

Perspectives de l'Énergie Nucléaire



Bertrand BARRÉ

Professeure émérite INSTN, Conseiller AREVA

1,6 milliards d'êtres humains...

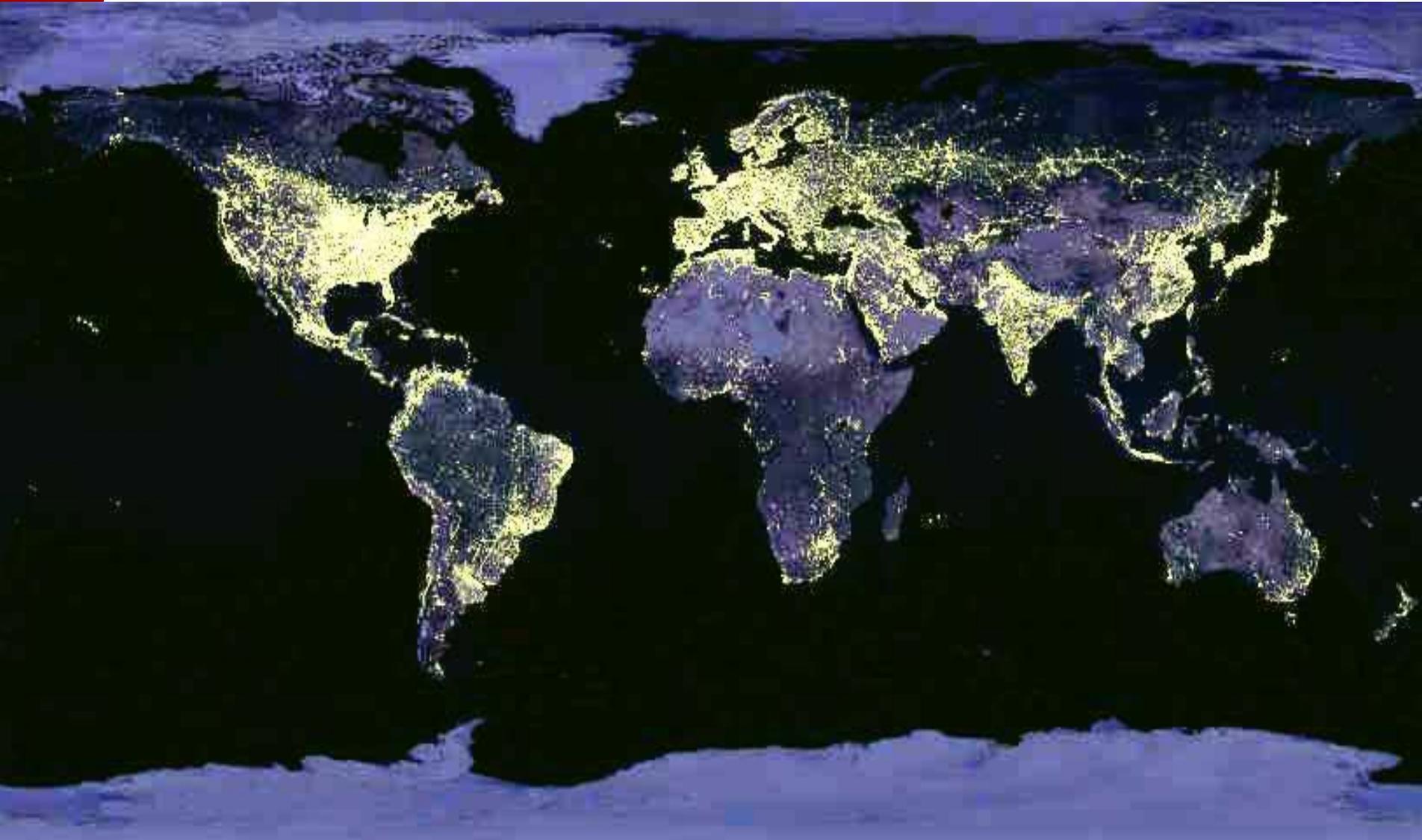
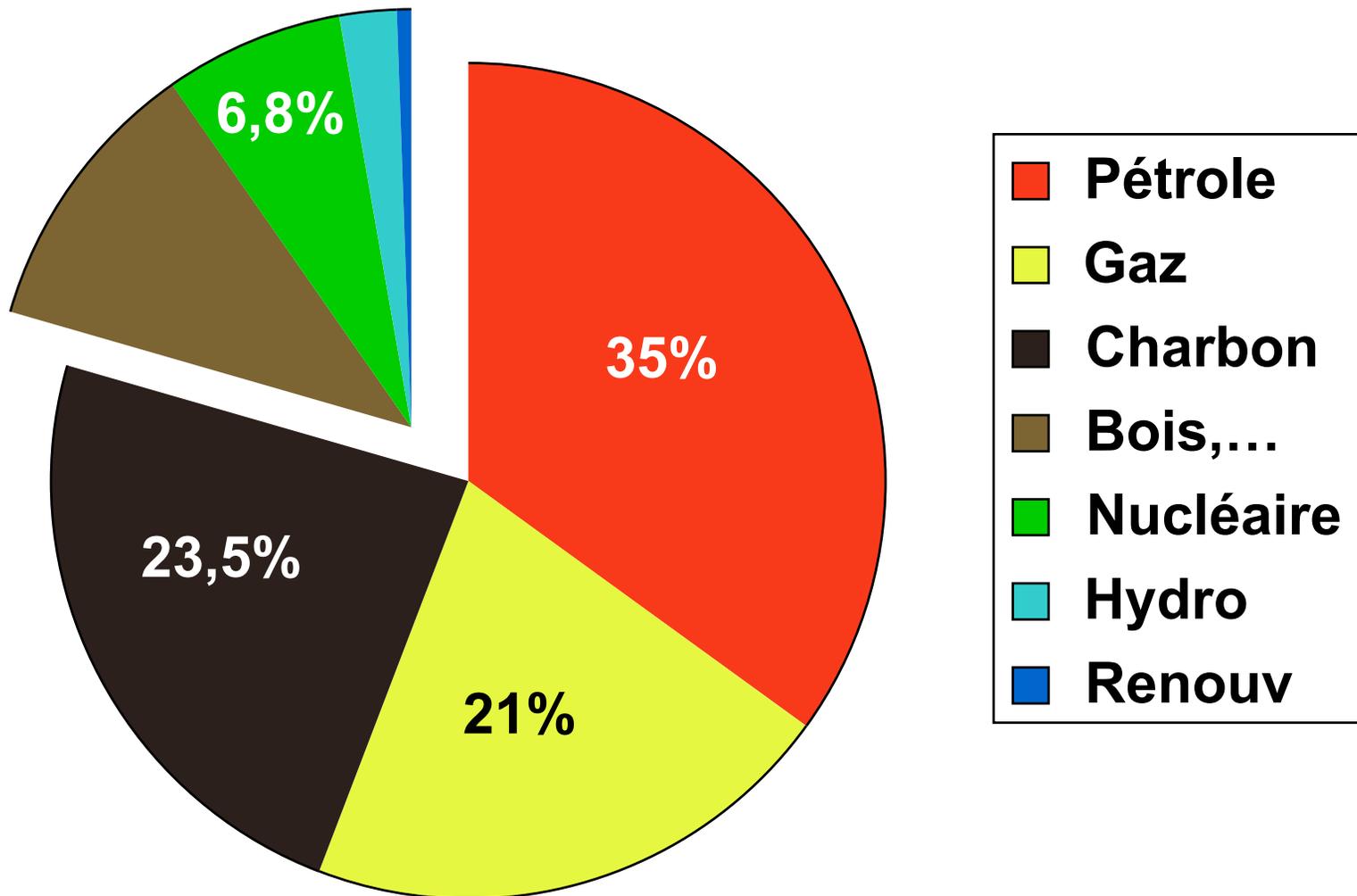


Photo composite NASA sans trucage

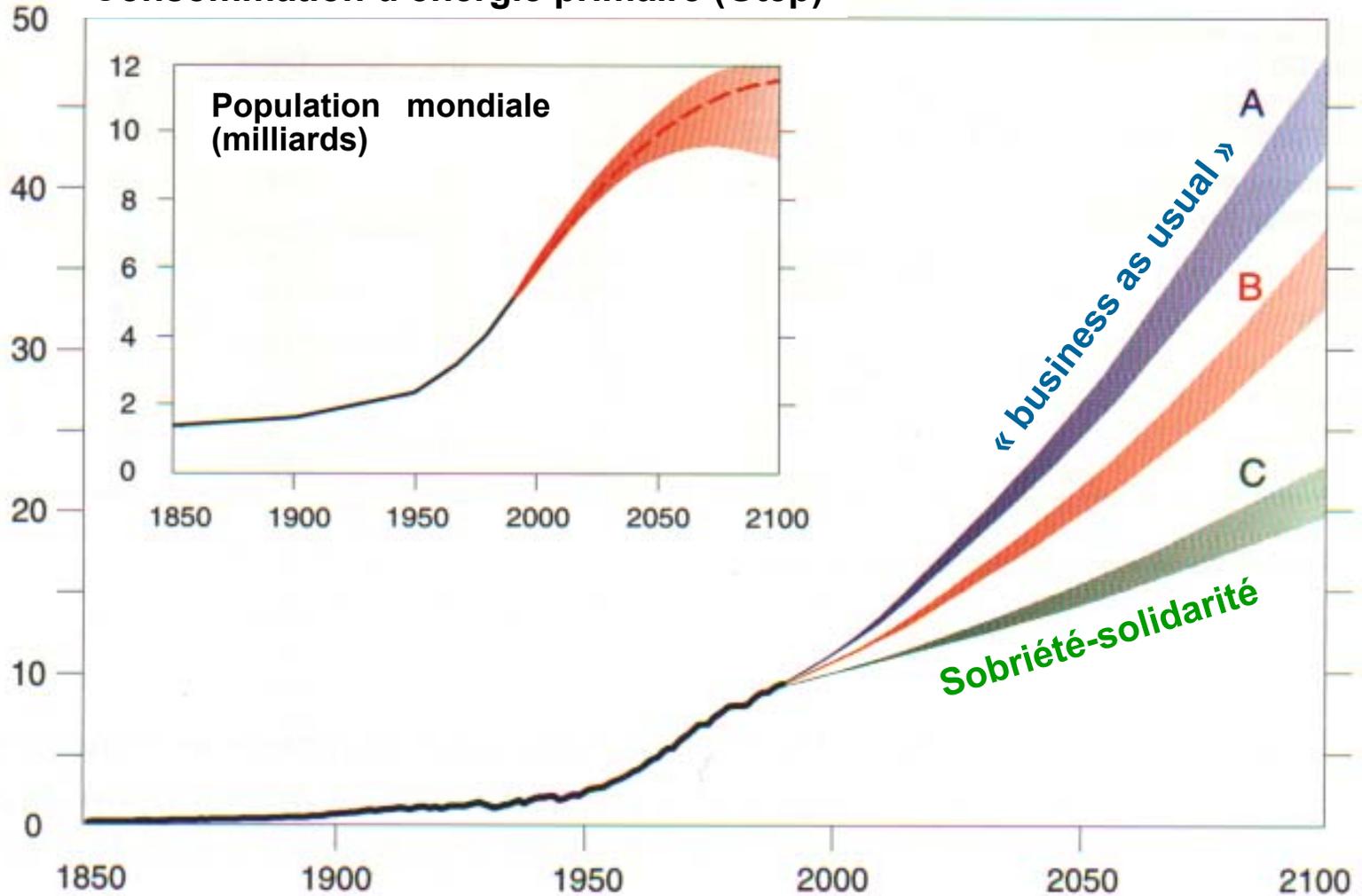
2000 : 6 milliards d'humains ont consommé 10 Gtep



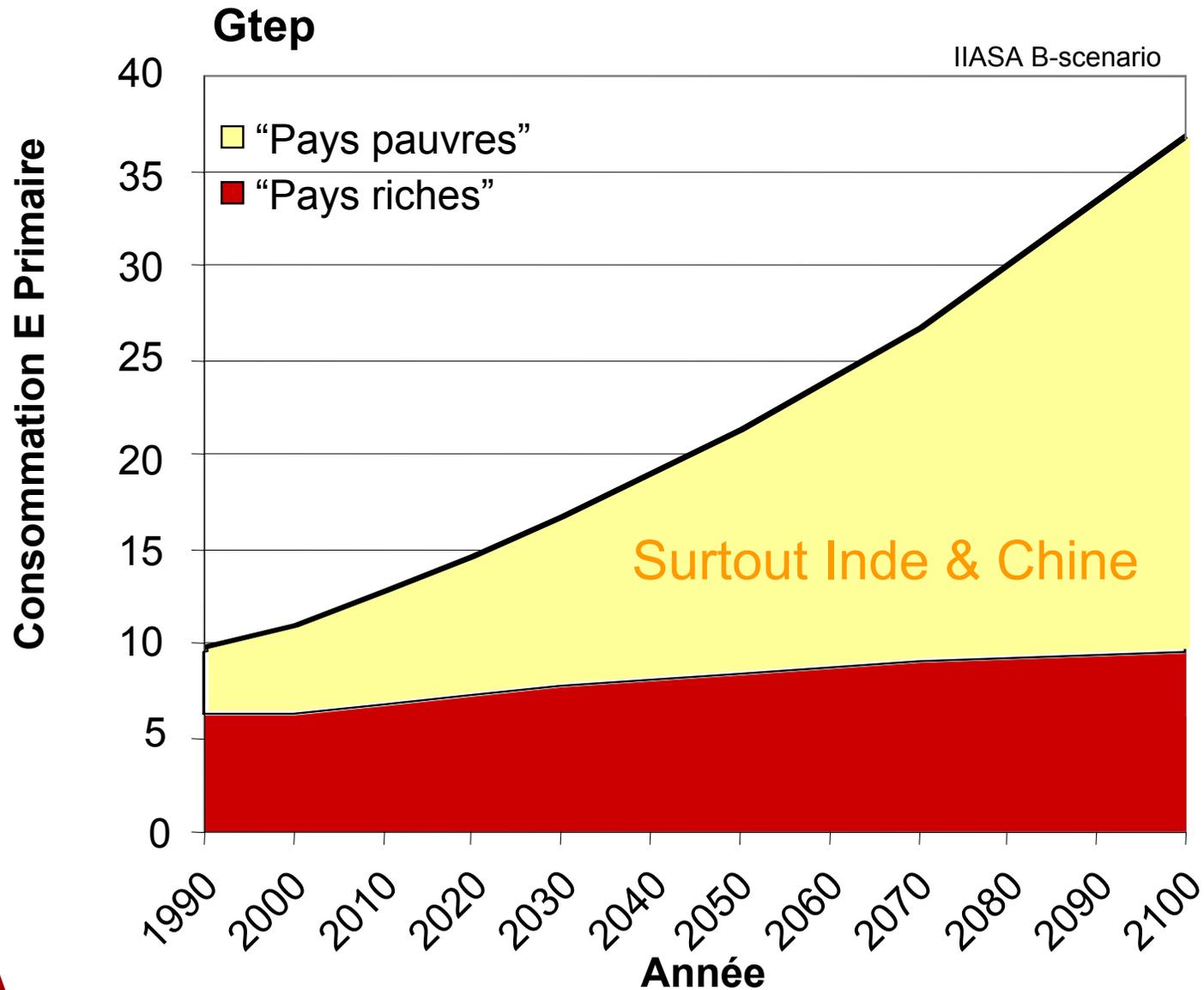
2006 : 6,5 milliards d'humains ont consommé 12 Gtep

Projections 1850-2000-2100 (WEC-IIASA 98)

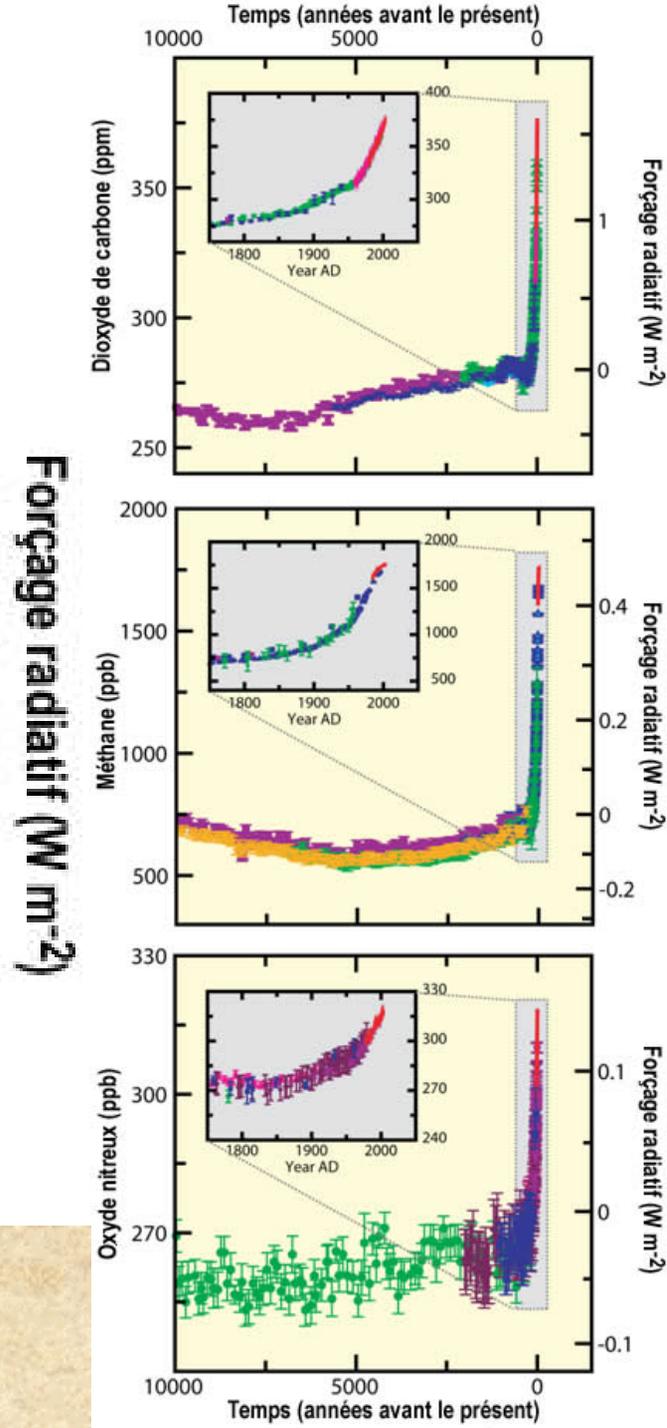
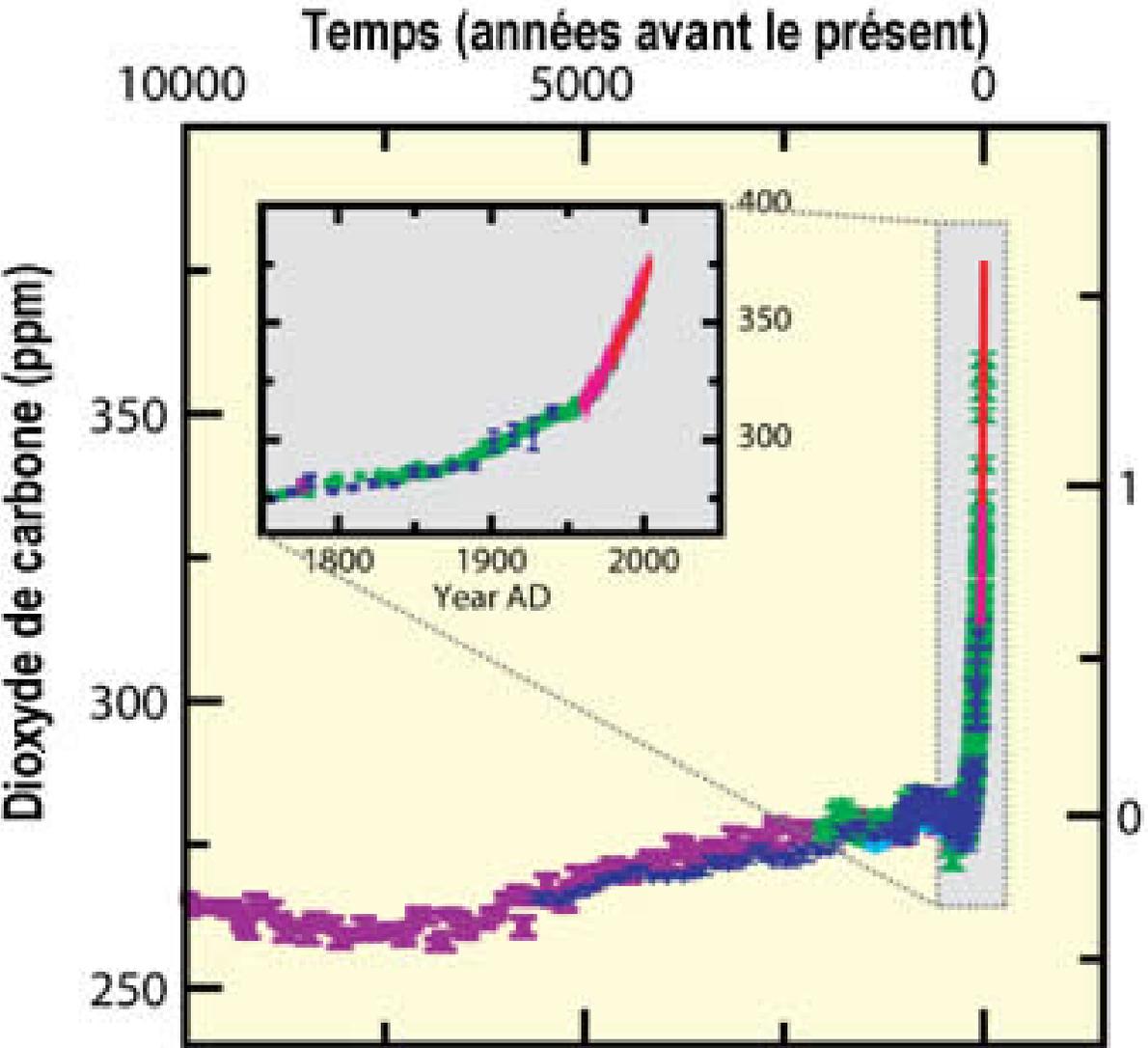
Consommation d'énergie primaire (Gtep)



Un rééquilibrage géopolitique



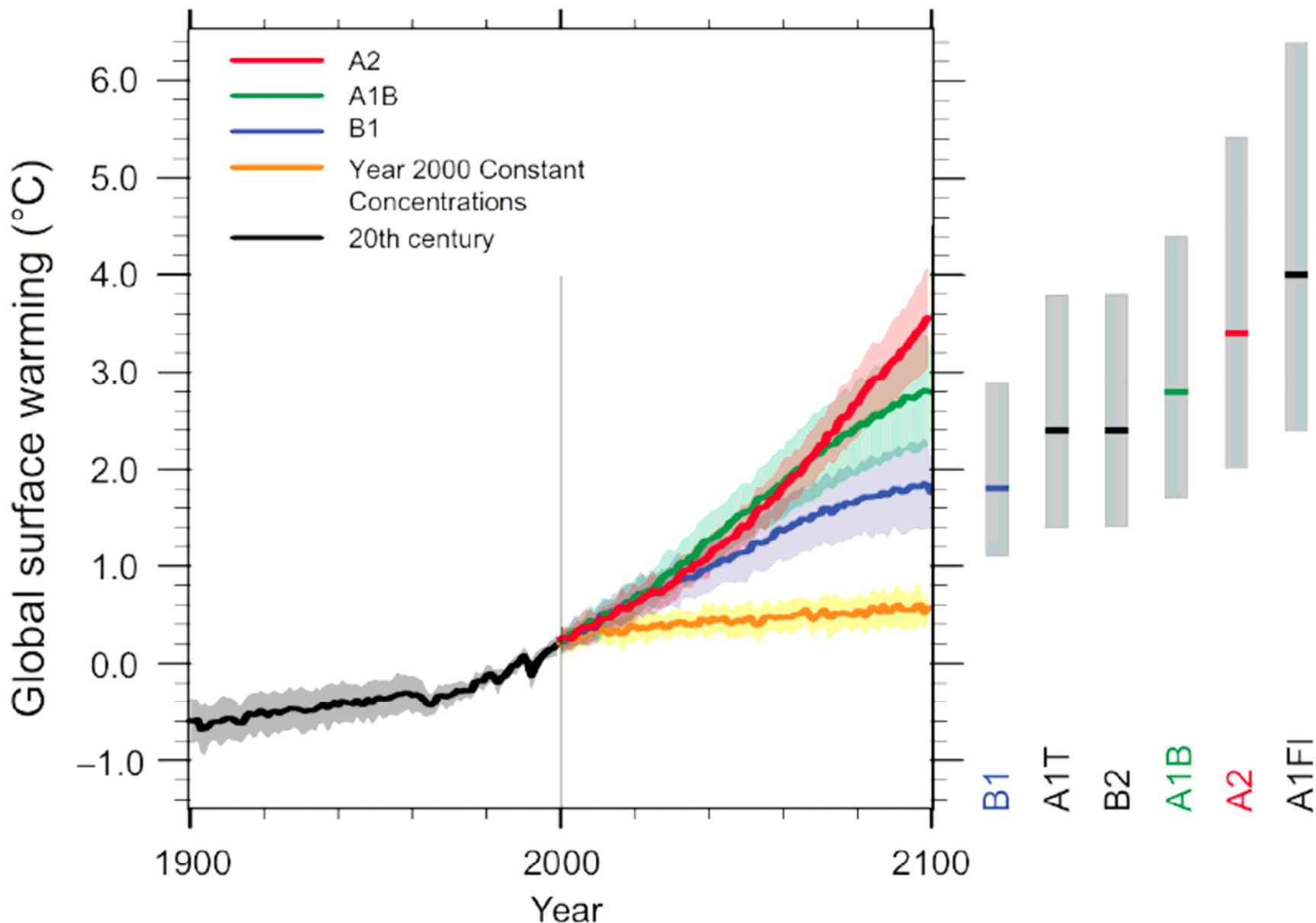
Les concentrations mondiales actuelles de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont crû de façon notable par suite des activités humaines depuis 1750 et maintenant dépassent largement les valeurs préindustrielles déterminées à partir des carottes de glace couvrant plusieurs milliers d'années. Les augmentations du dioxyde de carbone sont principalement dues à l'utilisation des combustibles fossiles et au changement d'utilisation des terres, tandis que ceux du méthane et du protoxyde d'azote sont principalement dus à l'agriculture.



GIEC groupe 1 2007

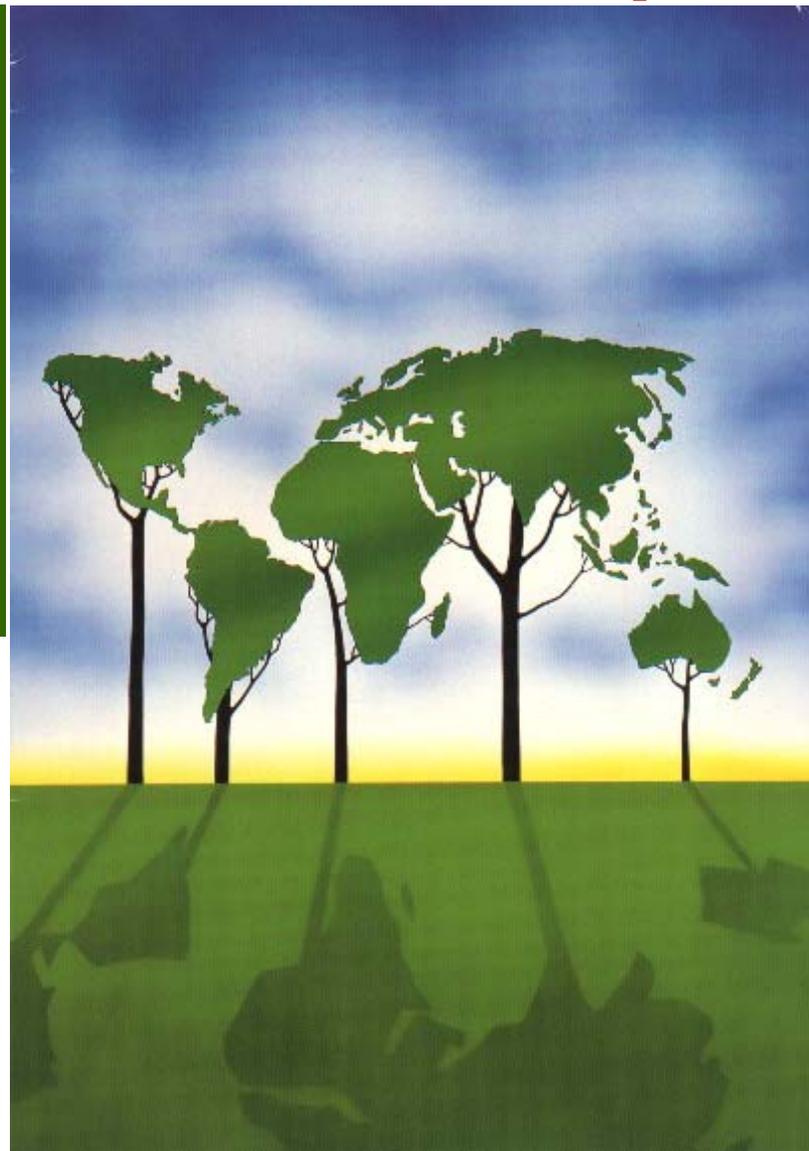
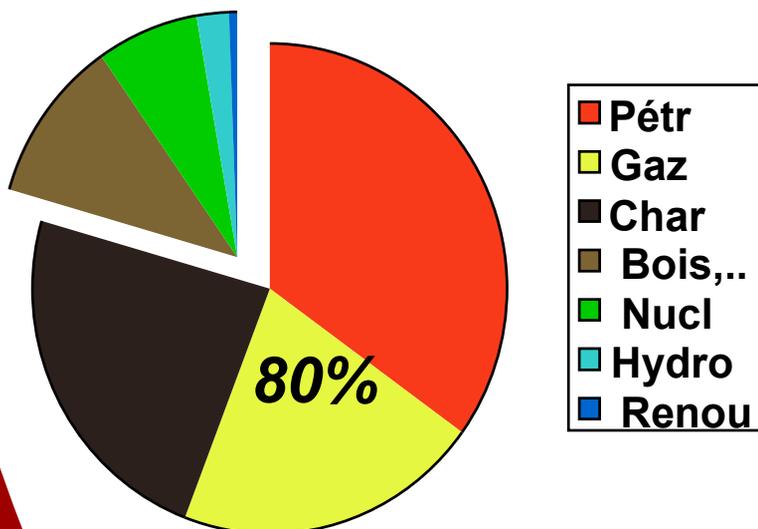
L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du 20^e siècle est **très vraisemblablement** dû à l'augmentation observée des gaz à effet de serre anthropiques. Ceci constitue un progrès par rapport à la conclusion du troisième Rapport : « l'essentiel du réchauffement observé au cours de 50 dernières années était vraisemblablement dû à l'accroissement de la concentration en gaz à effet de serre ». On peut maintenant discerner des influences humaines dans d'autres aspects du climat, comme le réchauffement de l'océan, les températures continentales moyennes, les températures extrêmes et la structure des vents.

Multi-model Averages and Assessed Ranges for Surface Warming



Le défi posé par la menace climatique

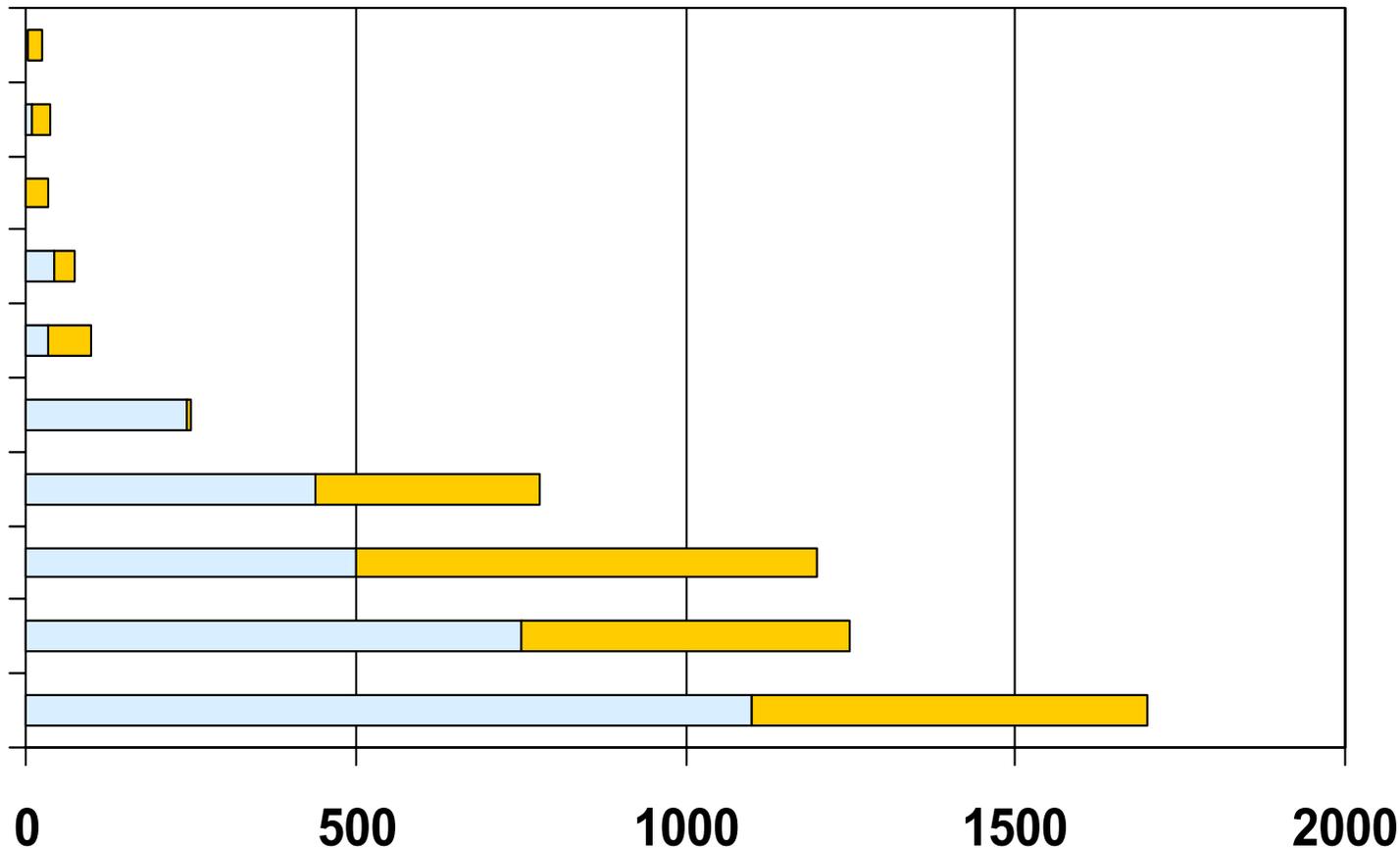
Diviser par 2
émissions de CO2
tout en
Doublant la
production d'énergie



Émissions de Gaz à effet de Serre, g CO_{2eq} par kWh_e

D. Weisser IAEA May 2006

Nucléaire
Eolien
Hydro
PV
Bois
CCS
Gaz
Fioul
Charbon
Lignite



Min
Max

Les fourchettes reflètent des différences dans les méthodes d'évaluation, le rendement thermique, le périmètre pris en compte, etc.

Dilemme : produire plus d'énergie en réduisant les émissions de CO₂

Quelles réponses ?

Maîtriser la demande d'énergie



Produire des énergies sans CO₂

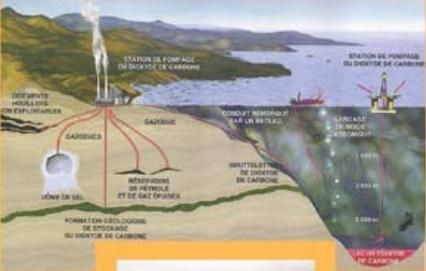
- > l'énergie nucléaire



- > les énergies renouvelables

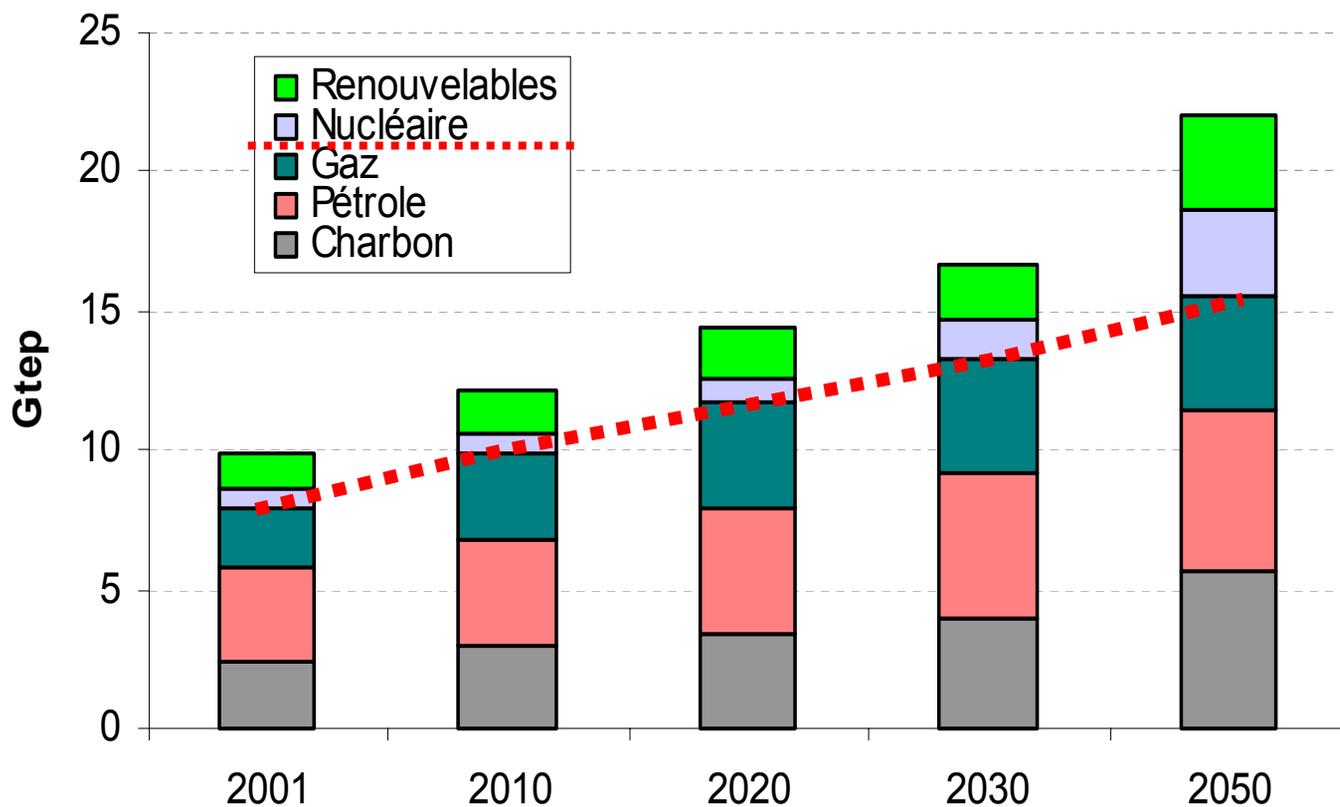


Séquestrer le CO₂



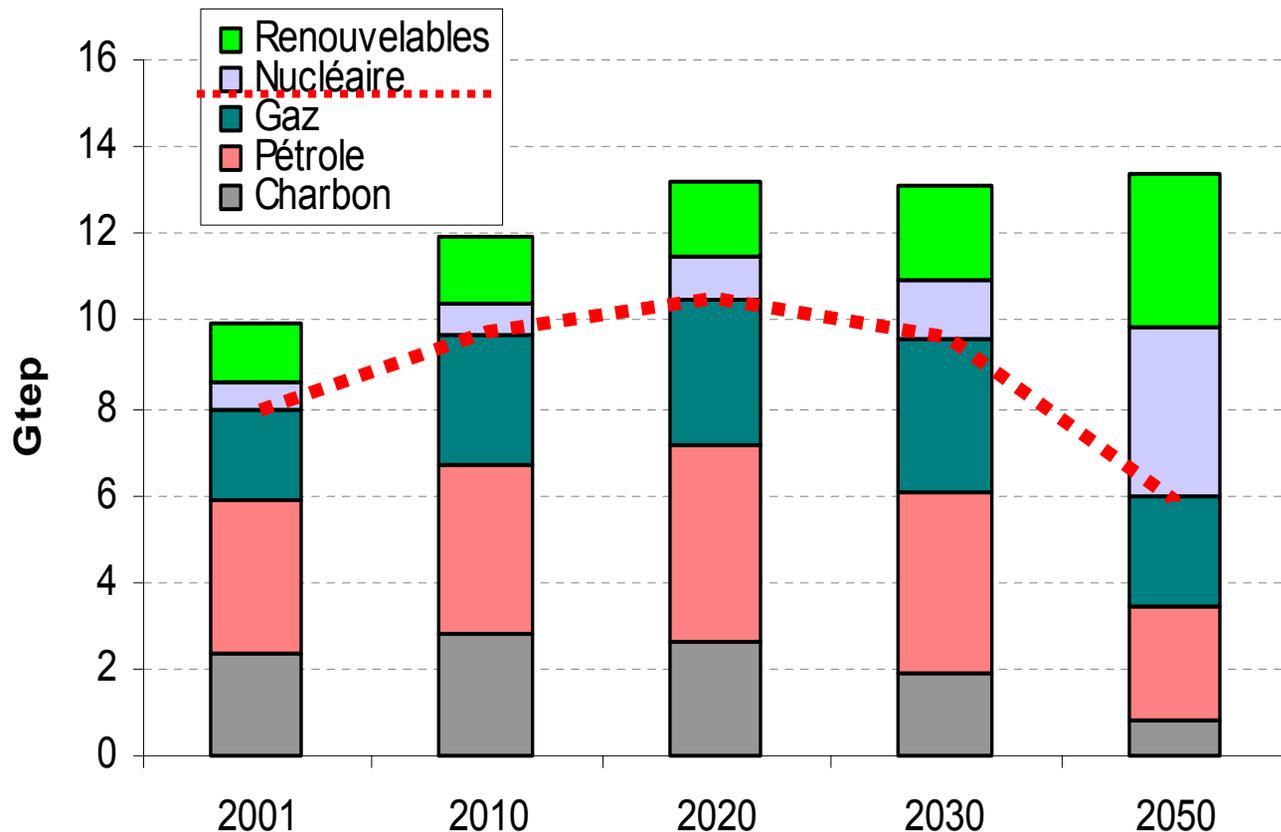
La projection de référence WETO-H2 (modèle POLES du LEPII pour DG RTD)

- ▶ **La consommation mondiale est multipliée par 2,2**
- ▶ **Le pic pétrolier puis gazier entraînent le grand retour du charbon malgré un développement très significatif des renouvelables et du nucléaire**



Un scénario mondial de stabilisation 450 ppm CO₂ (modèle POLES2005)

- ◆ La consommation mondiale d'énergie baisse de 22 à 14 Gtep
- ◆ 55% de l'approvisionnement provient maintenant des renouvelables et du nucléaire



Production électronucléaire 2006

Pays	GWe	TWh	Nb Réac.	%Elec
Etats-Unis	98	787	103	19
France	63	429	59	78
Japon	48	292	55	30
Allemagne	20	159	17	32
Russie	22	144	31	16
Corée Sud	17	141	20	39
Canada	13	92	18	16
Ukraine	13	85	15	48
Royaume U	11	69	19	18
Suède	9	65	10	52
MONDE	370	2 658	437	16

Site Web WNA Mai 2007

L'énergie nucléaire de fission



440 réacteurs dans 32 pays

2600 milliards kWh/an

= Hydraulique

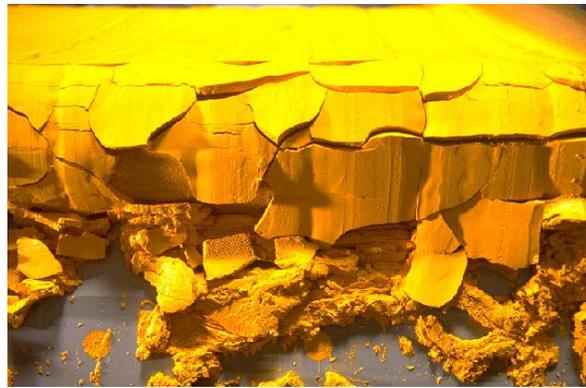
> Pétrole saoudien

16% électricité

6,8% énergie primaire

Limites à une croissance significative du nucléaire

- ▶ *Ressources en Matières Fissiles*
- ▶ *Accident grave*
- ▶ *Gestion des déchets radioactifs*
- ▶ *Prolifération des armes*



Ressources Assurées (<\$130/kgU)	4,8 Mt
Ressources ultimes « classiques »	~15 Mt
Phosphates	~22 Mt
(Eau de mer	4 500 Mt)

Consommation 2005	67 000 t
--------------------------	-----------------

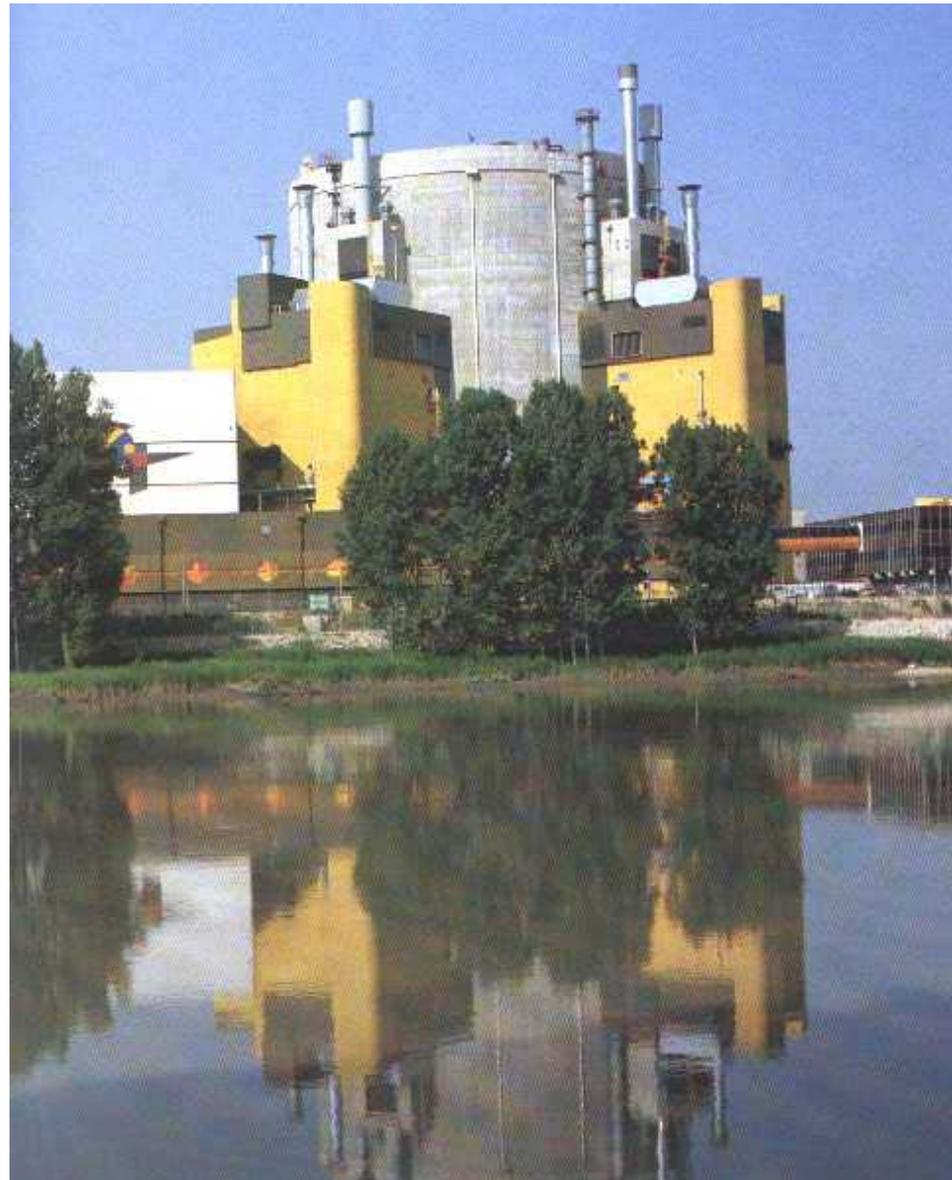
Les Ressources ultimes d'uranium "classique" sont plus de 200 fois la consommation mondiale 2005

Avec les surgénérateurs, les ressources sont pratiquement illimitées

Superphénix (Creys-Malville)

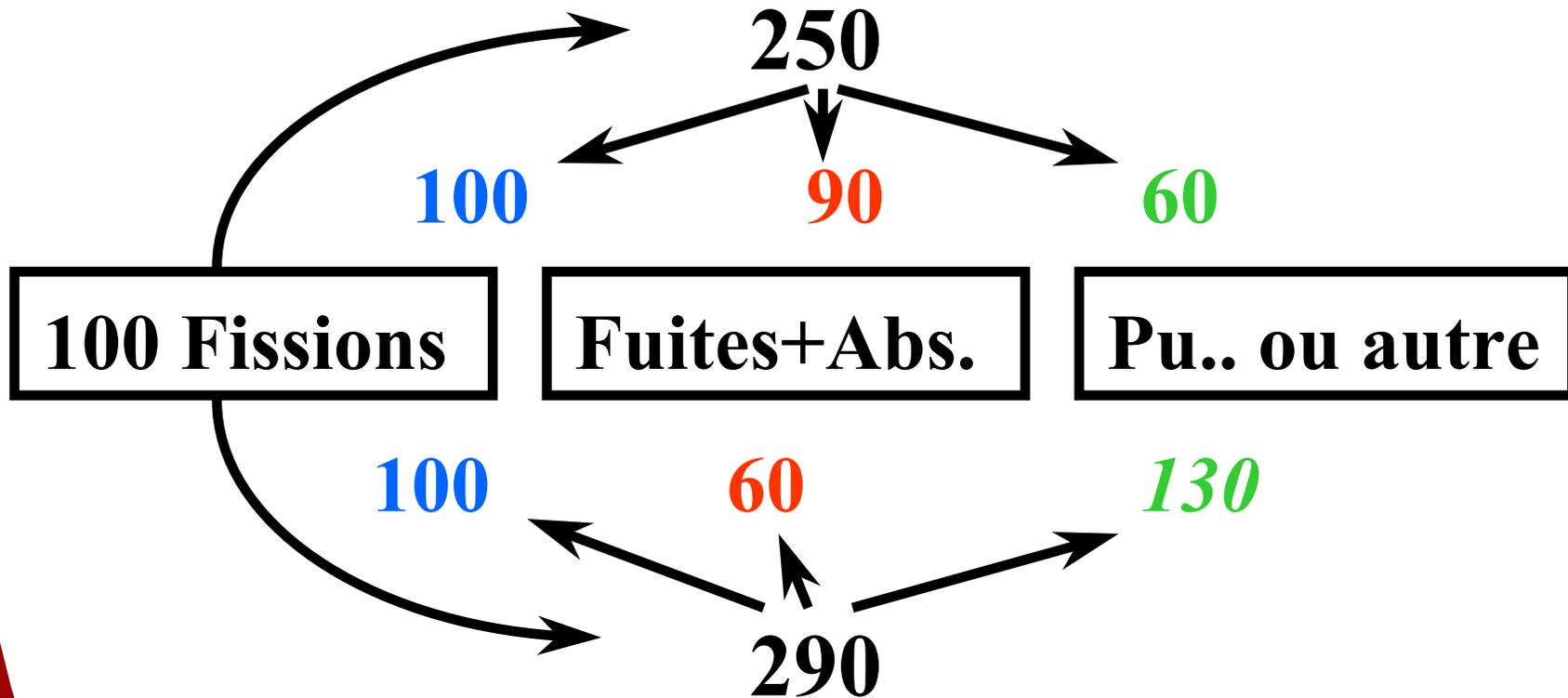
**RNR surgénérateur
de 1200 MWe
exploité par NERSA
(51% EdF)**

- Lancement 1977**
- MSI 1985**
- Arrêt 1997**



Bilans neutroniques simplifiés

Neutrons Thermiques - U²³⁵



Neutrons Rapides - Plutonium

Le Cycle RNR (ordre de grandeur)

Un REP(N4) fonctionnant en recyclage MOX, aura accumulé en 40 ans sur le sol national :

~ 5000 t d'Uranium appauvri

~ 20 t de Plutonium

Un RNR « iso-régénérateur » pourrait fonctionner en autarcie sur les 20 tonnes de plutonium disponibles.

il consommera alors ~ 1 tonne d'Uranium par an.

**Ce n'est pas la ressource uranium
qui limitera le développement nucléaire.**

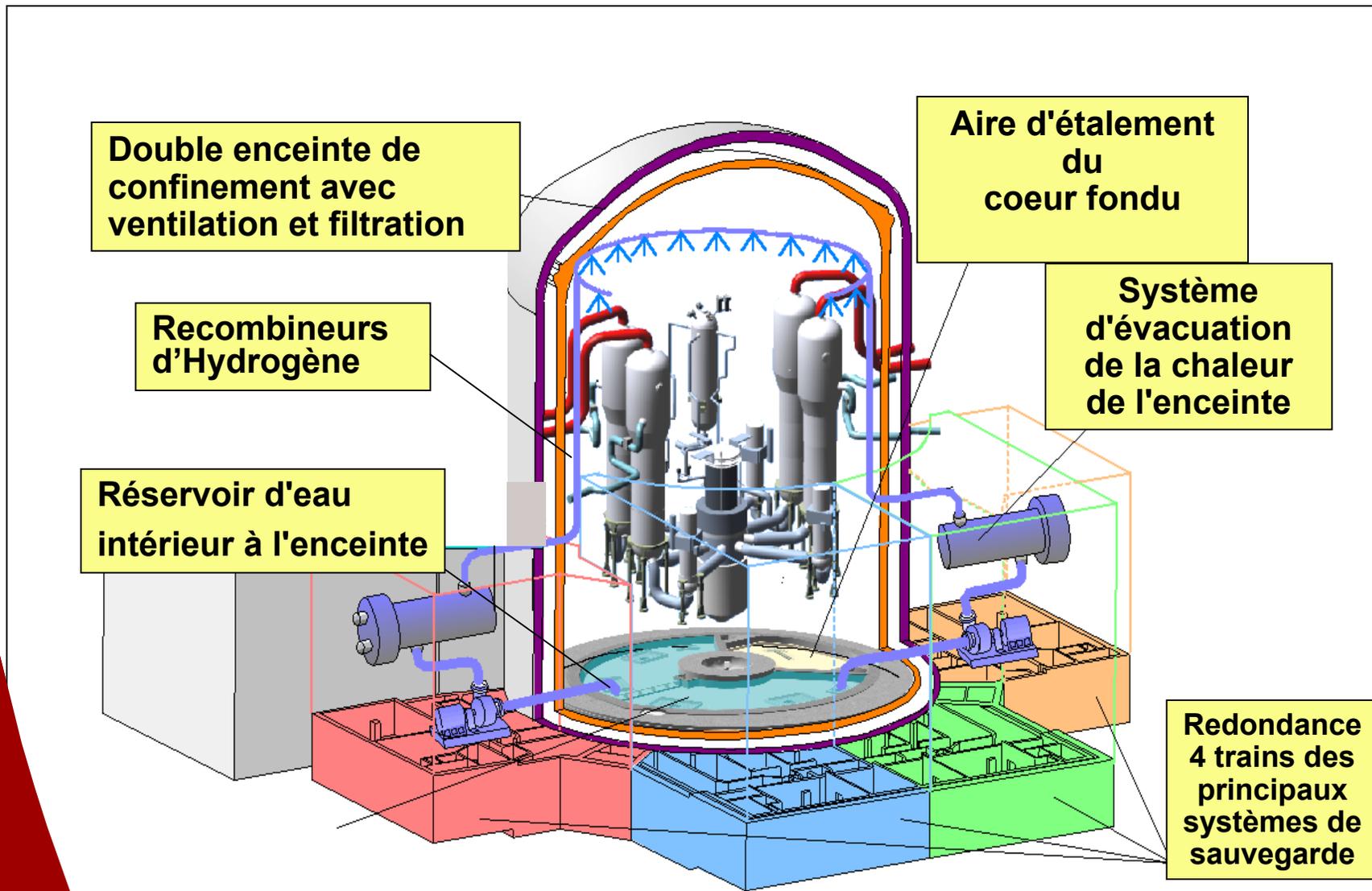
Les accidents graves



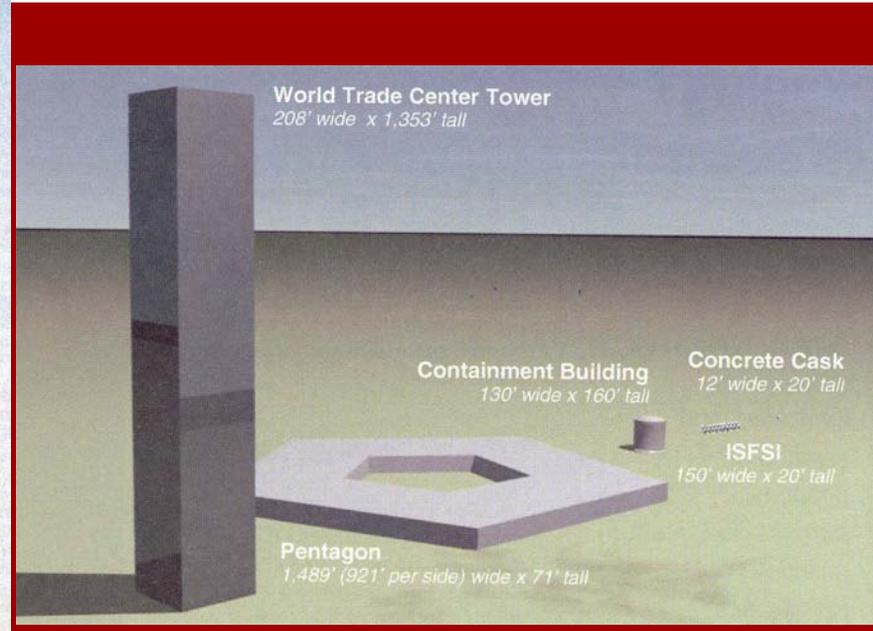
Sur 10 000 années.réacteur,
7 000 depuis Tchernobyl...
... sans accident

Les avancées en matière de sûreté

Les principaux systèmes de sauvegarde de l'EPR



Quant au terrorisme...



Déchets/an/habitant en France

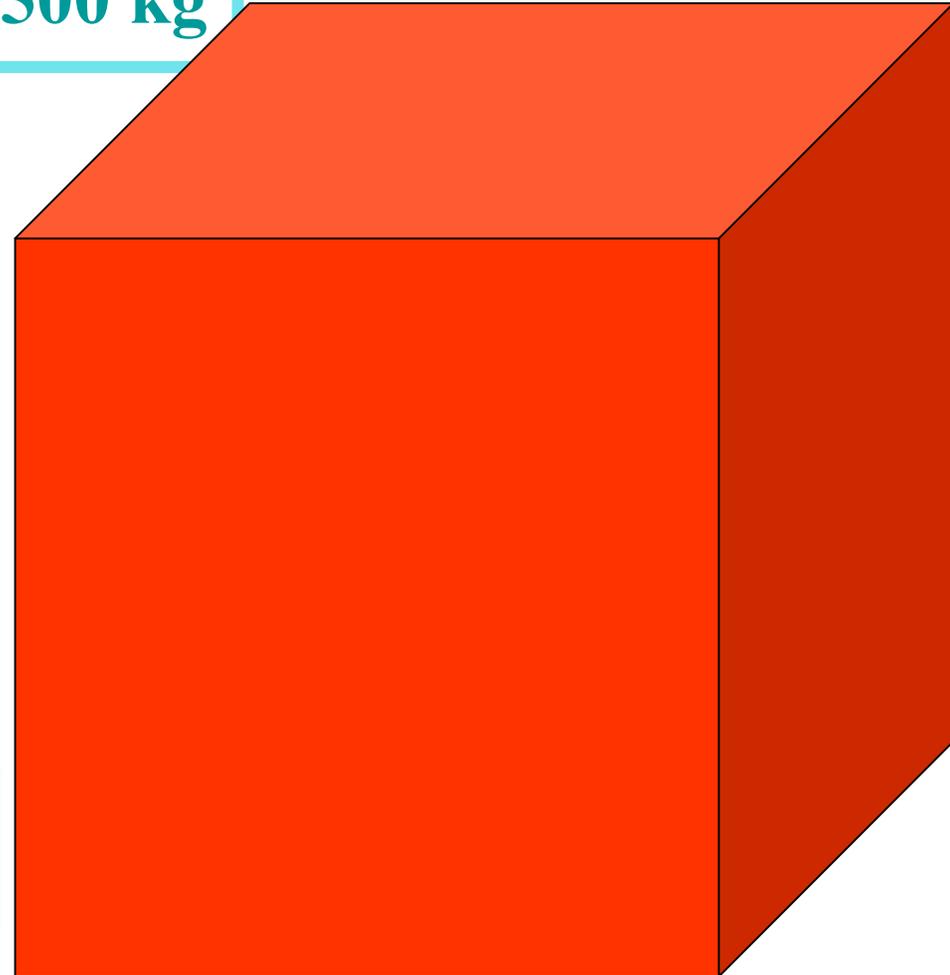
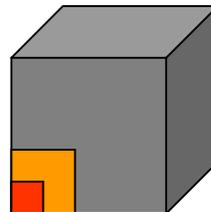
Déchets industriels : 2 500 kg

dont déchets toxiques :
100 kg

Déchets nucléaires
moins de 1 kg

dont vie longue : 100g

dont HA : 10g



Comme il y en a peu, on les gère en totalité

Les déchets nucléaires, on s'en occupe !

» Ils ne sont ni orphelins, ni dispersés à tous vents

» Les déchets FA sont stockés définitivement

» Les déchets MAVL & HA sont concentrés, confinés entreposés et surveillés.



» Là où ils sont, ils ne créent aucune nuisance à qui que ce soit

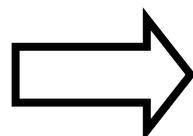
Mais ce n'est pas une solution définitive

La loi de juin 2006 en établit les bases

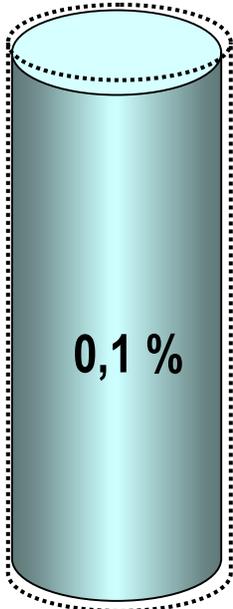
Loi du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs

- ▶ **Traitement des combustibles usés**
- ▶ **Entreposage des HA et MA-VL ...**
- ▶ **... suivi de leur Stockage **reversible** en couche géologique profonde**
- ▶ **Mise en service du Site de Stockage avant 2025, après consultations locale et nationale.**
- ▶ **Poursuivre la R&D sur P&T dans le cadre « Génération 4 »**
- ▶ **Démonstrateur en 2020 (CEA)**
- ▶ **Les producteurs de déchets financent tout.**
- ▶ **Pas de stockage en France de déchets « étrangers »**

Effet de la corrosion par l'eau



Après
10 000
ans



0,1 %

Compréhension des phénomènes

Construction des modèles mathématiques et calculs prédictifs

Validation des calculs (analogues naturels, opinions d'experts,...)

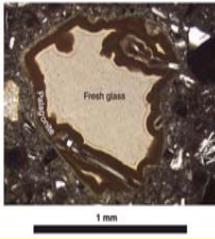


$$\frac{\partial x}{\partial t} = v \quad x = \frac{C_{Boron}(t)}{S \rho X_{Solid Boron}}$$

$$\frac{\partial C_{Si}(t)}{\partial t} = v C_{Silica} \frac{S}{V} + F(C_0 - C_{Si}(t))$$

$$C_{Silica} = C_{Silica}^{Glass} (1 - f(C_{Si}(t)))$$

$$v = v_0 \left(\frac{1 - \frac{C_{Si}(t)}{C^*}}{1 + v_0 \frac{C_{Silica} x}{D_g C^*}} \right)$$



**Après 10 000 ans,
La radiotoxicité des déchets HA vitrifiés
A considérablement décru**

Déchets vitrifiés



gisement d'uranium d'OKLO au Gabon

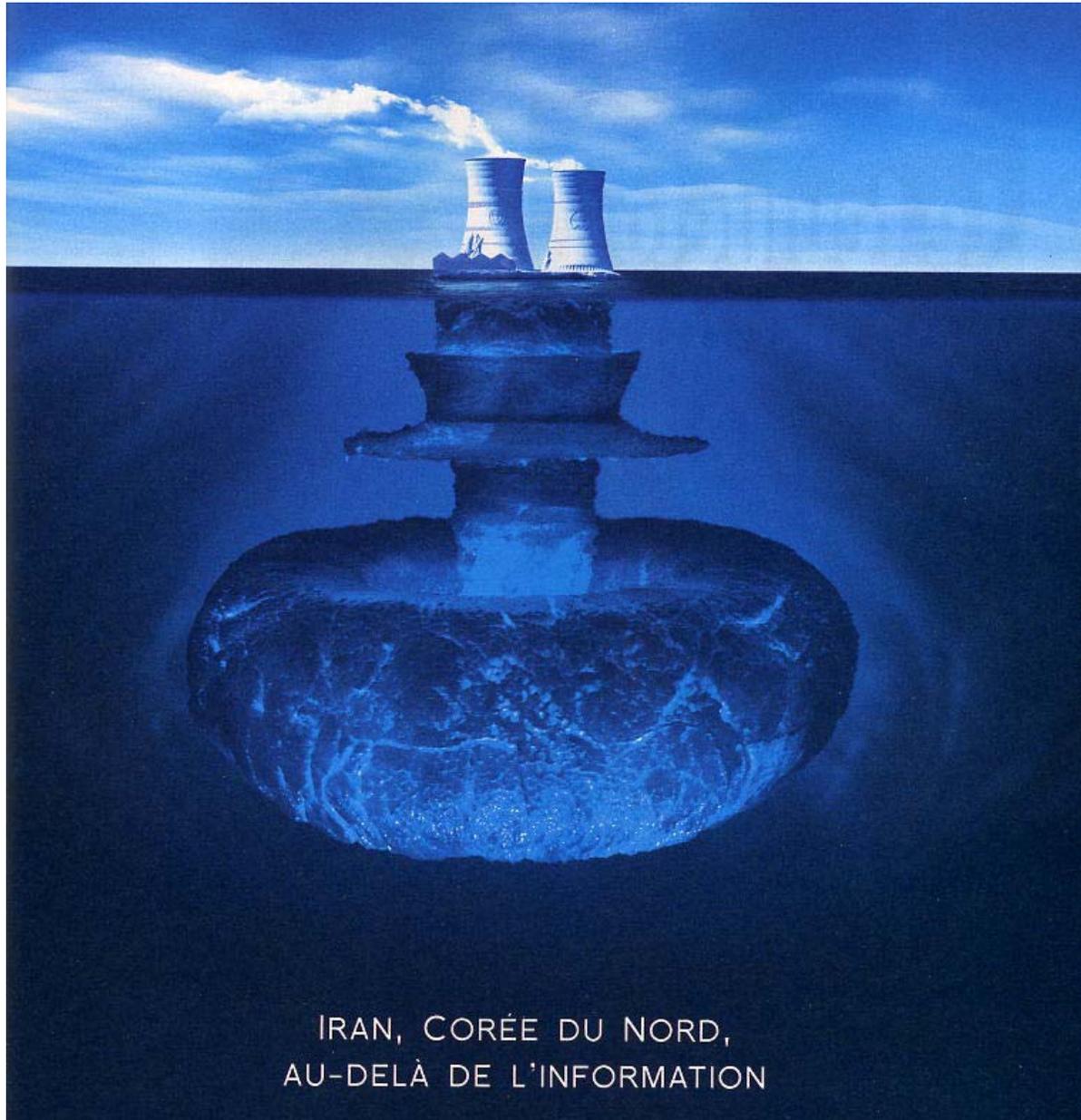
Vers un consensus international sur le stockage géologique

- ▶ ***Solution adoptée par Finlande et Suède (Site Finlandais approuvé et en cours de forage)***
- ▶ ***Solution mise en œuvre depuis 1998 au WIPP pour les déchets MAVL d'origine militaire***
- ▶ ***Solution retenue aux USA (mais difficultés sur le site choisi)***
- ▶ ***Solution étudiée au Canada, en Suisse, en Allemagne, en Belgique, au Japon, etc.***



Transport de TRUPACT vers WIPP

Pour le public en général, cela va de soi...

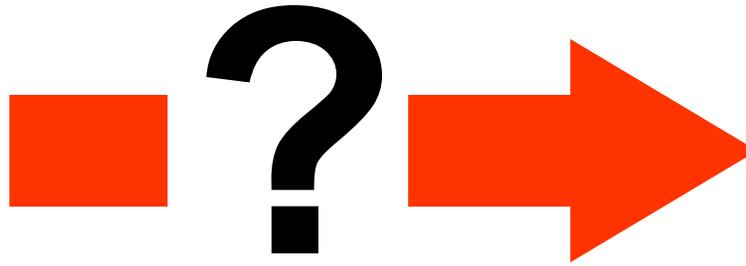


IRAN, CORÉE DU NORD,
AU-DELÀ DE L'INFORMATION

Année	Pays	Prolifération	Non-Prolifération
1945	USA	Première bombe A	
1949	URSS	Bombe A	
1952	Royaume Uni USA	Bombe A Première bombe H	
1953	URSS USA	Bombe H	Atoms for Peace
1957	ONU Royaume Uni	Bombe H	Création de l'AIEA
1960	France	Bombe A	
1963	USA/URSS/RU		Traité de Moscou (limitation des essais)
1964	Chine	Bombe A	
1967	Chine	Bombe H	
1968	France ONU	Bombe H	Traité de Non-prolifération TNP
1974	Inde AIEA Exportateurs	« Essai pacifique » A	Liste « trigger », comité Zangger Club de Londres NSG
1976	France		6 points – CPNE – Arrêt Pakistan

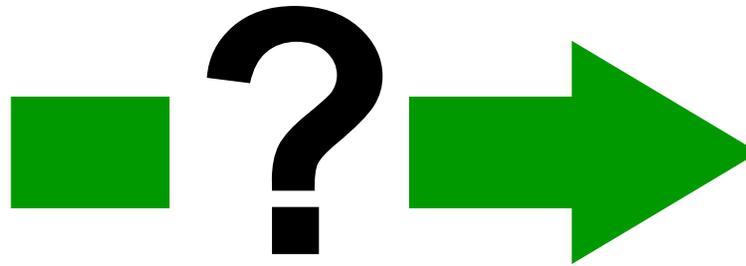
Année	Pays	Prolifération	Non-Prolifération
1990	Irak	Programme clandestin	Guerre du Golfe
1991	Afrique du Sud		Démantèlement armes, TNP
1992	France, Chine Fournisseurs (NSG)		TNP : France, Chine. Full Scope Safeguards
1995	CIS		Retour des armes en Russie Extension TNP, TICE
1997	AIEA		Protocole additionnel
1998	Inde	Bombe H	
1999	Pakistan	Bombe A	
2003	Pakistan, Libye, Iran, NK Corée du Nord	« Bazar » A Q Khan Dénonciation TNP	
2006	Iran Corée du Nord	Crise enrichissement Bombe A (?)	

Liens Énergie Nucléaire - Armements ??



- Des bases scientifiques communes (pas toutes !)
- Accès aux matières fissiles (en général, pas vraiment les mêmes)
- Tout pays décidé à le faire peut « proliférer », avec ou sans nucléaire civil (Israël, Irak)
- Développer l'énergie nucléaire fait entrer dans un système international d'engagements, de contrôles, qui rend plus détectables les activités clandestines (N.K.)

Liens Énergie Nucléaire - Armements ??



Au contraire !

Le nucléaire civil va « démilitariser » les matières militaires en excès (dilution HEU, MOX)

La Centrifugation, sous l'angle de la prolifération

- ▶ *Discrète : cascades courtes, inventaire minimum, peu énergivore*
- ▶ *Détournable :*
 - ◆ *Pas de problème de criticité*
 - ◆ *Possibiliter de réarranger les cascades, ou de réalimenter des batches enrichis*
- ▶ *Technologie pas trop sophistiquée... si le coût est secondaire*

« Weapons Usability » du Plutonium

« More than 2000 nuclear explosions have been carried out worldwide since 1945; none is known to have used reactor-grade plutonium (>18% Pu-240), none with Pu from light water reactors. Such reactor-grade Pu can be used *in principle* to make a crude explosive device; the practical difficulties are nevertheless considerable »

Bruno Pellaud, Jnl Nuc Mat Mgmt, Fall 2002

Grades	Plutonium 240	Usability
<i>Super Grade (SG)</i>	<i>< 3 %</i>	<i>Best quality</i>
<i>Weapon Grade (WG)</i>	<i>3 – 7 %</i>	<i>Standard aterial</i>
<i>Fuel Grade (FG)</i>	<i>7 – 18 %</i>	<i>Practically usable</i>
<i>Reactor Grade (RG)</i>	<i>18 – 30 %</i>	<i>Conceivably usable</i>
<i>MOX Grade</i>	<i>> 30 %</i>	<i>Practically unusable</i>

En guise de conclusion

- ▶ *La problématique de l'énergie est dans le dilemme Développement/Environnement*
- ▶ *Le nucléaire n'est pas LA solution, mais pas de solution aujourd'hui sans plus de nucléaire*
- ▶ *Pas de blocage obligatoire à son développement : l'obstacle principal est l'acceptation publique*