

*Après Fukushima, quels scénarios
énergétiques pour 2050 ?*

Professeur Jacques Foos

Fondation Concorde - Paris - 10 octobre 2011

La situation nouvelle du nucléaire : Acte 1

EPR : les interrogations d'un scientifique reconnu

Jacques Foos, vice-président de la Commission locale d'information de Flamanville et professeur honoraire au Conservatoire des arts et métiers, a exprimé des doutes et inquiétudes sur les conséquences pour l'EPR d'un raz-de-marée similaire à celui qui a touché le Japon. EDF contredit ses affirmations.

Jacques Foos n'est pas un antinucléaire. Titulaire pendant vingt-cinq ans de la chaire « radioactivité, isotopes et applications » au Conservatoire national des arts et métiers (Cnam), il a formé des centaines d'ingénieurs et de techniciens du nucléaire. Vice-président de la Commission locale d'information de Flamanville, il a souvent mis en avant un raisonnement scien-

tifique pour contredire les affirmations d'antinucleaires.

Sa réaction quelques jours après la catastrophe japonaise n'en revêt donc que plus d'intérêt. Dans un mail adressé au conseil général, qui gère les Commissions locales d'information liées aux installations nucléaires, Jacques Foos exprime clairement des doutes concernant l'EPR de Flamanville.

« Un responsable d'EDF à Montrouge (où se trouvent les concepteurs de l'EPR) m'a dit lundi que les diesels (qui fournissent l'énergie pour refroidir le réacteur en cas de problème) auraient été noyés à Flamanville », si une vague aussi impressionnante que celle qui a ravagé les côtes japonaises se formait sur l'ouest du Cotentin.

Conclusion simple de Jacques Foos : l'accident aurait été de même nature que celui de la centrale de Fukushima.

■ 9 mètres ?
12 mètres ?

« J'ai demandé si les diesels de Flamanville seraient noyés avec une vague de neuf mètres, on m'a répondu que oui ; si c'est vrai, c'est

grave », a développé Jacques Foos, interrogé par l'AFP. Le scientifique a visiblement été agacé par les déclarations politiques qui assurent depuis quelques jours qu'un tel drame n'aurait pas de conséquences radioactives s'il frappait l'EPR.

Jacques Foos fait donc une proposition : que les diesels de secours de la centrale de Flamanville soient installés sur la falaise qui surplombe les réacteurs.

Par ailleurs, dans son courrier, Jacques Foos regrette que l'alimentation de secours de l'EPR soit « tout électrique ». « Dans les autres réacteurs à eau sous pression, il y a des turbopompes, des chaudières à gaz, qui permettent de s'affranchir de l'électricité », explique-t-il.

Au lendemain de cette réaction à chaud, Jacques Foos souhaitait hier relativiser ses propos, déclarant à l'AFP être confiant dans l'avenir du nucléaire. Mais la conclusion de ce courrier reste à l'évidence d'actualité : « Il faudra que l'on ait des réponses claires lors de la prochaine assemblée générale de la Commission locale d'information. » Une réunion qui devrait avoir lieu en avril, même si les élections cantonales en cours (le président de la Cli est actuellement en campagne pour le renouvellement de son mandat) compliquent le calendrier.

Dès hier soir, EDF apportait en tout cas des réponses. Conformément à ce que nous annonçons en début de semaine, les responsables de la centrale assurent que la plate-

forme des trois réacteurs se situe à une douzaine de mètres du niveau moyen de la mer. « Nous sommes 4,6 mètres au-dessus de la crue la plus forte des mille dernières années, majorée de 15 % », insiste-t-on à Flamanville. Une situation qui explique que l'installation des diesels de secours en haut de la falaise n'a pas été étudiée. Par ailleurs, la direction du chantier EPR ga-

ranti que des équipements fonctionnant au fuel peuvent alimenter le réacteur en cas de nécessité, et que les systèmes ne sont donc pas « tout électriques ». Enfin, Anne Lauvergeon, la patronne d'Areva, a assuré en milieu de semaine que « s'il y avait des EPR à Fukushima, il n'y aurait pas de fuites possibles dans l'environnement, quelle que soit la situation ».



La centrale de Flamanville étant en bord de mer, Jacques Foos propose d'installer les diesels de secours en haut de la falaise afin de se prémunir de toute vague énorme.

La Presse de la Manche
18 mars 2011

La situation nouvelle du nucléaire : Acte 1

Interrogations que reconnu

cale d'information de Flamanville et professeur honoraire au Conservatoire des arts et métiers pour l'EPR d'un raz-de-marée similaire à celui qui a touché le Japon. EDF contredit se

responsable d'EDF à Flamanville (où se trouvent les concepteurs de l'EPR) a déclaré lundi que les diesels fournissent l'énergie pour refroidir le cœur en cas de problème. « J'aurais été noyé à Flamanville », si une vague impressionnante que celle qui a ravagé les côtes de la Manche se formait sur la côte du Cotentin.

Conclusion simple de Jacques Foos : l'accident aurait été de même nature que celui de la centrale de Fukushima.

■ 9 mètres ? 12 mètres ?

« J'ai demandé si les diesels de Flamanville seraient noyés avec une vague de neuf mètres, on m'a répondu que oui ; si c'est vrai, c'est

grave », a développé Jacques Foos, interrogé par l'AFP. Le scientifique a visiblement été agacé par les déclarations politiques qui assurent depuis quelques jours qu'un tel drame n'aurait pas de conséquences radioactives s'il frappait l'EPR.

Jacques Foos fait donc une proposition : que les diesels de secours de la centrale de Flamanville soient installés sur la falaise qui surplombe les réacteurs.

Par ailleurs, dans son courrier, Jacques Foos regrette que l'alimentation de secours de l'EPR soit « tout électrique ». « Dans les autres réacteurs à eau sous pression, il y a des turbopompes, des chaudières à gaz, qui permettent de s'affranchir de l'électricité », explique-t-il.

Au lendemain de cette réaction à chaud, Jacques Foos

forme des trois réacteurs se situe à une douzaine de mètres du niveau moyen de la mer. « Nous sommes 4,6 mètres au-dessus de la crue la plus forte des mille dernières années, majorée de 15 % », insiste-t-on à Flamanville. Une situation qui explique que l'installation des diesels de secours en haut de la falaise n'a pas été étudiée. Par ailleurs, la direction du chantier EPR ga-

La situation nouvelle du nucléaire : Acte II, 15 heures plus tard

PARIS, 18 mars 2011 (AFP) –

La plupart des réacteurs nucléaires au monde seraient "en grande difficulté" s'ils avaient été confrontés aux mêmes catastrophes naturelles qu'a subies la centrale japonaise de Fukushima la semaine dernière, a estimé vendredi un expert de l'Autorité de sûreté nucléaire française (ASN).

La situation nouvelle du nucléaire, Acte III, 15 jours plus tard

Le 31 mars, le président de l'Autorité de Sûreté Nucléaire, André-Claude Lacoste, devant l'Assemblée parlementaire, ne donne qu'un exemple *“à Flamanville, pour l'EPR, ne serait-il pas préférable de positionner les diesels en haut de la falaise plutôt que juste en bas, à côté du bâtiment réacteur, afin de se protéger de toute vague géante ? Il n'y a pas besoin d'années de réflexion pour prendre position sur ce point ”*

Les challenges de ce siècle

Énergie

Eau douce

Les challenges de ce siècle

Énergie

Indispensable à la vie et au développement économique

L'homme a besoin de 2,7 kWh → 1,35 Gtep/an
en fait : 0,6 Gtep/an → 6% de la consommation totale 2005

En réalité : France → **150 kWh/j** (→ 3% CET ; **0,87%**)

USA → **260 kWh/j** (→ 26% CET ; **4,35%**)

CET : Consommation d'Énergie Totale

Un seul exemple : énergie = santé

Une grossesse → 90 kWh

**Mais en France : 2 500 à
3 500 kWh quand tout va bien !**



**Espérance de vie : France homme : 78,1 ans femme : 84,8 ans
PVD homme : 45 ans femme : 47 ans**

Les challenges de ce siècle

Eau douce

Indispensable à la vie et au développement économique

Les besoins augmentent de 64 milliards de m³/an.

**Une seule solution pour l'avenir :
le dessalement de l'eau de mer (5 kWh/m³)**

Par an : 30 EPR ou 65 000 éoliennes de 5 MW


Où en sommes-nous ?

**Dans le Monde, la consommation d'énergie primaire est
passée de 1 à 10 Gtep/an entre 1900 et 2000
(+2,35% par an)**

Évolution de la population

 **300 millions en l'an 0**

 **1 milliard en 1800**

 **1,65 milliard en 1900**

 **6 milliards en 2000 (+1,48% par an)**

Le 19 décembre 2005

6,5 milliards de Terriens !

6 milliards en octobre 1999 $\Rightarrow \Delta : + 220\ 000$ par jour

**Aujourd'hui, 10 octobre 2011 à 5 heures : 6,979 milliards,
soit + 222 000 hab/jour depuis le 19 décembre 2005 mais
+ 226 000 depuis 6,8 milliards (le 6 août 2010)**

Chaque jour : 365 000 naissances (plus de 4 par seconde)

**57% en Asie, 26% en Afrique, 9% en Amérique latine,
5% en Europe, 3% en Amérique du Nord, 0,8% en Océanie**

\Rightarrow 10 milliards de Terriens en 2050

A la prochaine Saint Sylvestre



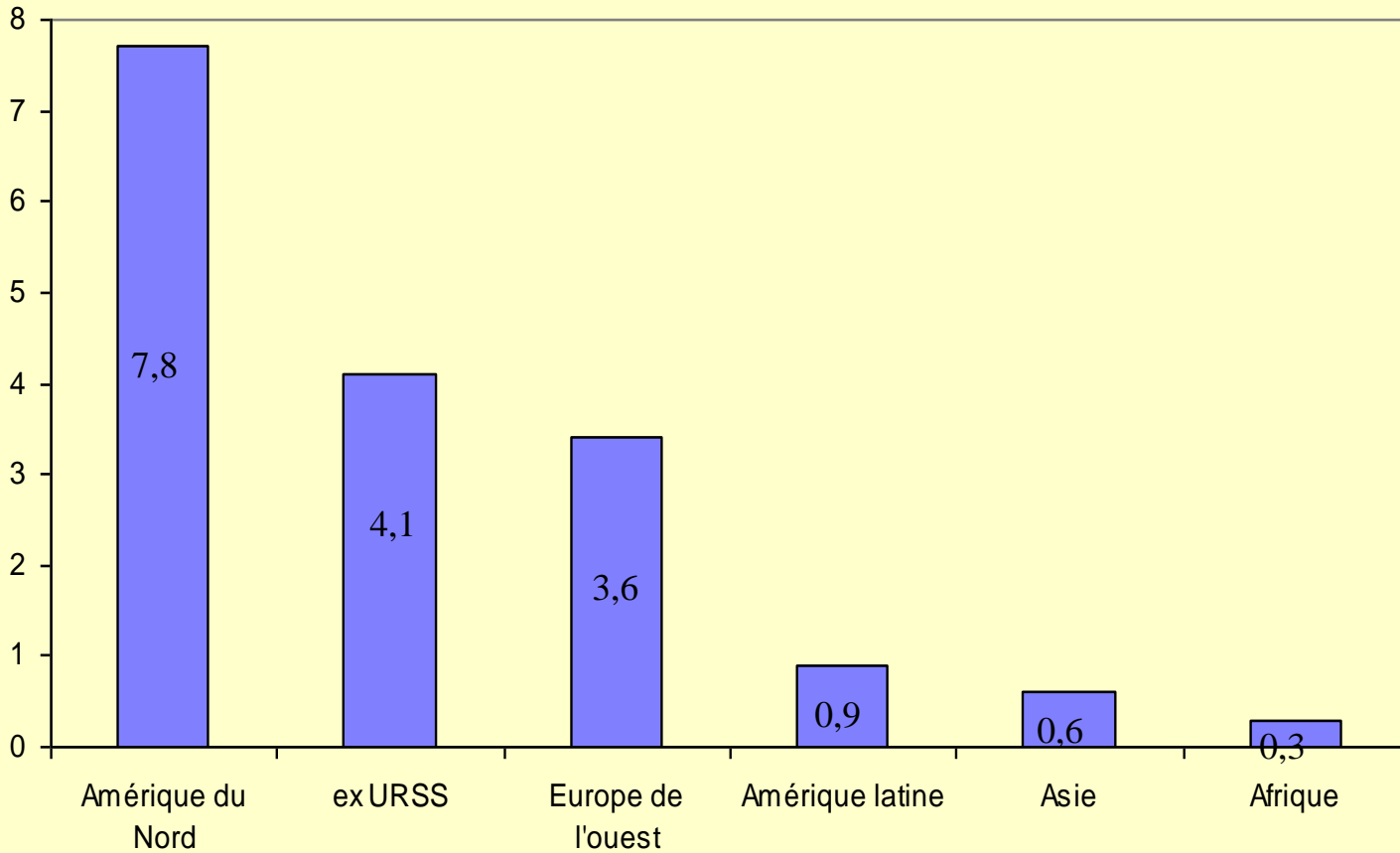
**On fêtera le passage
à la nouvelle année**

et

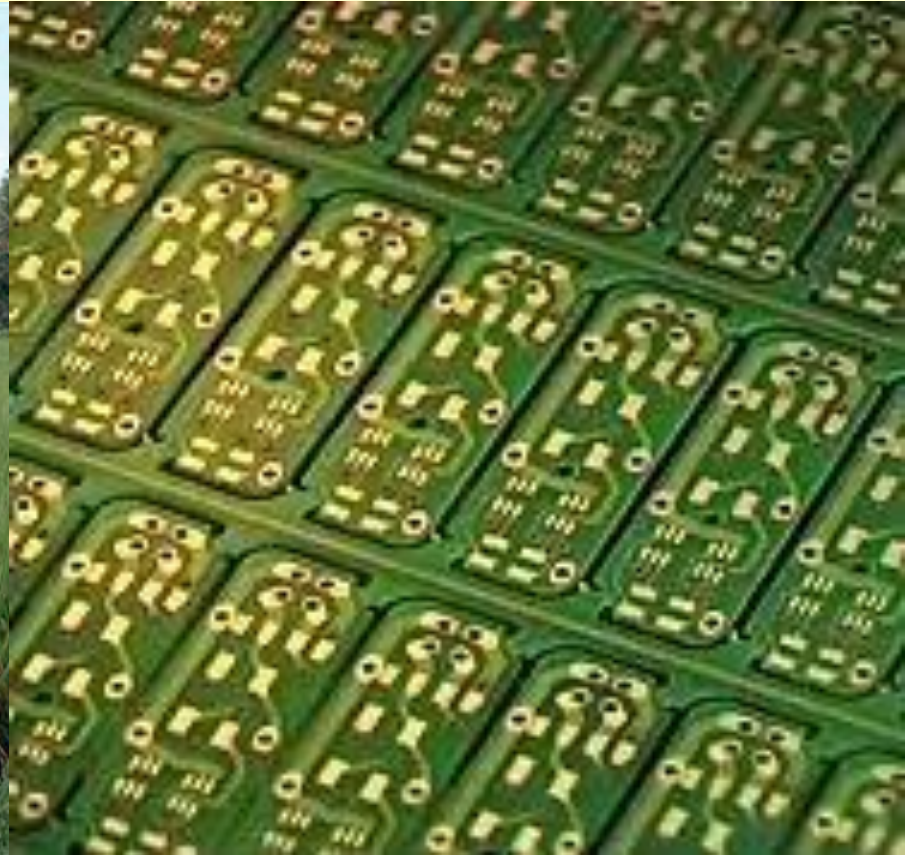
**le passage à 7 milliards
de terriens**

⇒ 10 milliards de Terriens en 2050

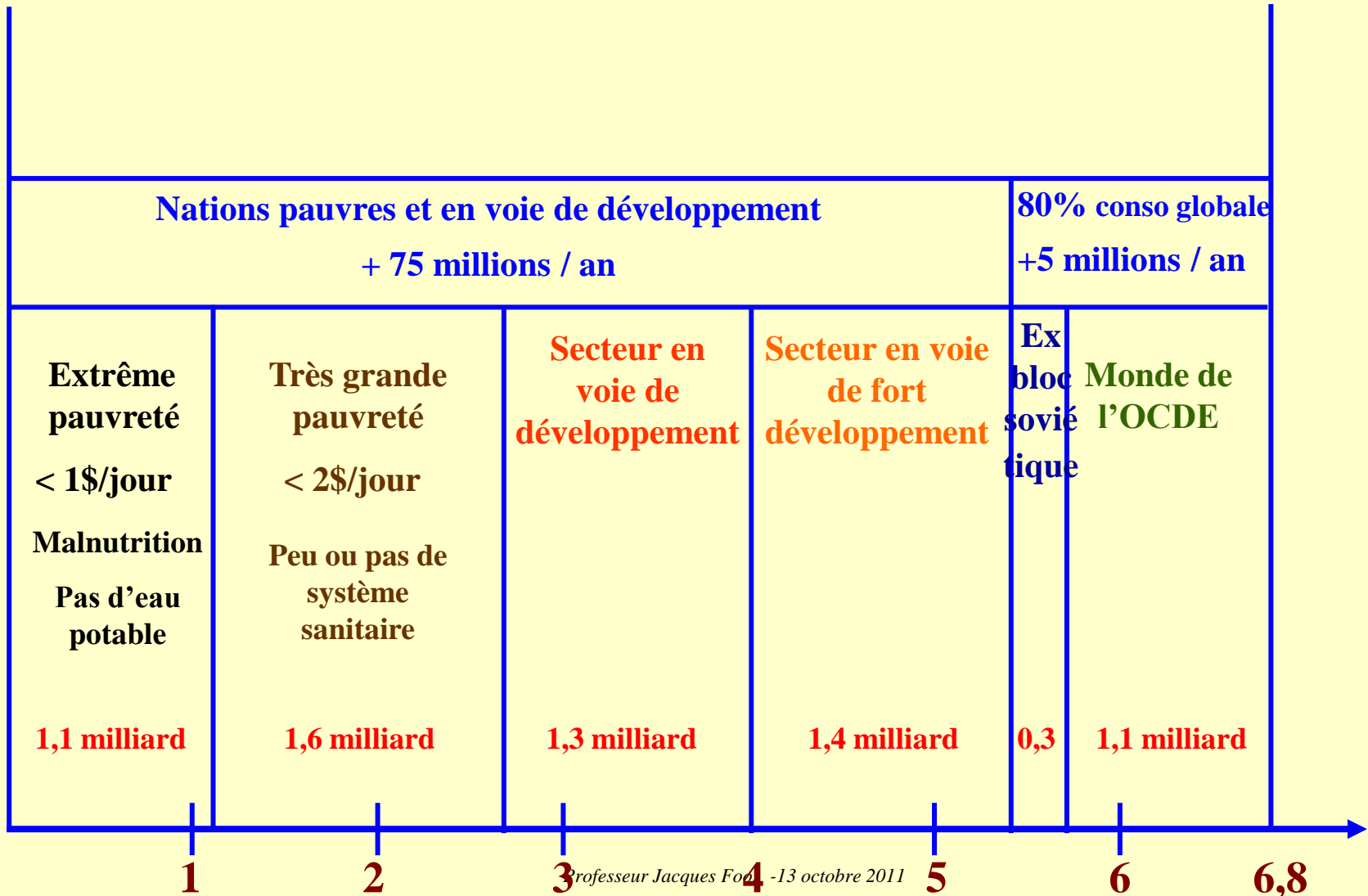
Consommation d'énergie commerciale (tep/hab)



Le grain de riz et le transistor

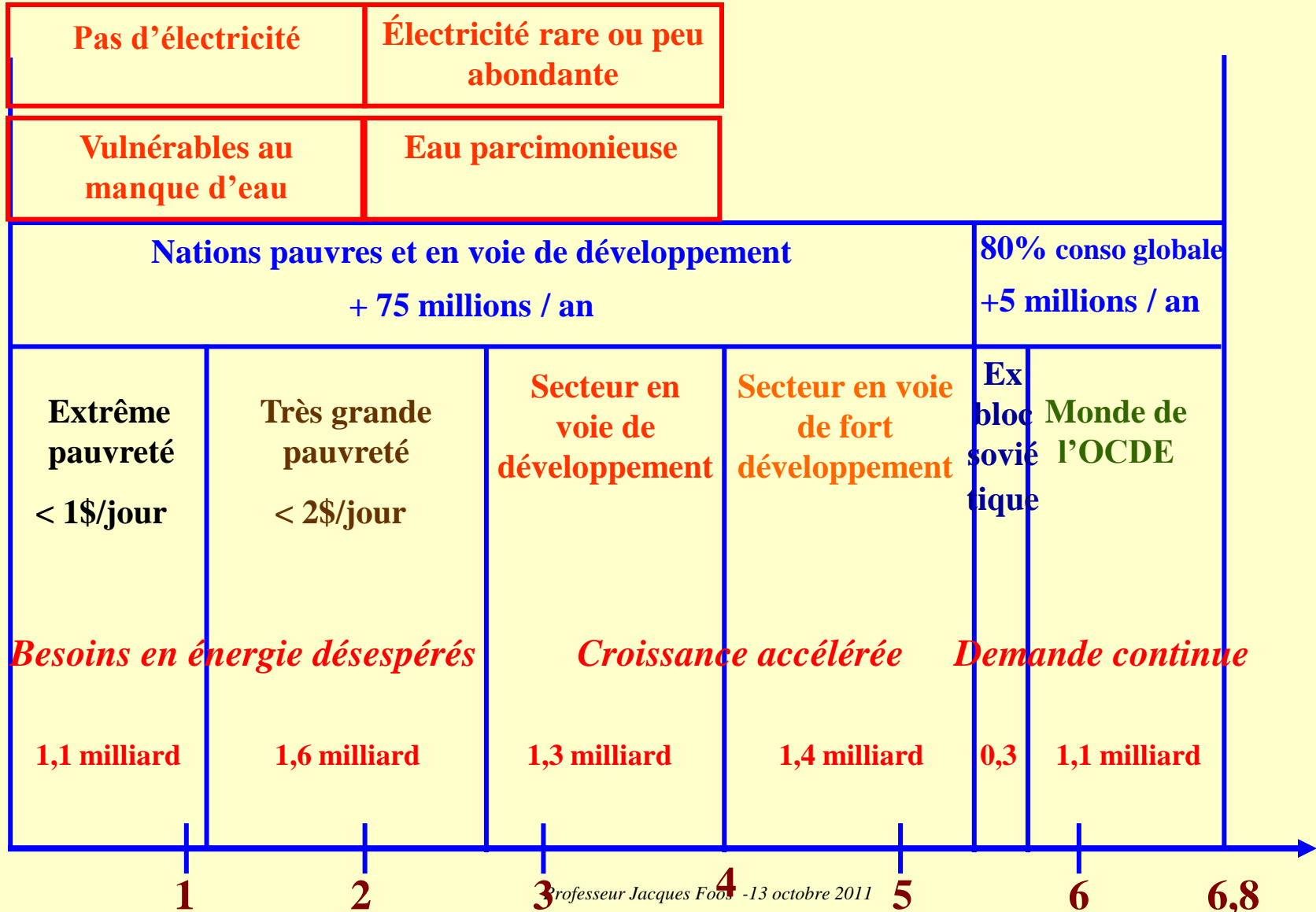


Dans quel Monde vit-on ?



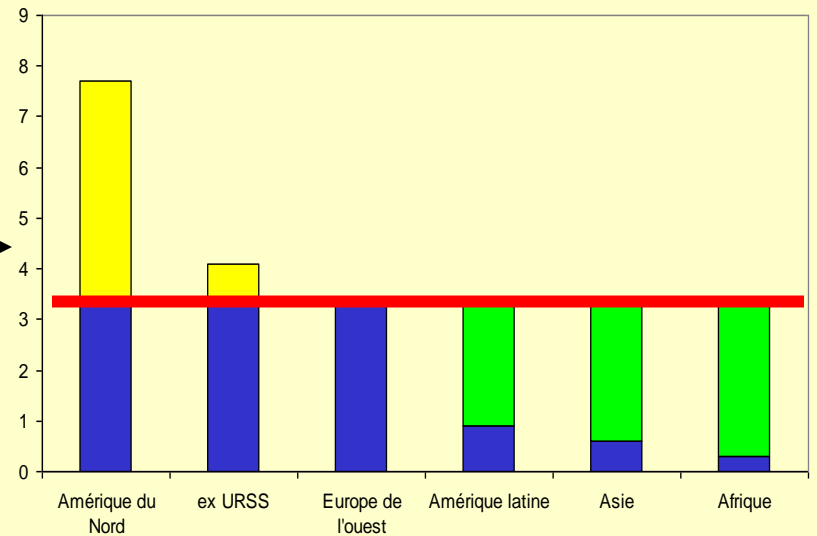
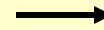
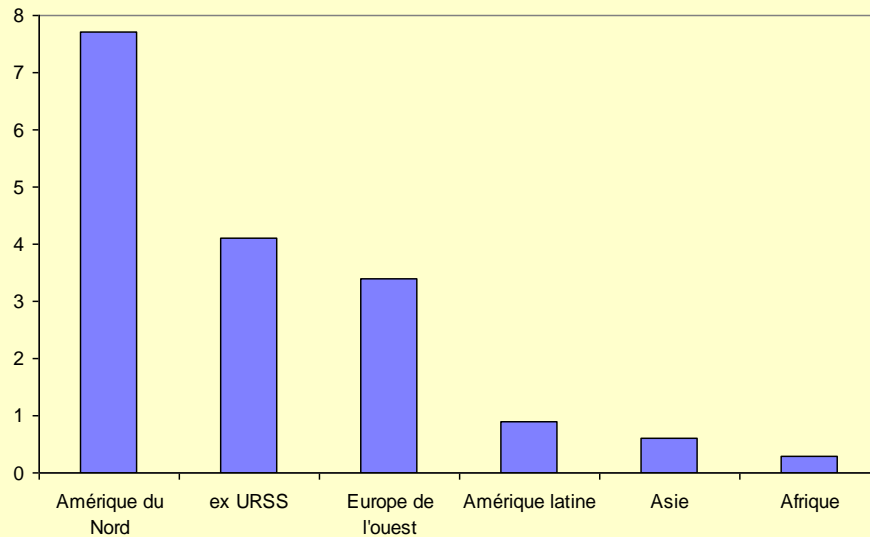
Professeur Jacques Fod - 13 octobre 2011

Dans quel Monde vit-on ?



Quelques scénarios de 2000 à 2050

1) Économie d'énergie dans les pays développés et croissance dans les pays en voie de développement → niveau Europe



Quelques scénarios de 2000 à 2050

- 1) **Économie d'énergie dans les pays développés et croissance dans les pays en voie de développement → niveau Europe**
- 2) **Maintien d'une croissance à 2,35%/an dans les pays développés.
Croissance plus forte dans certains pays en forte voie de développement**
- 3) **+ 2,35%/an pour tous les pays. (soit 32,5 Gtep par an en 2050) ce qui nécessite un effort considérable sur les économies d'énergie**

Évolution de la consommation en Mtep/an

	2000	2025	2050	2025	2050
Am. Nord	2 880	1 656	1 935	5 147	9 200
Am. Sud	590	2 809	3 556	1 573	4 193
Europe	2 965	3 570	3 638	5 300	9 472
Afrique	308	5 794	8 079	821	2 189
Asie	3 260	22 905	28 951	17 693	31 622
Océanie	178	229	295	318	570
	10 181	36 963	46 454	30 852	57 246

Scénarios (suite)

Hypothèse 1 : On passe de 10,2 à **46,4 Gtep/an**

Hypothèse 2 : On passe de 10,2 à **57,2 Gtep/an**

Hypothèse 3 : On passe de 10,2 à **32,5 Gtep/an**

Entre la plus **minimaliste** et la plus **réaliste**, augmentation du simple ($\Delta = 22,3$ Gtep/an) à plus du double (**47 Gtep/an**)

Le Δ a été de 9 en 100 ans, il sera compris entre 20 et 50 Gtep/an d'ici 2050 !

32,5 Gtep

46,4 Gtep

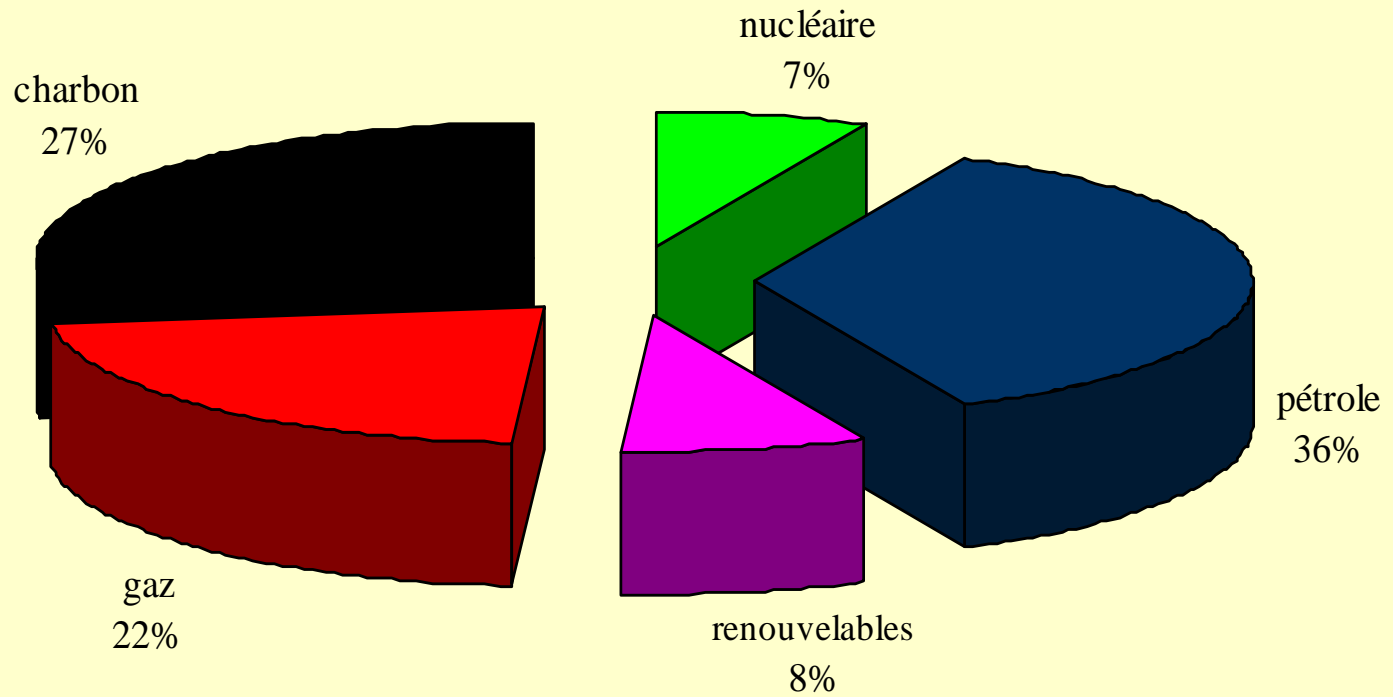
57,2 Gtep

Les sources d'énergie

- * Eau → énergie hydraulique
- * soleil → énergie solaire (thermique, photovoltaïque)
- * courants → énergie hydrolienne
- * vent → énergie éolienne
- * marée → énergie marémotrice
- * biomasse → houille verte, déchets
- * géothermie → forages
- * vapeur → charbon, pétrole, gaz
nucléaire (fission, fusion)

(* énergie musculaire)

Les sources d'énergie : bilan 2007



Sources d'énergie → quelle utilisation ?

- **chaleur** (combustibles fossiles, **géothermie**, **soleil**, biomasse)
- **électricité** (**eau**, combustibles fossiles, **solaire**, courants, **éolien**, **marée**, **nucléaire**)
- **transport** (combustibles fossiles, **vent**, **musculaire**)

Combustibles fossiles : état des réserves (2008)

Charbon : (houille + lignite)	826 milliards de tonnes	550 Gtep <i>160 ans de réserves au rythme actuel</i>
Gaz :	185 000 milliards de mètres cube	153 Gtep <i>60 ans de réserves au rythme actuel</i>
Pétrole :	171 milliards de tonnes (102 : OPEP)	171 Gtep <i>42 ans de réserves au rythme actuel</i>

Importations chinoises de pétrole : 23 Mtep (1996) → 148 Mtep en 2006
(l'Arabie Saoudite a multiplié par 100 ses exportations de pétrole vers la Chine en 10 ans).

*Quand les « bébés 2000 » souffleront leurs 50
bougies, il n'y aura plus de pétrole !*

*Quand ils prendront leur retraite (?) il n'y aura
plus de gaz !*

Combustibles fossiles : réserves ultimes

Pétrole non conventionnel

Schistes bitumineux et sables asphaltiques

plusieurs centaines de Gtep

Mais coûteux en énergie et très polluant à exploiter

*(ex : au Canada, 1 centrale nucléaire + une raffinerie
prévues pour l'exploitation de ce pétrole)*

Deux évènements importants ont marqué la fin du second millénaire

* Développement durable

« *Sustainable development* » rapport Brundtland – 1987

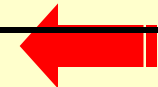
« Répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs »

« Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants »

Antoine de Saint-Exupéry
(1900-1944)

Consommation de pétrole

Pays	Augmentation en 20 ans
Corée du Sud	306%
Inde	240%
Chine	192%
Brésil	88%
Canada	23%
USA	16%
Japon	12%
France	-12%



Vous avez dit : « Développement Durable » ?

***Chaque Français, aujourd'hui, à sa naissance,
a déjà une dette de***

110 000 euros (début 2011)

***La dette publique française augmente de 550 millions
d'euros par jour (6 300 euros par seconde !)***

Vous avez dit : « Développement Durable » ?

***Chaque Français, aujourd'hui, à sa naissance,
a déjà une dette de***

110 000 euros (début 2011)

***« Arrive la Sainte Marie
et la France vit à crédit »***

Vous avez dit : « Développement Durable » ?

***Chaque Français, aujourd'hui, à sa naissance,
a déjà une dette de***

110 000 euros (début 2011)

***« À l'Assomption
la France n'a plus de pognon »***

Deux évènements importants ont marqué la fin du second millénaire

* **Développement durable**

* **Protocole de Kyoto**

Le protocole de Kyoto

Les pays dits « de l'annexe 1 » (Europe des 25, Russie, USA, Australie, Biélorussie, Canada, Japon, Suisse, N^{elle} Zélande, Turquie, Ukraine) s'engagent à une réduction globale de 5% des émissions des GES entre 2008 et 2012.

159 pays

décembre 1997

Mise en œuvre si 55% des pays représentant 55% du volume total des émissions de CO₂ en 1990 signent le protocole. Les pays en voie de développement ne sont pas concernés.

Évolution des émissions de CO₂ 1971 - 1990

Amérique du Nord	+ 17%	<i>dont USA</i>	+ 13%
Amérique latine	+ 67%		
Europe des 15	+ 5%	<i>dont France</i>	- 17%
Ex URSS	+ 50%		
Moyen Orient	+ 360%		
Afrique	+ 146%		
Asie	+ 181%	<i>dont Chine</i>	+ 176%
		<i>Inde</i>	+ 196%
Japon, Corée du Sud,	+ 17%		
Australie, N^{elle} Zélande			
Autres pays	+ 35%		
<hr/>			
<i>Monde</i>	<i>+ 44%</i>		

Évolution des émissions de CO₂ 1990 - 2002

	Réalisé %	Objectif de réduction entre 1990 et 2002 %
États - Unis	+ 16,7	- 7
Europe des 15	+ 3	- 8
Russie	- 25,3	0
Chine	+ 44,5	-
Japon	+ 18,9	- 6
Monde	+ 16,4	-

Protocole de Kyoto

Classement mondial	tonnes de CO₂ /hab (2008)
USA	19,1
Australie	18,7
Canada	17,3
Arabie Saoudite	14,7
Russie	10,4
Corée du sud	10
Allemagne	9,8
Japon	9,6
Royaume Uni	8,9
Chine	6,0
France	5,8

D'après Wikipédia

Protocole de Kyoto

Classement mondial	millions de tonnes de CO₂ (2008)
Chine	6 071
USA	5 770
Russie	1 587
Inde	1 324
Japon	1 236
Allemagne	798
Canada, UK	550
S-Corée, Iran	475
Mexique, Italie	438
Australie	396
Indonésie	377
France (15^e)	369

D'après Wikipédia

Protocole de Kyoto

classement européen	tonnes de CO ₂ /hab (2008)
Luxembourg	22,8
Estonie	15,2
Finlande, rép. Tchèque	12,1
Russie, Pays-Bas, Ireland	10,4
Belgique, Allemagne	9,8
Danemark, Norvège	9,2
Royaume-Uni, Grèce	8,9
Espagne, Autriche, Pologne	8,3
Bosnie-H., Italie, Islande, Slovénie	7,6
Biélorussie, Slovaquie, Bulgarie, Ukraine	6,9
Malte, Andorre	6,6
France (66^e au monde, 27^e /36 en Europe)	5,8
Croatie, Hongrie, Portugal, Suède, Macédoine	5,5
Serbie, Suisse, Lituanie, Lettonie	5,1 à 3,4

D'après Wikipédia

Électricité et CO₂

Émissions en CO₂ des différentes filières de production d'électricité

Modes de production	Hydrau-lique	nucléaire	éolien	photovoltaïque	cycle combiné à gaz	Gaz naturel	fuel
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	4	6	3 à 22 (380)	60 à 150 (400)	430	880	890

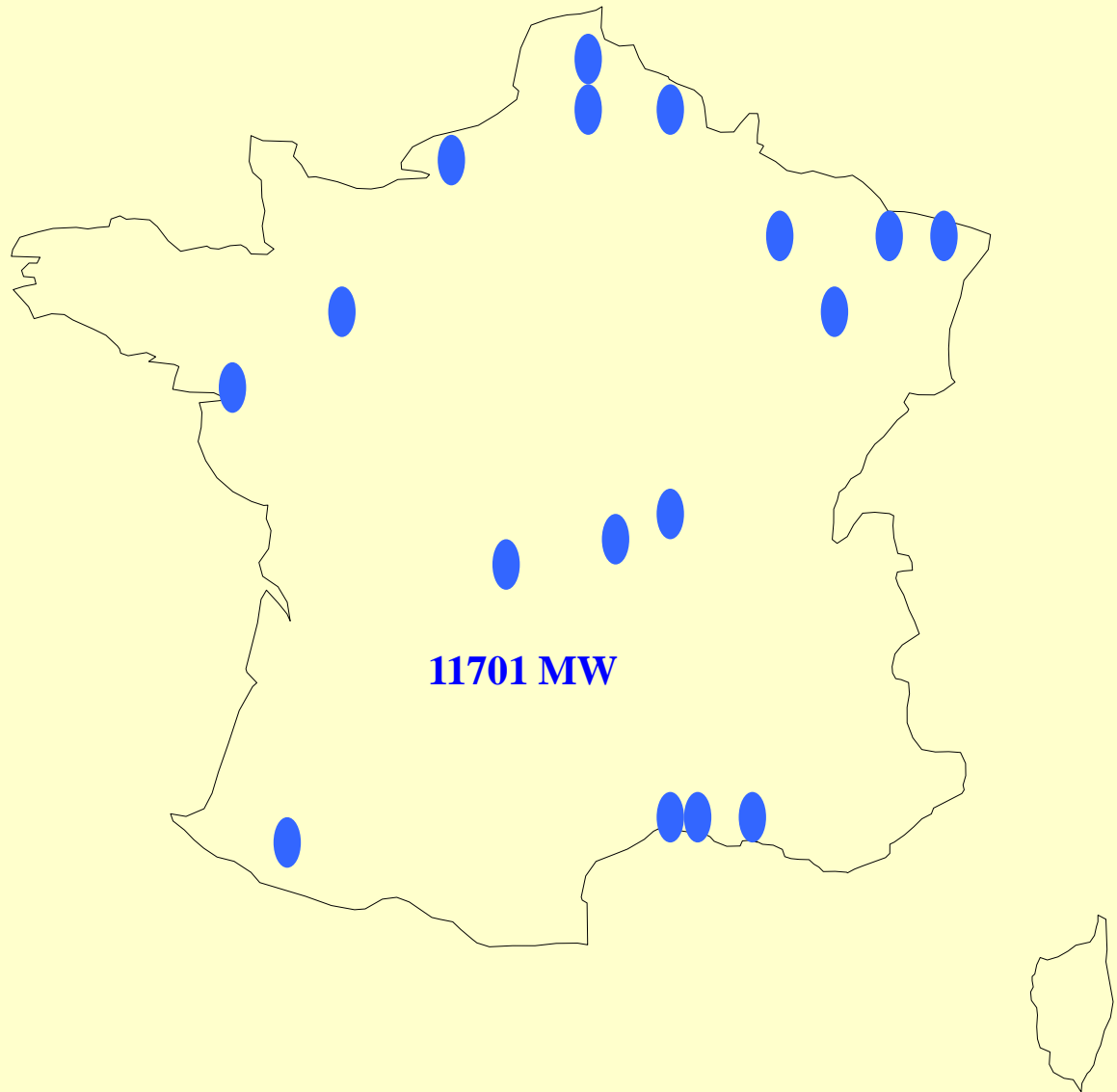
Source : EDF

Émissions en CO₂ pour 1 kWh moyen annuel dans différentes régions du monde

Production 1996	UE	USA	Japon	OCDE	monde	France
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	472	638	536	543	539	63

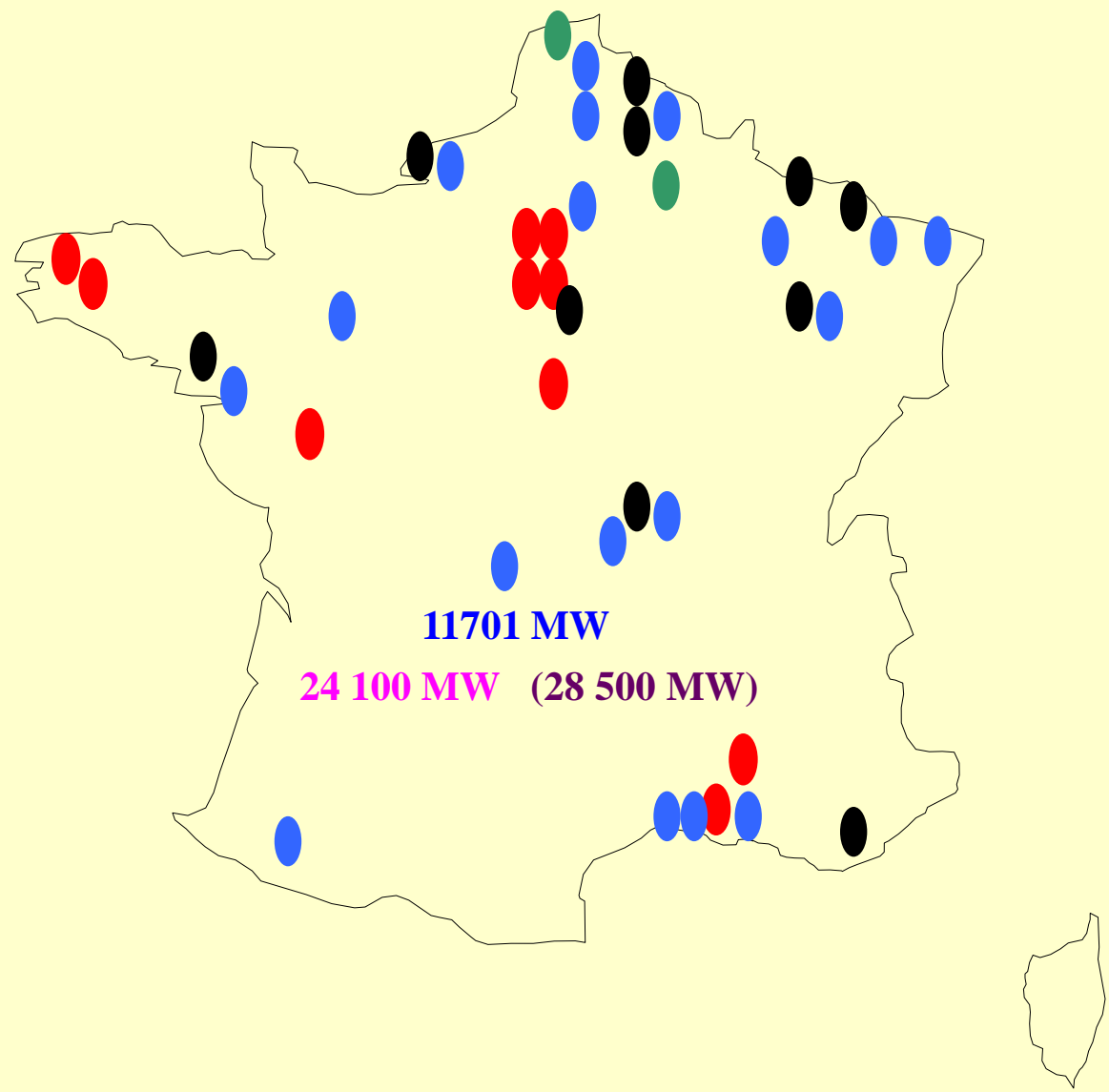
Source : : AIE 1996

 **Gaz, en construction ou projet**



- Gaz, en construction ou projet
- Fioul
- Charbon
- Gaz

Thermique classique
Renouvelable



Électricité et CO₂

Émissions en CO₂ des différentes filières de production d'électricité

Modes de production	Hydrau-lique	nucléaire	éolien	photovoltaïque	cycle combiné à gaz	Gaz naturel	fuel
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	4	6	3 à 22 (380)	60 à 150 (400)	430	880	890

Source : EDF

Émissions en CO₂ pour 1 kWh moyen annuel dans différentes régions du monde

Production 1996	UE	USA	Japon	OCDE	monde	France
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	472	638	536	543	539	63

Source : : AIE 1996

Il n'y a pas que le CO₂

Il y a aussi le méthane, 23 fois plus nocif pour l'effet de serre que le CO₂

Exemple : un bovin émet 650 kg de CO₂/an et 360 kg /an de méthane, soit 9 tonnes en équivalent CO₂/an

(respiration humaine : 0,5 t de CO₂ /an et individu)

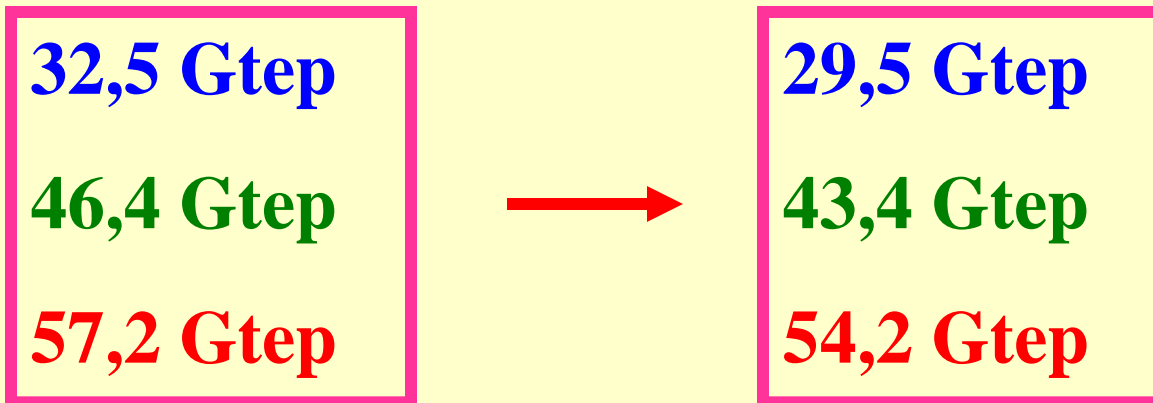


Bilan énergétique 2050

Énergie éolienne

Production d'énergie en 2006 : 0,015 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 3 Gtep/an



Off-shore ou on-shore ?

Malgré un coût plus élevé :

- 3000 euros par kW installé pour l'off-shore
- 2000 euros par kW installé pour l'on-shore

Exemple : la ferme éolienne du Banc de Guérande : 450 MW installés (entre 70 et 80 éoliennes de 6 MW) pour 1,4 milliard d'euros (les fondations peuvent dépasser 5 000 tonnes de béton).

*Autre possibilité off shore : l'ancrage sur bouée ancrée.
Exemple: 2,3 MW installés en Norvège, sur 200 mètres de fond pour 50 millions d'euros (soit 21 700 euros par kW installé)*

Off-shore ou on-shore ?

Malgré un coût plus élevé :

- 3000 euros par kW installé pour l'off-shore
- 2000 euros par kW installé pour l'on-shore

la tendance, dans les pays à forte densité de population comme la France, va plutôt vers l'off-shore

en raison de

L'énergie éolienne

* nuisance sonore

* nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)



Professeur Jacques FOOS - 15 octobre 2011

L'énergie éolienne

- * nuisance sonore
- * nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)



L'énergie éolienne



Sortosville (Manche)

L'énergie éolienne

- * **nuisance sonore**
- * **nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)**
- * **parfois dangereuse**



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

- * nuisance sonore
- * nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)
- * parfois dangereuse

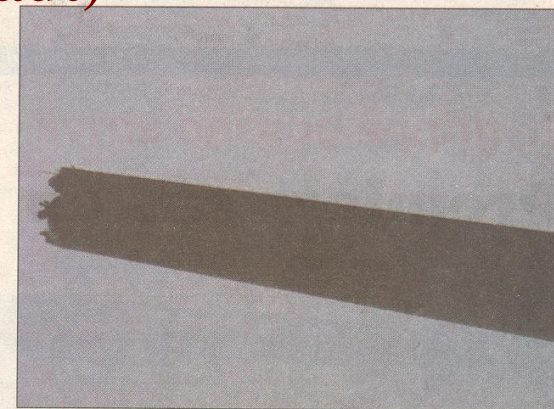
Une pale d'éolienne se brise à Clitourps

Hier matin, l'une des cinq éoliennes de Clitourps a perdu le bout d'une pale. Même si l'incident n'a pas fait de blessés, les anti-éoliens saisissent la pale au bond.

Mars 2007. Une pale d'éolienne se brise à Clitourps, dans le Val de Saire. « **Ce type d'incident est rarissime ; en fait, ce n'est jamais arrivé dans notre entreprise qui compte onze parcs en France** », disait alors Mme Dubernet, de la société EDF Nouvelles énergies.

Avril 2009. Bis repetita. Une pale de la même éolienne s'est cassée hier matin. Ce sont des passants qui ont constaté, en fin de matinée, que l'extrémité de cette pale pendait bizarrement. Ils ont alerté les pompiers, qui ont constaté que cette pale menaçait de tomber. « **Dans la demi-heure, les cinq machines ont été arrêtées** », explique le maire de la commune, Bernard Le Baron. Heureusement, car le morceau de quatre mètres de long, qui n'était plus tenu que par le câble antifoudre, est finalement tombé. « **Contrairement à ce qui s'était passé en 2007, où l'incident s'était produit alors que la machine fonctionnait et où le morceau avait volé sur deux cents mètres, nous avons donc récupéré la partie de pale tout près de l'éolienne** », précise Bernard Le Baron.

N'empêche. Deux problèmes rarissimes en deux ans, sur la même machine, c'est doublement étonnant. « **Ce sont des machines construites par Vestas, le leader mondial, qui fait référence quant à la fiabilité des éoliennes** », ajoute



C'est un morceau de quatre mètres, à l'extrémité d'une pale, qui est tombé.

le maire de Clitourps. Des experts sont donc attendus au pied des éoliennes pour tenter d'expliquer ce qui a bien pu se passer. Et cette fois, contrairement à 2007, il n'y a pas eu ces derniers jours un énorme orage susceptible d'avoir fragilisé la machine. « **Ce qui est certain, c'est que les éoliennes ne redémarreront que lorsque nous serons sûrs qu'il n'y a aucun problème sur ces machines** », prévient Christian Le Baron.

Du côté des opposants aux éoliennes, en tout cas, on n'a pas tardé à tenter de profiter de ces vents porteurs. L'association Plain Cotentin Environnement, qui s'oppose à l'implantation d'éoliennes industrielles dans la presqu'île,

évoque « **un accident grave** » compte tenu « **de l'envergure et du poids des pales d'éoliennes** ». « **Une fois de plus, cela met en lumière le danger que représentent ces éoliennes, qui sont, en plus inutiles** », assène le président Jean-Pierre Ozannat. « **Rappelons que, lorsque l'EPR sera en service, le Cotentin exportera plus de 95 % de l'électricité qu'il produit, ajoute Jean-Pierre Ozannat. Vouloir produire encore plus d'électricité ici, alors que cette électricité se transporte mal, c'est justifier encore plus de lignes THT sans résoudre les problèmes posés par le nucléaire.** »

Professeur Jacques Foo

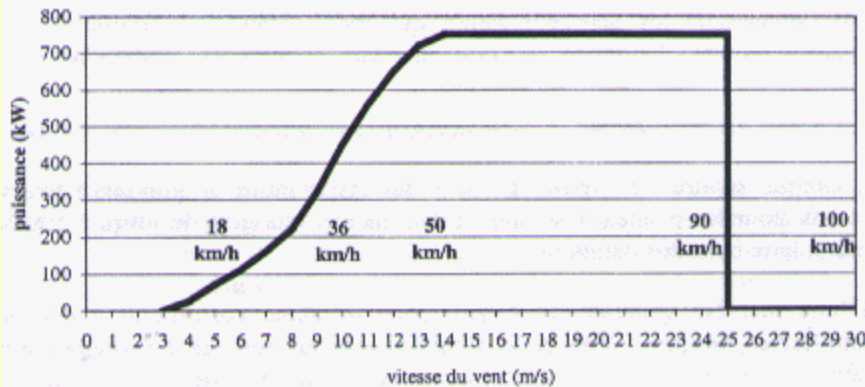
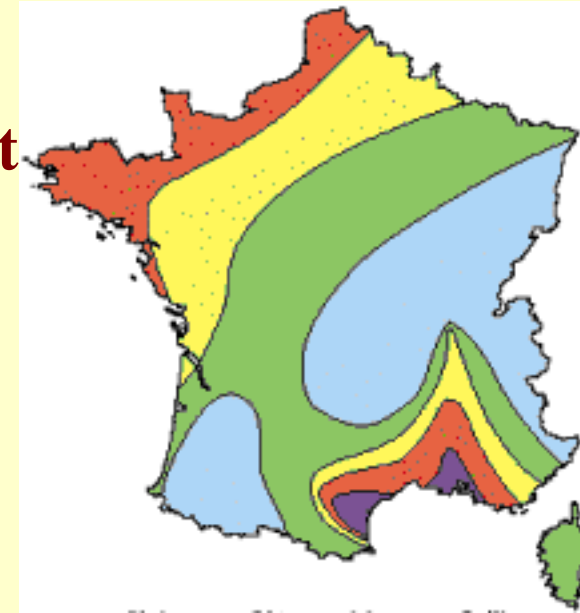
L'énergie éolienne

*** Arrêt de la Cour d'Appel de Bordeaux, confirmé par le Conseil d'État, en application de l'article R-111-2 du code de l'Urbanisme prescrivant les exigences en matière de sécurité publique
(septembre 2009 : annulation du permis de construire)**

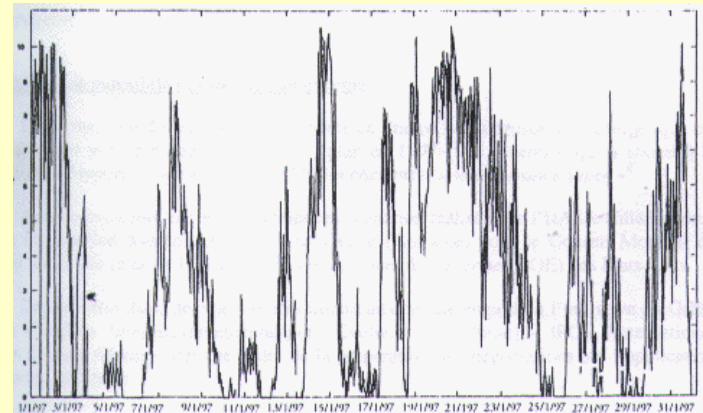
*** Arrêt du Tribunal de Grande Instance de Carpentras qualifiant de « *présence visuelle négative permanente* » un mât d'une hauteur de 20 mètres situé à 135 mètres des habitations
(février 2009)**

L'énergie éolienne

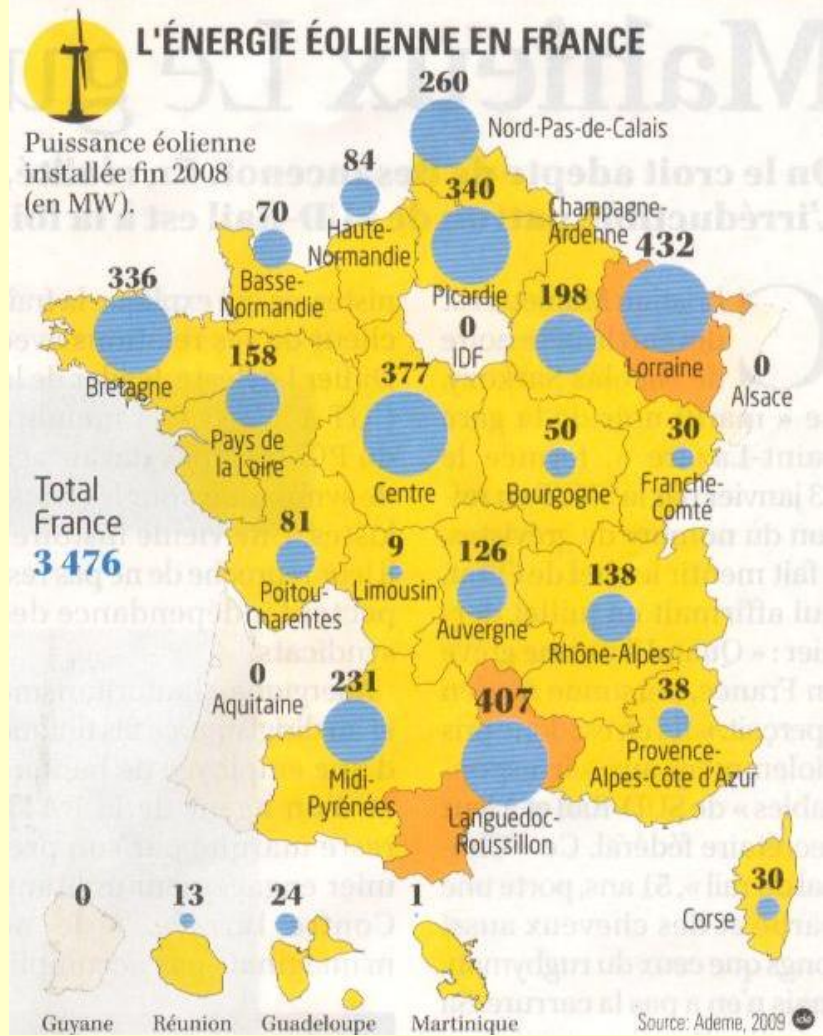
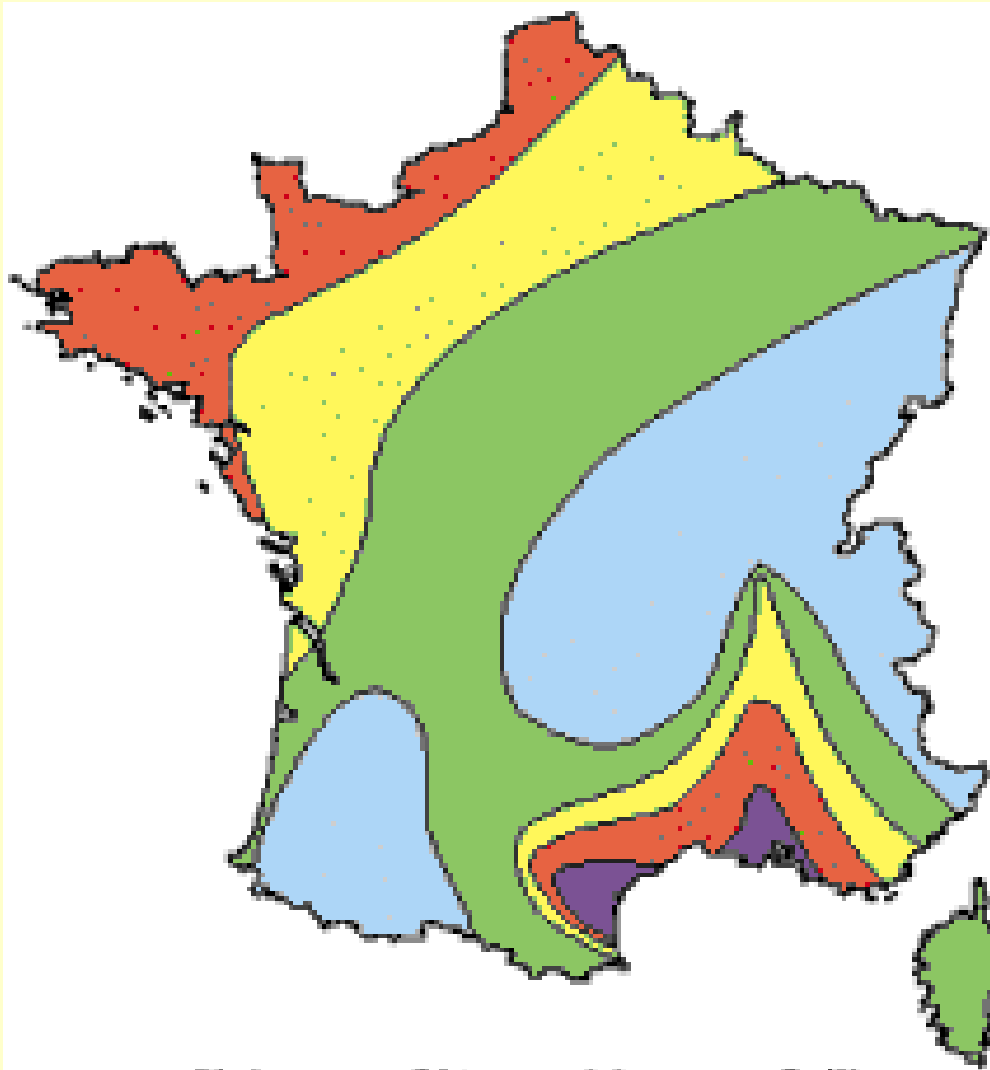
- * nuisance sonore
- * nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)
- * parfois dangereuse
- * toujours mortelle pour les oiseaux
- * emprise au sol élevée : 6 ha/ éolienne ou 80 ha par MW fourni car
- * rendement faible



Sources AEPN



L'énergie éolienne



L'énergie éolienne

- * nuisance sonore
- * nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)
- * parfois dangereuse
- * toujours mortelle pour les oiseaux
- * emprise au sol élevée : 6 ha/ éolienne
ou 80 ha par MW fourni car rendement faible *et donc*
- * **coût de fonctionnement élevé**

EDF achète le « kWh éolien » 8,4 c€ pendant 5 ans puis 7,2 c€ pendant 15 ans.

Par comparaison, le kWh électrique fin 2010 est vendu par EDF : 3,5 c€

Ainsi, les 5 000 MW installés en France rapporteront 700 millions d'euros aux constructeurs de machines et plus de 60 millions d'euros aux régions, tous payés par le contribuable.

En 2015, la facture pourrait se situer entre 1 et 2,5 milliards d'euros

L'énergie éolienne

Greenpeace - France (septembre 2009, Presse de la Manche) :

« 2 000 éoliennes peuvent remplacer un réacteur EPR »

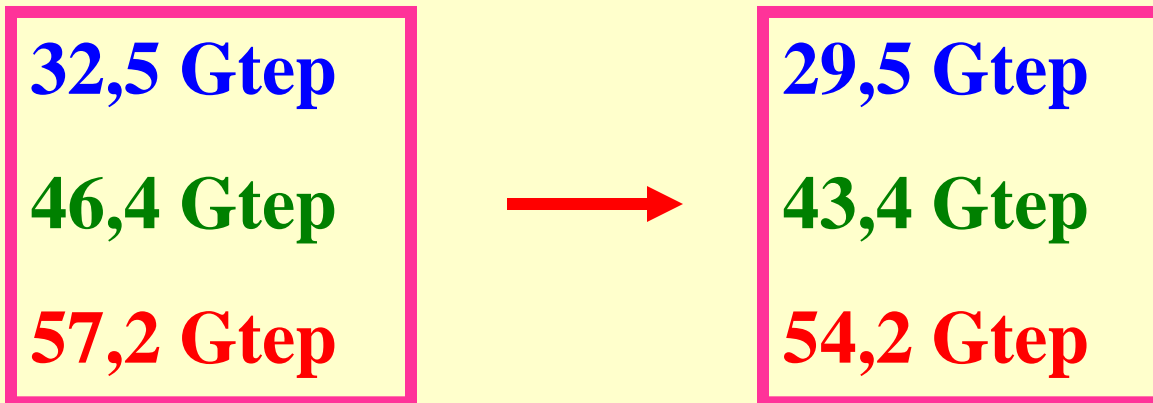
Exact : 2 000 éoliennes de 5 MW fournissent la même puissance électrique qu'un réacteur EPR (1 600 MW) pour un coût compris entre 20 milliards d'euros (on-shore) et 30 milliards d'euros (off-shore) etentre 4 et 10 millions de tonnes de béton ! (1 million de tonnes pour l'EPR)

Bilan énergétique 2050

Énergie éolienne

Production d'énergie en 2006 : 0,015 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 3 Gtep/an



3 Gtep de production éolienne ?

**Ce sont 6 millions d'éoliennes de 5 MW
(1 pour 1500 Terriens en 2050, des mâts de 150 à 180 mètres de haut,
des pales de 70 à 90 mètres)**

*Ainsi, rien que pour Paris intra-muros, ce sont 2150 éoliennes de
cette envergure, soit plus de 100 par arrondissement*

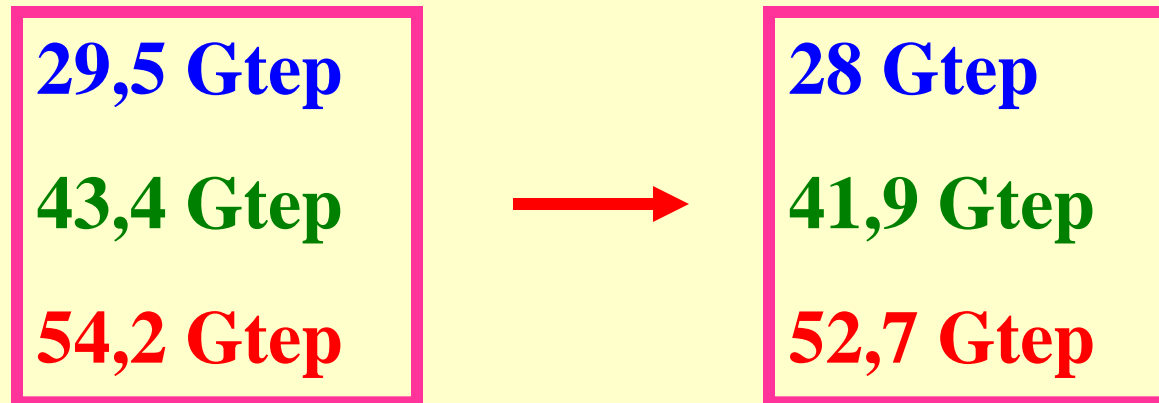
**Surface mondiale occupée : 10 fois celle de la France ; pour un coût
de 57 000 milliards d'euros soit 1,4 fois le PIB mondial annuel**

Bilan énergétique 2050

Énergie hydraulique

Production d'énergie en 2006 : 0,26 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 1,5 Gtep/an

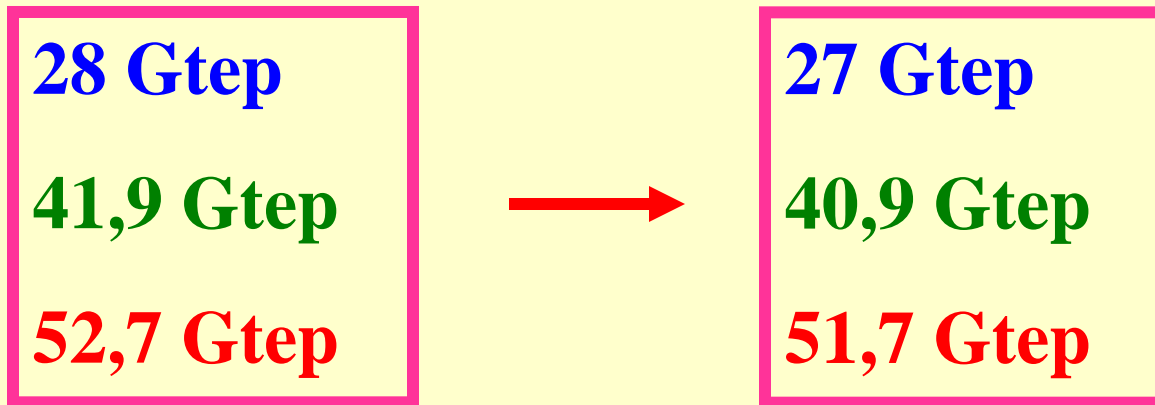


Bilan énergétique 2050

Énergie géothermique

Production d'énergie en 2000 : 0,03 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an

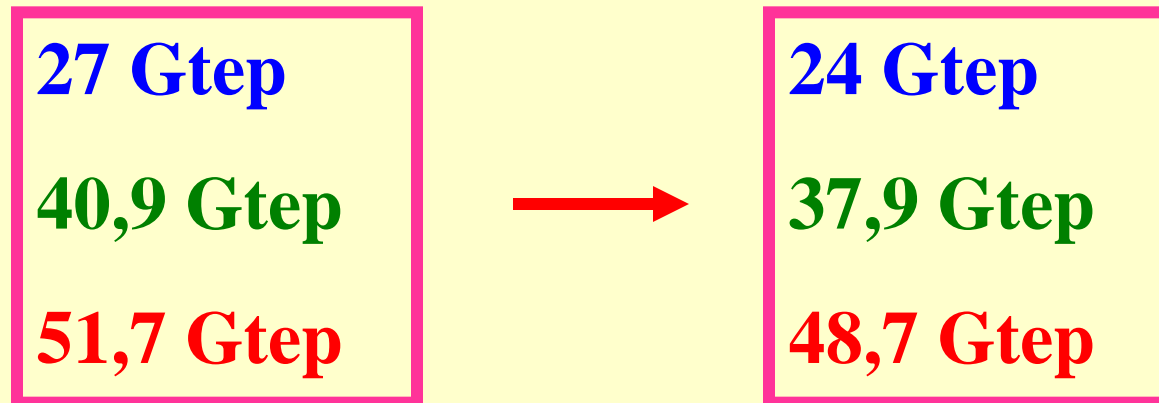


Bilan énergétique 2050

Énergie solaire

Production d'énergie en 2006 : 0,015 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 3 Gtep/an



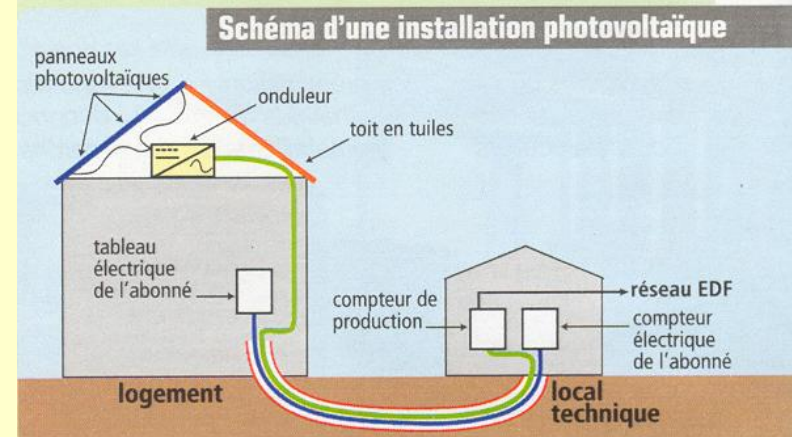
3 Gtep de production solaire ?

Exemple d'une famille française :

**Installation de 20 m² de panneaux pour 16 000 euros
(puissance installée : 2 kW ; production annuelle : 2600 kWh).**

Les crédits d'impôts et subventions diverses couvrent 70 à 80 % de l'investissement

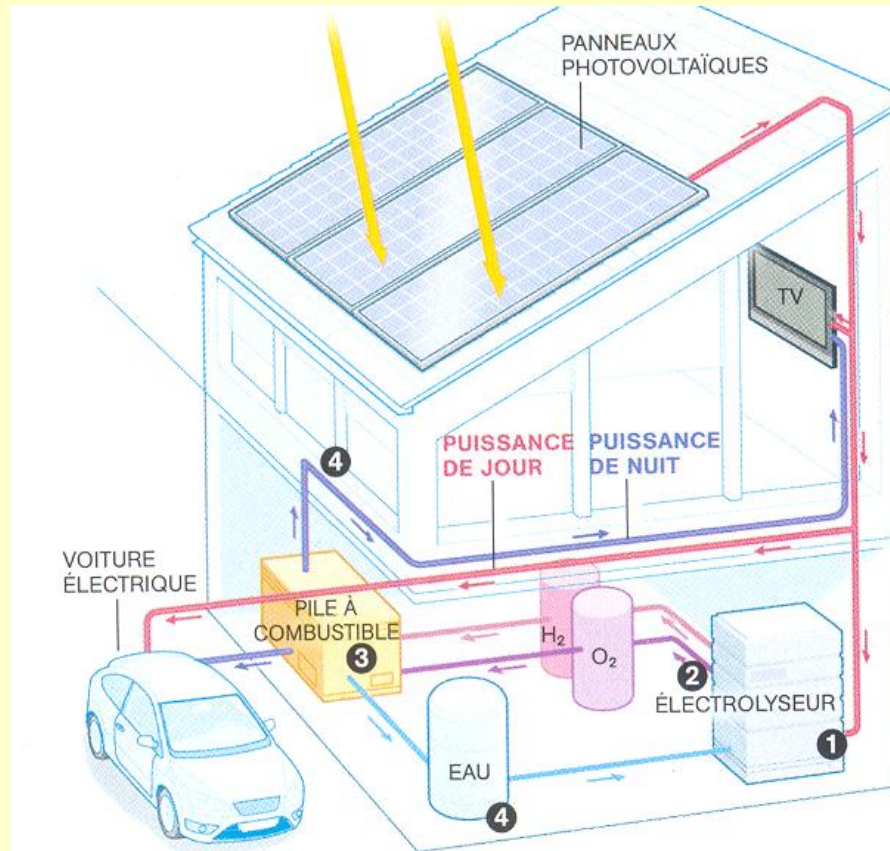
**Le kWh est vendu 55 c€ à EDF mais acheté à
3,5 c€ : L'installation est amortie en 4 ans et
rapporte ensuite un revenu annuel de 1300 à
1400 euros**



C'est la Fée Électricité : le compteur tourne à l'envers

3 Gtep de production solaire ?

Ce sont 28 m² de panneaux solaires par habitant de la Terre pour un coût de 213 000 milliards d'euros soit 5 fois le PIB mondial annuel ou 10% de ce PIB par an pendant 50 ans



3 Gtep de production solaire ?

Ce sont 28 m² de panneaux solaires par habitant de la Terre de 2050 pour un coût de 213 000 milliards d'euros soit 5 fois le PIB mondial annuel ou 10% de ce PIB par an pendant 50 ans

Exemple d'une famille française :

Installation de 20 m² de panneaux pour 16 000 euros (puissance installée : 2 kW ; production annuelle : 2600 kWh).

Les crédits d'impôts et subventions diverses couvrent 70 à 80 % de l'investissement

Le kWh est vendu 55 c€ à EDF mais acheté à 3,5 c€ : L'installation est amortie en 4 ans et rapporte ensuite un revenu annuel de 1300 à 1400 euros

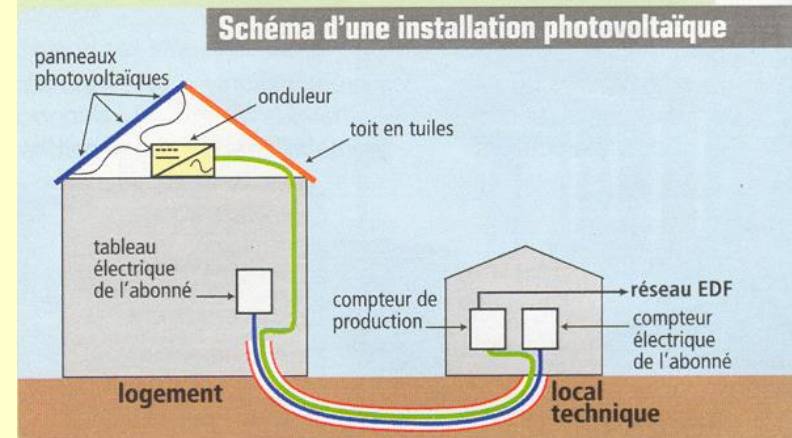
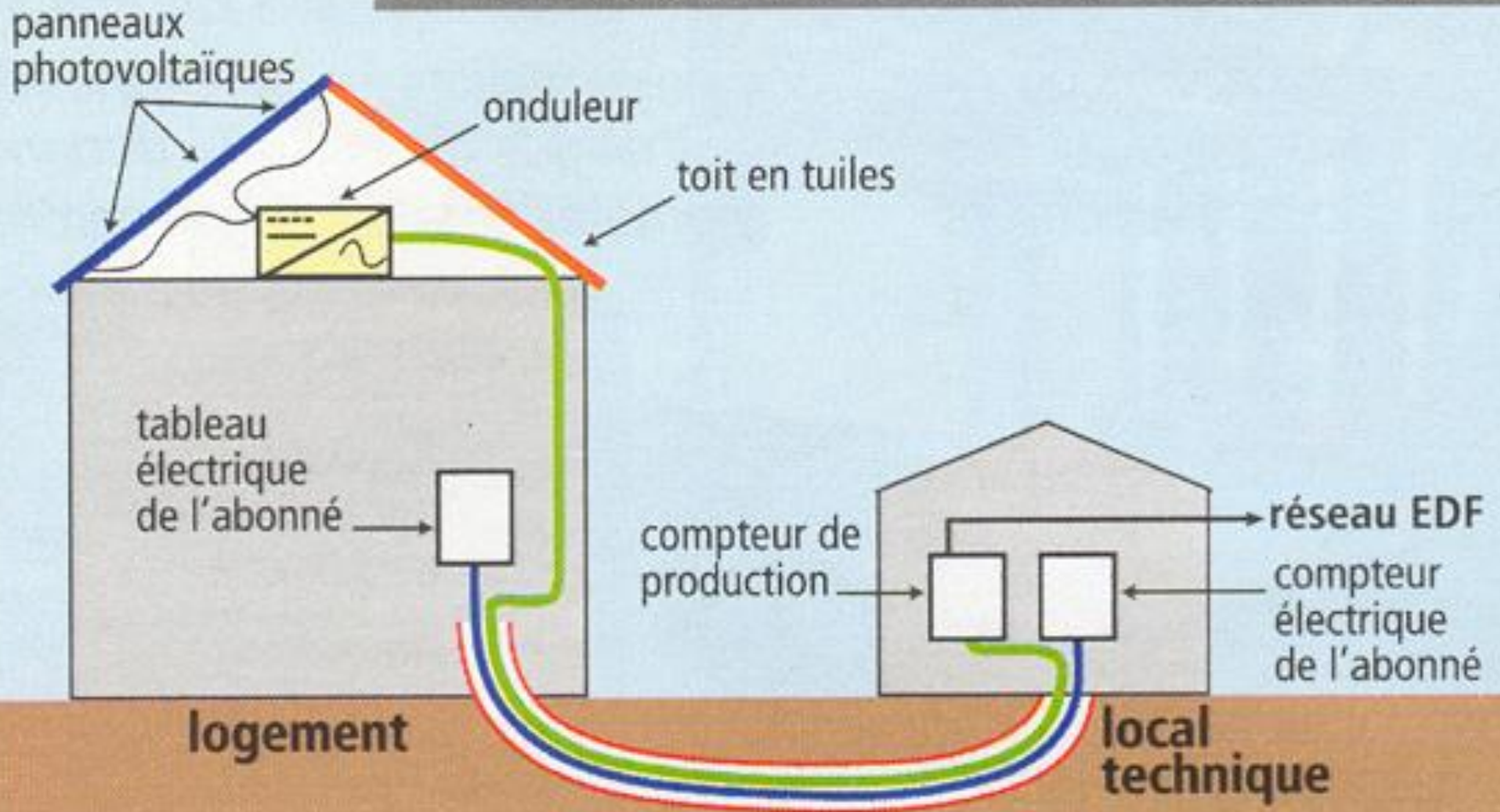


Schéma d'une installation photovoltaïque



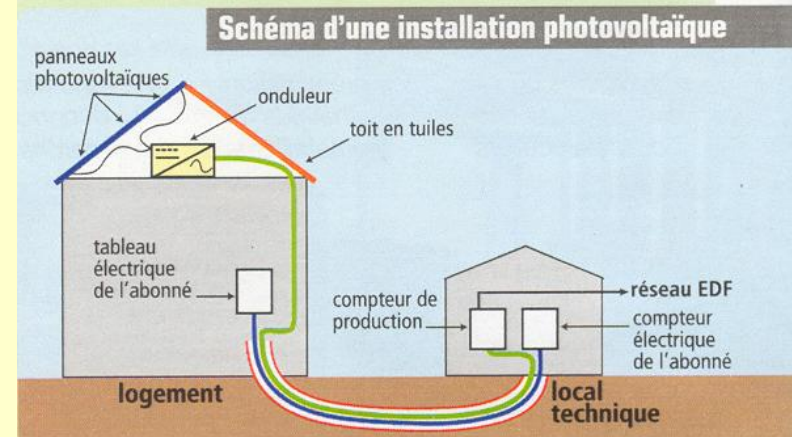
3 Gtep de production solaire ?

Exemple d'une famille française :

**Installation de 20 m² de panneaux pour 16 000 euros
(puissance installée : 2 kW ; production annuelle : 2600 kWh).**

Les crédits d'impôts et subventions diverses couvrent 70 à 80 % de l'investissement

**Le kWh est vendu 55 c€ à EDF mais acheté à
3,5 c€ : L'installation est amortie en 4 ans et
rapporte ensuite un revenu annuel de 1300 à
1400 euros**



C'est la Fée Électricité : le compteur tourne à l'envers

La Fée électricité (*suite*)

Deux autres exemples :

**ZAC Pajol , Paris : 3 200 m² de panneaux solaires
pour une production de 380 000 kWh/an, soit un bénéfice annuel de
200 000 euros dans quelques années pour l'investisseur privé à qui la
Ville de Paris a sous-traité.**

La Fée électricité (suite)

Deux autres exemples :

Les parkings du Supermarché L... à Montpellier couverts de panneaux solaires : production électrique de 3 500 kWh/jour soit un coût annuel pour EDF de **650 000 euros.**



La Fée électricité (suite)

votre facture en détail document à conserver 5 ans

Votre référence client
22224 757 506 040 127

Réf. Point de livraison : 222 154847376 37

	relevé ou estimation en kWh			consom. (en kWh)	prix kWh en euros	montant HT en euros	taxes locales	TVA	total TTC en euros
	ancien	nouveau	différence						
électricité compteur n° 667						(1) 1498,76	143,88	258,88	1901,52
abonnement						408,12			
34,01€ /mois du 22/08/08 au 22/08/09									
consommation kWh jours pointe mobile	69585	70068	483	483	0,4850	234,26			
consommation HN du 26/06/08 au 26/06/09	35633	50817	15184	15184	* 0,0564	856,38			
49 jours à 0,0554€ + 311 jours à 0,0565€ soit un prix moyen de 0,0564€									

(1) y compris le coût d'acheminement de l'électricité pour 46% (% moyen pour le Tarif Bleu)

	montant HT en euros	taxes locales	TVA	total TTC en euros
autres prestations				
contribution au service public d'électricité	15667	0,0045	70,50	84,32

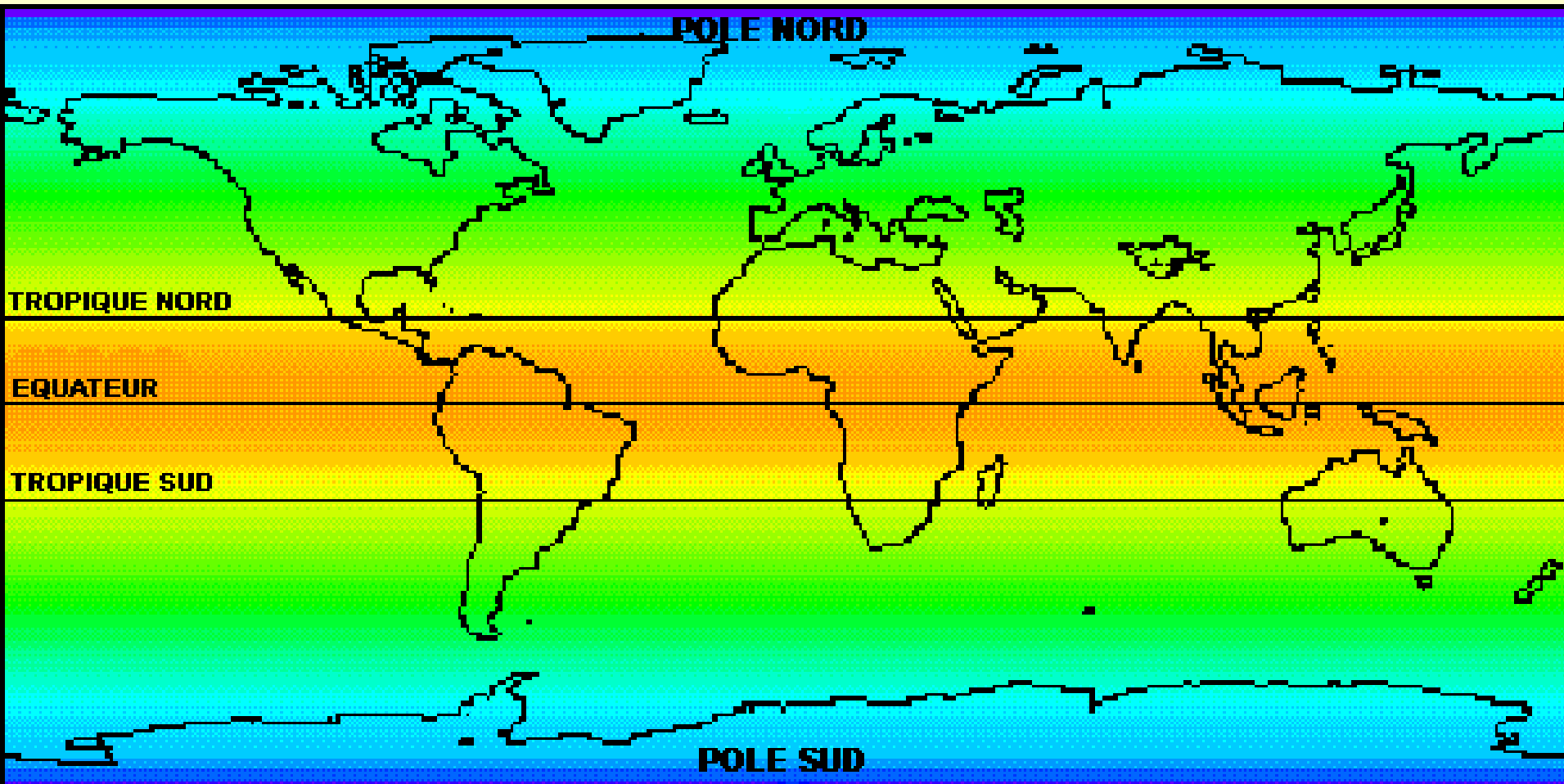
30% du montant : investissements dans le photovoltaïque

	montant HT en euros	taxes locales	TVA	total TTC en euros
total	1569,26	143,88	272,70	1985,84

Augmentation en 2011 de 67,5%

Une autre augmentation prévue en 2012

Ensoleillement de la planète

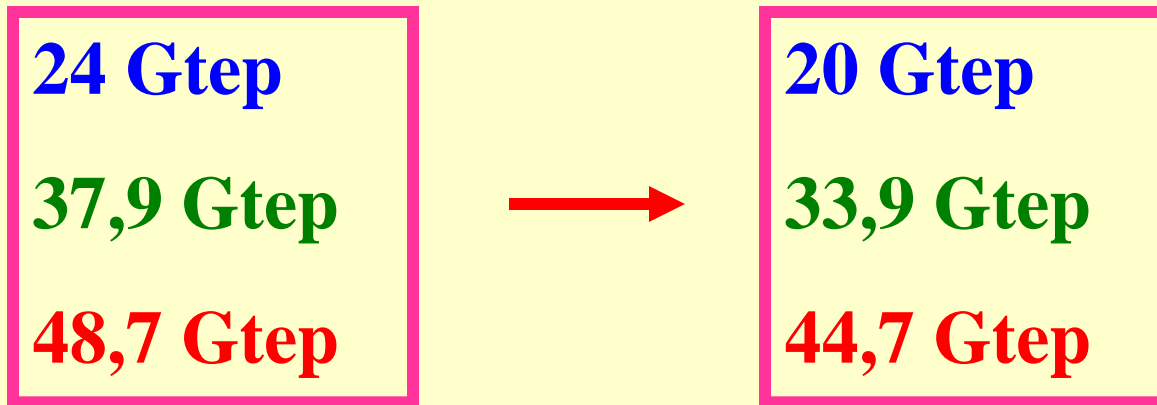


Bilan énergétique 2050

Biomasse

Production d'énergie en 2006 : 1,2 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an



Bilan énergétique 2050

Biomasse (chaleur)

Environ 1,2 Gtep en 2000



combustion du bois, paille, ordures ménagères ...

très utilisée malgré un rendement énergétique faible

Responsable de 1 500 morts par jour selon l'OMS (surtout dans les pays en voie de développement)

Bilan énergétique 2050

Biomasse (transport)

→ biocarburants 70 Mtep en 2000

2 filières → huile végétale (colza – tournesol)

→ éthanol (blé - betterave)

Le rendement est obligatoirement faible car il faut produire les végétaux ce qui implique :

- * de mettre du carburant dans le tracteur
- * de fabriquer des engrais (très énergivore)
- * de broyer et purifier le produit de la culture
- * de distiller le produit obtenu pour la filière alcool

Bilan énergétique 2050

Biomasse (transport)

Si on veut remplacer en France la moitié du pétrole utilisé pour les transports (25 Mtep), il faut une surface minimale immobilisée pour la production végétale égale à :

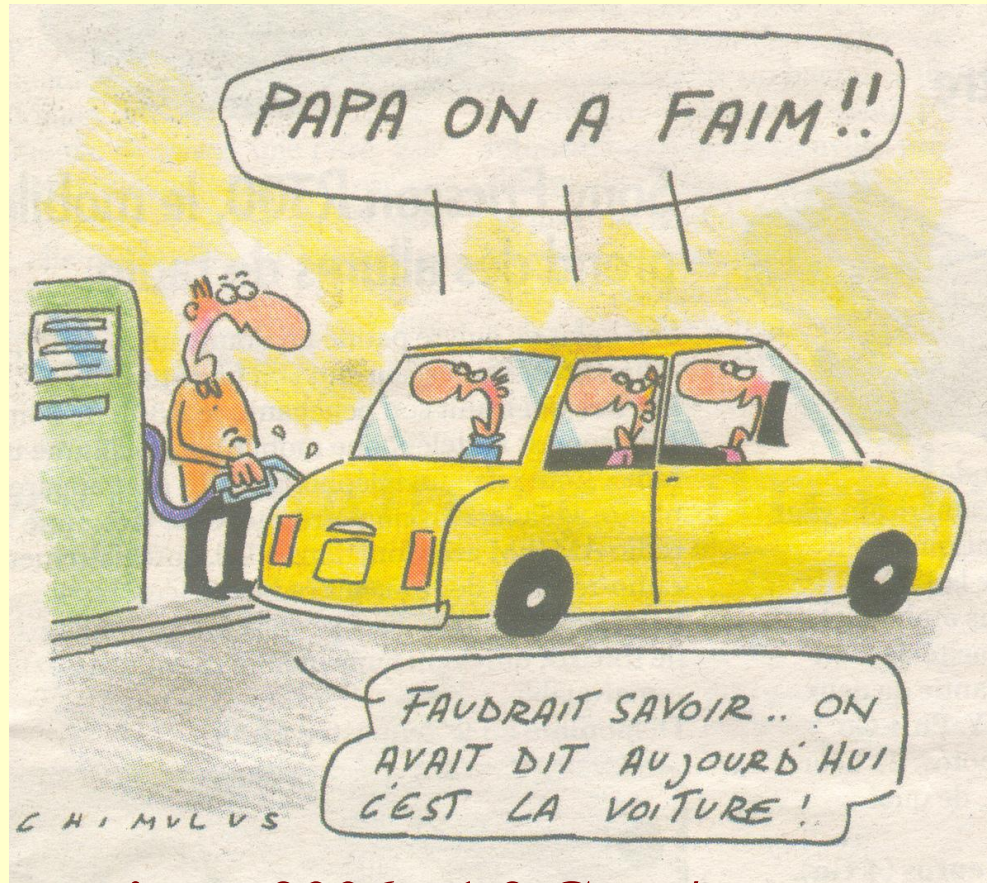
	tep/km ²	Surface (km ²) nécessaire pour 25 Mtep	% de surface totale cultivable	Pour mémoire surface cultivée (km ²)
Blé	289,50	86 354	47,0%	55 150
colza	270,25	92 508	50,3%	5 020
Tournesol	212,10	117 870	64,2%	8 930
Betterave	337,40	74 094	40,3%	4 785

Rapport DIREM / ADEME - 2003

« Boire ou conduire, il faut choisir »
« Manger ou rouler, il faut trancher »

Manger ou rouler, il faut trancher

Biomasse



Production d'énergie en 2006 : 1,2 Gtep/an

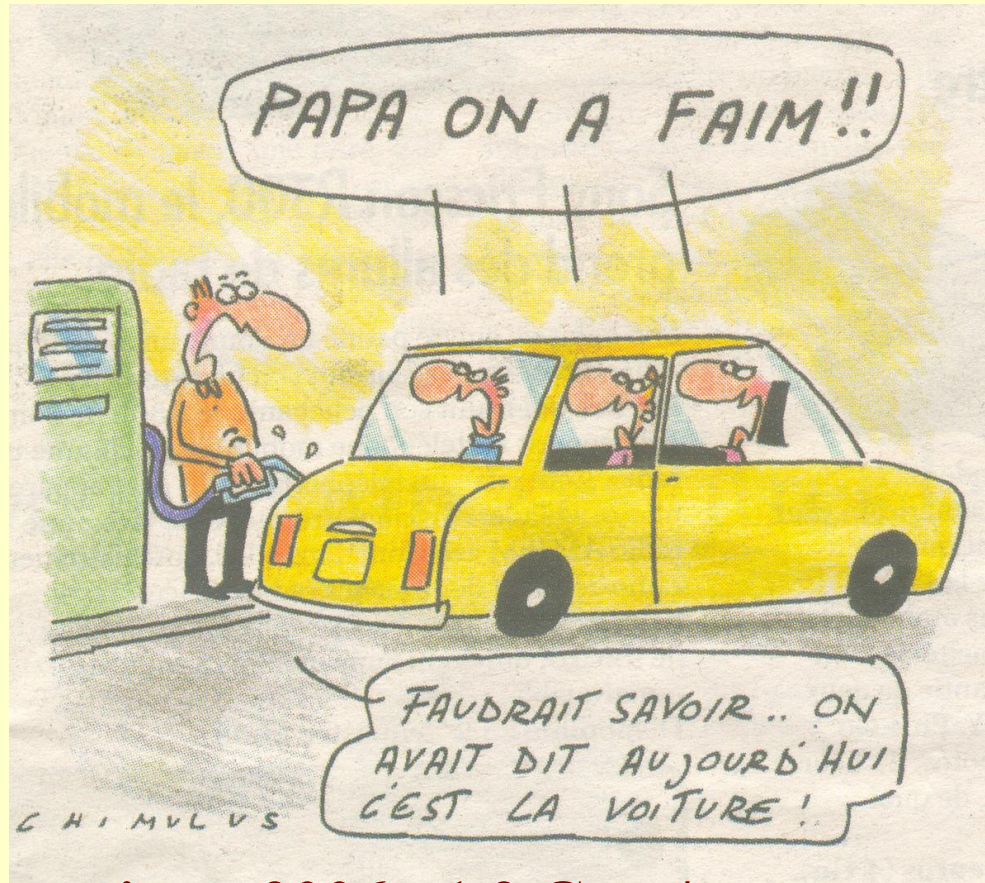
Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an
(25 fois la surface de la France de terres cultivables)

Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

24 Gtep
37,9 Gtep
48,7 Gtep

Manger ou rouler, il faut trancher

Biomasse



Production d'énergie en 2006 : 1,2 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an
(25 fois la surface de la France de terres cultivables)

Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

20 Gtep
33,9 Gtep
44,7 Gtep

L'hydrogène : le carburant de demain

« Je crois que l'eau sera employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, utilisés isolément ou séparément fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable »

Jules Verne – L'île mystérieuse

Mais : Bien que l'hydrogène soit présent partout, *il n'est disponible nulle part.*
Il n'existe que sous forme combinée à d'autres éléments.

Production de l'hydrogène

- * Par décomposition de l'eau (essentiellement par électrolyse)
- * À partir d'énergies fossiles (méthane, gaz à l'eau, gazéification du charbon)

Il est évident que seule la première voie de production peut être raisonnablement envisagée !

Source de l'énergie d'électrolyse : éolien ou nucléaire.

Coût de production : 10 fois plus que les hydrocarbures.

Coût de stockage : 100 fois celui des hydrocarbures liquides.

Le carburant hydrogène

Option prometteuse mais contraintes nombreuses :

- * même comprimé à 700 bars, il faut 4,6 litres d'hydrogène pour fournir autant d'énergie qu'un litre d'essence.
- * **Caractère inflammable et explosif.**
- * **Fragilisation des matériaux par l'hydrogène**
→ recherche technologique à développer dès aujourd'hui.

Bilan énergétique 2050

Énergie des mers

* Usines marémotrices (amplitude) **25 Mtep en 2000**

Source EDF

Ex. : la Rance 240 MW



* **Énergie hydrolienne (énergie des courants)**

* **Énergie des vagues**

* **Énergie thermique des mers**

20 Gtep

33,9 Gtep

44,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie des mers

* Usines marémotrices (amplitude) **25 Mtep en 2000**

Source EDF

Ex. : la Rance 240 MW



* **Énergie hydrolienne (énergie des courants)**

* **Énergie des vagues**

* **Énergie thermique des mers**

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an ?

19 Gtep

32,9 Gtep

43,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Centrales thermiques électrogènes

Une ville d'un million d'habitants utilise 1 GWe

Seul le thermique peut fournir une telle puissance en occupant une surface limitée.

Thermique classique : combustible fossile (gaz, pétrole, charbon)

*Thermique nucléaire : fission : uranium (minerai, eau de mer)
plutonium (issu des centrales)*

fusion : deutérium / tritium

Thermique classique :

Production d'énergie en 2000 : 3 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an

19 Gtep

32,9 Gtep

43,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Centrales thermiques électrogènes

Une ville d'un million d'habitants utilise 1 GWe

Seul le thermique peut fournir une telle puissance en occupant une surface limitée.

Thermique classique : combustible fossile (gaz, pétrole, charbon)

*Thermique nucléaire : fission : uranium (minerai, eau de mer)
plutonium (issu des centrales)*

fusion : deutérium / tritium

Thermique classique :

Production d'énergie en 2000 : 3 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an

15 Gtep

28,9 Gtep

39,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Les combustibles fossiles

* Thermique classique (électricité) : 2,5 Gtep/an

* Autres utilisations (chaleur, transport) : 5,5 Gtep/an

Production d'énergie en 2000 : 6,5 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 8 Gtep/an

15 Gtep

28,9 Gtep

39,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Les combustibles fossiles

* Thermique classique (électricité) : 2,5 Gtep/an

* Autres utilisations (chaleur, transport) : 5,5 Gtep/an

Production d'énergie en 2000 : 6,5 Gtep/an

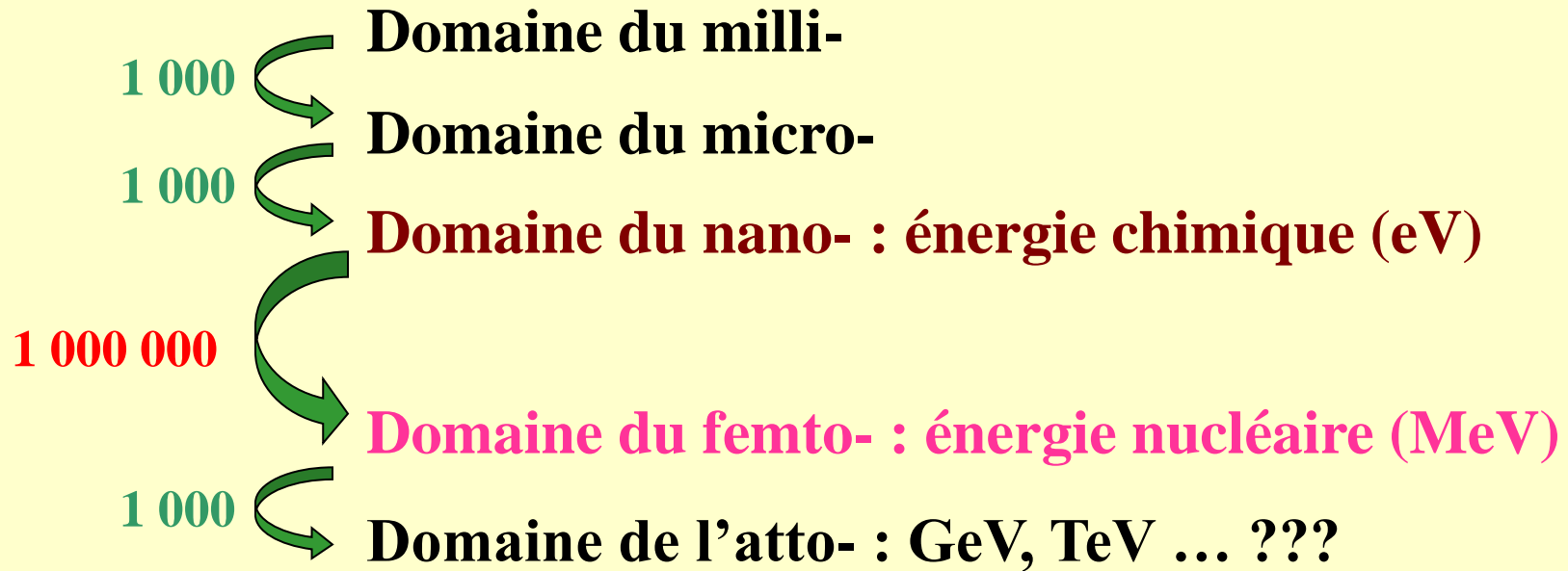
Production maximale en 2050 : 8 Gtep/an

7 Gtep

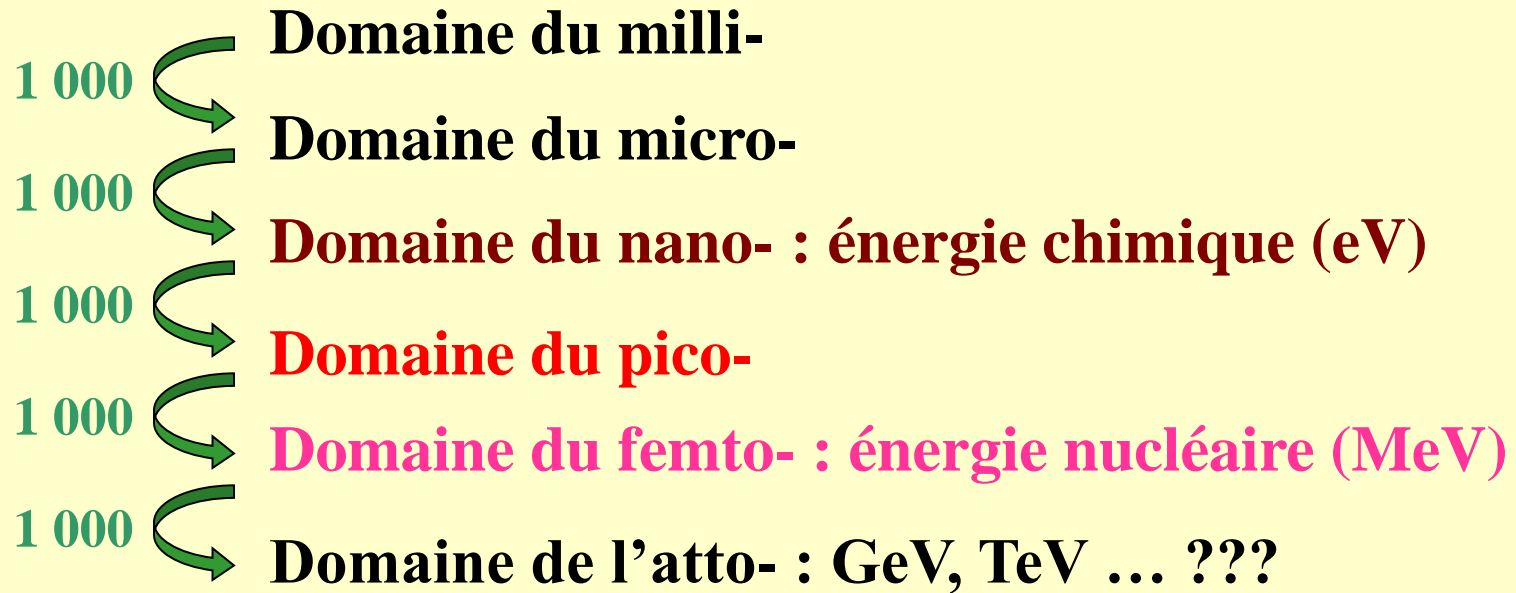
20,9 Gtep

31,7 Gtep







Et les énergies inconnues ?



Et les énergies inconnues ?



Et les énergies inconnues ?

1 000  **Domaine du milli-**
1 000  **Domaine du micro-**
1 000  **Domaine du nano-**
1 000  **Domaine du pico-**
1 000  **Domaine du femto-**
1 000  **Domaine de l'atto-**



Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie

- * Des matériaux isolants pour l'habitat et une politique volontariste d'aménagement,
- * Une amélioration du rendement de tout moteur,
- * Un changement individuel d'habitudes de vie, sans contraintes réelles,
- * Une recherche poussée sur le stockage de l'énergie,
- * Des subventions utilisées de façon intelligente.

⇒ - 1,5 Gtep dans l'hypothèse la plus optimiste

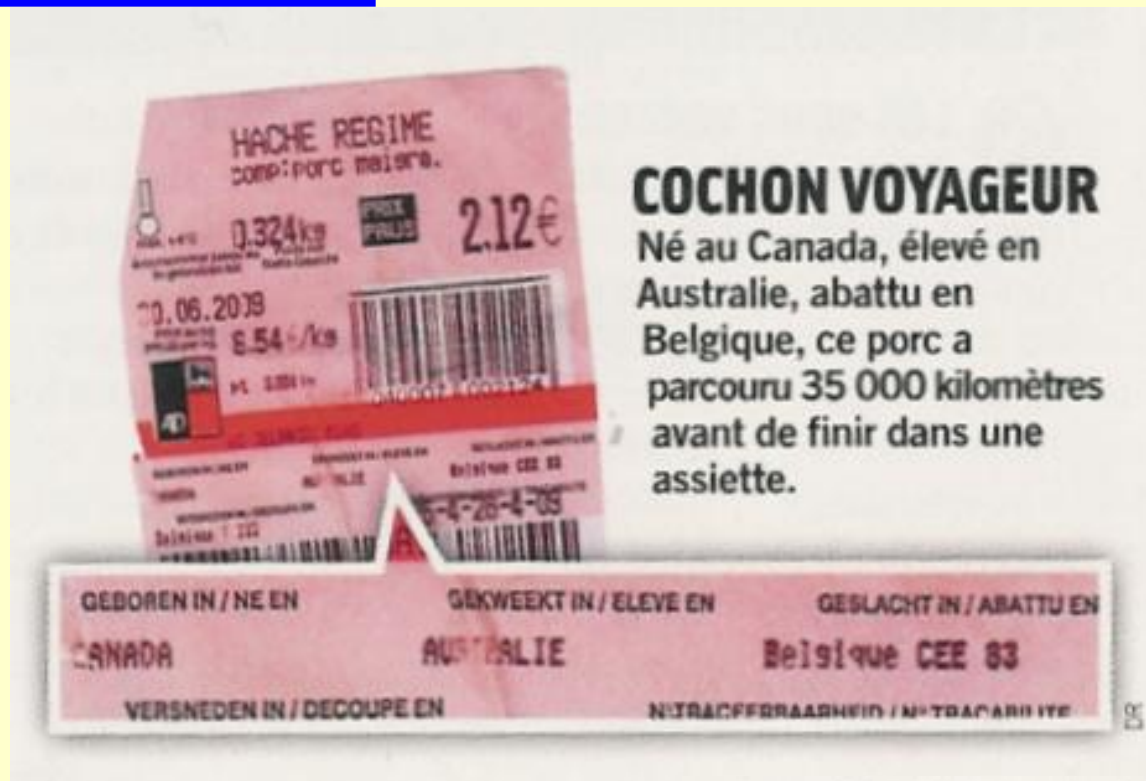
7 Gtep

20,9 Gtep

31,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

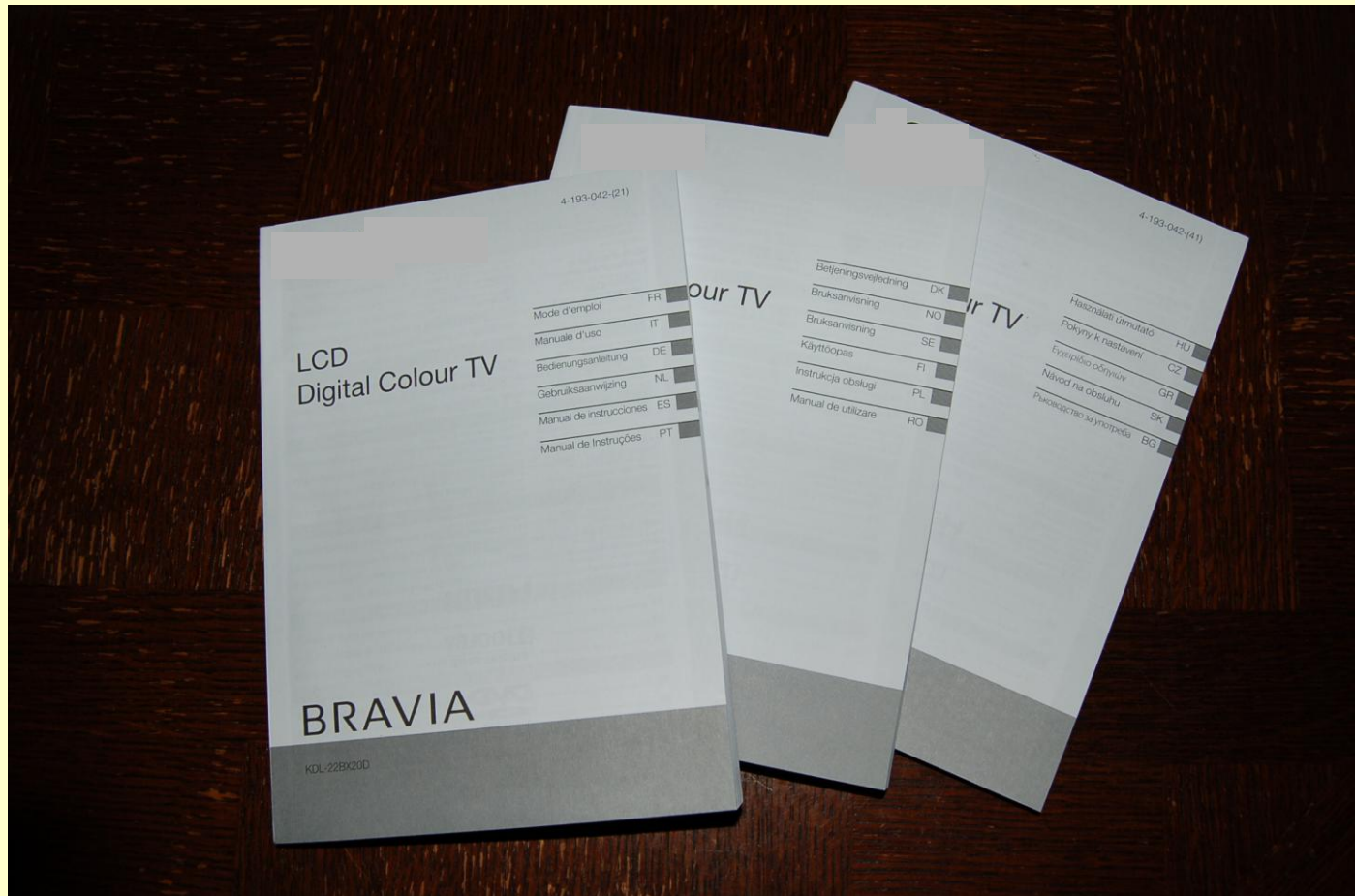
Économies d'énergie



JANVIER/FÉVRIER 2010 | HORS-SÉRIE SCIENCES ET AVENIR |

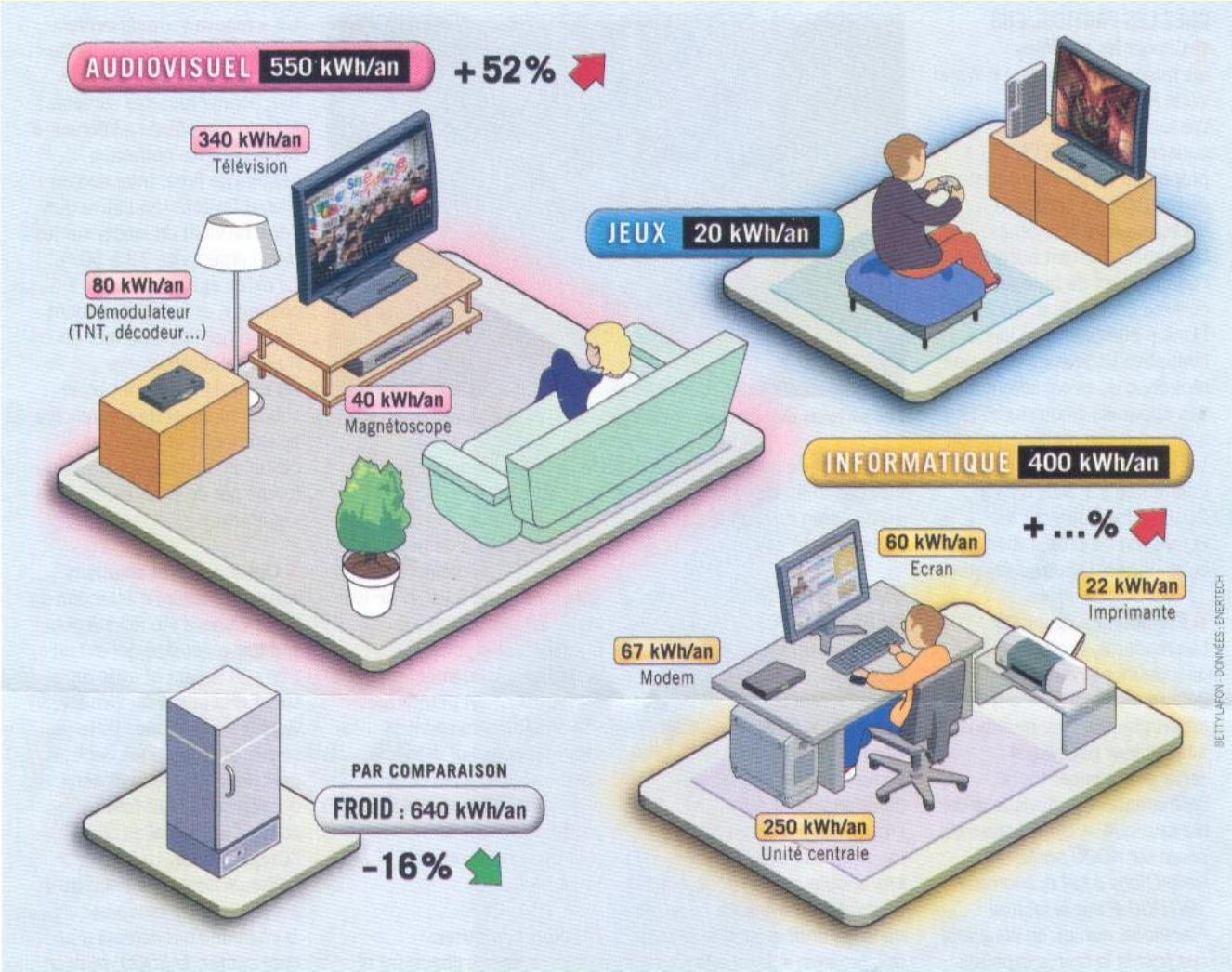
Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie



Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie



Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie

- * Des matériaux isolants pour l'habitat et une politique volontariste d'aménagement,
- * Une amélioration du rendement de tout moteur,
- * Un changement individuel d'habitudes de vie, sans contraintes réelles,
- * Une recherche poussée sur le stockage de l'énergie,
- * Des subventions utilisées de façon intelligente.

⇒ - 1,5 Gtep dans l'hypothèse la plus optimiste

7 Gtep

20,9 Gtep

31,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie

- * Des matériaux isolants pour l'habitat et une politique volontariste d'aménagement,
- * Une amélioration du rendement de tout moteur,
- * Un changement individuel d'habitudes de vie, sans contraintes réelles,
- * Une recherche poussée sur le stockage de l'énergie,
- * Des subventions utilisées de façon intelligente.

⇒ - 1,5 Gtep dans l'hypothèse la plus optimiste

5,5 Gtep

19,4 Gtep

30,2 Gtep

Bilan énergétique 2050

- * On utilise toutes les sources d'énergie et on peut supposer que le maximum a été fait pour économiser l'énergie
- * On n'aura malheureusement tenu ni les promesses de développement durable ni celles du protocole de Kyoto
- * On n'a même pas lésiné sur le coût du Mtep

Il manque toutefois

5,5 Gtep

19,4 Gtep

30,2 Gtep

Bilan énergétique 2050

5,5 Gtep

19,4 Gtep

30,2 Gtep

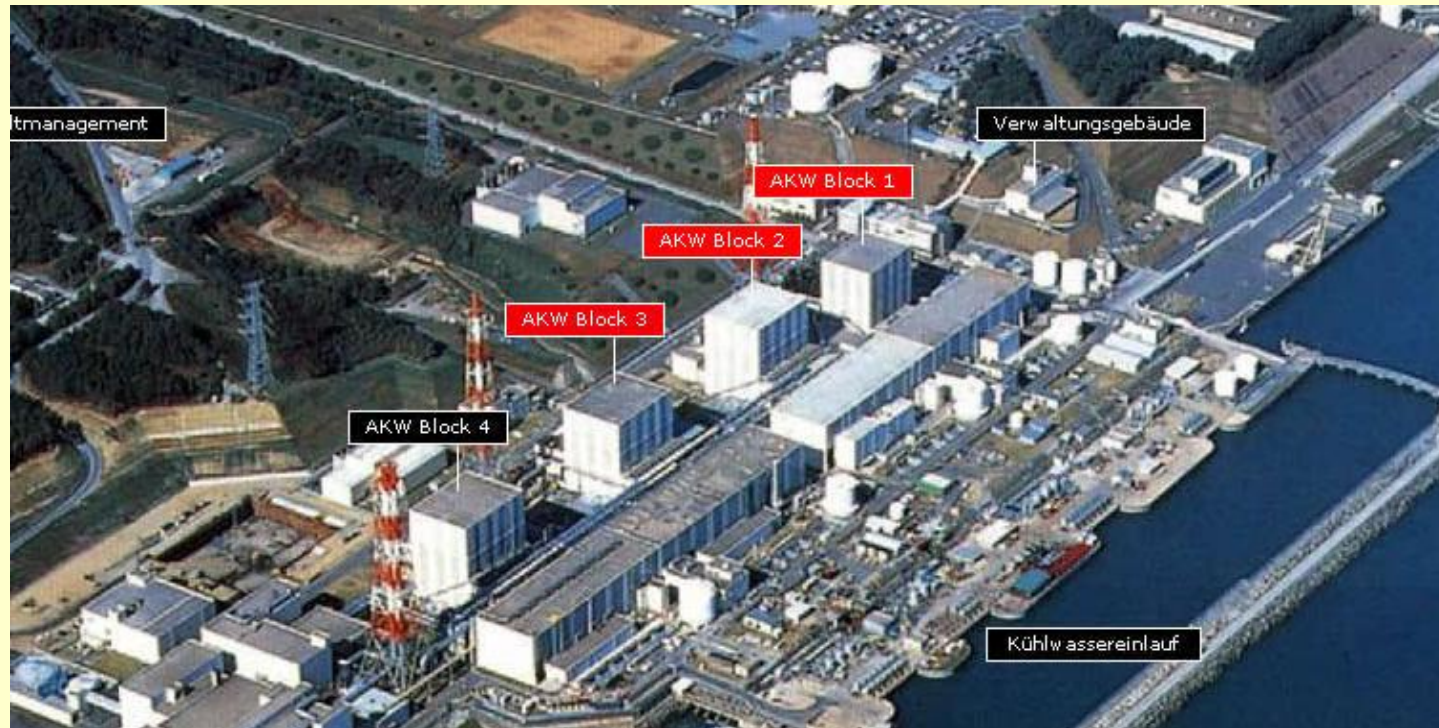
1 Gtep : 1600 réacteurs nucléaires de 1000 MWe

Sans oublier les réacteurs pour le dessalement de l'eau de mer

Bilan énergétique 2050

Le nucléaire vient de subir un séisme, la planète est contrainte de lui éviter un tsunami

Il faut s'y préparer et tirer les leçons des accidents du Japon




Bilan énergétique 2050




Pouvoir énergétique


1 gramme de carbone → 33 mille joules (combustion)

 × 2,5 millions

1 gramme d'uranium-235 → 82 milliards de joules (fission)

 × 7

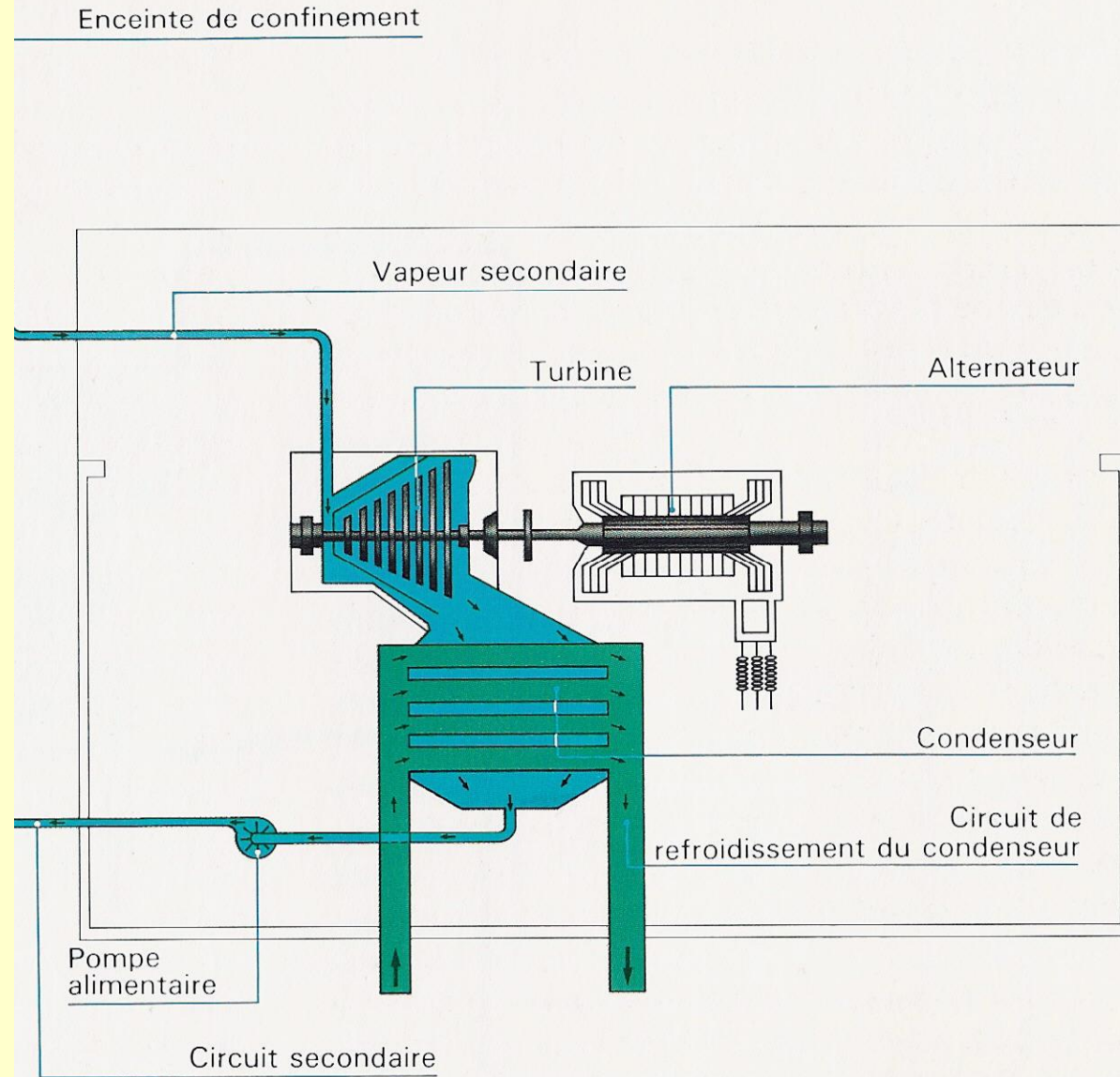
1 gramme de deutérium → 560 milliards de joules (fusion)

 × 160

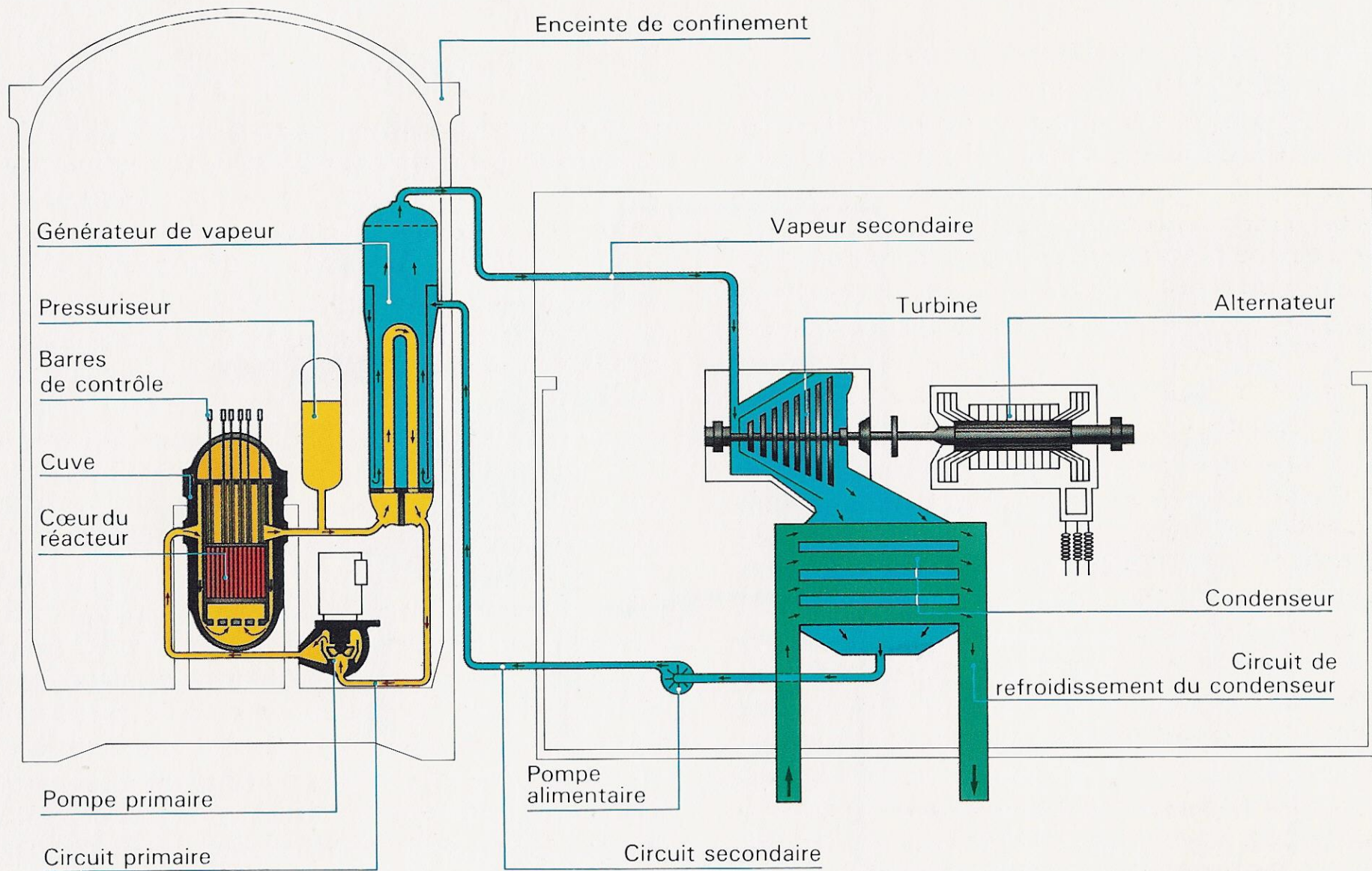
1 gramme de matière-antimatière → 90 000 milliards de joules
(annihilation)

Plus jamais, on ne fera un saut technologique aussi important que le jour où on est passé de la chimie classique au nucléaire !

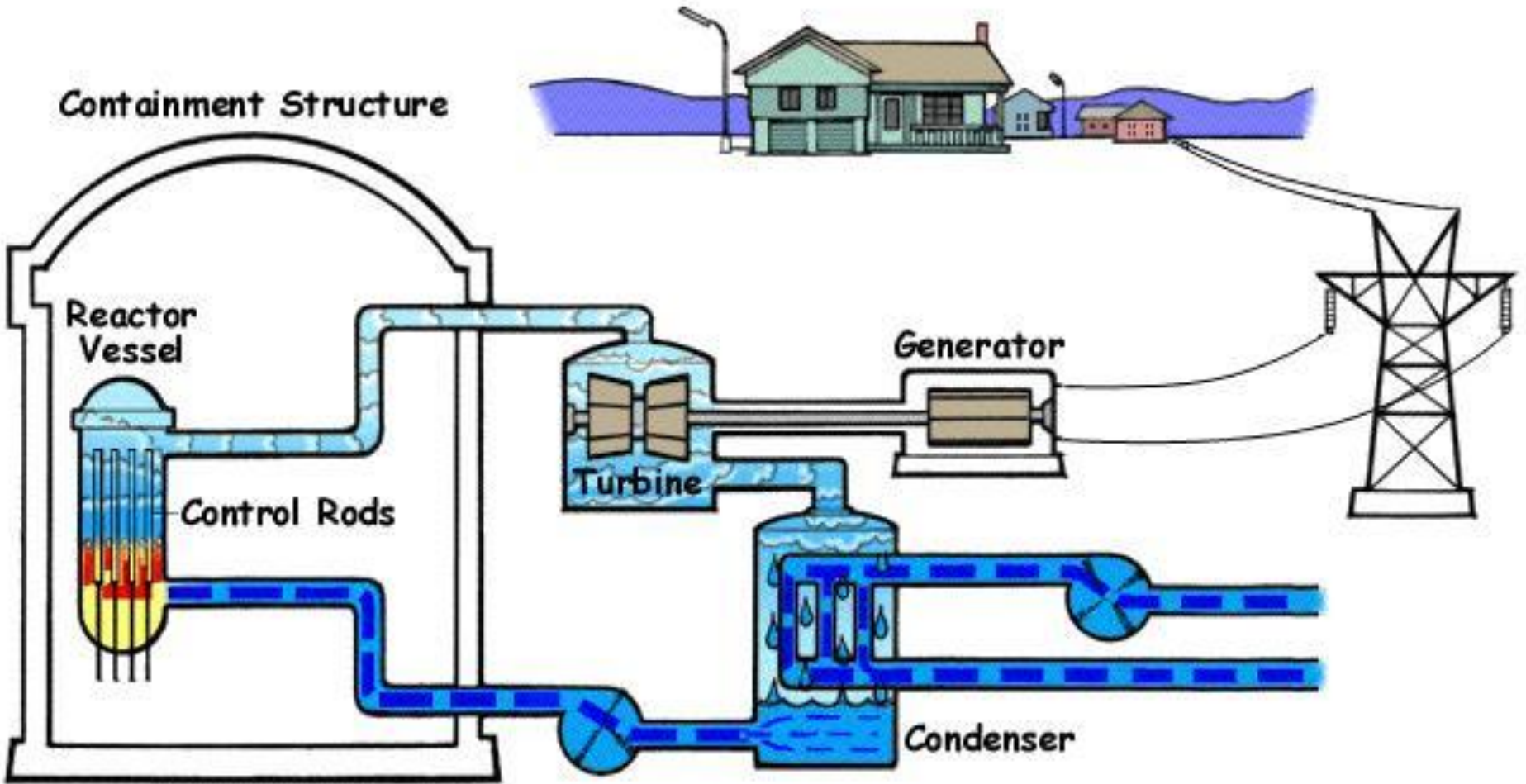
Centrale nucléaire à eau pressurisée (schéma de principe)



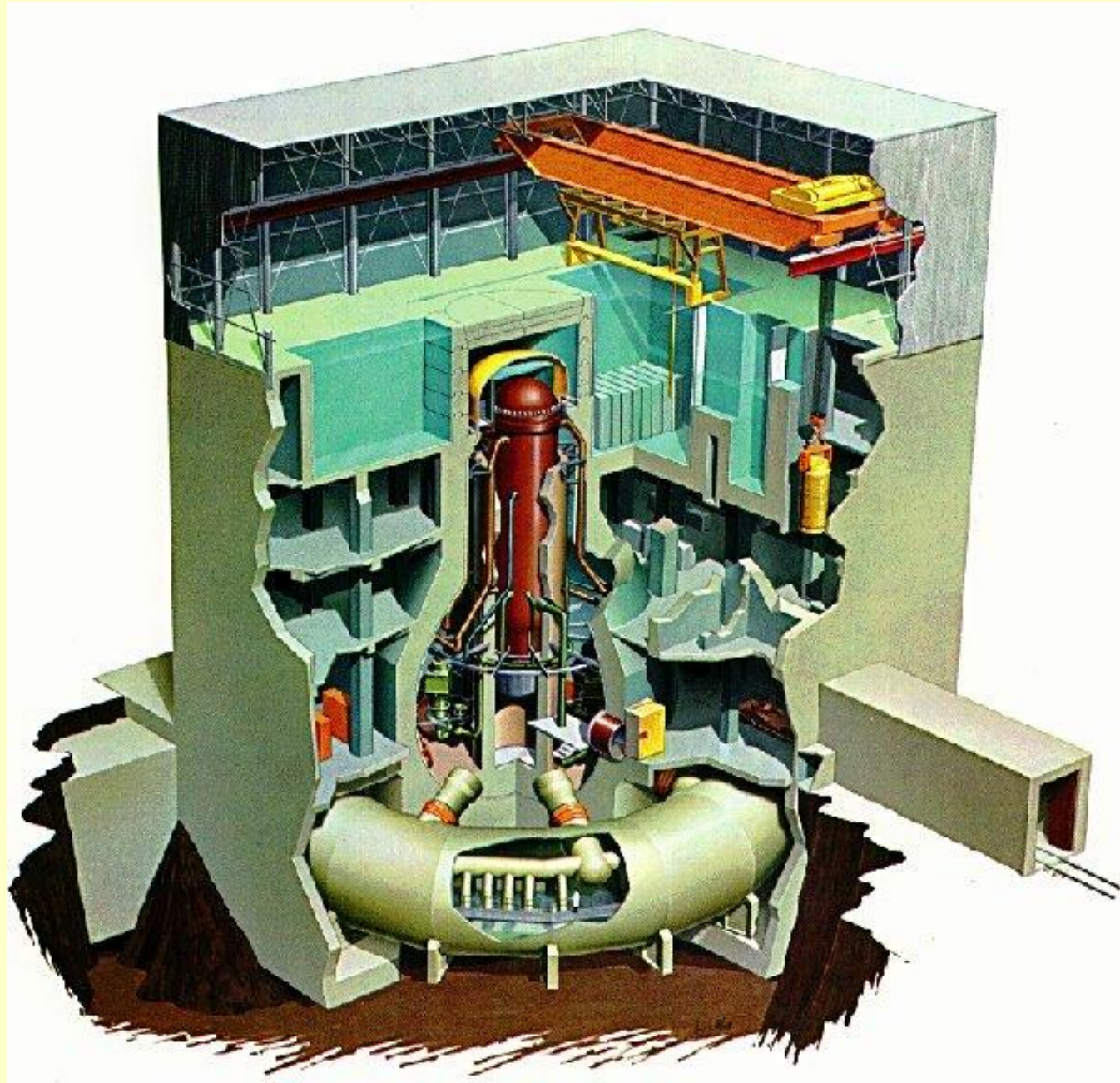
Centrale nucléaire à eau pressurisée (schéma de principe)



Le réacteur REB au Japon



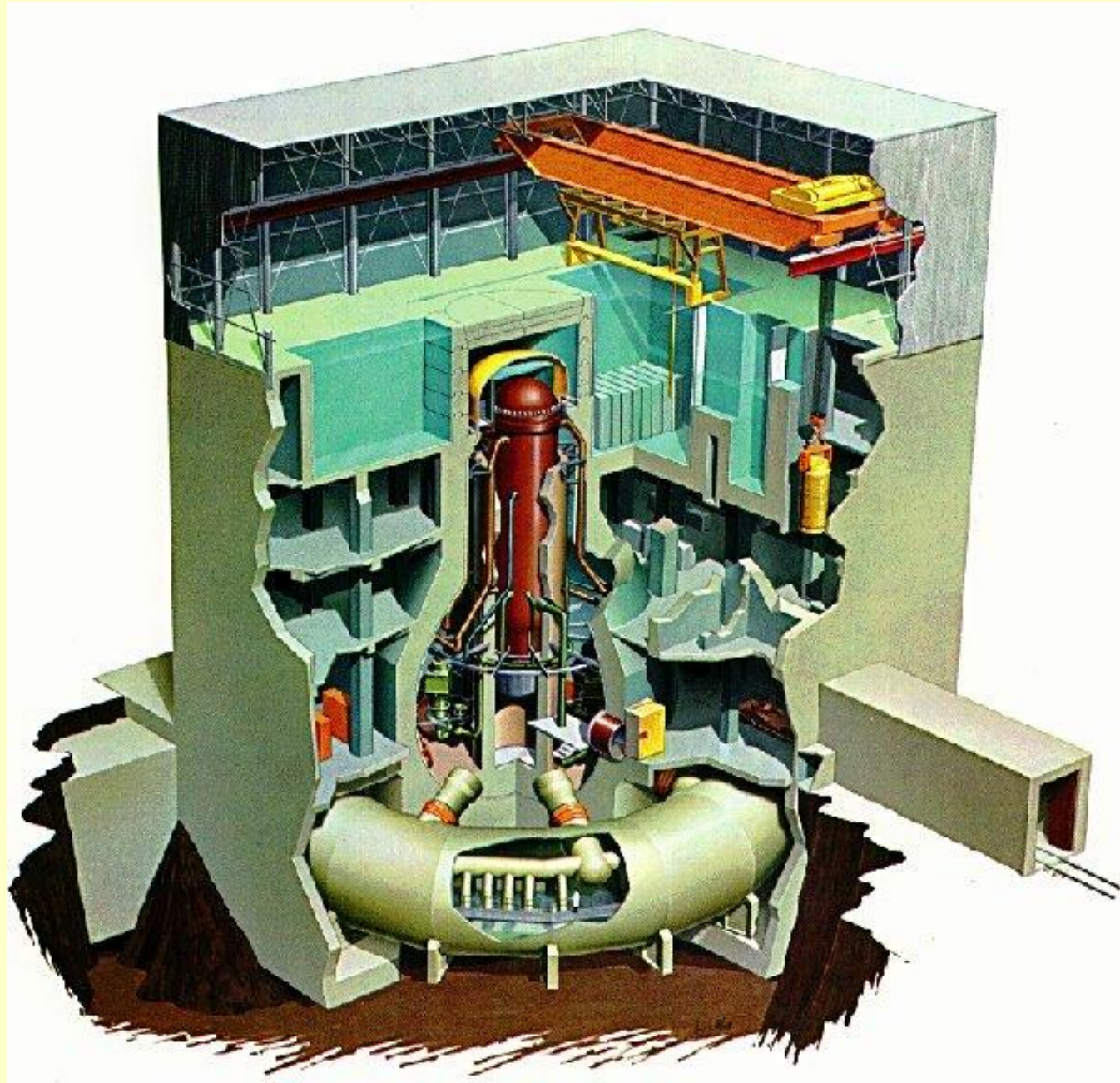
Le réacteur REB au Japon



Le réacteur REB au Japon



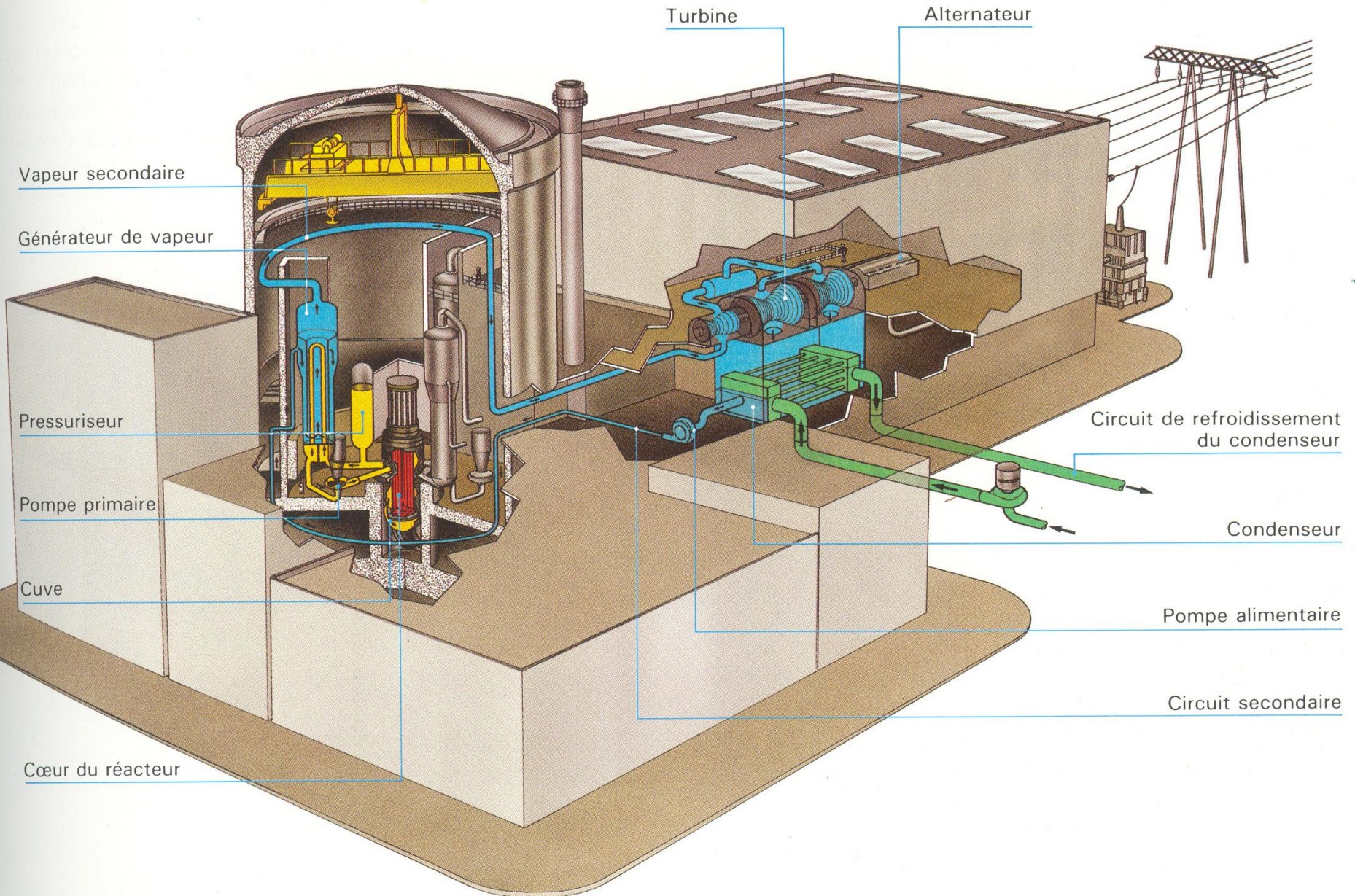
Le réacteur REB au Japon



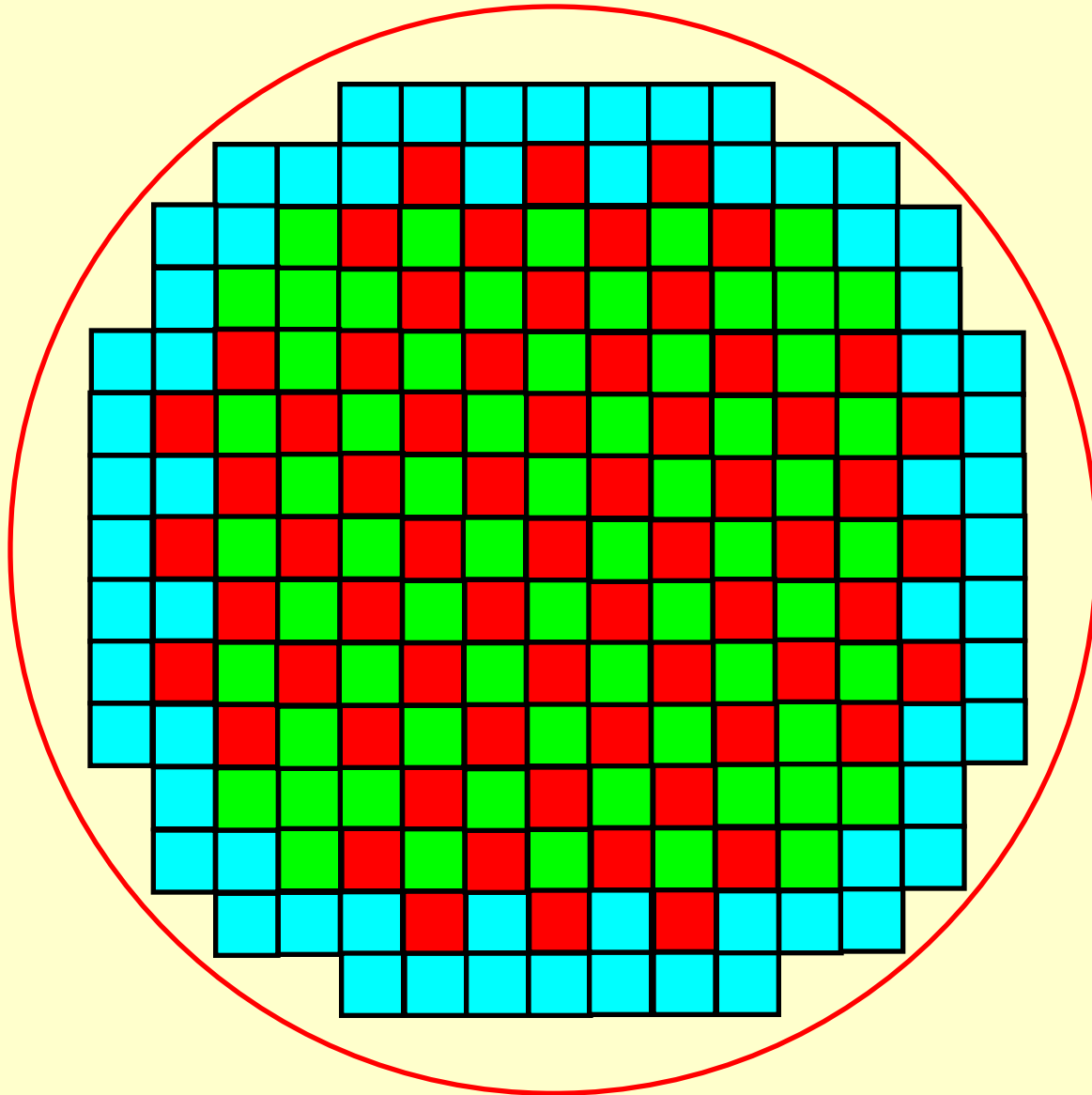
Le réacteur REB au Japon






Éclaté du réacteur REP



Le cœur

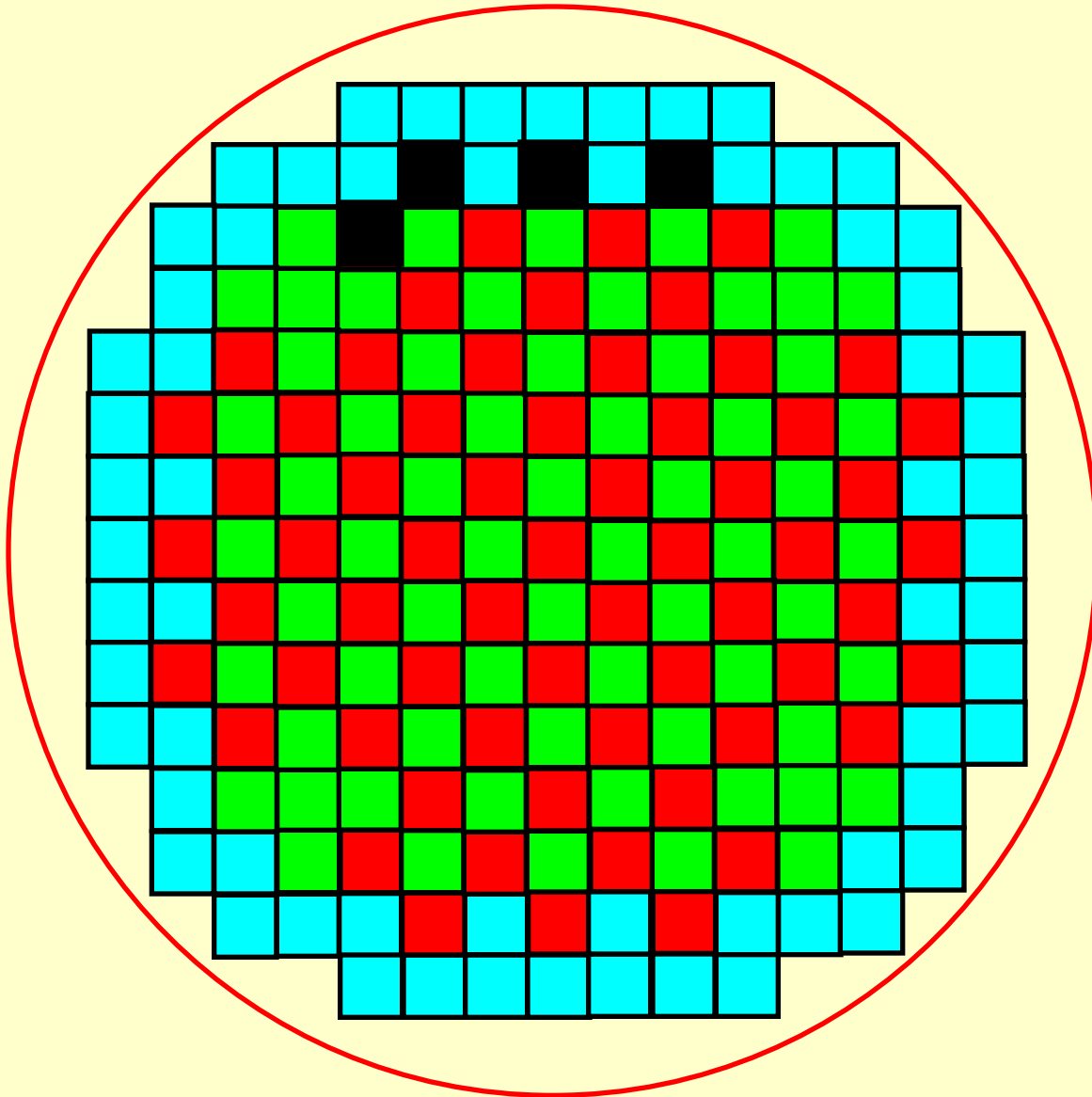
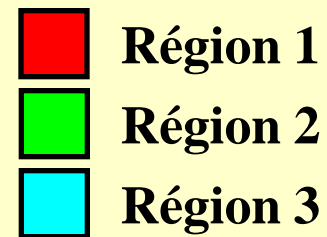


Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon

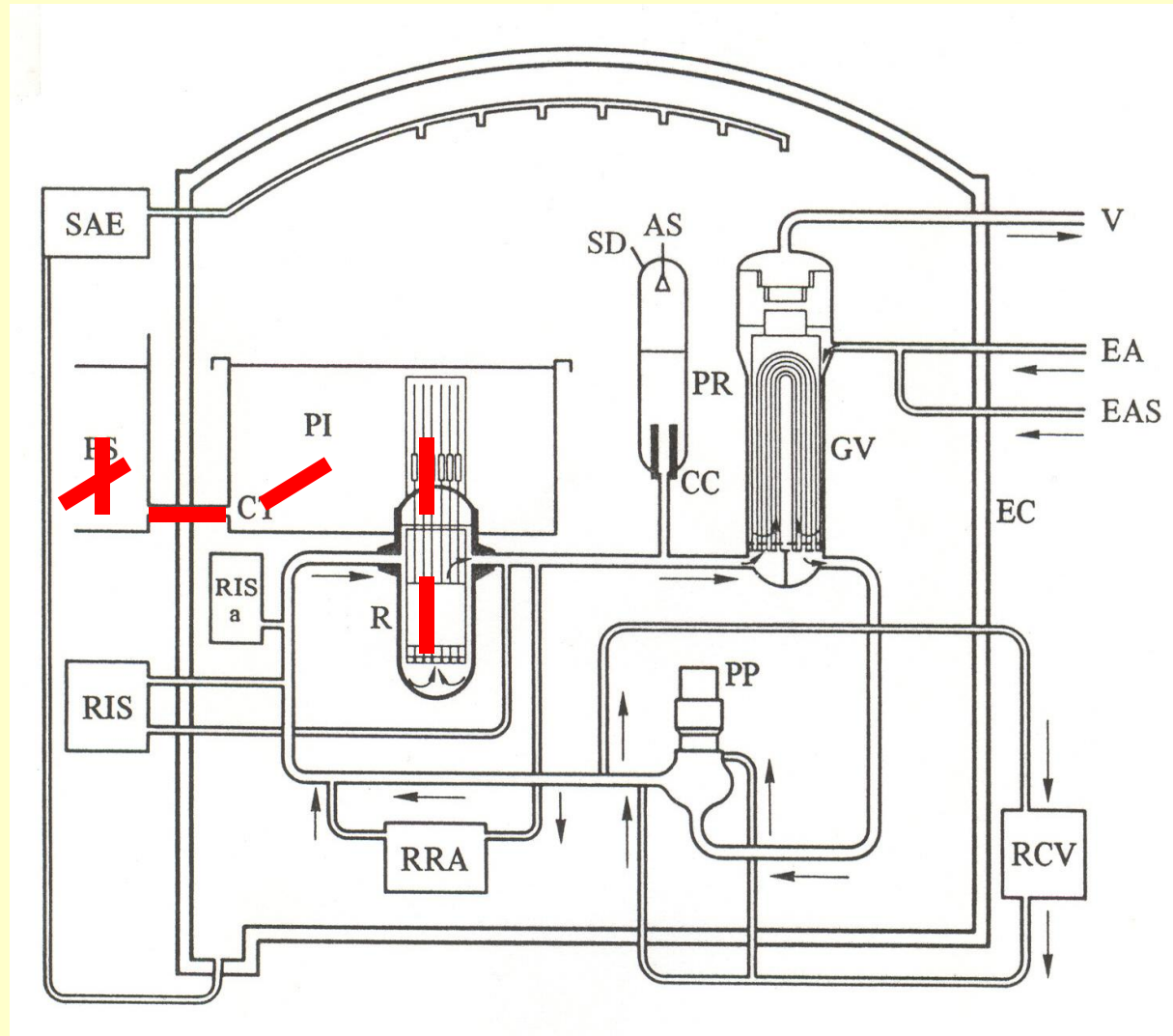
-  Région 1
-  Région 2
-  Région 3

Le cœur

Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon

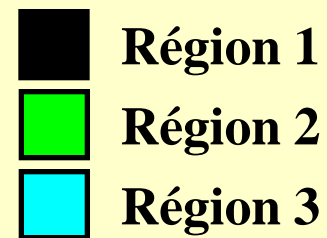


Bâtiment réacteur : schéma de principe



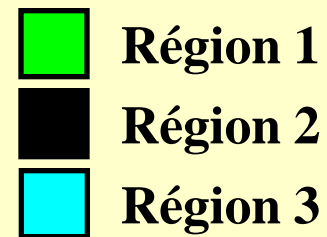
Le cœur

Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon

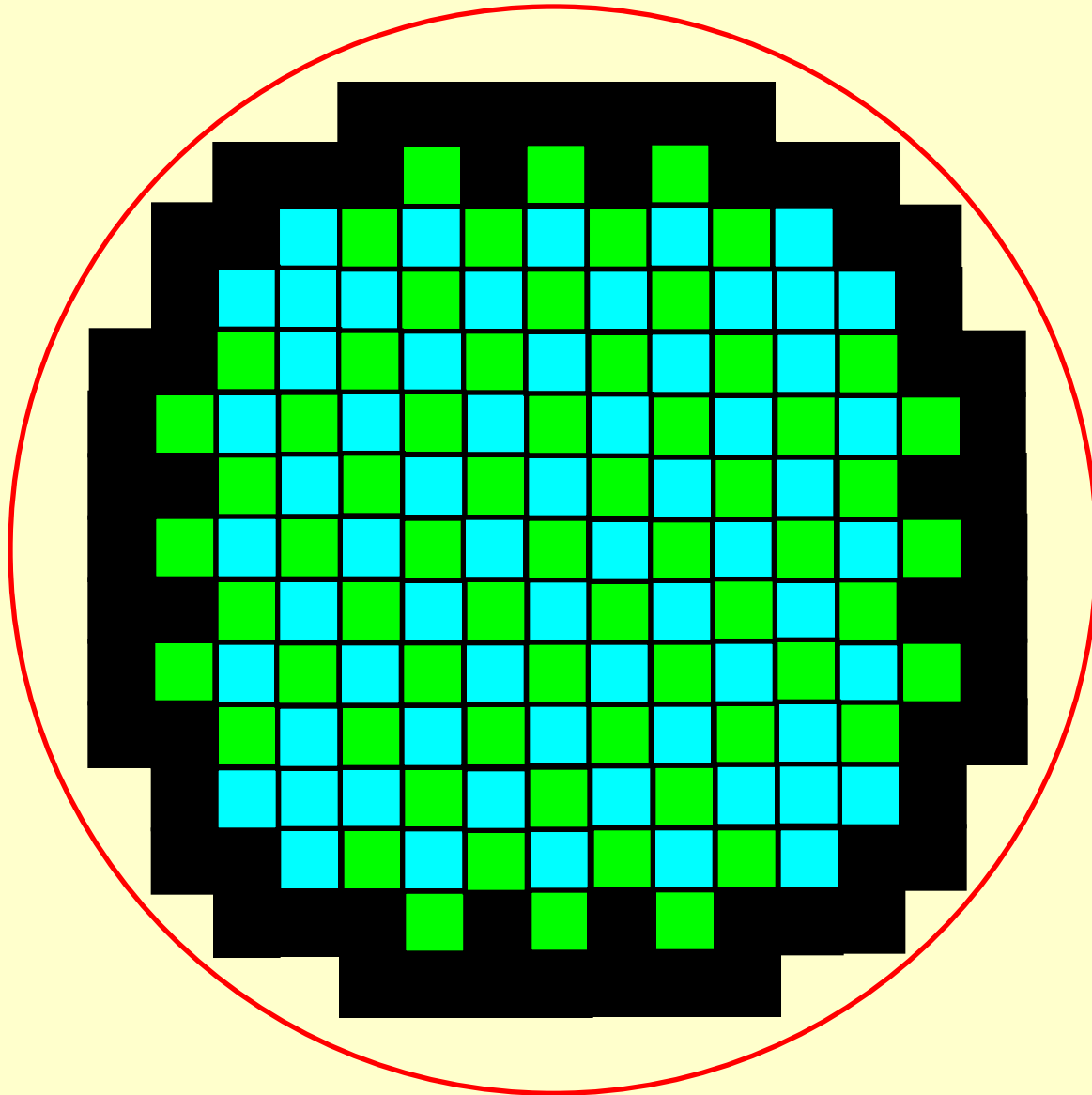


Le cœur




Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon



Le cœur



Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon

-  Région 1
-  Région 2
-  Région 3

Le cœur

Masse totale d'uranium :
100 tonnes dont le pouvoir
énergétique est équivalent à
8,5 millions de tonnes
de charbon




-  Région 1
-  Région 2
-  Région 3

Schéma de pilotage

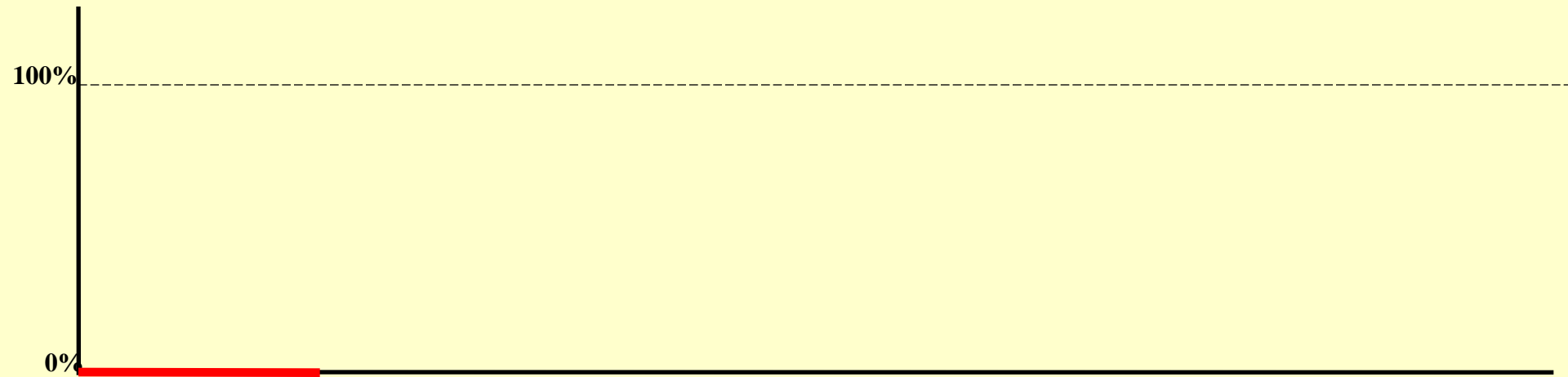
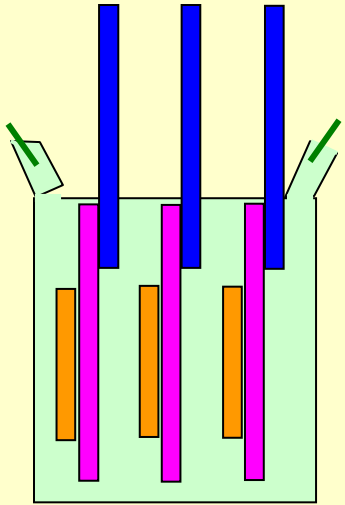


Schéma de pilotage

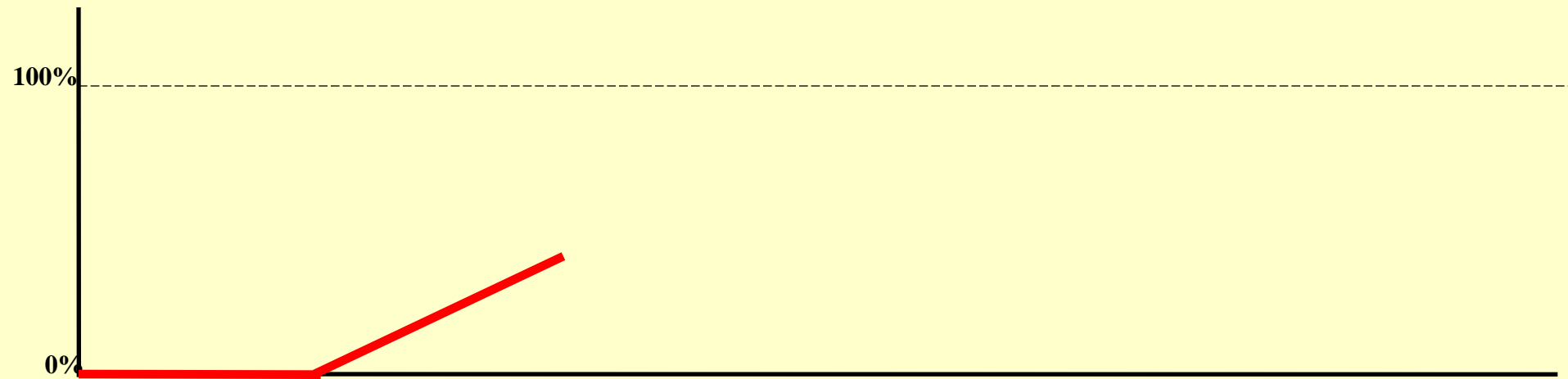
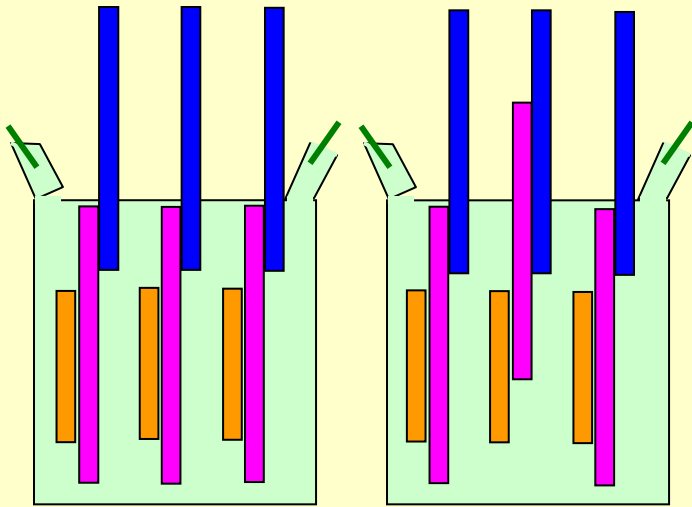


Schéma de pilotage

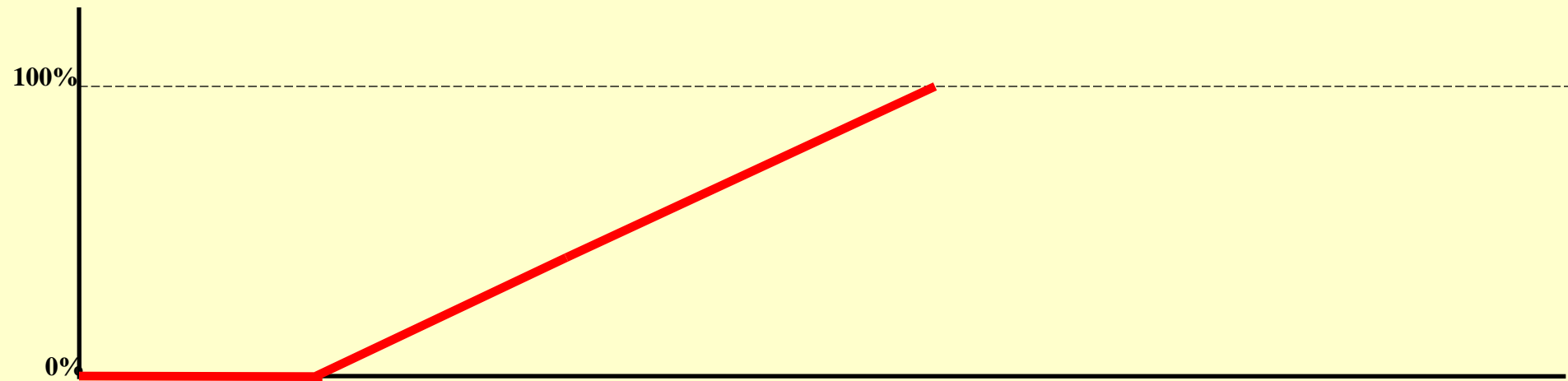
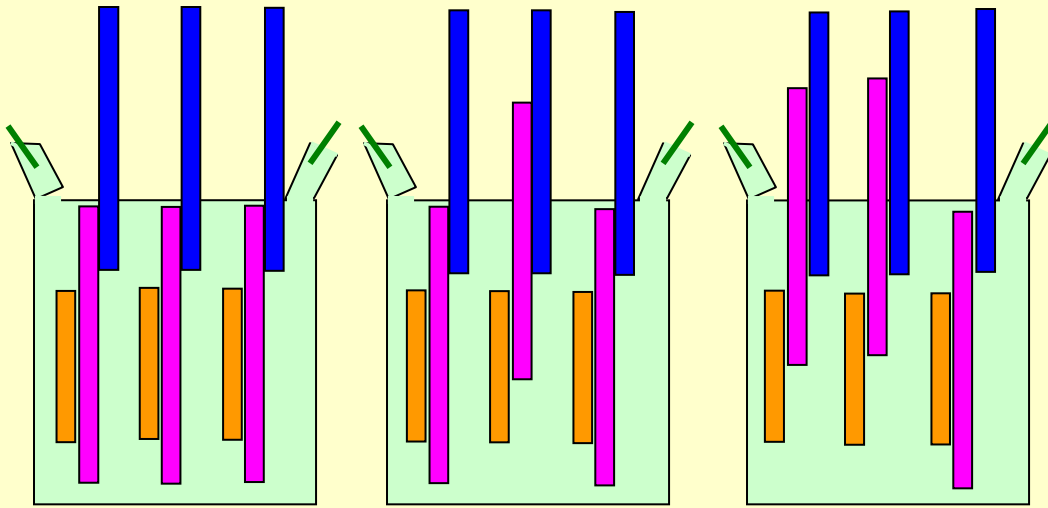


Schéma de pilotage

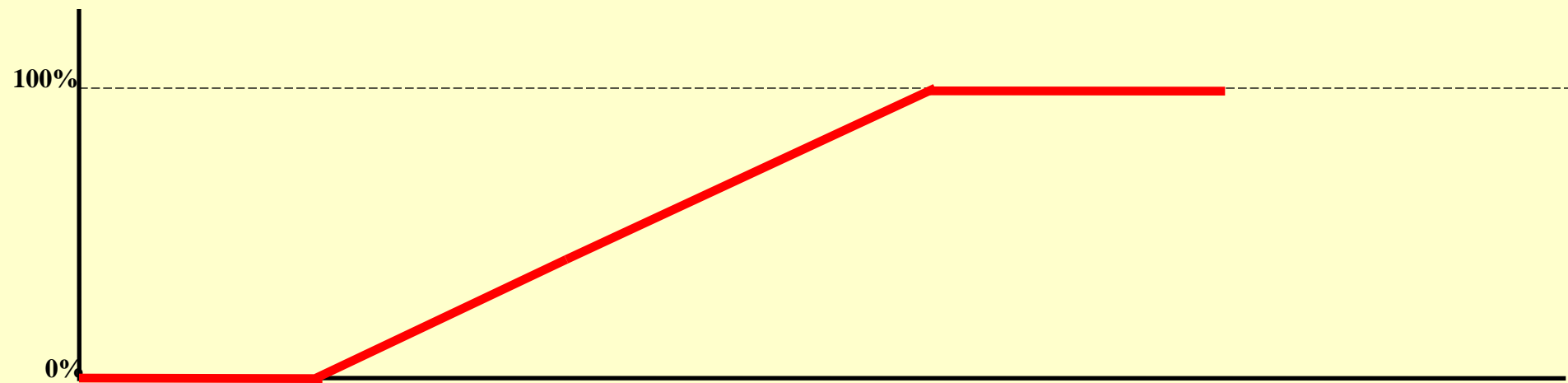
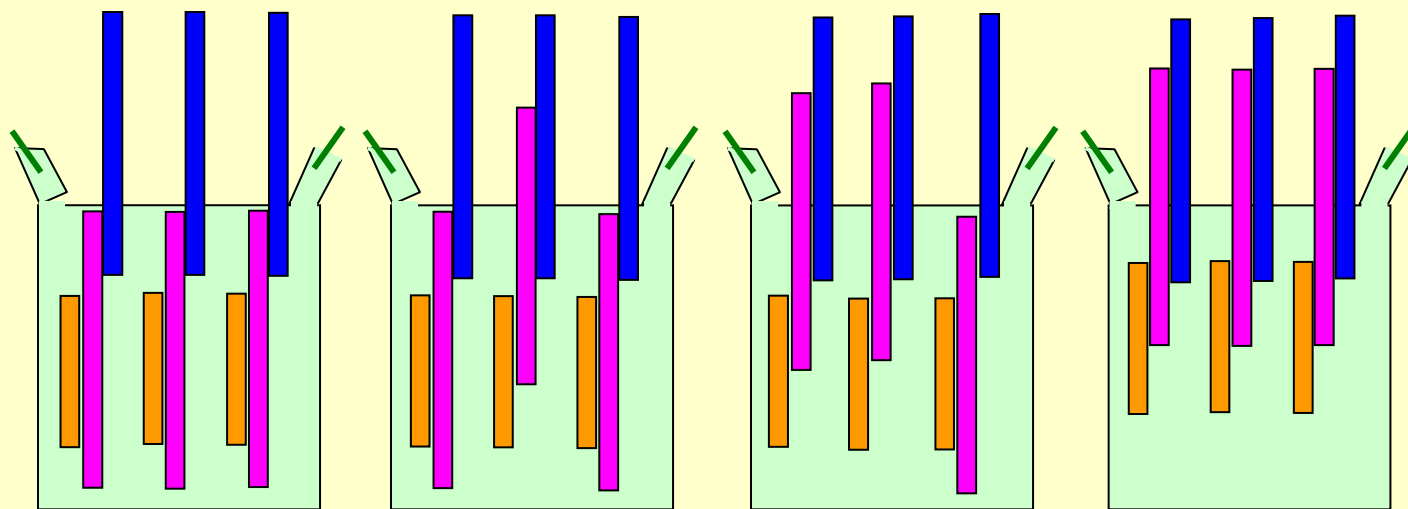


Schéma de pilotage

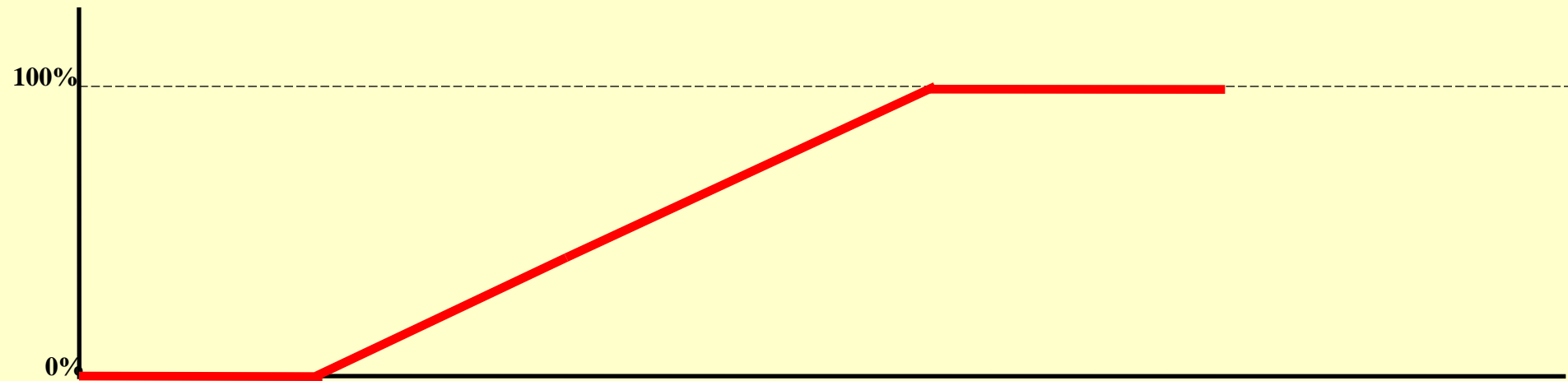
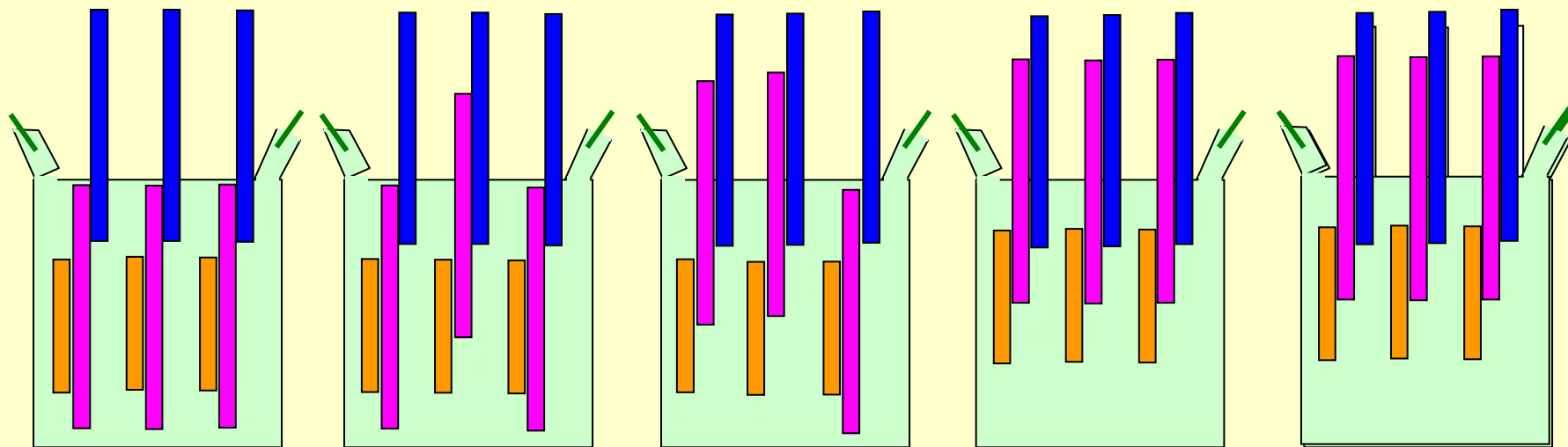


Schéma de pilotage

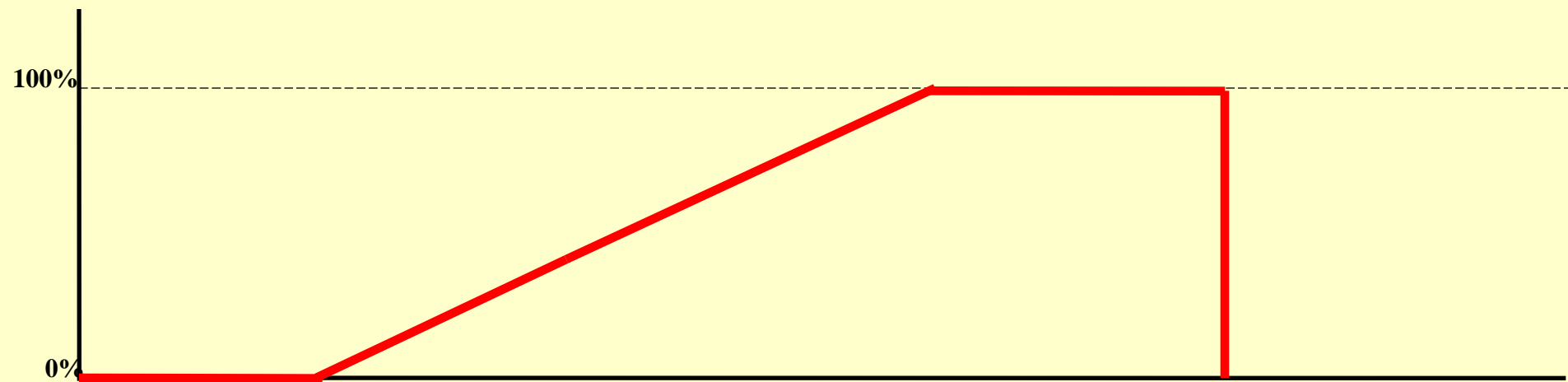
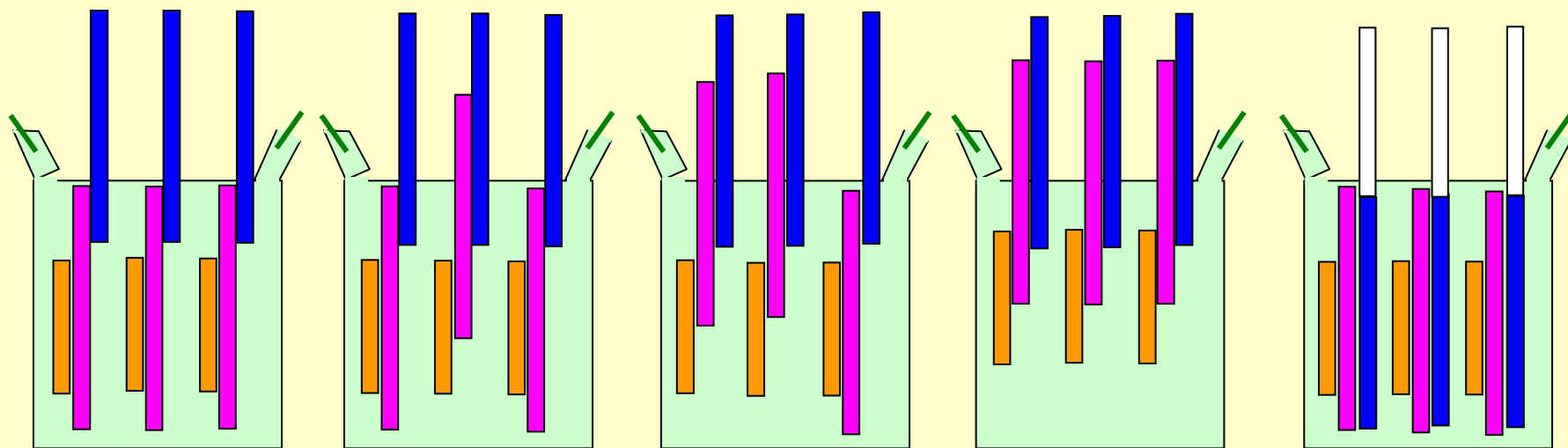


Schéma de pilotage

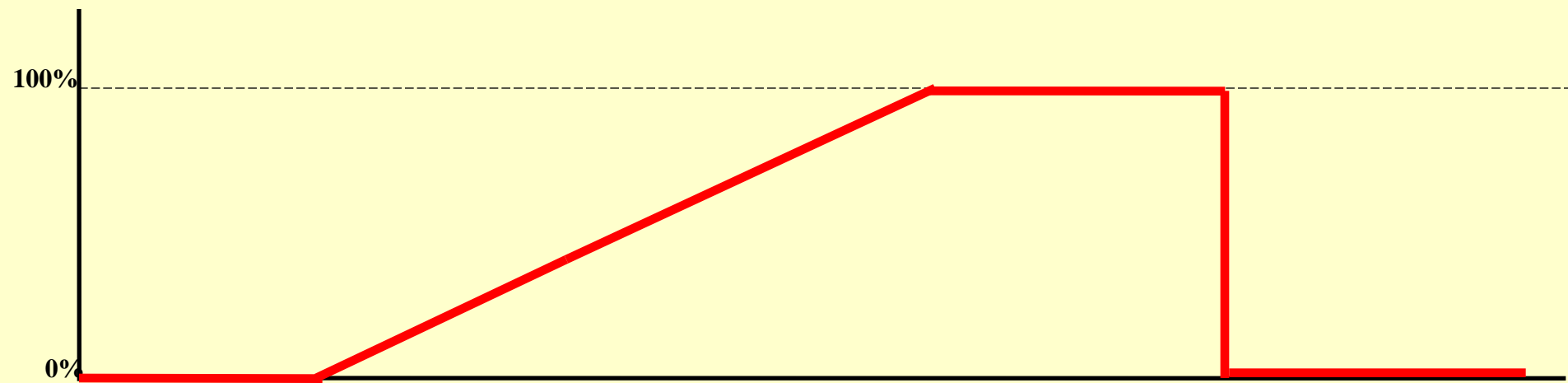
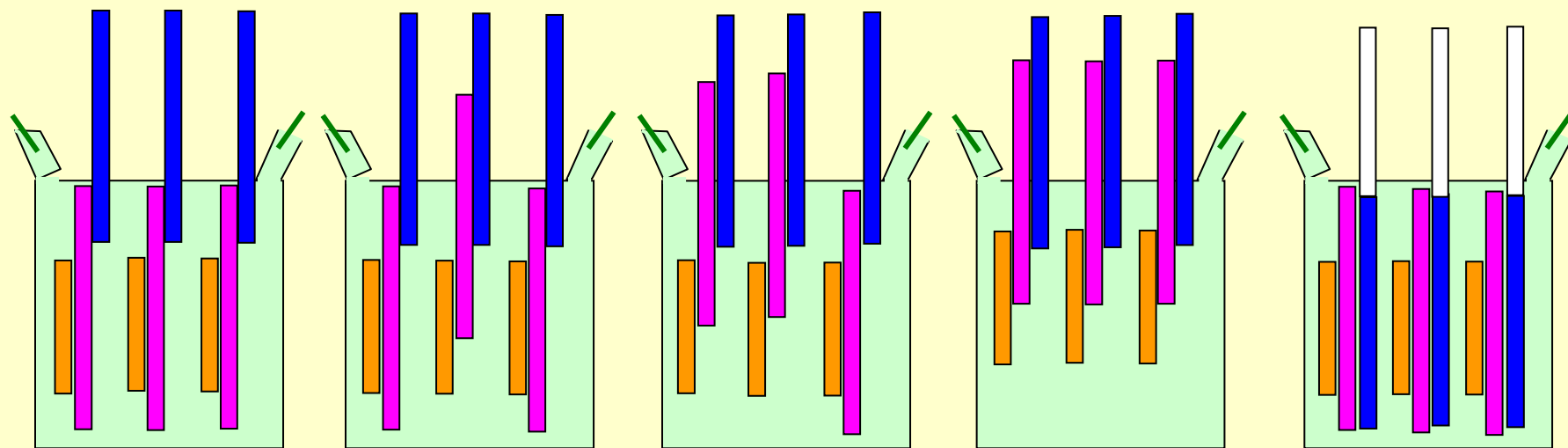
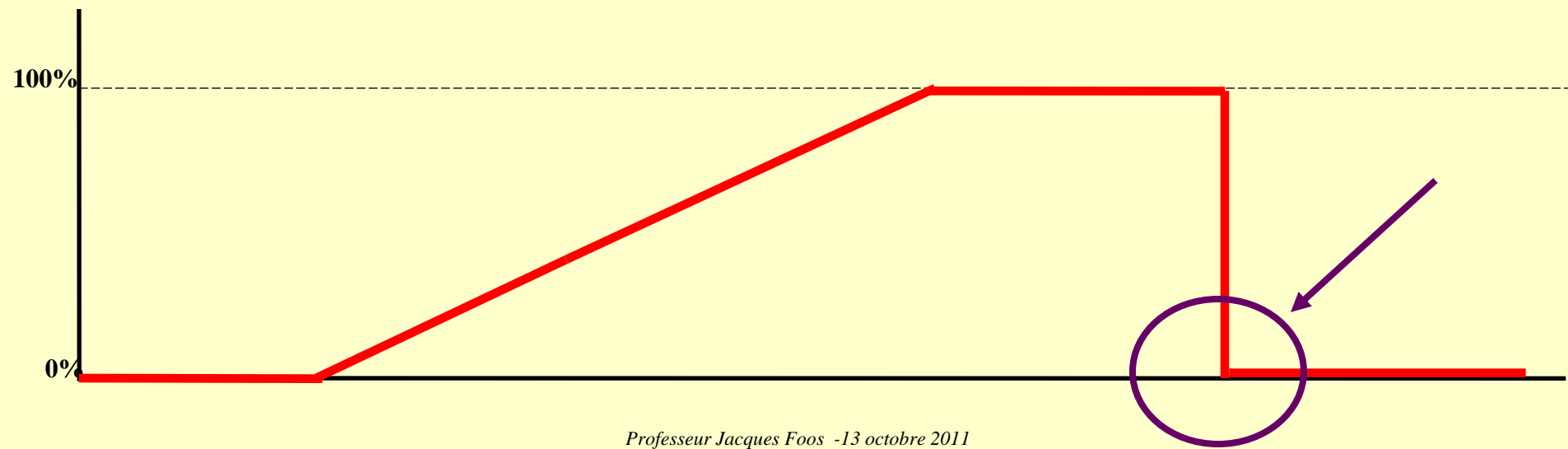
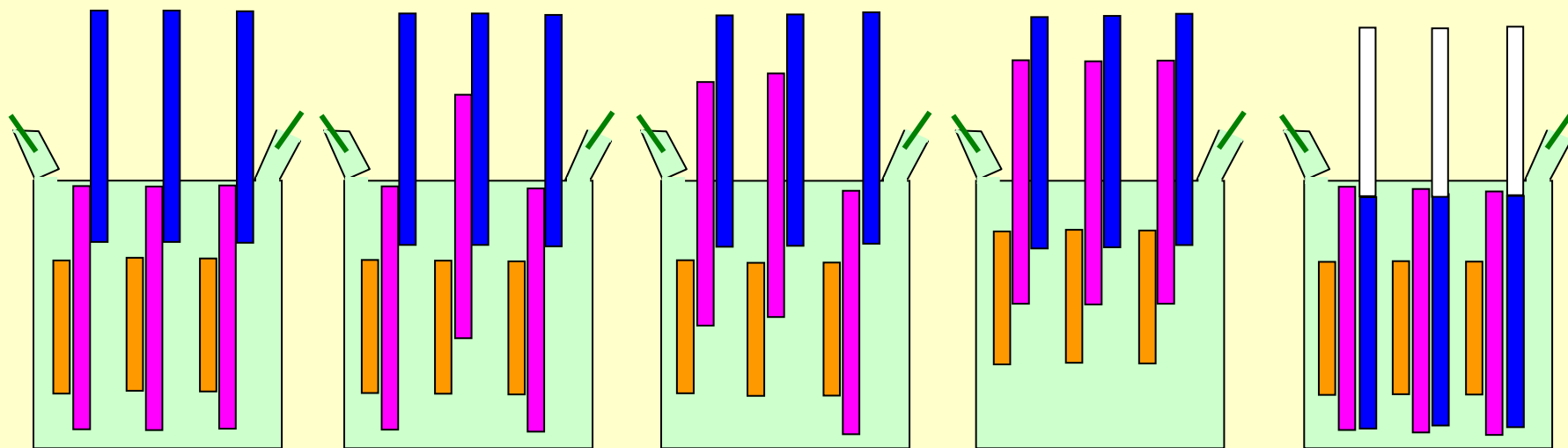


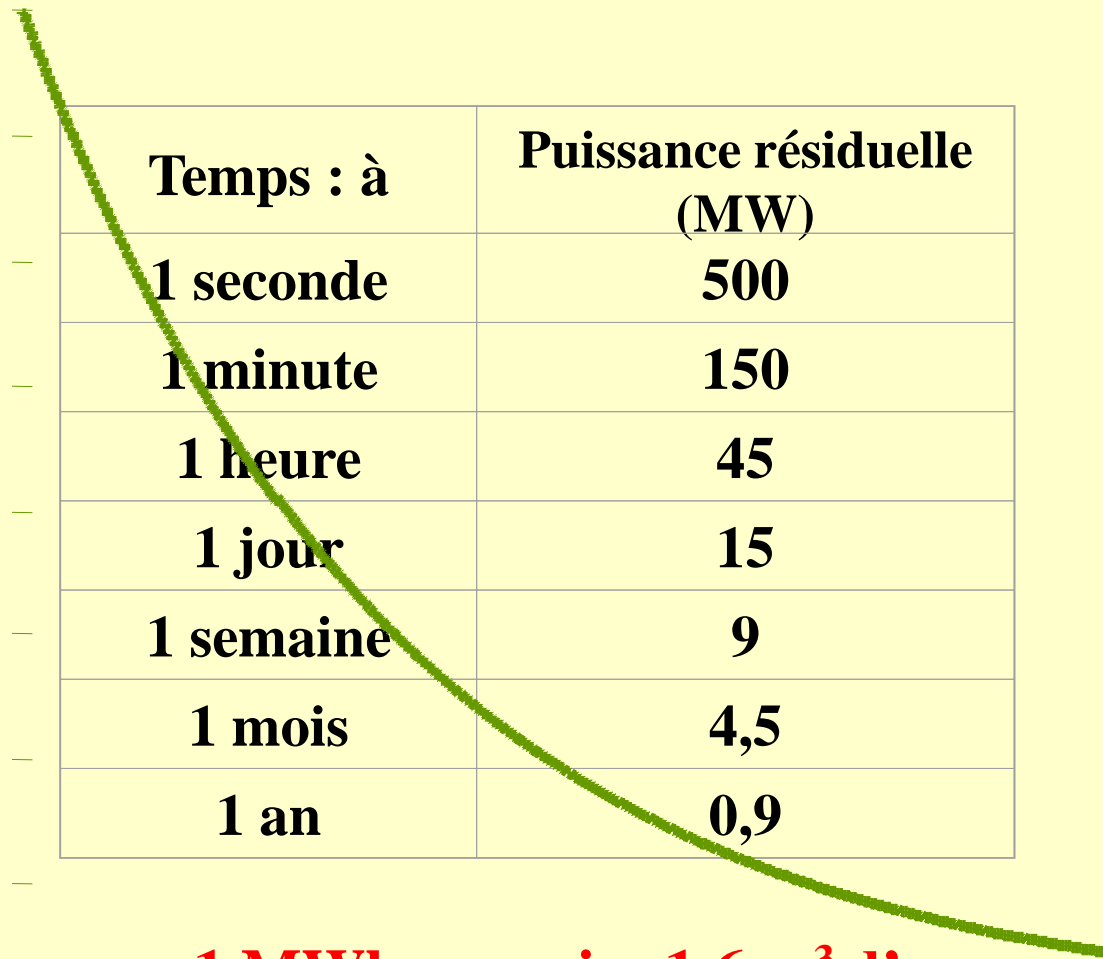
Schéma de pilotage



La puissance résiduelle après la tombée des barres (t)

- * **À t + 5 secondes** : les radioéléments artificiels émettent encore 5% de la puissance nominale du réacteur (refroidissement par les générateurs de vapeur).
- * **À t + 2,5 heures** : l'émission de chaleur est encore égale à 1% de la puissance nominale. A partir de là, elle est évacuée par le RRA (système de refroidissement du réacteur à l'arrêt).
- * **À t + 24 heures** : l'émission de chaleur est encore égale à 0,5% de la puissance nominale. A partir de là, elle est évacuée par le RRA (système de refroidissement du réacteur à l'arrêt).

La puissance résiduelle après la tombée des barres (t)



1 MWh vaporise 1,6 m³ d'eau

Peut-on se passer du nucléaire ?

Au niveau de la planète : IMPOSSIBLE

**Au niveau de la France : quelle consommation électrique
aujourd'hui ?**

Production française d'électricité

1955

50 milliards de kWh (TWh)

thermique classique

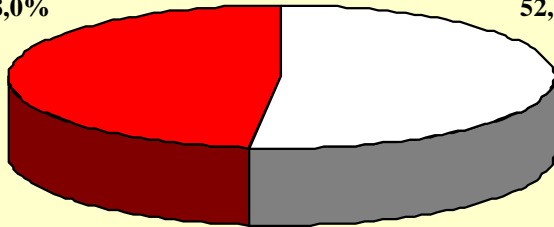
24 TWh

48,0%

hydraulique

26 TWh

52,0%



1980

247 milliards de kWh (TWh)

hydraulique

70 TWh

28,3%

nucléaire

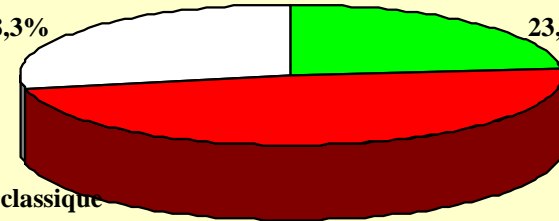
58 TWh

23,5%

thermique classique

119 TWh

48,2%



2005

547 milliards de kWh (TWh)

thermique classique

55 TWh

10,1%

hydraulique

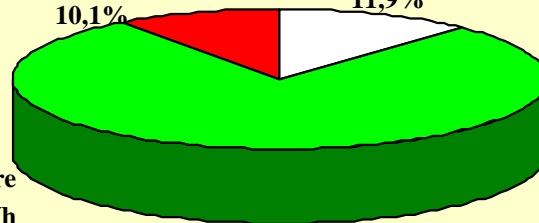
65 TWh

11,9%

nucléaire

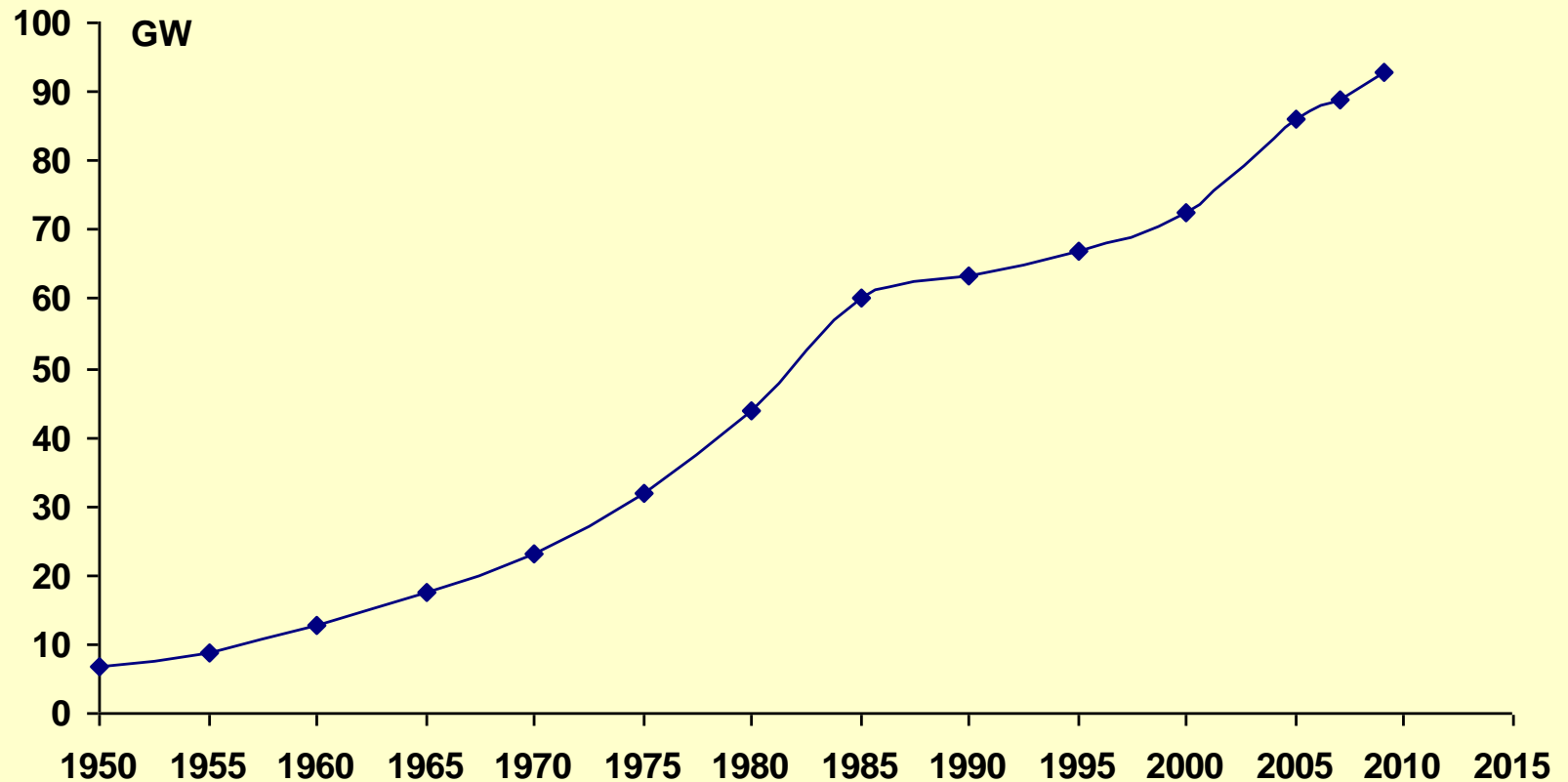
427 TWh

78,0%

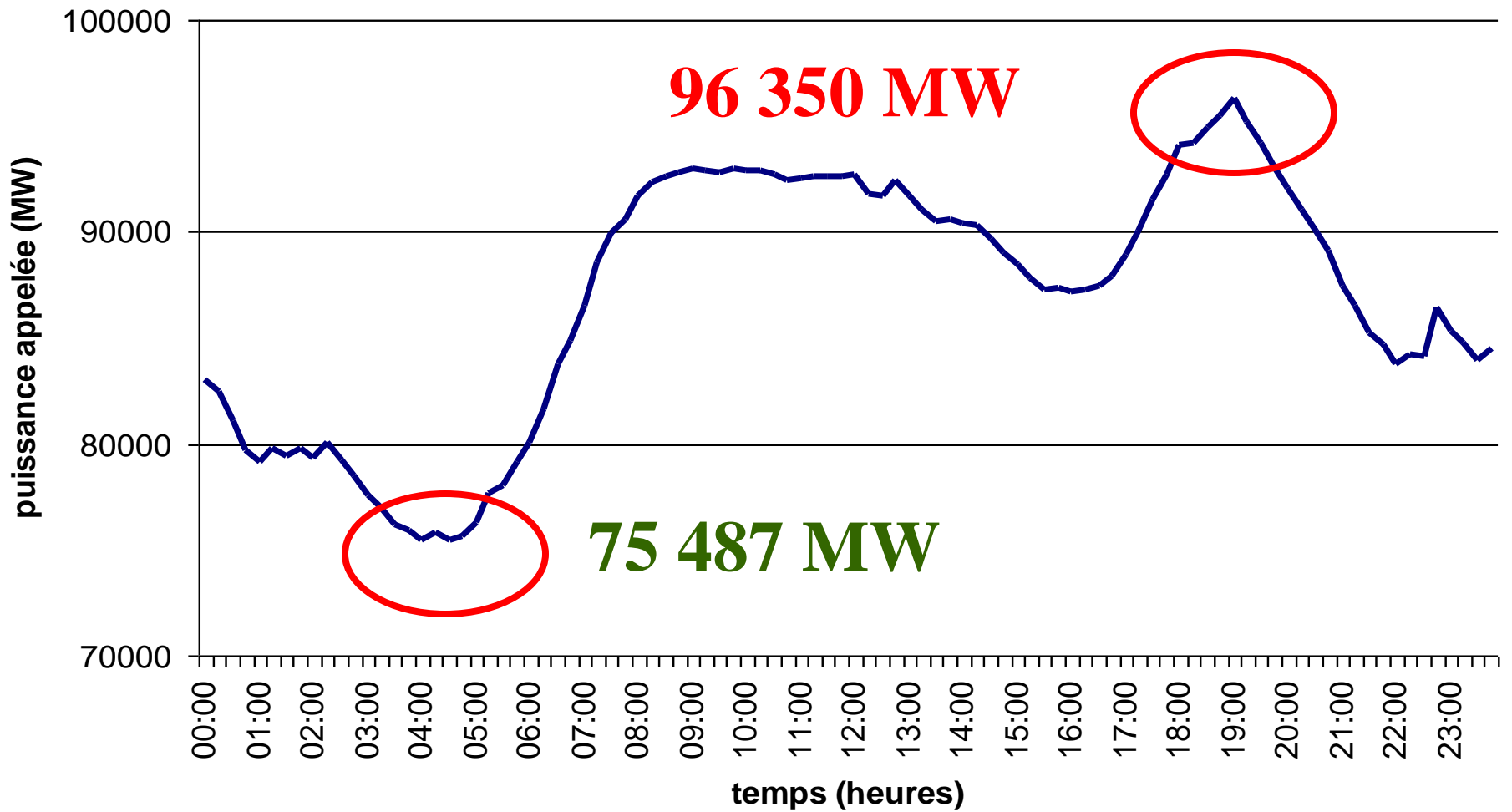


Puissance appelée sur le réseau français

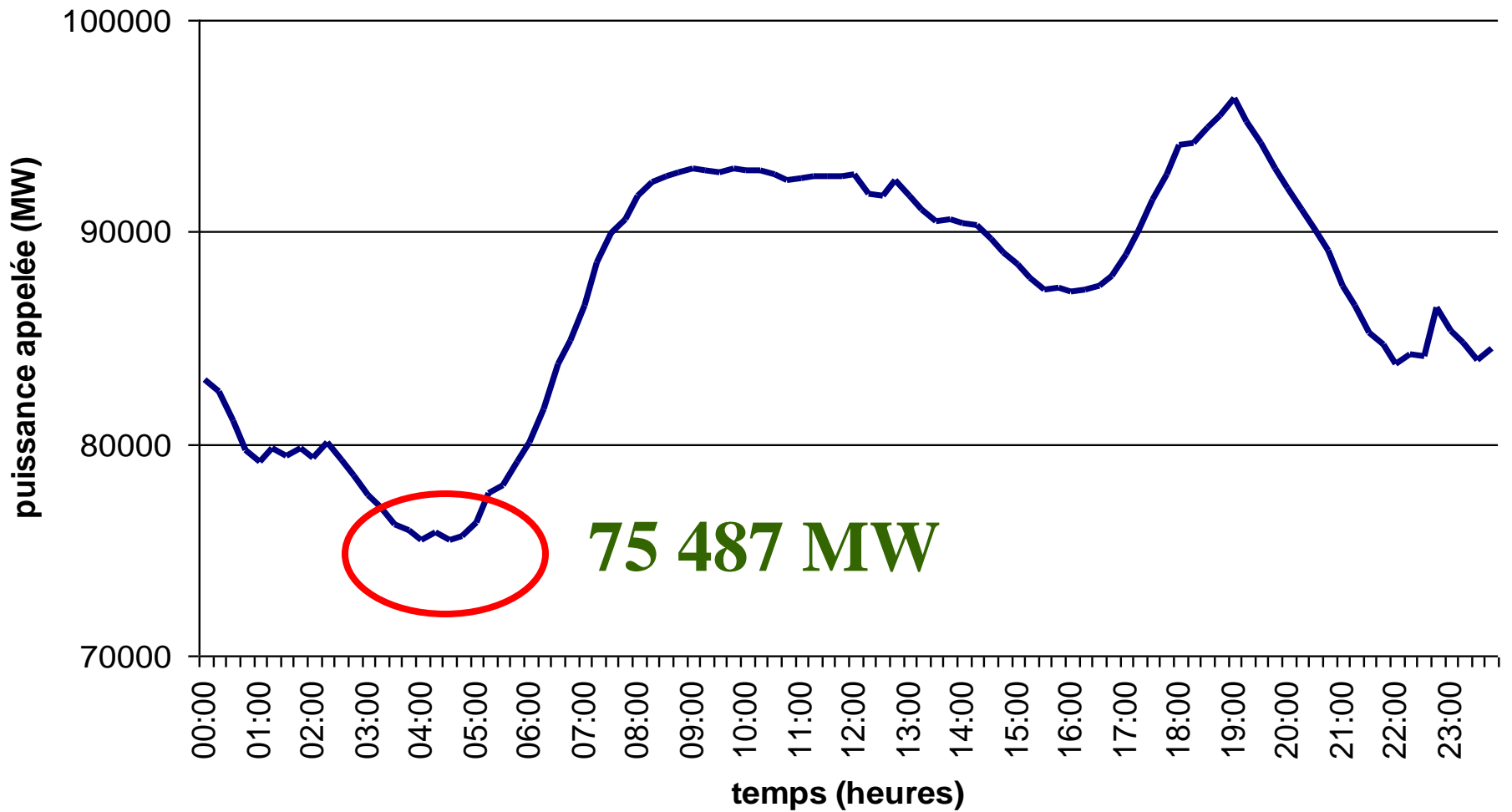
Puissance maximale appelée par le réseau
+ 4,5% par an en moyenne sur 60 ans



Puissance appelée sur le réseau français le 15 décembre 2010 (record jusqu'à ce jour)

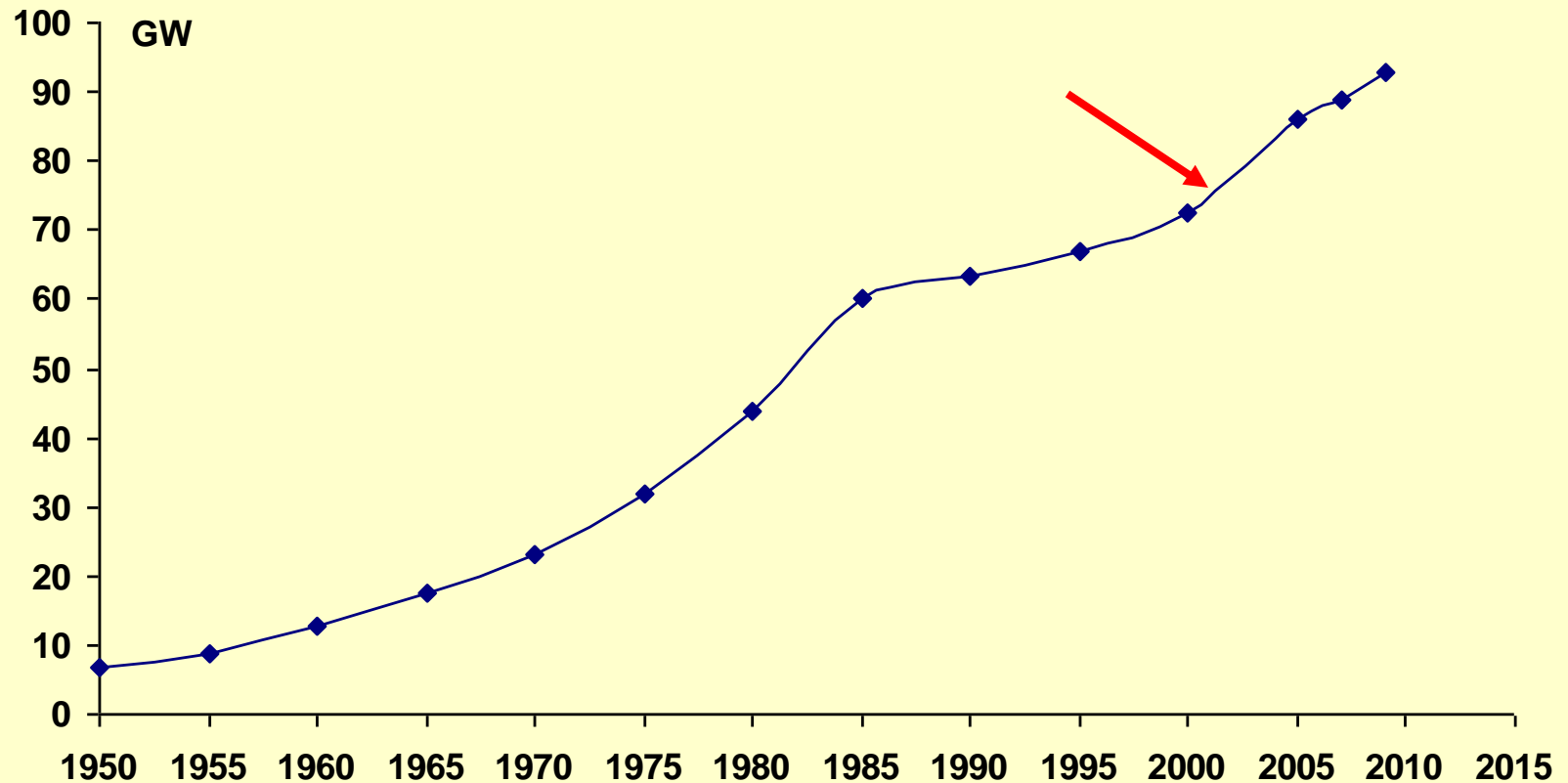


Puissance appelée sur le réseau français le 15 décembre 2010 (record jusqu'à ce jour)



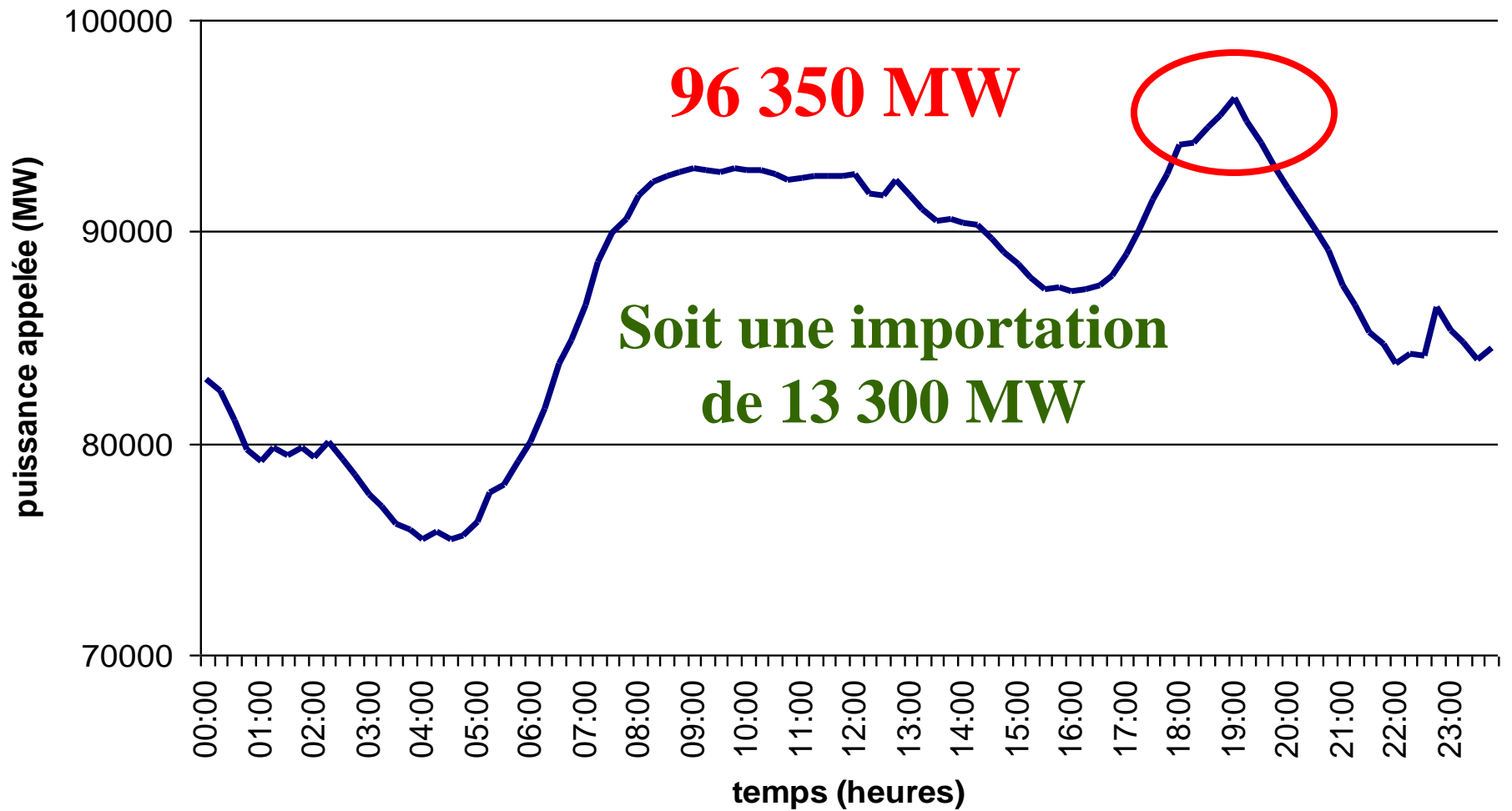
Puissance appelée sur le réseau français

**Puissance maximale appelée par le réseau
+ 4,5% par an en moyenne sur 60 ans**



A t'on trop de réacteurs nucléaires en France ?

(Puissance appelée sur le réseau français le 15 décembre 2010)



Chantier Flamanville



**État du chantier
fin 2010**

Conclusion

La planète ne s'affranchira pas du nucléaire. Il est donc indispensable de tirer les enseignements des accidents du Japon.

Ce n'est pas faire un « cocorico » que de dire que nos réacteurs sont parmi les plus sûrs et que notre Autorité de Sûreté Nucléaire est reconnue sur un plan international pour ses compétences et son indépendance mais ...

Il faut envisager les *scénarios de l'impensable* et s'en protéger, même si cela a un coût (une dépense d'1 milliard d'euros correspond à une augmentation du kWh, sur 10 ans, de 0,02 centime d'euro !)

« l'assurance n'est chère qu'avant l'accident »

Jacques FOOS & Yves DE SAINT JACOB

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?

Après Fukushima, les scénarios énergétiques de 2050

Fukushima ! Un nom que certains font sonner comme Hiroshima... après Tchernobyl. Faut-il « sortir du nucléaire » ? Et le peut-on ?

Cet ouvrage s'appuie sur une conviction profonde : pour répondre aux besoins de santé, d'éducation, de bien-être de la planète, et notamment de ses habitants les plus pauvres, il faut de l'énergie. Sans doute trois ou quatre fois plus qu'aujourd'hui à l'horizon 2050. Or même si l'on développe au maximum les énergies renouvelables, même si l'on relance un nucléaire plus sûr, même si l'on se serre la ceinture, cela ne suffira pas.

Alors, no future ? L'Apocalypse ? Non. Comme nous l'avons fait au ^{xx} siècle, nos enfants trouveront des solutions.

Peut-on sortir du nucléaire ? est fondé sur une double expérience : l'approche universitaire du Pr Jacques Foos, titulaire pendant 25 ans de la chaire de sciences nucléaires du Conservatoire National des Arts et Métiers, et l'approche médiatique d'Yves de Saint Jacob, ancien rédacteur en chef de l'Agence France-Presse.

Jacques Foos
Yves de Saint Jacob

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?

Jacques FOOS
YVES DE SAINT JACOB

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?

*Après Fukushima,
les scénarios
énergétiques de 2050*



ISBN 978 2 7056 8172 2



9 782705 681722

19 €



HERMANN



HERMANN

Jacques FOOS & Yves DE SAINT JACOB

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?

Après Fukushima, les scénarios énergétiques de 2050

Fukushima ! Un nom que certains font sonner comme Hiroshima... après Tchernobyl. Faut-il « sortir du nucléaire » ? Et le peut-on ?

Cet ouvrage s'appuie sur une conviction profonde : pour répondre aux besoins de santé, d'éducation, de bien-être de la planète, et notamment de ses habitants les plus pauvres, il faut de l'énergie. Sans doute trois ou quatre fois plus qu'aujourd'hui à l'horizon 2050. Or même si l'on développe au maximum les énergies renouvelables, même si l'on relance un nucléaire plus sûr, même si l'on se serre la ceinture, cela ne suffira pas.

Alors, no future ? L'Apocalypse ? Non. Comme nous l'avons fait au ^{xx}e siècle, nos enfants trouveront des solutions.

Peut-on sortir du nucléaire ? est fondé sur une double expérience : l'approche universitaire du Pr Jacques Foos, titulaire pendant 25 ans de la chaire de sciences nucléaires du Conservatoire National des Arts et Métiers, et l'approche médiatique d'Yves de Saint Jacob, ancien rédacteur en chef de l'Agence France-Press.

Jacques Foos
Yves de Saint Jacob

Jacques FOOS
Yves DE SAINT JACOB

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?

*Après Fukushima,
les scénarios
énergétiques de 2050*

PEUT-ON SORTIR DU NUCLÉAIRE ?



ISBN 978 2 7058 8172 2



19 €



Merci pour votre attention !

Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

FLAMANVILLE - Septembre 2011



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

FLAMANVILLE - Septembre 2011

**Tour de
manutention**
**Les gros composants
(cuve, générateurs de
vapeur, ...) seront
introduits au sein du
bâtiment réacteur par
cette tour.**



FLAMANVILLE - Septembre 2011

Bâtiment réacteur
Bétonnage du plancher de
service situé au niveau
+19.5 mètres



FLAMANVILLE - Septembre 2011



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

FLAMANVILLE - Septembre 2011



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

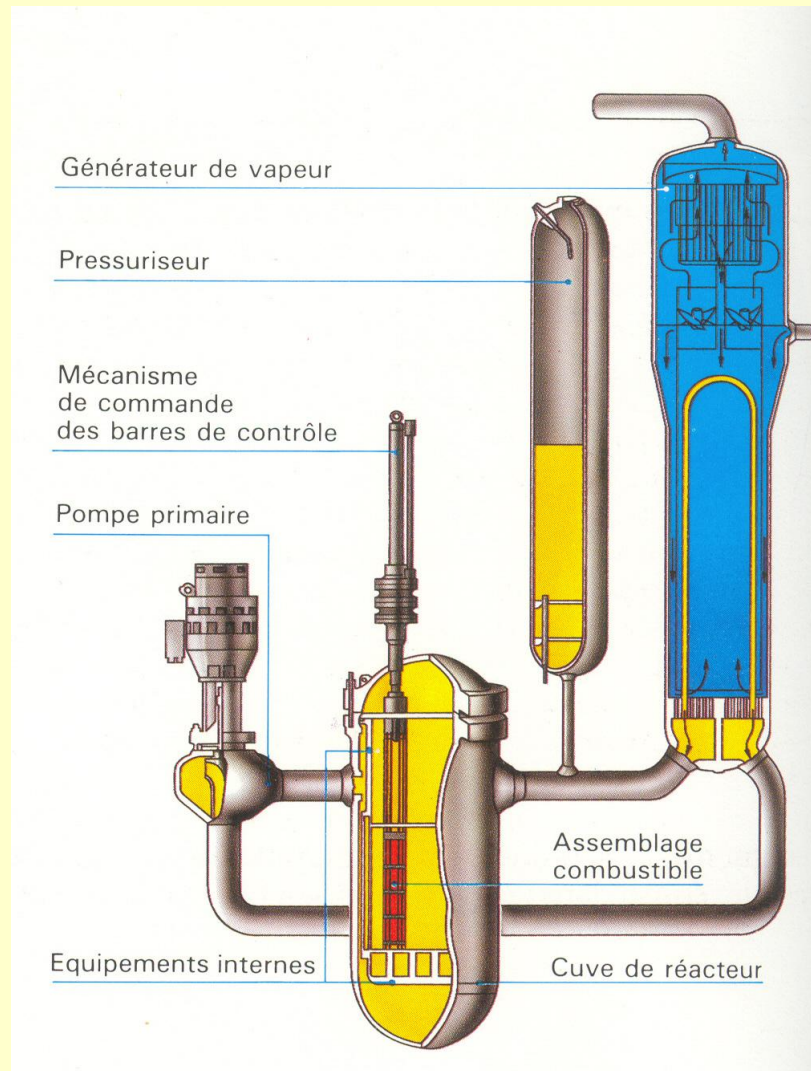
FLAMANVILLE - Septembre 2011



Finition du pôle opérationnel d'exploitation

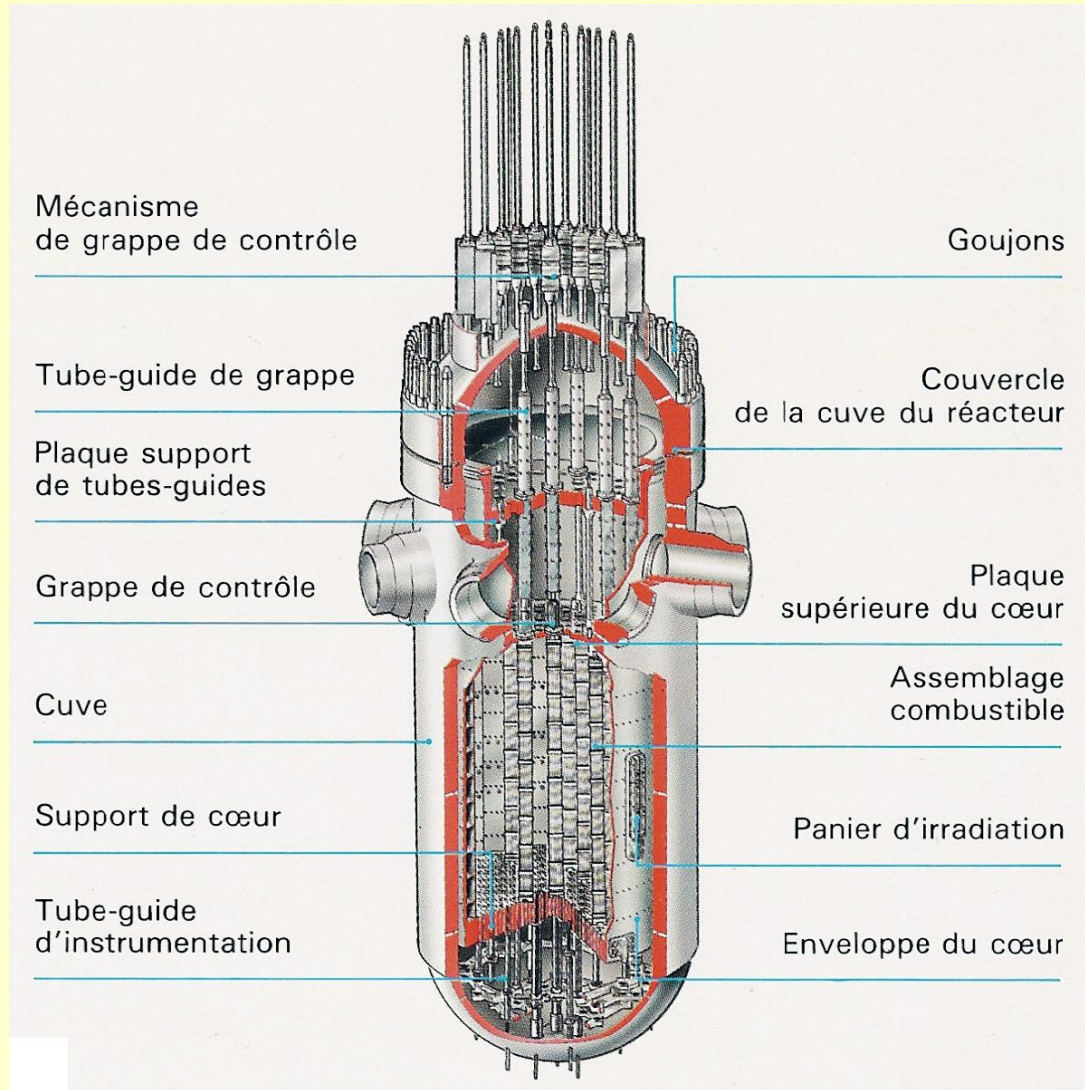
Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Les éléments du réacteur

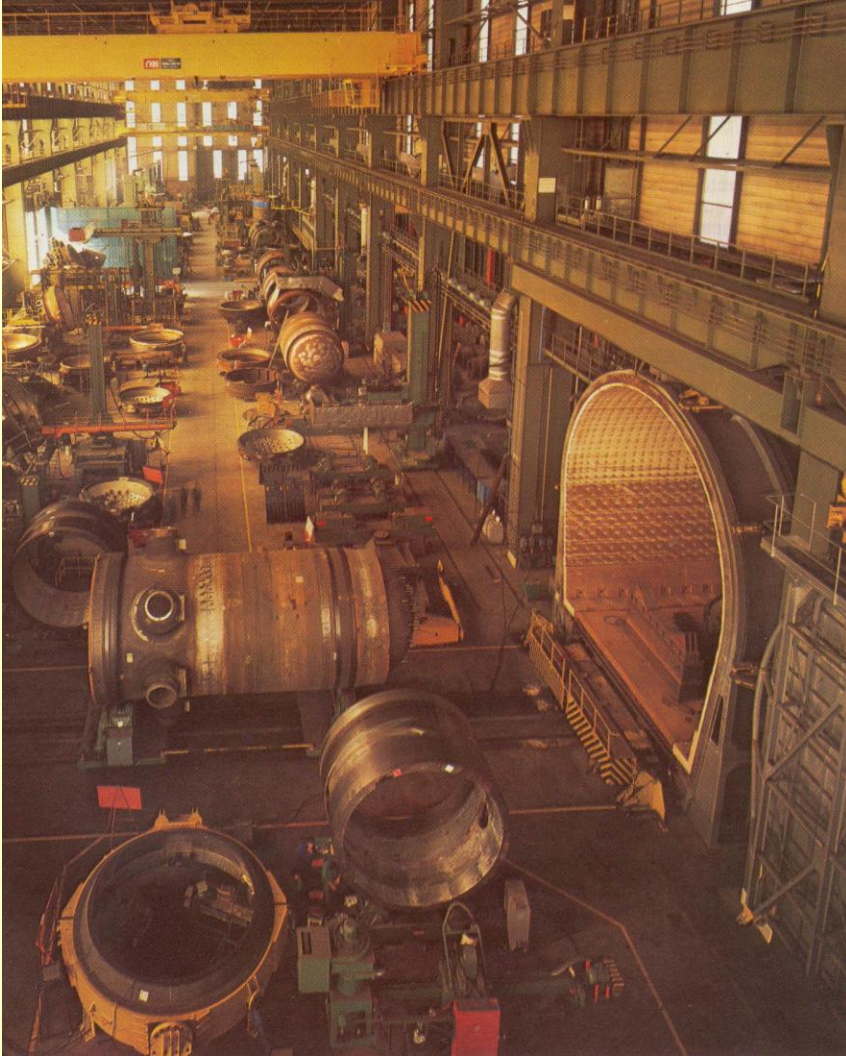


Cuve du réacteur nucléaire

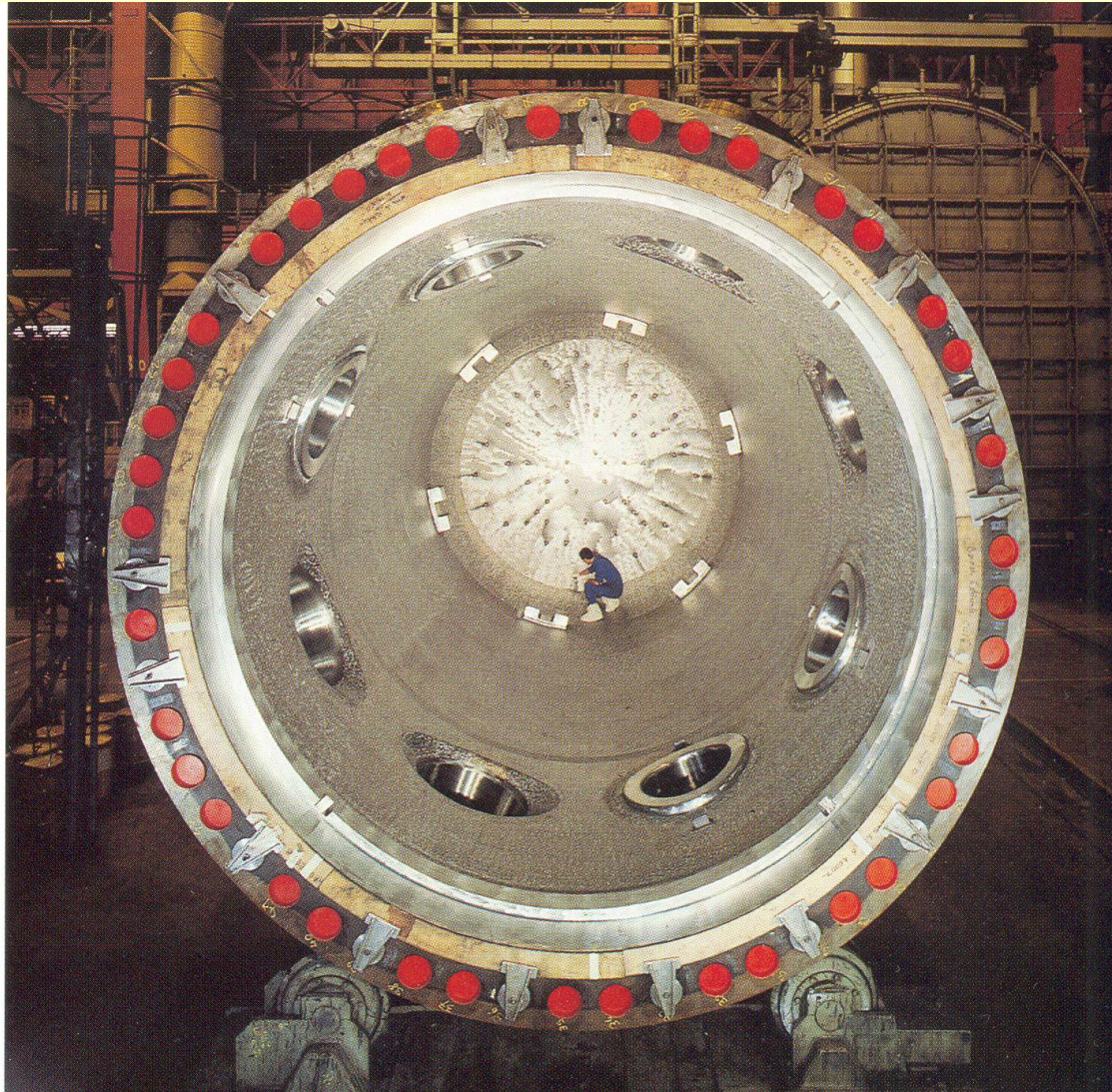
Schéma de principe



Cuve du réacteur nucléaire



Cuve du réacteur nucléaire



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

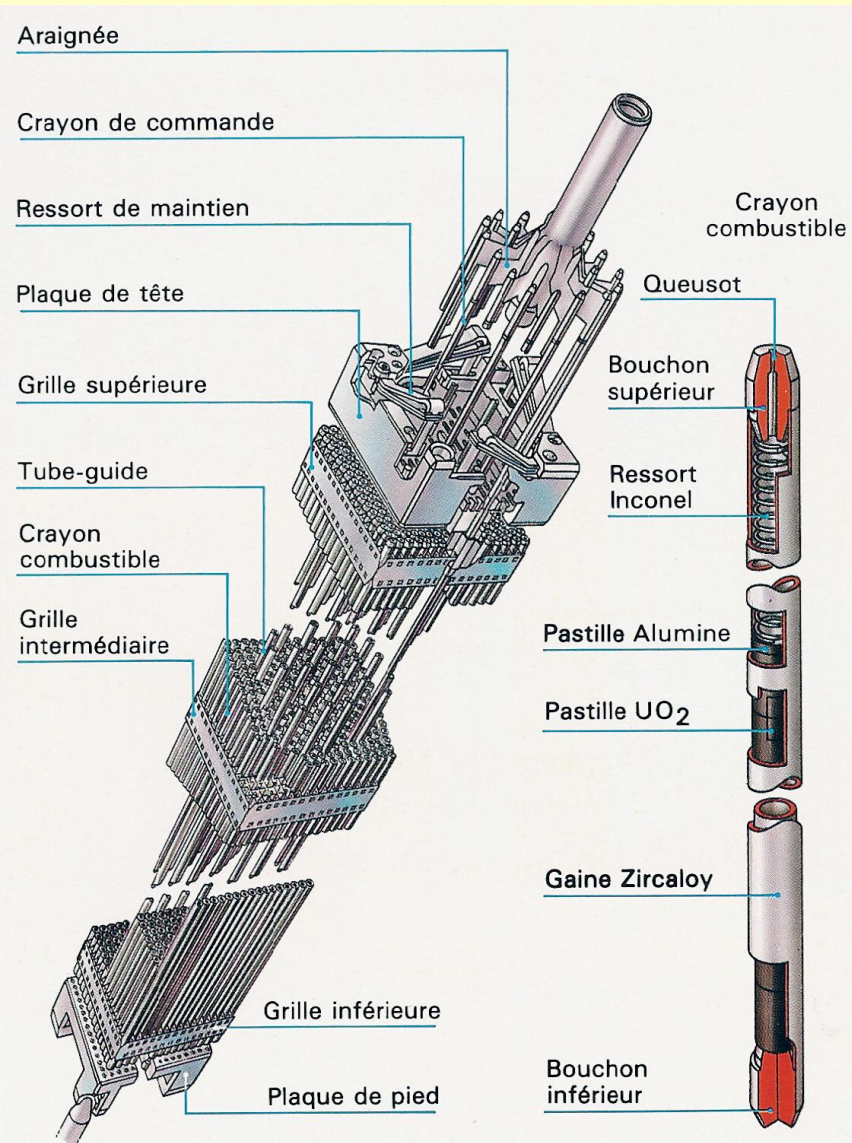
Cuve du réacteur nucléaire



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Assemblage du combustible nucléaire

Schéma de principe

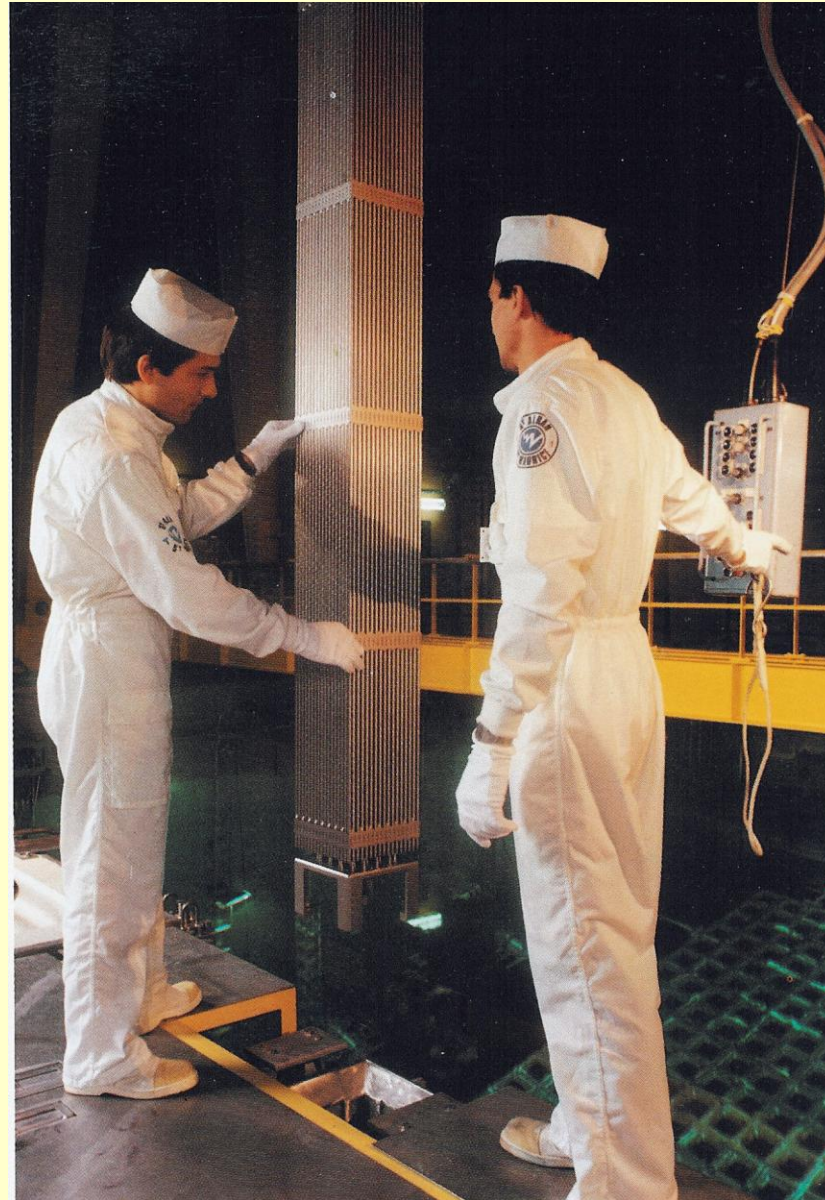


Assemblage du combustible nucléaire



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Assemblage du combustible nucléaire

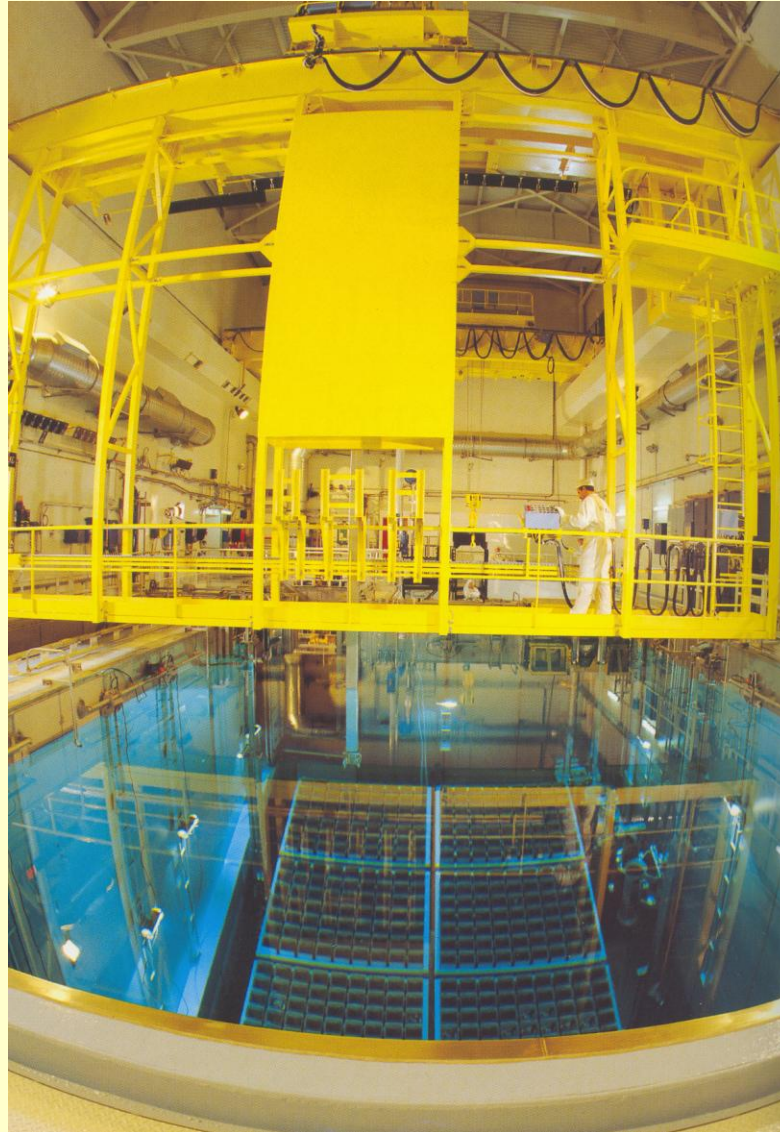


Chargement du combustible nucléaire



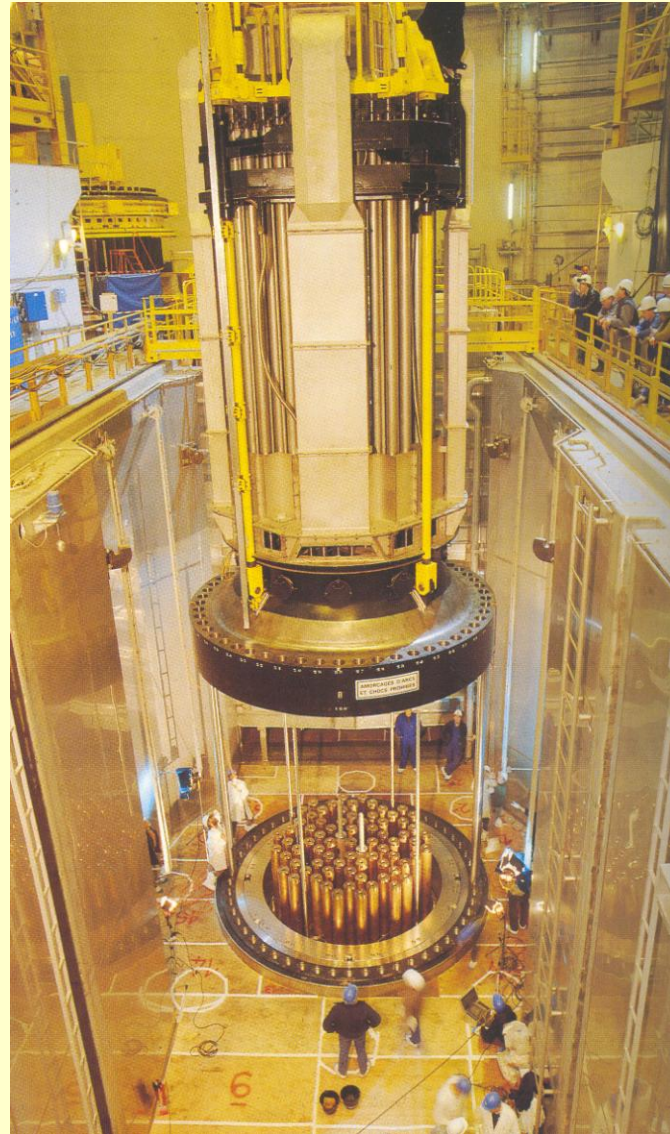
Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Chargement du combustible nucléaire



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

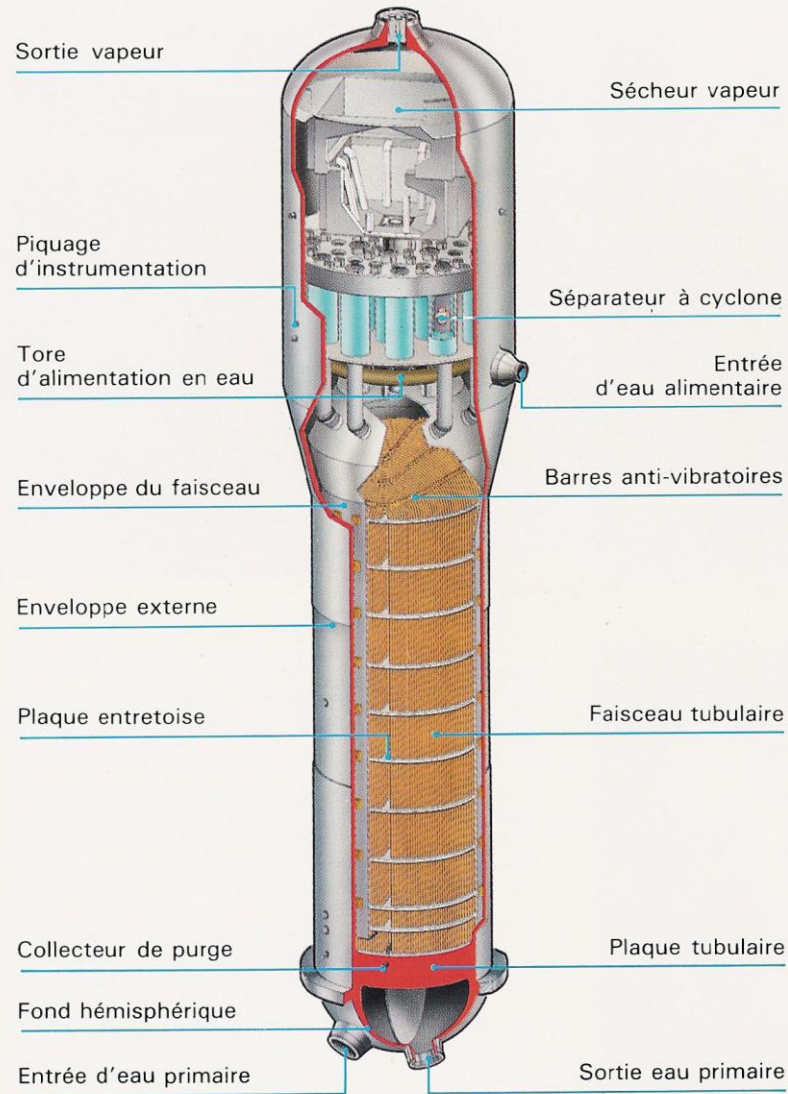
Chargement du combustible nucléaire



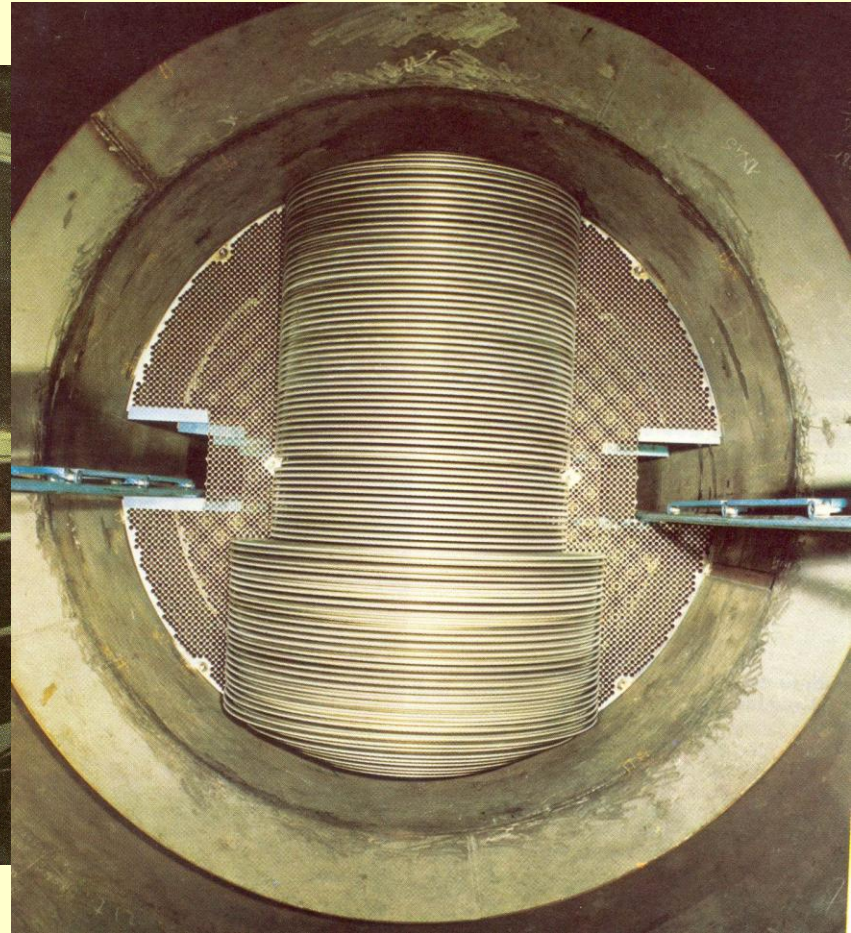
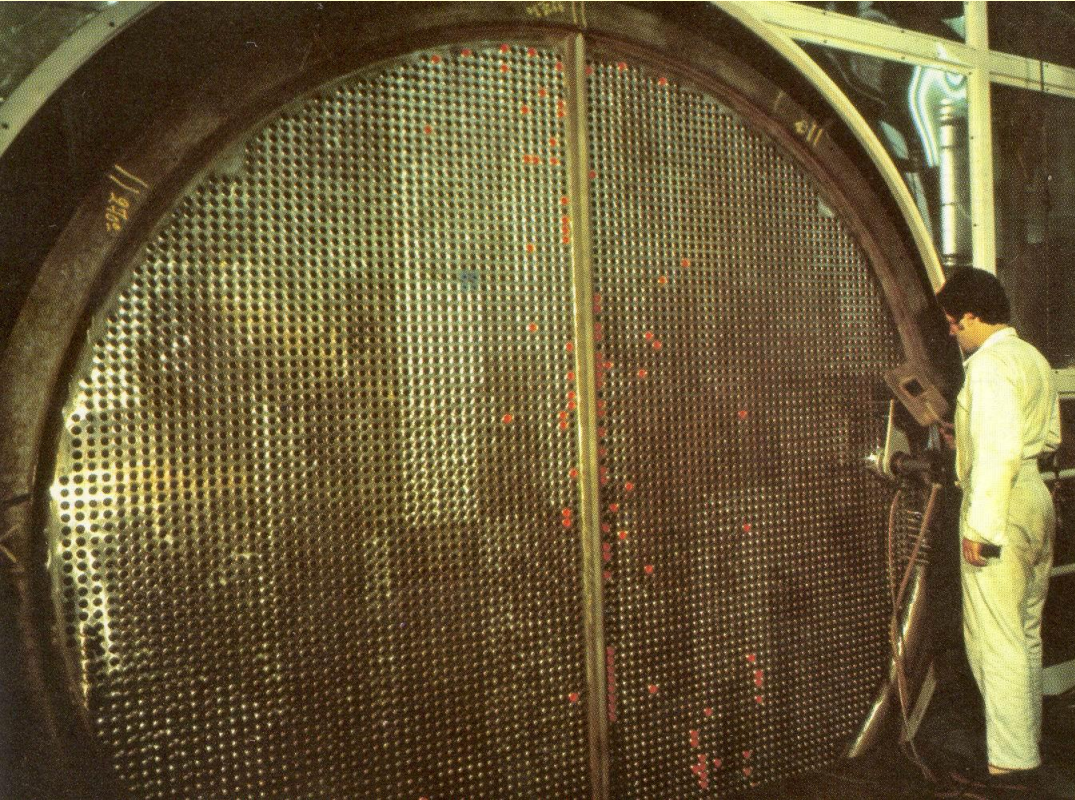
Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Générateur de vapeur

Schéma de principe



Générateur de vapeur



Générateur de vapeur



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Générateur de vapeur d'un réacteur nucléaire (1300 MW) partie inférieure



Générateur de vapeur d'un réacteur nucléaire (1300 MW) partie inférieure



Dampierre en Burly (4 ×900 MW) : *dôme d'une enceinte en construction*



Saint-Alban (2 ×1300 MW)



Tricastin : dôme du réacteur



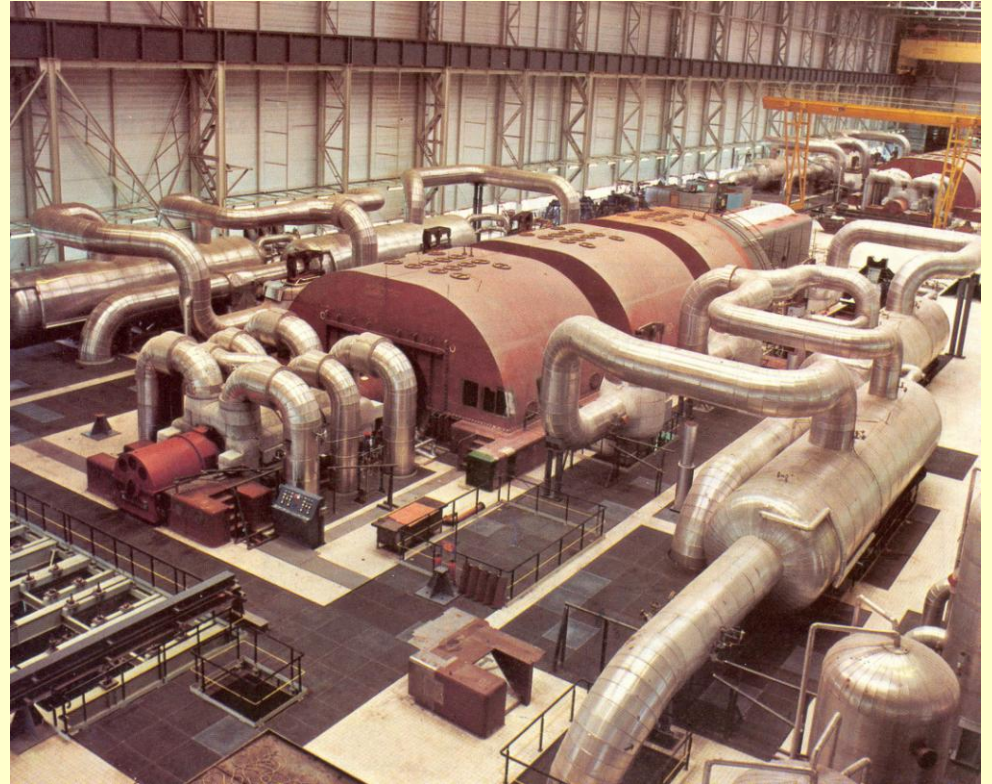
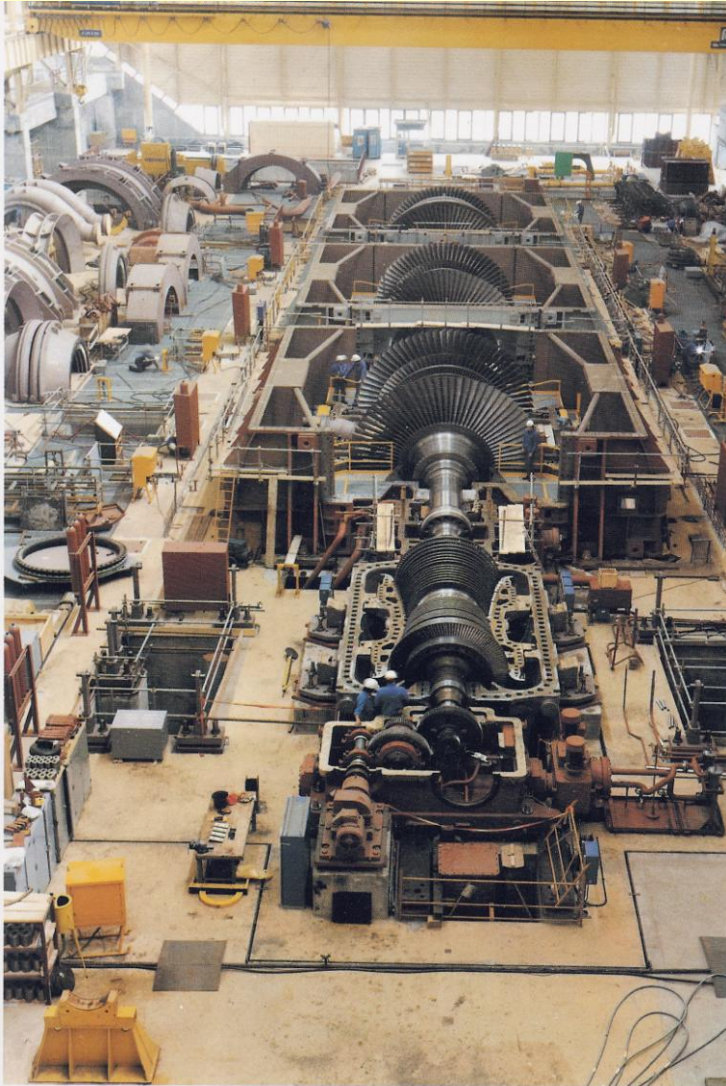
Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Cruas : salle des machines

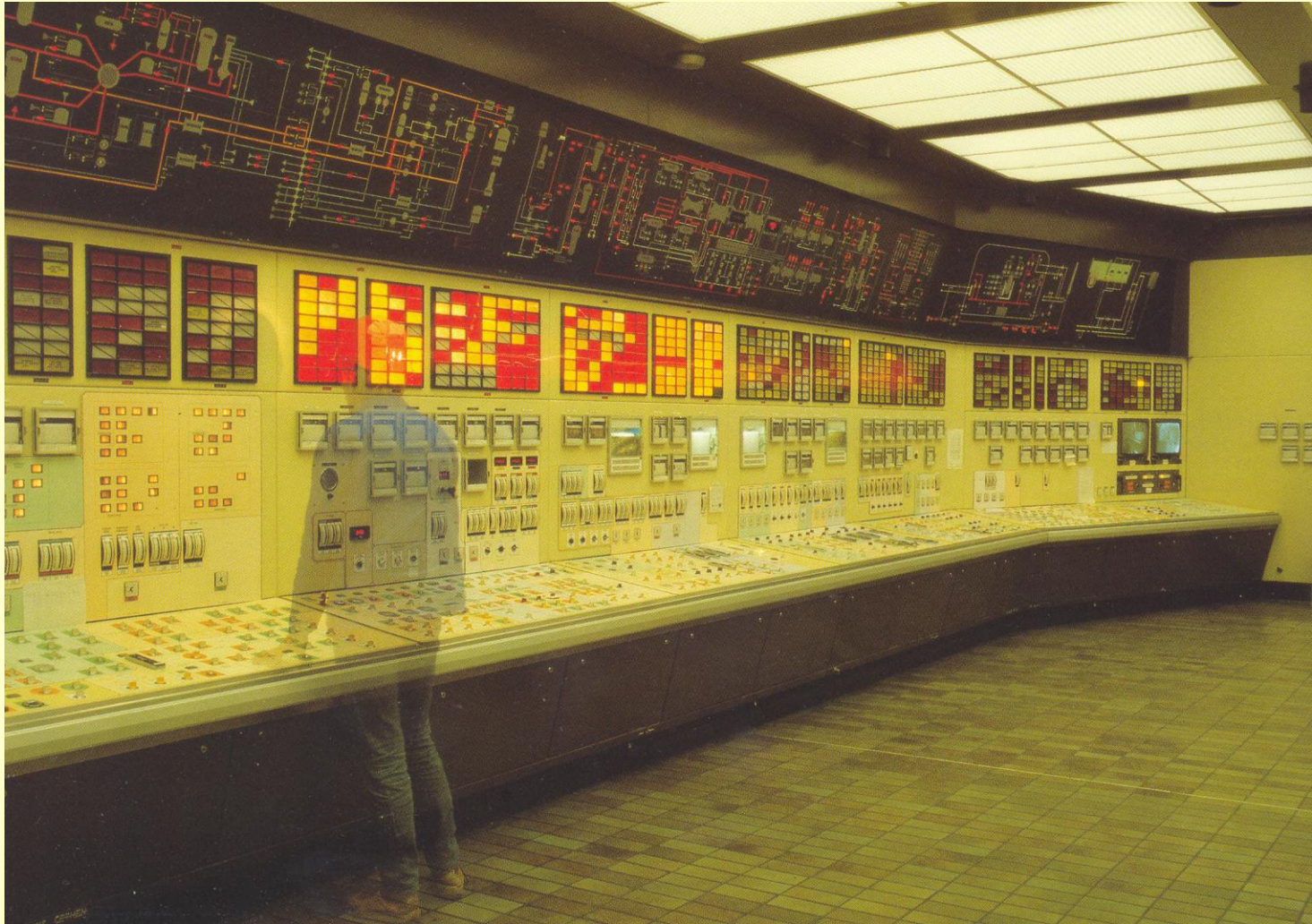


Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Salle des machines

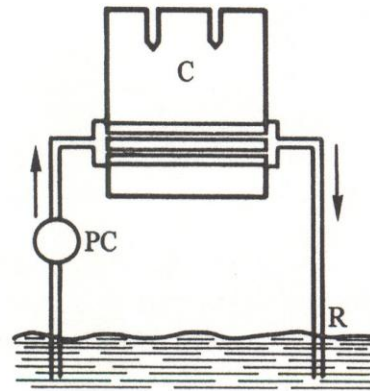


Salle de commande

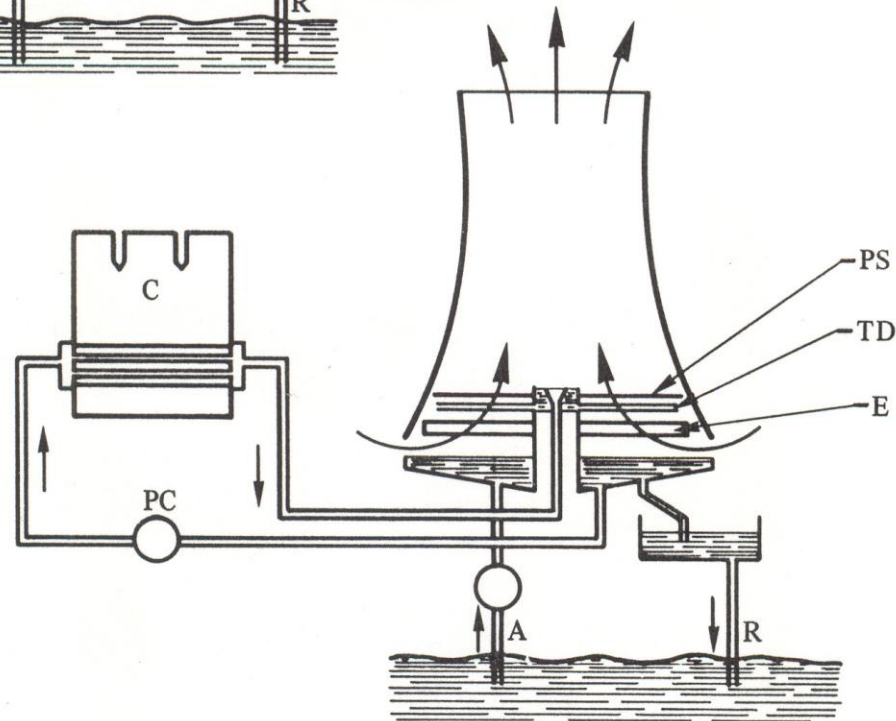


Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

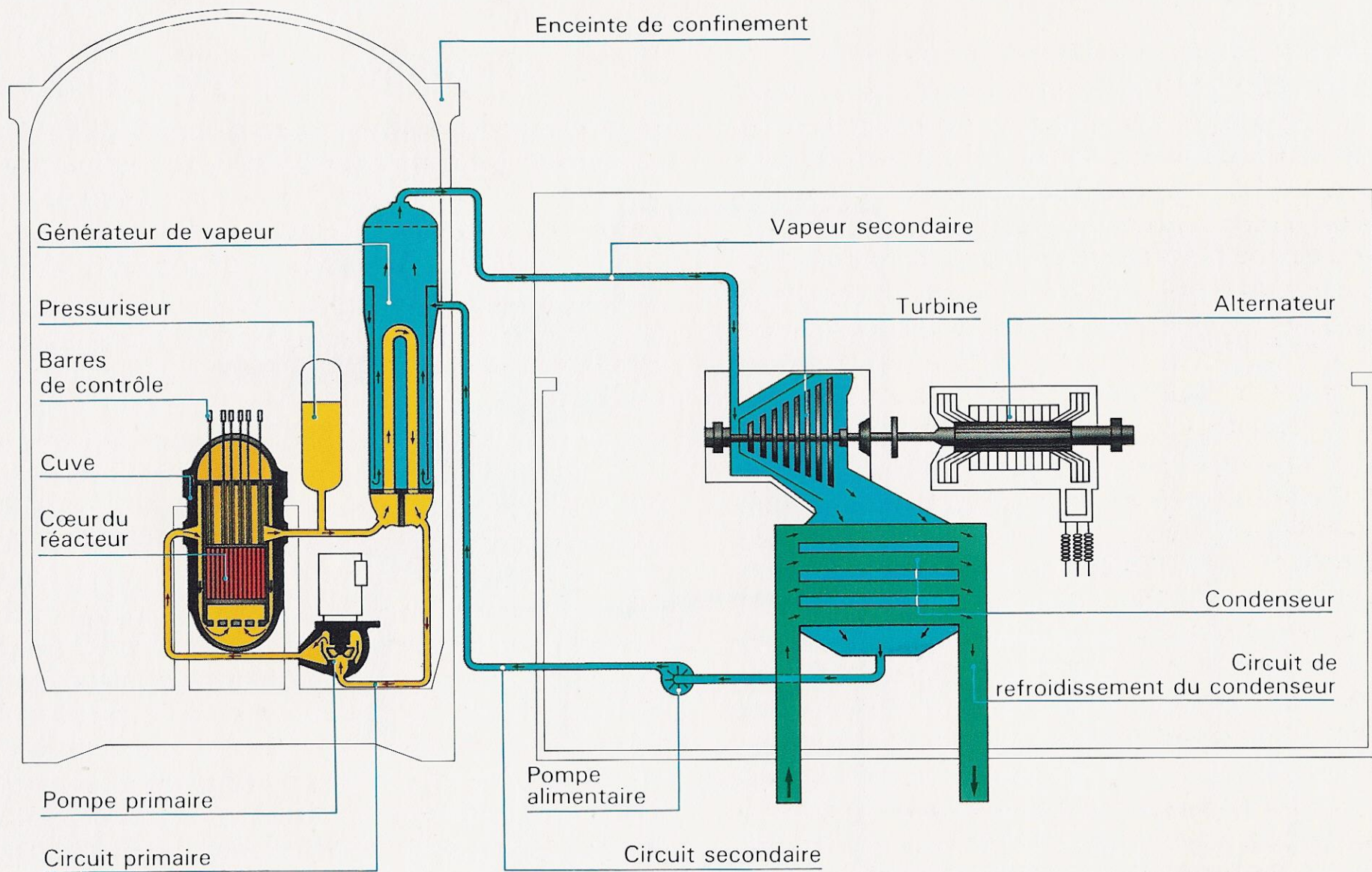
Systemes de refroidissement du condenseur



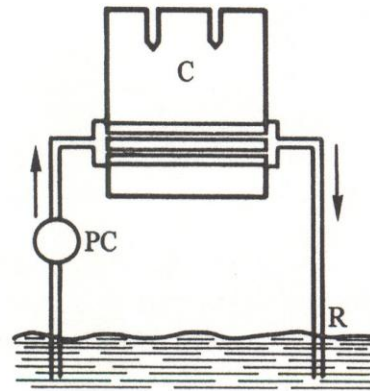
- A Appoint
- C Condenseur
- E Echangeur air-eau
- PC Pompe de circulation
- PS Panneaux séparateurs de gouttes
- R Rejet
- TD Tubes de distribution de l'eau à refroidir



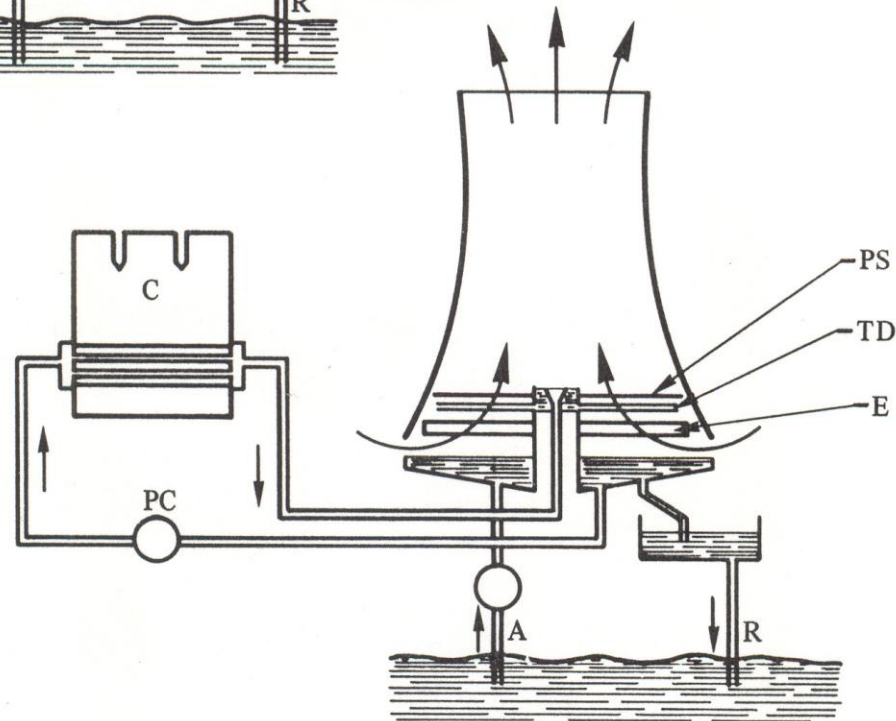
Centrale nucléaire à eau pressurisée (schéma de principe)



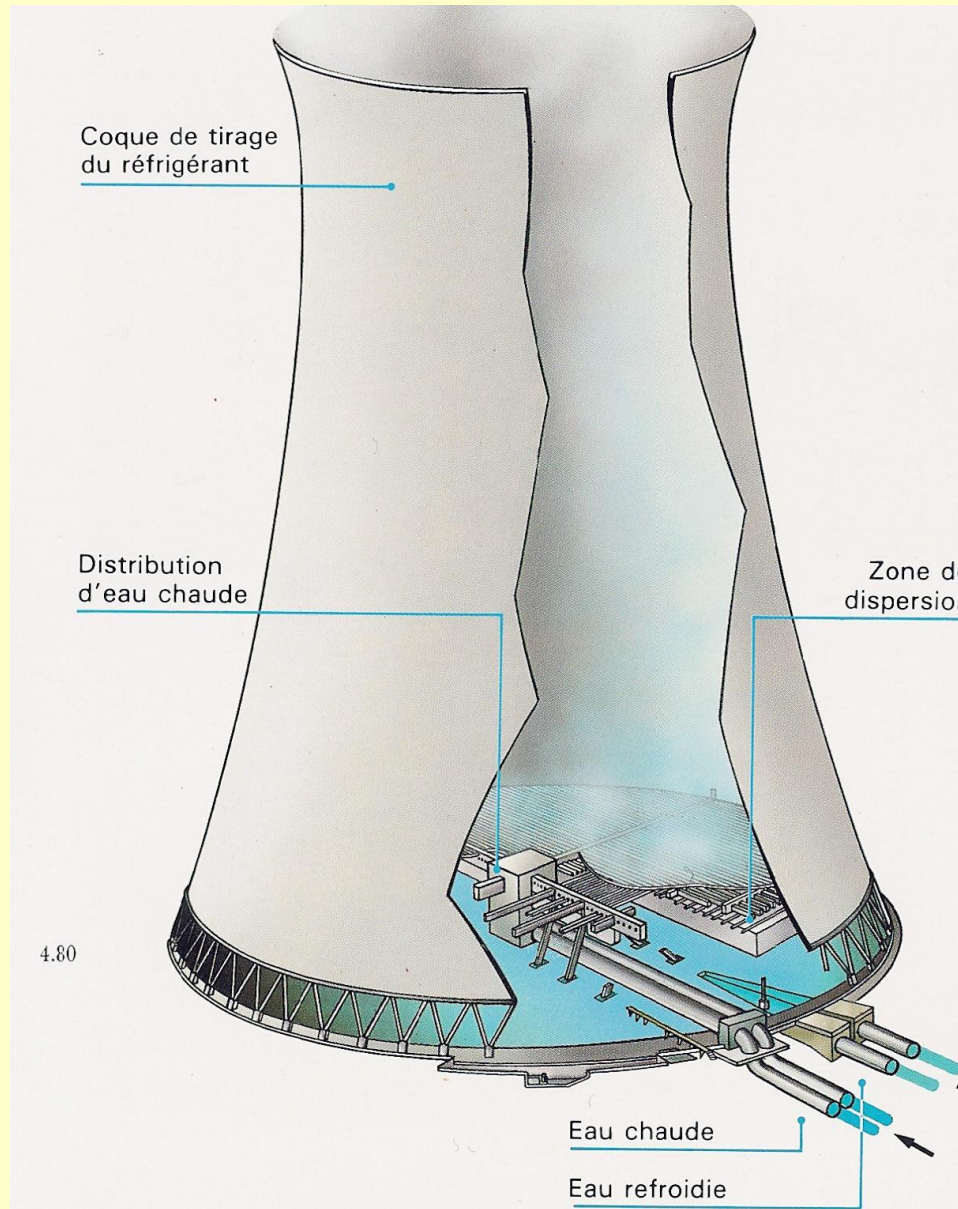
Systemes de refroidissement du condenseur



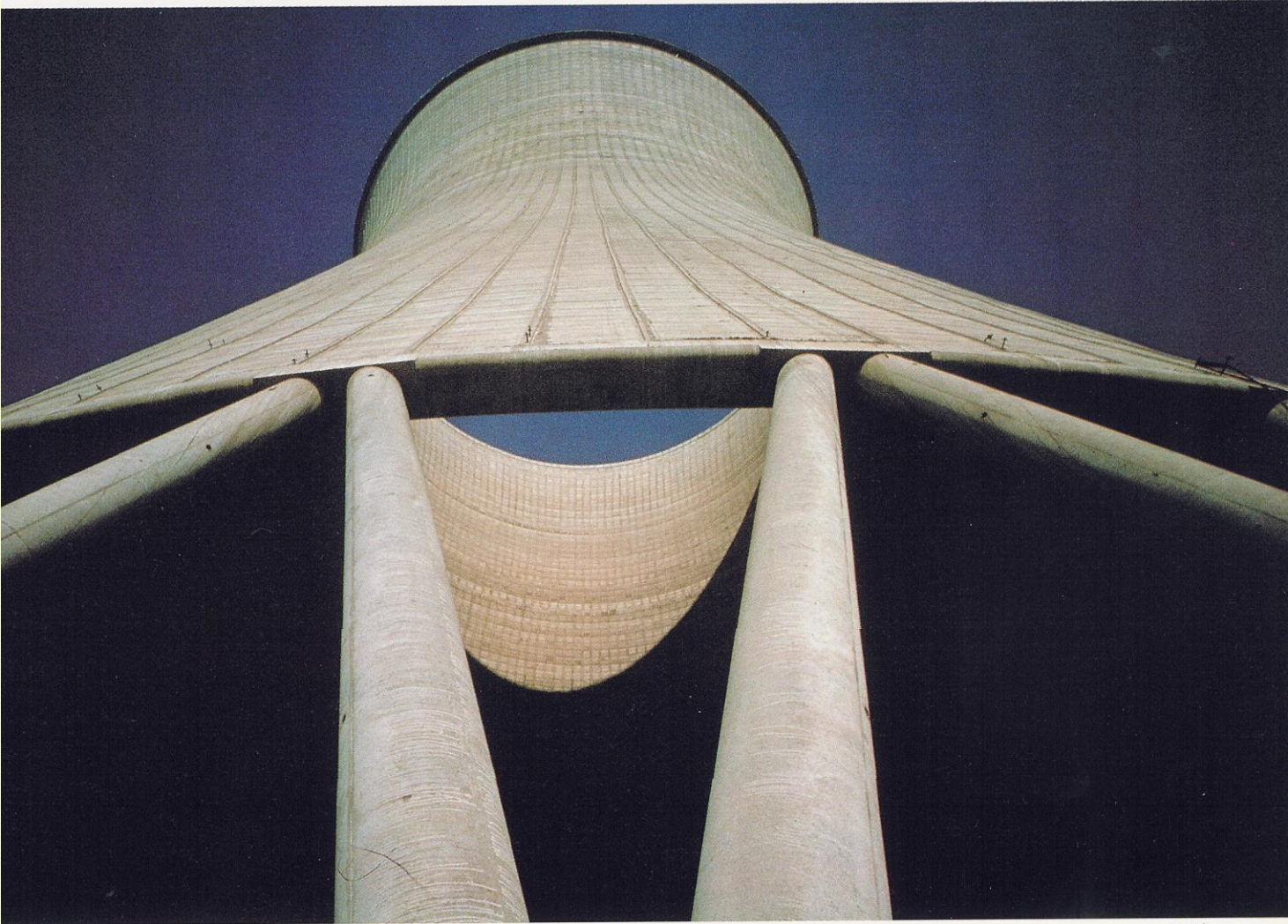
- A Appoint
- C Condenseur
- E Echangeur air-eau
- PC Pompe de circulation
- PS Panneaux séparateurs de gouttes
- R Rejet
- TD Tubes de distribution de l'eau à refroidir



Aéro-réfrigérant à contre courant



Réfrigérant de Bugey

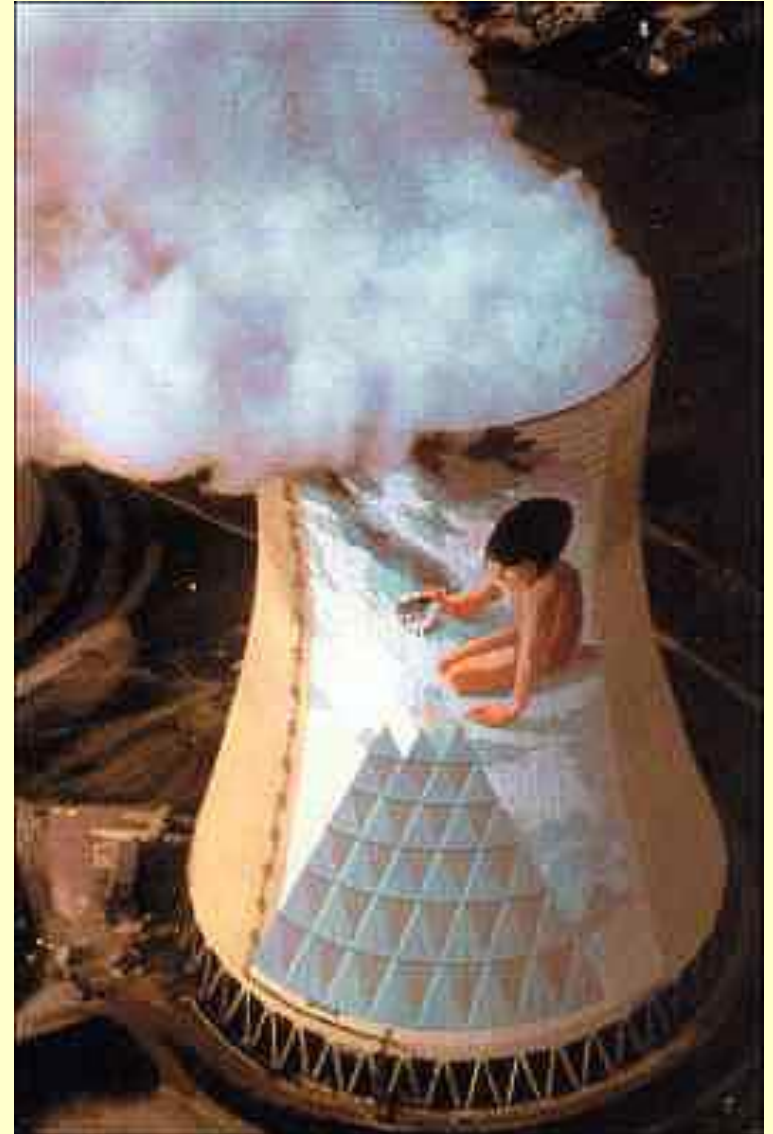
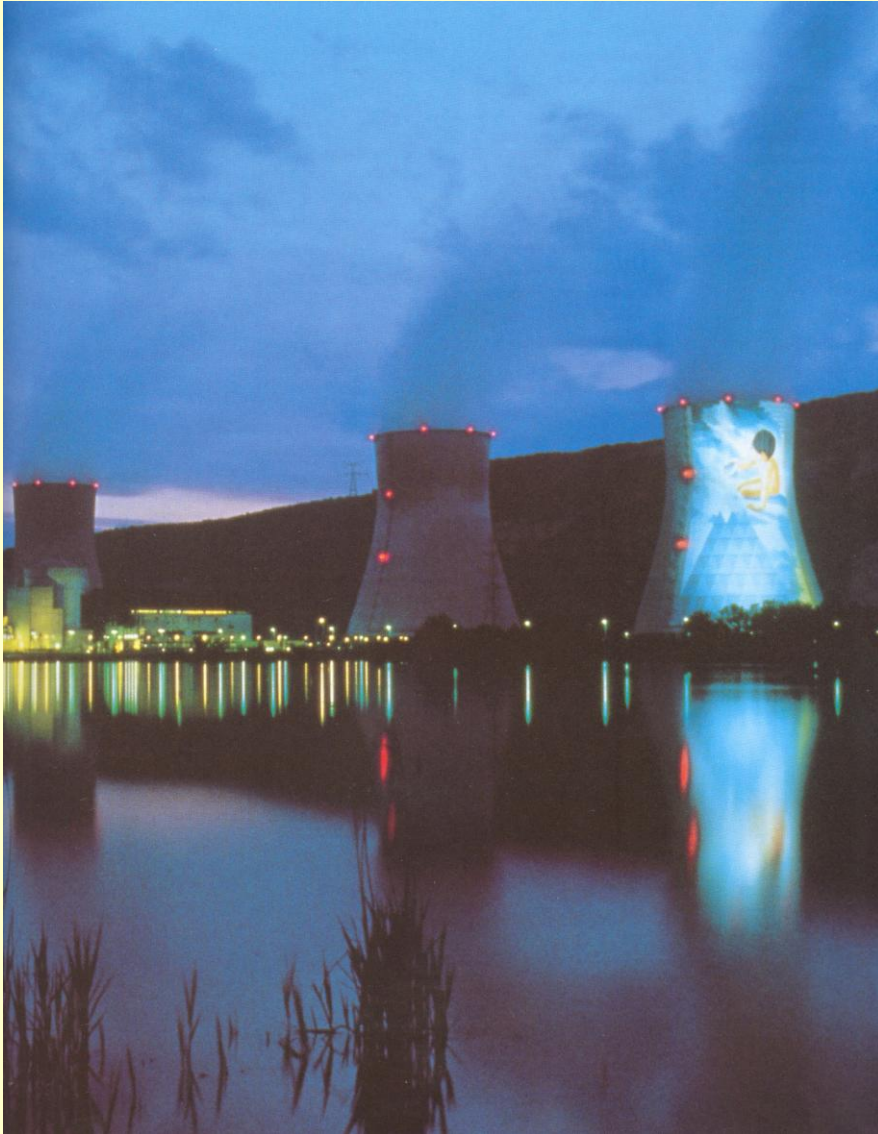


Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Bugey (4 × 900 MW)



Réfrigérants de Cruas

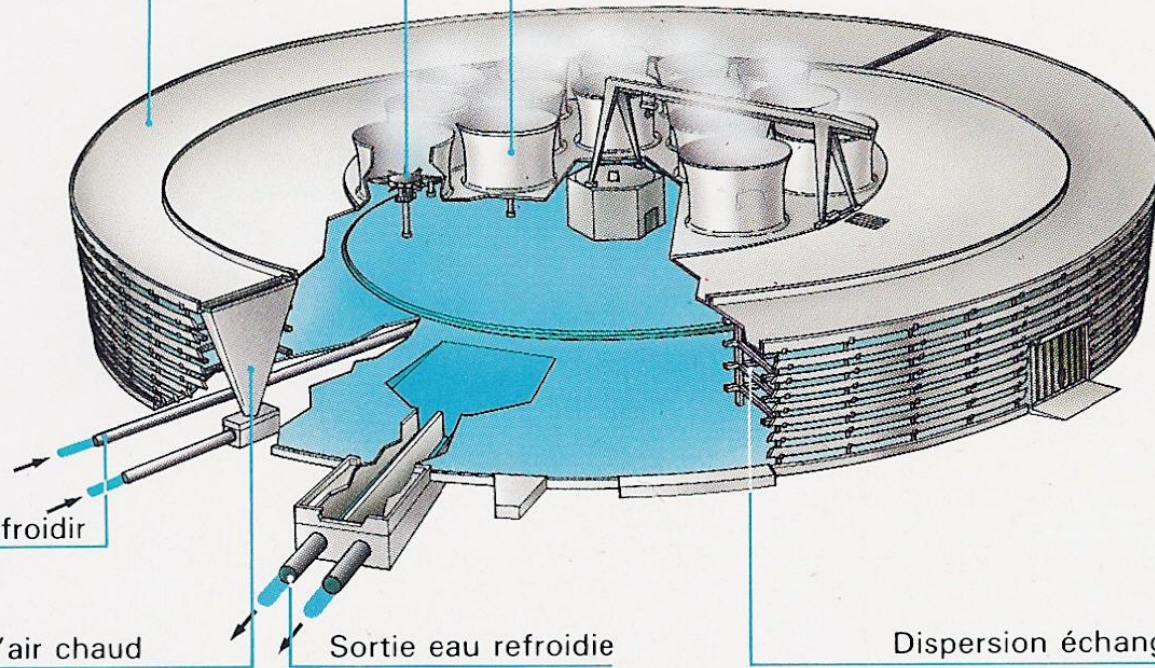


Réfrigérant à tirage forcé

Distribution d'eau chaude

Ventilation du tirage d'air

Diffuseur d'air



Entrée eau à refroidir

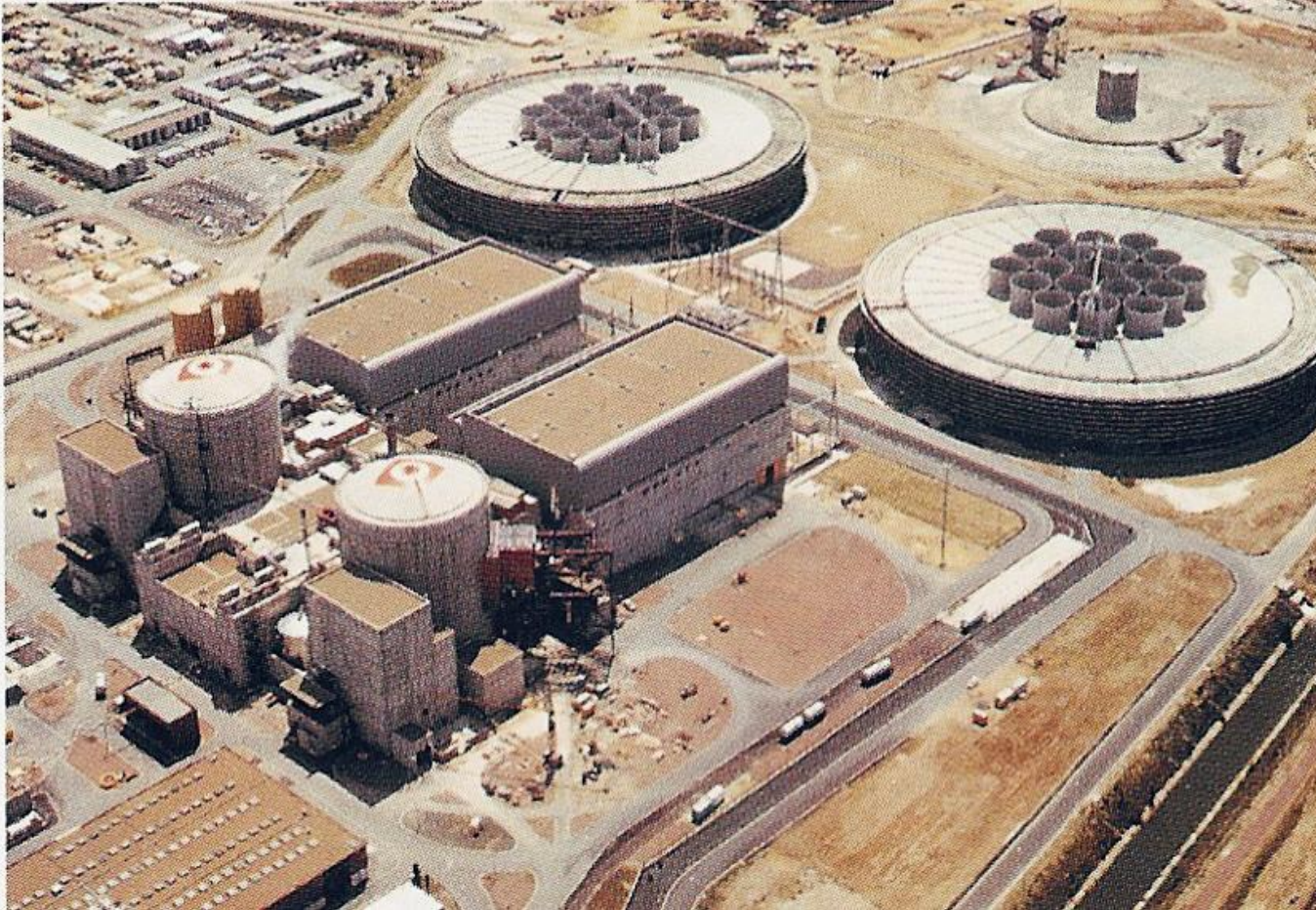
TUBE de déversement d'air chaud

Sortie eau refroidie

Dispersion échangeur air-eau

Chinon (4 × 900 MW)

Réfrigérant à tirage forcé



Chinon : vue des ventilateurs



Professeur Jacques Foos -13 octobre 2011

Fin de la première partie

Ralentisseur (ou modérateur)

On envoie les neutrons rapides choquer d'autres noyaux.

Plus la masse du noyau choqué est proche de celle du neutron, plus le choc est efficace.

Le ralentisseur (ou modérateur) doit être choisi parmi les plus légers.

On prend les 6 premiers éléments

^1H (hydrogène) et son isotope lourd : **^2D** (deutérium)

^4He (hélium) **^{6-7}Li** (lithium) **^9Be** (béryllium)

$^{10-11}\text{B}$ (bore) **^{12}C** (carbone)

Modérateur

H

He

Li

Be

B

C

H₂O (eau légère)

H₂

D₂O (eau lourde)

D₂

BeO

graphite

CO₂

Modérateur

H

He

Li

Be

B

C

H₂O (eau légère)

H₂

D₂O (eau lourde)

D₂

BeO

graphite

CO₂

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

Modérateur

H

H₂O (eau légère)

D₂O (eau lourde)

Li

Be

BeO

B

C

graphite

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

Modérateur

H

H₂O (eau légère)

D₂O (eau lourde)

Li

Be

BeO

B

C

graphite

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

le modérateur ne doit pas absorber les neutrons : ils seraient perdus

Modérateur

H

H₂O (eau légère)

D₂O (eau lourde)

Be

BeO

C

graphite

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

le modérateur ne doit pas absorber les neutrons : ils seraient perdus

Modérateur

H

H₂O (eau légère)

D₂O (eau lourde)

Be

BeO

C

graphite

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

le modérateur ne doit pas absorber les neutrons : ils seraient perdus

**le modérateur ne doit être ni toxique, ni cher,
ni difficilement usinable**

Modérateur

H

H₂O (eau légère)

D₂O (eau lourde)

C

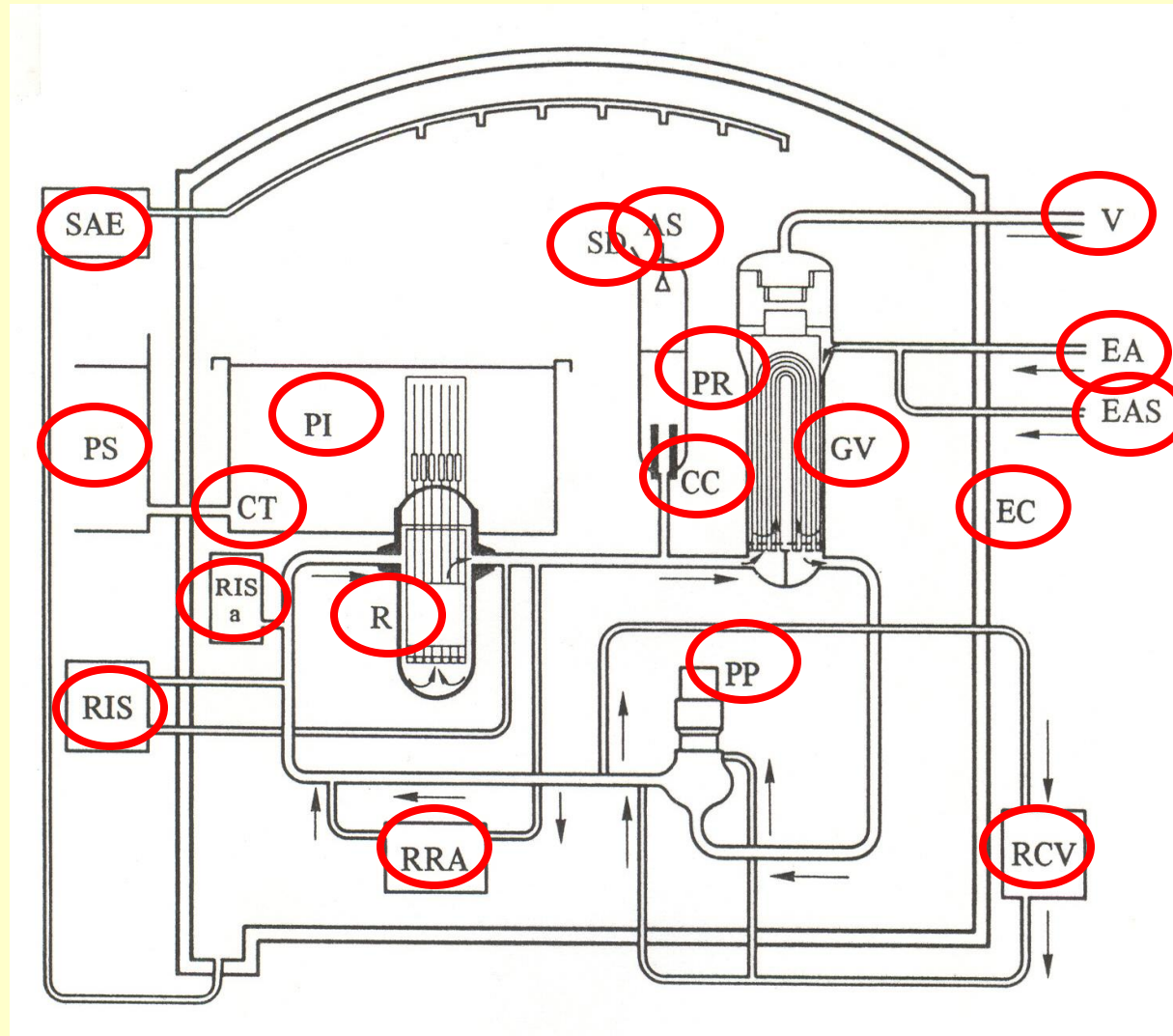
graphite

le modérateur doit être sous forme condensée : les gaz sont exclus

le modérateur ne doit pas absorber les neutrons : ils seraient perdus

**le modérateur ne doit être ni toxique, ni cher,
ni difficilement usinable**

Bâtiment réacteur : schéma de principe



La criticité

La fission de l'uranium et du plutonium, induite par des neutrons, produit elle-même d'autres neutrons qui peuvent créer d'autres fissions.

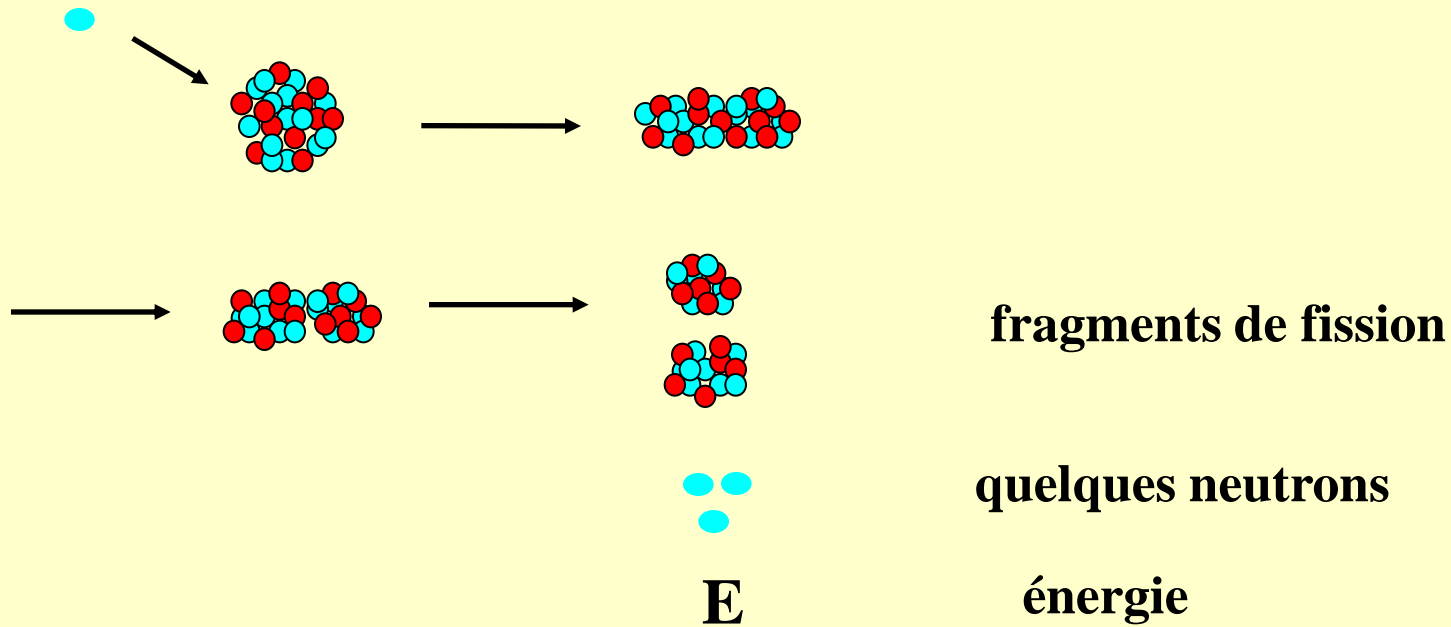
Si le nombre de neutrons N est inférieur au nombre de fissions F qui les ont créés, on parle de *régime sous-critique* : la réaction va s'arrêter.

Si N est égal à F , la réaction est *auto-entretenu* (comme dans les centrales nucléaires en fonctionnement).

Si N est supérieur à F , on parle de *régime sur-critique*.

En exploitation industrielle, c'est une situation accidentelle appelée *accident de criticité*.

La fission (1938)



Les fragments de fission sont radioactifs, parce qu'excédentaires en neutrons, donc émetteurs β^- .

Leurs descendants se nomment : produits de fission.

**Au cours de la fission
se dégage de l'énergie, mais aussi quelques neutrons**

La fission est un processus de désintégration naturel. Seuls les isotopes possédant un nombre pair de neutrons et de protons fissionnent. Ce processus de désintégration ne devient toutefois prépondérant qu'à partir de $Z = 100$ (fermium).

La fission peut donc être provoquée en envoyant des neutrons sur des isotopes possédant un nombre pair de protons et un nombre impair de neutrons.

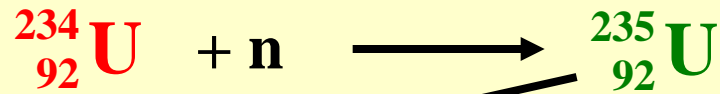
Les neutrons émis au cours de la réaction peuvent entretenir celle-ci.

Les combustibles nucléaires vont donc être :

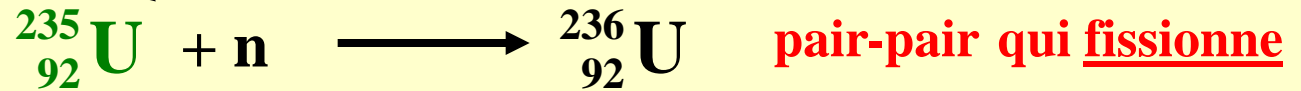
- des noyaux très lourds
- les plus lourds rencontrés dans la nature
- de numéro atomique pair
 - (\Rightarrow limité à Th (thorium) $Z = 90$
 - et à U (uranium) $Z = 92$)
- et les plus efficaces \Rightarrow le numéro atomique le plus élevé
 - \Rightarrow uranium

L'uranium naturel est composé de 3 isotopes :

$^{234}_{92}\text{U}$ 0,006%

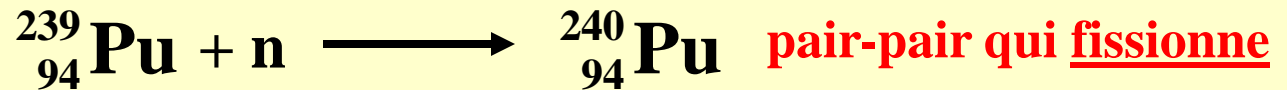
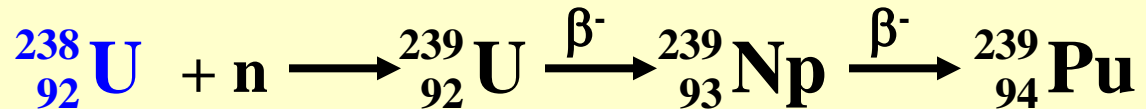


$^{235}_{92}\text{U}$ 0,718%



l'uranium-235 est fissile

$^{238}_{92}\text{U}$ 99,276%

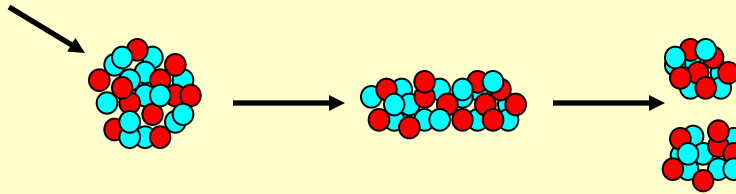


le plutonium-239 est fissile

On dit alors que l'uranium-238 est fertile

Comment piloter un réacteur nucléaire ?

1 neutron lent



fragments de fission
+ des neutrons rapides

(2,5 en moyenne)

modérateur

2,5 neutrons lents

absorbeur de neutrons

-1,5

Eau légère : modérateur et fluide caloporteur

L'eau légère (grâce à ses noyaux d'hydrogène H) ralentit les neutrons pour leur permettre d'induire d'autres fissions

Toutefois, elle ne se contente pas de ralentir les neutrons, elle les absorbe aussi de façon non négligeable

Si on veut l'utiliser comme modérateur (ou ralentisseur de neutrons),

il faut enrichir l'uranium naturel en uranium fissile 235
→ passer de 0,72 à 3,25%

C'est ce que l'on appelle l'uranium enrichi.

Évacuation de la chaleur

Enfin, il faut évacuer la chaleur produite grâce à un fluide caloporteur.

- ➡ **un liquide (eau légère ou eau lourde)**
- ➡ **ou un gaz (carbonique)**

Voici les 3 filières de réacteurs utilisés en France (à l'exception du surgénérateur) :

- **à eau lourde (type Brennilis)**
- **UNGG (uranium naturel-graphite-gaz)**
- **à eau légère (REP)**