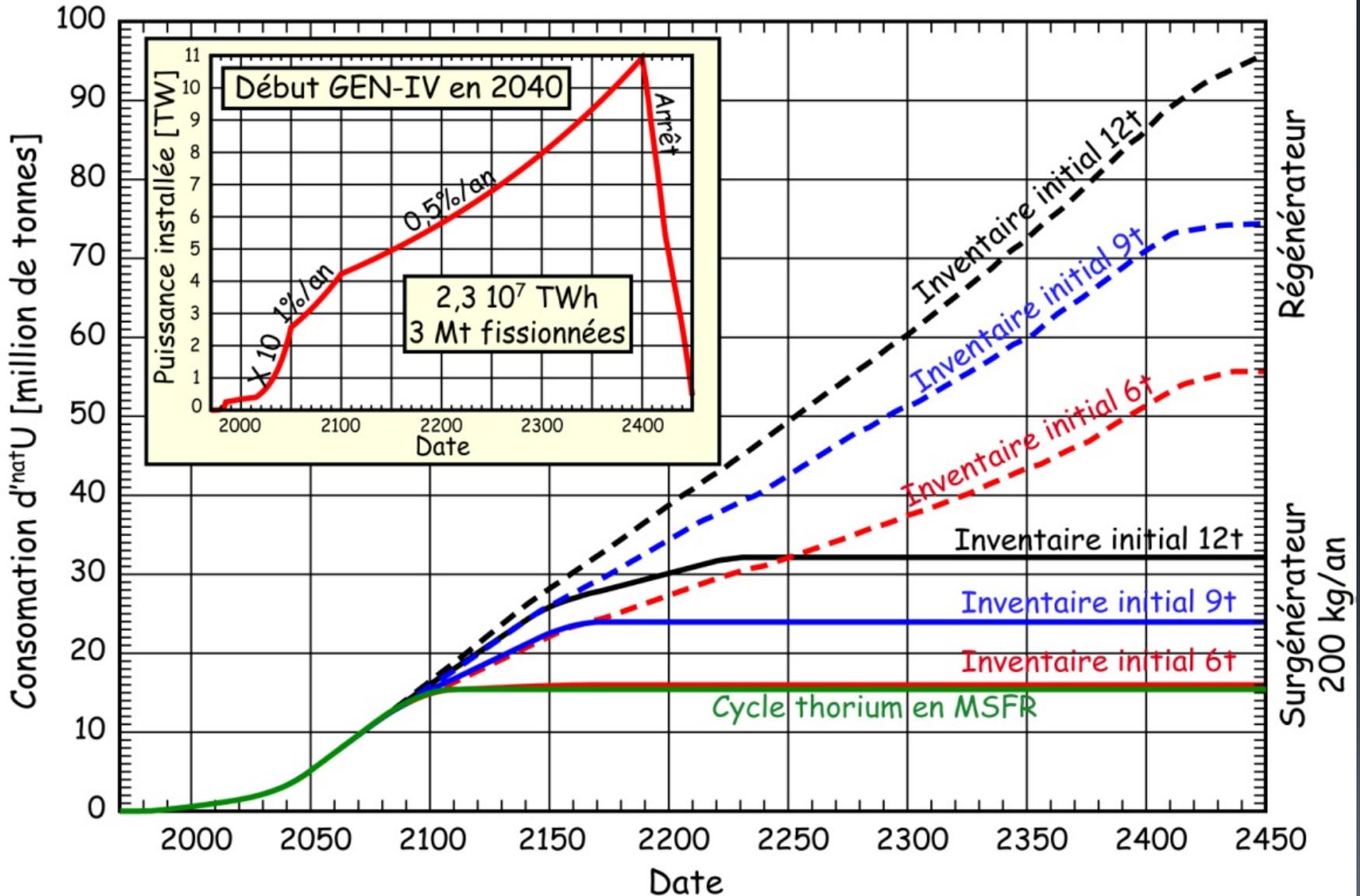
# Peut-on compter sur la régénération ?

Exemple avec le Déploiement des RNR-Na



# 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 surrégénérateurs directement à l'uranium enrichi.
  - Un REP de 1 GW<sub>e</sub> consomme 200 t/an d' $^{\text{nat}}\text{U}$ , soit 1,44 tonnes d' $^{235}\text{U}$  pour ne produire que 240 kg de plutonium

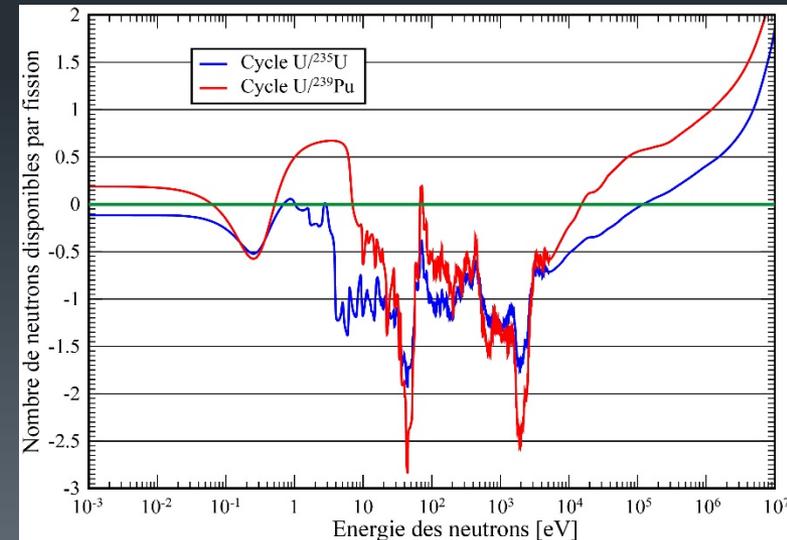
# Utilisation directe de l' $^{235}\text{U}$

- Pour minimiser la demande en uranium naturel on pourrait démarrer les réacteurs surrégénérateurs 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 que 240 kg de plutonium
- Les propriétés neutroniques de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{239}\text{Pu}$  ne sont pas favorables à la régénération
  - Le nombre de neutrons disponible par fission, après entretien de la réaction en chaîne et régénération du fissile, s'écrit :  $N_d = \nu_{235\text{U}} - 2 - \alpha_{235\text{U}} - \alpha_{239\text{Pu}}$  ( $\alpha = \frac{\sigma_{\text{Capture}}}{\sigma_{\text{Fission}}}$ )

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

- Pour minimiser la demande en uranium naturel on pourrait démarrer les réacteurs surrégénérateurs 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 que 240 kg de plutonium
- Les propriétés neutroniques de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{239}\text{Pu}$  ne sont pas favorables à la régénération
  - Le nombre de neutrons disponible 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' $^{235}\text{U}$

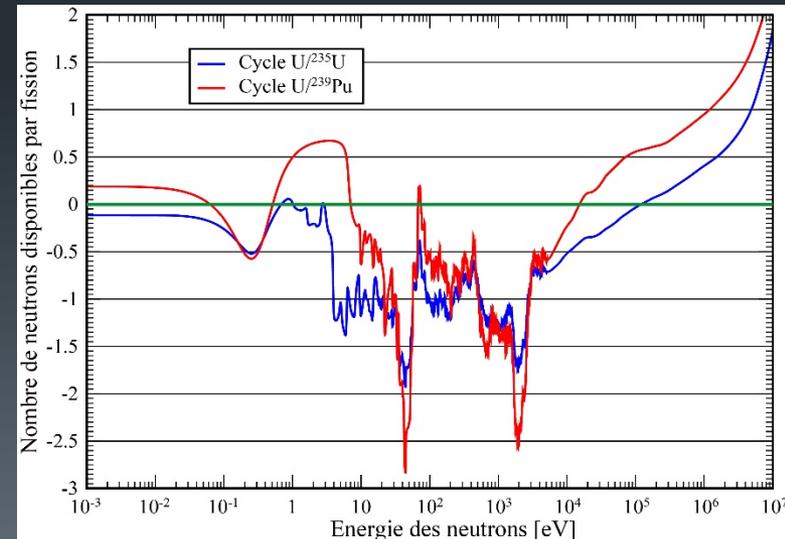


# Utilisation directe de l' $^{235}\text{U}$

- Pour minimiser la demande en uranium naturel on pourrait démarrer les réacteurs surrégénérateurs 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 que 240 kg de plutonium
- Les propriétés neutroniques de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{239}\text{Pu}$  ne sont pas favorables à la régénération
  - Le nombre de neutrons disponible par fission, après entretien de la réaction en chaîne et régénération du fissile, s'écrit :  $N_d = \nu_{235\text{U}} - 2 - \alpha_{235\text{U}} - \alpha_{239\text{Pu}}$  ( $\alpha = \frac{\sigma_{\text{Capture}}}{\sigma_{\text{Fission}}}$ )

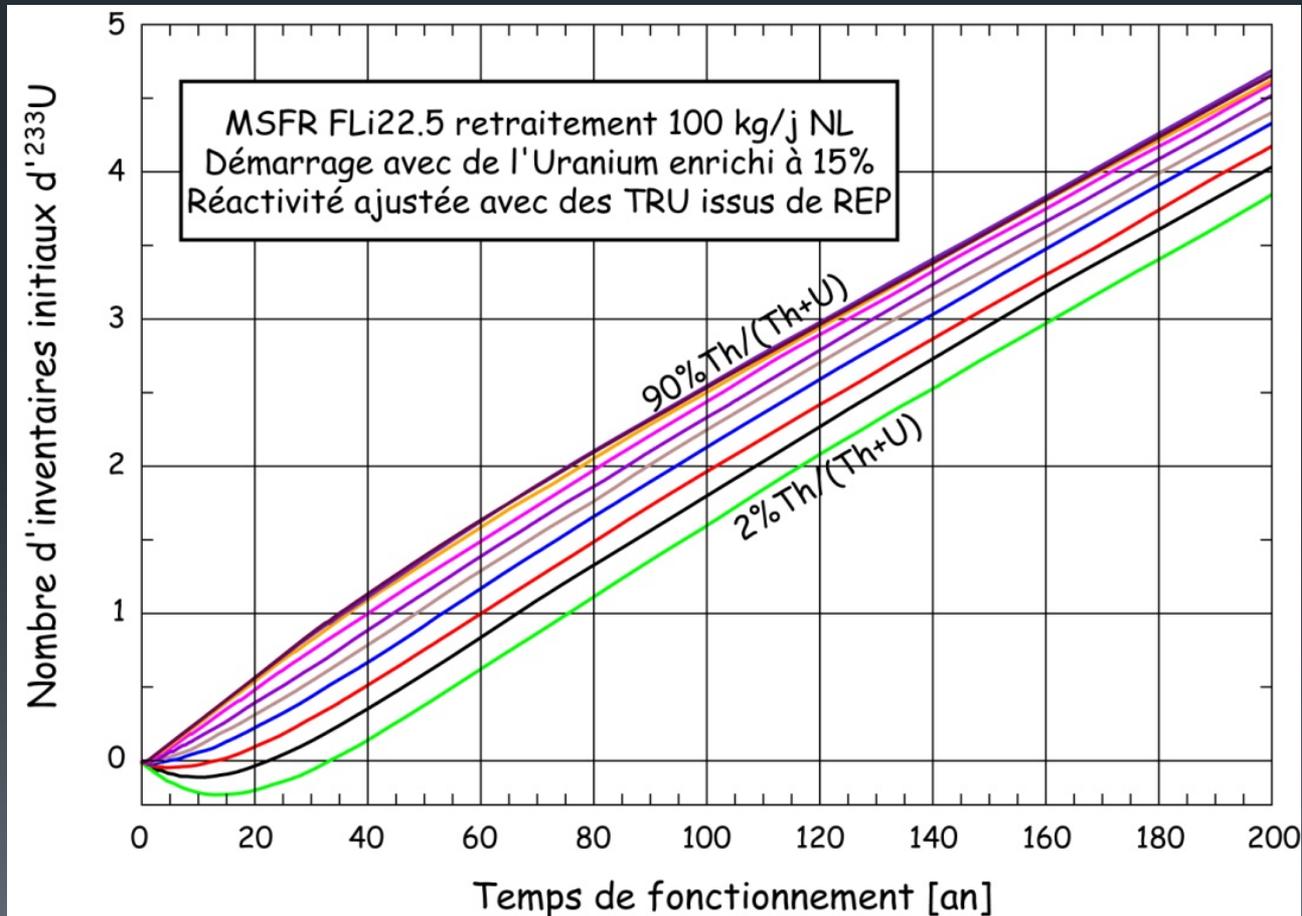
Il n'est pas possible d'atteindre la régénération uniquement avec de l' $^{235}\text{U}$

- 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



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

- Illustration avec un MSFR démarré avec un mix  $^{\text{enr}}\text{U}$  à 15%, TRU (Pu + actinides mineurs) issus de REP et thorium
  - Pour être régénérateur il faut à minima 30% de TRU ce qui correspond à
    - 3 800 kg/GWé de Pu
    - 550 kg/GWé d'actinides mineurs





Ca ne va pas être si simple !

En résumé

# 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 TRU pour faire ce déploiement uniquement avec eux
    - La surrégénération 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'avère indispensable pour permettre un déploiement massif et rapide

Merci pour votre  
attention

**Nucléaire :  
quels scénarios  
pour le futur ?**

**Michel Chatelier  
Patrick Criqui  
Daniel Heuer  
Sylvestre Huet**

**360**  
collection dirigée par  
Isabelle Joncour

**la ville brûle**