

## Notre approche

Les deux faces du terme durable par analogie à l'anglais

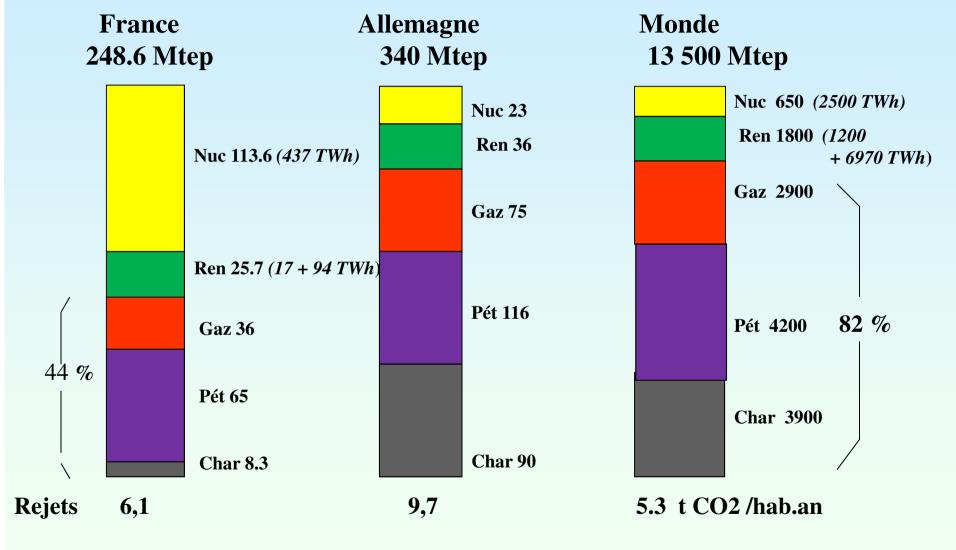
- « Sustainable » ( maintenable)
- Durées temporelles

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?

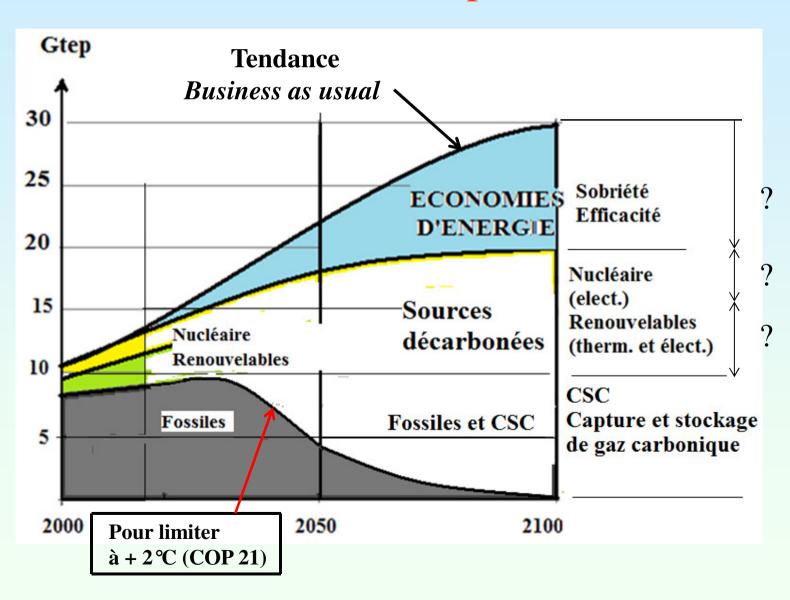
## Situation actuelle Energie Primaire en tep

« tonne équivalent pétrole »



1 tep= 42 GJ (milliards de joules) 1 tep ~ 1,6 tonne de houille, 1170 m³ de gaz, 2,2 tonnes de  $\frac{1}{2}$ ois.

## 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 »

	Ra/Pa	R ultimes ?
Pétrole	60	x 2
Gaz	70	x 2
Charbon	250	x 2
Uranium actuel	270	x 2 à 4
avec RNR		x 100 a > 10000

**DURABLE?** 

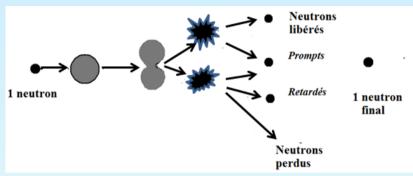
70 % du pétrole

40 % du gaz

En France un stock de 300 000 tonnes d'uranium appauvri Avec RNR

3 000 ans de la consommation actuelle

## Le nucléaire la fission



#### La réaction en chaîne

$$Une fission typique$$

Moyenne avec U 2.4 neutrons Moyenne avec Pu et neutrons rapides 2.9 Une fission produit 193 MeV 10 joule
Un gramme d'uranium 235 fissionné
produit 7.9 10 joules, soit 22 MWh
1 gramme d'uranium naturel qui contient
0.7 % d'uranium fissile 235, produit 154
kWh (thermique)

Production actuelle nucléaire mondiale de 2 760 TWh électrique Besoins d'uranium naturel environ 66 000 tonnes par an,

#### Réaction en chaine contrôlée

En régime stable 1 neutron donne 1.0000...,

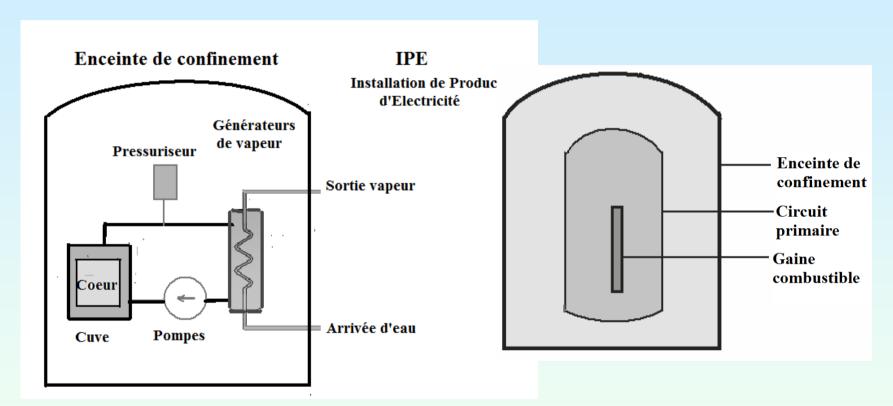
En momentané 1 neutron donne 1.00001 ou 0.99990 (le pcm)

Effets naturels de contre réactions

L'importance des neutrons retardés

L'action des absorbants commandés

### Le nucléaire les bases

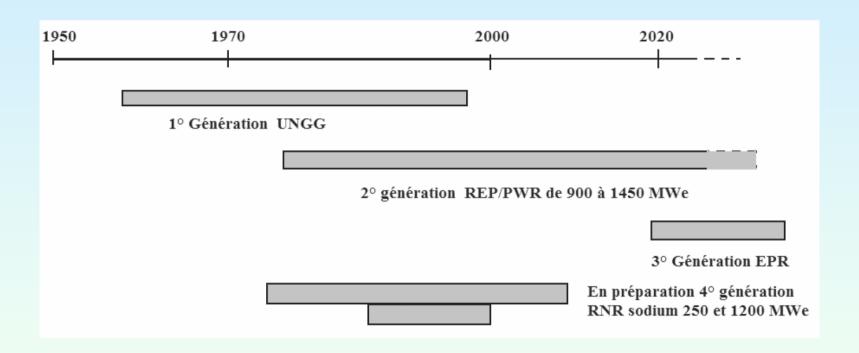


Une tranche nucléaire PWR

Les 3 barrières de l'approche sûreté

Circuit primaire eau pressurisée

# Le nucléaire, les filières exemple en France



### Nucléaire situation monde

Production nucléaire de 2 500 TWh (10.5 % du total 24 000 TWh (charbon 9 430, gaz et pétrole 6170, hydraulique 3 810, EnRi 1050...)

#### Puissance installée de 378 GW (France 63 GW sur 58 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.

#### 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 tranche de 1 000 MWe (facteur de charge 80%) 7 TWh/an 150 tonnes d'uranium naturel /an

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

(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

- <u>Si parc nucléaire x 6 dans ce siècle, appel aux phosphates vers 2080 et échéance 2110</u>
- 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

Autre: Th 232 fertile 
$$\rightarrow$$
 U233 (fissile)  
 $Th \ 232 + n \rightarrow Th \ 233 \rightarrow Pa \ 233 + \beta \rightarrow U \ 233 + \beta -$ 

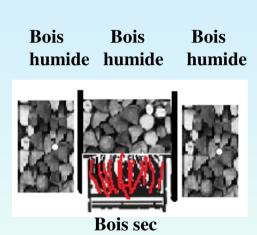
## Vision mondiale le GIF Génération International Forum

Sur la base de critères fixés (sureté, 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



Couverture axiale Uranium naturel ou appauvri



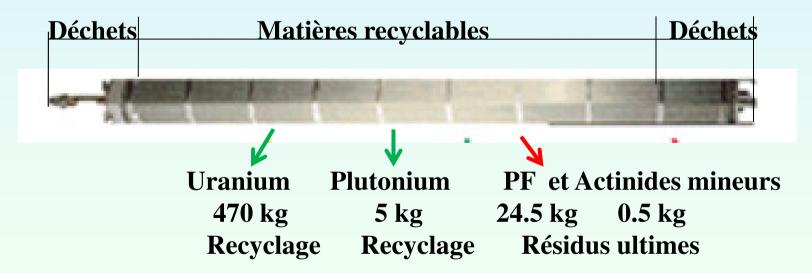
Couverture radiale Uranium naturel ou appauvri

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

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

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

#### **Après irradiation**



## Caractéristiques RNR Sodium

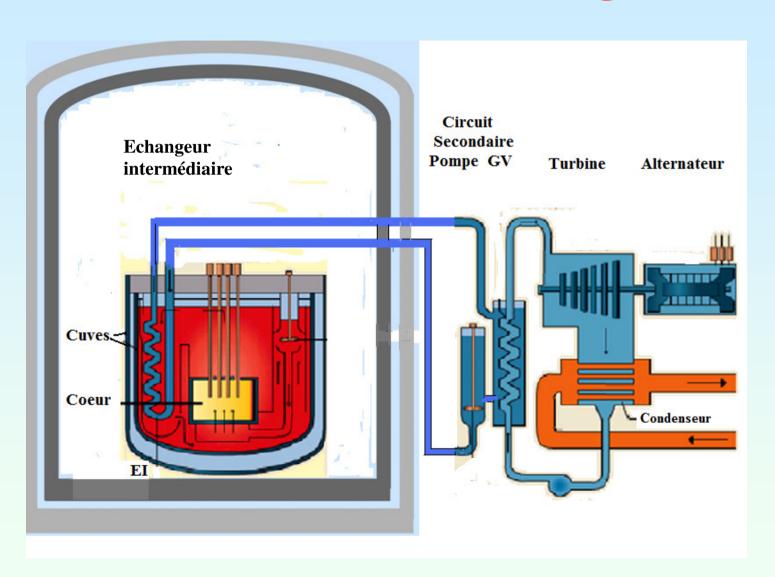
Neutrons rapides, faibles sections efficaces d'où plus forte concentration en combustibles, fortes densités de puissance.

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...

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

53 mois de fonctionnement

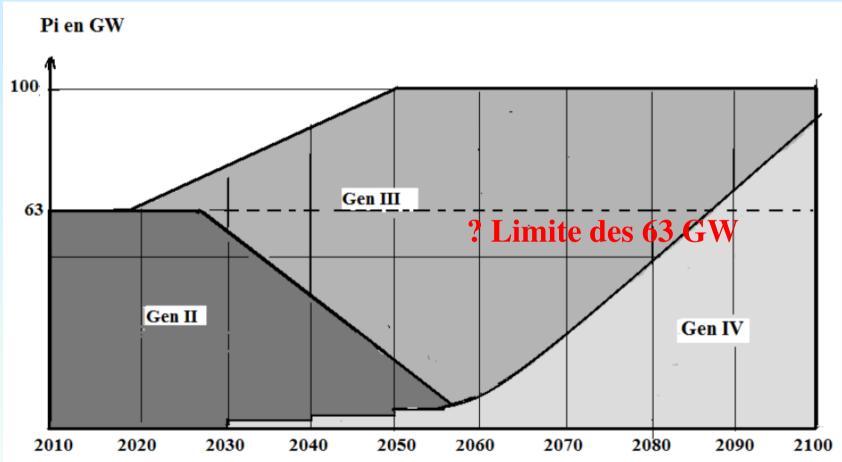
25 mois de travaux (barillet, pollution ciel, fuite argon EI)

54 mois de procédures administratives

### Les constructions

PFBR (Inde) 500 MWe (2017 criticality)
En Chine 1 chantier ouvert en 2017 CFR 600 (suite CEFR)
en projet 2 BN 800

## De Gen II à III, à IV exemple France



Début mises en service de la génération IV, après Gen III Selon le scénario Négatep (plus de nucléaire).

« En conclusion intermédiaire, le passage à un nucléaire durable est possible en France, sans blocage du fait de l'absence de plutonium d'amorçage.18

## L'acceptabilité du nucléaire



## L'acceptabilité du nucléaire

### Les éléments positifs

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

L'uranium est importé, mais la matière première ne représente qu'environ 3 % du coût du kilowattheure. L'essentiel des dépenses soit 97 % reste national, Avec la surgénération indépendance totale

- Prix modéré électricité
- Adaptabilité aux besoins et défaillances des intermittents

### Les réserves, blocages

- Rayonnements
- Accidents
- Déchets

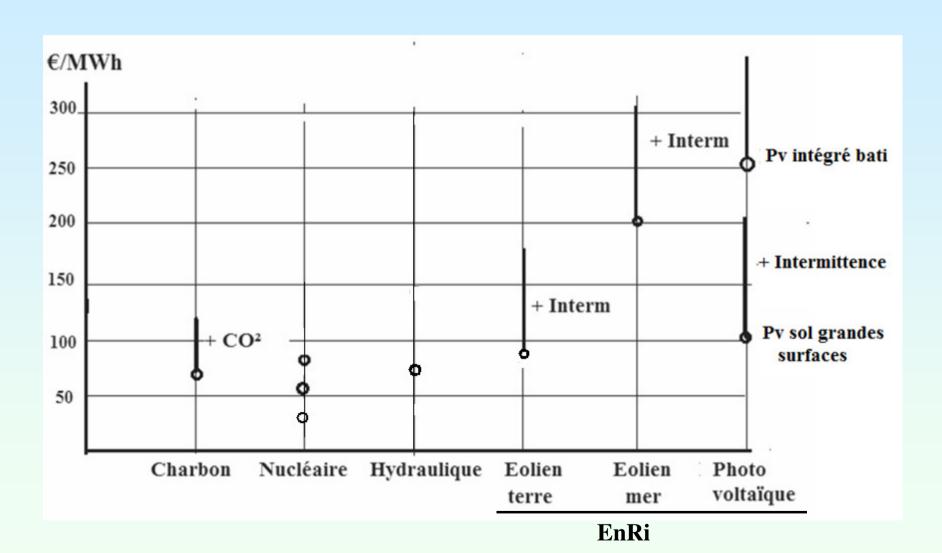
## Coût du nucléaire

- La Cour des Comptes (Rapport 2013/2014) donne un coût économique de 59.8 €/MWh (EDF 56.4 €/MWh) avec la méthode dite « CCE » (coût courant économique) décomposée en:
  - Exploitation: 24.7 (dont 1.5 uranium sur le total de 5.1 combustible)
  - Loyer économique : 21 (capital origine, permet de reconstituer, à la fin de leur durée de fonctionnement, (ici 40 ans) un parc identique au parc initial. Ne prend pas en compte l'amortissement déjà couvert)
  - Investissements sur l'existant : 9.1
  - Provisions déchets : 3.2
  - Provisions démantèlement : 1.3

Ce coût intègre tous les coûts futurs potentiels tels que ceux de maintenance lourde nécessaire au prolongement de durée d'exploitation, les travaux « post-Fukushima », les coûts de démantèlement, les coûts de gestion à long terme des déchets radioactifs.

- Rappel en 2010 la Cour donnait 49.6 (voir aussi Débat et rapport Percebois)
- A côté l'ARENH (tarif d'achat d'Accès Régulé à l'Electricité du Nucléaire Historique) est de 42 €/MWh (juillet 2012) !
- La non prolongation de durée de vie de 10 ans pour le parc actuel aurait un coût de 100 Milliards d'€
- EPR Tête de série 80 € /MWh ? Suite EPR 70 €/MWh ?

## Coûts électricité



#### 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

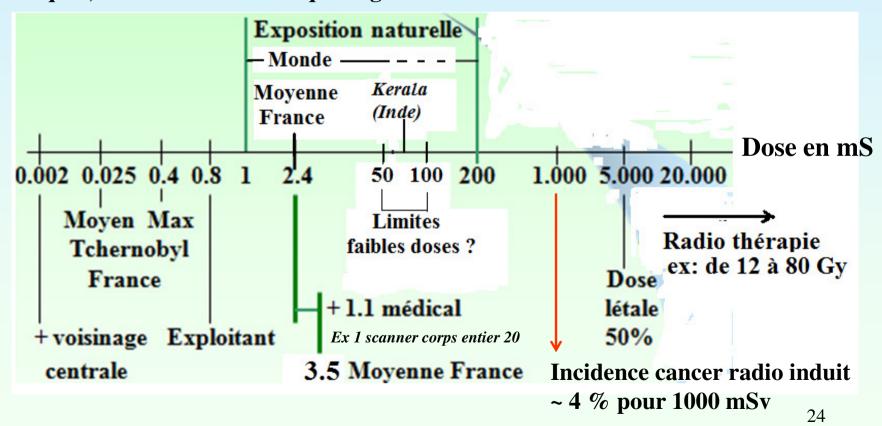
Maintenir la filière nucléaire dans la mesure où elle s'avère avoir le plus faible impact sur la santé par kWh produit

### RAYONNEMENTS DOSES

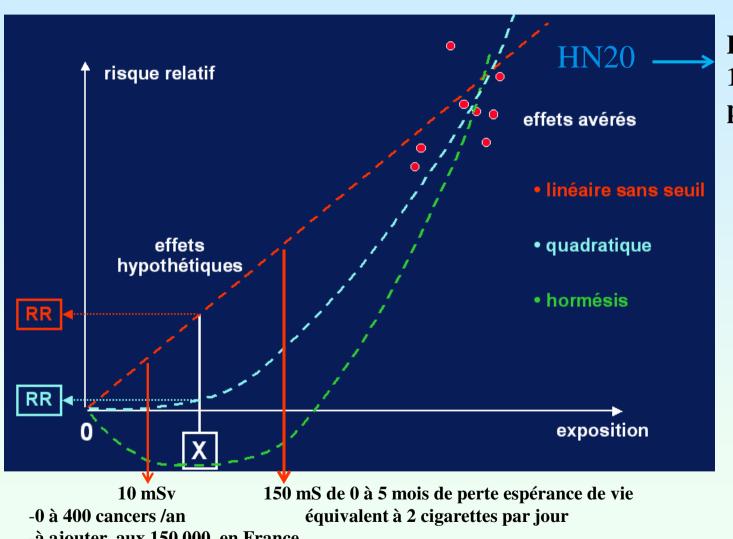
#### millièmes de Sievert / an

« 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)

Une exposition abusive peut entraîner un cancer, la mort, mais tout est affaire de degré. Facilement détectable: aspect très positif sous les angles scientifiques et techniques, mais retour médiatique négatif



## Rayonnements Effets des faibles doses?



**Probalité** 1/100 cancer pour 200 mSv

- -à ajouter aux 150 000 en France
- ou de 0 à 0.34 mois de perte d'espérance de vie

## Energie et santé, les accidents

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

- Hydraulique : Henan ( Chine ) 230000 morts, Machlu ( Inde ) 30000 morts Autres : 4015 morts (13 accidents)

- Pétrole : 20200 morts (397 accidents)

- Charbon: 6418 morts (133 accidents)

- **Gaz**: 6054 morts (240 accidents)

- Nucléaire: Three miles Island (1979) 0 décès

Tchernobyl (1986) 76 ?! morts, ou 4000 ou 600000 selon Arte ?...

Fukushima (2011) 0 décès

#### Autres décès: somme de tous les « petits accidents »

Charbon monde: 15000 directs par an. Silicoses ...150000 par an?

Et pas seulement en Chine, exemple USA en 2010 en Virginie 1 accident 25 morts

En Ukraine 5000 morts directs charbon depuis 1986, dernier accident Turquie 310 morts

#### 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)

## Energie et santé, les grands accidents nucléaires

#### Tchernobyl (1986)

Rapport UNSCEAR 2011 (8 institutions ONU et les gouvernements du Bélarus, de la Russie et de l'Ukraine.

- 76 décès associés aux rayonnements (47 à 61 personnel + 15 enfants thyroïde)
- Avenir ? 4 000 et 50 000 morts prématurées jusqu'en 2070, avec hypothèses actuelles pessimistes (loi linéaire sans seuil)
- Les conséquences majeures sont indirectes, sans rapport avec l'irradiation. Elles sont associées aux évacuations, déracinements de population et leurs conséquences. détresse psychologique et maladies liées au stress, dans un contexte sanitaire dégradé de l'ex URSS.

#### Fukushima (2011)

0 décès liés au rayonnement

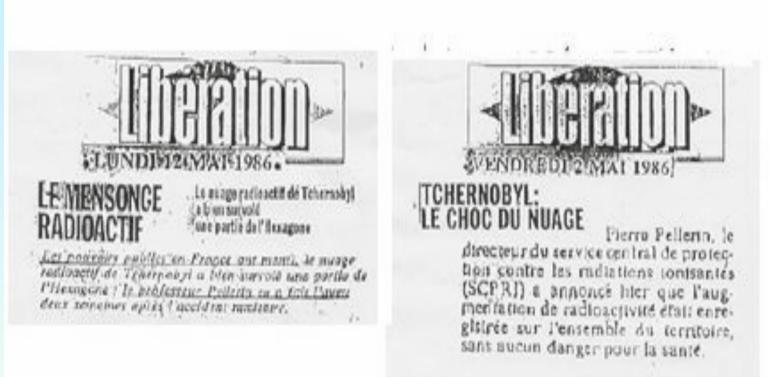
Conséquences indirectes stress évacuation, angoisse d'un futur incertain.

Confusion médiatique (erreur ou volonté de maintenir l'audience)

JT France 2 du 24/8/2011 « Fukushima 20000 morts »

Le Figaro du 2/1/2012 « Fukushima au moins 10000 morts »

## Tchernobyl, les dits mensonges



Le 12 mai : « Les pouvoirs publics ont menti, le nuage de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'hexagone ; le Professeur Pellerin en a fait l'annonce deux semaines après l'accident nucléaire ».

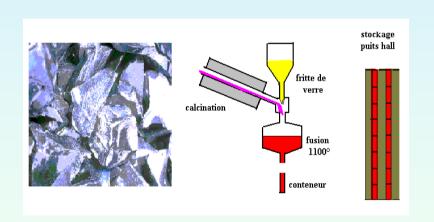
Le 2 mai : « Pierre Pellerin, le directeur du service central de protection contre les radiations ionisées (SCPRI) a annoncé hier que l'augmentation de radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire, sans aucun danger pour la santé. »

## Déchets nucléaires

- Léguer aux générations futures une situation contrôlée, contrairement aux rejets incontrôlés de CO2 et autres impuretés
- Volumes réduits: 1 kg/an et par français, dont 10 g vie longue et très radioactifs vitrifiés (à côté de 4.000 kg de déchets dont 100 kg dangereux)
- Stockage définitif des déchets TFA et FA à Morvilliers et Soulaines
- Pour HA, loi juin 2006 « gestion des déchets nucléaires à vie longue ». Solution de base à venir : le stockage profond opérationnel en 2025

### DECHETS HA

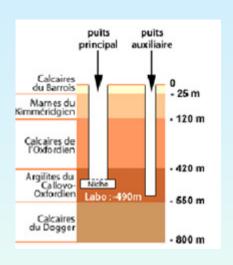
Les déchets MAVL et HA sont concentrés, confinés (vitrifiés) entreposés et surveillés





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

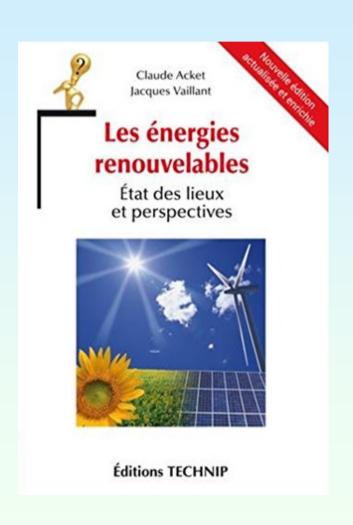
## Stockage profond







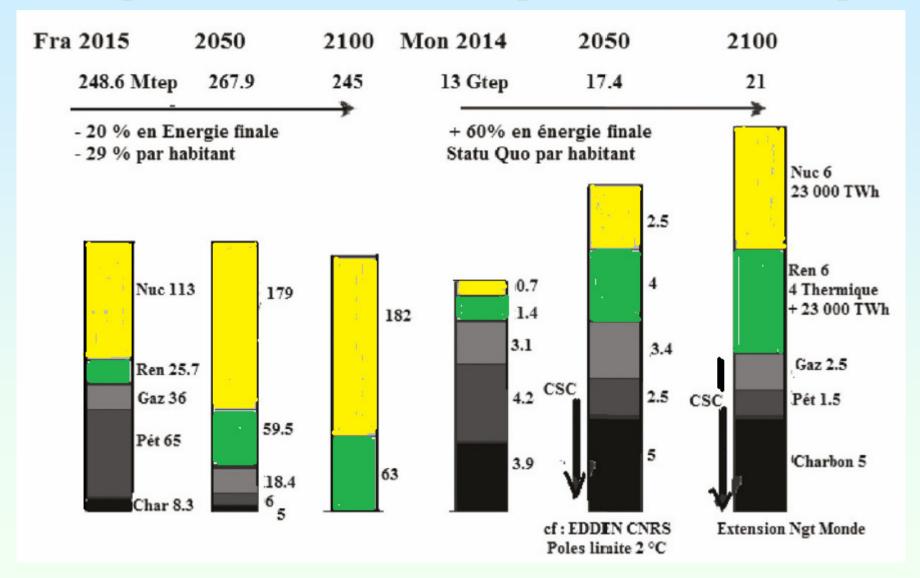
# Les renouvelables De très grands espoirs, mais des limites



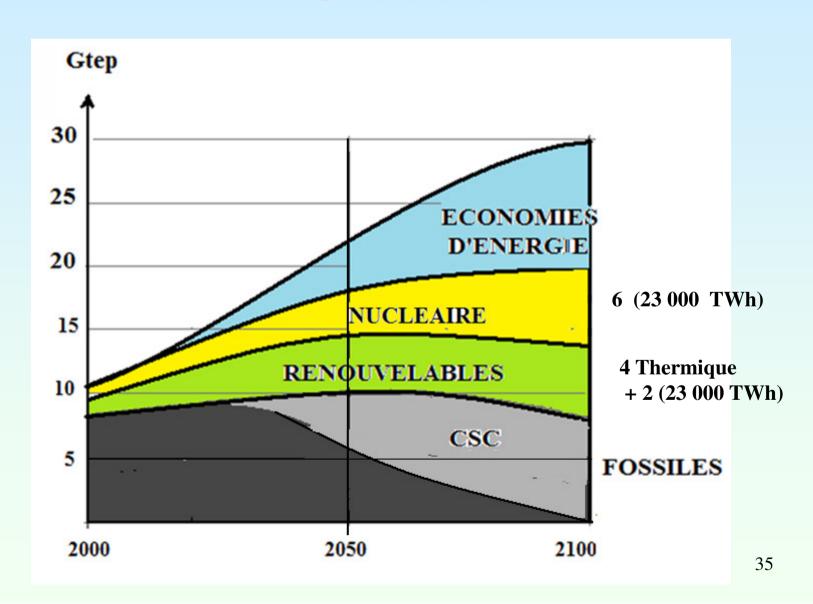
Production actuelle 1,8 Gtep:
1.2 thermique
0.6 en électricité (6970 TWh)
Avenir siècle 6 Gtep (x 4)
4 thermique
2 en électrique (22800 TWh)



## Energies primaires Perspectives Monde en Gtep et France en Mtep.



## Monde, en parcourant le siècle Une vision



### En conclusion « Nucléaire Durable »



- « Sous la forme des réacteurs de IV ° 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