

Claude Acket

# LE NUCLÉAIRE DURABLE

Un des piliers de notre avenir énergétique sans carbone



Phoenix, l'oiseau mythique qui renaît de ses cendres  
Symbole de la surrégénération

LGO  
EDITIONS

# Notre approche

**Les deux faces du terme durable par analogie à l'anglais  
« Sustainable » ( acceptable, maintenable ...)**

**- Durées temporelles**

**Sur quelques dizaines d'années, quelques siècles , l'infini  
(renouvelable ?)...mais pour répondre à quels besoins ?**

**- Acceptabilité sociale (acceptable , supportable ..)**

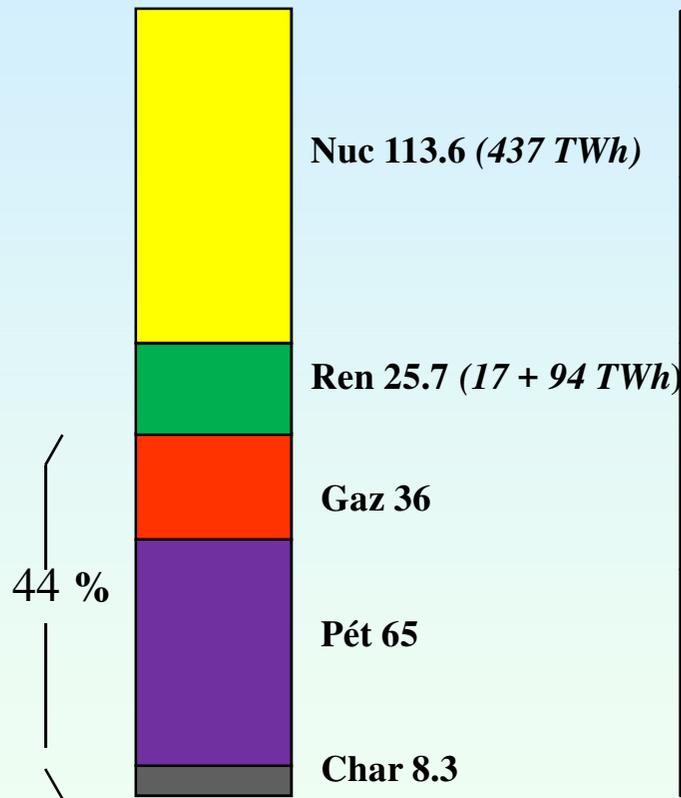
**Les pour et les contre, faut-il faire la balance ?**

**Une vrai approche du principe de précaution ?**

# Situation actuelle Energie Primaire en tep

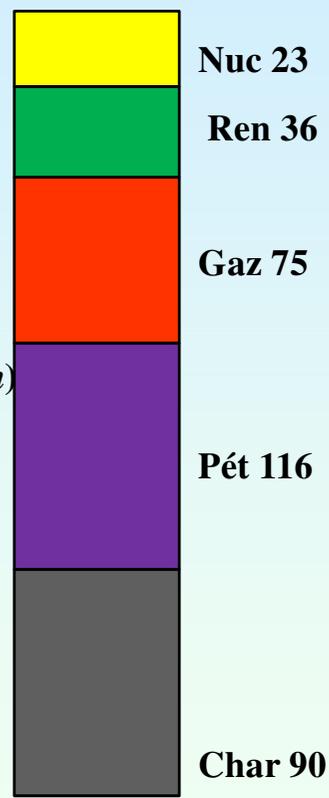
*La tep: tonne équivalent pétrole = 42 GJ, ~ 1.6 tonne de houille*

**France**  
248.6 Mtep



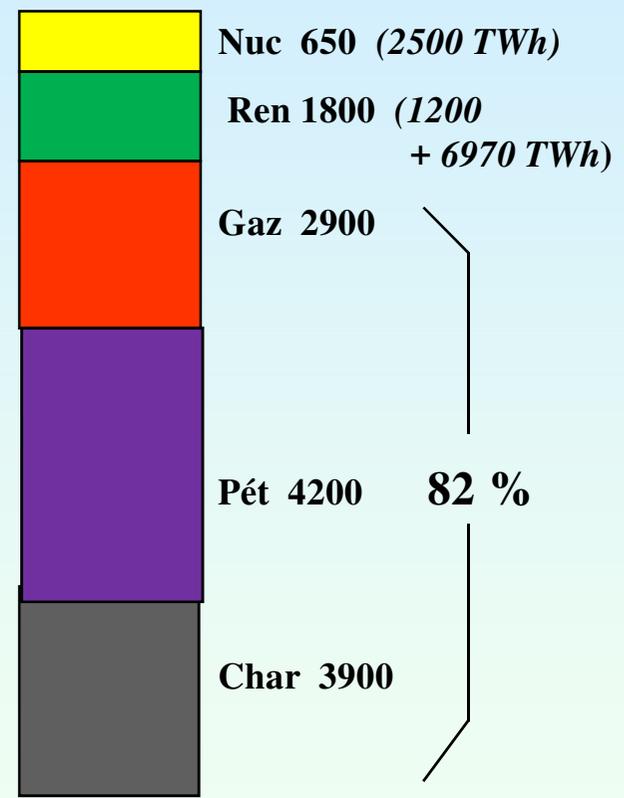
**Rejets** 6,1  
**En finale** 2.3

**Allemagne**  
340 Mtep



**Rejets** 9,7  
**En finale** 2.7

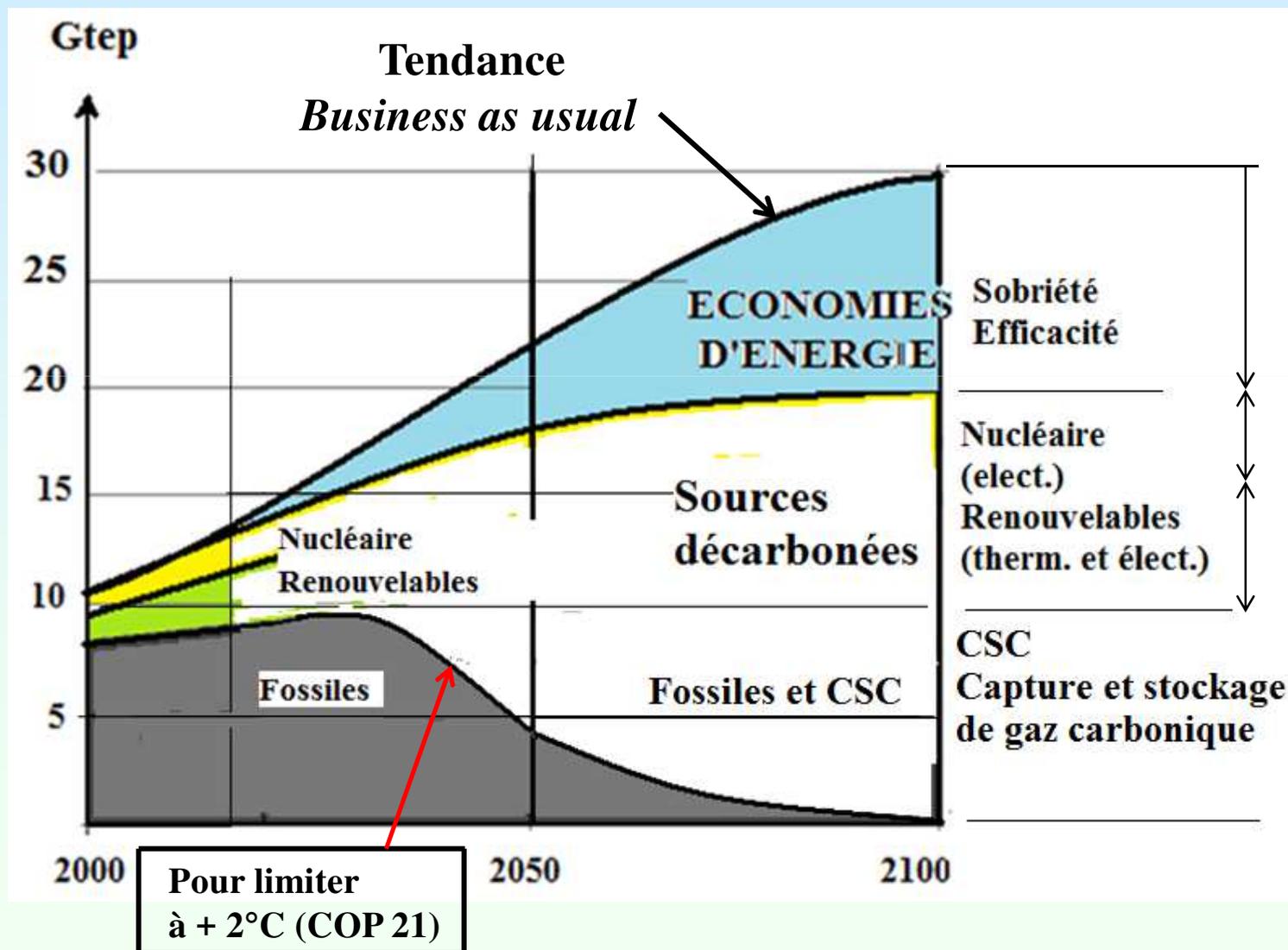
**Monde**  
13 500 Mtep



**Rejets** 5.3 t CO<sub>2</sub>/hab.an  
**En finale** 1.5 tep/hab.an

# Monde, en parcourant le siècle

## Un avenir à prévoir



# Combustibles les réserves

Pour mémoire dixit le club de Rome en 1972  
« *Attention dans 30 ans il n'y a plus de pétrole* »

	<b>Ra/Pa</b>	<b>R ultimes ?</b>	
<b>Pétrole</b>	<b>60</b>	<b>x 2</b>	
<b>Gaz</b>	<b>70</b>	<b>x 2</b>	
<b>Charbon</b>	<b>250</b>	<b>x 2</b>	
<b>Uranium actuel</b>	<b>270</b>	<b>x 2 à 4</b>	
<b><i>avec RNR</i></b>		<b>x 100 à &gt; 10 000</b>	<b>DURABLE ?</b>

*70 % du pétrole*

*40 % du gaz*



**En France un stock de  
300 000 tonnes d'uranium appauvri  
Avec RNR  
3 000 ans de la consommation actuelle**

# Nucléaire situation monde

**Production nucléaire de 2 500 TWh (10.5 % du total 24 000 TWh (charbon 9 430, gaz et pétrole 6 170, hydraulique 3 810, EnRi 1 050...))**

**Puissance installée de 378 GW (France 63 GW sur 58 tranches )**

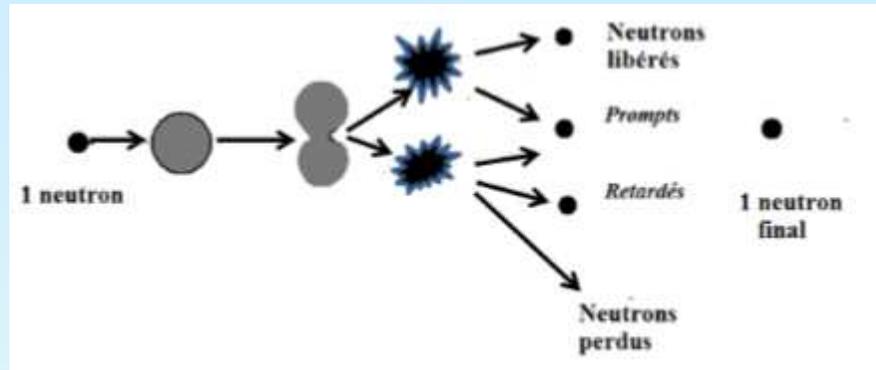
## **Sur 435 tranches**

- **279 PWR** : eau pressurisée (65 aux USA, 58 en France, 34 en Russie, 24 au Japon...)
- 74 BWR : eau bouillante (34 aux USA, 22 au Japon ...)
- 49 PHWR : eau lourde pressurisée (18 en Inde, 18 au Canada ...)
- 16 GCR : graphite/gaz, tous au Royaume Unie
- 15 RBMK (appellation Russe) graphite et tubes de force, tous en Russie.
- 2 SFR

**En 2015, il y avait dans le Monde 72 tranches en construction**

28 en Chine, 10 en Russie, 6 en Inde..., et une en France (Flamanville 3)

# Besoins d'Uranium



Une fission 193 Mev(31 pJ, 0,03 nJ)  
1 gramme d'uranium naturel  
(0,7 % d'uranium fissile 235)  
produit 154 kWh (th)

France : 58 tranches nucléaires 63 000 MWe (440 TWh)

Besoins France 8 000 tonnes d'uranium naturel par an

- 17 % avec Mox (22 réacteurs) et U de retraitement (4 réacteurs)

Equivalent à 165 millions de tonnes de charbon,

Monde : 434 tranches nucléaires 2 500 TWh

**Besoins actuels Monde 66 000 tonnes par an**

*(à côté: pétrole 4,2 milliards de tonnes, charbon 6 milliards de tonnes)*

# RESERVES NUCLEAIRE DURABLE ?

A ce jour utilisation U 235 ( 0.7 % dans l'uranium naturel ) Ra/Pa 270

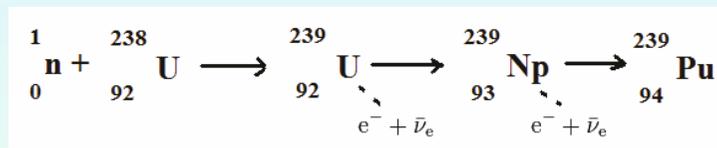
*Un plus: le recyclage Pu de retraitement ( MOx)*

Si parc nucléaire mondial x 4.3 dans ce siècle,

avec les techniques actuelles uranium jusqu'en 2110

Si parc nucléaire x 6 dans ce siècle, appel aux phosphates vers 2080 et échéance 2110

- Au-delà surgénération U 238 fertile → Pu ( fissile)



Réserves terres x 100 (hors eau de mer) 25000 ans avec facteur 6

*Avec eau de mer 1 million d'années avec le facteur 6 et renouvelable !*

Autre: Th 232 fertile → U233 ( fissile)



# Vision mondiale le GIF

## Génération International Forum

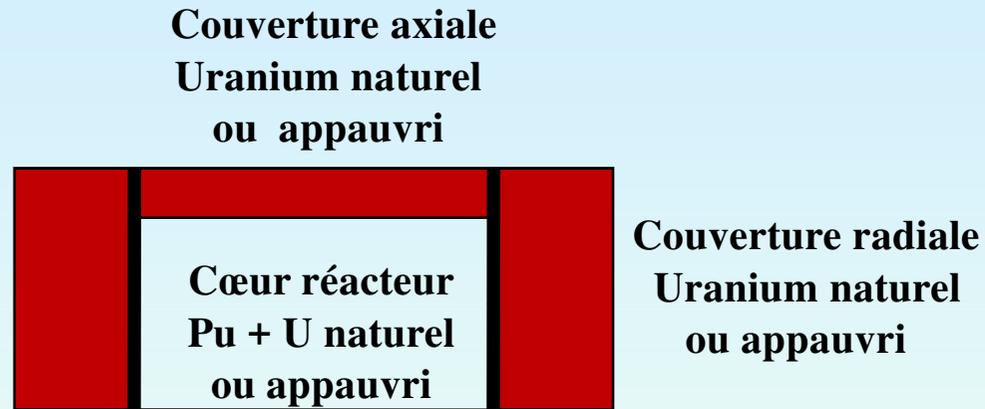
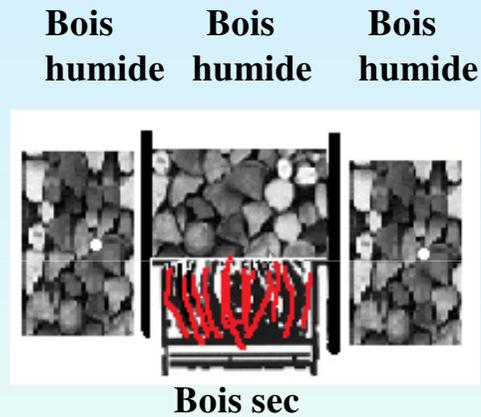
**Sur la base de critères fixés (sûreté, économie, soutenabilité), le GIF a retenu, en 2000, six filières :**

- SFR, ou RNR-Na : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium**
- VHTR : réacteurs à très haute température, à spectre thermique**
- GFR : réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz**
- LFR : réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb**
- MSR : réacteurs à sels fondus à spectre rapide ou thermique**
- SCWR : réacteurs refroidis à l'eau supercritique à spectre rapide ou thermique**

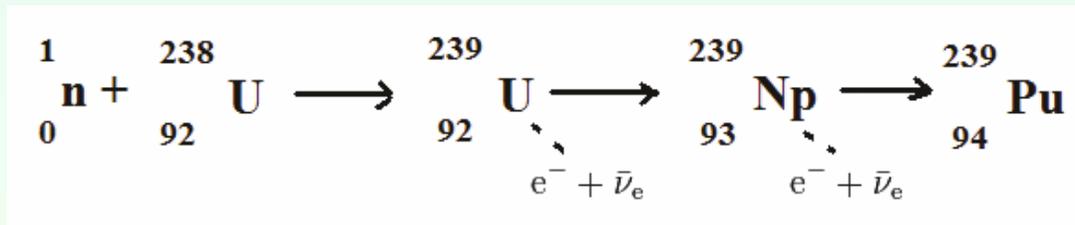
**La filière SFR est celle qui a retenu le plus d'adhérents, puisque tous, sauf le Canada, la Suisse et l'Afrique du Sud, se sont à des degrés divers impliqués dans cette filière.**

# Sous ou Iso ou Surgénération

## Produire du combustible en le consommant



Au départ pour 1 000 MWe,  
il faut charger  
6 tonnes de plutonium → qui vont produire par ex:  
6 à 7 tonnes de Pu

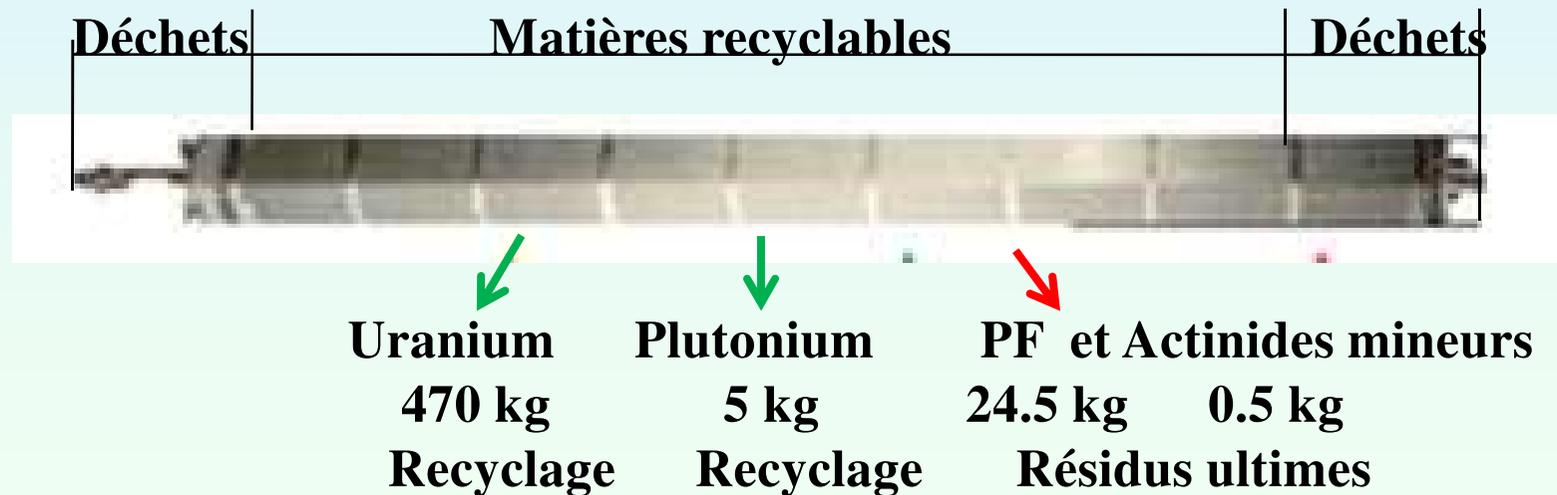


*Fission Pu émet 2.9 neutrons*  
*Fission U 235 émet 2.4 neutrons*

# Le départ : Plutonium issu du combustible « usé » PWR

*Avant irradiation en réacteur  
un combustible : 500 kg d'uranium*

**Après irradiation**



*Un modèle d'économie circulaire !*

# Caractéristiques RNR Sodium

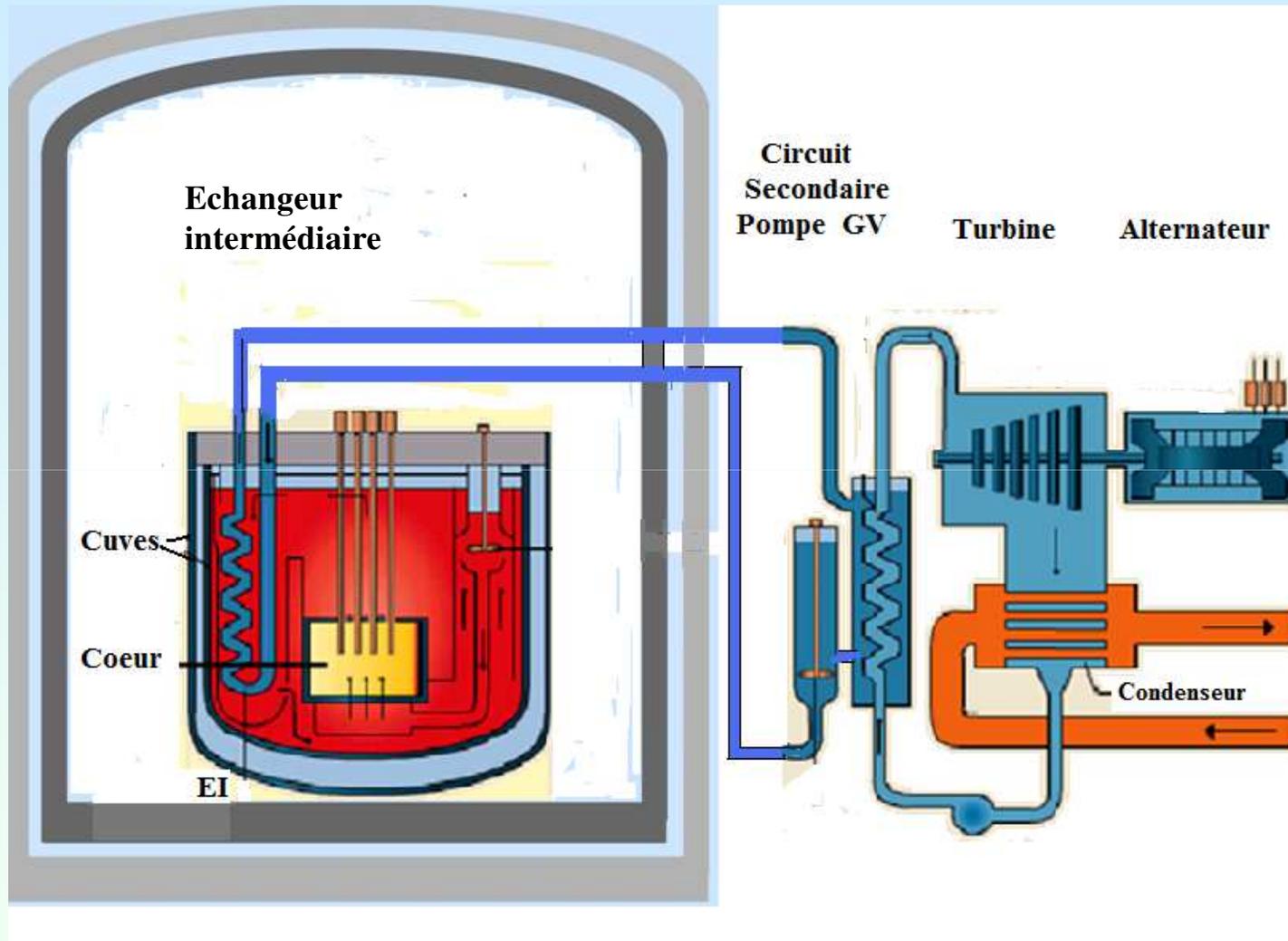
**Neutrons rapides, faibles sections efficaces  
d'où plus forte concentration en combustibles,  
fortes densités de puissance.**

**Besoin d'un réfrigérant efficace, mais eau exclue  
(thermalisation), d'où le choix sodium**

## **Le Sodium**

- + Thermique favorable**
- + Pas de pression**
- feux**
- réaction sodium eau (d'où le circuit secondaire)**

# RNR Sodium Intégré



# Les références

**370 Années de fonctionnement: Russie 106, USA 61, France 58...**

BOR 60 (Russie)	12 MWe	(1969 - )
<b>Phénix</b>	<b>250 MWe</b>	<b>(1973 - 2009)</b>
BN 350 (Kasakhstan)	350 MWe	(1974 - 1999)
Joyo (Japon)	100 MWth	(1977 - )
<b>BN 600 (Russie)</b>	<b>600 MWe</b>	<b>(1980 - )</b>
FBTR (Inde)	40 MWTh	(1985 - )
<b>Super Phénix</b>	<b>1200 MWe</b>	<b>(1986 - 1997)</b>
Monju (Japon)	300 MWe	(1994 - 2011 )
CEFR (Chine)	25 MWe	(2011 - )
<b>BN 800 (Russie)</b>	<b>800 MWe</b>	<b>(2015 - )</b>

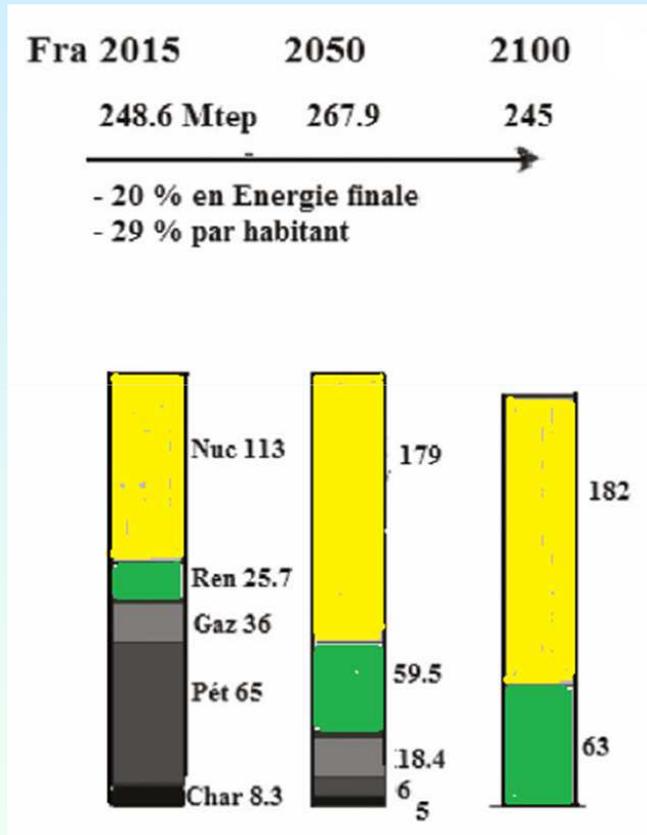


*53 mois de fonctionnement (facteur de disponibilité 90 % en 1996)  
25 mois de travaux (barillet, pollution ciel, fuite argon EI)  
54 mois de procédures administratives*

## Les constructions

- Inde : PFBR 500 MWe (2017 criticality)
- Chine : CFR 600, chantier ouvert en 2017, pour mise en service en 2023 , puis 5 autres CFR 600 avant 2030, puis CFR 1000, en parallèle en projet 2 BN 800

# Une perspective France Negatep 2050 (DNTE)....2100



## La base sortir des fossiles

- Charbon quasi déjà fait
- Pétrole (mobilité) vers bio carburants et électricité décarbonée
- Gaz (chaleur) vers Ren Th (biomasse, géoth.... et électricité décarbonée (pompes à chaleur...))

## Globalement plus d'électricité en production

2015: 573 TWh (Nuc 437; Ren 94,6; Fos 41,3)

2050: 845 TWh (Nuc 688; Ren 137; Fos 20)

2100: 840 TWh (Nuc 700; Ren 140; Fos 0)

## En puissances installées

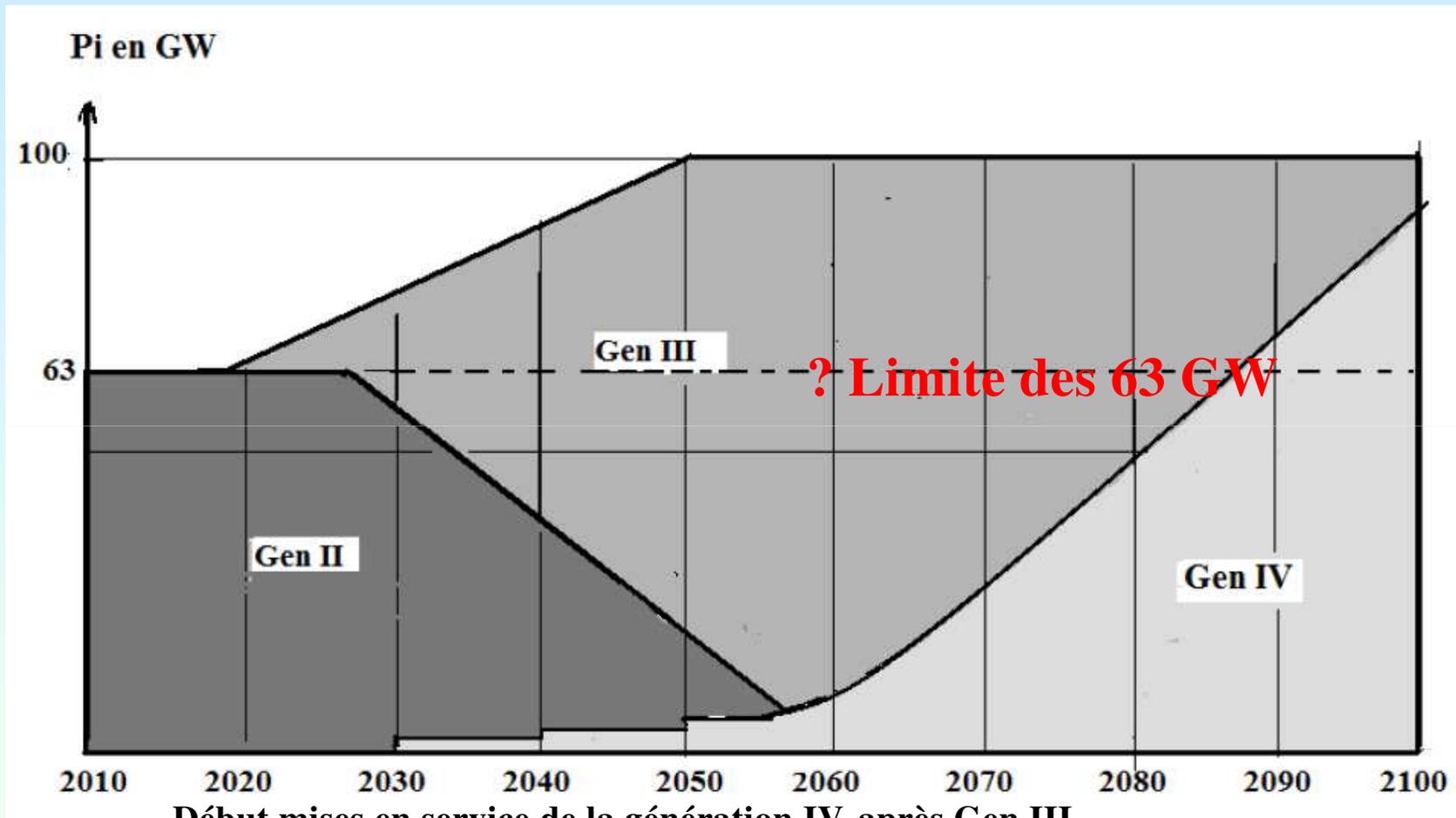
2015: 128 GW (Nuc 63; Ren 43,5; Fos 22)

2050: 173 GW (Nuc 100; Ren 53; Fos 20)

2100: 155 GW (Nuc 102; Ren 53; Fos 0)

## Les limites des EnRi la variabilité

# Nucléaire, une perspective France de Gen II à III, à IV



Début mises en service de la génération IV, après Gen III

Selon le scénario Négatep , Hors la loi actuelle des 63 GW

« En conclusion intermédiaire, le passage à un nucléaire durable est possible en France, sans blocage du fait de l'absence de plutonium d'amorçage. »

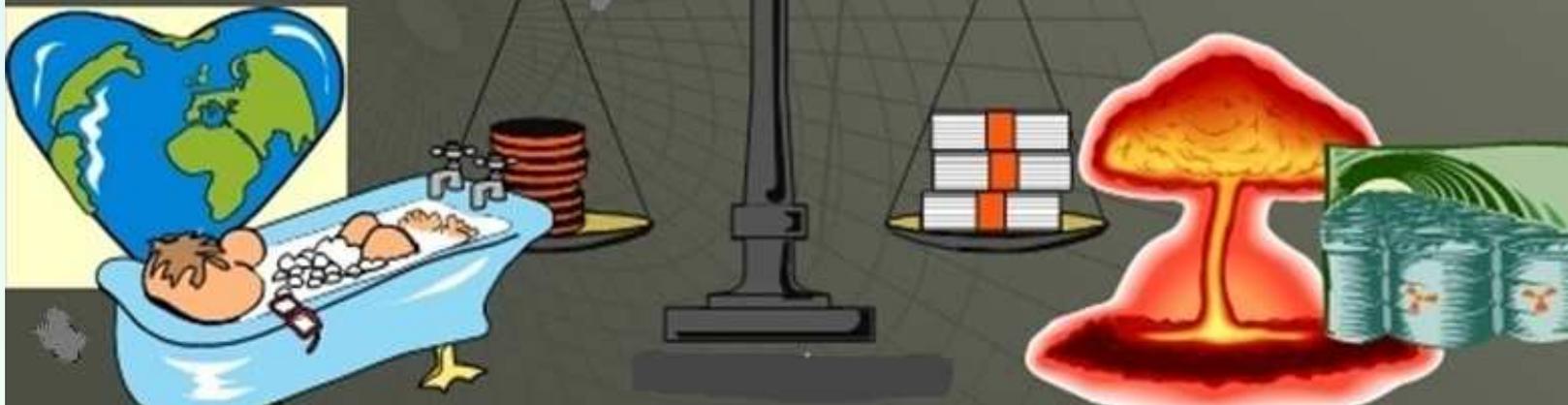
# L'acceptabilité du nucléaire

## ◆ Bénéfices

- Source énergie
- Économie
- Indépendance
- Effet de serre
- Le médical

## ◆ Contraintes

- **Cancers**
- **Incertitudes**
- **Déchets**
- **Accidents**
- **Armes nucléaires**



**Mais le pire des maux serait le manque d'énergie,  
la plongée vers la décroissance, même dite heureuse...**

# L'acceptabilité du nucléaire

## Les éléments positifs

- Pas de pollution, lutte contre l'effet de serre

*Et pourtant 77 % des Français pensent qu'en baissant le nucléaire on participe à la lutte contre le réchauffement climatique*

- Indépendance énergétique

*L'uranium est importé, mais la matière première ne représente qu'environ 3 % du coût du kilowattheure. Avec la surgénération indépendance totale*

- Source pilotable, adaptabilité aux besoins et à la variabilité EnRi

*Facteur charge: Pv 0,15; Eolien 0,35 , Nuc 0,9 (pilotable)*

- Prix modéré et stable de l'électricité

## Les réserves, blocages

- Rayonnements
- Accidents
- Déchets

# ACCEPTATION SOCIALE LES BLOCAGES

## - RAYONNEMENTS FAIBLES DOSES

+ 0.1 % du Rayonnement naturel (2,4 mS/an)

Question fondamentale: la limite des faibles doses (50 à 100 mS ?)

## - ACCIDENTS

Source d'énergie la moins meurtrière *réf :OMS*

5 fois moins que le GAZ

17 fois moins que le CHARBON

## - DECHETS

Volumes réduits: par Français 1 kg/an

dont 10 g vie longue et très radioactifs vitrifiés

(à côté de 6.600 kg de CO<sup>2</sup>, 4.000 kg de déchets dont 100 kg dangereux)

## CHOIX ENERGETIQUE ET SANTE

Académie de Médecine 25 juin 2003

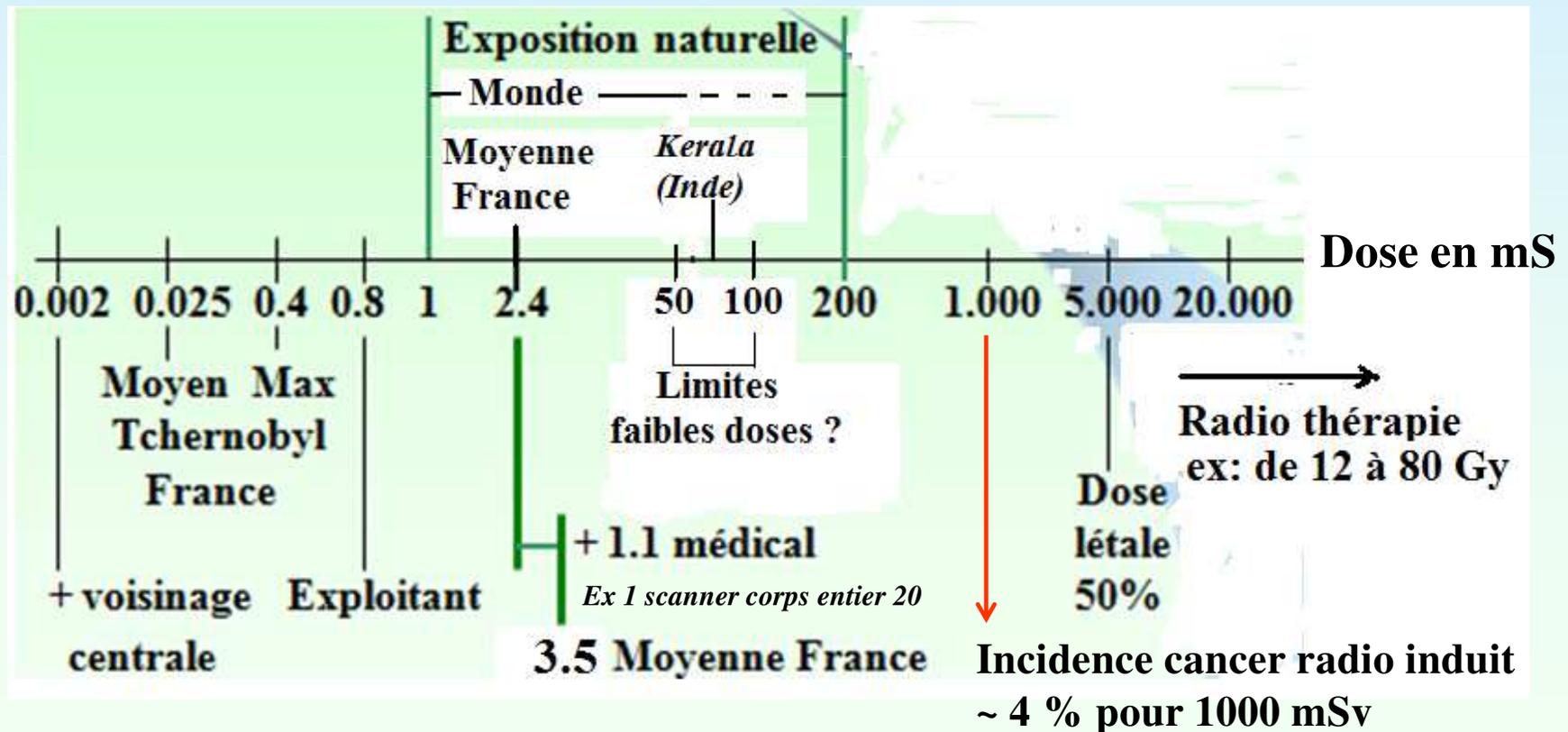
*Maintenir la filière nucléaire dans la mesure où elle s'avère avoir le plus faible impact sur la santé par kWh produit*

# RAYONNEMENTS DOSES

millièmes de Sievert / an

« Toutes les choses sont poison, et rien n'est sans poison, seule la dose fait qu'une chose n'est pas un poison » Paracelse ( XVe siècle)

Pour les « faibles doses » aucun effet biologique (mécanismes de réparation de l'ADN)  
(très faibles doses l'hormésis ?)



# Energie et santé, les accidents

**Dans le cadre de l'énergie, entre 1969 et 2000 « les grands accidents » (cf OMS)**

- **Hydraulique : Henan ( Chine ) 230 000 morts, Machlu ( Inde ) 30000 morts**  
**Autres : 4 015 morts (13 accidents)**
- **Pétrole : 20 200 morts (397 accidents)**
- **Charbon : 6 418 morts (133 accidents)**
- **Gaz : 6 054 morts (240 accidents)**
- **Nucléaire : Three miles Island (1979) 0 décès**  
**Tchernobyl (1986) 76 ?! morts, ou 4 000 ou 600 000 selon Arte ?...**  
**Fukushima (2011) 0 décès**

**Autres décès: somme de tous les « petits accidents » et « décès tardifs »**

**Globalement en une seule année (repère 2000) 288 000 morts liés à l'énergie,  
dont 2500 « grands accidents »**

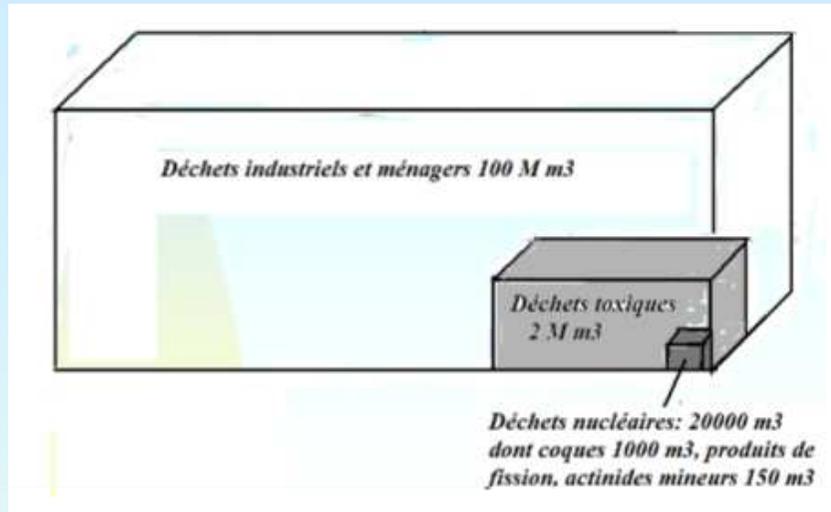
**A coté la « pollution atmosphérique et particules fines », décès prématurés par an,  
Monde 2 100 000 , France 46 000, Allemagne 81 000**

**Années de vie perdues par GWhe**

**Charbon : 0.35 , Gaz : 0.1, Nucléaire : 0.02 (estimations pessimistes effets doses)**

**De 1971 à 2009, le nucléaire aurait évité 1.84 million de morts (ref: James Hansen)**

# Déchets nucléaires



**Volumes réduits: par français, 1 kg/an dont 10 g vie longue et très radioactifs à côté de 4.000 kg de déchets dont 100 kg dangereux**

**Stockage définitif pour 90 % du volume des déchets radioactifs**

**TFA Très faible activité « tumulus gazon » (Morvilliers)**

**FA Faible activité, vie courte « casemate béton » (Soulaines)**

**Pour le reste:**

**MA Moyenne activité (structures des assemblages)**

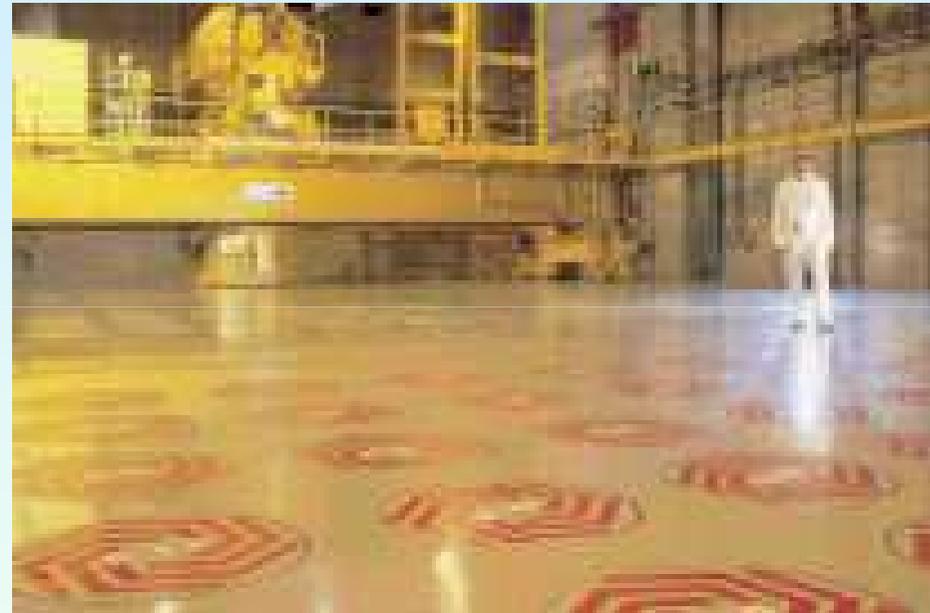
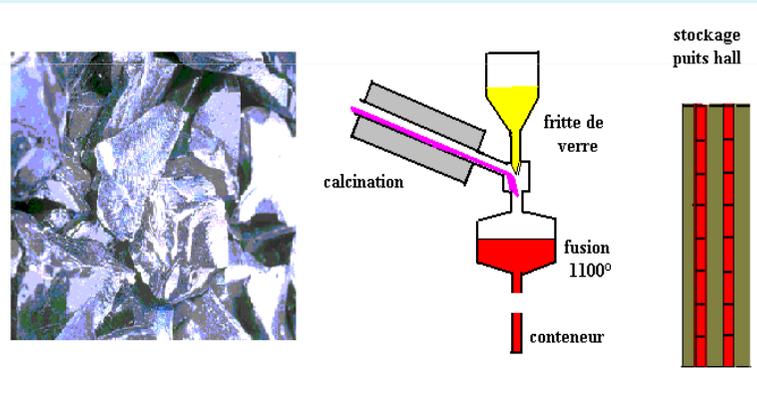
**HA Haute activité (produits de fission et actinides), vitrification**

- **Loi juin 2006 « gestion des déchets nucléaires à vie longue ». Solution de base à venir : le stockage profond opérationnel en 2025 CIGEO, coque d'argile stable depuis 160 millions d'années**

**En définitif, pas de problème, tout est réglé, une industrie modèle**

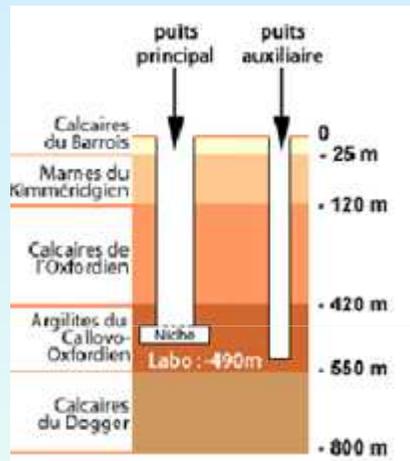
# DECHETS HA

**Les déchets MAVL et HA sont concentrés, confinés ( vitrifiés) entreposés et surveillés**

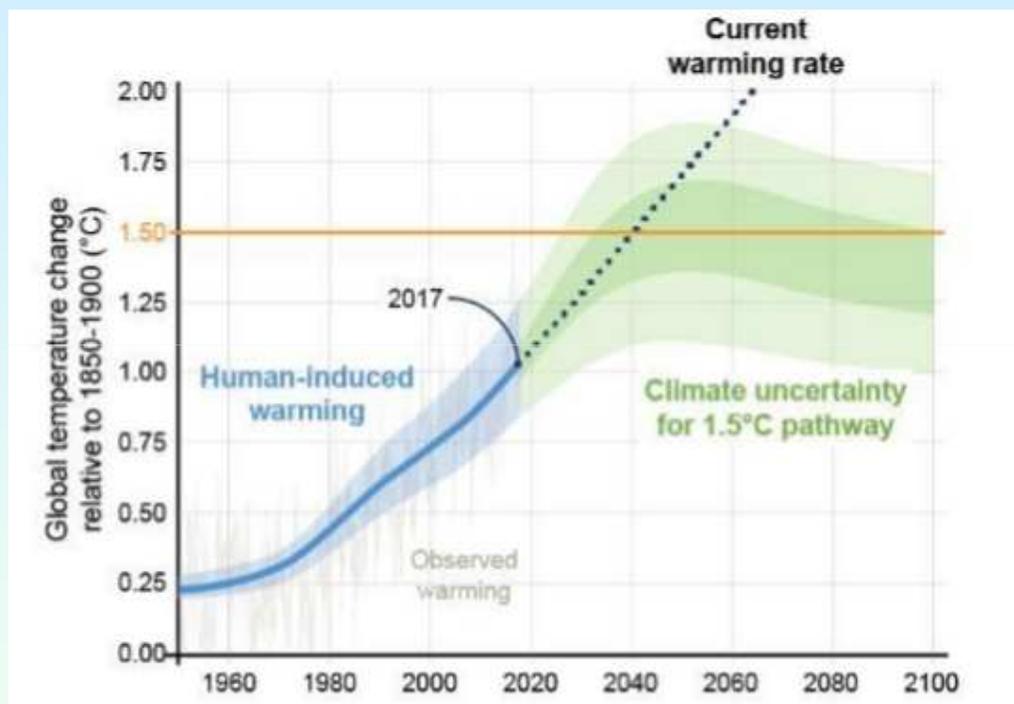


**Là où ils sont entreposés, ils ne créent aucune nuisance à qui que ce soit . Ce n'est pas définitif, suite stockage profond**

# Stockage profond



# Vision monde, dernières nouvelles du GIEC (10/2018)



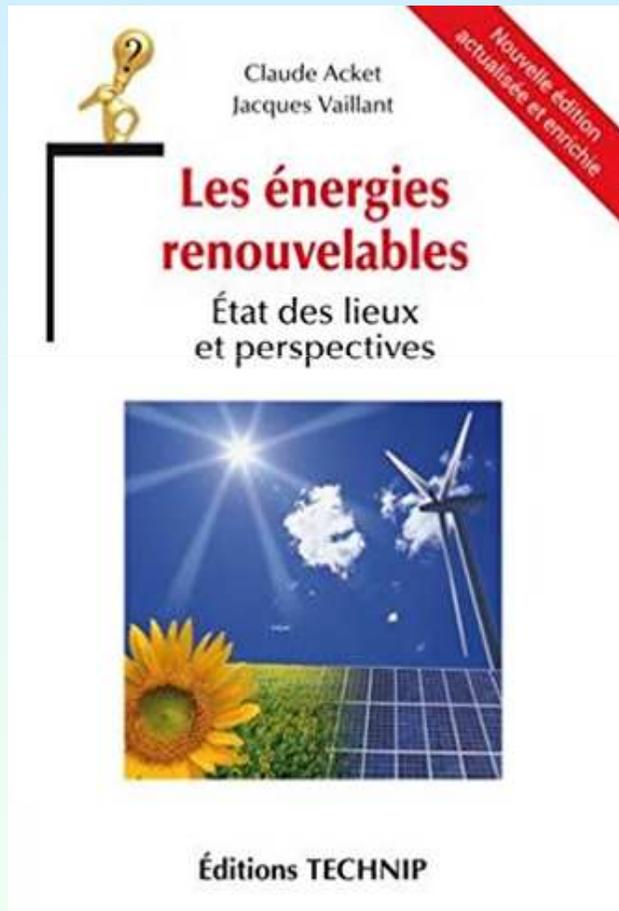
La limitation à 1,5 impossible, celle à 2°C est déjà quasi inaccessible, sauf décroissance forcée

Il faut aller au-delà dans la décarbonation, avec renouvelables et nucléaire et une éventuelle CSC

Celle-ci non nécessaire pour la France, peut le devenir pour le reste du Monde

# Les renouvelables

## De très grands espoirs, mais des limites



**Production actuelle 1,8 Gtep :**

**1.2 thermique**

**0.6 en électricité (6970 TWh)**

**Avenir siècle 6 Gtep (x 4)**

**4 thermique**

**2 en électrique (22800 TWh)**

# Perspectives nucléaire monde

## Le modèle France, sortie du charbon

- France 63 GW en environ 20 ans
- En relatif Monde ; Population, facteur 110, PIB facteur 30
- 60% des émissions mondiales de gaz carbonique, pays qui disposent déjà de l'énergie nucléaire dans leur mix énergétique:

*Chine, Etats-Unis, Inde, Russie, Japon, France, Corée du Sud, Canada, Brésil, Royaume-Uni, Afrique du Sud ...*

Ils possèdent déjà la technologie pour développer le nucléaire civil, comme la France l'a fait dans les années 1980. Si ces pays abandonnaient l'usage du charbon pour la production électrique et le remplaceraient par du nucléaire, on aurait déjà fait une bonne partie du chemin.

En partant des 378 GWi en 2015 (+10 lors dernière année), on devrait pouvoir atteindre: 1500 GWi en 2050, puis au-delà et étendu à d'autres pays 3500 GWi en 2100

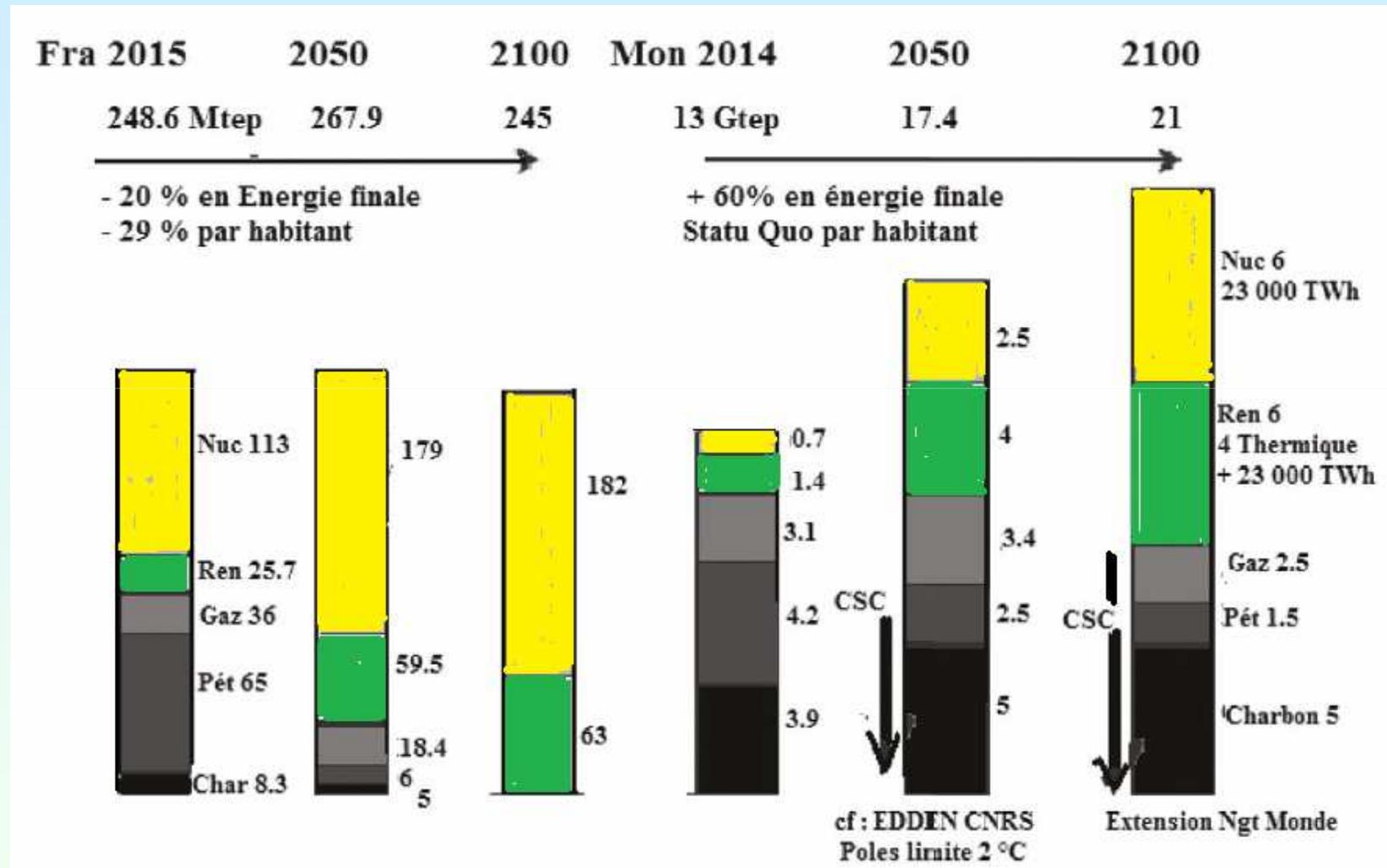
-

•



# Energies primaires

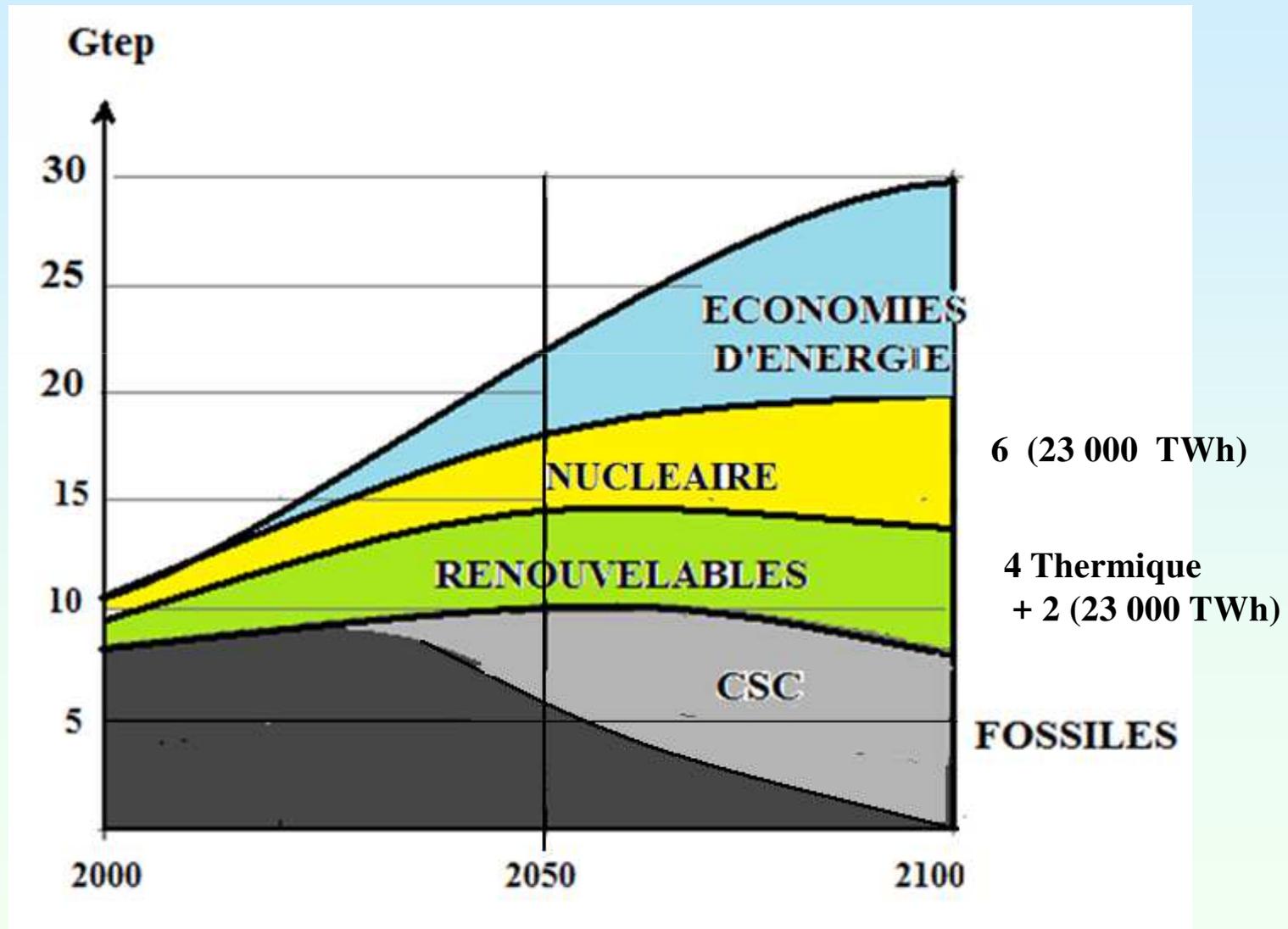
## Perspectives Monde en Gtep et France en Mtep.



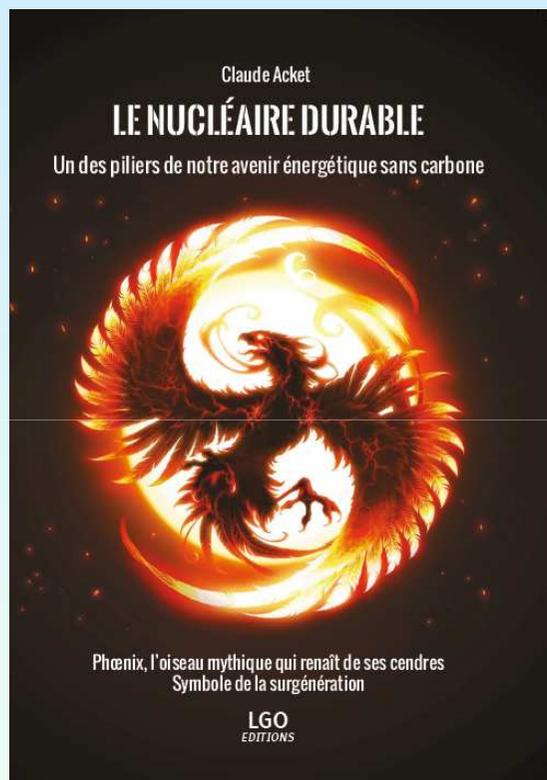
*En 2100 CSC 13 Md t de CO<sup>2</sup>  
20000 t de déchets nucléaires HA*

# Monde, en parcourant le siècle

## Une vision



# En conclusion « Nucléaire Durable »



*« Sous la forme des réacteurs de IV<sup>o</sup> génération, le nucléaire peut être retenu au titre durable, sous les deux aspects,*

- durabilité temporelle, chiffrable en milliers et plus d'années,*
- et aussi durabilité/acceptabilité par tous, comme la source la moins préjudiciable pour la santé et la plus favorable au bien être. »*

**Claude Acket, vous remercie pour votre attention**  
**A vos questions**