



# Energie Nucléaire

Principes, Applications & Enjeux

6<sup>ème</sup> - 2014/2015

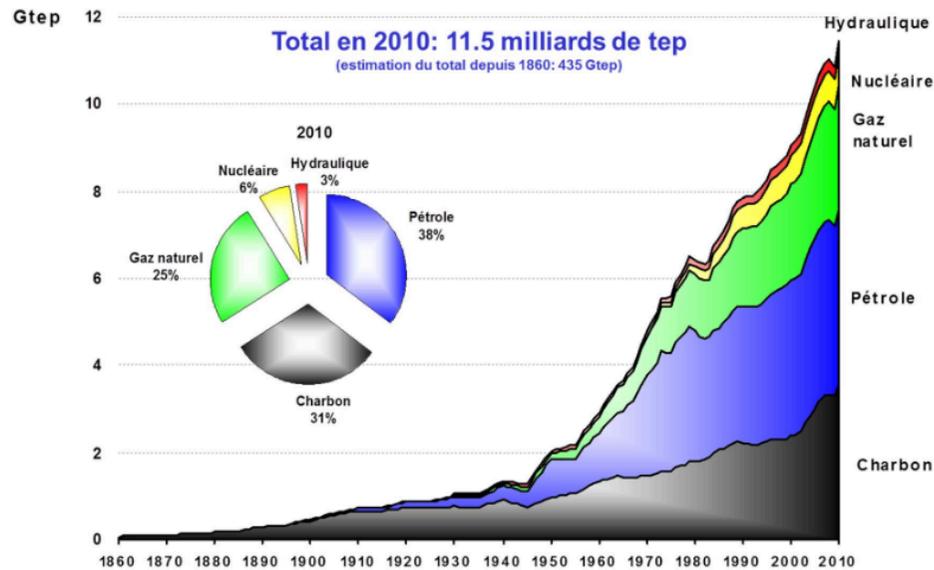
# Quelques constats

- Le **belge** consomme **3 fois plus d'énergie** que le terrien moyen; (0,56% de la consommation mondiale pour 0,17% de la population)
- 86% de la population mondiale consomme plus de ressources que la Terre ne peut produire et/ou renouveler;
- Nous vivons à « crédit » dès le mois d'août, 2 Terre(s) seront bientôt nécessaires pour couvrir notre demande en ressources et en énergie;
- **Comment soutenir notre demande en énergie, en ressources et donc nos modes de Vie?**

# Evolution de la consommation mondiale

## Consommation mondiale d'énergie primaire 2010 par source

(\*) énergies commerciales uniquement: hors bois, déchets, énergies solaire et éolienne, géothermie...  
 nucléaire = chaleur nucléaire = production électrique d'origine nucléaire / 33 %  
 hydraulique = production d'électricité hydraulique



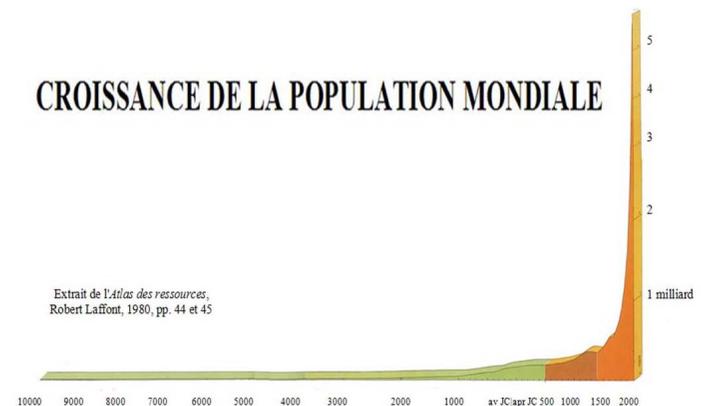
Source BP Statistical Review of World Energy June 2011, AIE  
 (\*) énergies commerciales uniquement: hors bois, déchets, énergies solaire et éolienne, géothermie...  
 nucléaire = chaleur nucléaire = production électrique d'origine nucléaire / 33%  
 hydraulique = production d'électricité hydraulique

5

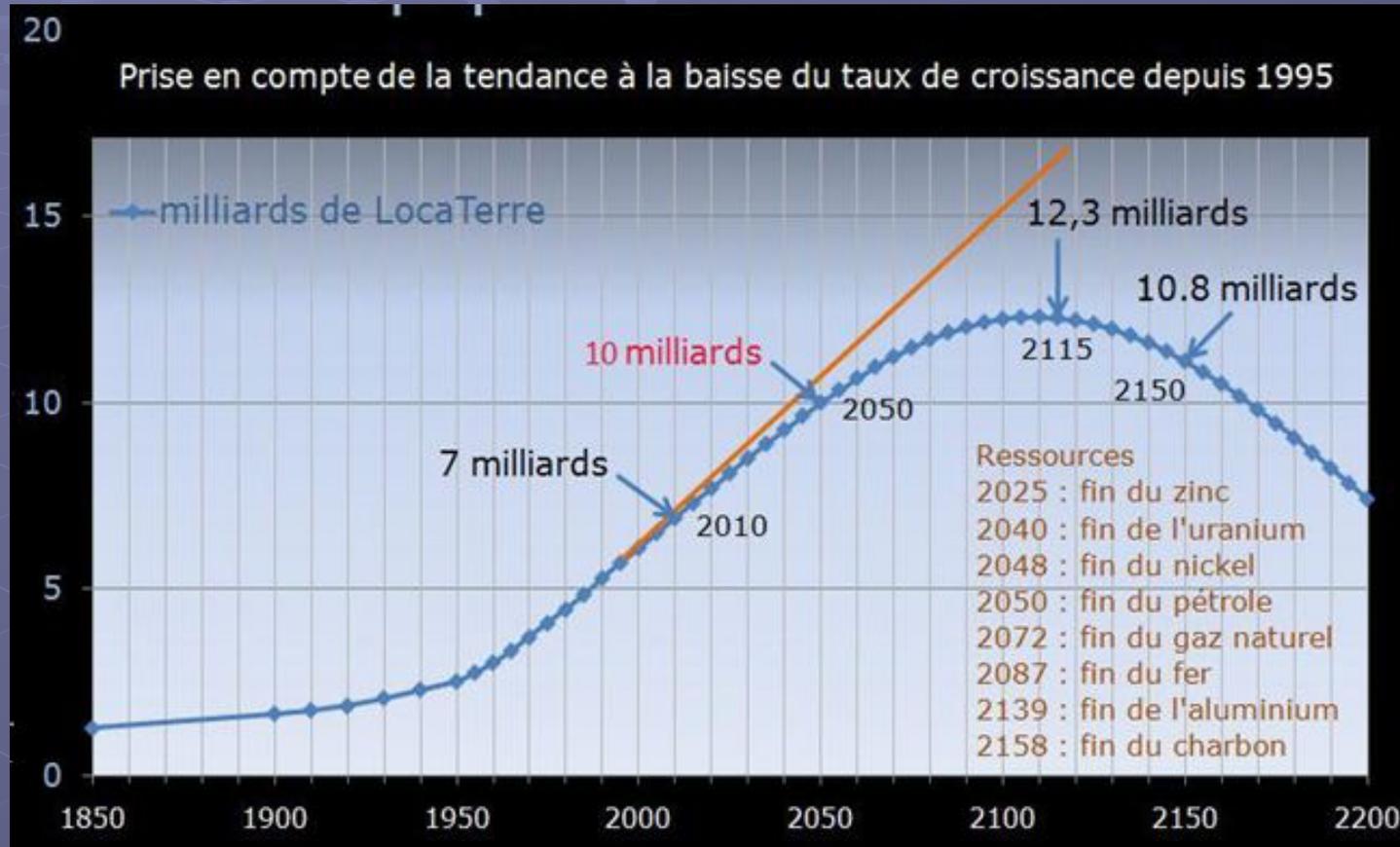
Graphe ICEDD - Source BP Statistical Review of World Energy June 2011, AIE

## CROISSANCE DE LA POPULATION MONDIALE

Extrait de l'Atlas des ressources,  
 Robert Laffont, 1980, pp. 44 et 45



# Population mondiale (parenthèse)



# Répartition inégale

## DEMANDE D'ENERGIE PAR HABITANT EN 2010 en tep/habitant

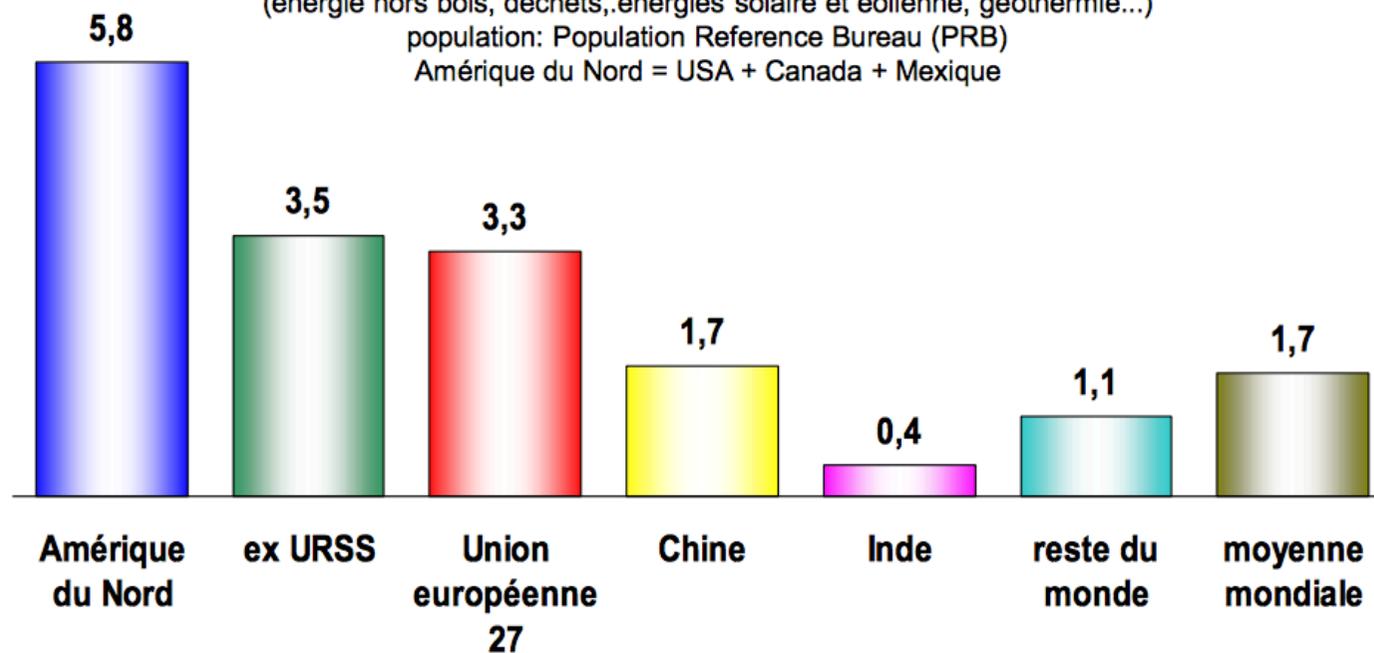
Sources

énergie: BP Statistical Review of World Energy June 2011

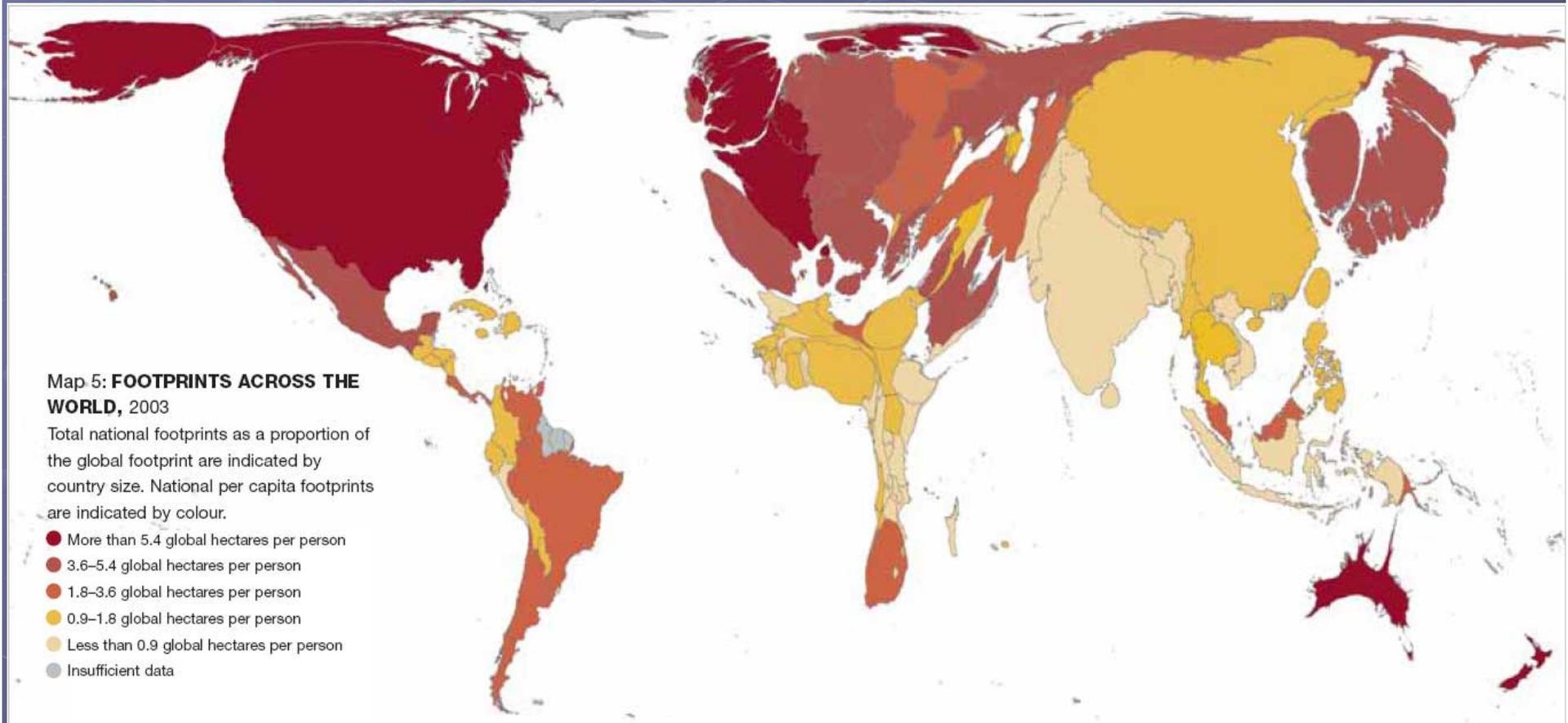
(énergie hors bois, déchets, énergies solaire et éolienne, géothermie...)

population: Population Reference Bureau (PRB)

Amérique du Nord = USA + Canada + Mexique

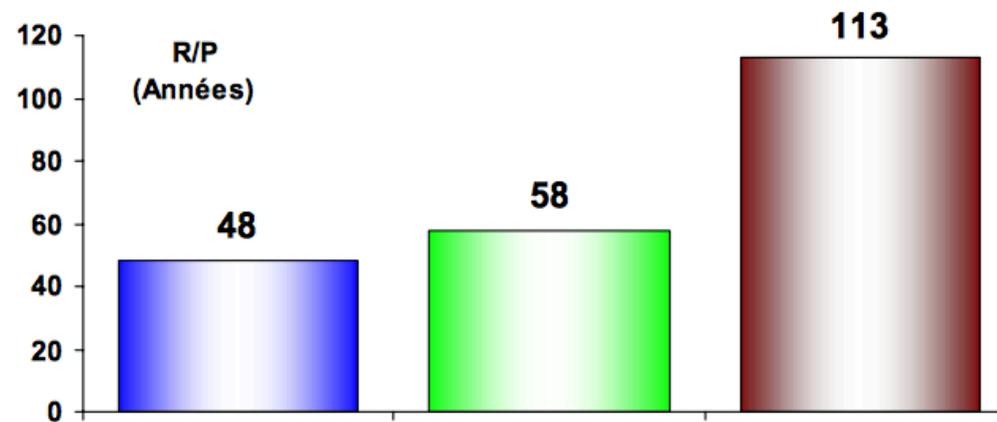


# Empreinte Ecologique



# Consommation & Réserves

## RESERVE ET PRODUCTION D'ENERGIES FOSSILES DANS LE MONDE EN 2010



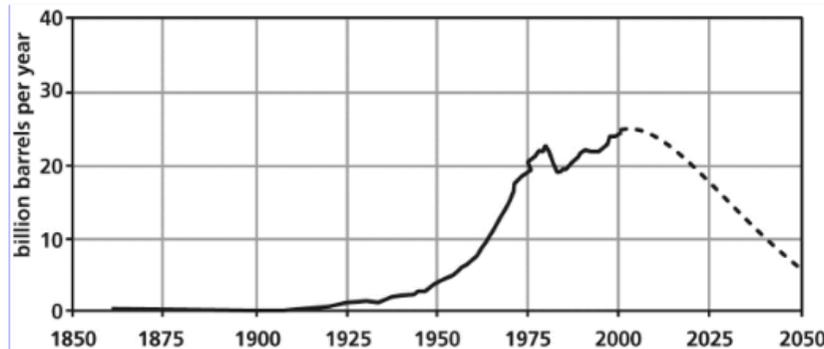
en 2010	Pétrole	Gaz naturel	Charbon
Réserves	189 Gtep	168 Gtep	422 Gtep
Production	3.9 Gtep	2.9 Gtep	3.7 Gtep

### Remarques :

- Production actuelle (2010) et réserves estimées par l'industrie pétrolière
- Cela fait 40 ans qu'on a une perspective de 40 ans de réserves
- Les réserves sont une partie de la ressource (celle connue et accessible à un prix défini)

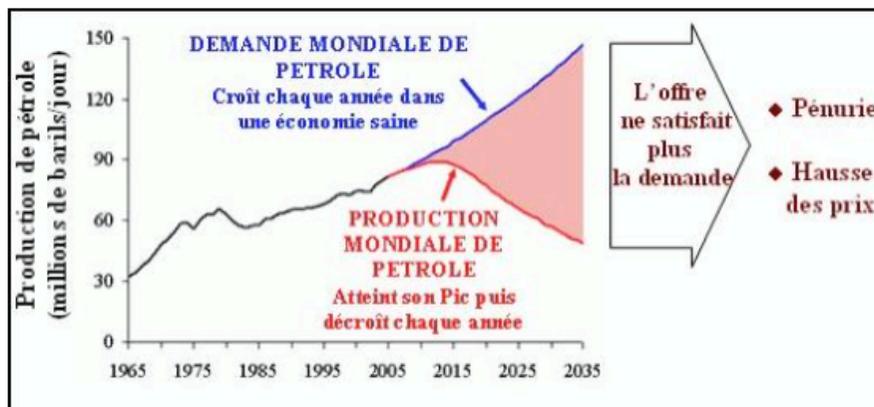
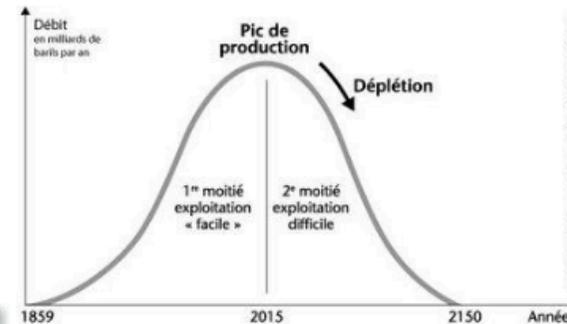
# Pic pétrolier

## Le pic du pétrole



<http://www.aspo.be>

Production actuelle :  
90 millions de barils/j  
1 baril = 159 litres de pétrole brut

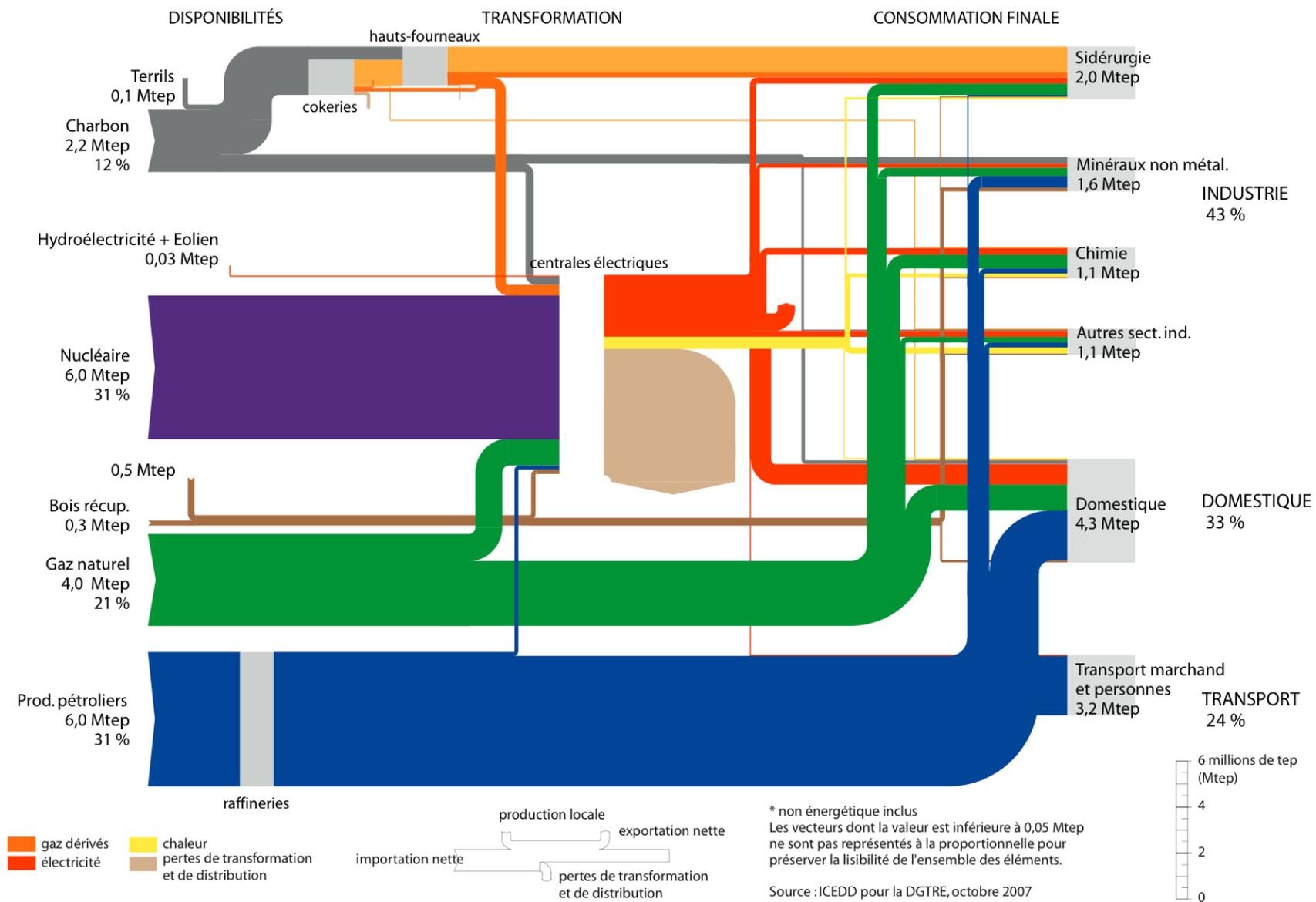


# Enjeux énergétiques

	<b>Impacts sur l'environnement</b>	<b>Ressources disponibles</b>	<b>Risques géopolitiques</b>	<b>Energie par unité de surface</b>
<b>Pétrole</b>	Défavorable	Très défavorable	Très défavorable	Favorable
<b>Gaz naturel</b>	Défavorable	Défavorable	Défavorable	Favorable
<b>Charbon</b>	Très défavorable	Favorable	Favorable	Favorable
<b>Uranium</b>	De faible à catastrophique	Défavorable	Favorable	Très favorable
<b>Renouvelable</b>	Favorable	Favorable	Très favorable	Défavorable
<b>Négawattheure</b>	Très favorable	Très favorable	Très favorable	Sans objet

Tableau 1: Essai de comparaison des différentes sources d'énergie

## RÉGION WALLONNE : FLUX ÉNERGÉTIQUES 2005



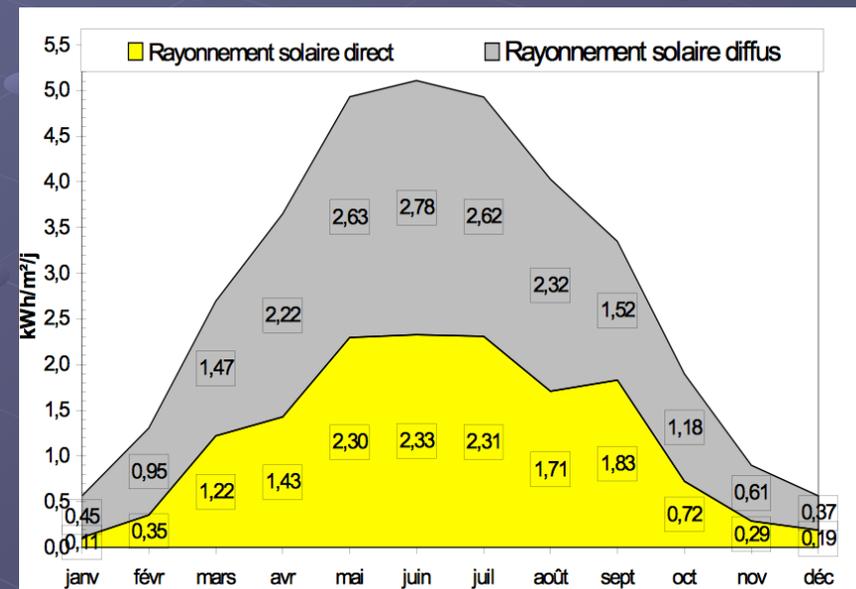
# Sources d'énergies

- **Energies fossiles;** (chimie – combustion)
- **Energie nucléaire;** (physique – atomes)
- **Energies renouvelables:**
  - Eolien
  - Solaire photovoltaïque ou thermique
  - Géothermique
  - Hydraulique (marées, barrages...)
  - Biomasses (métabolisations, combustions...)

# Energies renouvelables

- Puissances disponibles limitées;
- Intermittences potentielles dans l'approvisionnement;
- Disponibilité géographique aléatoire;

Peut-on se passer du **nucléaire** tout en garantissant nos modes de consommation et de vie?



# Comparaison

	<b>Puissance unitaire (MW)</b>	<b>Durée fonctionnement annuel (heures)</b>	<b>Production électrique annuelle (GWh)</b>
<b>Centrale nucléaire</b>	1000	8000	8000
<b>Centrale thermique (TGV,...)</b>	400	6000	2400
<b>Eolienne onshore</b>	2	2000	4

Tableau 2: Ordre de grandeur des puissances, des durées de fonctionnement<sup>18</sup> et des productions électriques de trois types de centrales

Il faut 2000 éoliennes pour remplacer la production annuelle d'un réacteur nucléaire...

# Energie fossile & Nucléaire

- Pétroles, gaz et charbons

Substances carbonées + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + Energie

Réaction chimique exothermique – quelques centaines de kCal

- Energie nucléaire

- Fission

Atomes lourds instables → Atomes légers + Energie

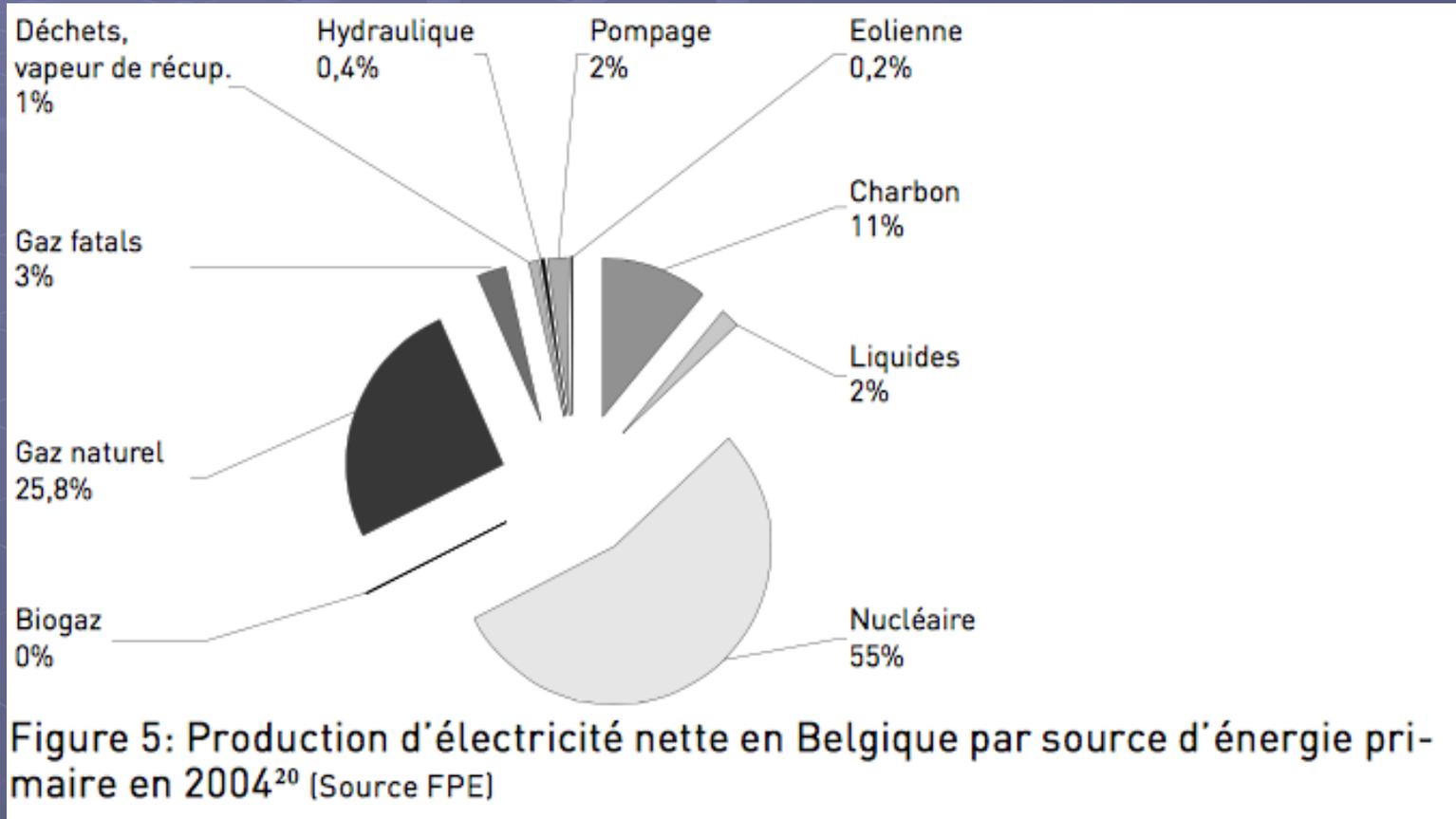
Réaction nucléaire exothermique – quelques milliards de kCal

- Fusion (en développement)

Atomes légers → Atomes lourds + Energie

Réaction nucléaire exothermique – quelques millions de milliards de kCal

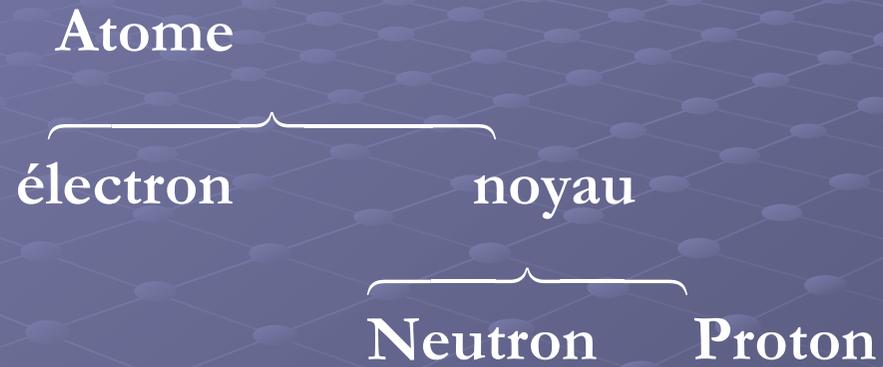
# Importance du nucléaire en Belgique



# Physique vs Chimie

Chimie	Physique
<ul style="list-style-type: none"><li>• De grandes quantités de matière (moles, kilogrammes, tonnes...)</li><li>• Pas de transformations des atomes, <b>Principe de Lavoisier</b>.</li><li>• Quelques milliers de kJ/mol de combustibles. L'énergie libérée se trouve en fait dans les liaisons chimiques entre les atomes des molécules. Quelques dizaines d'eV</li><li>• Gaz à effet de serre produits.</li><li>• Dépendance énergétique importante.</li><li>• <b>Réaction CHIMIQUE</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• De « petites » quantités de matière utilisées.</li><li>• Disparition d'une partie de la matière, transmutation de certains atomes.</li><li>• Phénomènes énergétiques pouvant être très violents. Quelques milliers de MeV ou GeV.</li><li>• PAS de gaz à effet de serre. Déchets nucléaires produits et gestion sécuritaire des sites.</li><li>• Dépendance énergétique plus faible.</li><li>• <b>TRANSMUTATION NUCLEOSYNTHESE</b></li></ul>

# Rappels - Atome

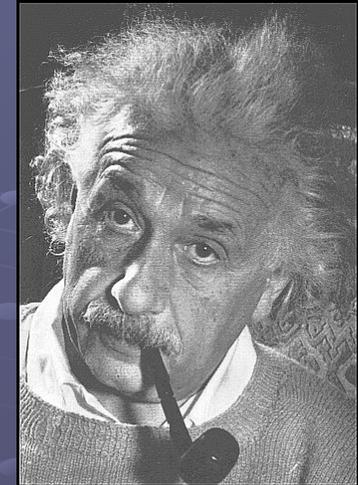


# Isotopes

- Chimie : **sans conséquences** particulières sur la réactivité chimique
- Physique : Certains isotopes sont **instables**; masses différentes ( $n^\circ$ )
- Les **pourcentages isotopiques** sont constants les uns par rapport aux autres et varient tous dans le temps.

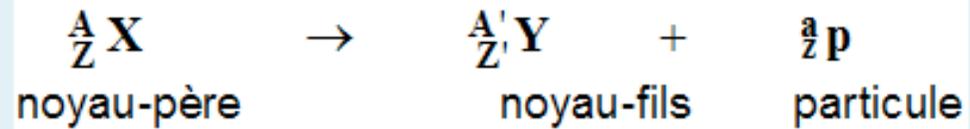
# Principes fondamentaux

- Equivalence Masse – Energie
  - Albert Einstein
  - $E = m c^2$
- Conservation de la charge
- Conservation du nombre de nucléons (à relativiser)
- Conservation de l'énergie totale
- Conservation de la quantité de mouvement



# Conservations

- Toutes les réactions nucléaires vérifient les lois de conservation suivantes :



- Lois de Soddy :
- Conservation du nombre de masse :  $A = A' + a$
- Conservation de la charge :  $Z = Z' + z$

# Exemples



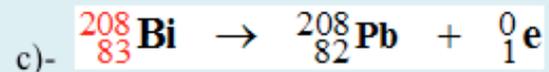
-  $107 = A$  et  $46 = Z + (-1)$

-  $A = 107$  et  $Z = 47$



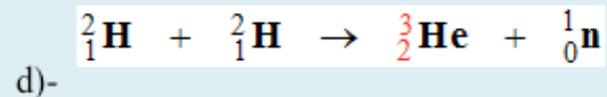
-  $218 = A + 4$  et  $84 = Z + 2$

-  $A = 214$  et  $Z = 82$



-  $A = 208 + 0$  et  $Z = 82 + 1$

-  $A = 208$  et  $Z = 83$



-  $2 + 2 = A + 1$  et  $1 + 1 = Z + 0$

-  $A = 3$  et  $Z = 2$

# Les grandeurs liées à l'atome

## ● Taille

- $10^{-15}$  m (noyau)
- $10^{-10}$  m (atome)

## ● Temps

- Phénomènes rapides ( $10^{-20}$  s)

## ● Masse et Energie

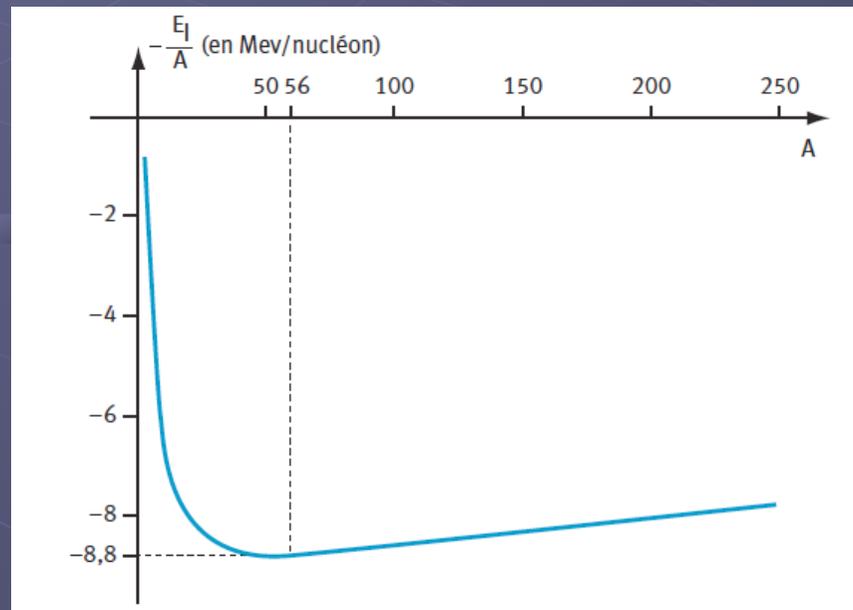
# Stabilité des atomes

- Une tendance marquée
- Une instabilité de certains isotopes lourds
  - Proportion de neutrons/protons  $(Z-A)/A$
  - Rapport  $E_I/A$

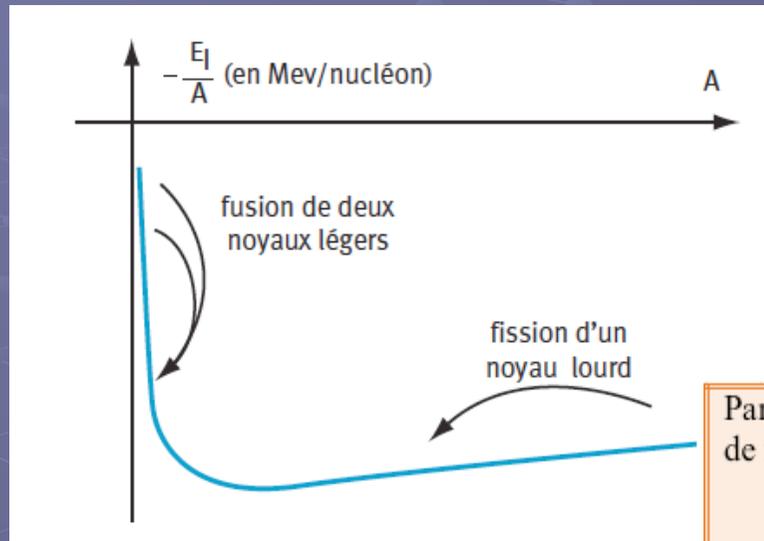
$E_I$  est une mesure de l'énergie de liaison entre particules

2 phénomènes

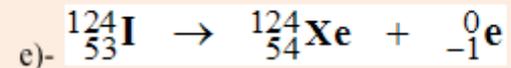
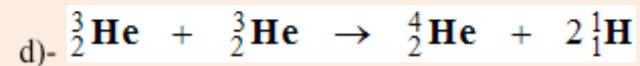
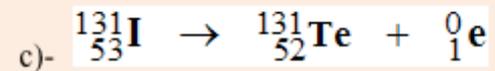
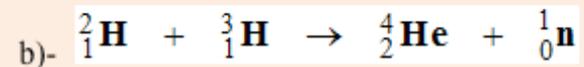
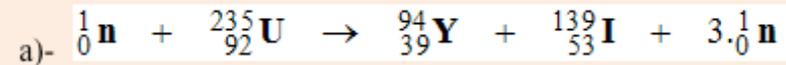
**FISSION**  
**FUSION**



# Fissions et Fusions



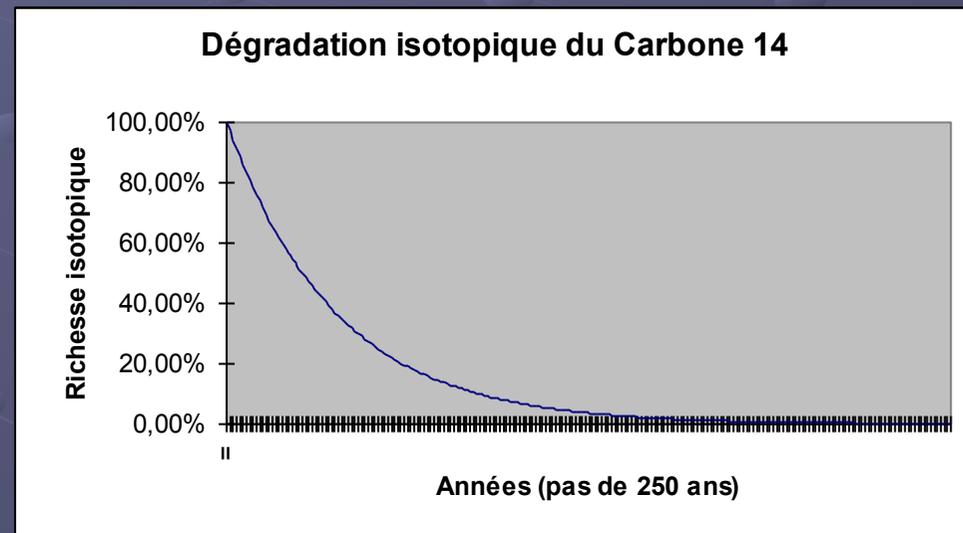
Parmi les réactions nucléaires suivantes, repérer les équations des réactions de fission et de fusion :



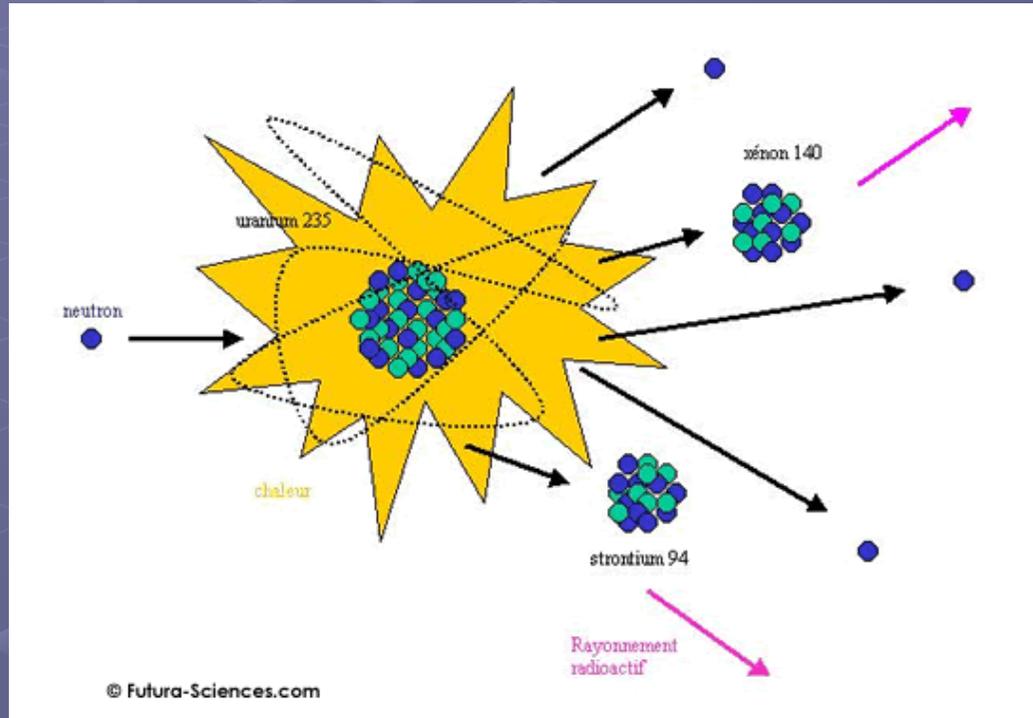
# Radioactivité

- Emission  $\gamma$  - OEM
- Stabilisation de l'atome
- Très énergétique :  $E = h.f$  et  $f \nearrow$
- Phénomène naturel - Oklo

$$N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$$



# Fission nucléaire



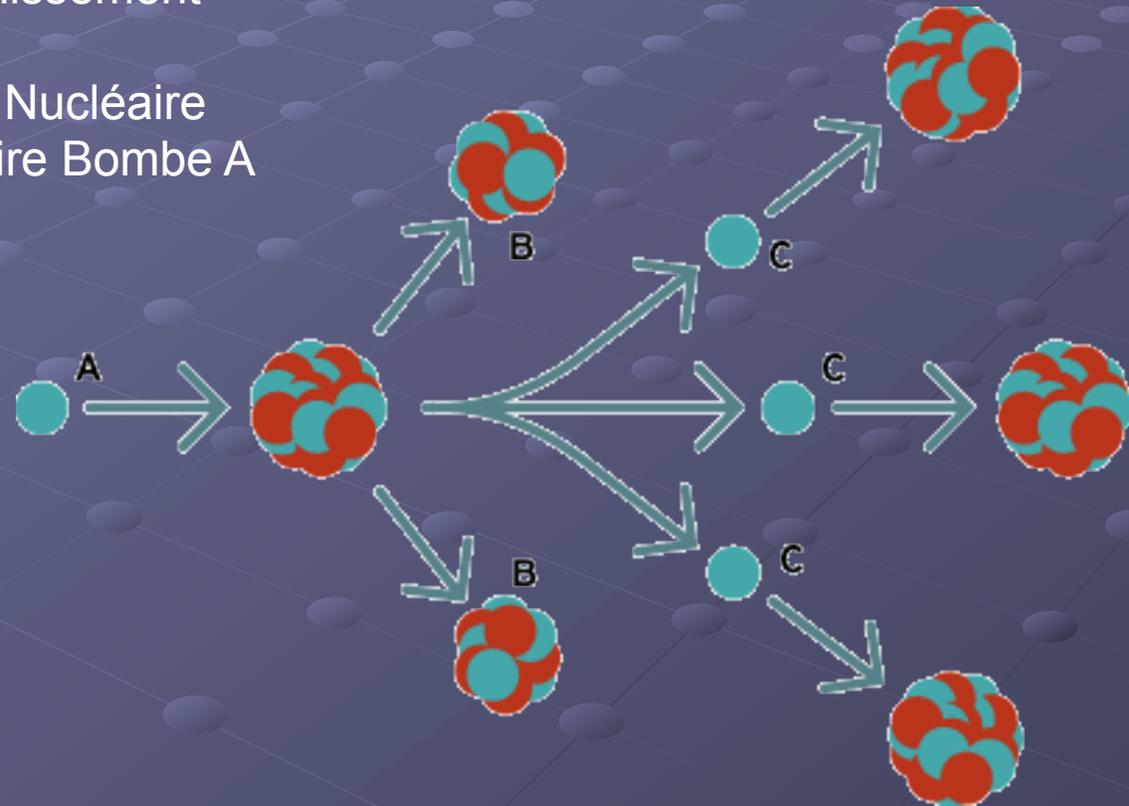
# Réaction en chaîne

## ● Contrôlée ou non

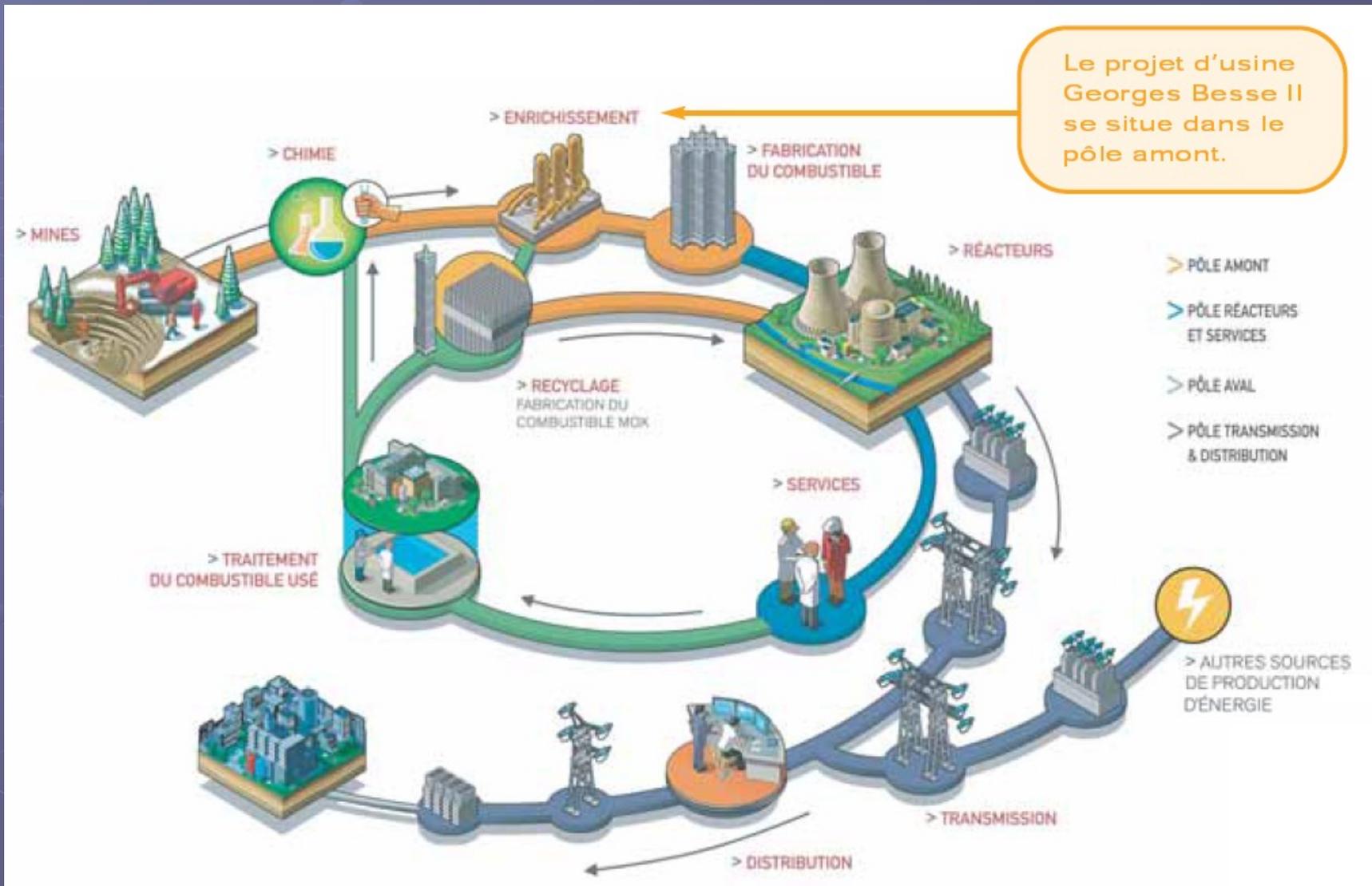
C'est une question d'enrichissement

Si environ 15 % - Centrale Nucléaire

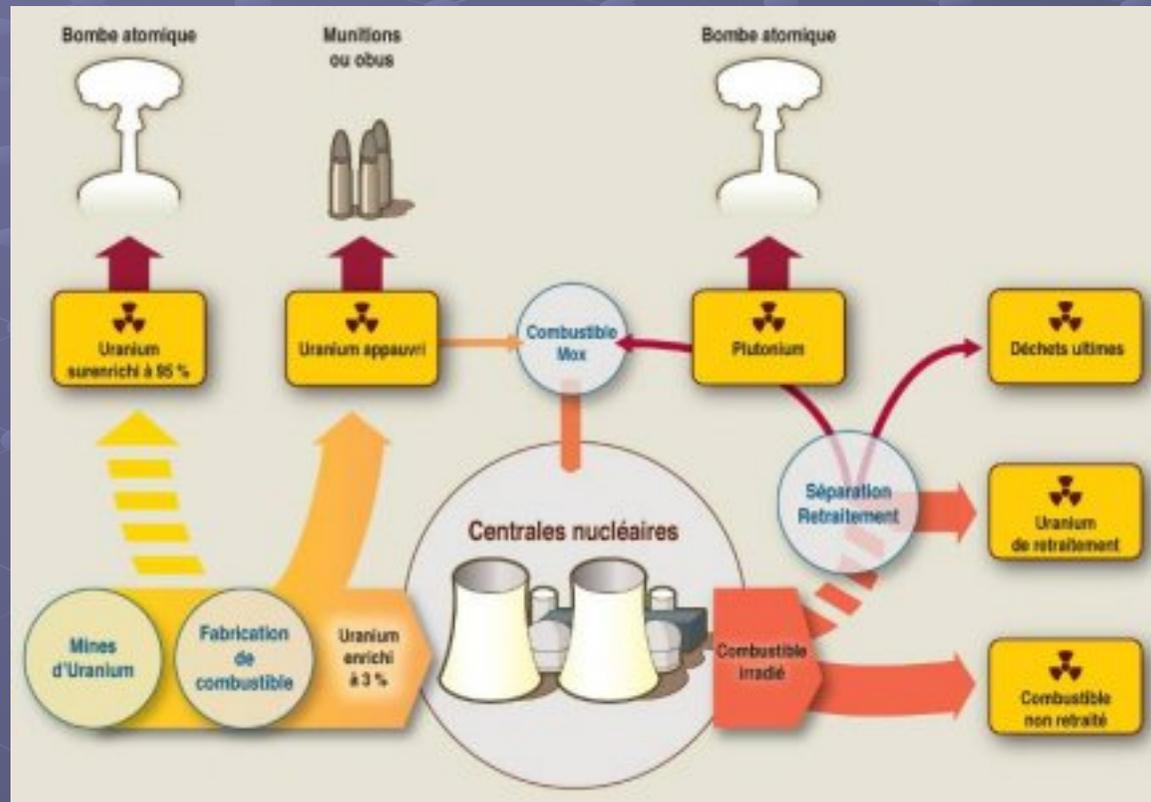
Si >80 % - Nucléaire militaire Bombe A



# Enrichissement nécessaire

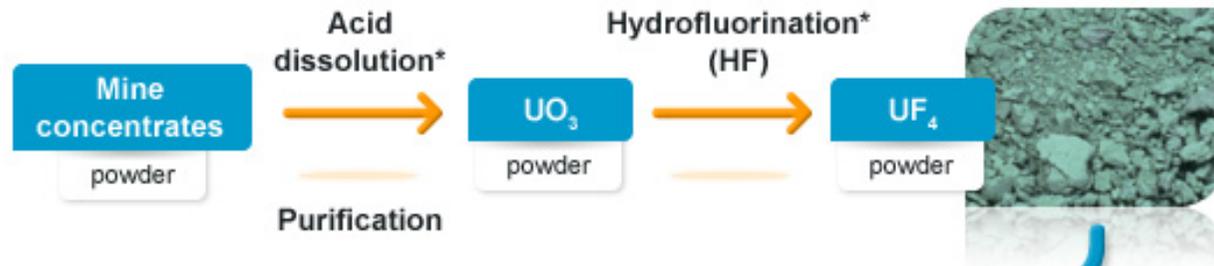


# Cycle de vie et Applications

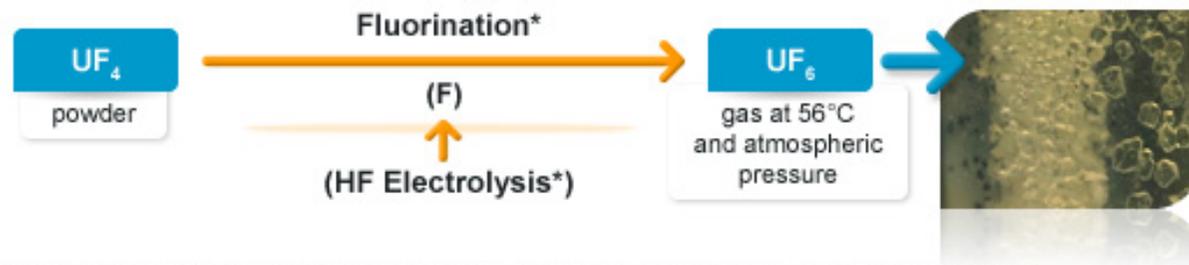


# Extraction minière et traitements chimiques

## Malvésí



## Pierrelatte



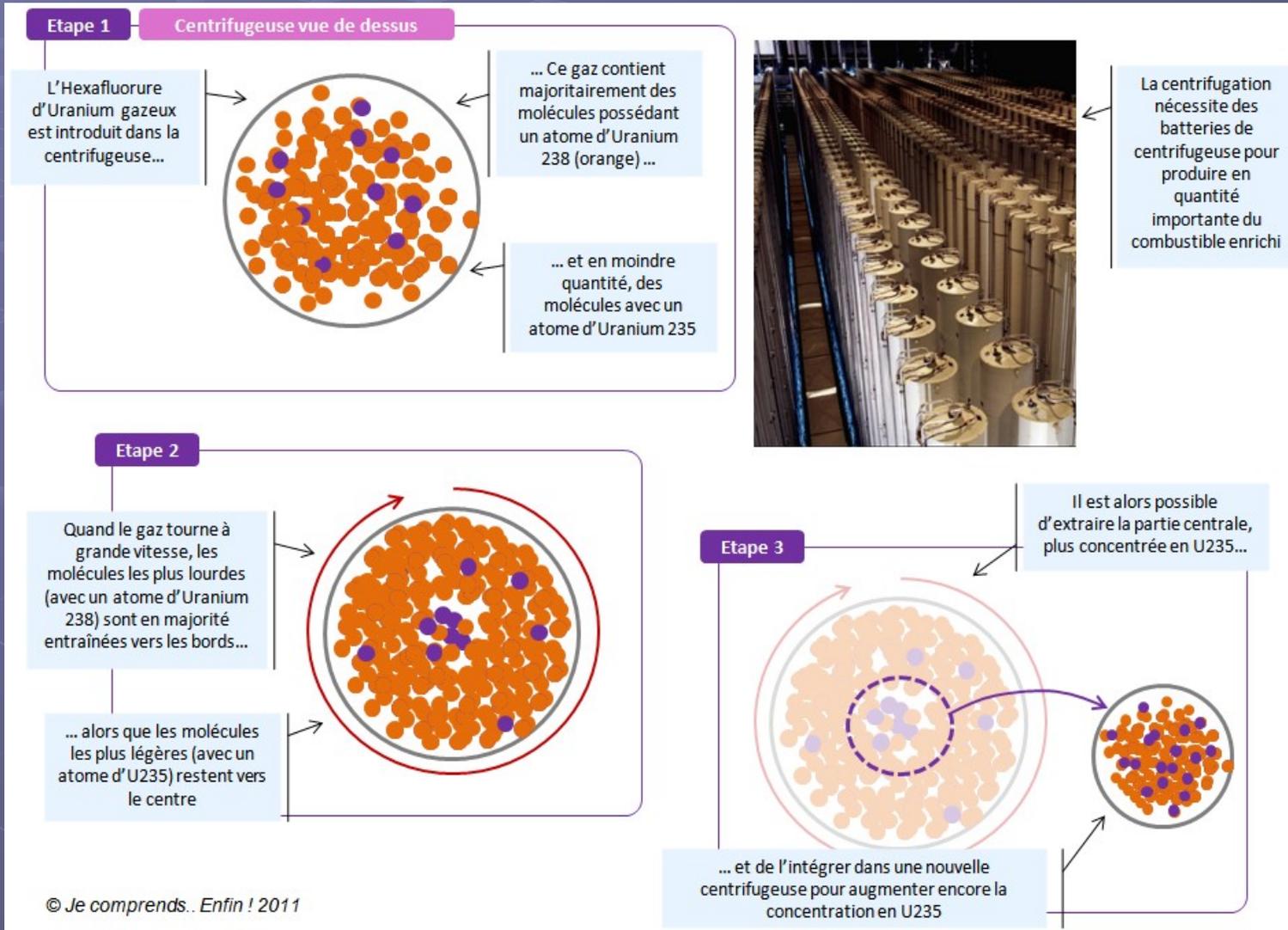
\* Purely chemical operations (no change to the uranium's isotopic composition).

# Obtention du Yellow cake



© La médiathèque EDF / Patrick Landmann

# Enrichissement - Centrifugation



# Centrifugation II

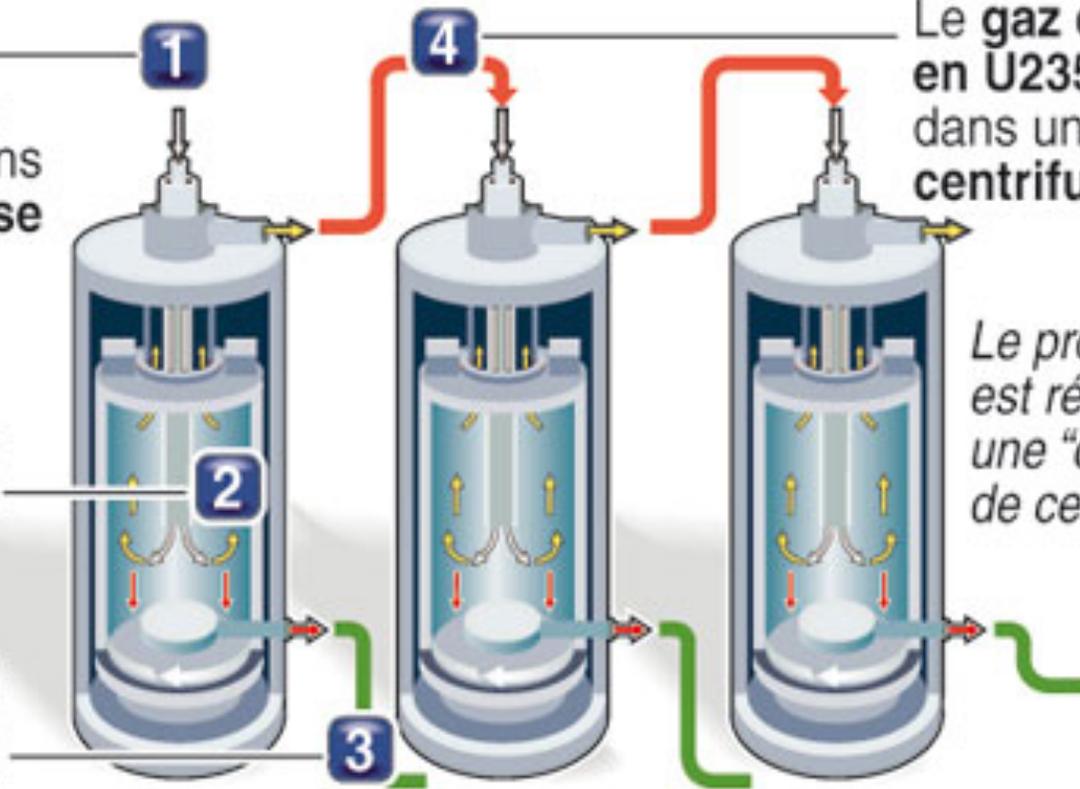
et à 0,7% d'**U235** (le seul permettant de produire de l'énergie nucléaire)

d'uranium 235 en le séparant de l'**U238** dans une **centrifugeuse**

L'uranium à l'état **gazeux** est introduit dans la **centrifugeuse**

L'**U235**, plus léger, remonte

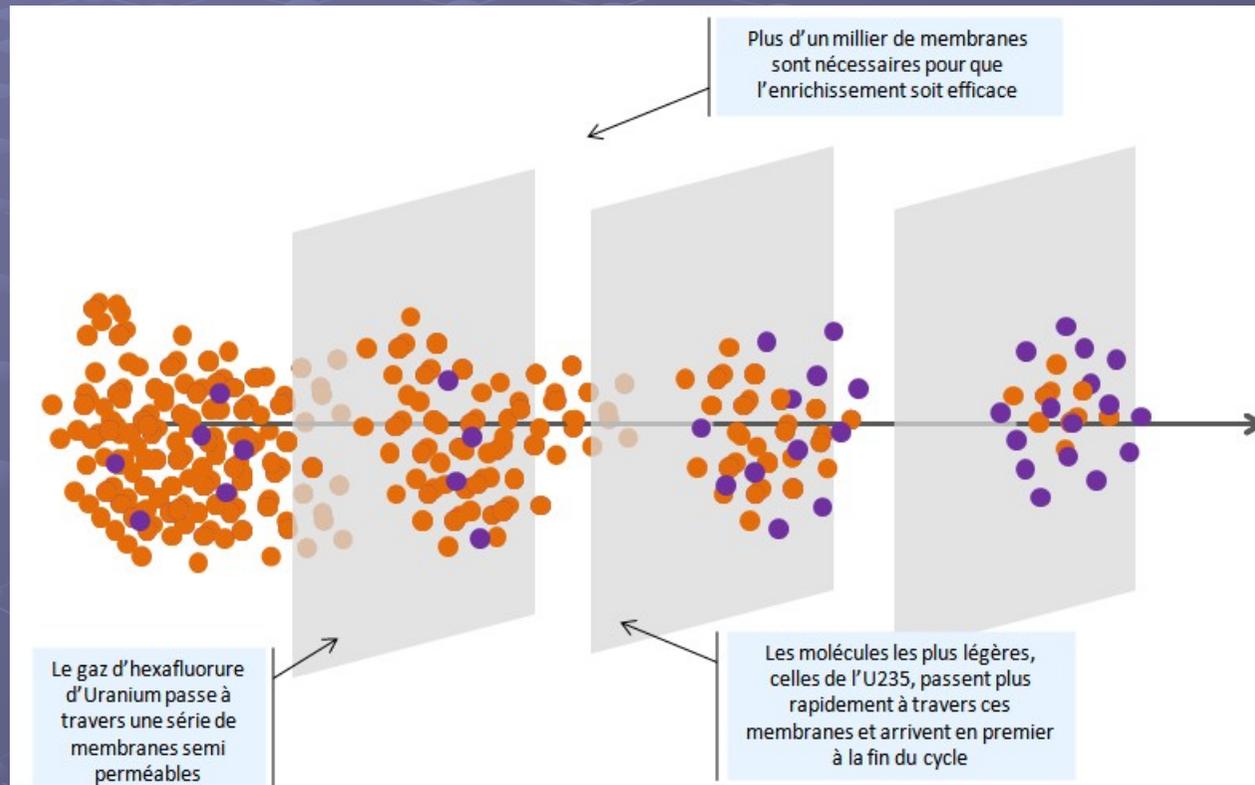
L' **U238**, plus lourd, descend et est enlevé



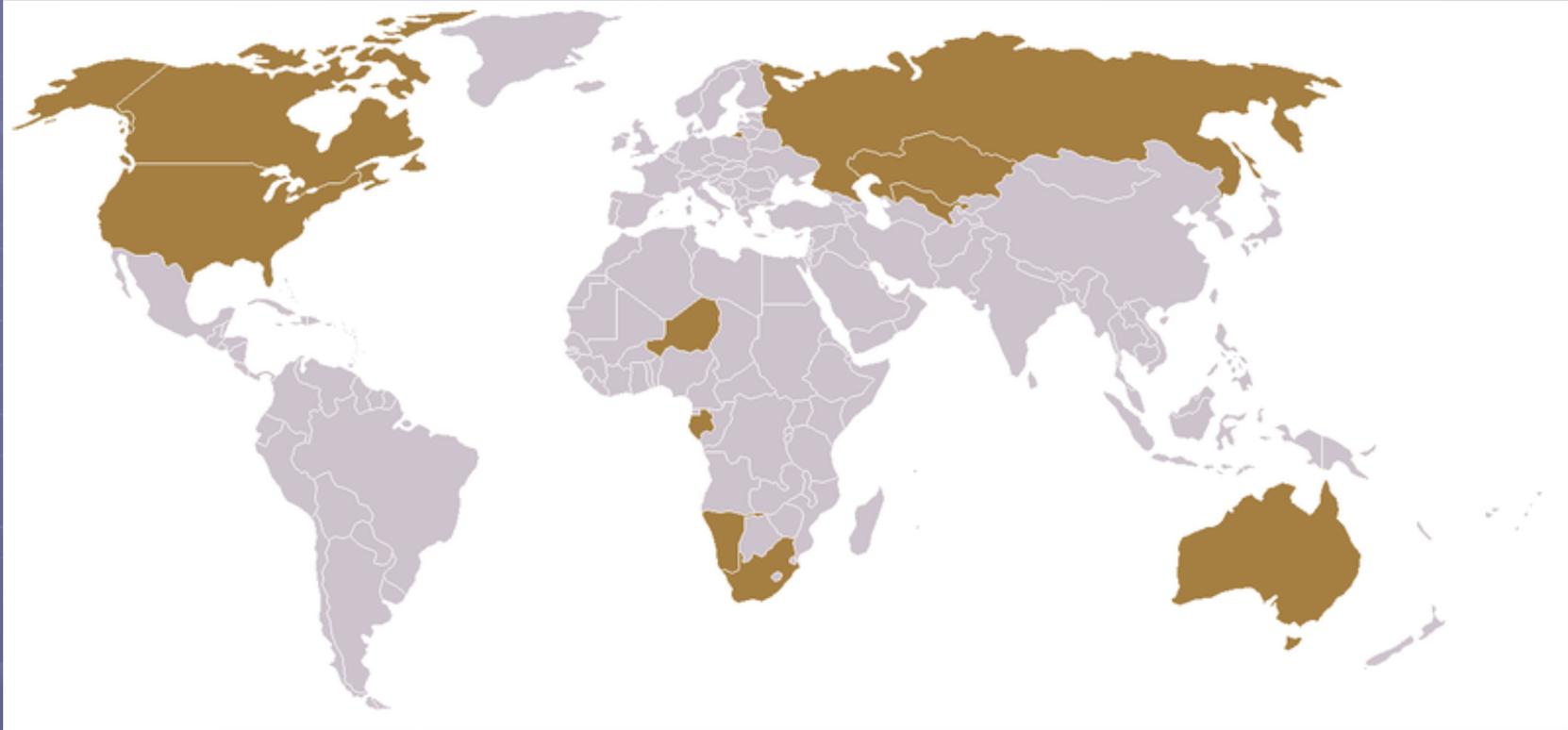
Le **gaz enrichi en U235** est envoyé dans une deuxième **centrifugeuse**

Le processus est répété dans une "cascade" de centrifugeuses

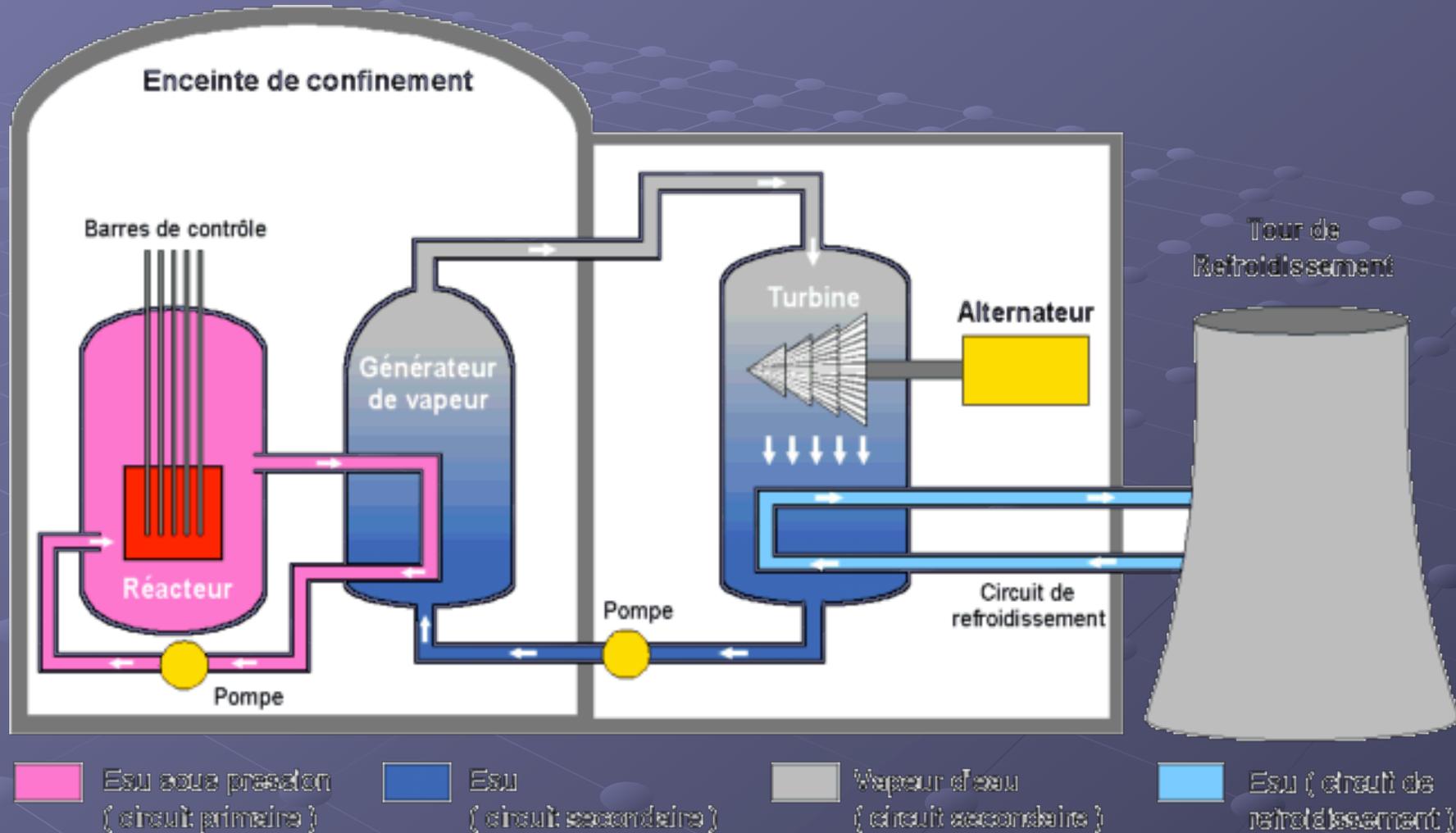
# Enrichissement - Diffusion

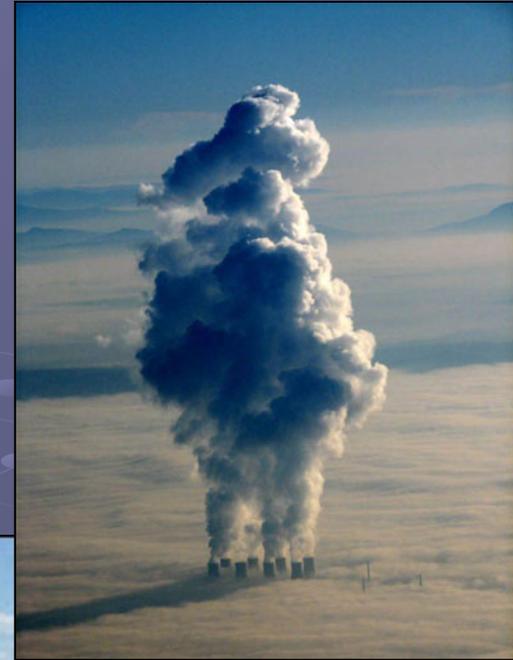
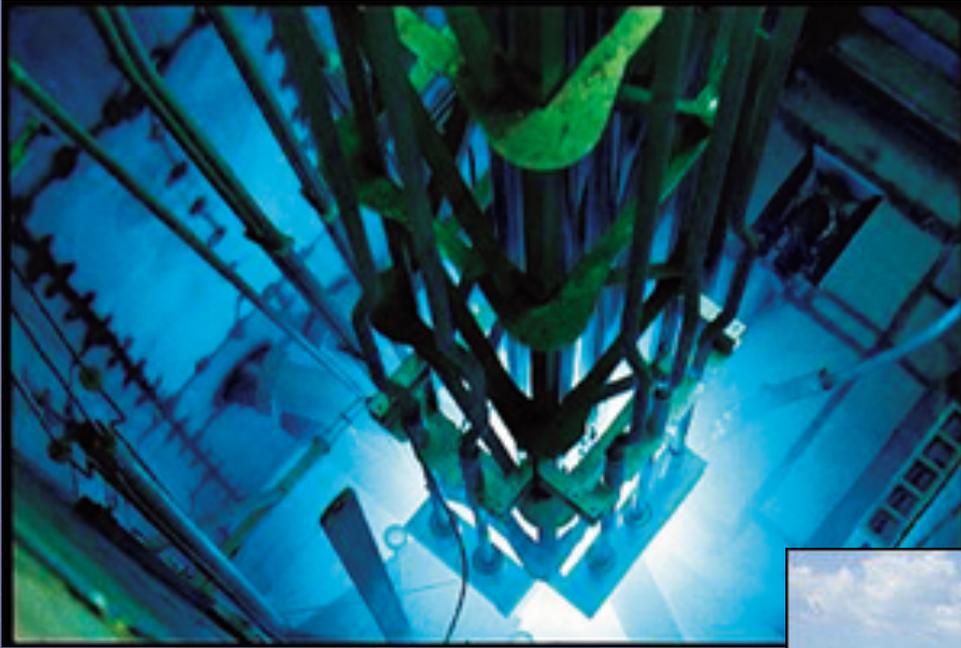






# Nucléaire civil - PWR





# Réacteurs et implantation

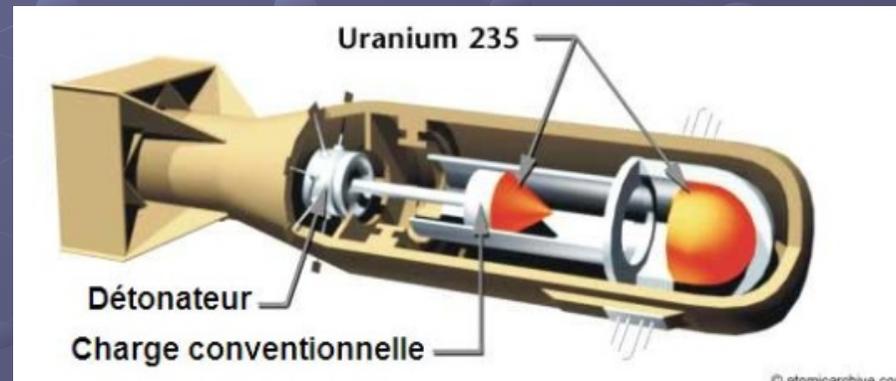


# Applications militaires

- Uranium hautement enrichi >85%

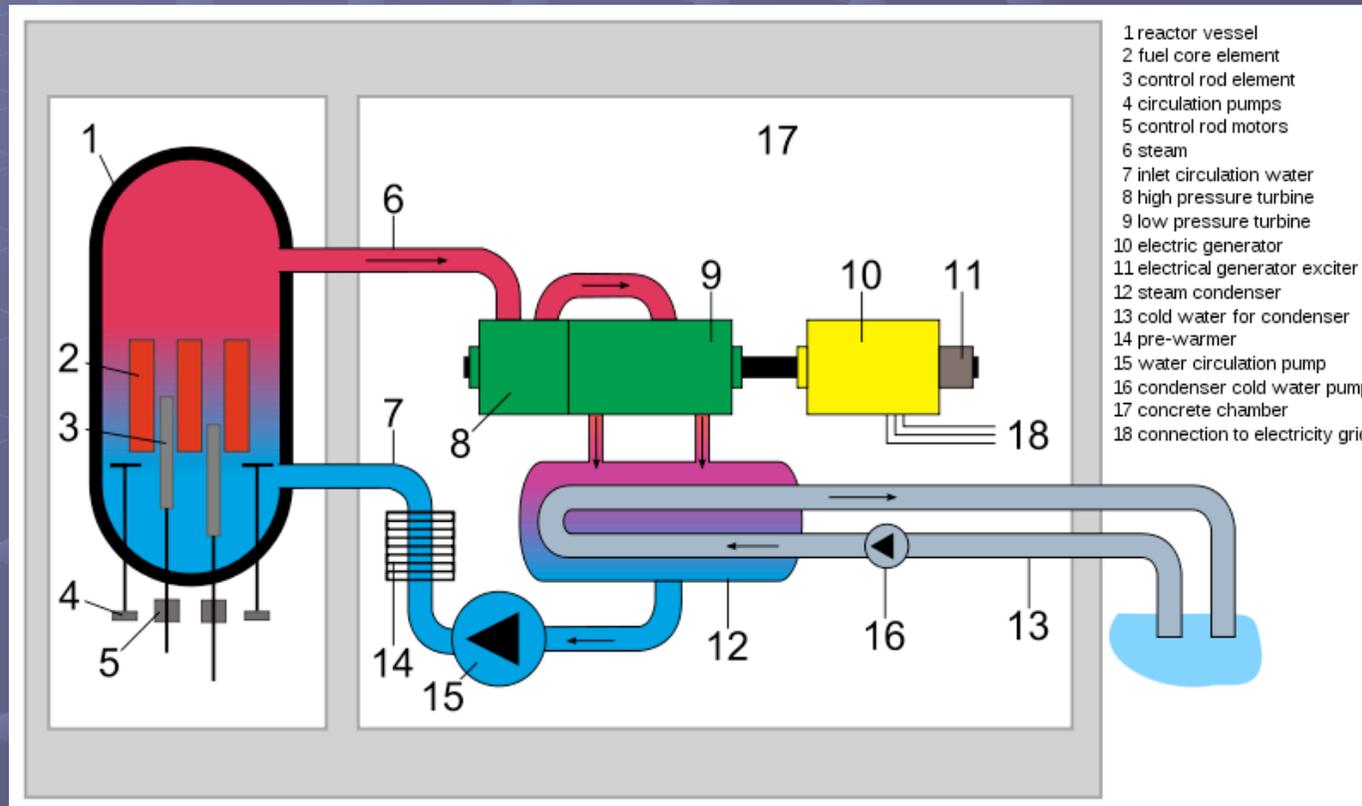


Bombes à fission (1945) – Bombe A



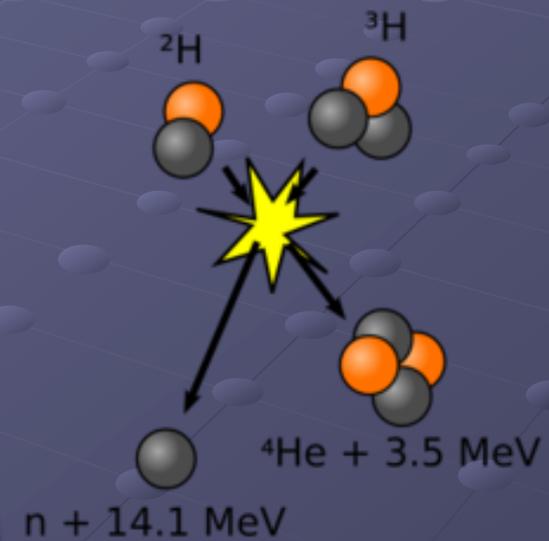
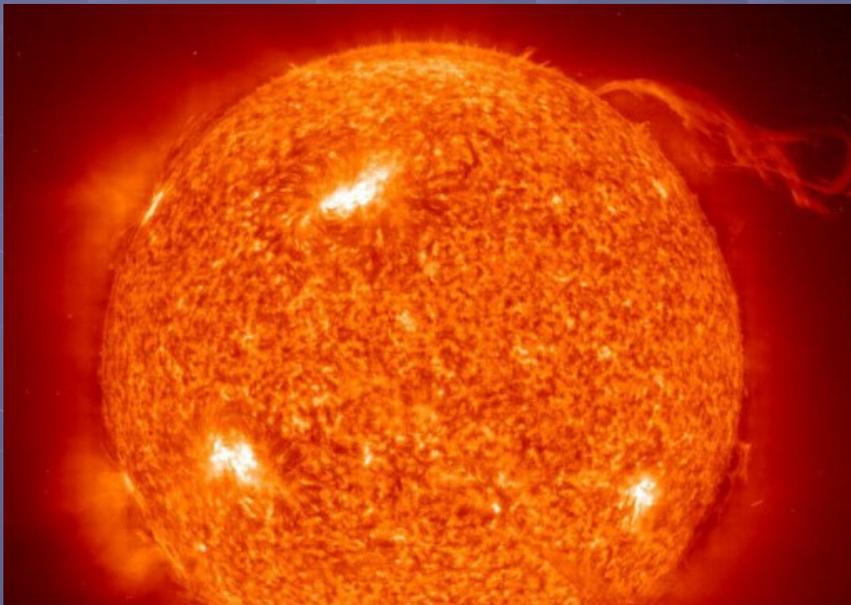
Quelques Kilotonnes à plusieurs dizaines

# BWR Fukushima



# Et la Fusion ?

- **Fusion Naturelle** dans les étoiles (H jusqu'au Fe) – Nucléosynthèse et dégagement considérable d'énergie possible grâce à la gravité et à la masse



- **Fusion Artificielle** dans un réacteur de fusion nucléaire par confinement du combustible (plasma)

# Fusion non-contrôlée

## Application militaire



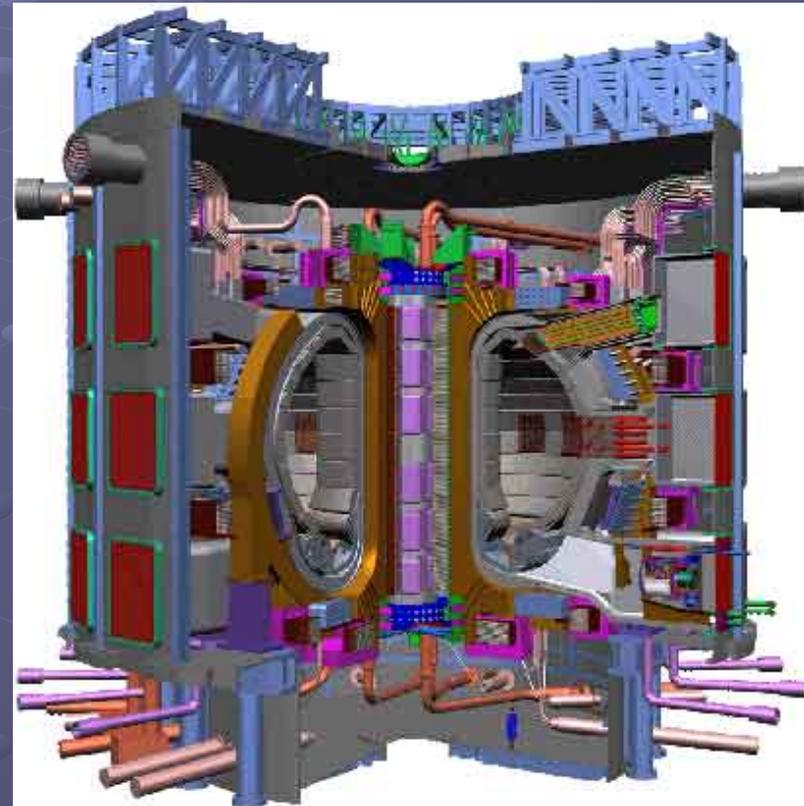
Bombe à Hydrogène  
Fusion  
Bombe H Thermonucléaire  
« Mini-soleil » à la surface  
de la Terre  
Plusieurs dizaines de  
bombes A

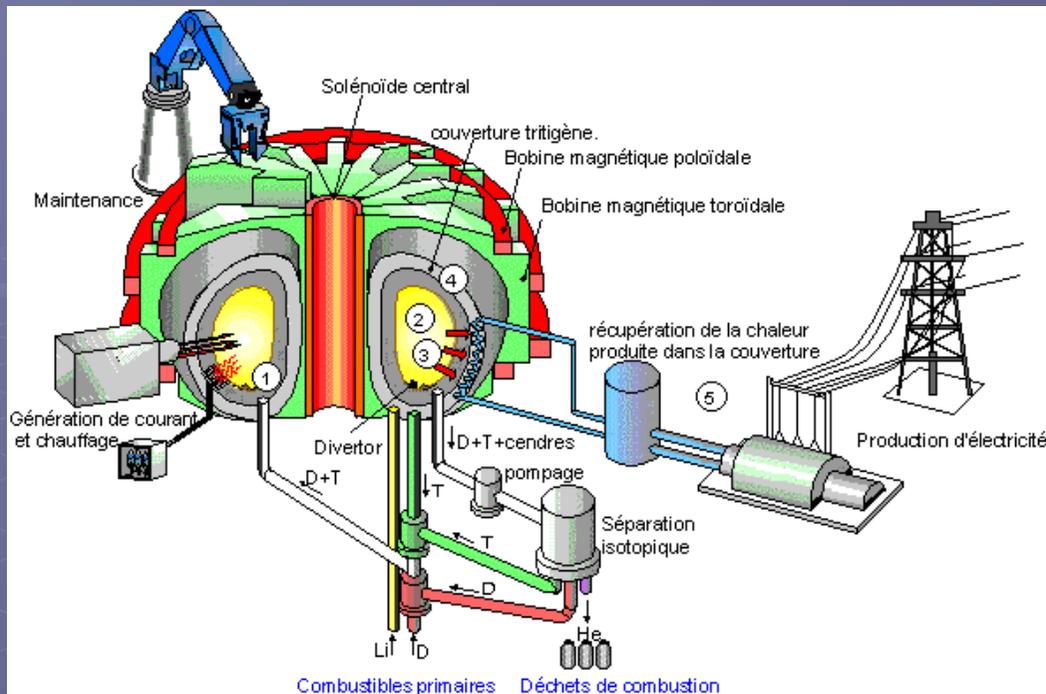
En Mégatonnes

# ITER – Le « Soleil sur Terre » - Fusion contrôlée

## ● Quelques Chiffres

- 80000 km de supraconducteurs
- 23000 tonnes
- 840 m<sup>3</sup> pour la chambre de confinement
- 5000 personnes sur le projet (physiciens, ingénieurs, construction...)
- 100 kilomètres de routes aménagées
- 360000 tonnes de béton
- 18 bobines magnétiques de 360 tonnes
- 60 mètres de haut
- 13 milliards d'euros (construction)
- 150 millions de degrés à maintenir





## D'autres technologies prometteuses pour la Fusion

- Confinement Inertiel par lasers
- Confinement par décharges de condensateur (Z-pinch)