

# Rencontres Jeunes Chercheurs 2008

## Session « Energie Nucléaire »

E. Merle-Lucotte

LPSC / Grenoble INP - PHELMA

# SOMMAIRE

- **Futur énergétique dans le monde - Pourquoi le nucléaire**
- **Conditions pour un futur du nucléaire et cycles du combustible**
- **Les réacteurs nucléaires Génération IV et les ADS**

# SOMMAIRE

- **Futur énergétique dans le monde - Pourquoi le nucléaire**
- Conditions pour un futur du nucléaire et cycles du combustible
- Les réacteurs nucléaires Génération IV et les ADS

# Futur énergétique dans le monde D'ici à 2050

- Population **X 1.5**
- Rééquilibrage **Accroissement des besoins**
- Economies **Pour 1/4 de la population**

Facteur ~2  
mondial

Il va donc falloir avant 2050 :

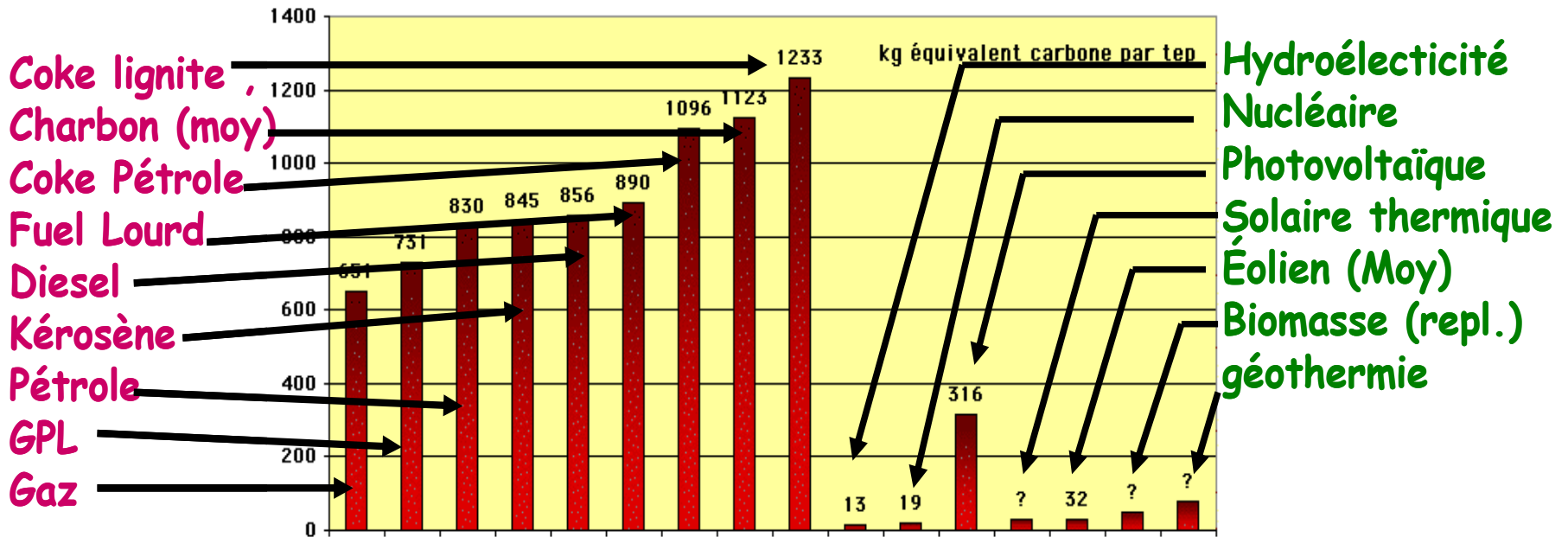
- Accroître la ressource en diminuant la production de gaz à effet de serre
- Trouver entre 7 et 13 GTep voire plus avec les renouvelables et le nucléaire

Part actuelle du nucléaire :

Dans le monde ~ 7% (0.6GTep)

En France ~ 30%

# Pourquoi le nucléaire ? Les gaz à effet de serre



**Kg-equivalent-C émis par TeP pour diverses énergies. Pour les énergies  
Produisant de l'électricité, la conversion a été le taux physique  
(1TeP=42GJ=11,6MWh) Sources Manicore, ADEME, EDF**

# Pourquoi le nucléaire ?

## La concentration

1 réacteur nucléaire de 1GWé.an soit 7 TWh, c'est :

- 27 t d'U enrichi à 3.2% par an et autant de déchets
- 1 tonne de matière fissile ( $^{235}\text{U}$  + Pu)
- 1.5 Mt de pétrole et 4.5Mt de  $\text{CO}_2$
- 38 Gt d'eau sur 100m
- 4 000 éoliennes de 1 MW soit 500 km<sup>2</sup> (sans stockage)
- 30 km<sup>2</sup> de cellules photovoltaïques (sans stockage)
- 210 km<sup>2</sup> de culture pour des biocarburants



L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée  
Intérêt stratégique (stockage facile...), économique, environnement, ...

# SOMMAIRE

- Futur énergétique dans le monde - Pourquoi le nucléaire
- **Conditions pour un futur du nucléaire et cycles du combustible**
- Les réacteurs nucléaires Génération IV et les ADS

# Conditions pour un futur du nucléaire

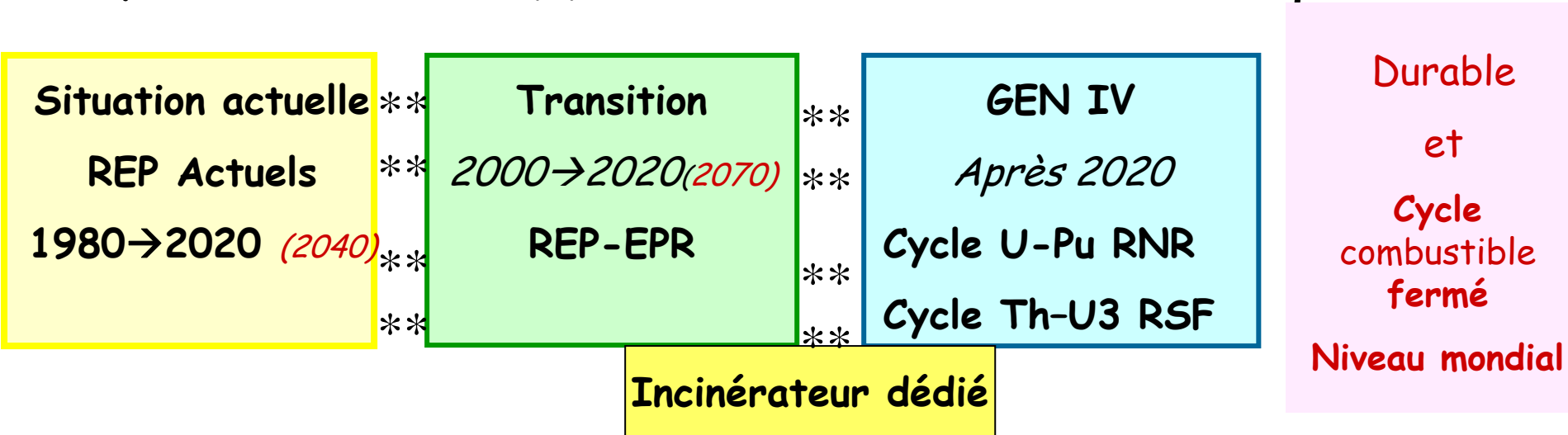
## Quels buts ?

### Incinération des déchets (Loi Bataille)

- Faut-il incinérer le Plutonium ?
- Faut-il incinérer les Actinides Mineurs ( $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ) ?
- Doit-on fermer le cycle du combustible ?
- Va-t-on continuer à construire des REP ou EPR ?

**MAIS** pour répondre aux questions précédentes,

Il faut bien savoir comment le nucléaire va continuer /à quel niveau





# Conditions pour un futur du nucléaire Forum International GENIV



# Conditions pour un futur du nucléaire

Caractéristiques indispensables à tout réacteur nucléaire de Génération IV :

- 
- **Minimisation de la production de déchets**
  - **Economie des ressources**
  - **Potentialités de déploiement**
  - **Sûreté optimale**
  - **Faisabilité d'ici à 2050**

# Conditions pour un futur du nucléaire

Caractéristiques indispensables à tout réacteur nucléaire de Génération IV :

- 
- **Minimisation de la production de déchets**
  - **Economie des ressources**
  - **Potentialités de déploiement**
  - **Sûreté optimale**
  - **Faisabilité d'ici à 2050**

# Conditions pour un futur du nucléaire

Caractéristiques indispensables à tout réacteur nucléaire de Génération IV :

- 
- Minimisation de la production de déchets
  - Economie des ressources
  - Potentialités de déploiement
  - Sécurité optimale
  - Faisabilité d'ici à 2050

**Cycles du combustible**

# Conditions pour un futur du nucléaire

## Cycles du combustibles possibles

Noyaux fissiles pouvant être utilisés comme combustible dans les réacteurs nucléaires :  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ , Pu

$^{235}\text{U}$  = seul noyau fissile existant naturellement (uranium naturel = 0,7%  $^{235}\text{U}$  + 99,3%  $^{238}\text{U}$ )

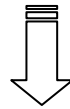
- Les ressources en fissile pour le nucléaire actuel avec 1tU /GWé.an **250 ans**
- Si nucléaire x 5 **50 ans + Durée de vie**

# Conditions pour un futur du nucléaire

## Cycles du combustibles possibles

Noyaux fissiles pouvant être utilisés comme combustible dans les réacteurs nucléaires :  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ , Pu

$^{235}\text{U}$  = seul noyau fissile existant naturellement  
(uranium naturel = 0,7%  $^{235}\text{U}$  + 99,3%  $^{238}\text{U}$ )



Tous les autres noyaux **fissiles** doivent être produits par capture neutronique sur un noyau **fertile**

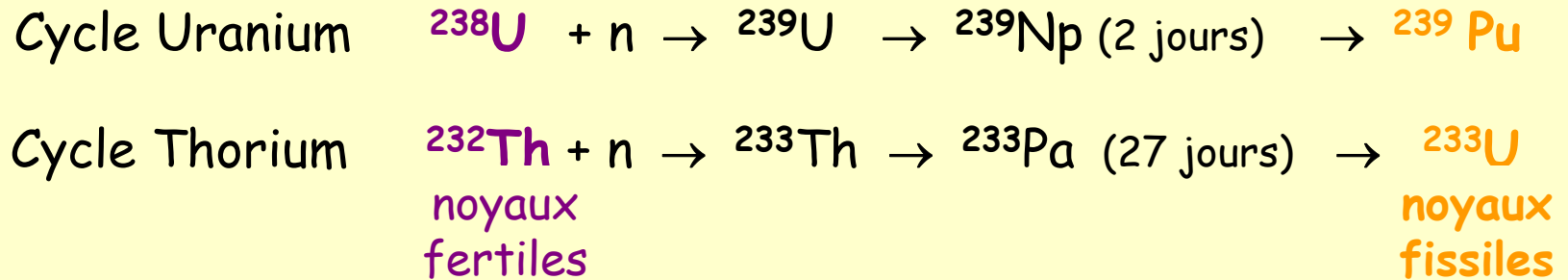


De quels noyaux fertiles disposons-nous sur terre ?

# Conditions pour un futur du nucléaire

## Cycles du combustibles possibles

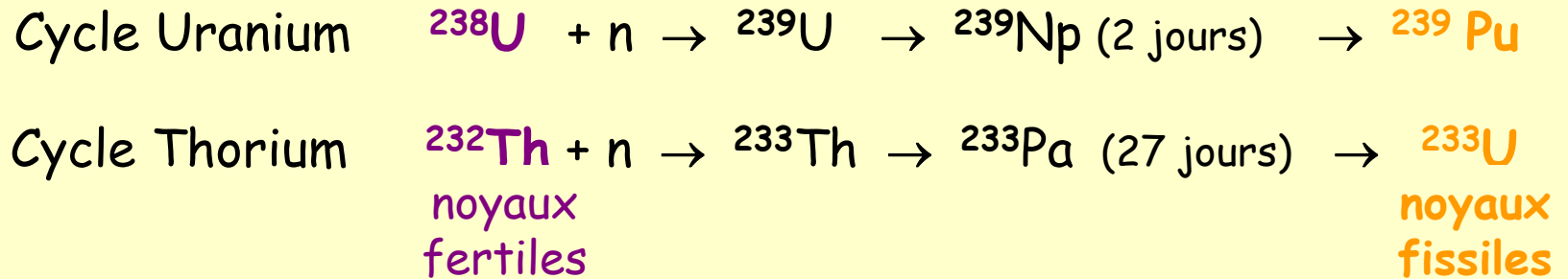
2 seuls futurs cycles du combustible ou filières pour la régénération :



# Conditions pour un futur du nucléaire

## Cycles du combustibles possibles

2 seuls futurs cycles du combustible ou filières pour la régénération :



Pour produire 1 GWe.an, il faut fissionner **1 tonne** de matière :

- dans un REP, il faut utiliser **200 tonnes** d'uranium naturel
- dans un réacteur régénérateur, **1 tonne** d' $^{238}\text{U}$  ou de  $^{232}\text{Th}$  suffit

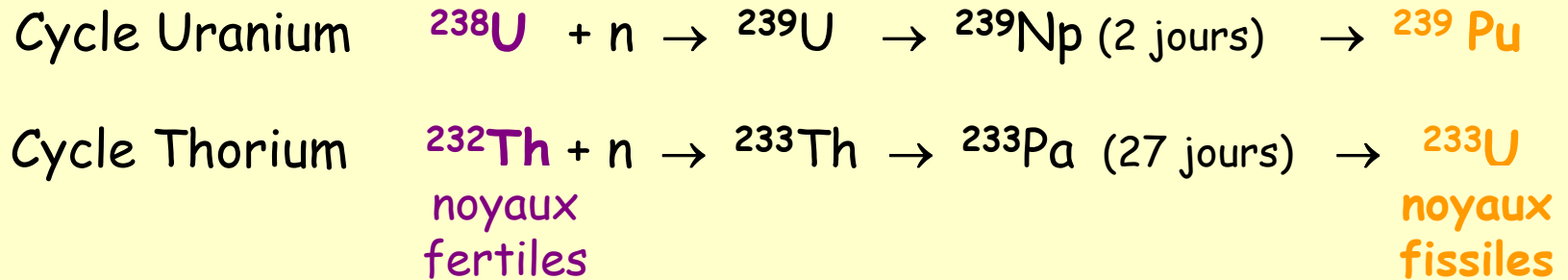
- Les ressources en fissile pour le nucléaire actuel avec 1tU /GWé.an **250 ans**
- Si nucléaire x 5 **50 ans + Durée de vie**
- Si surgénération **Uranium X 200**  
**Thorium X 600**



# Conditions pour un futur du nucléaire

## Cycles du combustibles possibles

2 seuls futurs cycles du combustible ou filières pour la régénération :



Pour produire 1 GWe.an, il faut fissionner **1 tonne** de matière :

- dans un REP, il faut utiliser **200 tonnes** d'uranium naturel
- dans un réacteur régénérateur, **1 tonne** d' $^{238}\text{U}$  ou de  $^{232}\text{Th}$  suffit

*Présentation de Benoit LAURENT sur la "Mesure du nombre de neutrons prompts dans la réaction  $^{239}\text{Pu}(n, f)$ "*

# SOMMAIRE

- Futur énergétique dans le monde - Pourquoi le nucléaire
- Conditions pour un futur du nucléaire et cycles du combustible
- **Les réacteurs nucléaires Génération IV et les ADS**

# L'énergie nucléaire du futur

## Les déchets

- **Les produits de fission**

Quantité ne dépend que de la puissance produite

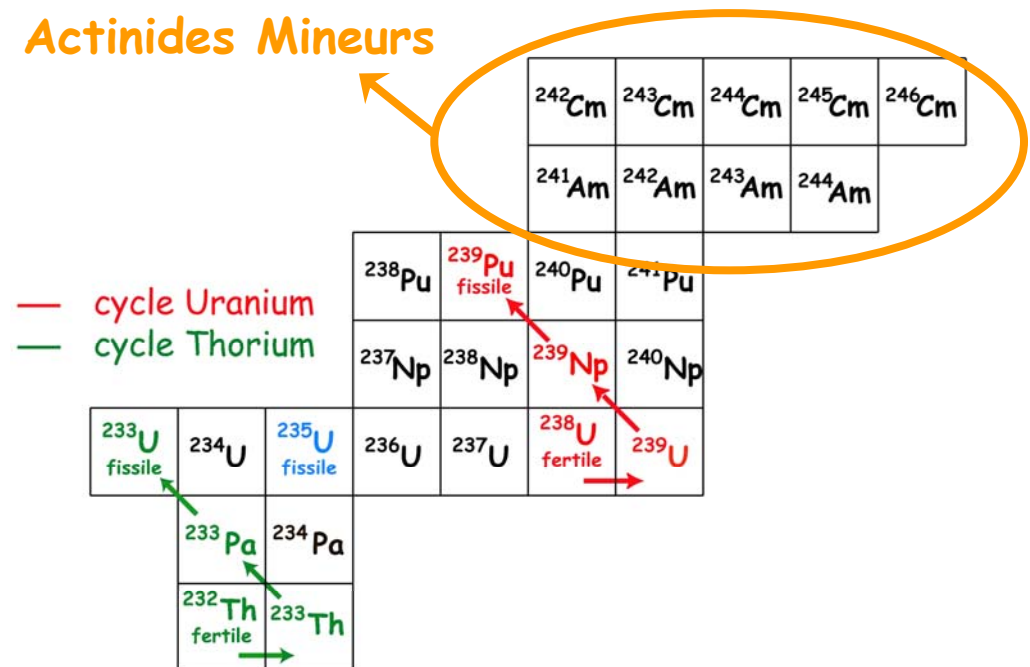
- **Les actinides**

⇒ Cf dans un REP :

27279 kg de déchets dont

- 26 047 kg d'Uranium
- 266 kg de Plutonium
- 20 kg d'A.M.
- 946 kg de PF (63kg de VL)

### Actinides Mineurs



- **Les déchets technologiques**

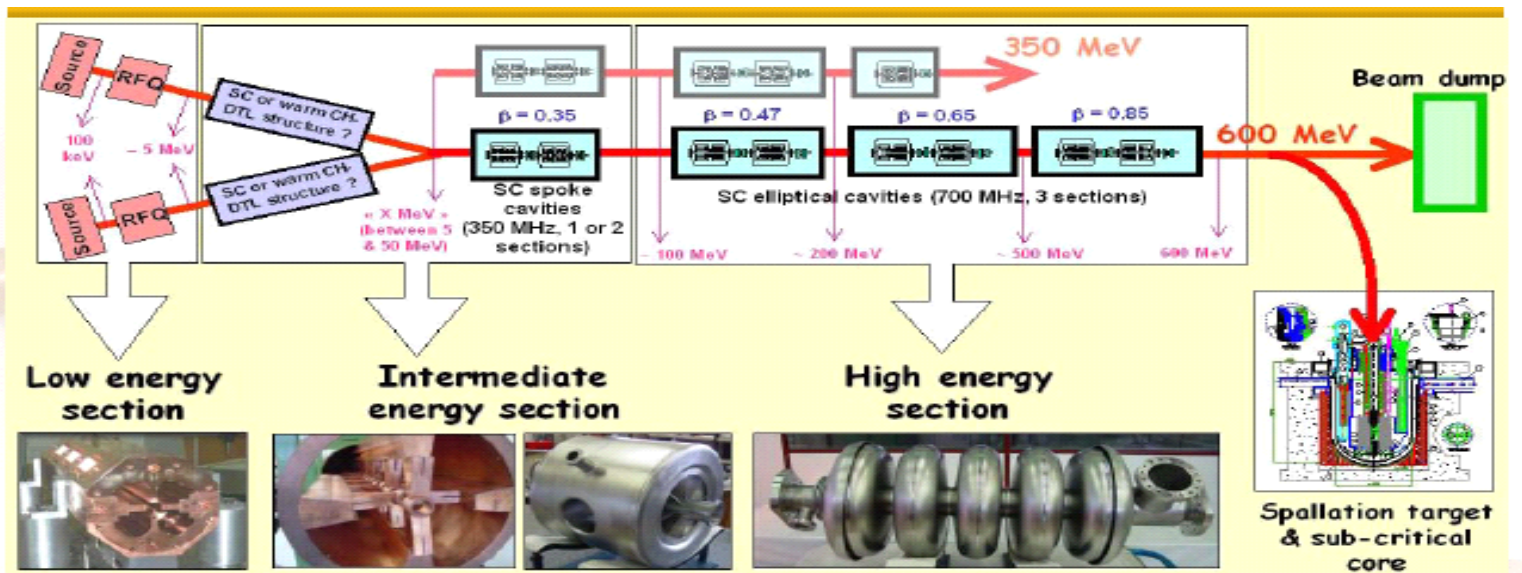
# L'énergie nucléaire du futur

## Les déchets : gestion future versus toxicité

- Réduire la quantité, la toxicité, la chaleur
- Pour les produits de fission : **rendement**
- Pour les actinides mineurs: **diminuer la quantité + transmuter**
- Pour le Pu: utiliser dans les réacteurs du futur = **pas de multirecyclage en REP**
- U disponible pour U/Pu

# L'énergie nucléaire du futur

## Les déchets : la transmutation



- Transmuter: meilleure consommation en spectre rapide (réacteurs dédiés ou répartir dans les futurs réacteurs régénérateurs)
- Si systèmes dédiés : réacteurs hybrides pour sûreté, nommés 'réacteurs pilotés par accélérateur' (en anglais 'Accelerator Driven System' ou ADS)
- Déchets ultimes: stockage

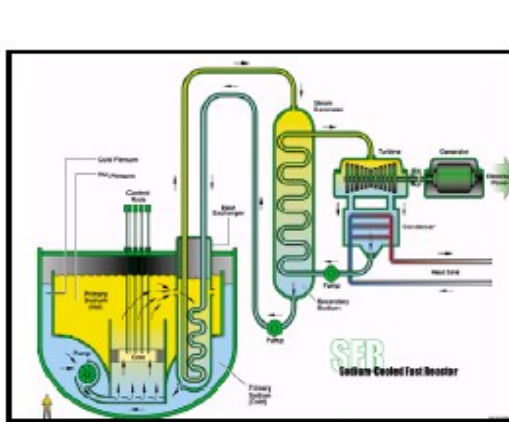
Présentations de Frédéric BOULY sur les "Accélérateurs de protons pour les ADS" de Thomas GORBINET sur l'"Etude de la spallation avec les faisceaux d'ions lourds de l'accélérateur GSI", et de Guillaume BOUTOUX sur la 'Mesure de sections efficaces ( $n, \gamma$ ) pour des actinides mineurs d'intérêt pour la transmutation'

# Les réacteurs nucléaires Génération IV Forum International GENIV

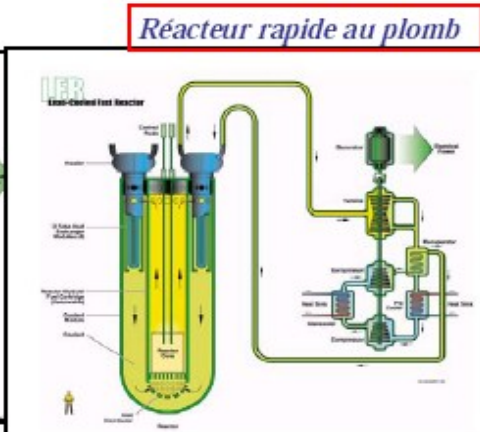




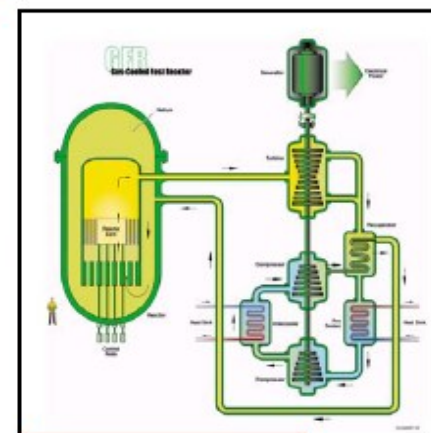
# Les réacteurs nucléaires Génération IV 6 concepts sélectionnés



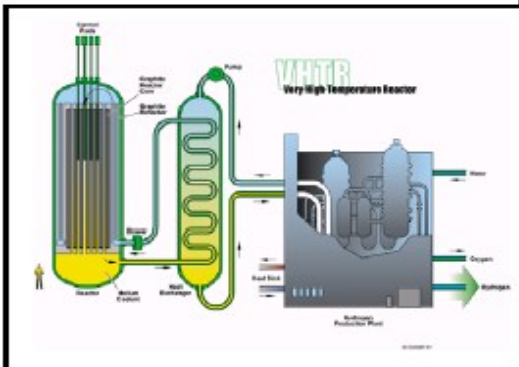
Réacteur rapide sodium



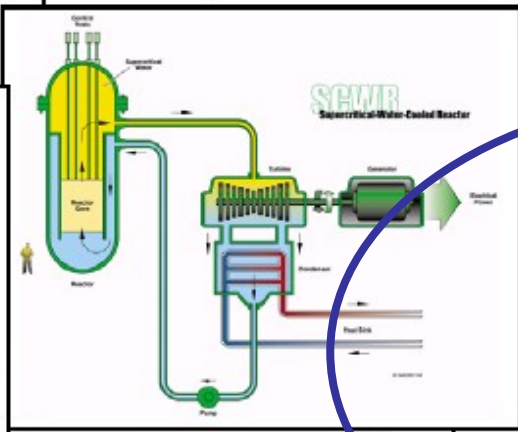
Réacteur rapide au plomb



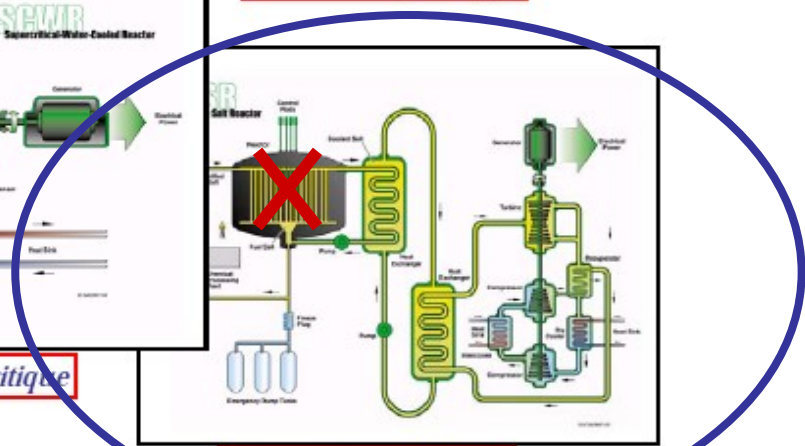
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, très haute température



Réacteur à eau supercritique

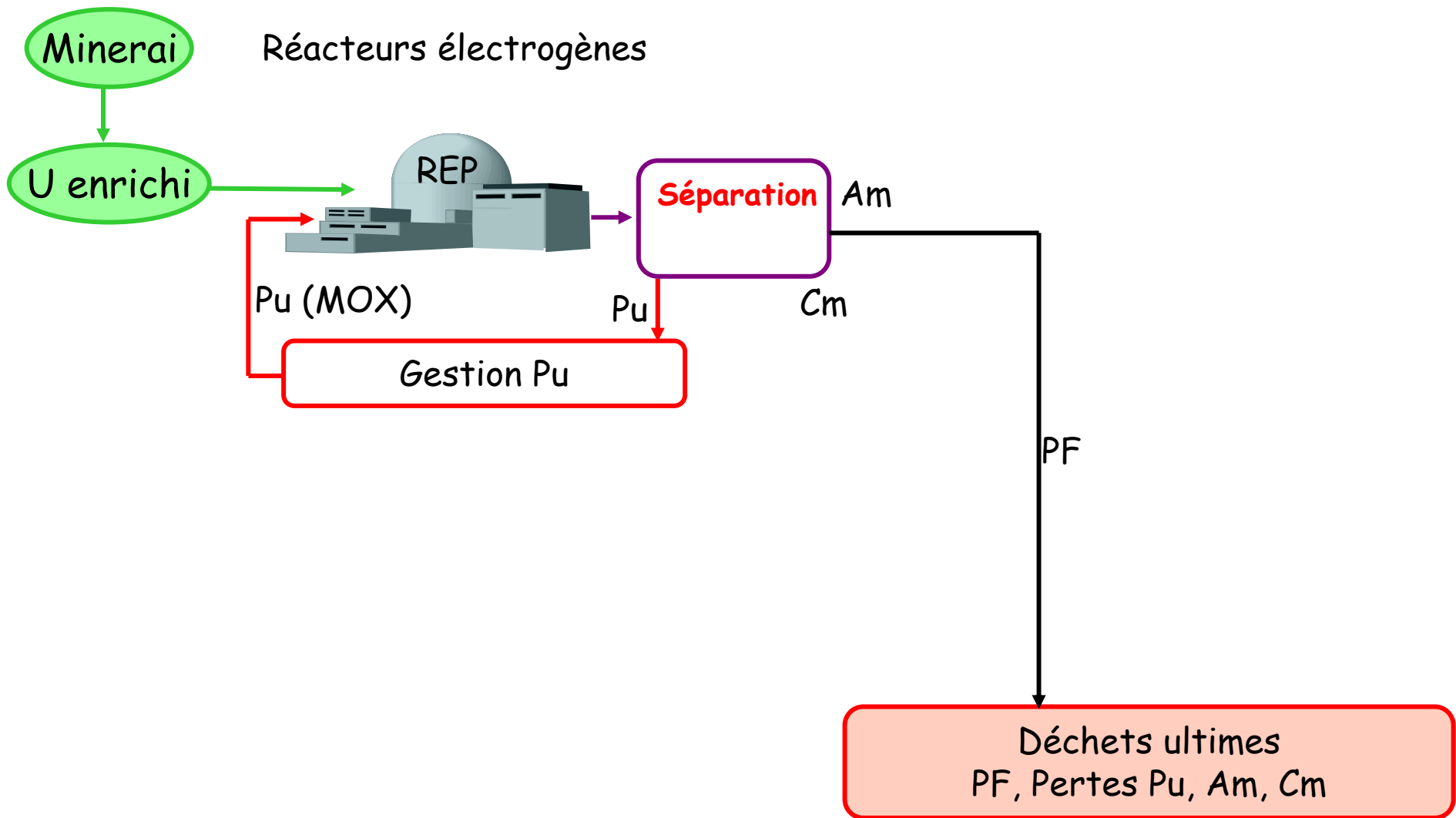


Réacteur à sels fondus

Présentation de Xavier DOLIGEZ sur les "Réacteurs à Sels Fondus"

# Les réacteurs nucléaires Génération IV

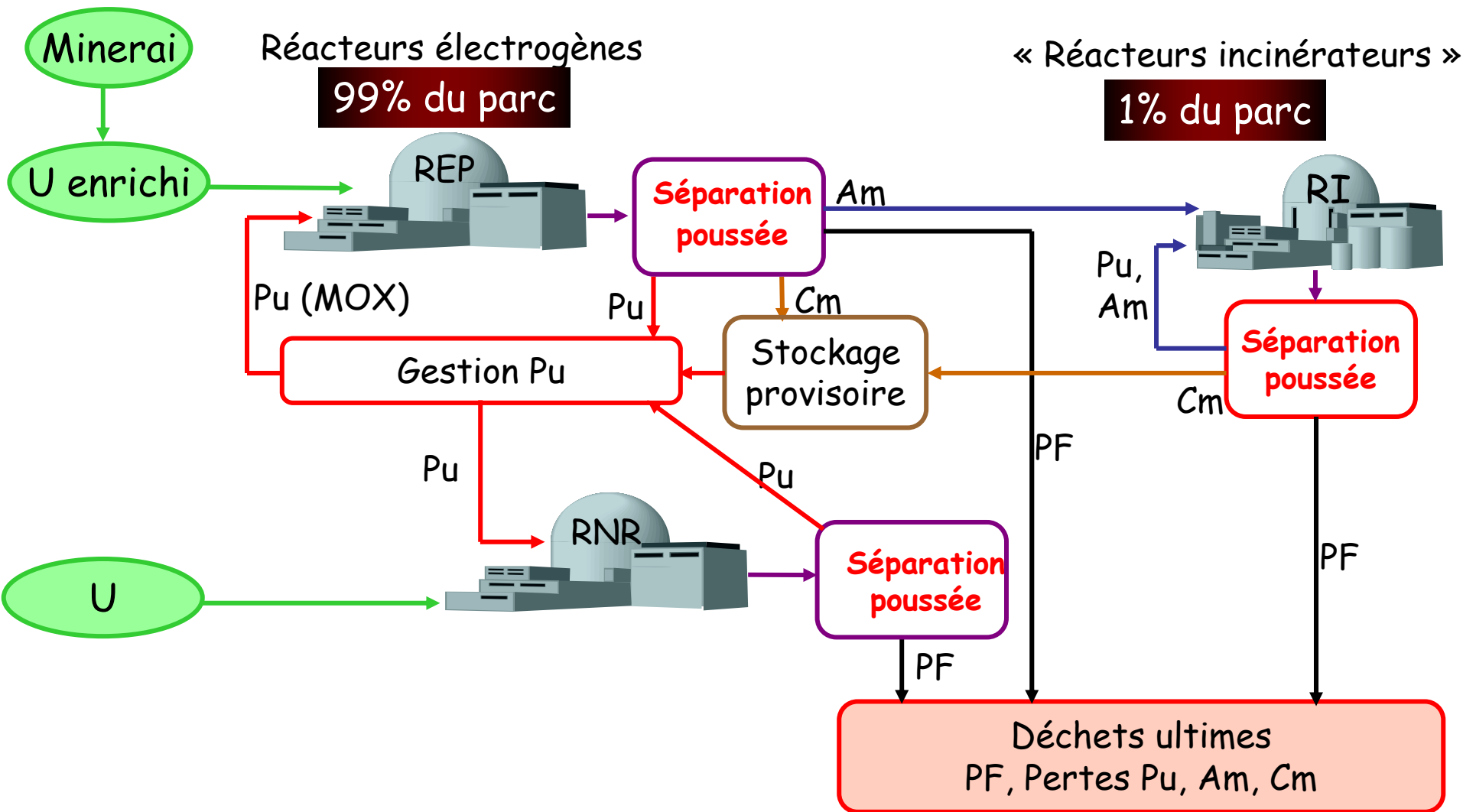
## Exemple de parc symbiotique mondial





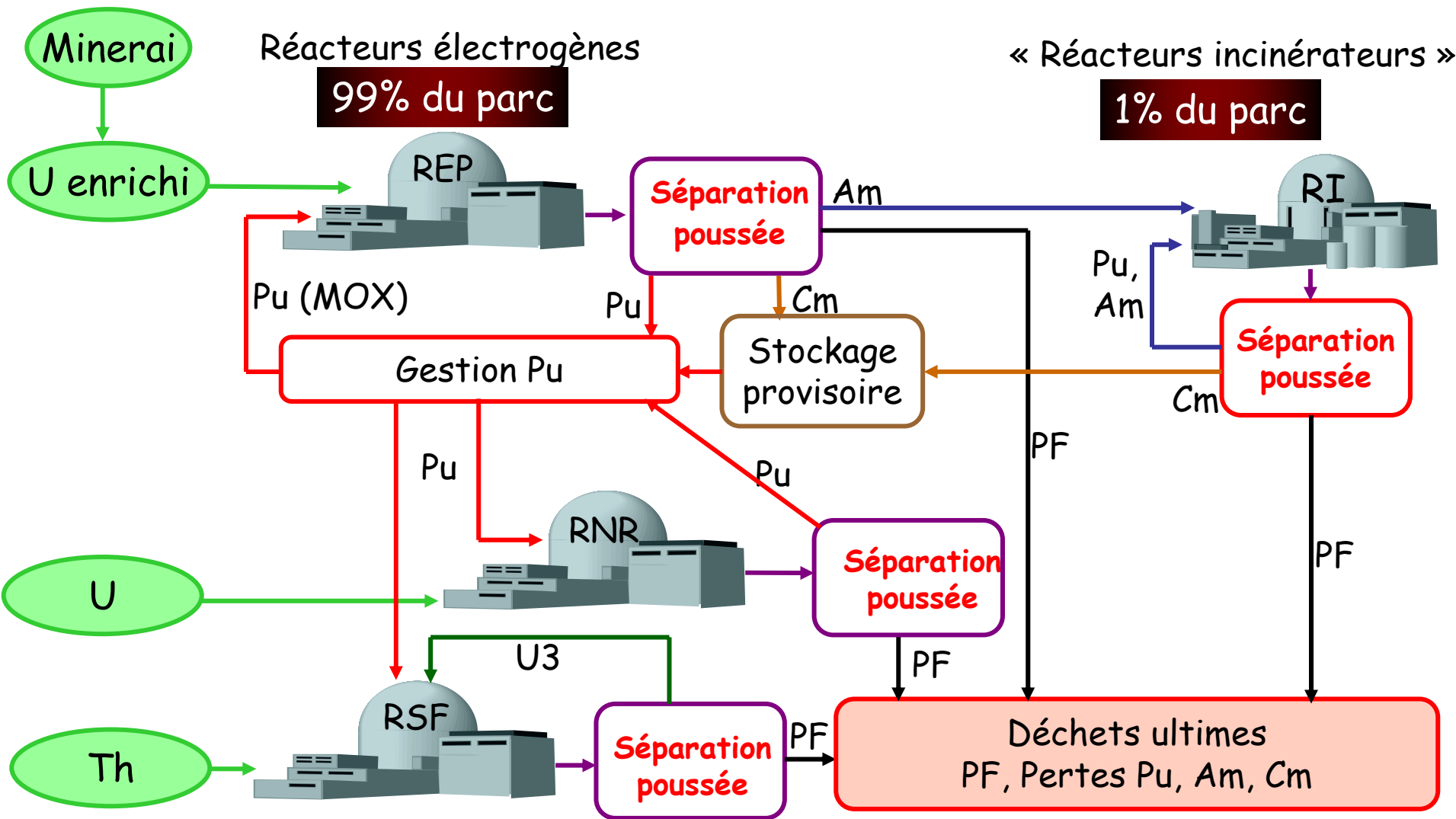
# Les réacteurs nucléaires Génération IV

## Exemple de parc symbiotique mondial



# Les réacteurs nucléaires Génération IV

## Exemple de parc symbiotique mondial



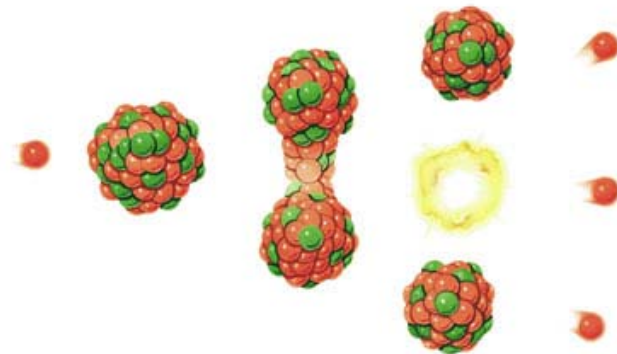
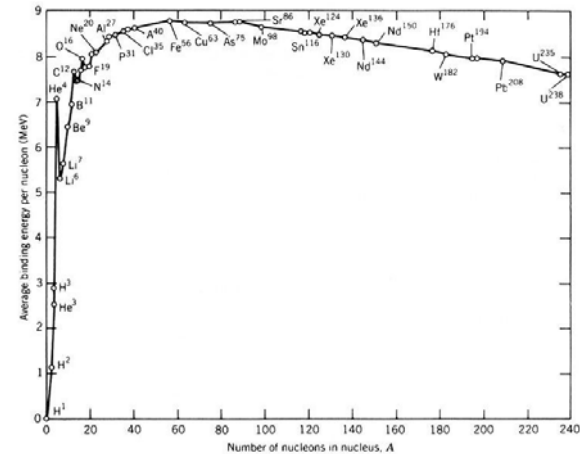
# Session "Energie Nucléaire"

- Etude d'un cryomodule supraconducteur et de sa boucle de régulation radiofréquence à 700 MHz pour les accélérateurs de protons type ADS  
Frédéric BOULY - *IPNO*
- Etude de la spallation avec les faisceaux d'ions lourds de l'accélérateur GSI  
Thomas GORBINET - *CEA DSM / IRFU*
- Mesure de sections efficaces (n,γ) à partir de réactions de transfert pour des actinides mineurs d'intérêt pour la transmutation  
Guillaume BOUTOUX - *CENBG*
- Mesure du nombre de neutrons prompts dans la réaction  $^{239}\text{Pu}(n,f)$  : vers l'amélioration de la résolution des distributions en masse des fragments  
Benoit LAURENT - *CEA DAM*
- Influence de l'unité de retraitement sur le comportement d'un TMSR  
Xavier DOLIGEZ - *LPSC*

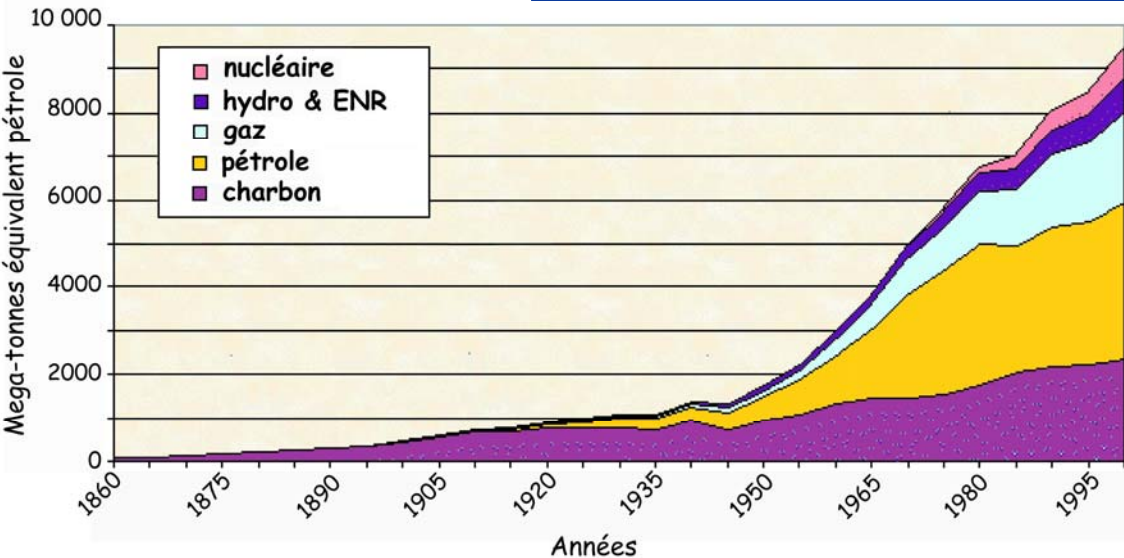


# D'où vient l'énergie nucléaire

- Energies de liaison
- Fusion: < 24 MeV
- Fission: ~200 MeV
- Combustion: ~10 eV
- Soit un rapport  $10^7$
- Une fission = 2 à 3 n
- Contrôle de la réaction en chaîne: jouer sur la quantité de combustible et la vitesse du neutron.



# CONTEXTE ENERGETIQUE

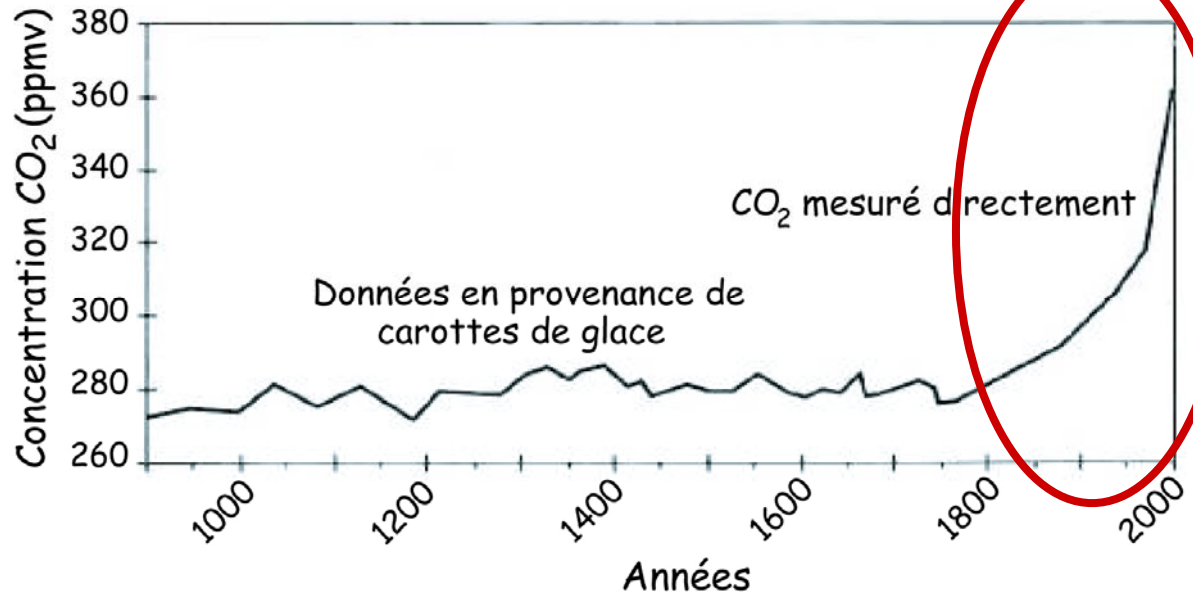


Consommation énergétique mondiale

Concentration en  $\text{CO}_2$   
1000 dernières années



Augmentation liée aux  
activités humaines



# Futur énergétique dans le monde

## Consommation énergétique mondiale

Pays	Population (millions habitants)	Énergie Primaire (Mtep)	tep/habitant
USA	281	2 293	8.2
Chine	1 271	1 245	1.0
Inde	1 045	538	0.5
Japon	127	509	4.0
Europe (15)	403	1 470	3.65
France	60.	258	4.3
Monde	6 071	10 200	1.67

# Le retraitement

- Minimiser les déchets ultimes (quantité, radiotoxicité, chaleur)
- PUREX actuel puis Séparation poussée: PF, A.M., Pu, U
- Pyrochimie futur
- Obligatoire pour régénérer et utiliser les ressources

