

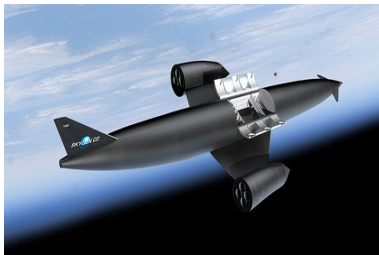
# Énergie nucléaire du futur, aspects sociétaux, physiques et mathématiques

Jean-Pierre Demailly

Institut Fourier, Université de Grenoble I & Académie des Sciences de Paris

18 novembre 2015  
Séminaire des Doctorants  
de l'Université d'Aix-Marseille

La science et la technologie sont aujourd'hui omniprésentes dans la vie quotidienne, au point qu'on ne s'en rend même plus compte ...



3.7 milliards d'habitants  
5 milliards tep

6 milliards d'habitants  
9.2 milliards tep

8.2 milliards d'habitants  
15.3 milliards tep



1970

1.35 tep/hab

2000

1.5 tep/hab

2030

1.9 tep/hab

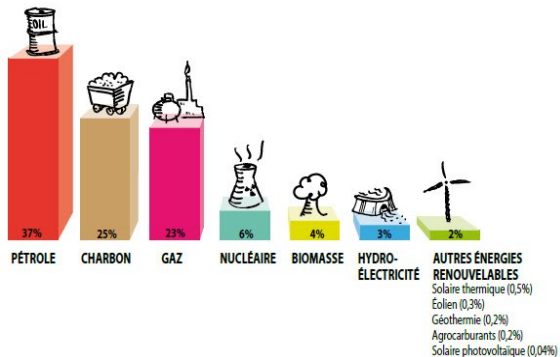
*Croissance de la population et de la demande d'énergie*

# Centrale électrique au charbon



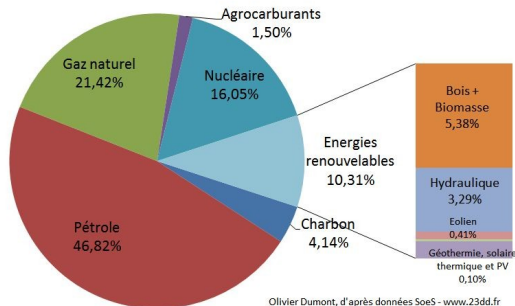
# Sources d'énergie utilisées dans le monde et en France

## SOURCES D'ÉNERGIE UTILISÉES DANS LE MONDE



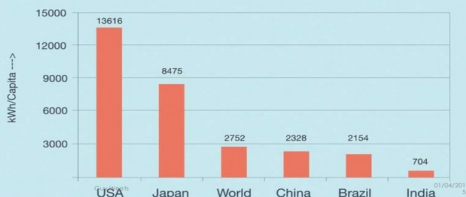
## Sources d'énergie dans la consommation finale totale en France, 2009

(données corrigées du climat)

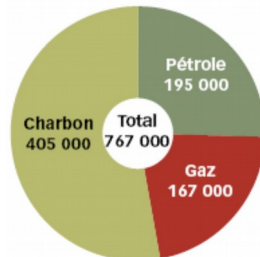


## Une situation très hétérogène

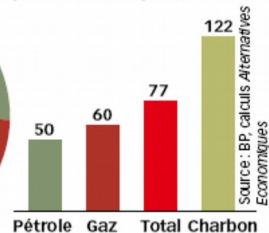
### Per Capita Electricity Consumption in kWh



## Réserves prouvées, en millions de tonnes d'équivalent pétrole



## Nombre d'années de production au rythme actuel



# Contexte nucléaire actuel : France

58 réacteurs / 63 GWe installés

75-77% de la production d'électricité

30% de la consommation totale d'énergie

## Bilan électrique France

	2011 (TWh)	2010 (TWh)	Variation 2011/2010	Part dans la production 2011	Émissions de CO <sub>2</sub> 2011 (en millions de tonnes)
<b>Production nette</b>	<b>541,9</b>	<b>550,2</b>	<b>-1,5%</b>	<b>100%</b>	<b>27,4</b>
Nucléaire	421,1	407,9	+3,2%	77,7%	0,0
Thermique à combustible fossile	51,2	59,5	-13,8%	9,5%	24,4
<i>dont charbon</i>	<i>13,4</i>	<i>19,1</i>	<i>-29,9%</i>	<i>2,5%</i>	<i>12,9</i>
<i>fioul</i>	<i>8,1</i>	<i>8,0</i>	<i>+0,7%</i>	<i>1,5%</i>	<i>2,3</i>
<i>gaz</i>	<i>29,7</i>	<i>29,9</i>	<i>-0,5%</i>	<i>5,5%</i>	<i>9,2</i>
Hydraulique	50,3	67,6	-25,6%	9,3%	0,0
Éolien	11,9	9,7	+22,8%	2,2%	0,0
Photovoltaïque	1,8	0,6	+208,7%	0,3%	0,0
Autres sources d'énergie renouvelables	5,6	4,9	+12,3%	1,0%	3,0

# Une rue à Grenoble ...



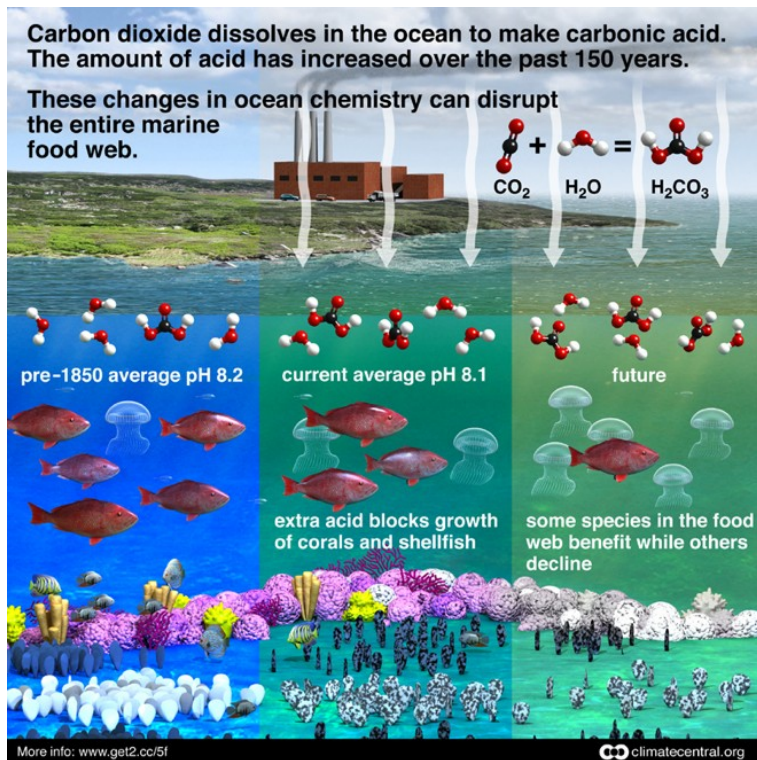


Entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 20 août 2015, l'humanité avait déjà consommé toutes les ressources biologiques que la nature est capable de renouveler en une année, soit une surconsommation se situant à un niveau d'environ 156 % !



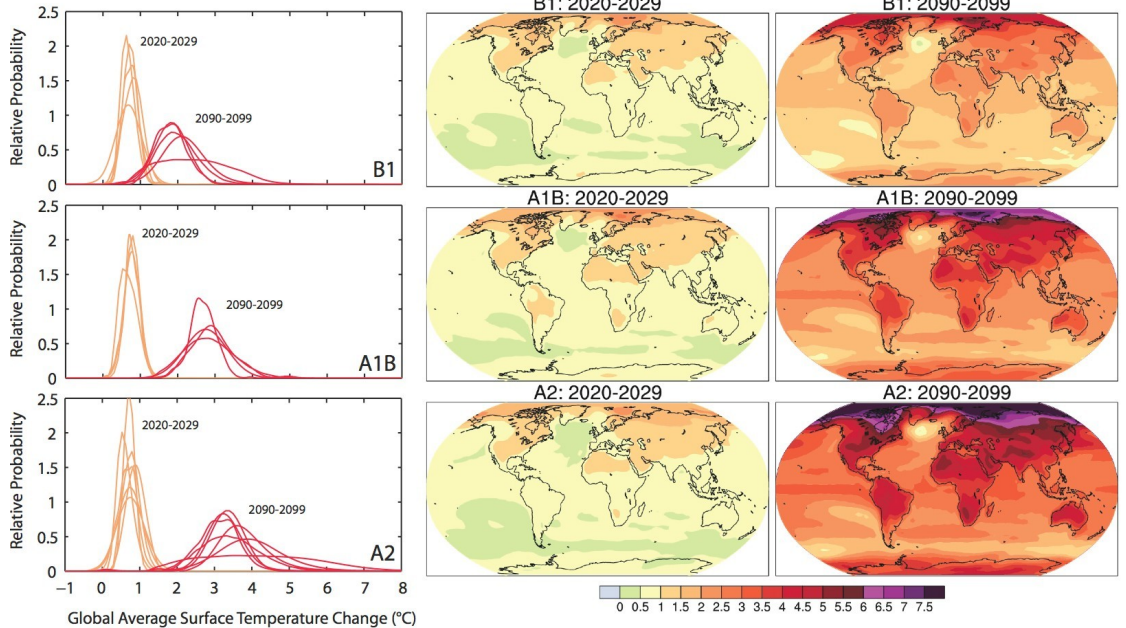


# Acidification des océans, entraînant un dépérissement de la faune aquatique

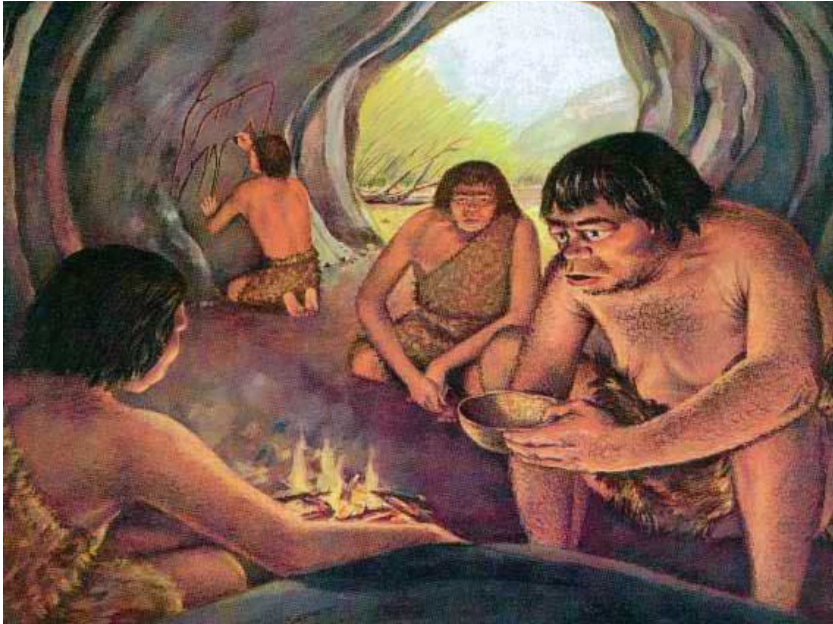


# Réchauffement climatique

## AOGCM Projections of Surface Temperatures



Faut-il en revenir à l'âge des cavernes ?



# Continuer la fuite en avant avec des énergies fossiles non conventionnelles...

Gaz de schiste, fracturation hydraulique





# Sables bitumeux Alberta Canada



01/04/201

# Energies renouvelables ...

## Solaire thermique Espagne



# Convertisseurs de courants marins Canada



Guy Weets

01/04/201  
5



# Géothermie Japon

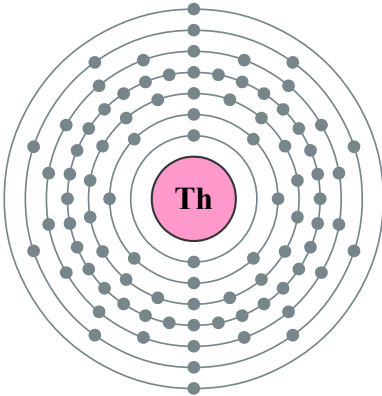


# Energie nucléaire ??

L'énergie nucléaire dispose au plan théorique d'un avantage colossal : sa densité énergétique par unité de masse est plusieurs millions de fois supérieure à celle de l'énergie chimique.

90: Thorium

2,8,18,32,18,10,2



découvert en Norvège en 1829

Bille de 150 g de thorium = plus de 300 tonnes de pétrole



# Energie : concentration

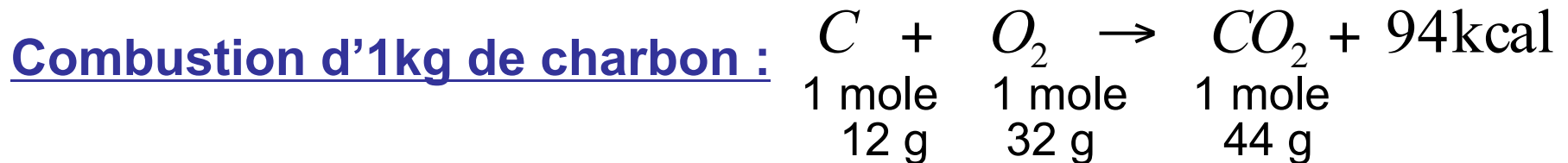
## Fission d'1kg de $^{235}\text{U}$ :

Energie libérée / fission  $\approx 200$  MeV (ou  $3,2 \cdot 10^{-11}$  J)

1kg d' $^{235}\text{U}$  =  $1000 \times N_A / 235 = 2,56 \cdot 10^{24}$  noyaux d'  $^{235}\text{U}$

$\Rightarrow$  Fission d'1 kg d' $^{235}\text{U}$  : produit  $2,56 \cdot 10^{24} \times 200 = 5,12 \cdot 10^{26}$  MeV

+ Rendement thermique  $\rightarrow$  électrique de 33%



Combustion d'1 mole de C : libère 94 kcal soit  $2,45 \cdot 10^{18}$  MeV (ou  $3,9 \cdot 10^5$  J)

1 kg de charbon contient  $1000/12 = 8,33$  moles de C

$\Rightarrow$  Combustion d'1kg de charbon : produit  $2,04 \cdot 10^{20}$  MeV

+ Rendement thermique  $\rightarrow$  électrique de 45%

# Energie : concentration



Il faut **1800 t** de charbon pour produire autant d'électricité qu'**1 kg d'<sup>235</sup>U**

OU

Par an, 1 personne (pays OCDE) consomme comme électricité environ 1 kW en continu soit 32 GJ/an ou 9000 kWh/an

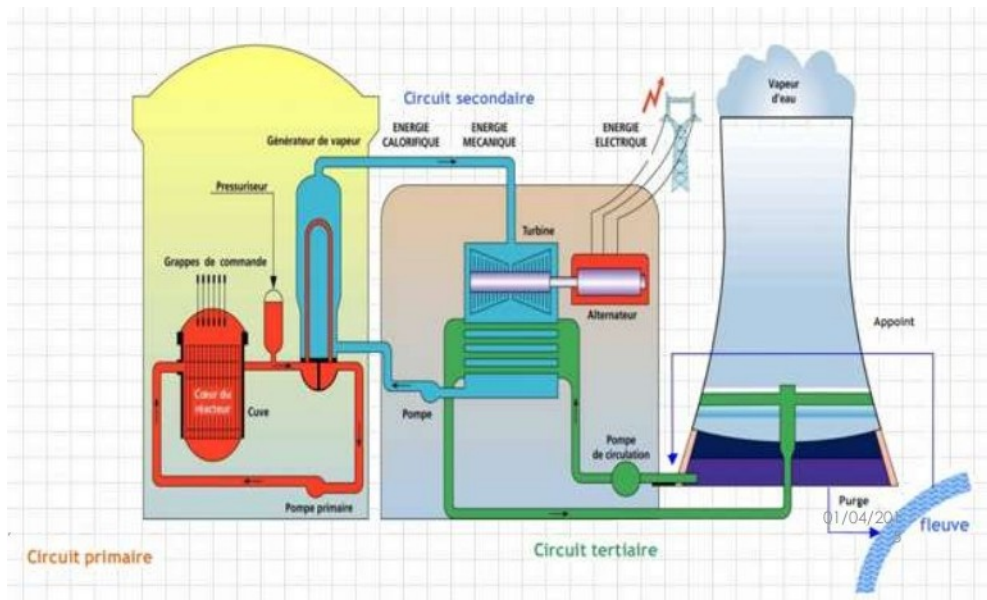
→  $32 \cdot 10^9 / 3,2 \cdot 10^{-11} / 0,33 = 3,03 \cdot 10^{21}$  fissions ⇒ **1,2 g d'<sup>235</sup>U ou 240g d'Unat**

→  $32 \cdot 10^9 / 3,9 \cdot 10^5 / 0,45 = 1,82 \cdot 10^5$  moles ⇒ **2150 kg de charbon**

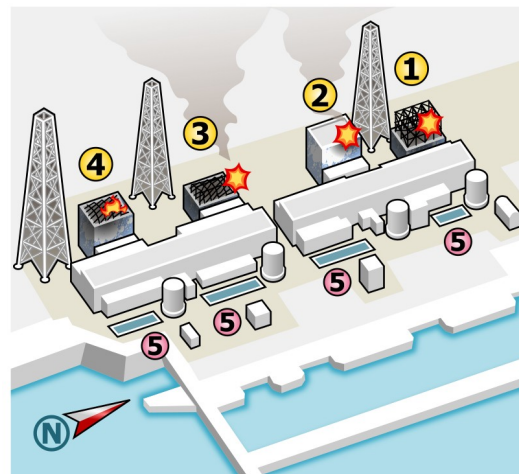
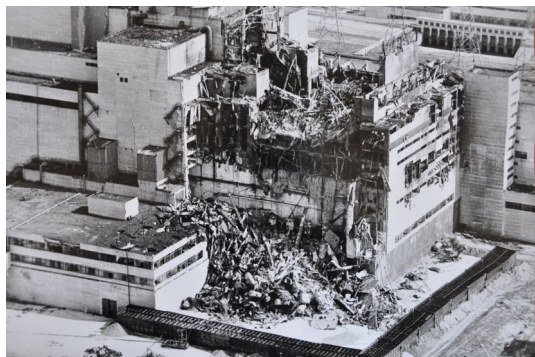


**L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée**

# Principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire électrogène



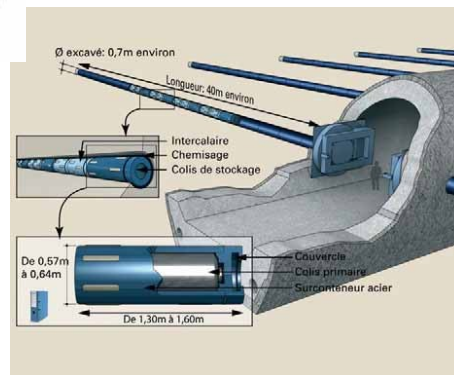
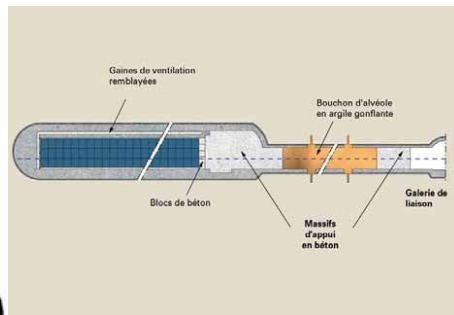
Les désastres nucléaires de Tchernobyl et Fukushima témoignent de la sécurité insuffisante de la technologie nucléaire actuelle : environ 430 réacteurs dans le monde majoritairement des REP (eau pressurisée, 155 bars)



Réacteur de type RBMK  
à eau bouillante,  
modéré au graphite

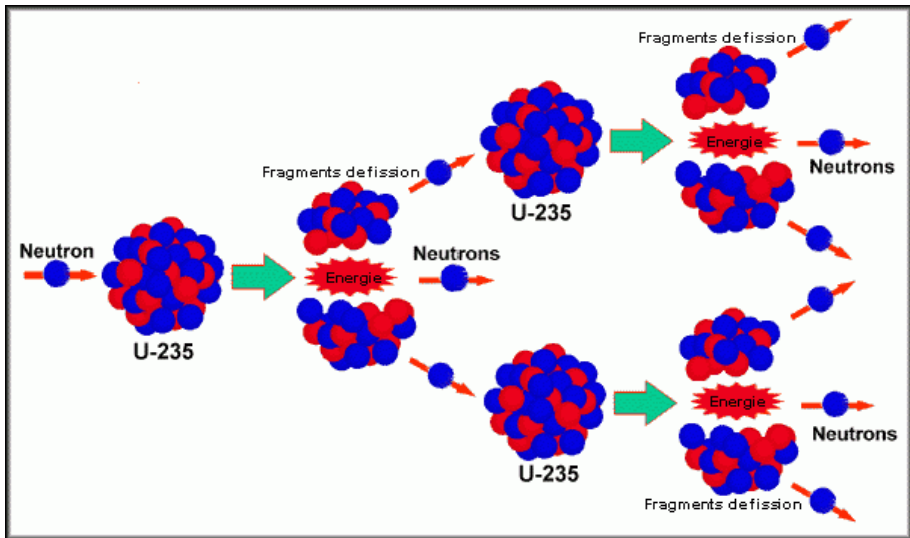
Réacteurs à eau bouillante

# Problème des déchets / stockage géologique



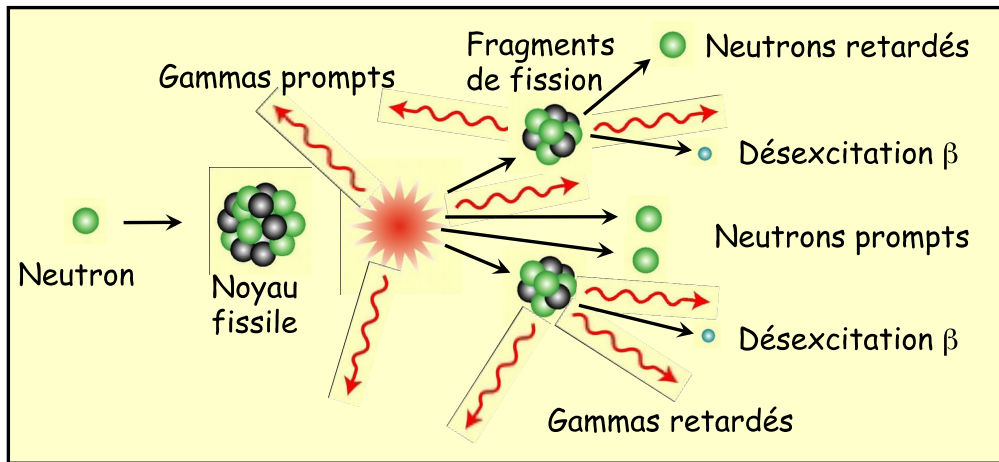
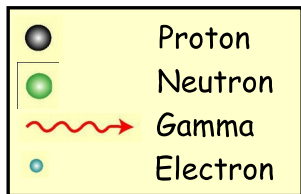


# Principe des réactions en chaîne



On dit que l'Uranium 235 est fissile : il peut alimenter directement une réaction en chaîne – utilisable pour un réacteur électrogène ... ou pour une arme nucléaire

# Une fission un peu plus réaliste...



# Réaction en chaîne : facteur de multiplication et réactivité

Facteur de multiplication  $k_{\text{eff}}$  défini comme :

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nb neutrons produits}}{\text{Nb neutrons absorbés}}$$

Si  $k_{\text{eff}} < 1$ , la réaction en chaîne ne s'entretient pas  
elle s'arrête après avoir produit  $1/(1-k)$  neutrons

Si  $k_{\text{eff}} > 1$ , la réaction diverge (principe des bombes à fission)

Si  $k_{\text{eff}} = 1$ , la réaction en chaîne s'entretient d'elle même  
Principe d'un réacteur CRITIQUE

Réactivité :

$$\square = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

## Risques spécifiques d'un réacteur nucléaire :

- Stock d'énergie concentrée dans le combustible
- Accumulation de produits radioactifs (danger + chaleur)
- Dégagement significatif d'énergie même après arrêt

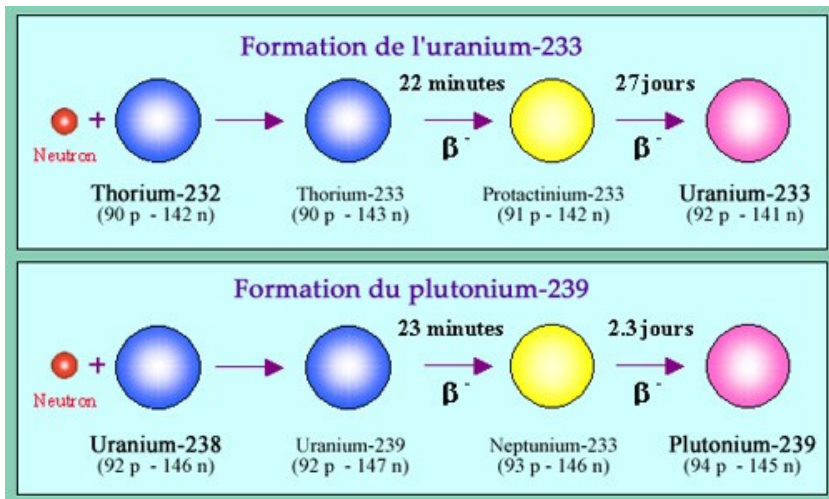
## Bases de la sûreté nucléaire = maîtriser le réacteur

- Confiner les produits radioactifs □ 3 barrières
- Maîtriser la réaction en chaîne en tout instant = piloter le réacteur
- Evacuer la puissance y compris après l'arrêt de la réaction en chaîne

Seuls trois éléments sont exploitables dans la nature pour la fission : U235, U238, Th232

U235 est directement *fissile* ... mais il est peu abondant, sa teneur dans l'uranium naturel n'est que 0,72 %, le reste (99,28 %) étant essentiellement de l'U238

U238 et Th232 sont seulement « *fertiles* »



U233

et

Pu239

eux, sont

fissiles

# Le rêve des physiciens nucléaires :

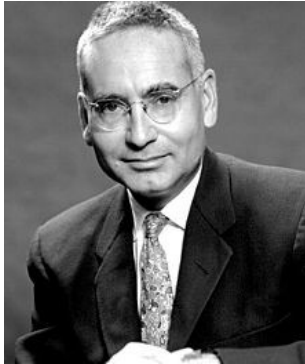
- un réacteur sûr, qui ne puisse en aucun cas connaître d'accident susceptible de disperser de la radioactivité, ceci quelles que soient les circonstances extérieures
- des ressources de combustible abondantes (des milliers d'années, ou plus !)
- une production de déchets très faible
- un réacteur non proliférant : la possibilité de le détourner pour produire des armes nucléaires doit être quasiment exclue

Ce sont les critères demandés pour les réacteurs dits de Génération IV (forum international années 2000)

Nous y ajouterons :

- des réacteurs fournissant une énergie compétitive avec les énergies « sales » comme le charbon, si possible même moins chère, de façon à pouvoir s'y substituer

La bonne nouvelle : un tel réacteur semble possible !



Un pionnier du  
nucléaire :  
Alvin Weinberg  
1915 – 2006  
Directeur ORNL  
Oak Ridge



Modérateur graphite  
du MSRE à Oak Ridge (1965)



# Forum International Génération 4

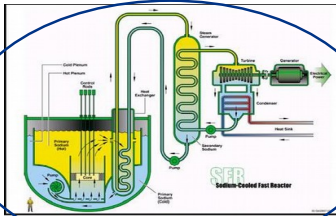
Forum international d'experts (GIF) créé en 2000 à l'initiative des USA pour définir les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération

Critères de sélection:

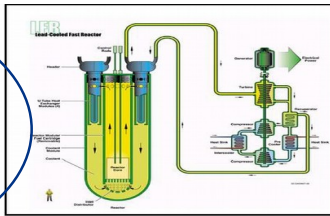
- Économiser les ressources naturelles
- Améliorer encore la sûreté
- Minimiser la production de déchets
- Réduire les risques de prolifération
- Réacteurs économiquement rentables



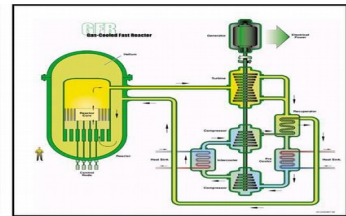
⇒ 6 concepts ont été retenus



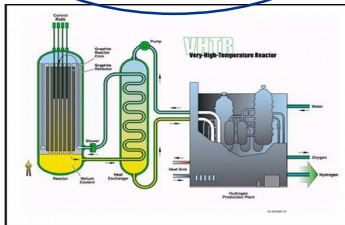
Réacteur rapide au Sodium



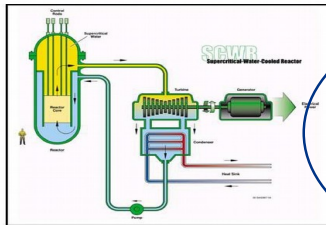
Réacteur rapide au Plomb



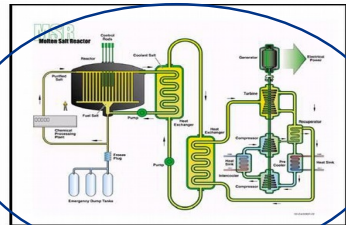
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température

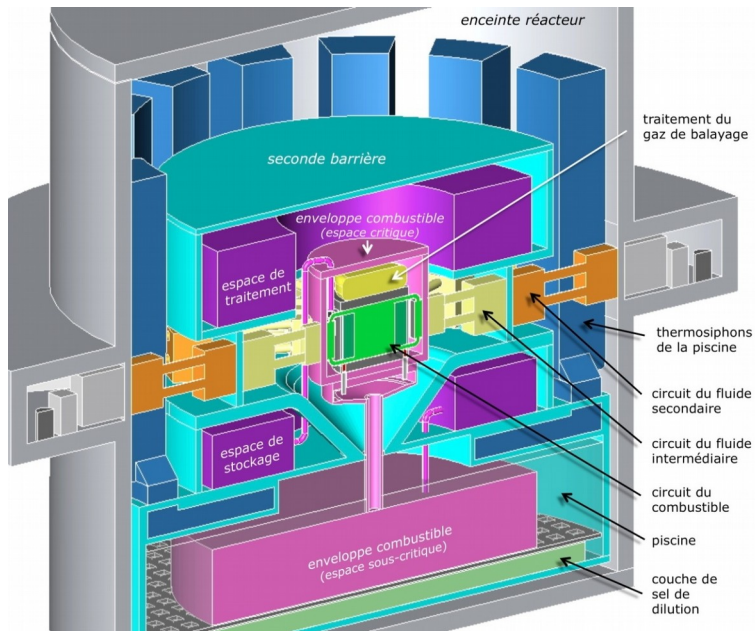


Réacteur à eau supercritique



Réacteur à sels fondus

# Réacteur à sels fondus en cycle thorium (Th232 – U233)



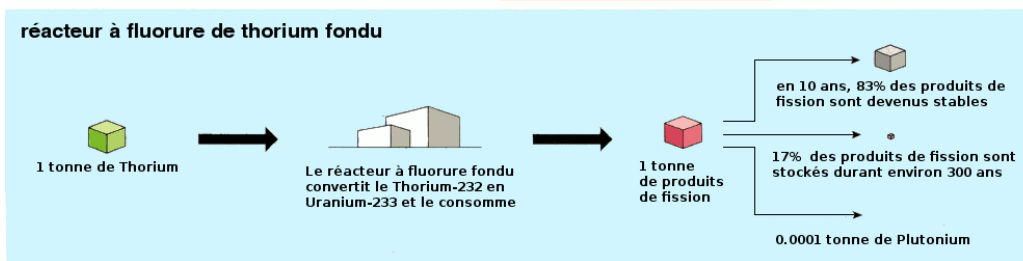
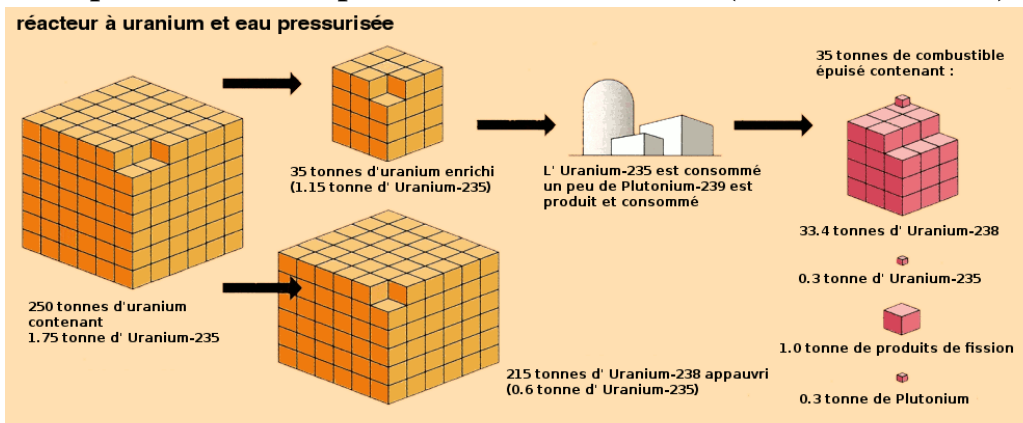
MSFR : design de réacteur à neutrons rapides proposé par le CNRS (LPSC Grenoble) au forum international Gen IV

# Principales caractéristiques :

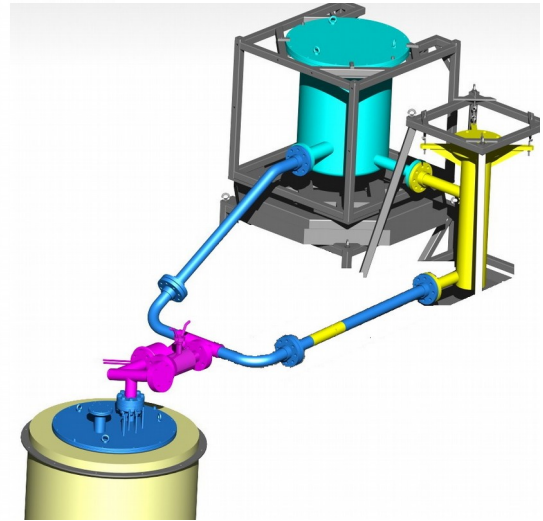
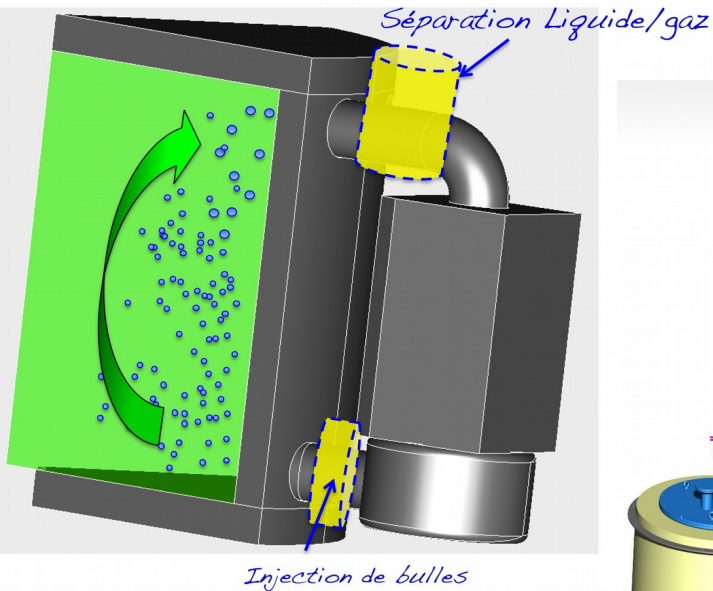
- Les sels fondus ( $\text{LiF}$  + fluorures d'éléments fissiles/fertiles U, Pu, Th, ...) servent aussi de fluide caloporteur : le circuit primaire ne contient pas d'eau et fonctionne donc à pression atmosphérique  
→ **sécurité très accrue**
- Les produits de fission sont retraités « en ligne » par des procédés physico-chimiques (bullage hélium...) à l'intérieur même du réacteur : celui-ci est donc en permanence beaucoup plus « propre » que les réacteurs actuels.
- Le combustible liquide étant homogène, celui-ci peut être utilisé en quasi-totalité (au delà de 99%), il n'y a plus de « pertes »

- Presque tous les produits de fission sont à durée de vie courte ou assez courte (moins de 30 ans) ; le réacteur ne produit **pratiquement plus de « transuraniens »**, déchets radioactifs à longue vie (de 1000 à 10000 fois moins!)
  - **le besoin de stockage géologique est extrêmement réduit**
- Le MSFR est capable d'incinérer en grande partie les transuraniens produits par les centrales nucléaires actuelles, donc de les valoriser tout en les éliminant !
- Le combustible irradié est impropre à la fabrication d'armements (présence d'U232 aboutissant à Tl208 → rayonnements gamma)
- Les coefficients de vide et de contre-réaction thermique sont négatifs : le réacteur est intrinsèquement stable
  - **un accident de criticité de type Tchernobyl est impossible**
- En cas d'arrêt du réacteur, une vidange par gravité des sels et un refroidissement thermique passif suffisent
  - **un accident de type Fukushima est impossible**

# Comparaison de la production de déchets (REP vs MSFR)



# Retraitement chimique en ligne et bullage



# RSF : résultats et travaux en cours

## Configuration MSFR de référence

Sel initial : 77,5%  ${}^7\text{LiF}$  + 22,5% (Th+fissile) $\text{F}_4$   
Température de fonctionnement : 625 à 775 °C  
Puissance : 3  $\text{GW}_{\text{th}}$  (1,4  $\text{GW}_{\text{él}}$ )

Inventaire initial d' ${}^{233}\text{U}$  par  $\text{GW}_{\text{él}}$  : 3600 kg  
Alimentation en Th par  $\text{GW}_{\text{él}}$  : 1100 kg par an

Diamètre intérieur du cœur : 2,26 m  
Hauteur du cœur : 2,26 m

Volume de sel combustible : 18  $\text{m}^3$

- 1/2 dans le cœur
- 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

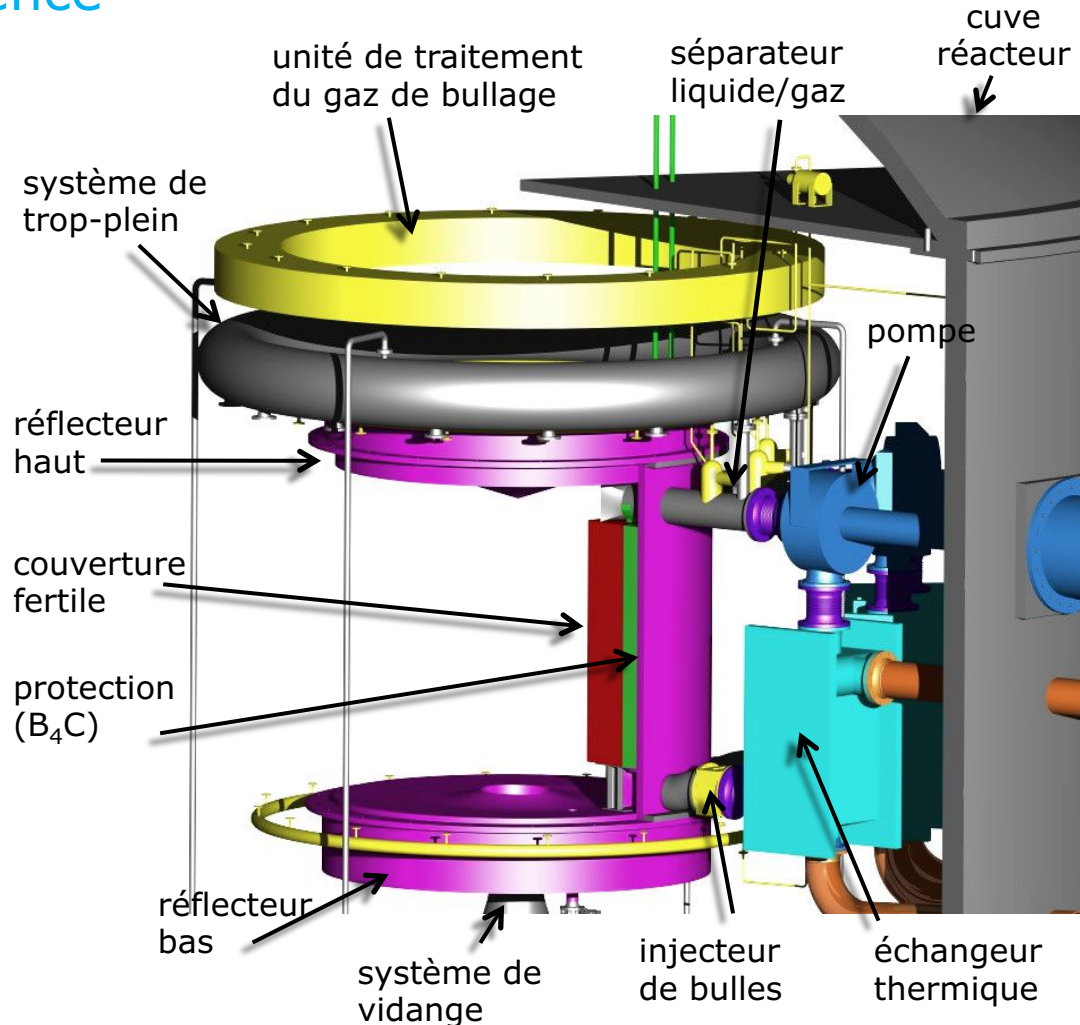
Puissance volumique : 330  $\text{W}/\text{cm}^3$

Coefficient de contre réaction: de  $\approx -5$  pcm/K

Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

Production d' ${}^{233}\text{U}$  : 52 à 90 kg/an

Temps de doublement : 98 à 56 ans



# Et le coût de ces réacteurs ?

Outre les caractéristiques techniques exceptionnelles qui précèdent, il faut observer que le thorium est abondant, et ne nécessite aucun enrichissement préalable.

De plus, le réacteur à sels fondus est de petite taille (18 m<sup>3</sup>), et n'a pas besoin de multiples enceintes de confinement. On peut même remplacer les lourdes machines à vapeur par des turbines à gaz fonctionnant à l'air atmosphérique (cycle Brayton)

Tous ces éléments laissent penser que le MSFR pourrait à terme devenir l'une des sources d'énergie les moins chères, sinon la moins chère (le physicien américain Robert Hargraves estime qu'à terme son coût pourrait être de 60 % de celui induit par les combustibles fossiles)



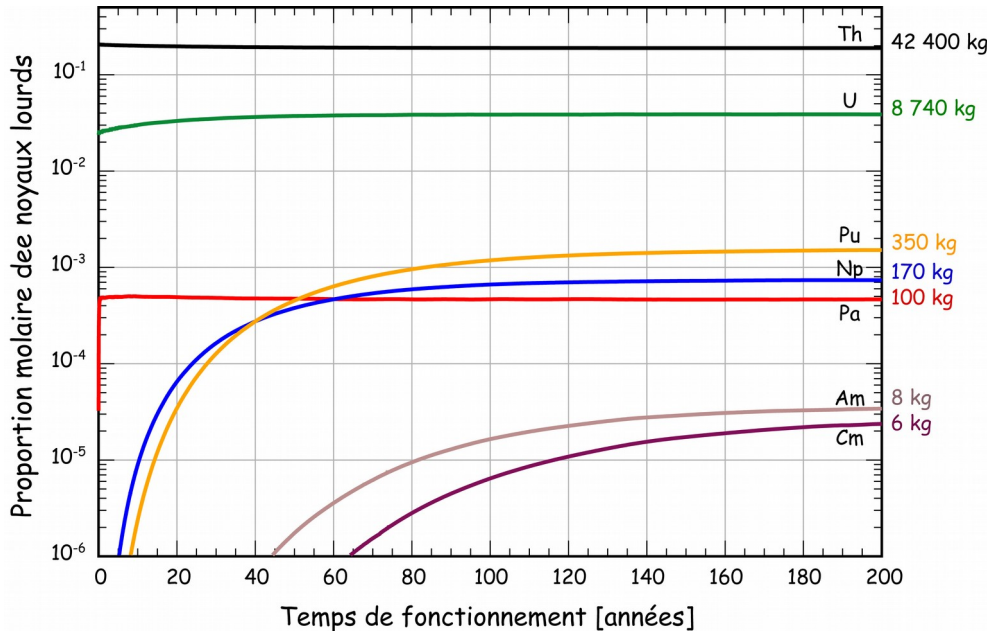
# Challenges techniques

Les besoins de R & D couvrent un vaste domaine à l'interface entre la physique, la chimie, l'informatique et les mathématiques

- Il faut extrapoler à des réacteurs de taille industrielle les résultats expérimentaux américains des années 1960 :
- modélisations numériques
- optimisations géométriques
- couplages thermique – neutronique (EDP)
- résistance des matériaux
- chimie des sels fondus et de nombreux composés

Depuis janvier 2011, la Chine a créé à Shanghai un Institut de Physique dédié à la technologie des réacteurs à sels fondus, avec un budget de quelques centaines de millions de Dollars. L'Europe doit faire de même !

# Résultats de simulations numériques pour le cycle Th-U : évolution dans le temps des transuriniens (E. Merle-Lucotte)



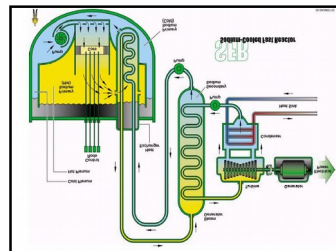
# Réacteurs de 4<sup>ème</sup> Génération : RNR-Na ou MSFR

C'est le concept qui a le plus de retour d'expérience

En France: Rapsodie, Phénix et Superphénix

Mais aussi en Russie, Japon, USA, Allemagne et Royaume Uni

- Un seul est encore en service (BN600 Russe de Beloyraski)  
Fonctionne à l'uranium enrichi en moyenne à 20%
- Un est à l'arrêt (Chine) et un en arrêt prolongé (Monju280, Japon)
- 2 sont en construction (PFBR500 Inde, BN800 Russie)



Ce type de réacteur pose quelques gros problèmes technologiques

- Le sodium s'enflamme au contact de l'air ou de l'eau  
Incendies sodium maîtrisables (sans eau !) mais très violents
- Le coefficient de vide d'un réacteur de puissance est positif ce qui peut entraîner un accident de réactivité
  - Pour résoudre ce problème, le cœur doit permettre la fuite des neutrons  
Géométrie complexe et nécessité d'un inventaire fissile très important
- Régénération obtenue grâce à une couverture fertile très proliférante ( $^{239}\text{Pu}$  pur) en cycle U-Pu

# Références

Global Footprint Network,

[http://www.footprintnetwork.org/fr/index.php/GFN/page/earth\\_overshoot\\_day/](http://www.footprintnetwork.org/fr/index.php/GFN/page/earth_overshoot_day/)

David McKay, *Sustainable Energy – without the hot air*,

<http://www.withouthotair.com/>

Daniel Heuer, *Le thorium et le nucléaire du futur*,

<https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

LPSC/CNRS/IN2P3, *Étude paramétrique des RSF et cycle thorium*, <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/msfr.htm>

Robert Hargraves - *Thorium Energy Cheaper than Coal* @

ThEC12, <https://www.youtube.com/watch?v=ayIyiVua8cY>

John Laurie, <http://www.energiesduthorium.fr>, La fission liquide et le thorium pour un climat stable et une prospérité énergétique

John Laurie, « *La voiture nucléaire* »,

[https://www.youtube.com/watch?v=bkj-vf1\\_pzQ](https://www.youtube.com/watch?v=bkj-vf1_pzQ)