

# **Ruptures technologiques: le rôle du nucléaire**

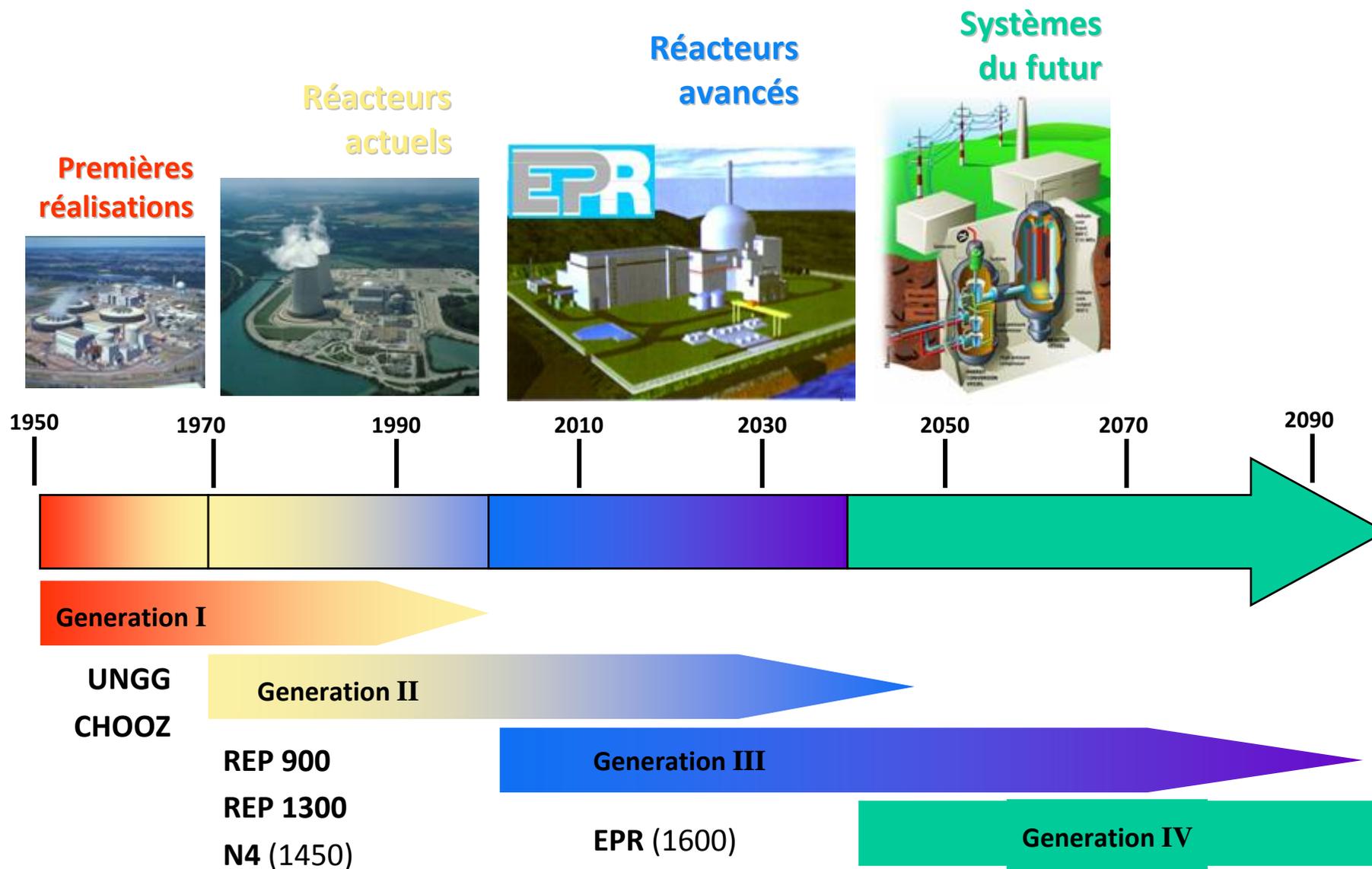
(Idées 8 Février 2011)

*Jean-Paul Langlois*

# Grandes caractéristiques de l'énergie nucléaire

- Energie très concentrée: (1 tonne d'Unat eq. 10 000TEP à 500 000TEP)
- Marché de l'U très spécifique: 1 seul usage civil, pas de substitut et part faible dans la valeur du produit final (5 à 10%), mais heureusement stockable.
- Industrie très capitalistique
- Nucléaire et nations:
  - Aspects proliférants
  - Nécessite haut niveau technologique, réseau électrique dense, infrastructures de contrôle et stabilité politique à long terme
- Nucléaire et opinion publique
  - Comportement très culturel par rapport au nucléaire électrogène
- Echelle des temps:
  - Cycle d'une centrale: 1 siècle
  - Gestion des déchets sur le long terme
  - Progrès technologiques lents (processus d'approbation sûreté),
    - » => Vision nécessaire au moins à l'échelle du siècle

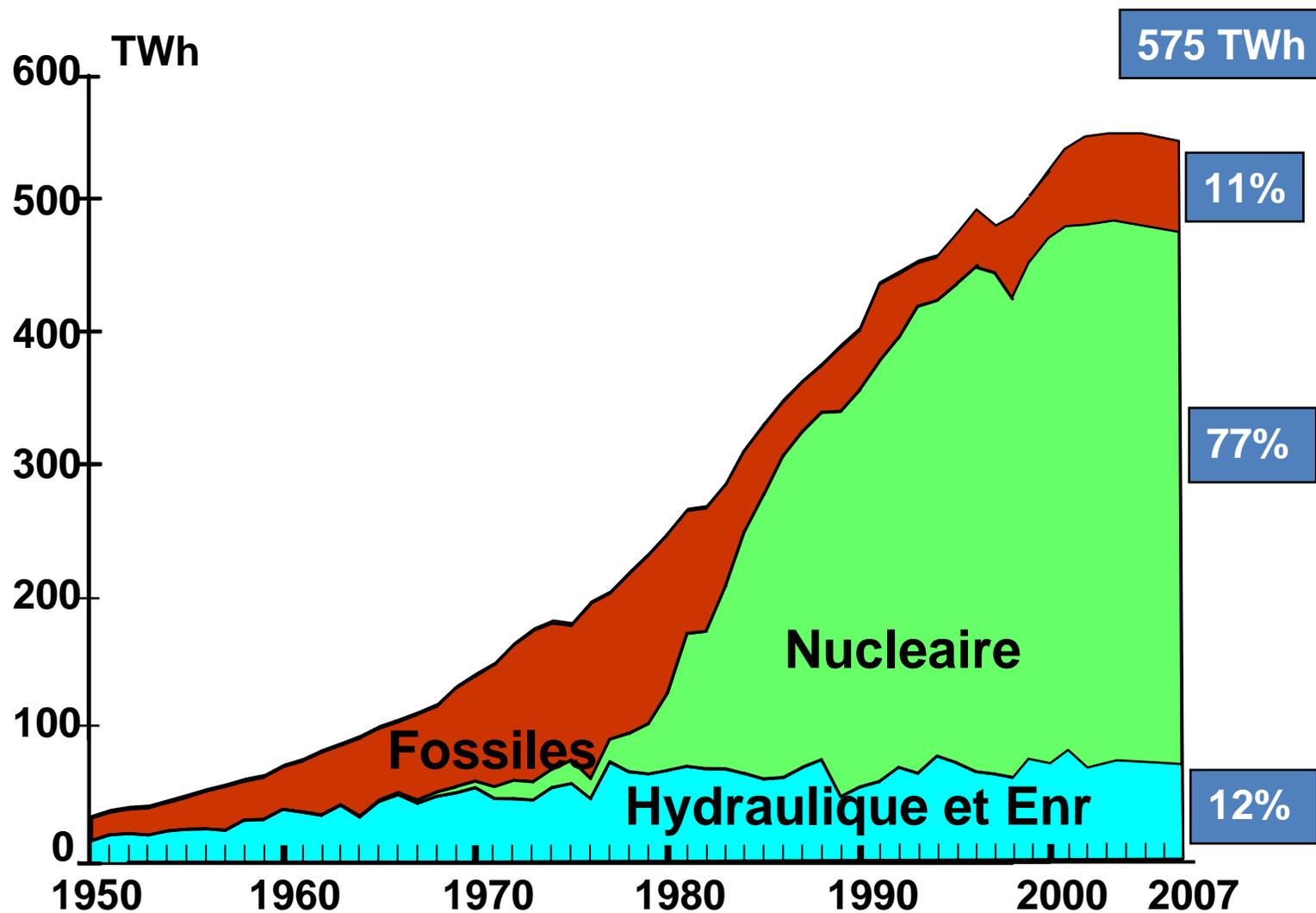
# Le calendrier des générations nucléaires



# Les grands programmes dans le monde

- 1960-1980: Angleterre, USA, Canada, Allemagne, Suède
- 1970-2000: France, Japon
- 2000-2020: Chine, Corée, «URSS », Inde, Europe de l'Est
- Après 2020: Chine, Inde, Europe

# Production d'électricité en France depuis 1950

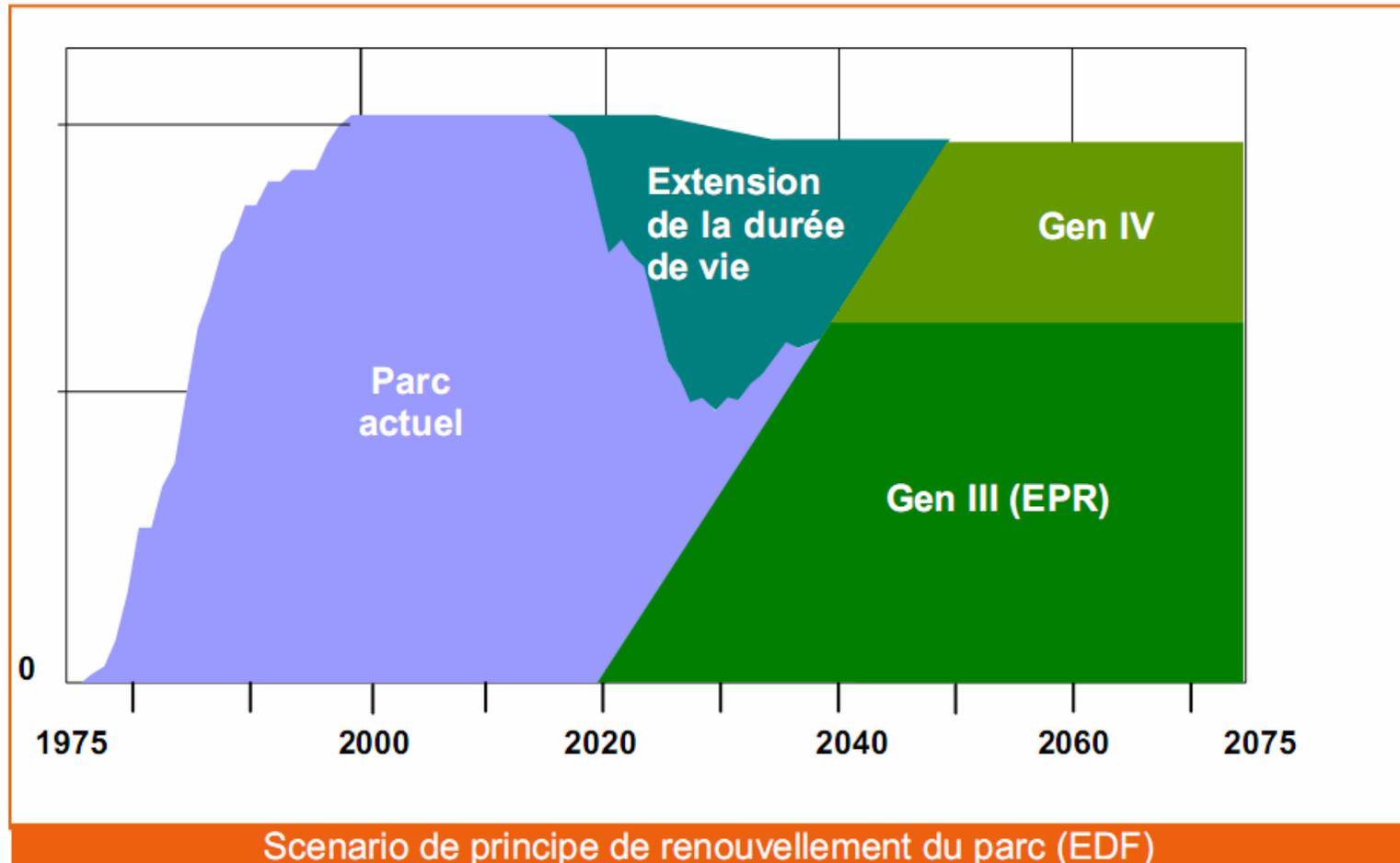


Source IEA

# Les raisons du succès du programme nucléaire en France

- **Un choc psychologique : la crise de 1973 permettant une prise de risque industriel**
- **Une tradition française de grands programmes nationaux centralisés (financement garanti par l'Etat, opinion publique globalement favorable)**
- **EDF, 1<sup>er</sup> électricien mondial et organisme d'état**
- **Une volonté politique inscrite dans la continuité**
- **Une filière éprouvée aux USA (PWR Westinghouse), une industrie française performante et une R&D solide (CEA et EDF)**

# Quel futur en France?



# La 4ème génération : vers un nucléaire durable

## ➔ De nouvelles exigences pour un nucléaire durable

### *Des progrès en continuité :*

- Compétitivité économique
- Sûreté et fiabilité

### *Des avancées :*

- Minimisation des déchets
- Économie des ressources
- Résistance à la prolifération

## ➔ Des systèmes déployables à l'horizon 2040

## ➔ Des atouts pour de nouvelles applications

*Hydrogène, eau potable, chaleur*

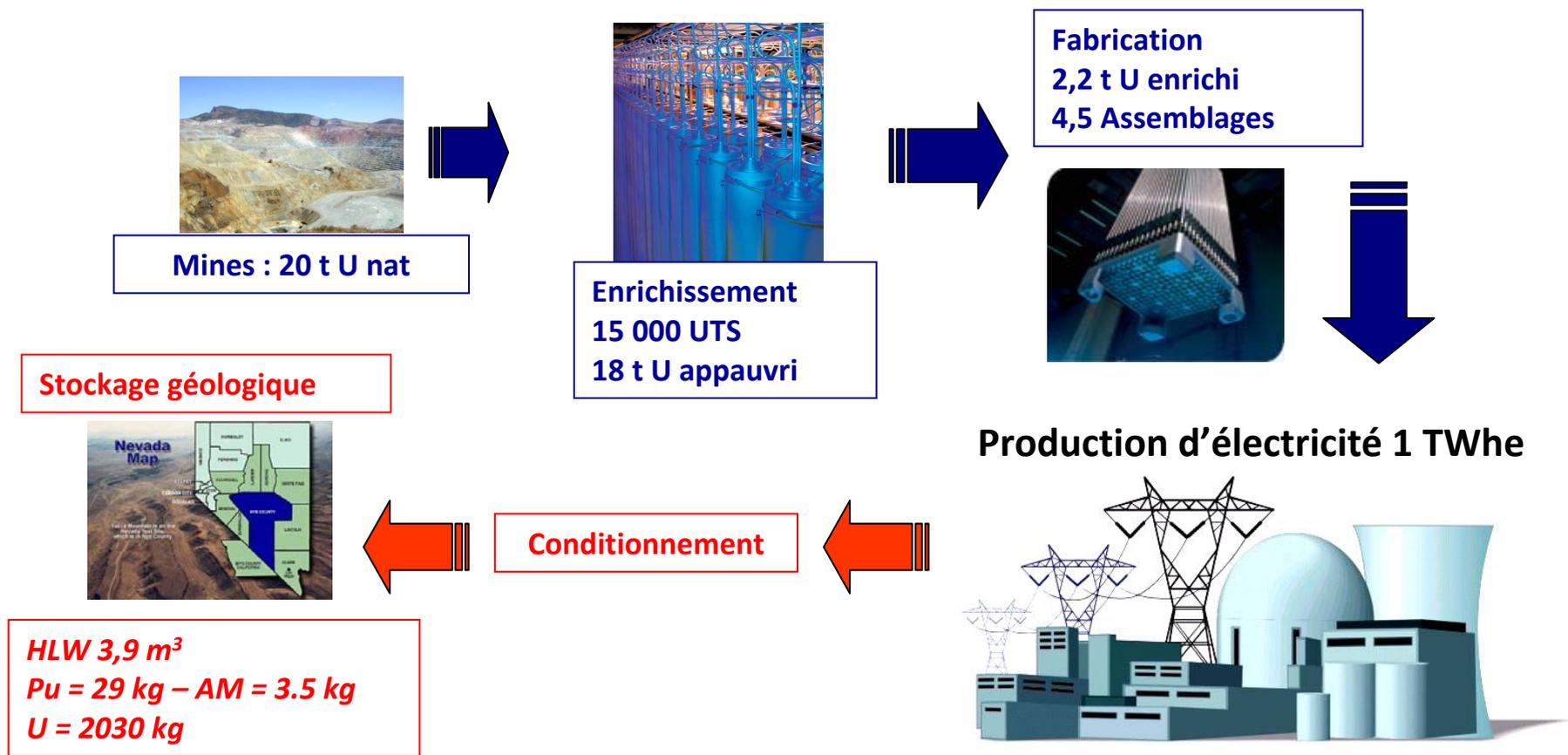
## ➔ Une R&D internationalisée



# Cycle du combustible ouvert

Le cycle du combustible ouvert permet de définir :

- **l'amont** : les étapes nécessaires à la fabrication du combustible à charger en réacteur
- **l'aval** : le devenir du combustible à la sortie du réacteur



# Conditions d'un développement durable

- **1/ Ressources primaires en quantité suffisant et accessibles dans des conditions acceptables (économie et environnement)**
- **2/Gestion acceptée des déchets**
- **3/Gestion de la non prolifération**

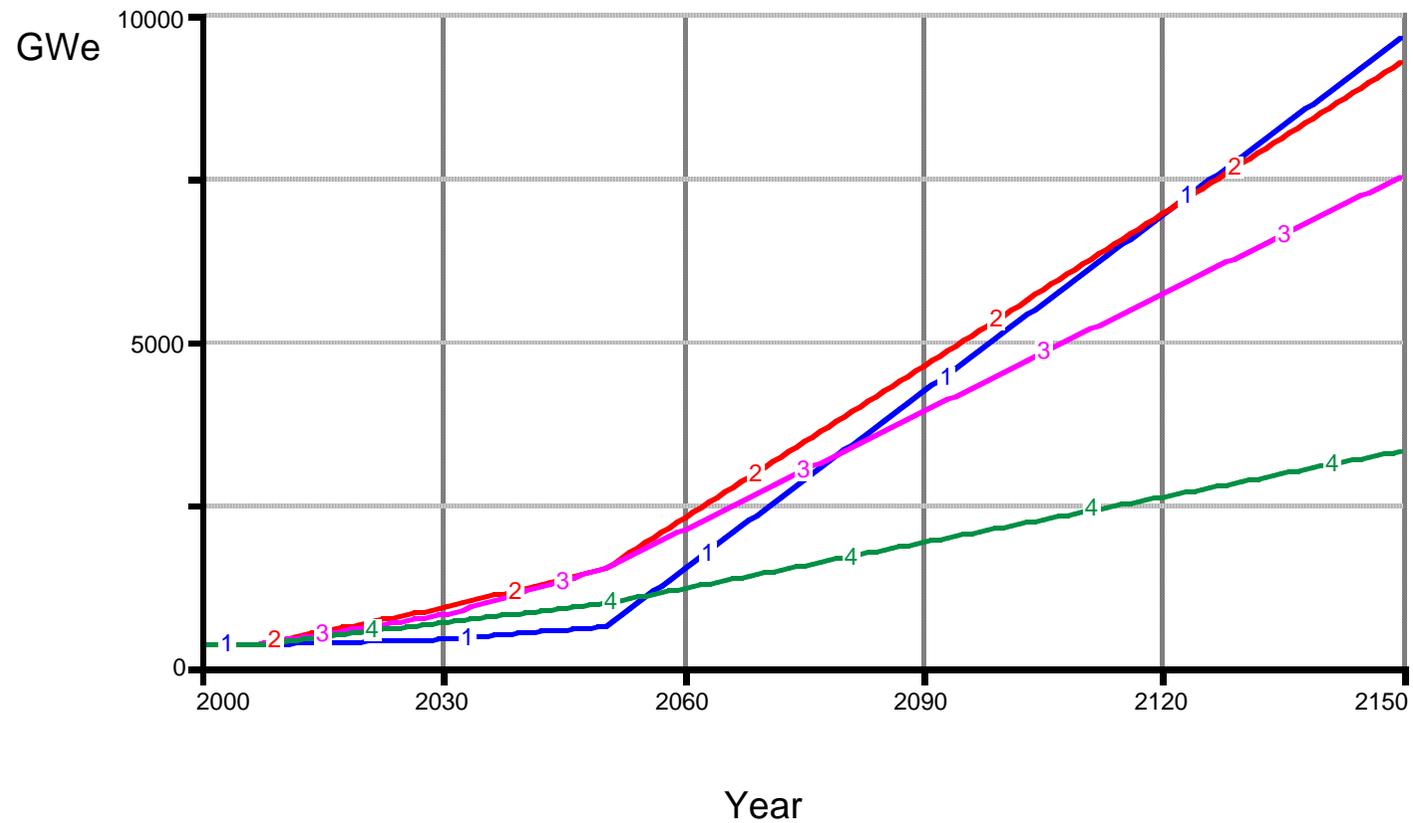
# Assumptions: Energy need and nuclear capacity (source CEA-Tésé)

**IIASA A2**

**IIASA A3**

**IIASA B**

**IIASA C2**

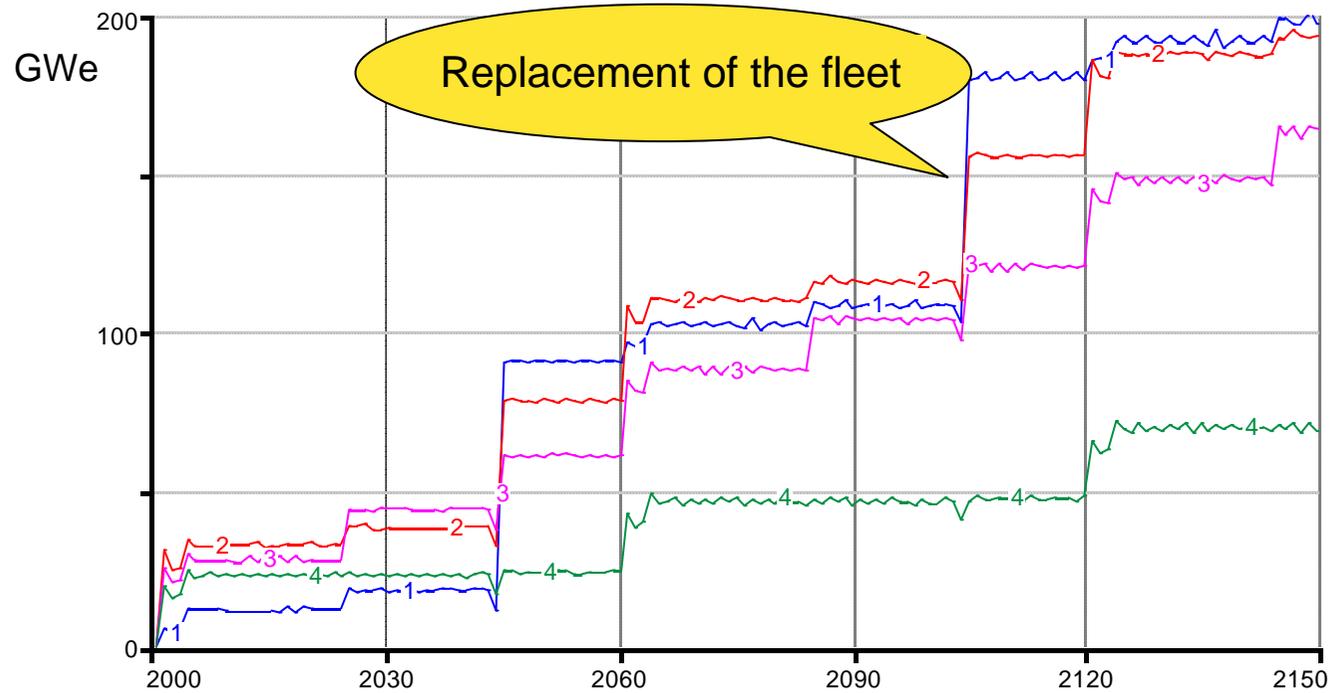


# Nuclear power to be installed (source CEA-

Tésé)

1 : IIASA A2 2 : IIASA A3 3 : IIASA B

4 : IIASA C2



Net power to be installed every year

## Ressources mondiales d'uranium (Livre rouge AEN 2010)

	Ressources conventionnelles ou classiques (MtU)			
	Identifiées		Non découvertes	
	Raisonnement assurées	Présumées	Pronostiquées	Spéculatives
< 40 \$/kg U	0,6	0,2	1,7	
40-80 \$/kg U	1,9	1,0		
80-130 \$/kg U	1,0	0,7		
130-260 \$/kg U	0,5	0,4		
Sous total	4,0	2,3	2,9	7,5
Total	6,3 MtU		10,4 MtU	

- **Ressources non classiques :**

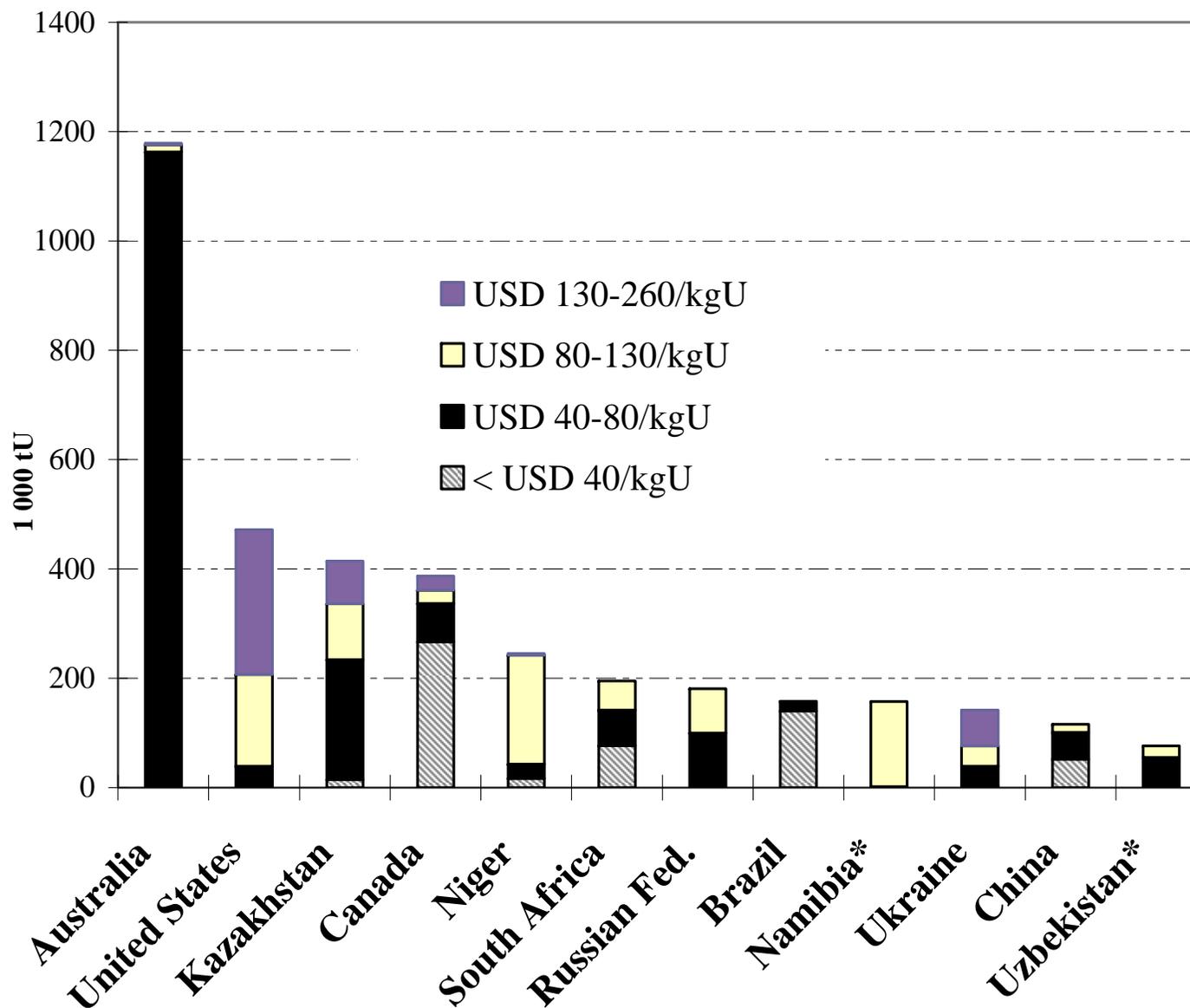
- Sous-produit d'importance secondaire (associé à des **phosphates**, des schistes noirs, etc...) **22 MtU** (> 100-120 \$/kgU)

- « Gisements » de faible teneur (**eau de mer...**) **4 000 MtU** (> 1000 \$/kgU ?)

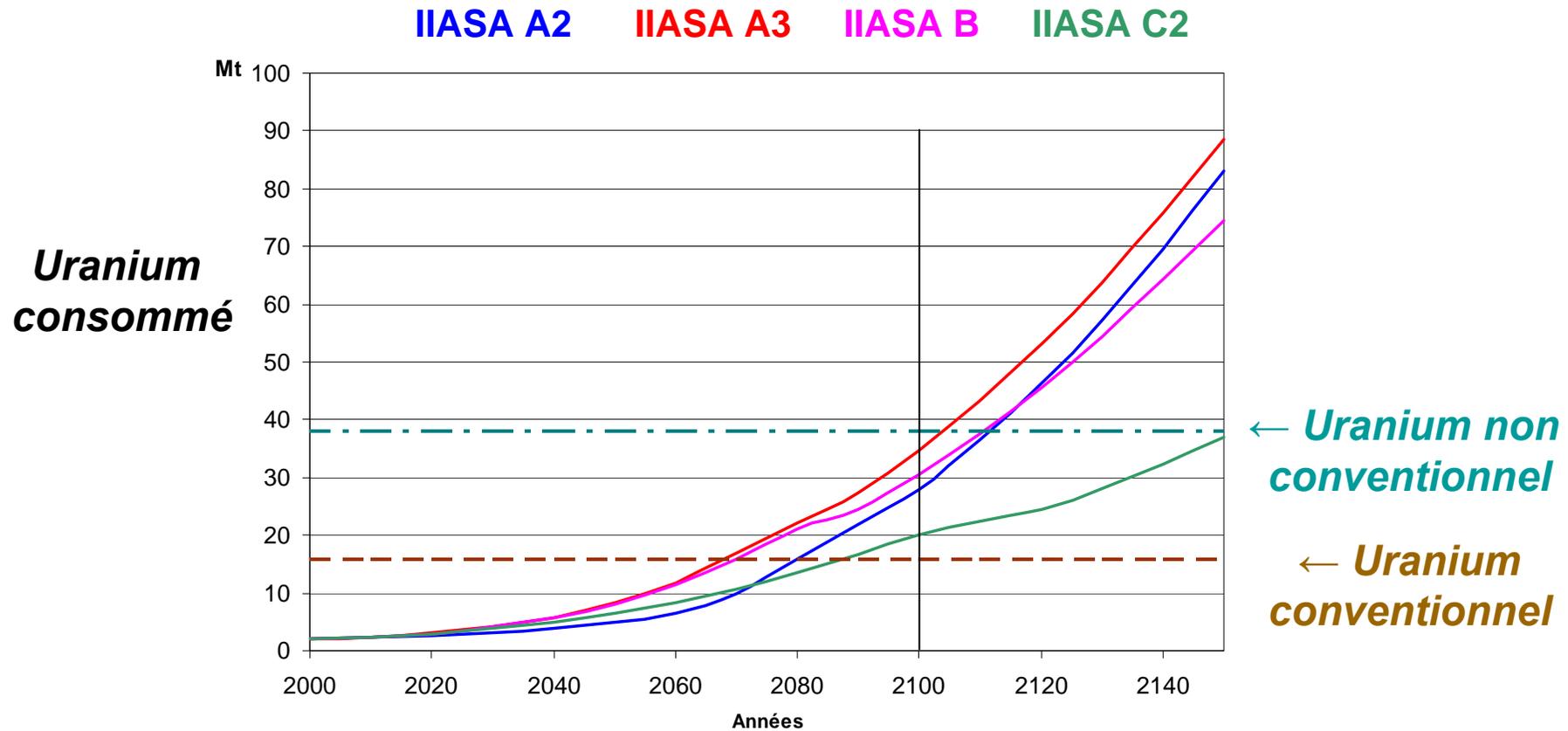
# Les ressources en uranium



## Les ressources raisonnablement assurées en uranium

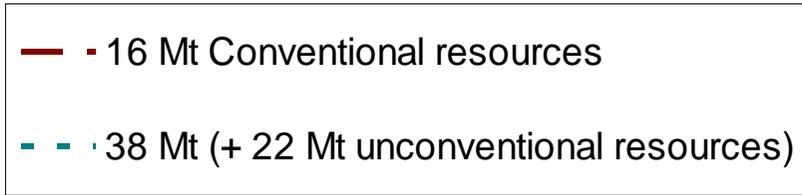
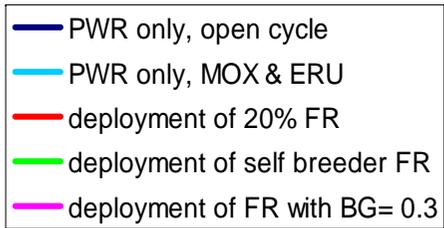


Installation de REP uniquement, sans recyclage (source CEA-Tésé)

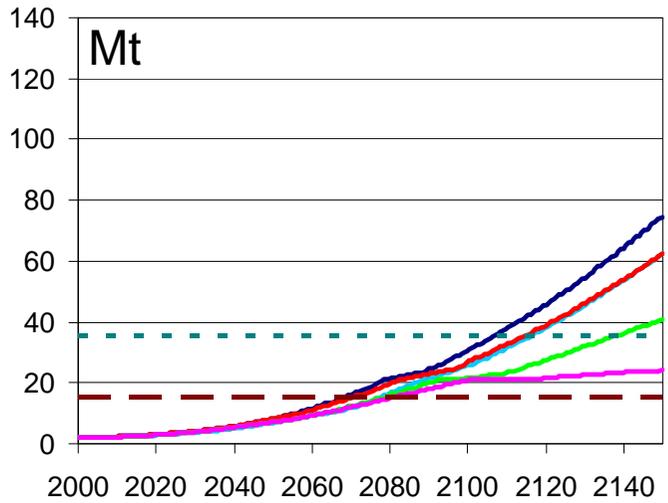


=> *Les réacteurs à neutrons rapides apparaissent nécessaires au développement durable du nucléaire*

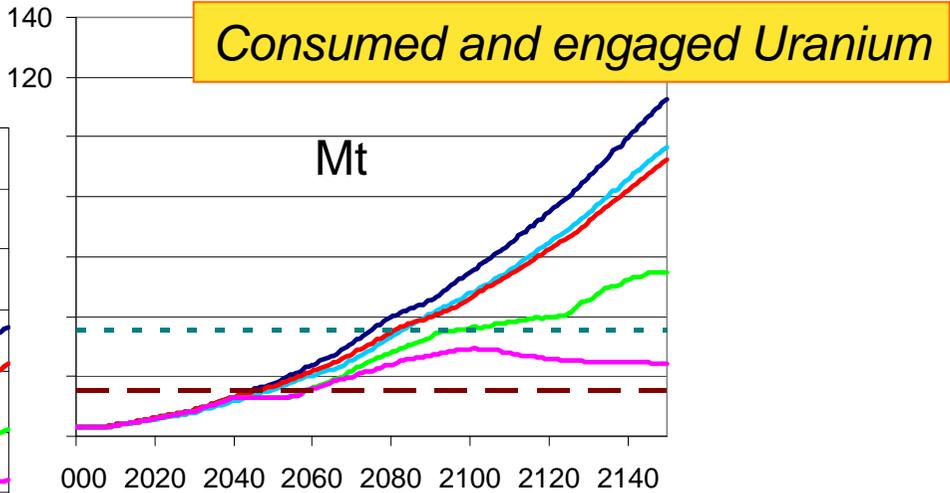
# IIASA B Scenario (source CEA-Tésé)



**Consumed Uranium**



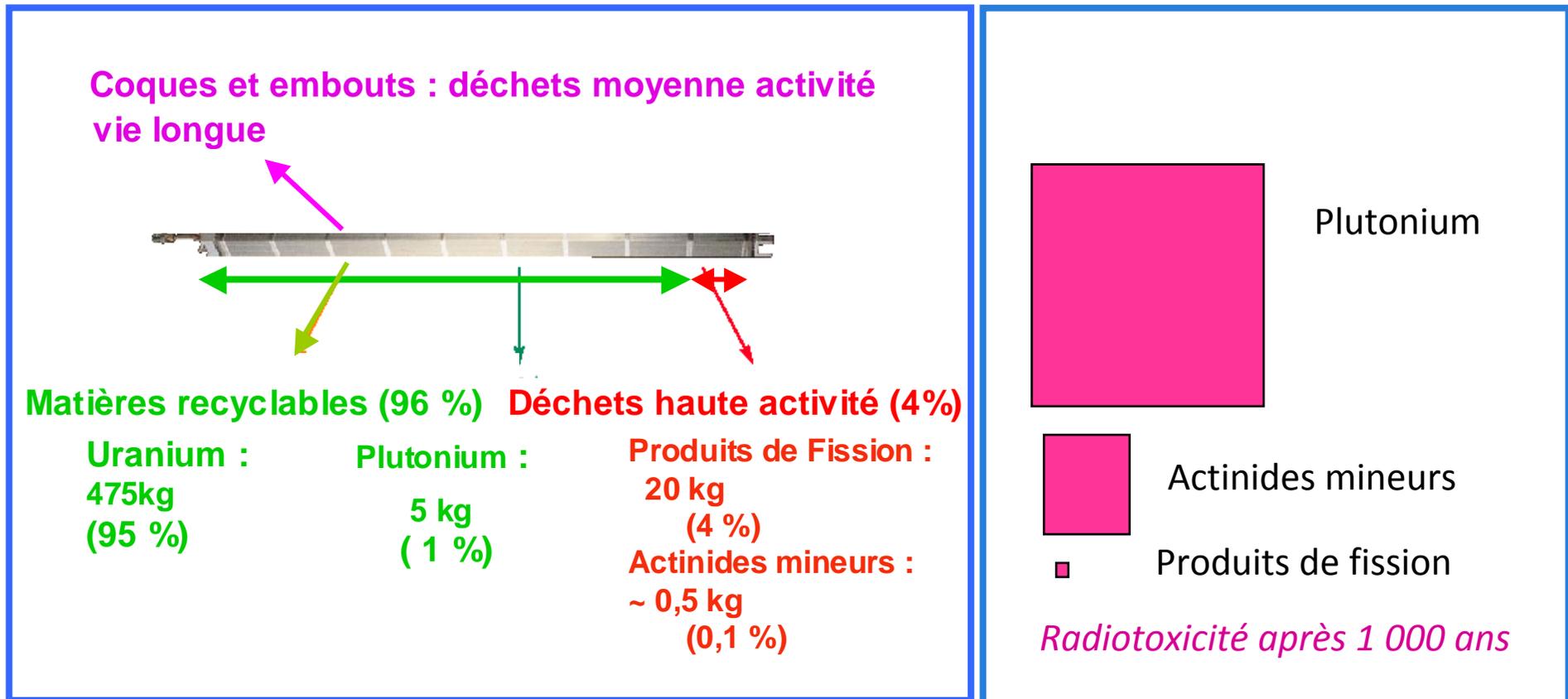
**Consumed and engaged Uranium**



**Engaged Uranium:** future uranium consumption for the already installed reactors for their remaining life time

## Composition du combustible utilisé

- Le plutonium constitue la plus grande partie de la radiotoxicité de longue durée du combustible utilisé,
- Il a un potentiel énergétique important



# Cycle fermé = recyclage

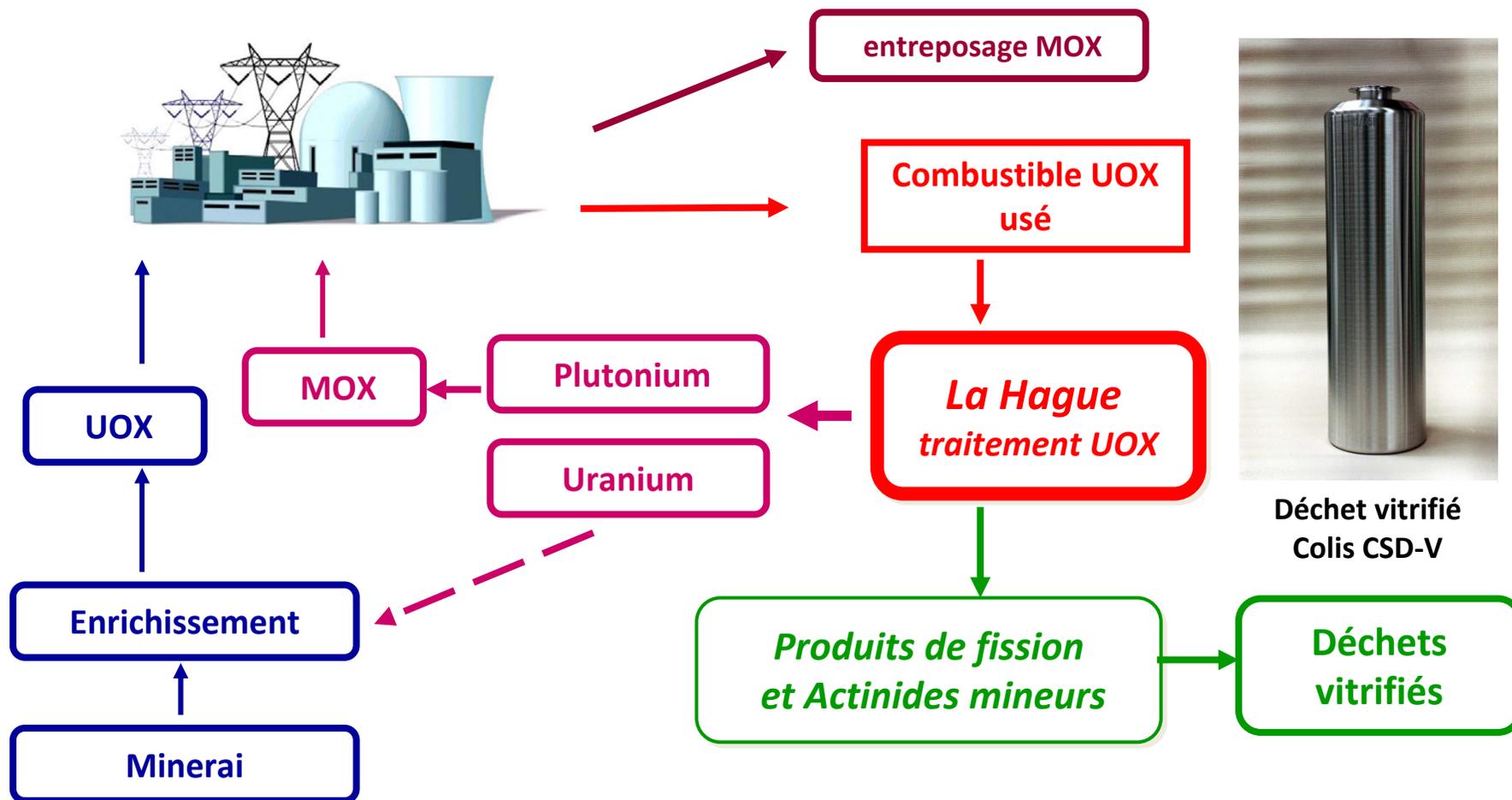
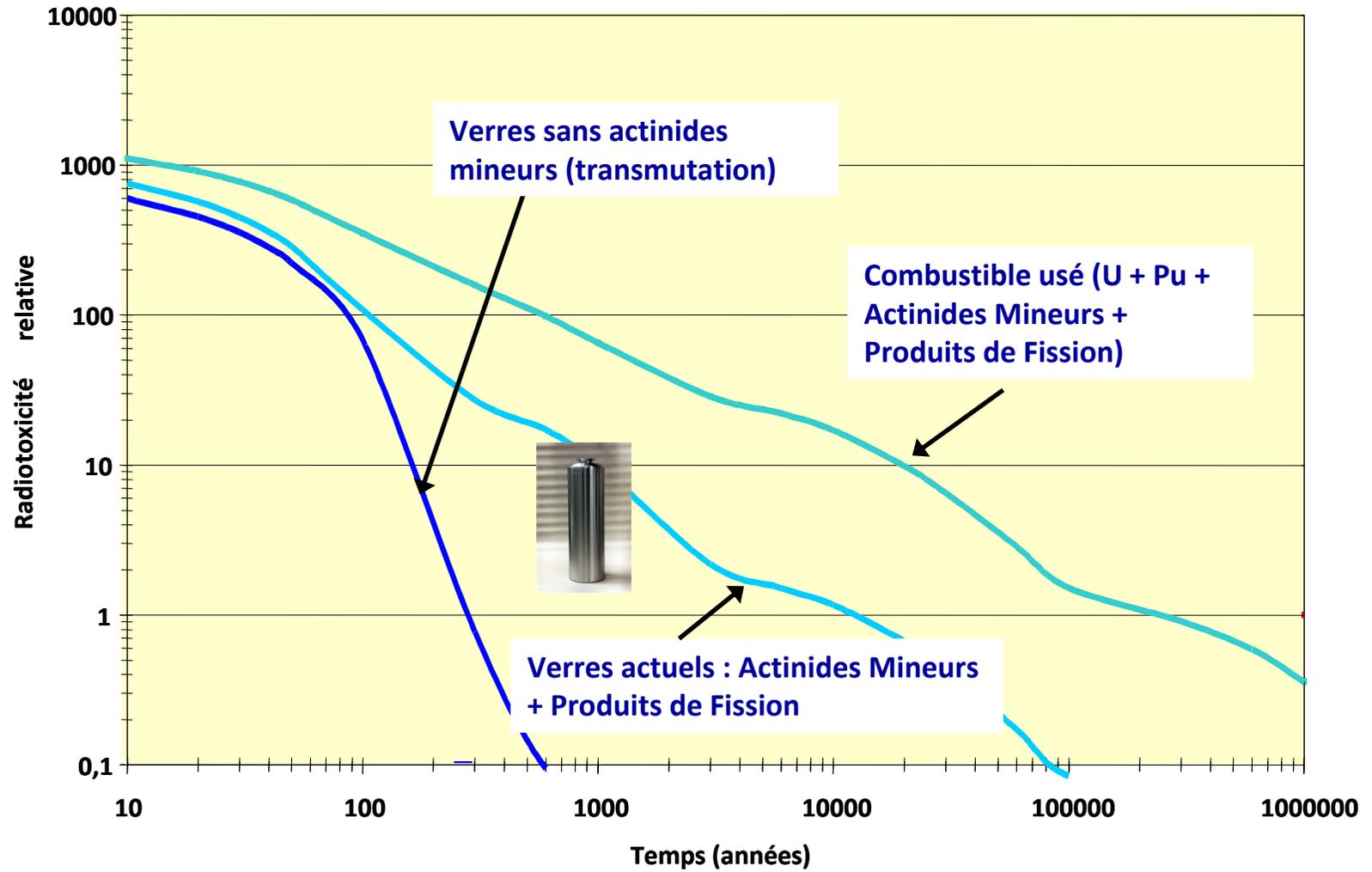


Schéma du cycle du combustible mis en œuvre industriellement en France

# Radiotoxicité des déchets en fonction du temps

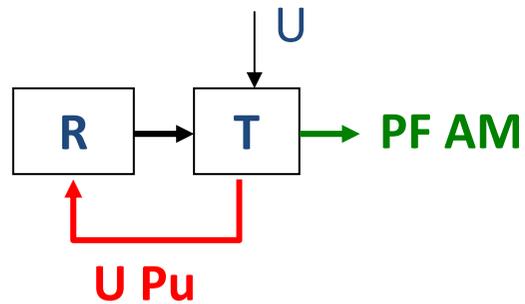


# Le cycle du combustible pour la 4<sup>ème</sup> génération

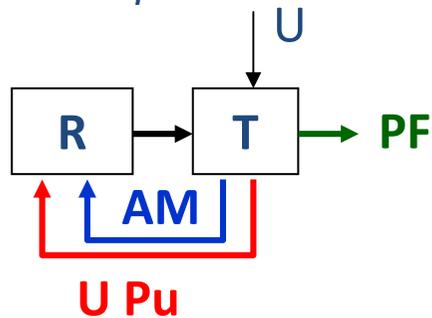
- **Économie des ressources**
- **Minimisation des déchets**
- **Résistance à la prolifération** (*objectifs Gen IV*)

50 fois plus d'électricité  
avec la même quantité  
d'uranium naturel

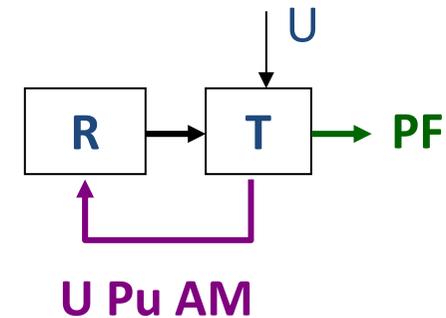
*Plusieurs options d'ambition croissante que le prototype doit permettre d'évaluer au plan technico-économique :*



Recyclage U Pu  
seuls



Recyclage  
hétérogène



Recyclage homogène

# Autres ruptures technologiques possibles

- **GEN IV en réacteurs rapides à gaz**
- **Cycle Thorium**
- **Réacteurs à fusion**

# Réacteurs à gaz

- **Avantages:**
  - Gaz inerte et transparent (He)
  - Permet des températures plus élevées
- **Inconvénients**
  - Absence d'expérience sur les RNR gaz
  - Fuites possibles
  - Pb matériaux (HT)
  - Sûreté neutronique
- **Histoire et projets**
  - HTR Fort StVrain
  - REDT

# Cycle Thorium

- **Avantage:**
  - Contourne l'Uranium une fois la filière lancée
- **Inconvénients:**
  - Th fertile et non fissile (=>U233)
  - Cycle à développer
- **Histoire et projet:**
  - Pays concernés: Inde, Norvège et Canada
  - Histoire:
  - Projets

# Réacteurs à fusion

- Physique connue mais non linéaire
- Symbolisme de l'union internationale (sommet de Genève 1985)
- Enormes défis technologiques (taille, températures, pressions, irradiations, déchets technologiques, régénération du T, évacuation puissance)
- Faisabilité physique acquise (JET+TOR)
- Faisabilité scientifique et technique 500MWth (ITER sans évacuation d'énergie): 2020
- Faisabilité industrielle DEMO (1500MWe) 2030
- Faisabilité économique au mieux 2040-2050

# Autres types de rupture

- **Nucléaire non uniquement électrogène:**
  - Chaleur
  - Production d'hydrogène
  - Production de biocarburants
- **Petites centrales embarquées (barge Rosatom, projet Flexblue de DCNS)**

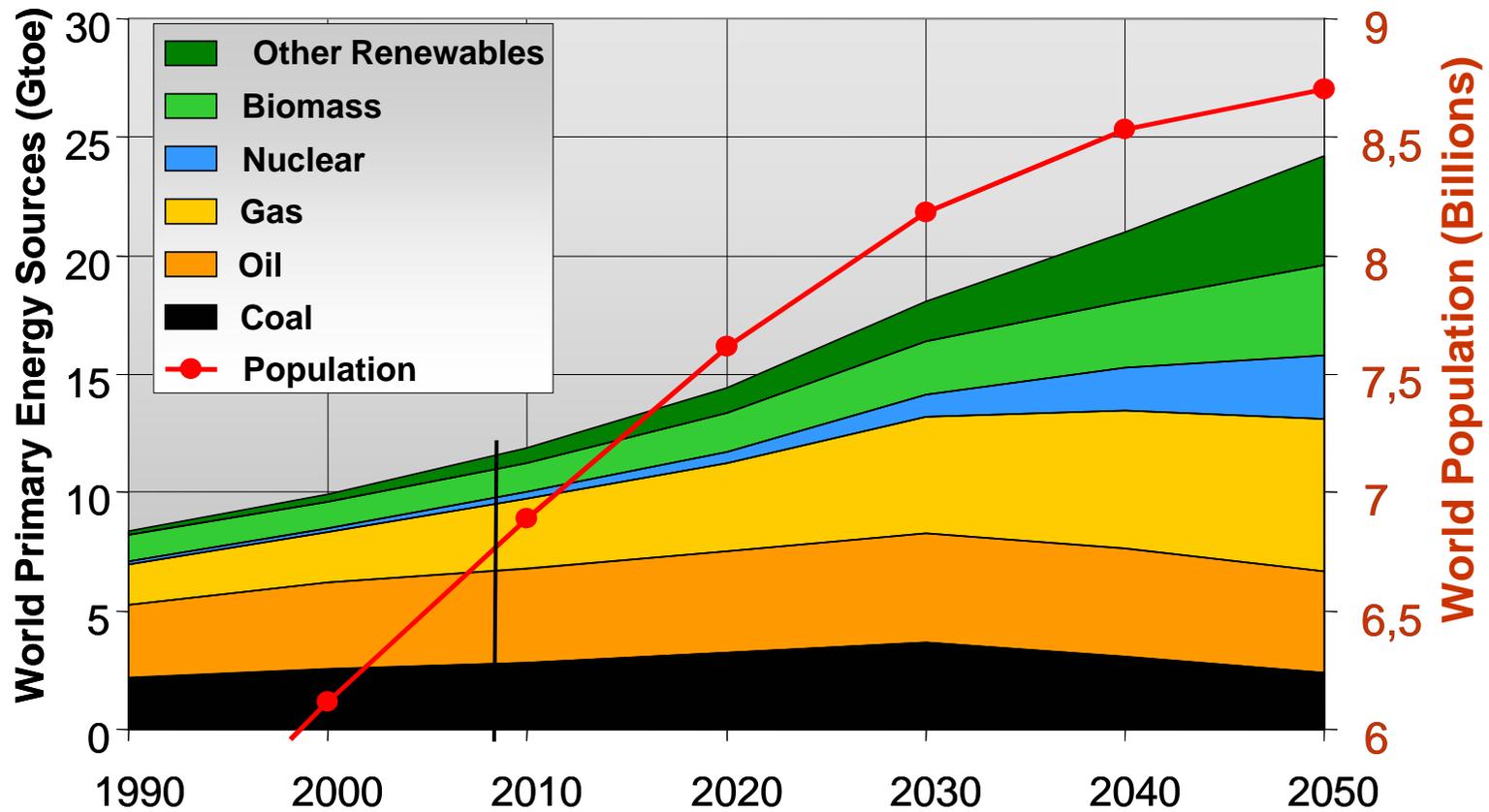
# Conclusions:

- **Technologie disponible aujourd'hui pour une production d'électricité bas carbone dans des conditions économiques compétitives**
- **Durabilité dépendant à la fois des succès dans l'implantation du nucléaire, des évolutions du marché de l'U. et du développement de GEN IV**
- **Les différences géopolitiques se conserveront. Avantage pour la France de disposer de GEN IV et de s'affranchir ainsi du pb de la disponibilité d'Uranium**

- ***Merci de votre attention....***

# World Energy demand increases

During last Century the world consumption has increased of a factor 16



Today, nearly 2 billion people without electricity

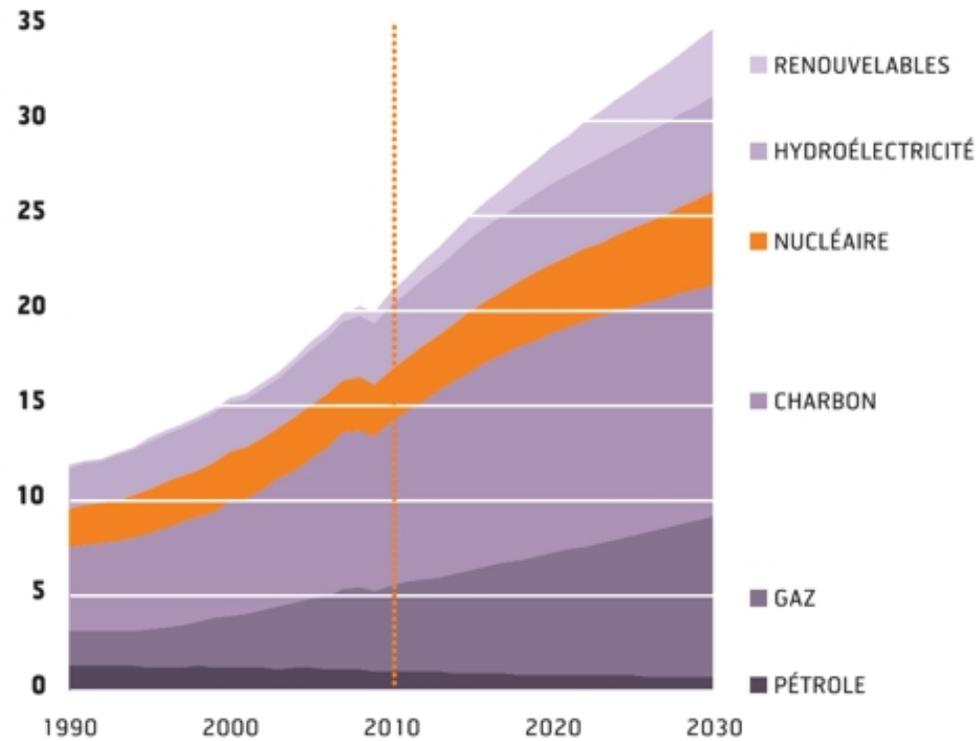


Source IEA : Energy to 2050

# Vision BP décembre 2011

## LA PRODUCTION MONDIALE D'ÉLECTRICITÉ VUE PAR BP

EN MILLIERS DE TWH



IDÉ / SOURCE : BP

## Les enjeux du proto Sodium, ASTRID

**Enjeu déchets** : R&D pour la transmutation en réponse à la loi du 28 juin 2006

→ **un réacteur capable de transmuter les actinides mineurs**

**Enjeu Ressources / Compétitivité** : incertitudes sur les réserves, sur le développement du parc de 3<sup>ème</sup> génération, mais le multi-recyclage du Pu sera dans un élément de détente du marché et de sécurité d'approvisionnement

→ **Un réacteur plus sûr, plus économique, plus facile à exploiter, capable de fonctionner à partir de l'U appauvri**

**Ces deux enjeux sont liés** : par exemple, combustible MOX utilisé

**Enjeu de leadership international** : L'Inde et la Russie construisent des réacteurs « pré-commerciaux » qui vont diverger en 2010-2012, ils sont centrés sur l'enjeu « ressources / compétitivité ».

→ **Disposer d'un produit compétitif pour le marché futur**

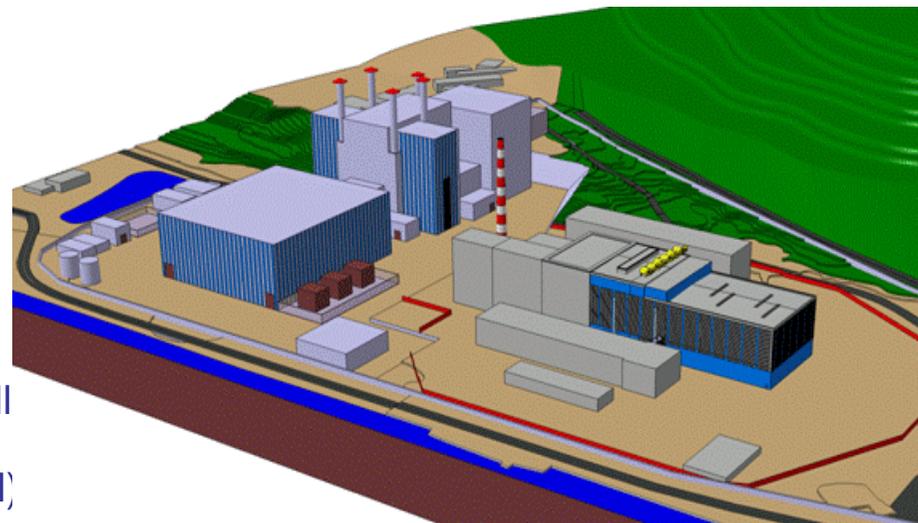
## ***Cahier des charges du prototype INDUSTRIEL RNR-Na***

1. **Faisabilité technique est acquise**
2. **Enjeux **Filière** : Sûreté (meilleure que Gen III pour l'ASN) ;  
Exploitabilité (demande forte d'EDF suite au REX RNR-Na) ;  
Compétitivité**
3. **Les réponses à ces enjeux, et en particulier la sûreté ne  
peuvent être démontrés que dans un prototype électrogène de  
puissance 300 – 600 MWé**
4. **Économie des ressources : Isogénération**
5. **Gestion des déchets :  
Multirecyclage Pu  
Recyclage AM**

### **6. Des installations du cycle associées sont nécessaires**

→ Possibilités d'irradiations à l'échelle  
de l'assemblage (combustibles  
avancés, combustibles porteurs d'AM)

**Besoin Expérimental**



## Les prototypes et inst ASTRID

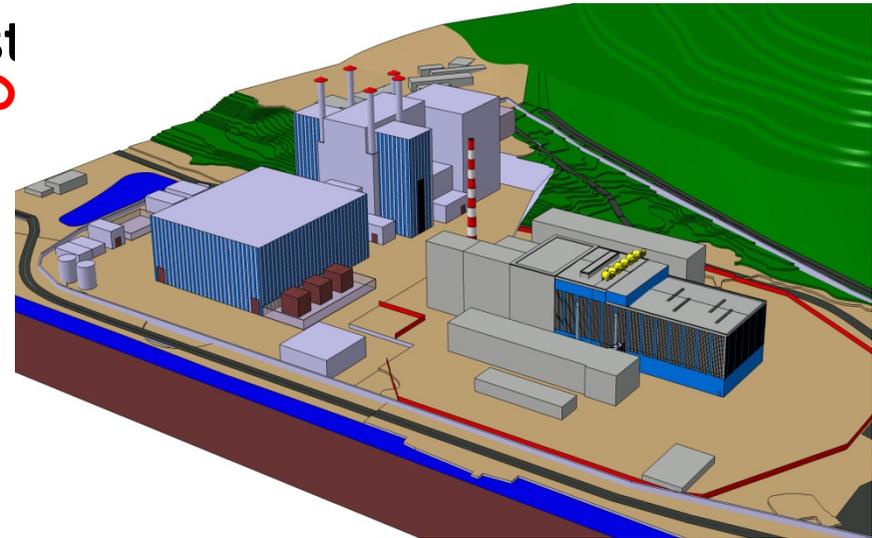
### En référence le proto RNR sodium :

600-1500 MW thermiques

250- 600 MW électriques

→ Précurseur de tête de série,

→ Outil d'irradiation



### Pour le faire fonctionner : l'AFC (Atelier Fabr. Combustible)

Combustibles MOX (10 t /an), La Hague

### Pour la R&D transmutation : l'AFM (Atelier Fabr. Micropilote)

Combustibles avec A.M. (10-100 kg/an), La Hague

### Une filière alternative et avancée : RNR gaz

ALLEGRO , 50 – 70 MW thermiques, en Europe

**ALLEGRO**

