

# Nucléaire du futur, quelle problématique, quelles technologies?

Sylvain DAVID

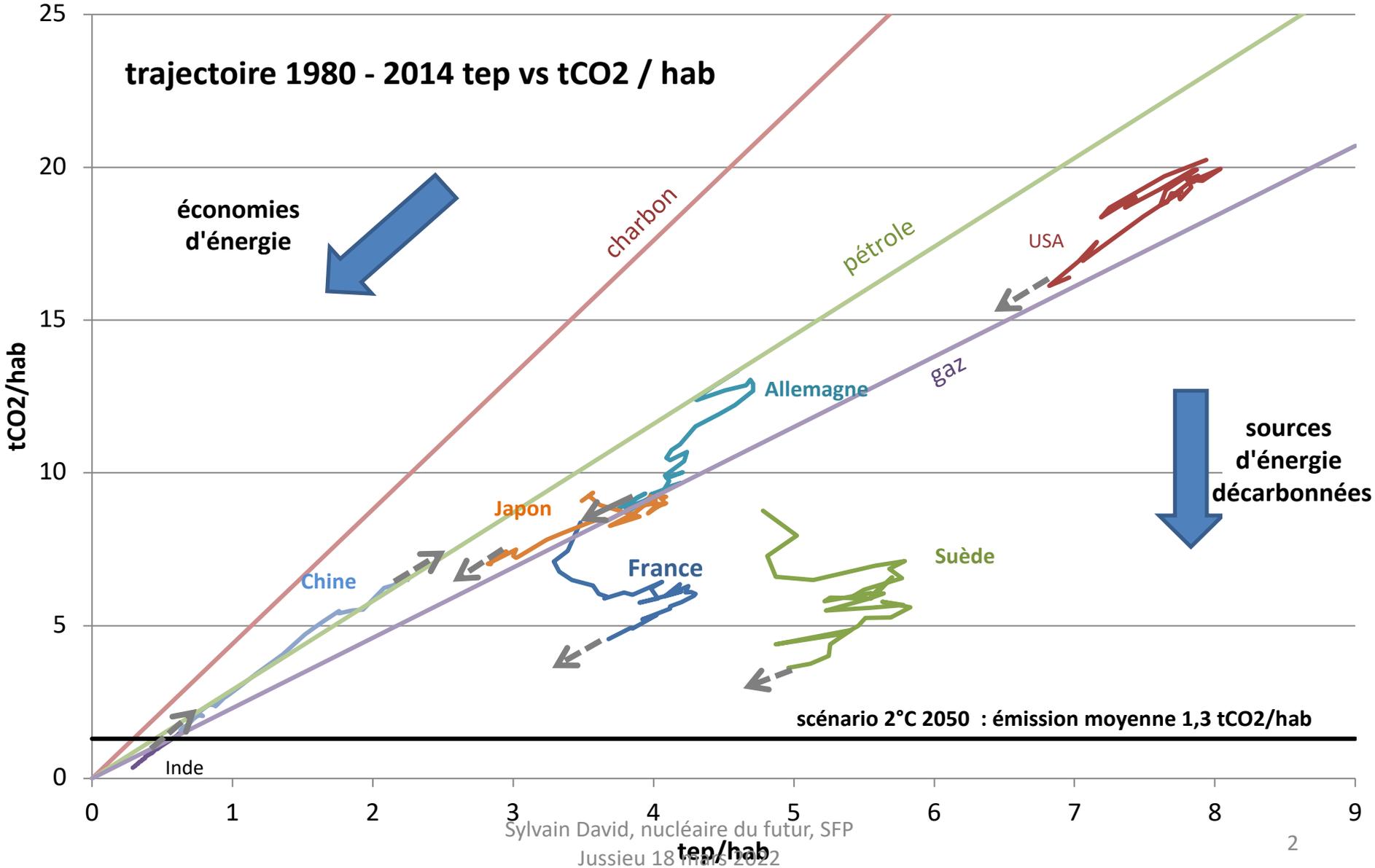
CNRS / IN2P3

[sylvain.david@ijclab.in2p3fr](mailto:sylvain.david@ijclab.in2p3fr)

SFP, Jussieu 18 mars 2022

# Trajectoires tep – tCO2 par habitant 1980 - 2014

trajectoire 1980 - 2014 tep vs tCO2 / hab

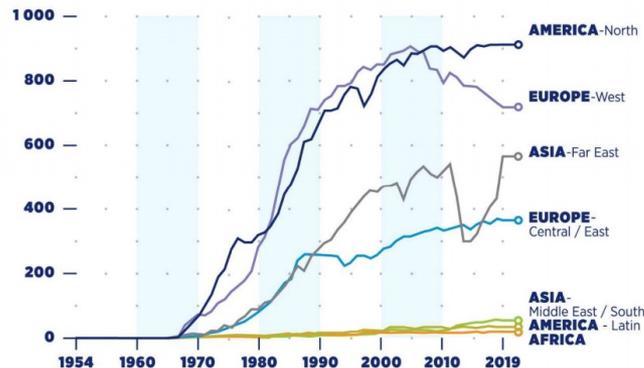


# Le nucléaire dans le monde

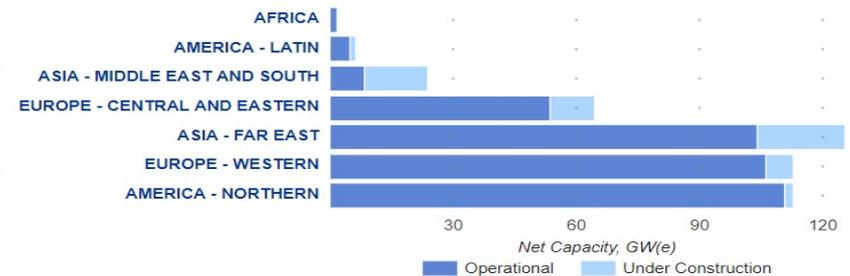
3

443 réacteurs en fonctionnement + 52 en construction  
393 GW électriques installés  
2700 TWh/an, 12% de l'électricité, en baisse

## REGIONAL ELECTRICITY PRODUCTION OVER TIME - TWh



## REGIONAL DISTRIBUTION OF NUCLEAR POWER CAPACITY



EPR de génération 3

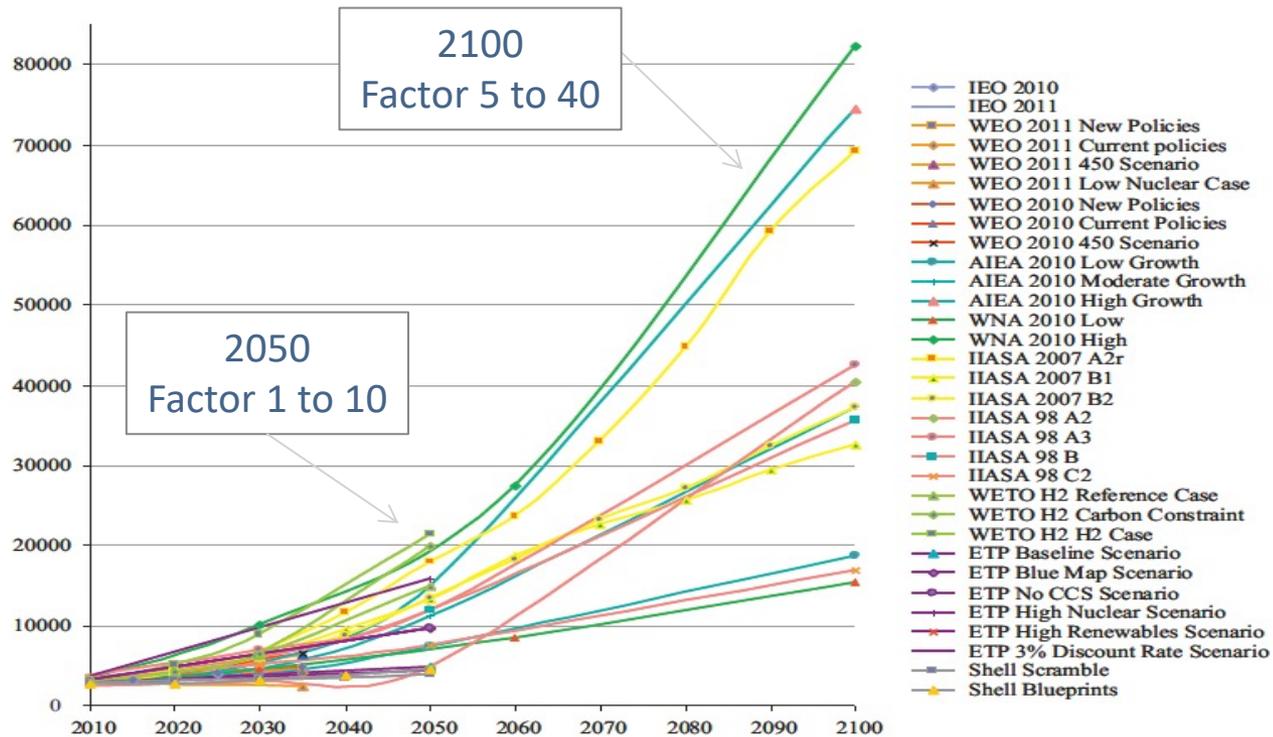
Flamanville, Olkiluoto, chantiers toujours pas terminés

Taishan 1&2 en opération (Chine)

Hinkley Point C 2 EPR en construction (UK)

En attente : **Sizewell C (2, UK), Jaitapur (6, Inde)**, Pologne, République Tchèque, Arabie Saoudite, ...

# Et dans le futur ?



Si le nucléaire doit jouer un rôle dans la lutte contre le dérèglement climatique, il faudra en faire beaucoup



# 5 Exemple d'un scénario nucléaire x8 en 2050

Modèle COSIME

Demande d'énergie mondiale 2050 = 20 Gtep/an

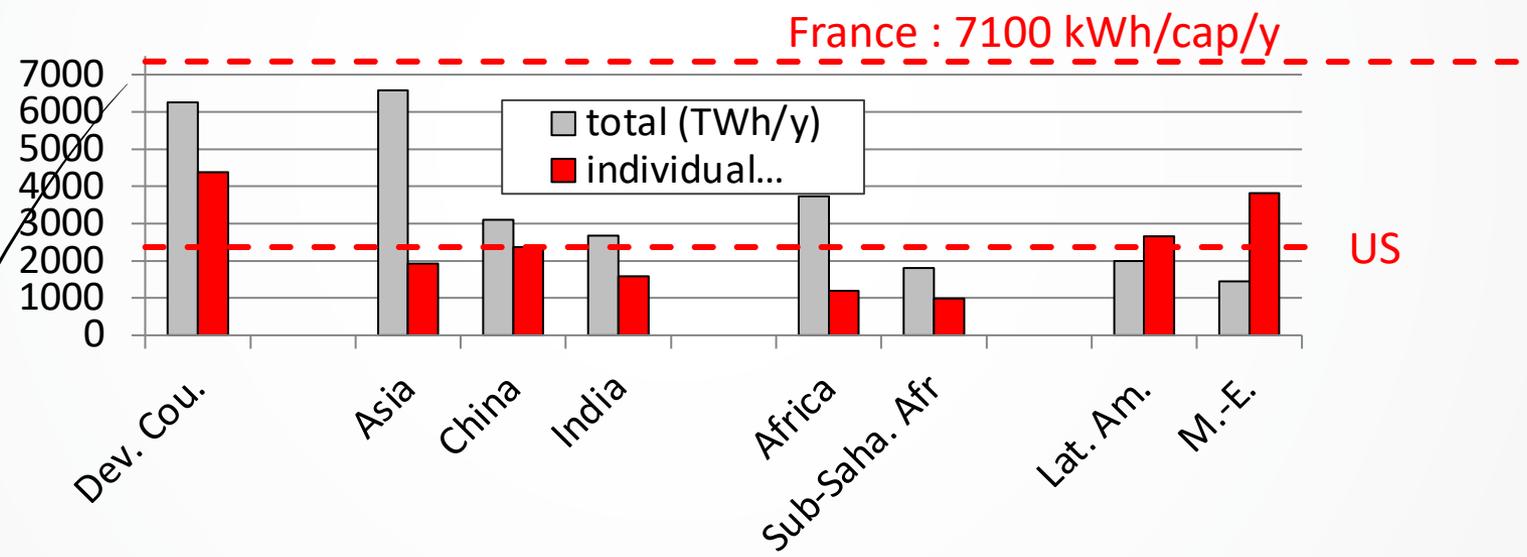
Contrainte climatique = CO<sub>2</sub> / 2 en 2050

Développement des renouvelables = 7,5 Gtep/an

Stockage CO<sub>2</sub> = 12 Gt/an

Nucléaire x8 en 2050

production électricité pour les populations urbaines (6milliards)



Pour la Chine, ce scénario correspond à 3 fois moins de nucléaire que la France\* en 2 fois plus de temps

\* ramené au nombre d'habitants

## 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations : Quel potentiel de production ?

Uranium naturel = 0,72% <sup>235</sup>U + 99,28% <sup>238</sup>U

### Consommation d'uranium des filières actuelles

U	/(GWe.an)
fissionné	1 t
enrichi	30 t
naturel	200 t

Taux d'utilisation du minerai d'uranium = 0,5 %

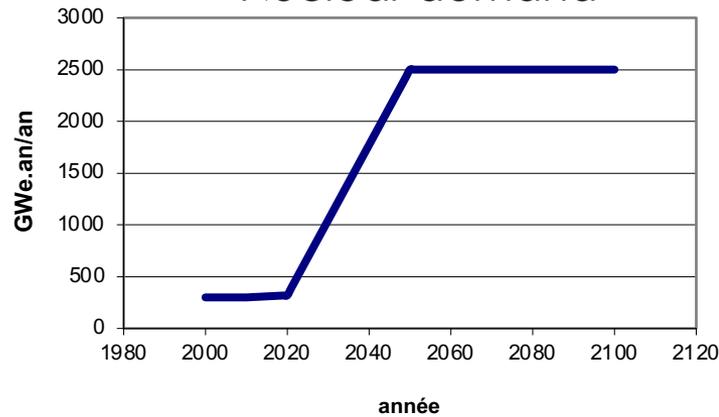
Optimisation possible jusqu'à ~130 tonnes/(GWe.an)

Si on connaît les ressources en uranium, on doit connaître le potentiel de production...

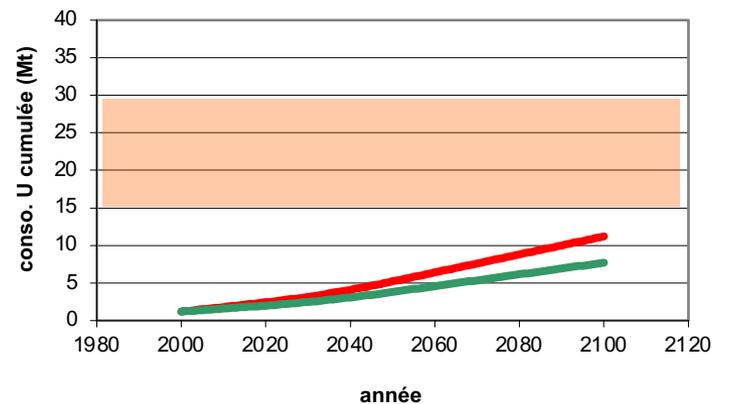
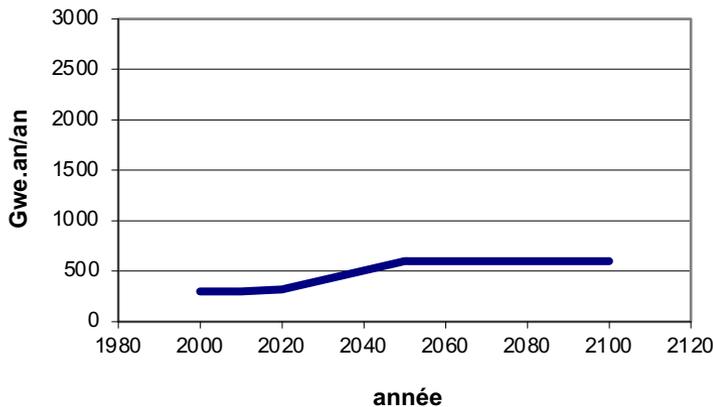
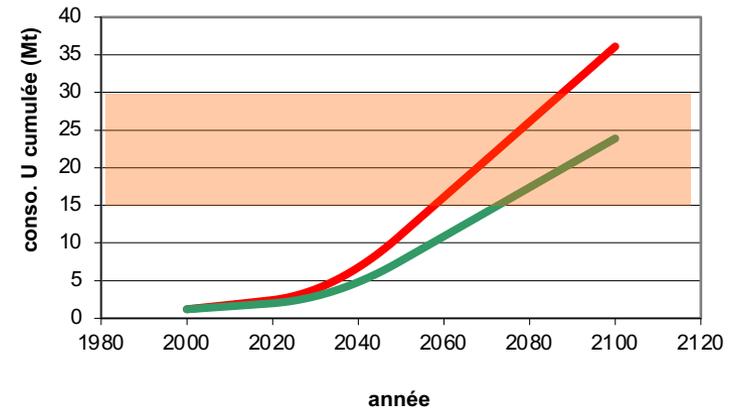
# Different scenarios of nuclear power evolution

— 200t/(GWe.an)  
— 130t/(GWe.an) :  
 ↘ 235 in U<sub>dep</sub>, reprocessing U, Pu

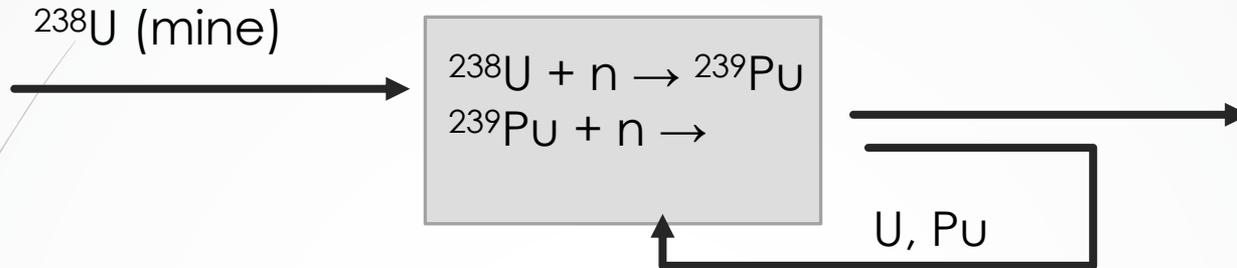
## Nuclear demand



## Consommation cumulée d'U naturel



## Recyclage Pu en réacteur à eau ou à neutrons rapides



	Stock à l'équilibre t / GWe	
	REP (modérateur)	Sans modérer les neutrons
Total	79	44
$^{238}\text{U}$	78	36,4
$^{239}\text{Pu}$ (fissile)	<b>0,58</b>	<b>4,56</b>
$^{240}\text{Pu}$	0,24	2,56
$^{241}\text{Pu}$ (fissile)	<b>0,19</b>	<b>0,33</b>
$^{242}\text{Pu}$	0,31	0,17
<b>Total Pu coeur</b>	<b>1,3</b>	<b>7,6</b>
<b>Total Pu (cycle)</b>	<b>3,2</b>	<b>18,2</b>
<b>Criticité du mélange U/Pu à l'équilibre</b>	<b>NON</b>	<b>OUI</b>

Parc français  $60 \times 18,2 = 1100$  t  
Pu civil 2020~350t



## 2 grandes catégories de technologie « du futur »

- Les réacteurs pensés pour optimiser la sûreté / le coût / le rendement / nouveaux usages (H<sub>2</sub>, chaleur, ...). Aucune optimisation affichée en termes de consommation d'U naturel, ou en terme de gestion des matières
  - Les réacteurs pensés pour « résoudre » la question des ressources : régénération
- + 1 catégorie dédiée à la gestion des actinides mineurs, mais qui vient en complément de réacteurs électrogènes qui recycle le plutonium

## Les « gros »

EPR  
1650MW



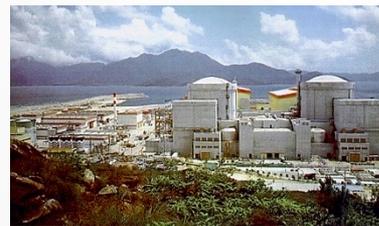
AP1000  
1000MW



VVER  
~1000 MW



CPR1000  
~1000MW



Problématique

Réduction des coûts  
(effets de série?)

Sûreté améliorée?

Diversification des usages

- Maniabilité?
- Chaleur?
- Cogénération?
- Hydrogène?
- Dessalement?
- ...?

## Les « petits » bientôt ?



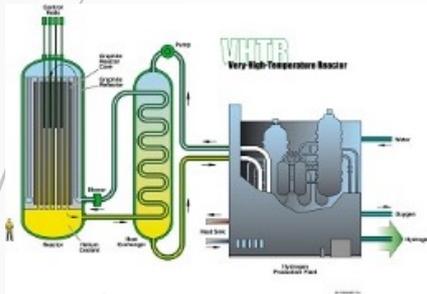
L'AIEA dénombre 50 projets de SMR  
Aucun n'a encore vu le jour à  
l'échelle commerciale

## Famille « U enrichi » : la haute température



Les réacteurs haute température refroidis au gaz (Hélium)

Un combustible réfractaire (difficilement retraitable) capable d'atteindre des hautes températures pour des rendements élevés ou des usages de chaleur directe



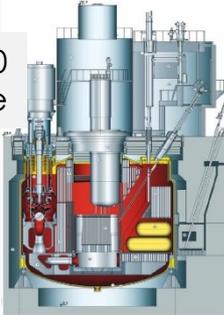
Les réacteurs à combustible solide et refroidis par un sel fondu

Superphenix  
1200MWe

## Réacteurs à sodium

Démonstration industrielle de la régénération à grande puissance

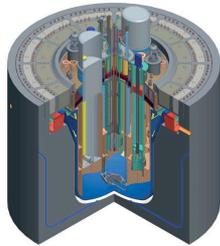
Pas de marché actuellement, car pas de pression sur l'uranium

BN800  
800MWeCFR600  
CFR1000

## Les alternatives au sodium

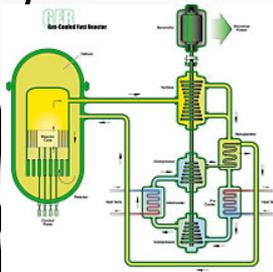
## Le plomb

Question de la corrosion du Pb à haute température



## Le gaz (He)

Capacité de confinement du combustible en limitant la présence de Carbone

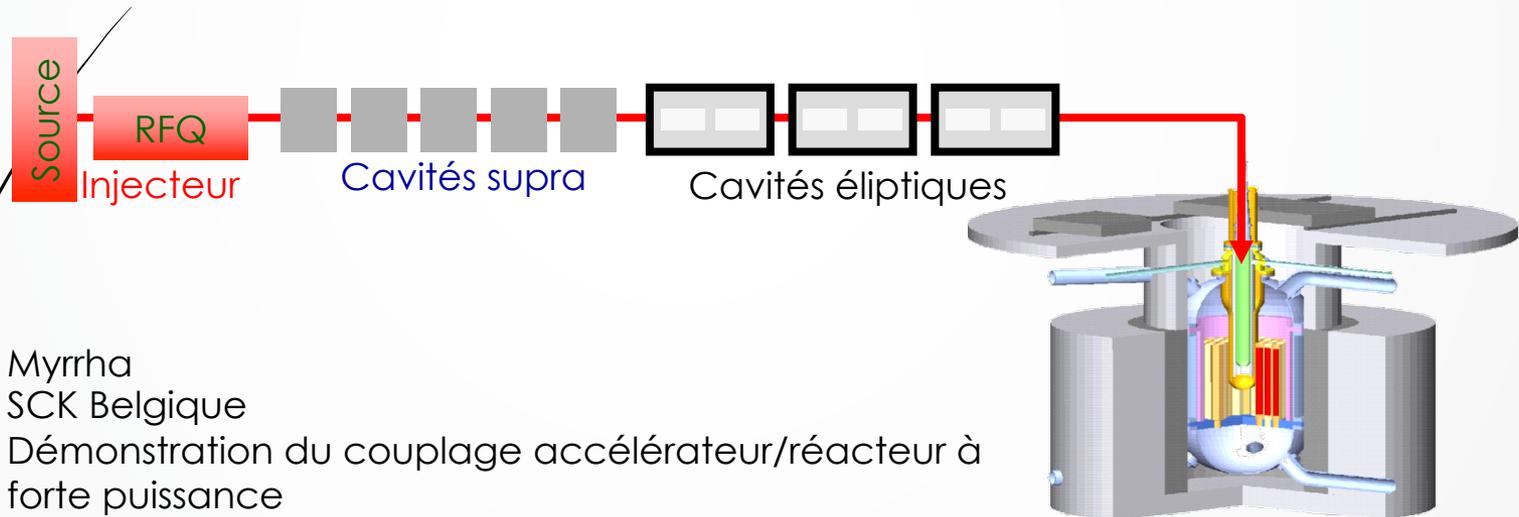


## Famille « Cycle » : les réacteurs dédiés à la transmutation des actinides mineurs

Concentrer les actinides mineurs (Américium) dans un réacteur dédié à leur transmutation ne permet pas de piloter le système en mode critique de façon sûre

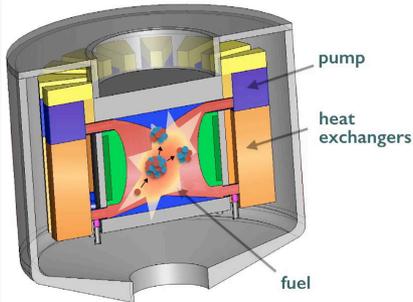
Il faut passer en mode sous-critique, la réaction en chaîne n'est pas autoentretenue, et une source de neutrons externe est nécessaire

Cela complique grandement la technologie, mais permet de séparer la strate « électrogène » de la strate « incinératrice »



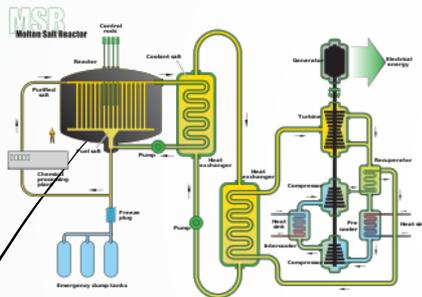
## Famille « Cycle » : les réacteurs à sels fondus, cycle U/Pu, Th/U, transmutation, ...

TMSR  
(CNRS-LPSC)



Un combustible liquide qui circule dans les échangeurs et sert de caloporteur

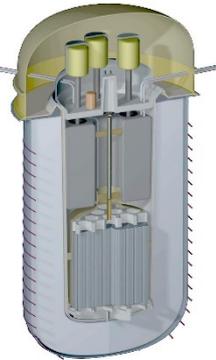
MSR  
(GIF gen4)



Des avantages « papier » intéressants

- Plusieurs sels possibles, modérateur de neutrons ou non
- Retraitement en ligne possible
- Cycles U/Pu, Th/U, incinération Pu, transmutation
- Évacuation passive de la puissance résiduelle
- Pilotage et contrôle de la criticité totalement différents (dilatation du sel, circulation, neutrons retardés, etc)

IMSR  
Terrestrial energy  
<http://terrestrialenergy.com>



De nombreux projets en particulier portés par des start-ups US, mais il manque encore une étape essentielle entre le réacteur idéal sur le papier, et un réel projet de prototype porté par des ingénieurs

- Un marché de réacteurs à eau peu dynamique, l'option des petits réacteurs interroge
- Les seuls réacteurs électrogènes qui fonctionnent à un stade industriel et « commandés » sont les réacteurs à eau (surtout type REP), basés sur l' $^{235}\text{U}$  comme matière fissile
- Parmi les réacteurs pour le futur, les seuls ayant fonctionné à un niveau avancé pré-industriel sont les réacteurs rapides refroidis au sodium
- Une multitude de projets, de systèmes, de combinaison cycle/technologie, mais aucune démonstration à grande échelle à ce stade
- Le Paradoxe
  - Pas de déploiement massif à court terme, donc pas besoin de régénération
  - Temps de développement très long et nécessité d'anticiper dans un monde très incertain
- Le monde et le climat ont un besoin urgent de prototypes de réacteurs à fission de puissance, dédié à la production d'énergie en priorité (électricité, chaleur, ...), et pas seulement de projets papiers idéaux. La Chine semble se lancer dans cette voie d'innovation et d'exploration, ensuite les USA (start-ups?), mais l'Europe?