

Pour célébrer les 150 ans de l'École Centrale de Lyon



Cycle : Energie : quelles nouvelles techniques ?

Les avancées du nucléaire : nouvelle génération de réacteurs et traitement des déchets

par Philippe Garderet, directeur scientifique du groupe AREVA



www.efferve-sciences.ec-lyon.fr





AREVA

Energie, quelles nouvelles techniques ?

EFFERVE'SCIENCES

Les perspectives de développement de l'énergie nucléaire

Philippe GARDERET
Directeur Scientifique

AREVA

Lyon, 13 novembre 2007

- ▶ **Energie et développement**
- ▶ **Energie et environnement**
- ▶ **Quelques éléments de physique**
- ▶ **Quels risques et comment les maîtriser**
- ▶ **Le cycle industriel de l'énergie nucléaire**
- ▶ **Quelles perspectives commerciales pour l'énergie nucléaire**

Impératifs de développement

et ... incitation à la sobriété

- ▶ **Près de 2 milliards d'habitants de la planète souffrent du manque d'énergie**
- ▶ **Là où la croissance est dynamique, le besoin en énergie est vital (pas négociable pour les pays en développement !)**
- ▶ **Dans les pays développés la sobriété devrait s'imposer (-20% d'économie est l'objectif que s'est fixée l'UE pour 2020)**
- ▶ **Partout il y a place pour de l'innovation au service de l'efficacité**

- ▶ En 2006 près d'un quart de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité et en 2030 il y en aura encore 1,5 milliards
- ▶ Il y aura 60 % de population urbaine dès 2030
- ▶ Corrélation entre indice de développement humain et énergie : un classement très contrasté

◆ 1	Norvège	0,965	25300 kWh/tête
◆ 16	France	0,942	8300
◆ 65	Russie	0,797	6300
◆ 126	Inde	0,611	600

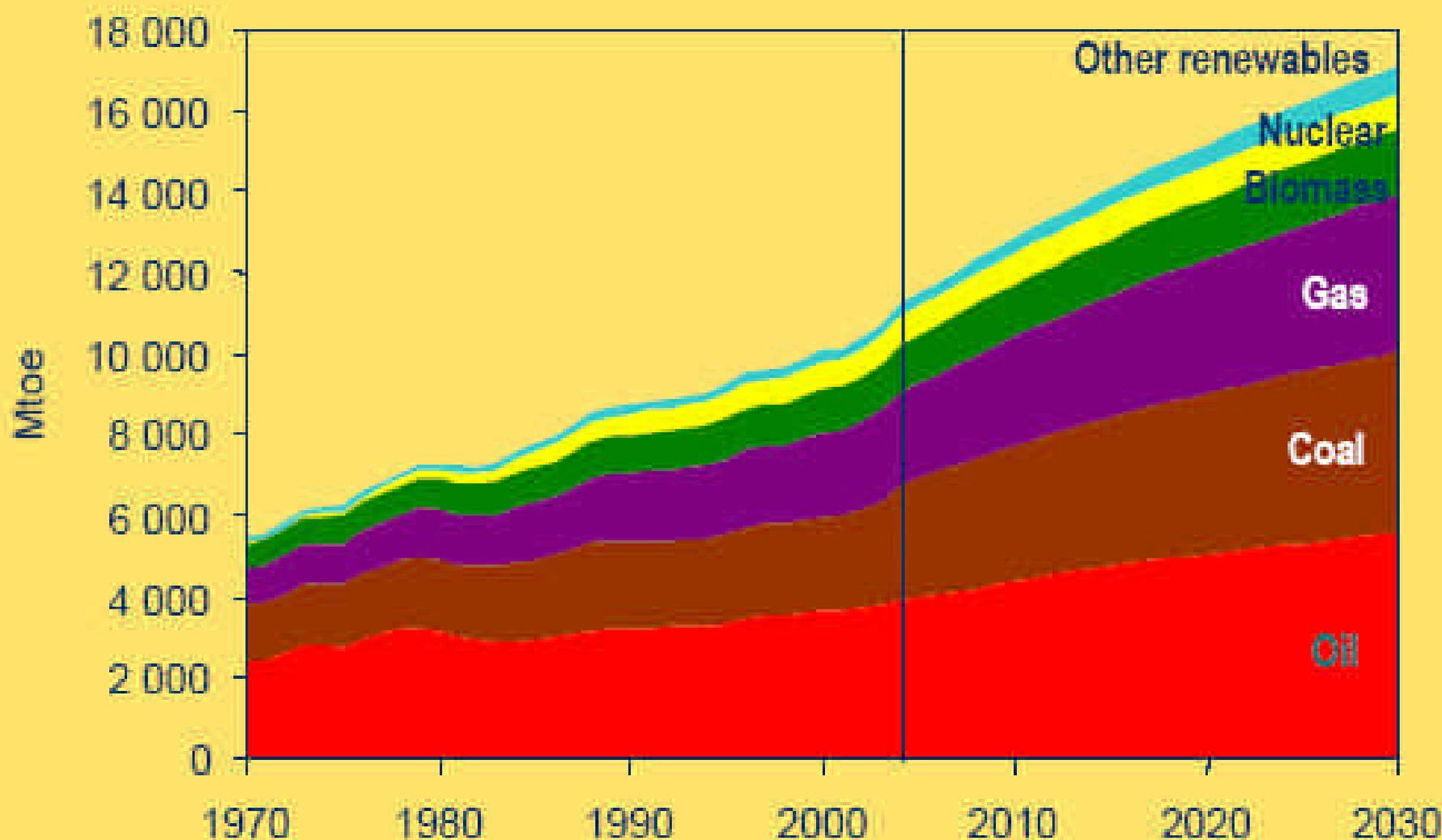
Trois défis énergétiques pour la planète

Le développement économique

Le devenir des combustibles fossiles

La réduction des gaz à effet de serre

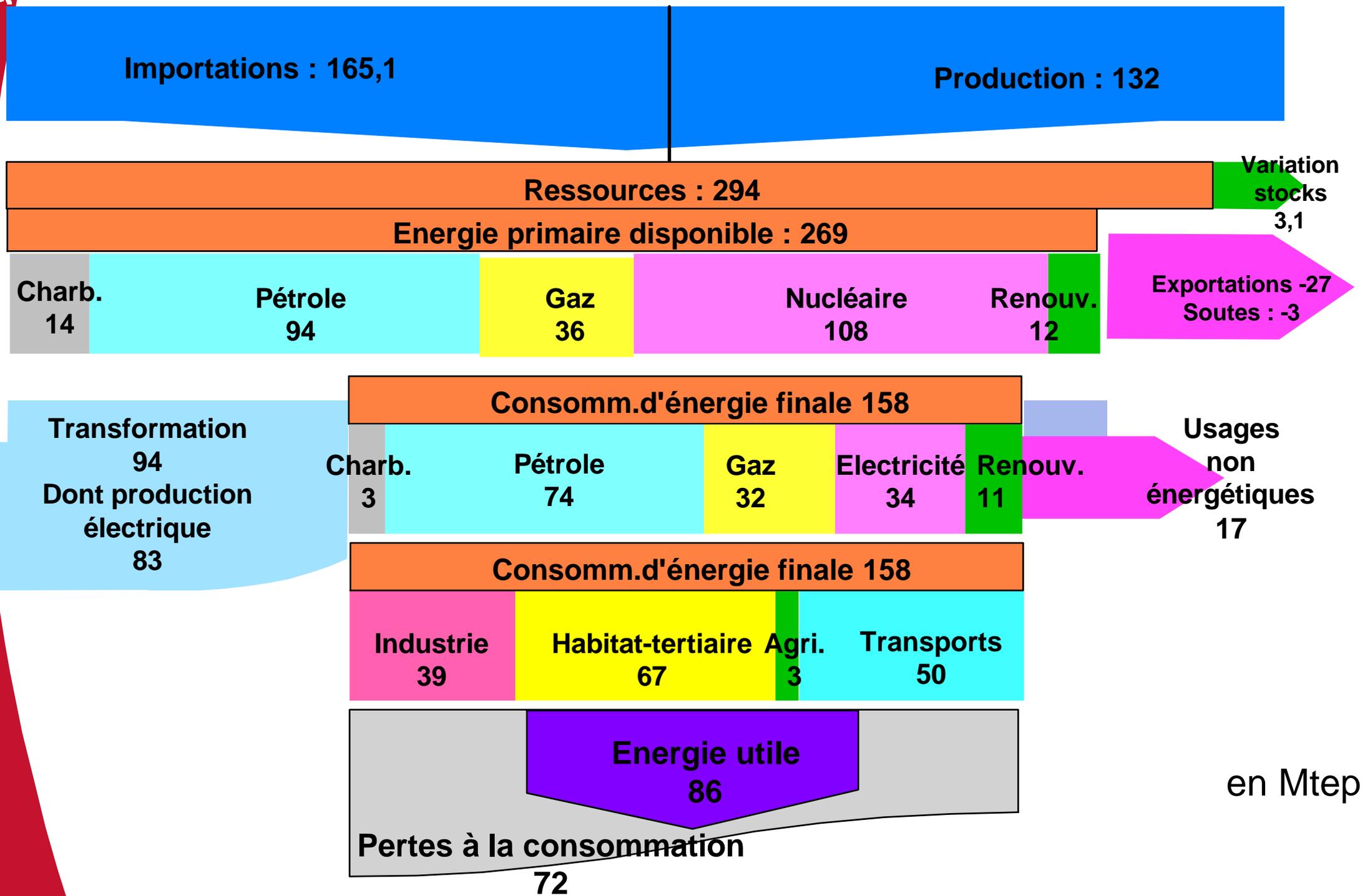
The Reference Scenario: World Primary Energy Demand



Global demand grows by more than half over the next quarter of a century, with coal demand increasing most in absolute terms

- ▶ **Toutes les études prospectives conduisent à des scénarios de croissance des besoins énergétiques pour le siècle prochain**
 - ◆ la prolongation des tendances actuelles n'est pas soutenable (x 5)
 - ◆ solidarité et sobriété volontaristes conduisent quand même à x 2
 - ◆ le scénario moyen « réaliste ? » conduit à x 3
- ▶ **Pourtant tous les scénarios intègrent une meilleure efficacité énergétique et la maîtrise de la demande**
- ▶ **La question épineuse reste le transport,**

plus facile pour la production d'électricité en base qui peut (mais progressivement) basculer du fossile au nucléaire,



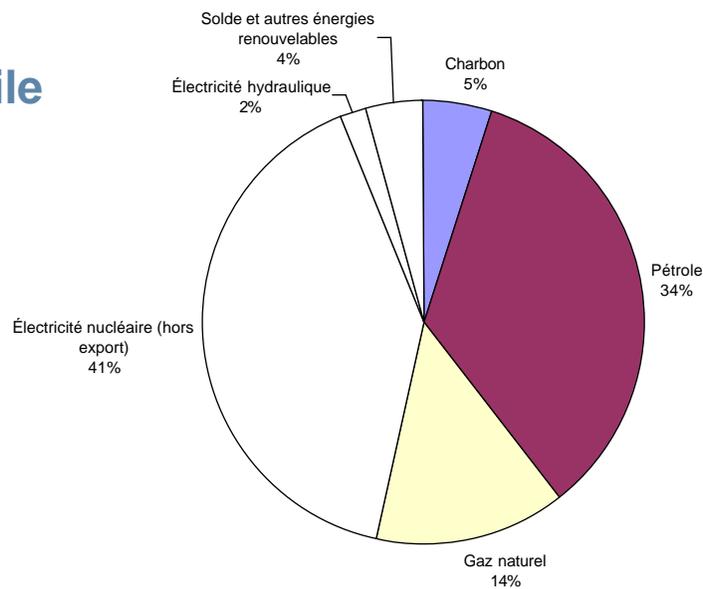
en Mtep

Les flux en France en 2000

Rendement global : 34 %

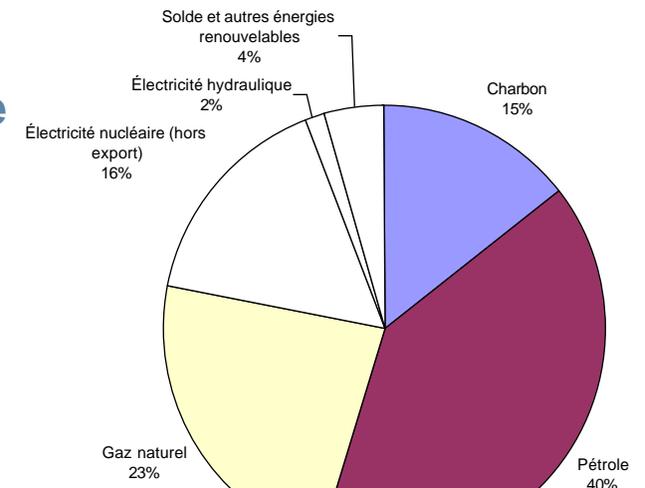
France: 266 Mtep

53% fossile



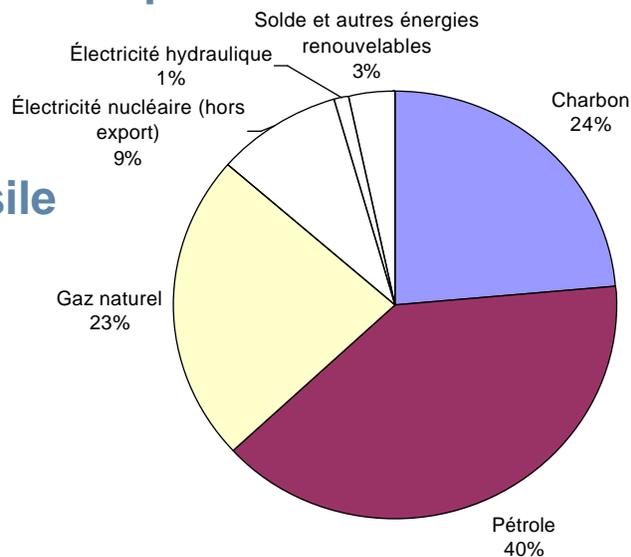
UE: 1 489 Mtep

78% fossile



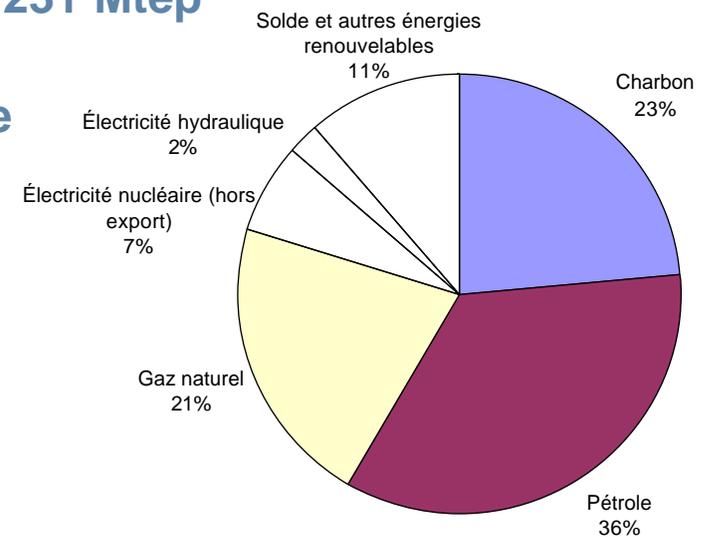
USA: 2 290 Mtep

87% fossile

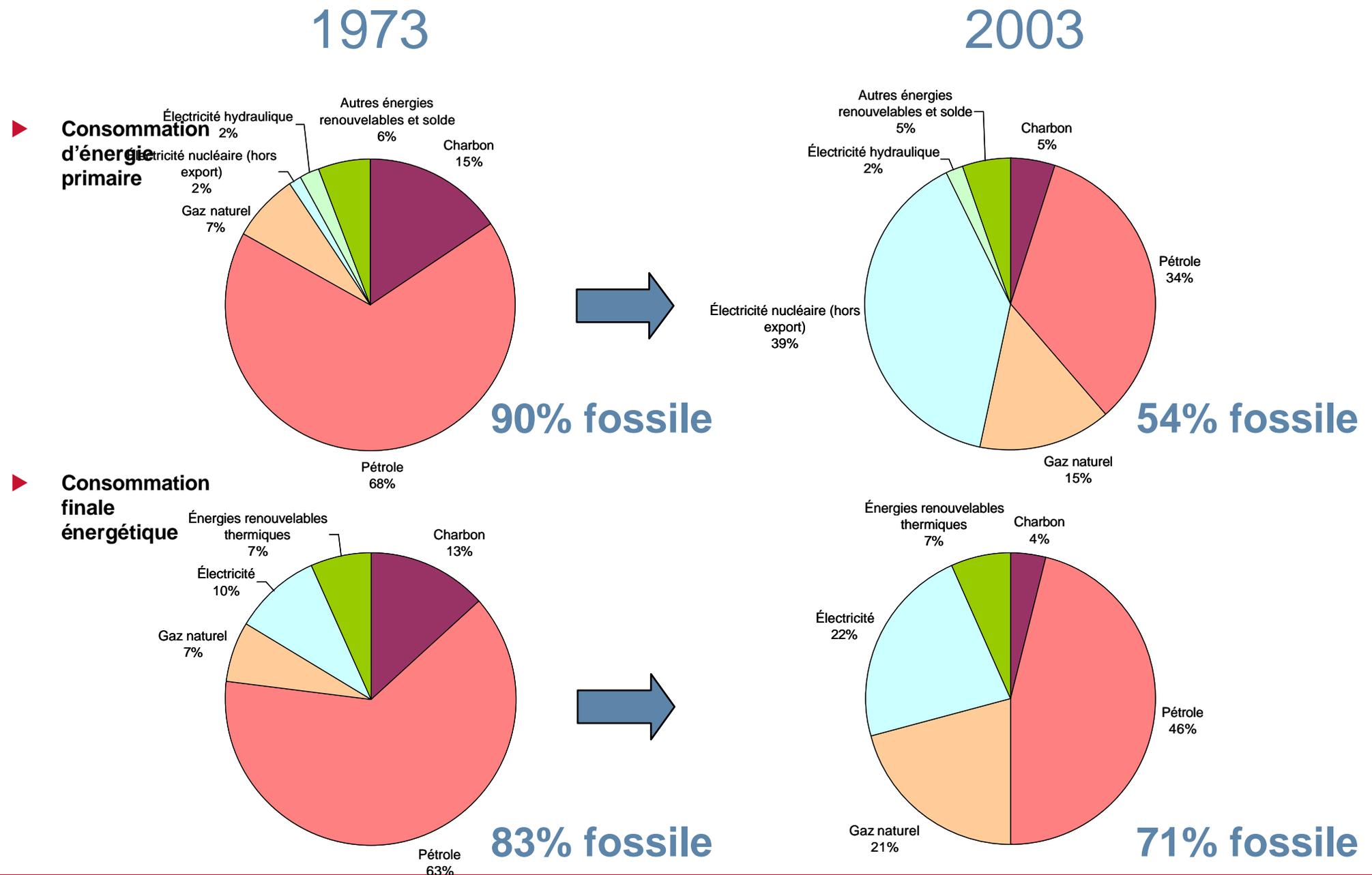


Monde: 10 231 Mtep

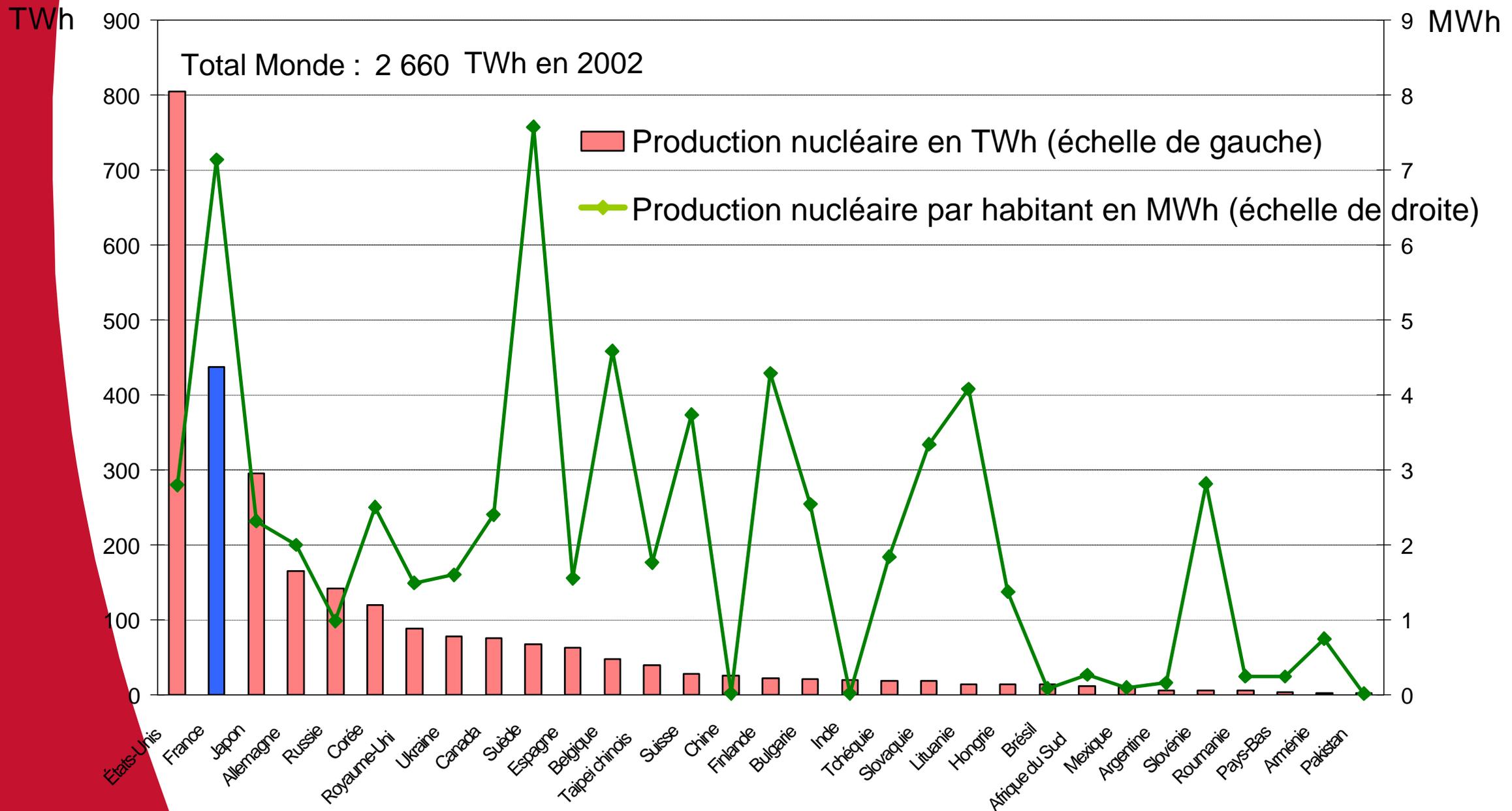
80% fossile



Forte baisse de la part « fossile » du mix énergétique français depuis 1973



La France est le 2^{ème} producteur d'électricité nucléaire au Monde



Source: AIE, pour 2002.

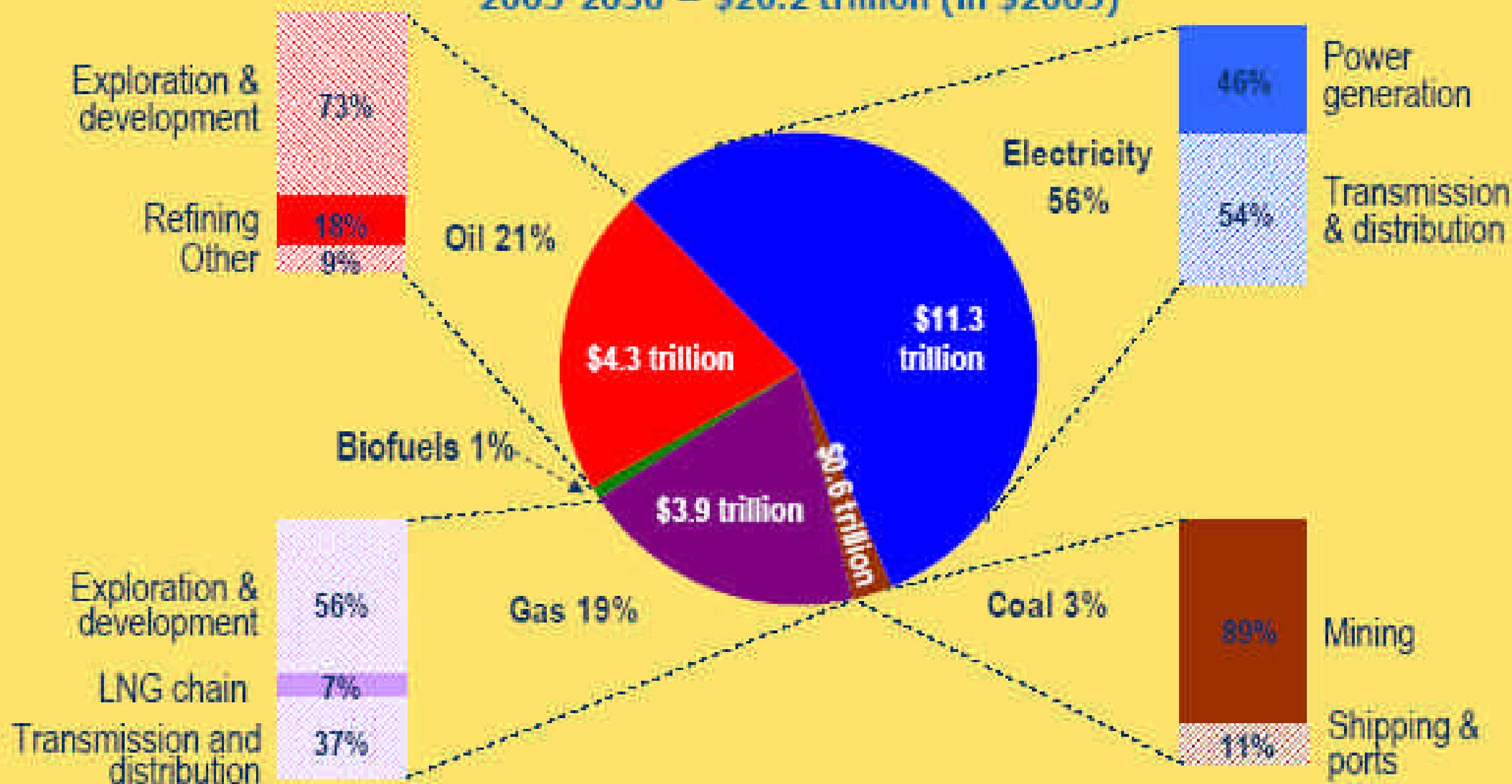
- ▶ **Partout il va falloir investir massivement**
 - ◆ **pour installer de nouvelles capacités de production**
 - ◆ **pour renouveler les installations en fin de vie**
 - ◆ **pour favoriser des substitutions (moins de CO₂)**

- ▶ **Les investissements portent à la fois sur la production et sur la transmission et distribution**

The Reference Scenario: Investment



**Cumulative Investment in Energy-Supply Infrastructure,
2005-2030 = \$20.2 trillion (in \$2005)**



Just over half of all investment needs to 2030 are in developing countries, 18% in China alone

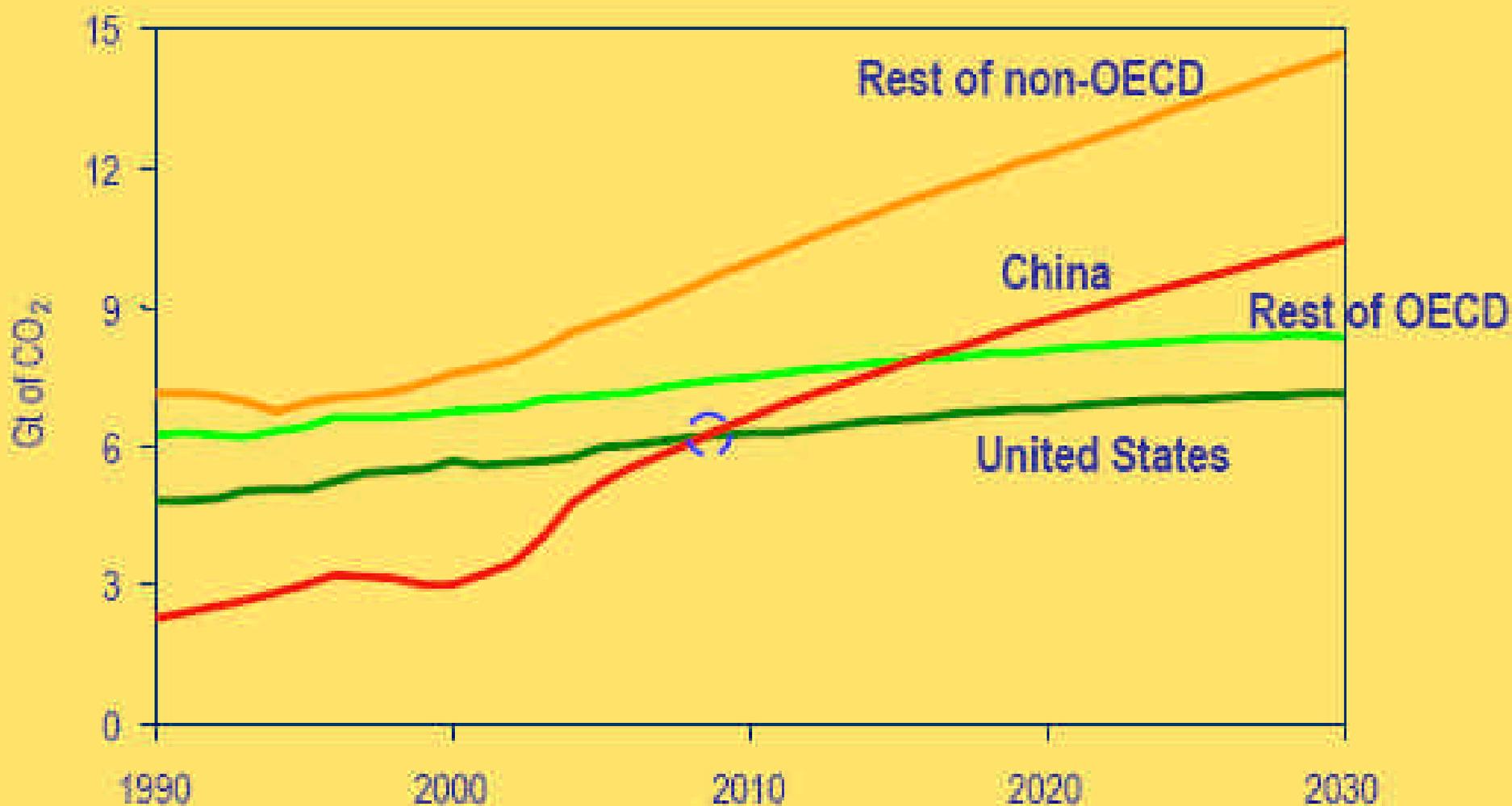
▶ **Consensus des scientifiques sur l'impact sur le climat des activités humaines**

▶ **Qui émet quoi**

◆ Etats-Unis	19,7	T CO2/hab
◆ Allemagne	10,3	
◆ France	6,2	
◆ Suède	5,8	

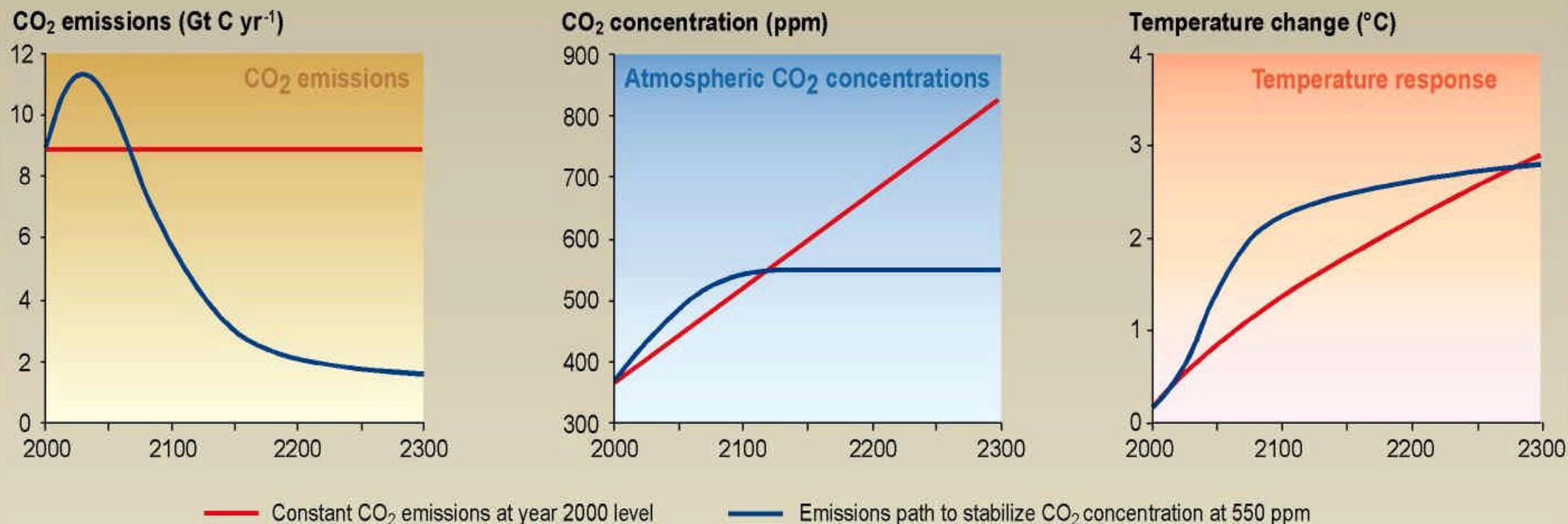
▶ **Entre production nucléaire et mauvais charbon le facteur d'émission de gaz à effet de serre est 1000**

Reference Scenario: CO₂ emissions by Region



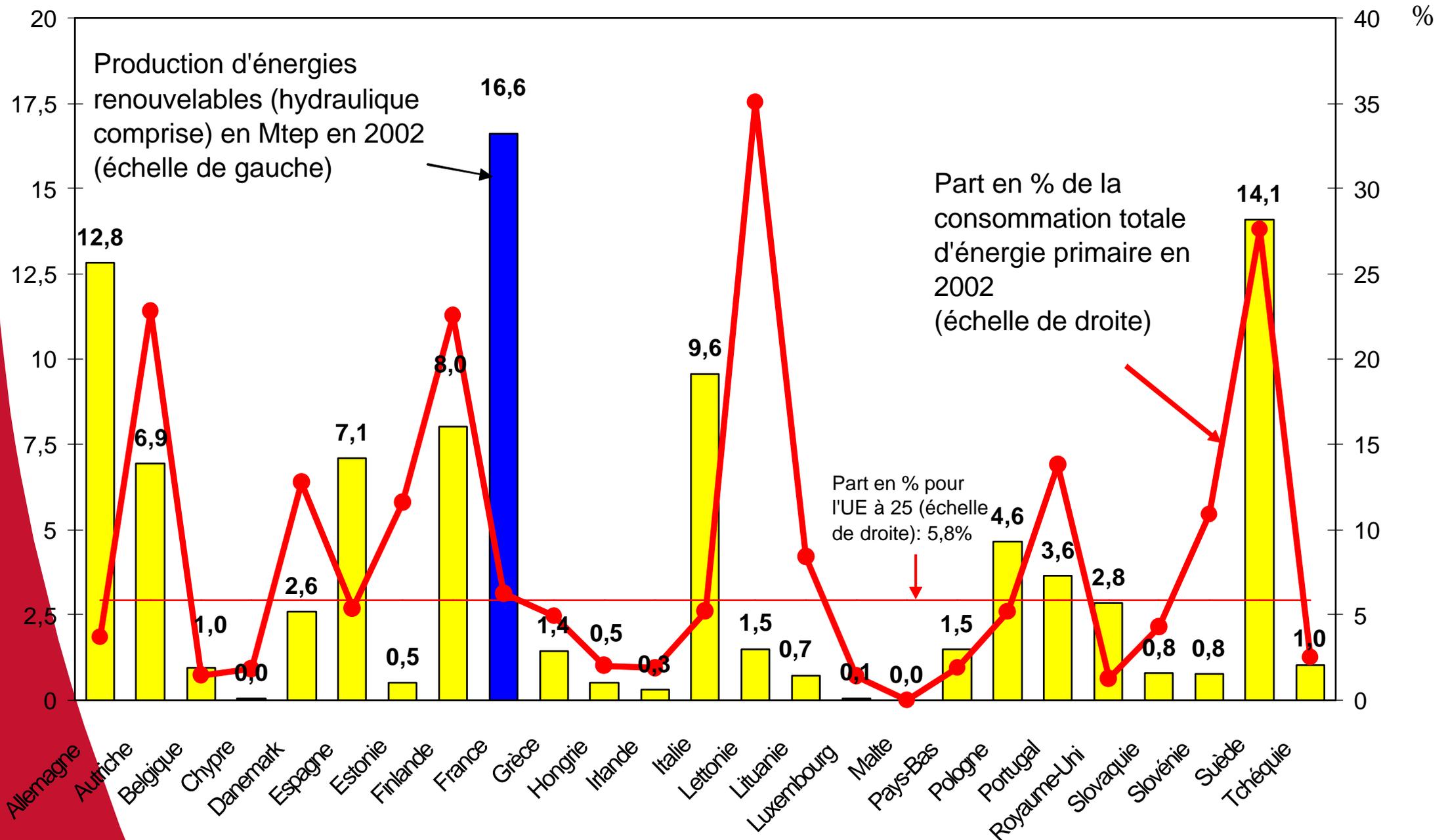
CO₂ emissions increase by 14.3 Gt, or 55% China overtakes the United States as the world's biggest emitter before 2010

Impact of stabilizing emissions versus stabilizing concentrations of CO₂



SYR - FIGURE 5-2

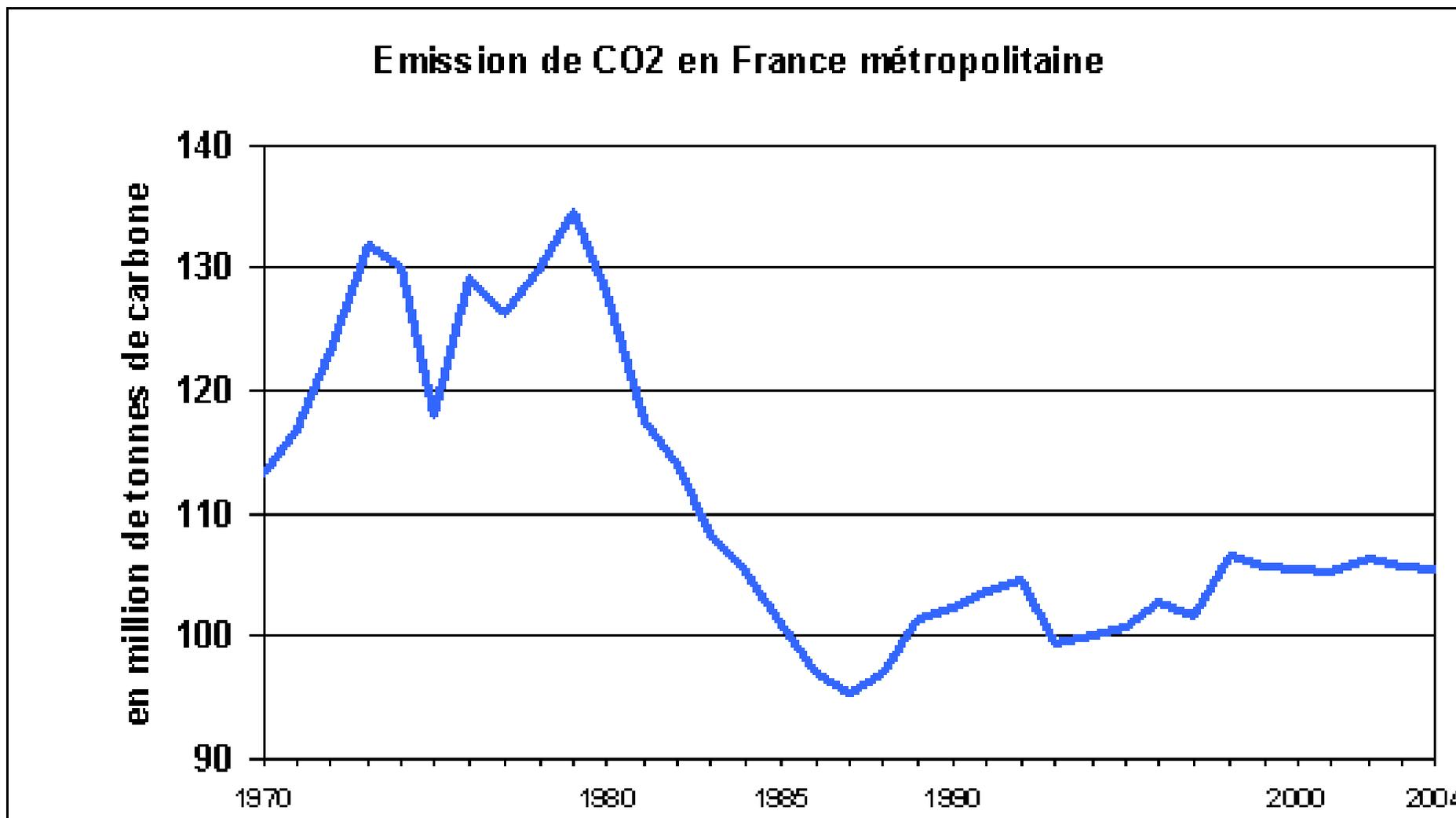
Mtep



L'utilisation de l'énergie nucléaire a permis à la France de réduire drastiquement ses émissions de CO2 depuis 1980

Diminution de près de 20% depuis 1980

alors que l'accroissement de consommation d'énergie a été de +46% sur la même durée



Evolution des émissions de CO2 in France

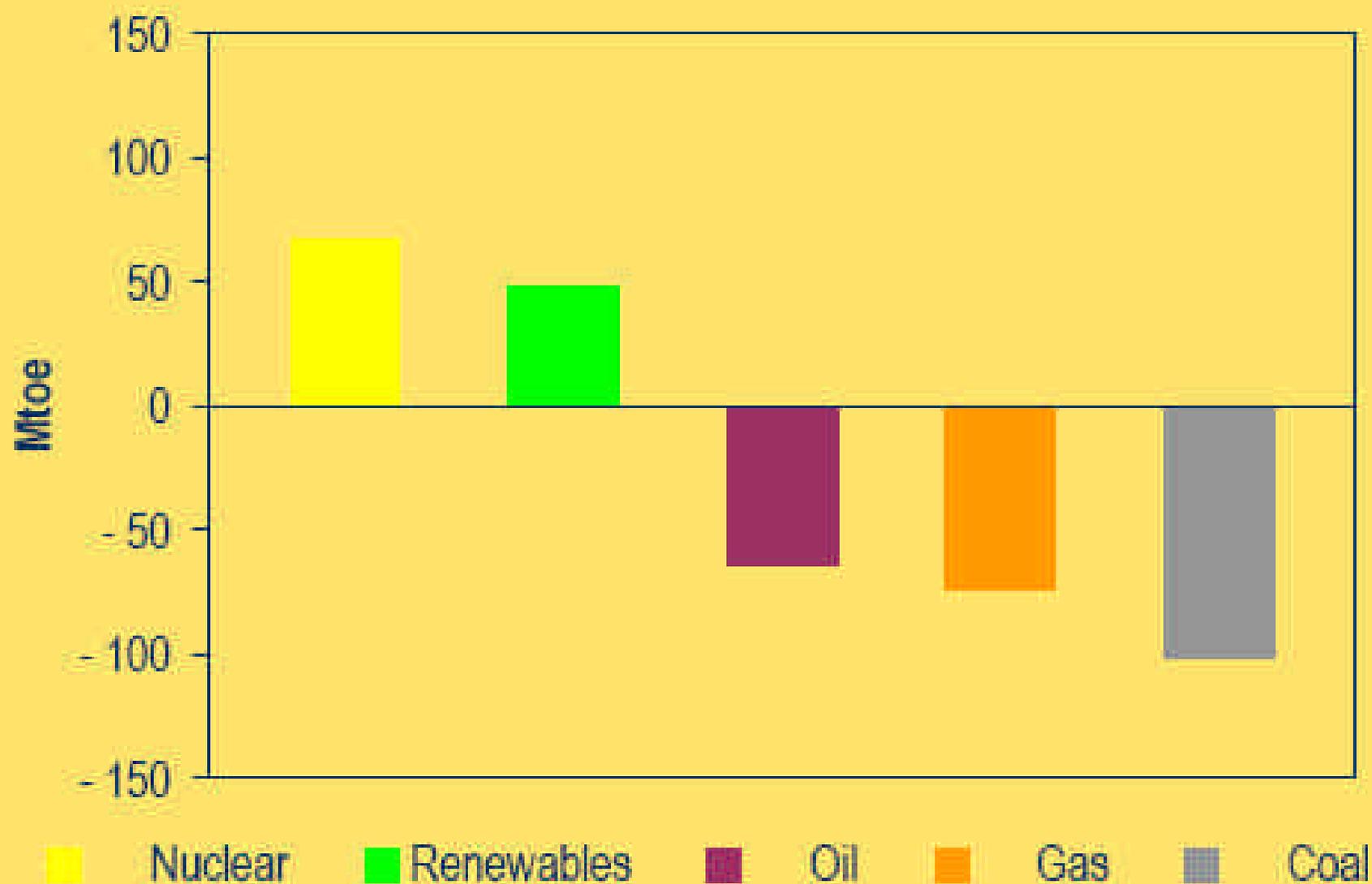
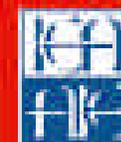
Y a-t-il des scénarios vertueux alternatifs ?

- ▶ **Mécanismes financiers « Post Kyoto » and incitations (coût CO2)**
- ▶ **Politiques coercitives d'économies d'énergie (bâtiment, transport)**
- ▶ **Avantages financiers pour les renouvelables**
- ▶ **Soutien au développement des Bio carburants (contreversé)**

et ...

- ▶ **Reconnaître le « nucléaire » comme partie intégrante de la solution
au moins pour la production d'électricité en base**

European Union Alternative Policy Scenario Changes in Primary Energy Demand in 2030



Demand for fossil fuel is reduced by 16% in 2030, while use of renewables and nuclear grows

Objectifs pour l'UE

5 fois 20

20% de sobriété

20% de renouvelables

pour

20% de moins de CO2

en

20 20

- ▶ **La physique nucléaire est une discipline du XXème siècle**
 - ◆ **théorie nouvelle (pas encore tout à fait stabilisée)**
 - ◆ **vite expérimentée partout dans le monde**
 - ◆ **applications nombreuses (à commencer par les applications de défense)**

- ▶ **La fission est dans son principe facile à mettre en œuvre, mais**
 - ◆ **nécessite de nombreuses précautions pour les expérimentateurs**
 - ◆ **réclame beaucoup de technologies pour une exploitation industrielle**
 - ◆ **exige une organisation méticuleuse ...et un contrôle sans complaisance**

- ▶ **Impose un « droit d'entrée » coûteux**



LE RESULTAT

1 – deux "morceaux" : les produits de fission (pf)

2 – plusieurs neutrons : en moyenne $n = 2,5$

3 – de "l'énergie" ($E = mc^2$)

L'énergie de fission (1/2)

(exprimée en ev : 1 ev = 1,6 10⁻¹⁹ j)

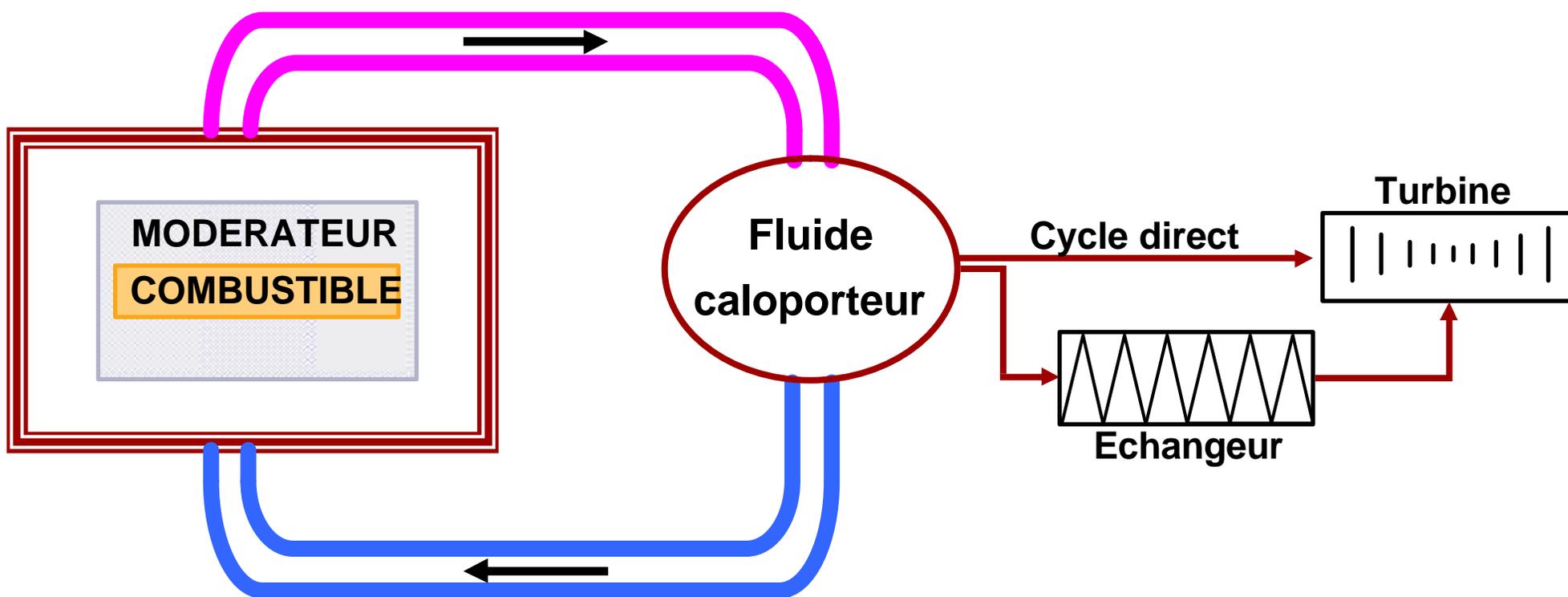
► Répartition moyenne

Origine	ENERGIE		Zone de dissipation
	Valeur (Mev)	%	
Energie cinétique des pf.	167	83,5	Quelques microns
Energie g	15	7,5	Quelques cm ou dizaines
Energie b	7	3,5	Quelques mm
Energie cinétique des neutrons	5	2,5	Quelques cm ou dizaines
Energie antineutrinos	(10)	0	NON RECUPEREE
Energie g issue des captures des neutrons (n, g)	6	3,0	Quelques cm ou dizaines
Total récupéré	200	100	

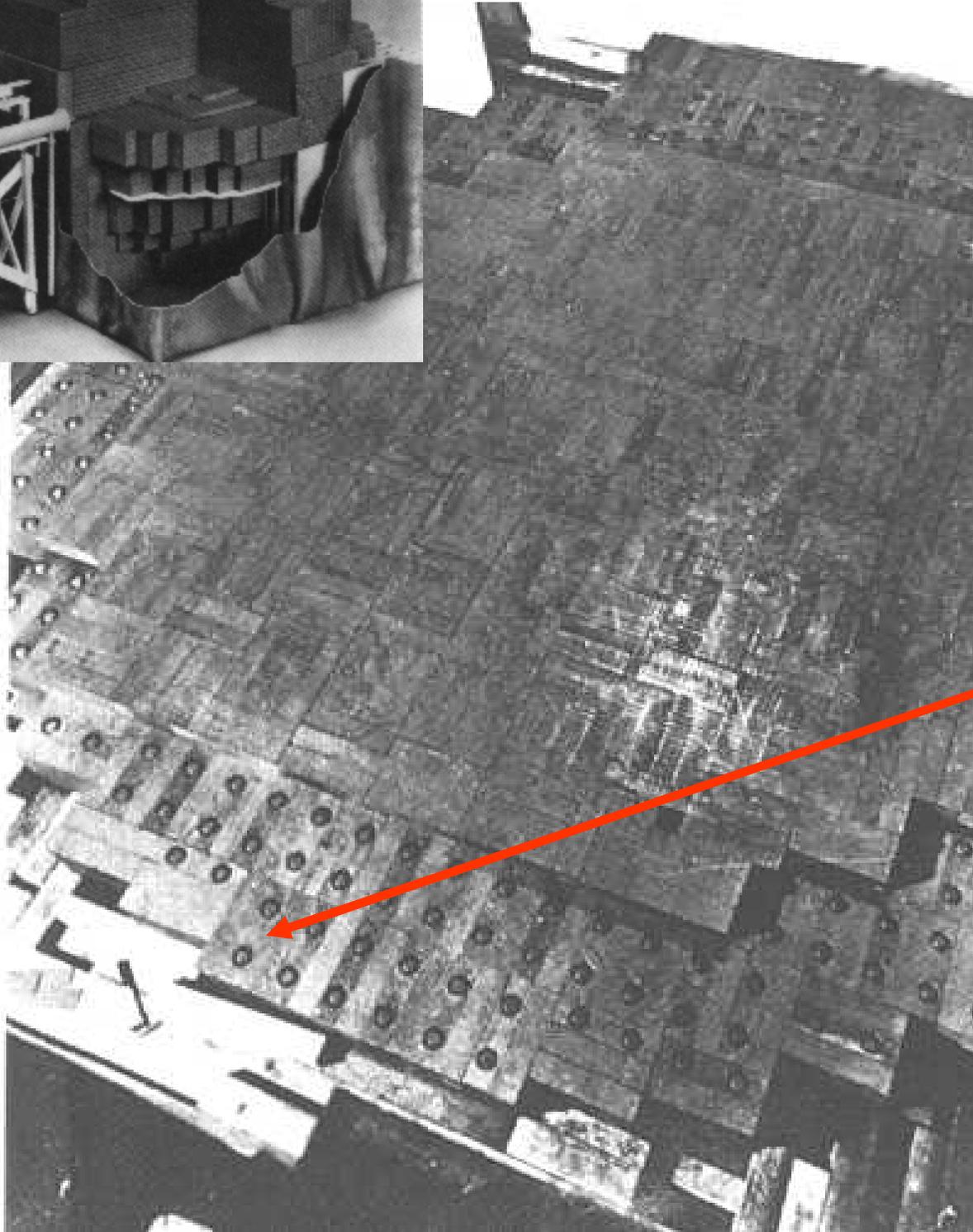
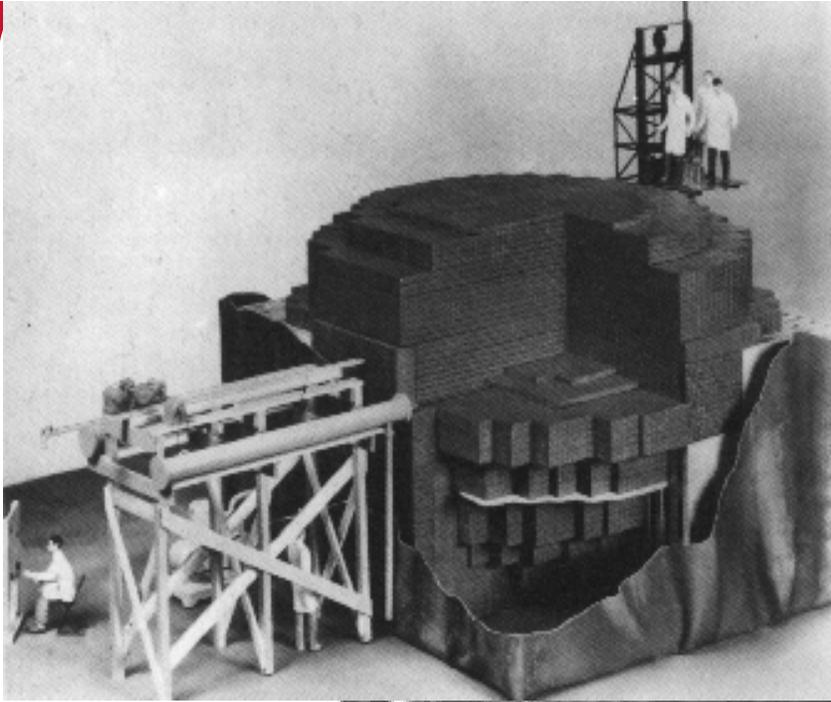
► Ordre de grandeur

- Il faut $3,1 \cdot 10^{10}$ fissions pour obtenir 1 joule
- Un réacteur de 1 000 MWe (3 000 MWth) c'est :
 - ◆ Environ 1 tonne de fissions/an
 - ◆ Équivalent à 2 millions de Tep/an

FACTEUR UN MILLION ENTRE ENERGIE NUCLEAIRE ET FOSSILE



Chicago Pile #1



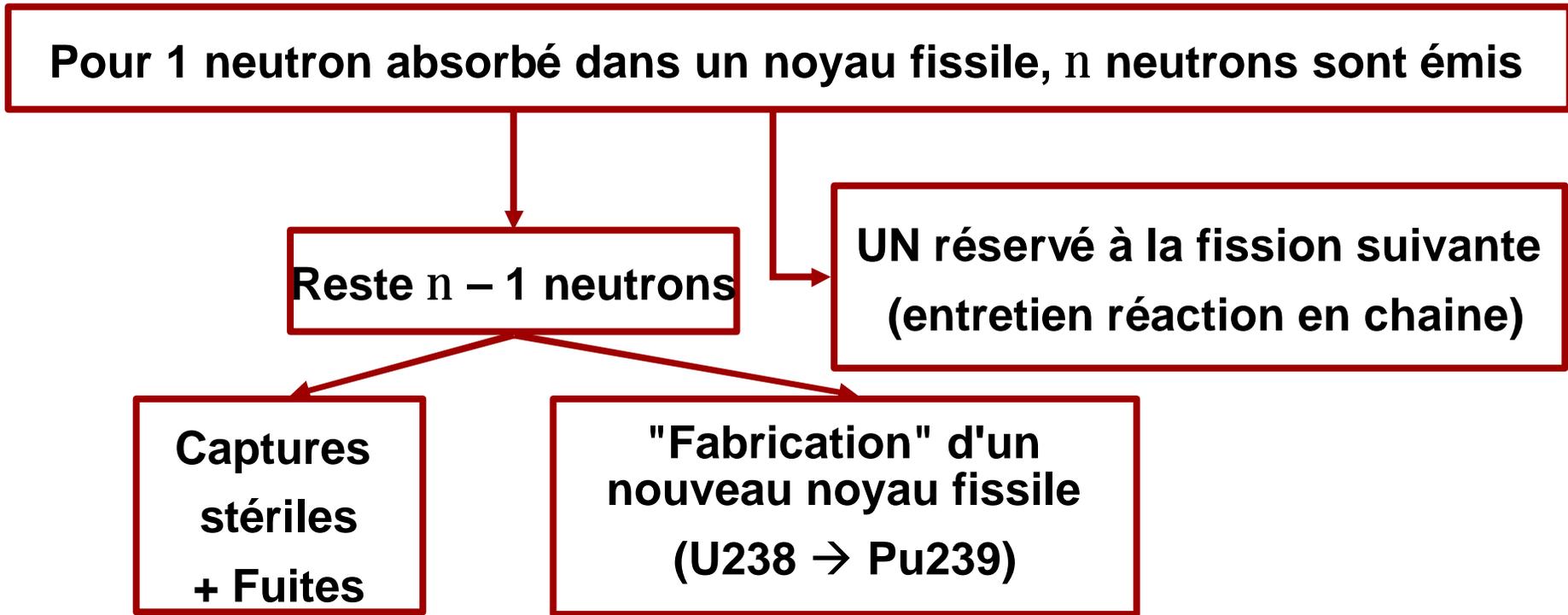
Fermi :
2/12/1942

**Uranium
naturel
(métal & oxyde)**

Graphite

Gaz

Le secret des Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR)



Valeurs de $(n - 1)$

	U235	Pu239
Neutrons "thermiques"	1,07	1,11
Neutrons "rapides" RNR	0,88	1.33

On peut fabriquer un nouveau noyau fissile pour un noyau fissile détruit si $n - 1$ assez supérieur à 1 : **SURGENERATION** possible avec RNR- Pu

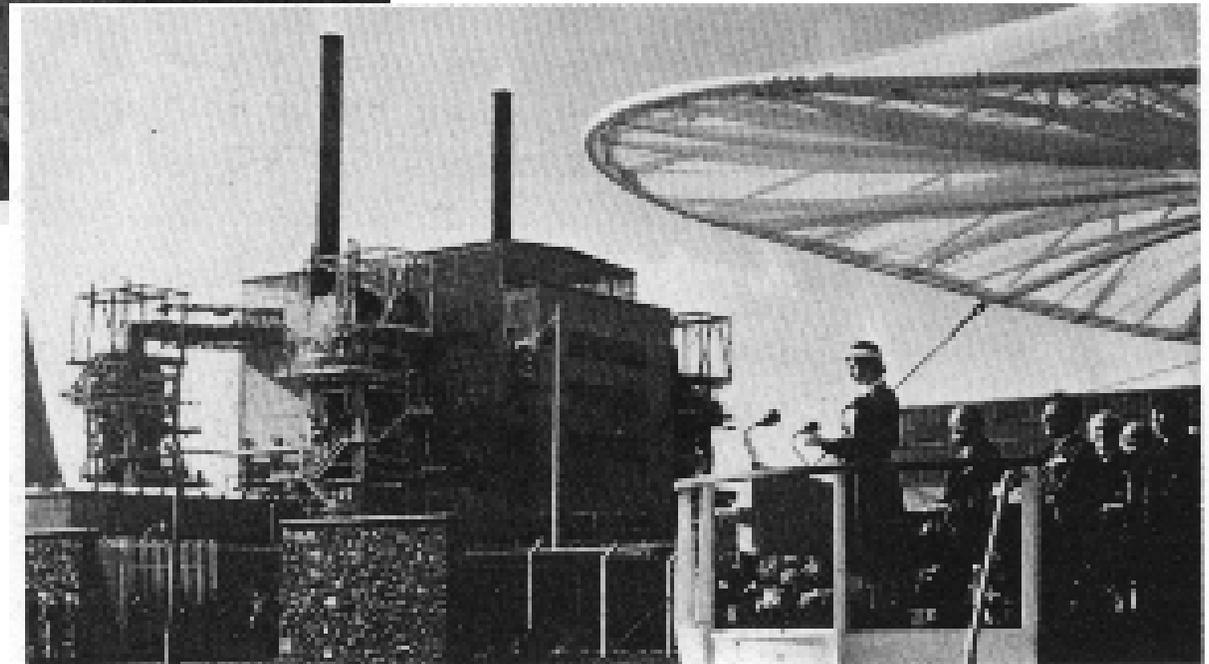
Les pionniers

Obninsk, 27 juin 1954
GLWR 5 MWe



**1951 : EBR 1 Arco
(Idaho)**

**1956 : Inauguration de
Calder Hall par
Elisabeth II**



« On a tout essayé pour ne rien oublier »

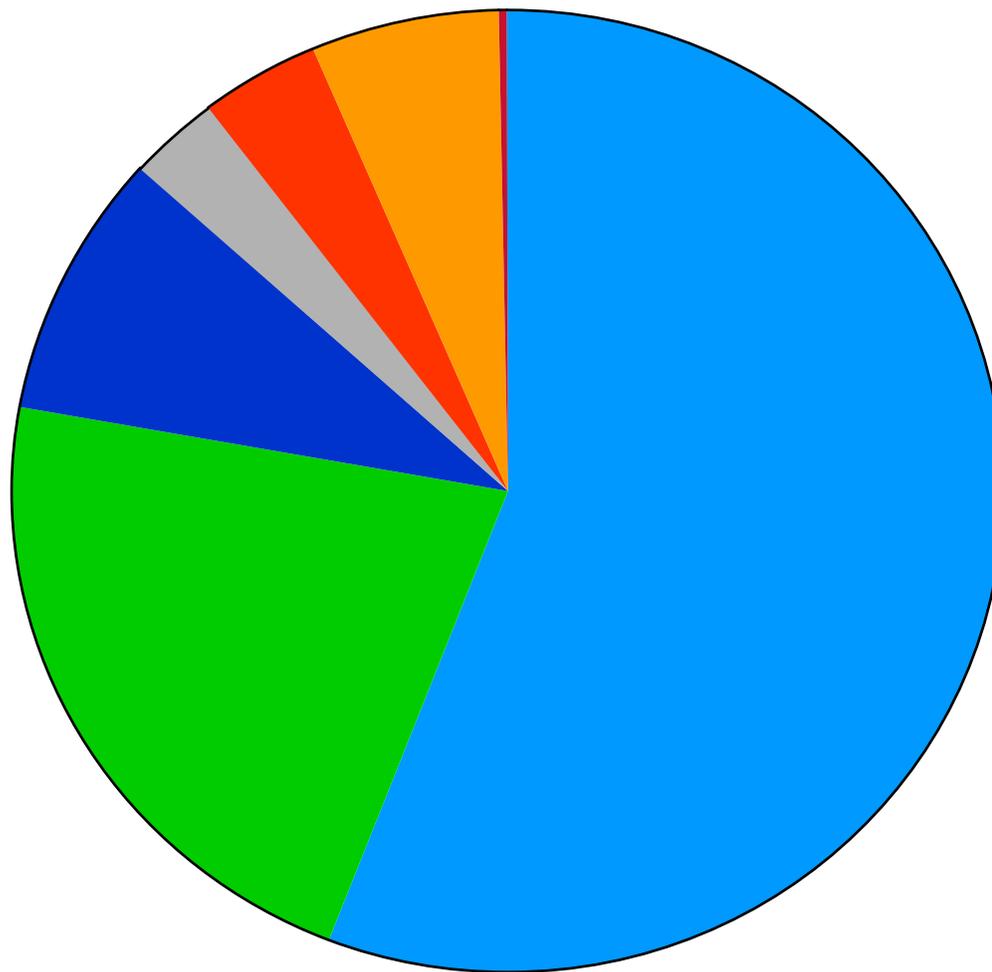
- ▶ **200 000** : nombre de combinaisons possibles de combustibles, de modérateurs et de caloporteurs sous différentes formes
- ▶ **1000** : combinaisons ayant fait l'objet d'études
- ▶ **100** : projets plus ou moins complets parmi ces 1000 combinaisons
- ▶ **30** : projets ayant fait l'objet d'essais en laboratoire ou de prototypes
- ▶ **17** : de ces projets ont été jusqu'à la construction et au fonctionnement de réacteurs producteurs d'énergie

(source : Claude Bienvenu , « L'aventure nucléaire » Explora, 1995

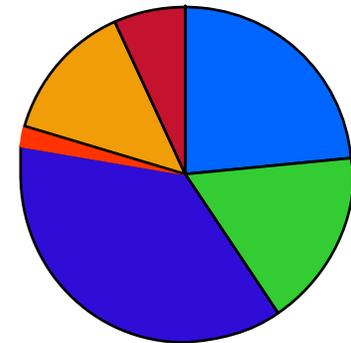
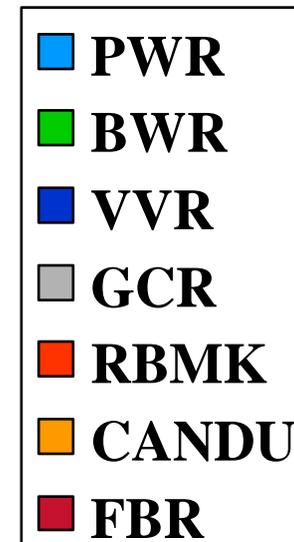
*Le résultat de 50 ans de sélection naturelle :
un parc mondial fait essentiellement de Réacteurs à eau*

En fonctionnement : près de 400 GWe

Construction : 20 GWe



LWR = 87%



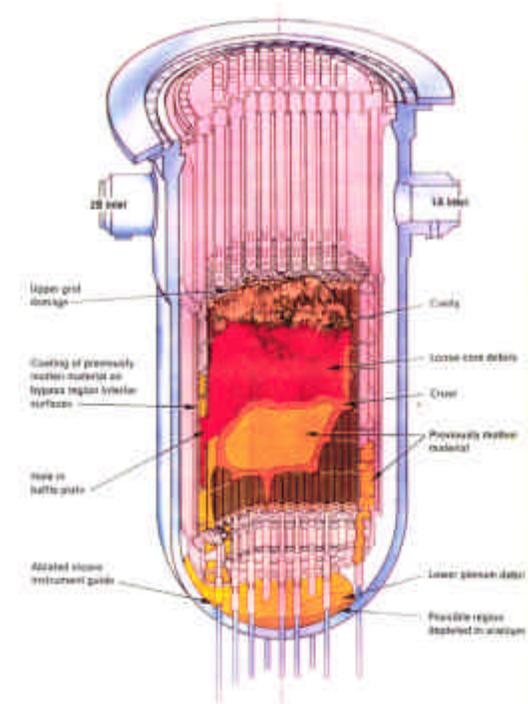
Mars 1979 : TMI (erreur de représentation)

Interface homme/machine
Hiérarchisation des alarmes
Approche par états, ISR

Avril 1986 : Tchernobyl (violations sûreté)

Importance de l'enceinte
La protéger contre corium, recombinaison H₂
Relâchement massif **inacceptable**
Unifier règles et normes (au moins en Europe)

1989 « Projet commun » franco-allemand

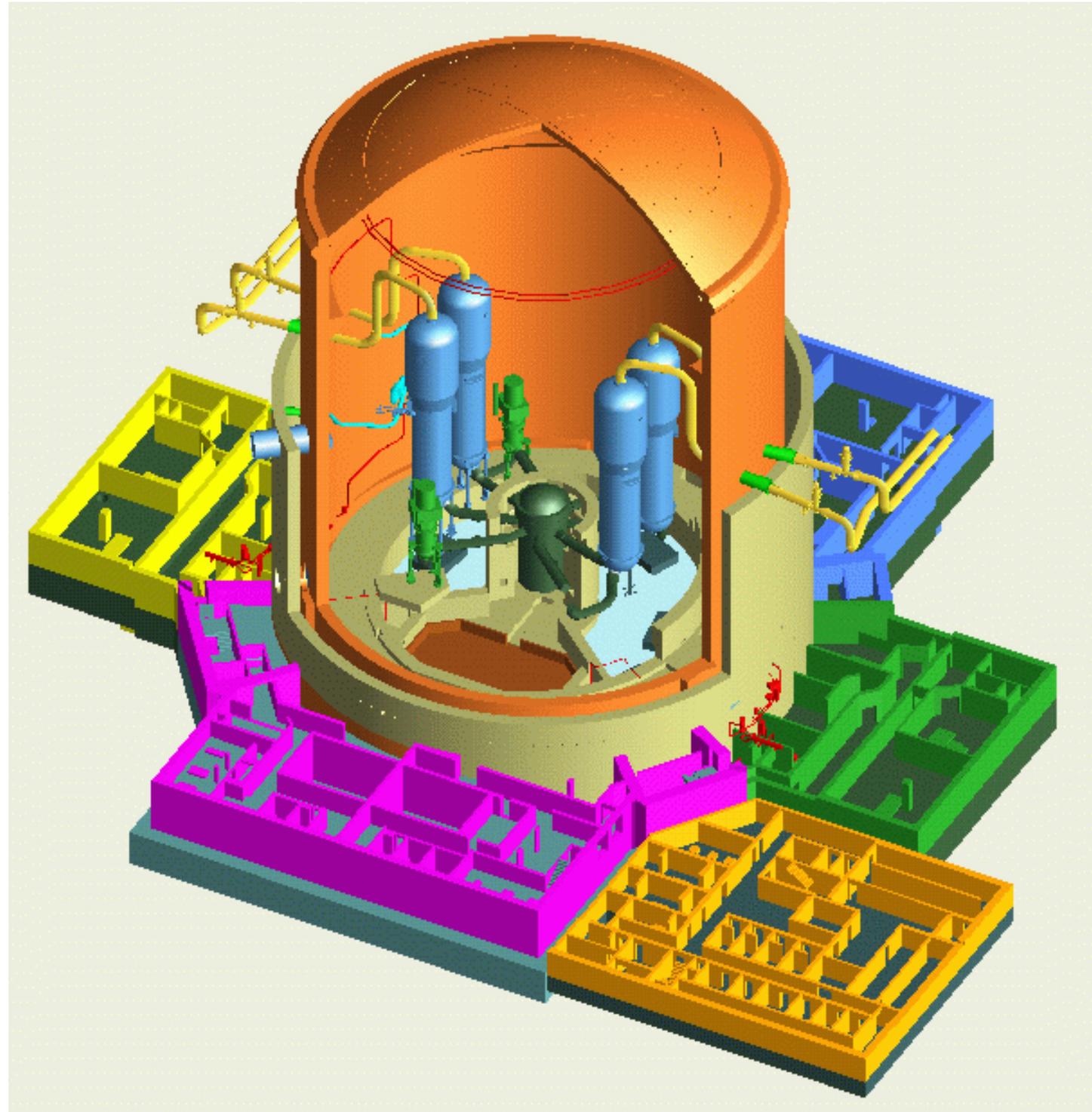


TMI-2 Core End-State Configuration

Les avancées économiques de l'EPR

- ◆ Puissance unitaire élevée (1600 Mwe : économie d'échelle)
- ◆ Pression secondaire 78 bars, **rendement de 36 %** ;
- ◆ Meilleure utilisation du combustible (60 GWj / t);
- ◆ Simplification de la maintenance : accessibilité, standardisation, maintenance en service des équipements installés hors bâtiment réacteur ;
- ◆ Arrêts plus courts (16 jours), **92 % de disponibilité** ;
- ◆ Réduction des doses d'irradiation ;
- ◆ Durée de vie technique de **60 ans**.

Résultat : coût de production du MWh de l'EPR inférieur de 10% à celui du N4.





Une vue d'artiste de l'EPR en Finlande

Deux risques à maîtriser

L'évacuation de la puissance et la gestion des accidents graves pouvant en résulter

***La gestion des matières radioactives
- de la mine aux déchets
via un confinement adapté***

Jamais et nulle part le moindre compromis sur les enjeux de sûreté, de radioprotection et de non-prolifération

▶ Règles de sûreté

(ex : chaleur résiduelle et prévention des accidents graves)

- ◆ non seulement dans les phases de conception et à travers les options techniques
- ◆ mais surtout sur les conditions d'exploitation (facteurs humains)

▶ Radio protection

(ex : confinement des matières radioactives)

- ◆ pour les travailleurs de l'industrie nucléaire
- ◆ pour le public et l'environnement

▶ **Le contrôle international est une exigence ... incontournable**

C'est de la matière radioactive en rien différente de celle qu'on manipule dans le cycle industriel :

▶ **il faut la confiner (c'est évidemment impératif!) = vitrification**

- ◆ Temporairement = entreposage (à renouveler)
- ◆ Définitivement = stockage définitif (réversible jusqu'à la fermeture)

▶ **il faut en réduire le volume et l'activité, d'où l'intérêt du recyclage**

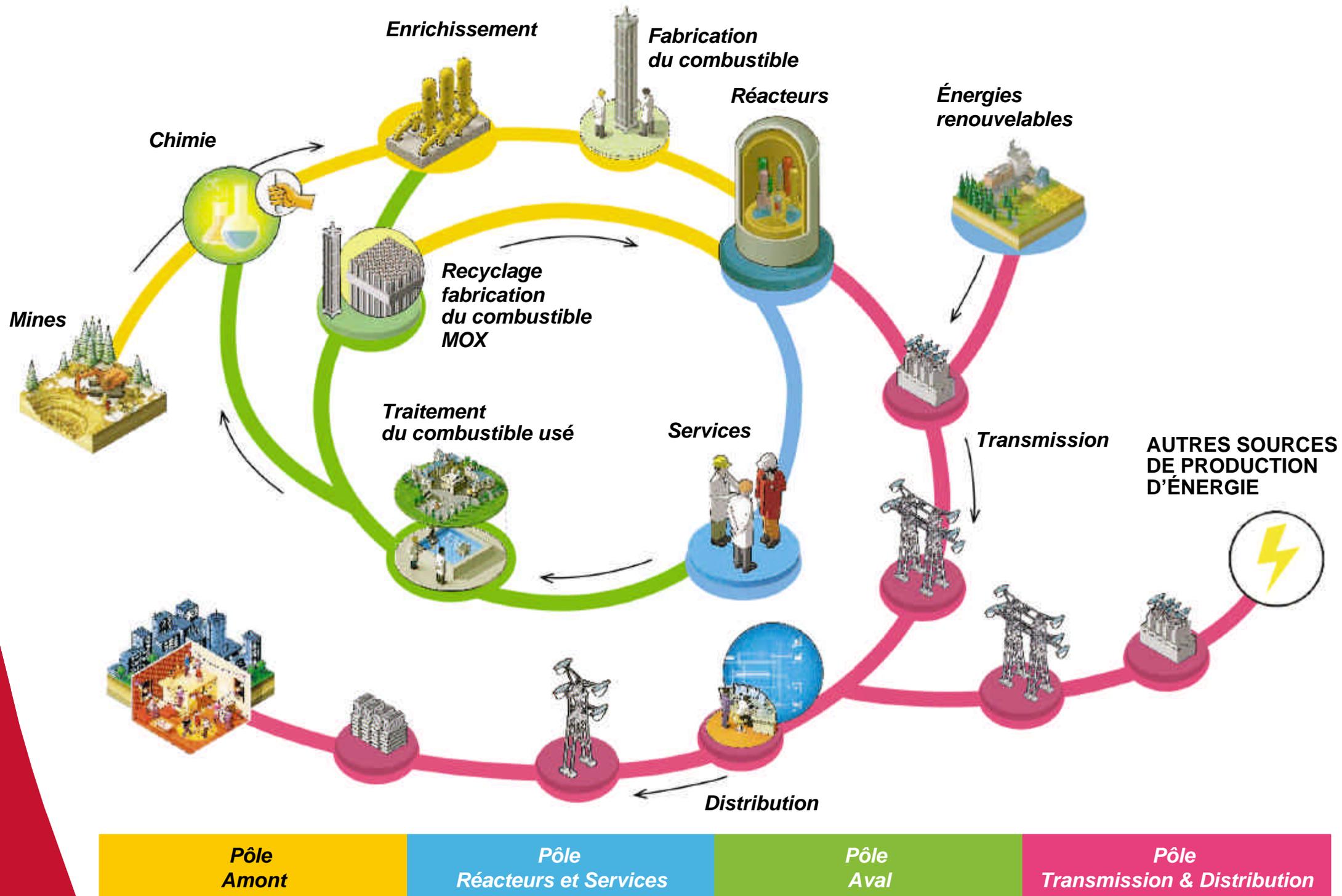
▶ **mais cela ne représente au total que 1kg par habitant et par an**

et l'équivalent d'un paquet à cigarette de déchets haute activité vitrifiés, pour la consommation d'électricité d'une famille en 50 ans

▶ **c'est ce morceau de verre, insoluble pendant des centaines de milliers d'années qu'on se propose de stocker en couche géologique profonde, sans circulation d'eau ...en attendant que la radioactivité décroisse**

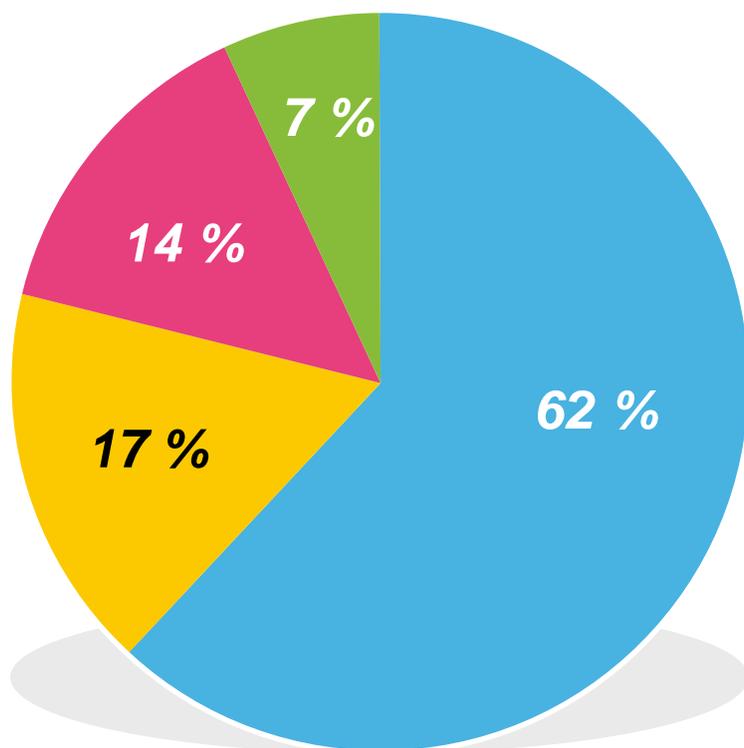
▶ **on pense que les progrès encore à faire permettront à terme de produire des déchets ...ayant le même impact que le minéral radioactif qu'on a extrait en amont du cycle industriel**

Une offre industrielle intégrée



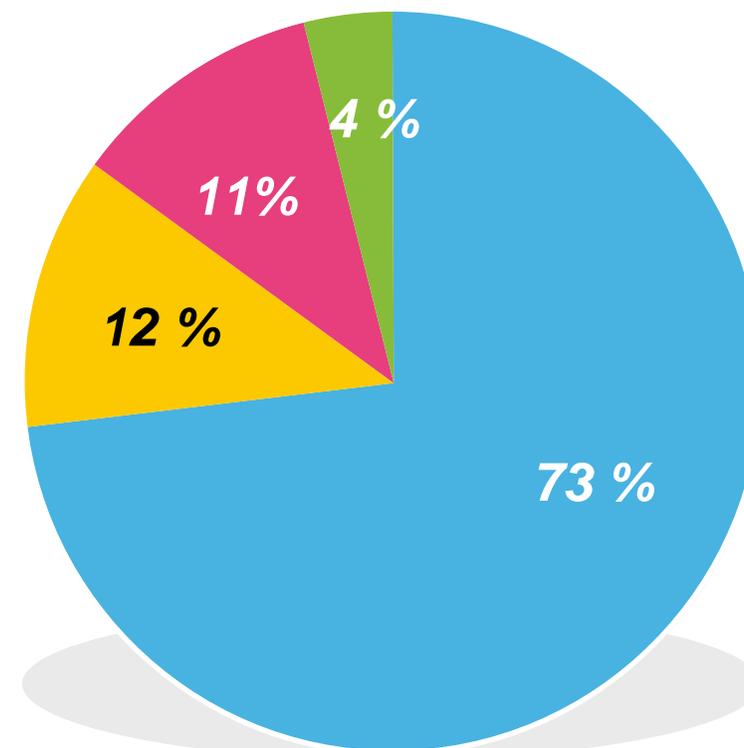
Répartition du chiffre d'affaires par zone géographique (en %)

[C.A. total : 10 863 millions d'euros]



Répartition des effectifs par zone géographique (en %)

[Effectif total : 61 111 collaborateurs]

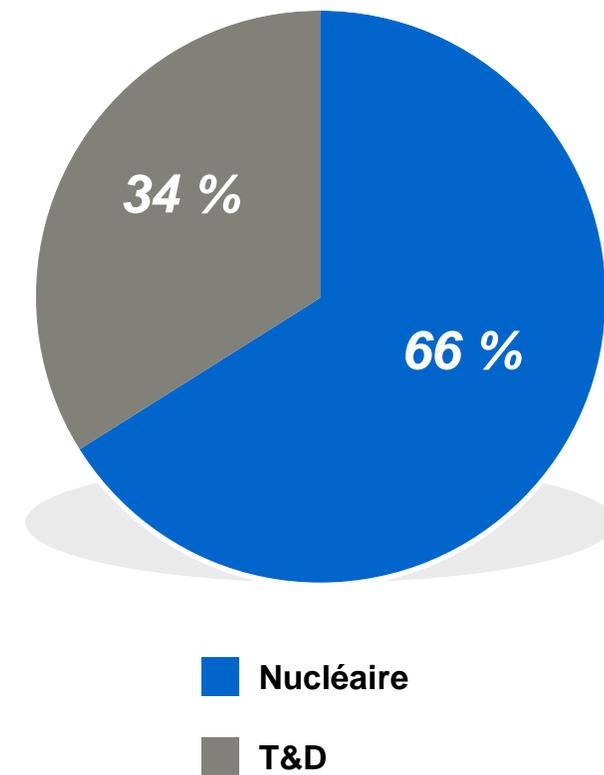
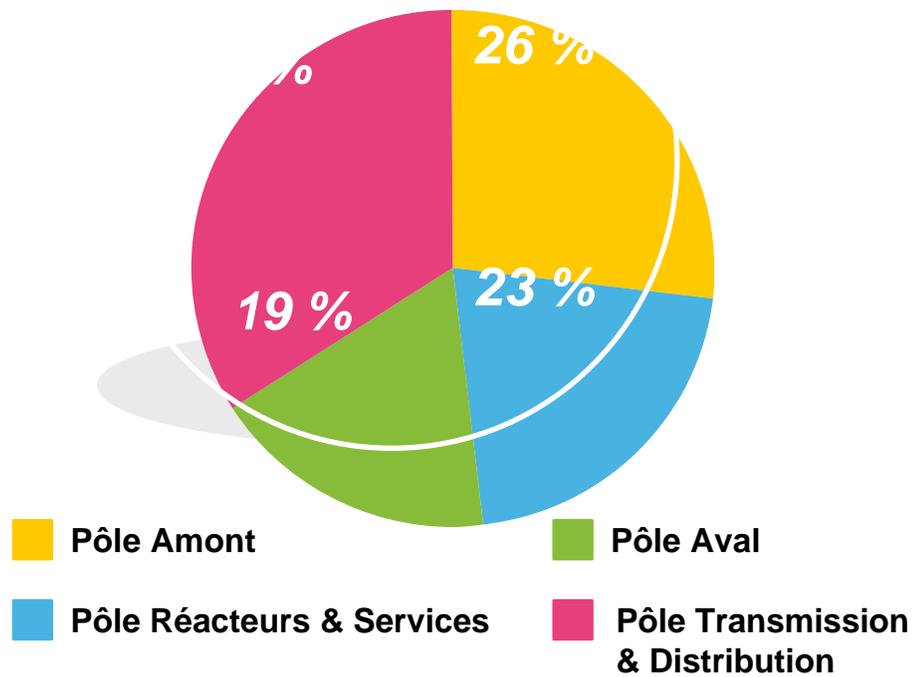


■ Europe & CEI
 ■ Amériques
 ■ Asie-Pacifique
 ■ Afrique Moyen-Orient

Répartition du chiffre d'affaires par pôle (en %)

Répartition du CA par métier (en %)

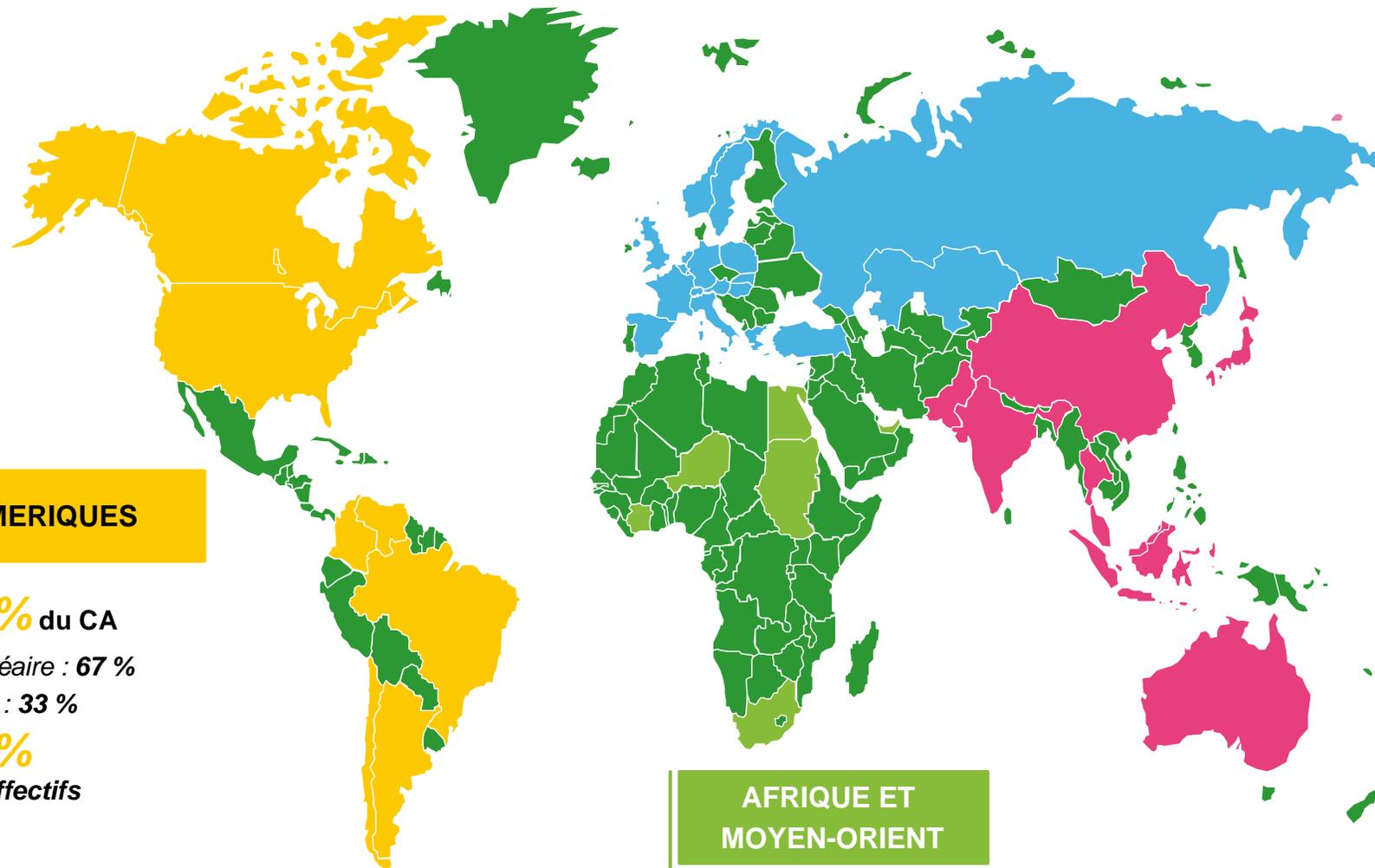
[C.A. total : 10 863 millions d'euros]



41 pays
présence industrielle

+ de 100 pays
présence commerciale

2/3 du chiffre d'affaires
réalisés hors de France



AMERIQUES

17 % du CA
- Nucléaire : 67 %
- T&D : 33 %
12 %
des effectifs

AFRIQUE ET MOYEN-ORIENT

7 % du CA
- Nucléaire : 9 %
- T&D : 91 %
4 %
des effectifs

EUROPE ET CEI

62 % du CA
- Nucléaire : 76 %
- T&D : 24 %
73 %
des effectifs

ASIE-PACIFIQUE

14 % du CA
- Nucléaire : 47 %
- T&D : 53 %
11 %
des effectifs

Présence industrielle ■ ■ ■ ■

▶ **Renouvellement des parcs actuels**

- ◆ durée de vie = enjeu économique important pour les exploitants
- ◆ anticipation pourtant nécessaire

▶ **Développement des parcs**

- ◆ pour les pays qui possèdent déjà la technologie
- ◆ pour les pays en développement rapide

▶ **Intérêt à terme pour quasi tous les pays industrialisés**

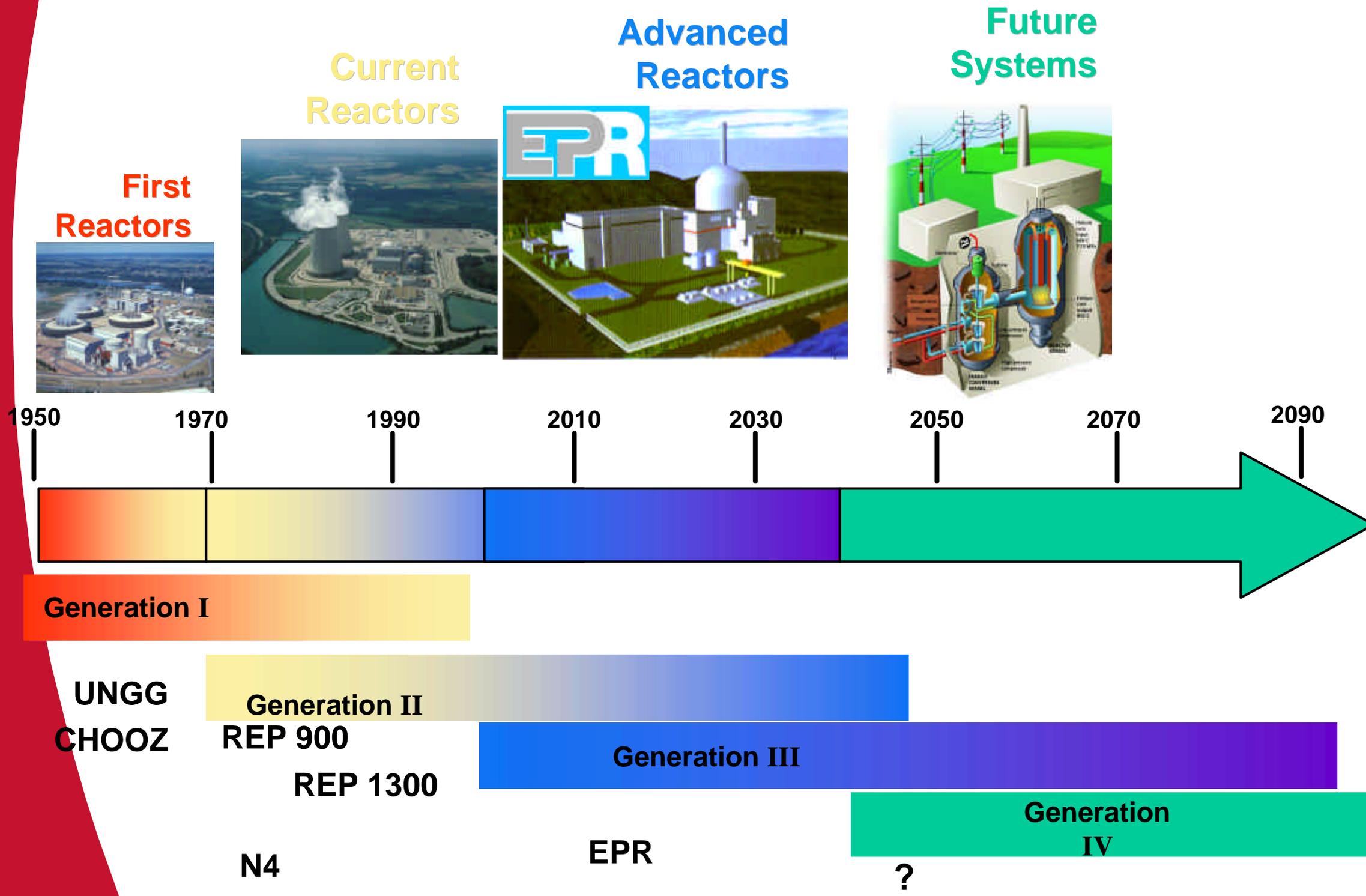
▶ **Nouvelles applications possibles**

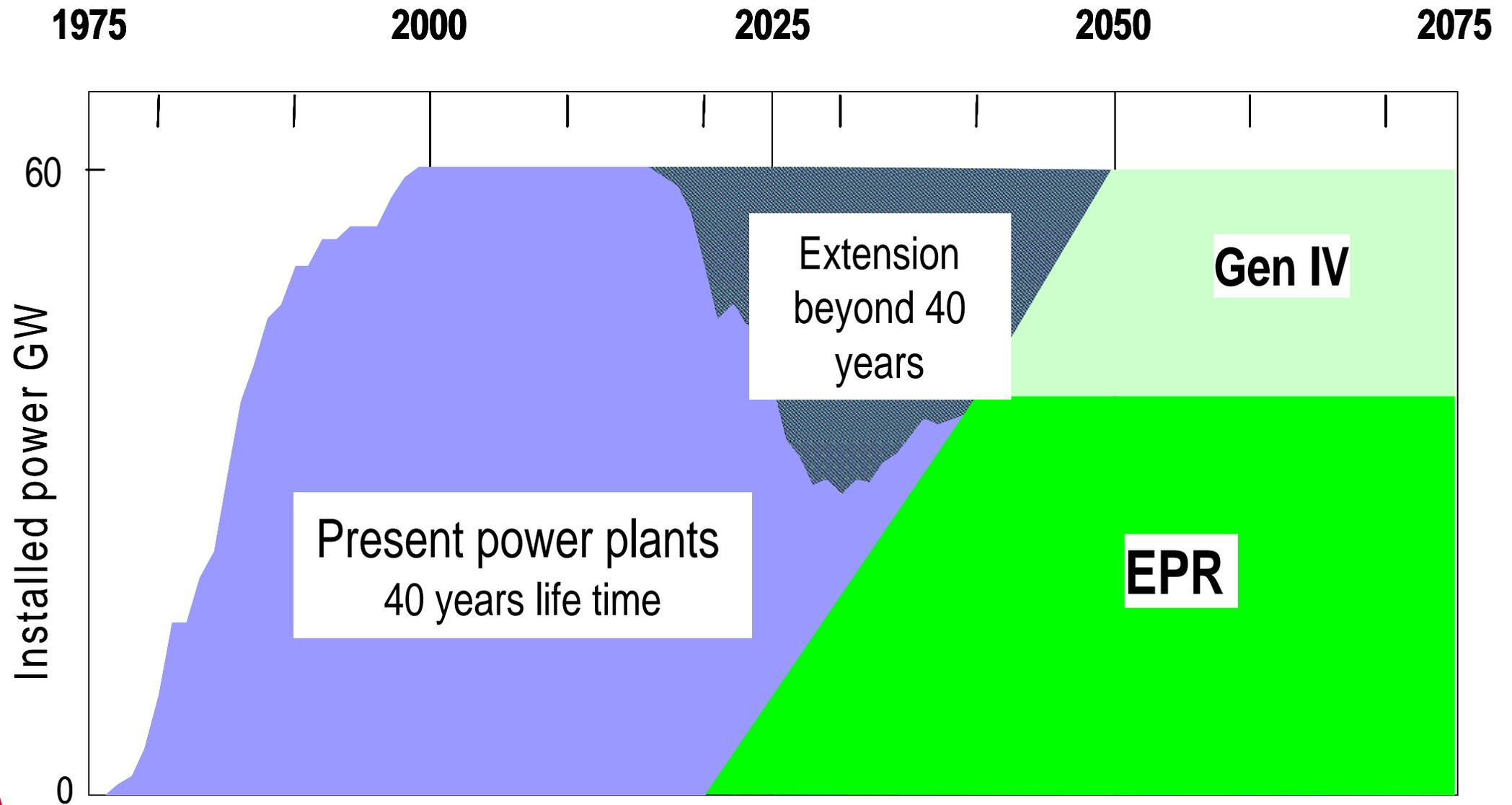
Développer un ou plusieurs système nucléaires qui

- ◆ **soient déployables à l'horizon 2030**
- ◆ **offrent des avancées significatives en terme de :**
 - **durabilité**
 - **sûreté et fiabilité**
 - **prolifération et protection physique**
 - **économie**
- ◆ **soient compétitifs sur différents marchés**
- ◆ **qui s'ouvrent à différentes applications énergétiques non électrogènes : hydrogène, chaleur, dessalement, ...**



THE EVOLUTION OF NUCLEAR POWER

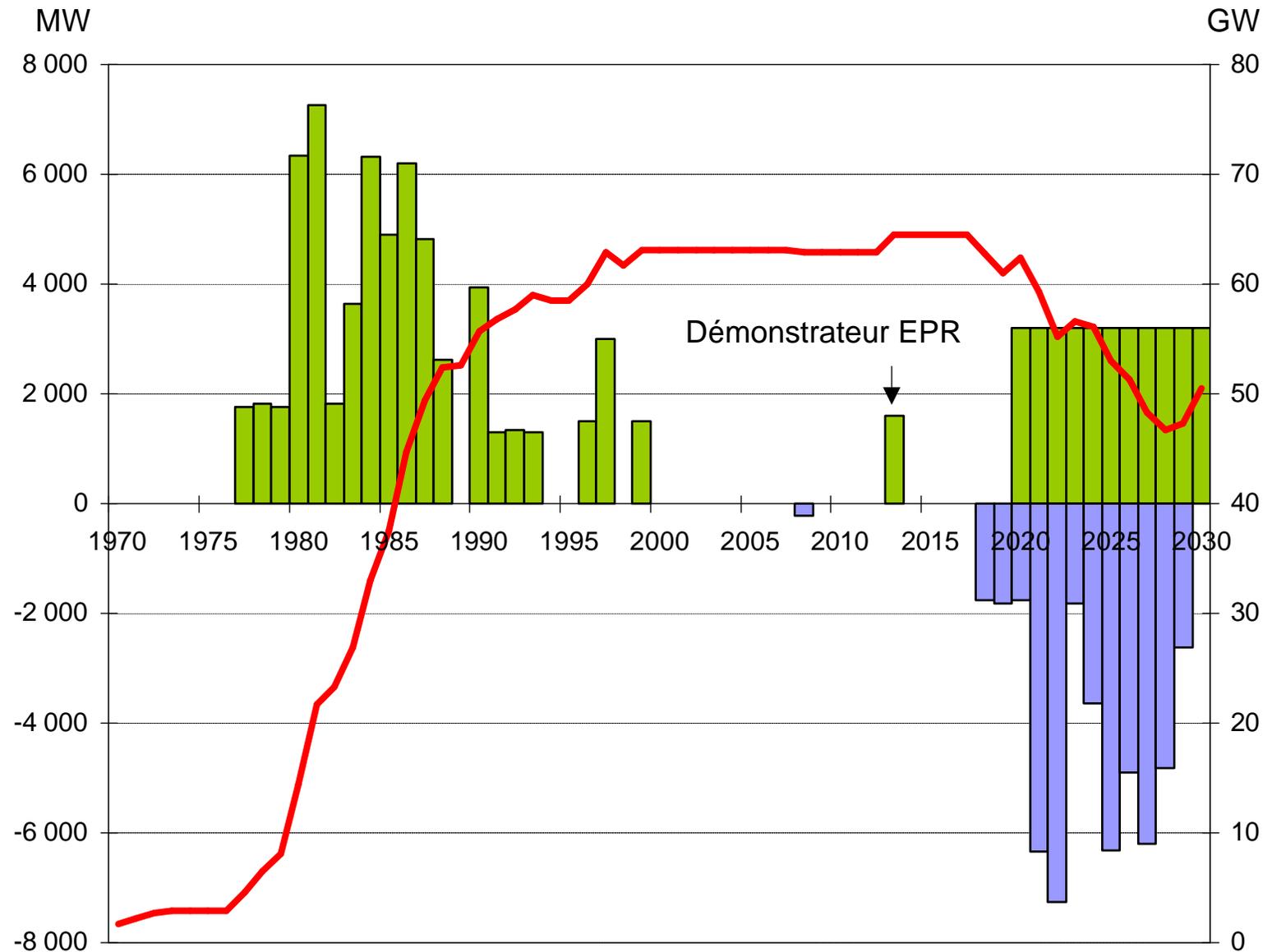




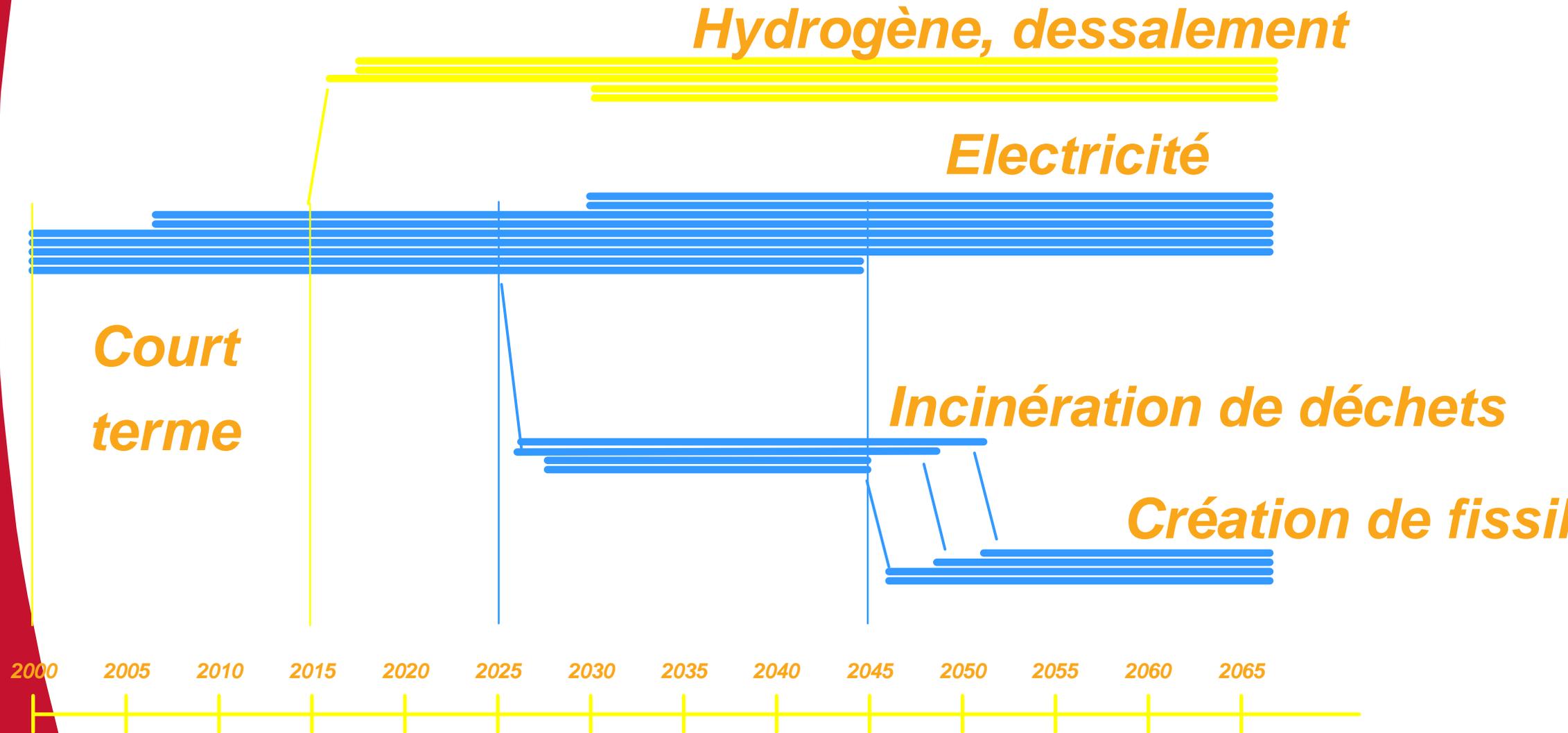
Principales hypothèses:

- ▶ 40 ans de durée de vie
- ▶ 2 EPR par an mis en service à partir de 2020
- ▶ passage à l'ultracentrifugation entre 2010 et 2015

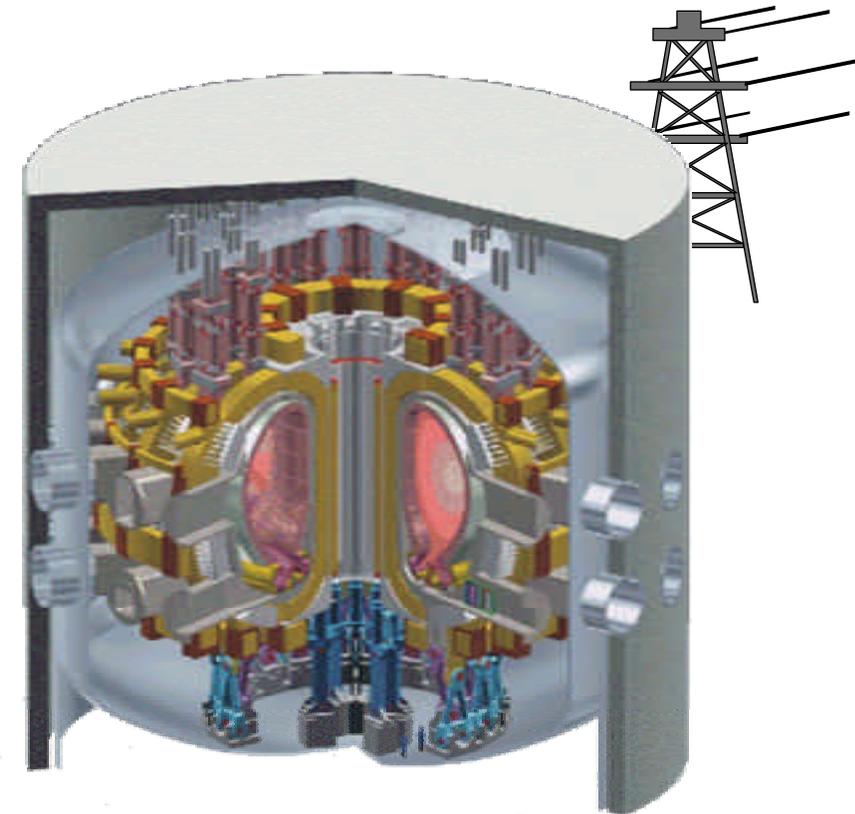
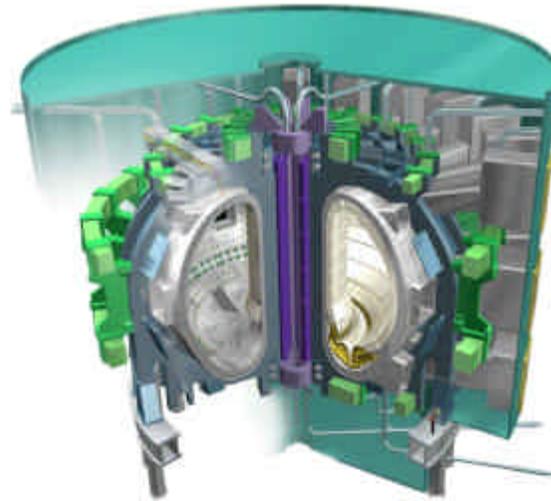
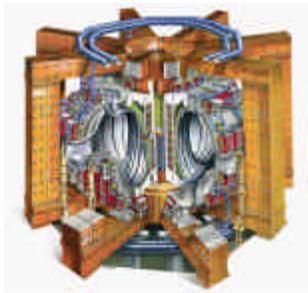
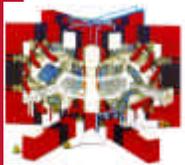
- Ajouts (MW)
- Déclassements après 2000 (MW)
- Puissance nucléaire installée totale (GW, échelle de droite)



Autres applications : perspectives de développement



La fusion ne règlera pas nos problèmes d'ici 2050 !!



Tore Supra **JET**

25 m³

80 m³

0 MW_{th} **~16 MW_{th}**

ITER

800 m³

~ 500 MW_{th}

DEMO

~ 1000 - 3500 m³

~ 2000 - 4000 MW_{th}

un intérêt renouvelé pour le nucléaire

Le nucléaire est considéré de plus en plus ouvertement comme un très bon candidat pour un choix durable (économique, écologique) :

- ▶ sur la base d'analyses de retour sur investissement (définitivement moins cher que la combustion de fossiles!)
- ▶ sur la base d'une « évidence » scientifique, d'un retour d'expérience industriel réussi (EDF est un modèle pour beaucoup d'électriciens), de produits commercialement disponibles (AREVA, Toshiba, GE...), d'une sûreté maîtrisée
- ▶ avec des perspectives de développement durable (U₅ maintenant, U₈ demain, thorium peut-être, nouveaux réacteurs ...)

... aussi longtemps qu'on accepte de respecter strictement
« des règles de bonne conduite unanimement admises »

- ▶ **Des perspectives “nucléaires” sont à l’étude dans de nombreux pays (de 400 aujourd’hui à 2000 réacteurs d’ici 2030 ? Pas impossible !)**
 - ◆ développements quasi décidés en Chine, Inde, RSA, Brésil
 - ◆ renaissance attendue en USA, UK
 - ◆ poursuite actée en France, Japon, Russie, Corée

- ▶ **Calendrier incertain compte tenu des données**
 - ◆ financières
 - ◆ politiques
 - ◆ industrielles (capacités de production des gros composants)

- ▶ **Sûreté et non-prolifération demeurent des données essentielles**

- ▶ Le nucléaire est avec le charbon (avec capture et séquestration du CO₂) la seule voie durable de production massive de l'électricité en base
- ▶ Aujourd'hui, les **grands vainqueurs** de la compétition nucléaire sont les **Réacteurs à Eau Légère (P ou B)** et cette domination se maintiendra **au moins jusqu'au milieu du siècle** : USA, Europe (EPR), Est (VVER), Asie (Chine, Japon, ...)
- ▶ Dans la deuxième moitié de ce siècle, les **Réacteurs à Neutrons Rapides (GEN IV)** pourraient progressivement remplacer les REL **mais sous conditions** :
 - ◆ le parc nucléaire mondial s'accroît sensiblement
 - ◆ la gestion des ressources en uranium commence à faire problème
 - ◆ les RNR deviennent compétitifs

Dans ce contexte les **HTR** peuvent espérer se placer sur des **marchés spécifiques** grâce à leurs atouts (H₂, petits réacteurs, ...)

Le nucléaire est une industrie encore jeune pour laquelle il existe de bonnes marges de progrès sur le plan technique, bien entendu à sûreté croissante

Le vrai enjeu des prochaines décennies touche la gouvernance du cycle du combustible (amont et aval)

Jamais et nulle part la moindre concession :

- ▶ **à la sûreté de conception**
- ▶ **à la culture de sûreté d'exploitation**
- ▶ **au contrôle des installations par des autorités de sûreté indépendantes**
- ▶ **à des règles internationales de non-prolifération**

***Merci de votre invitation
et de votre attention***



AREVA