

De Zoé à Iter

L'odyssée de la centrale nucléaire

Professeur Jacques Foos

Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009



Masse du noyau

Soit un noyau ${}^A_Z\text{X}$ constitué de Z protons et N ($A - Z$) neutrons

m_p : masse du proton m_n : masse du neutron

Quelle est la masse du noyau ?

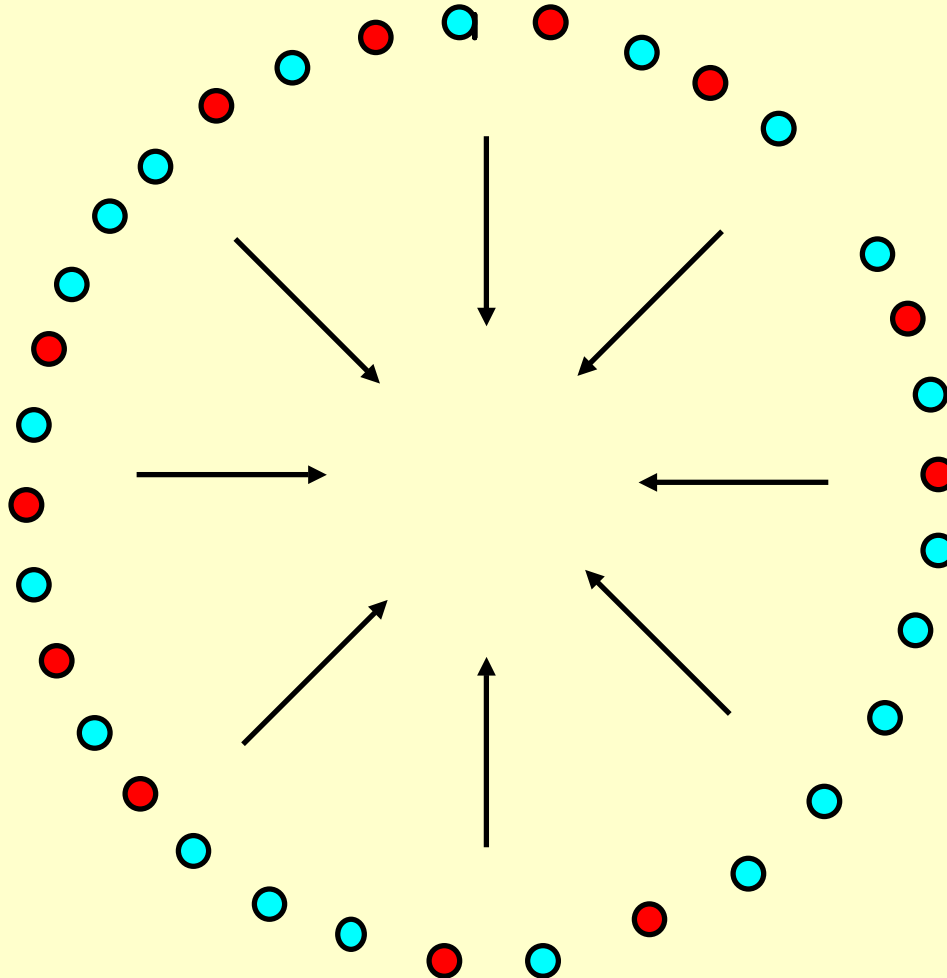
Cette masse est **toujours inférieure** à la masse des nucléons qui constituent ce noyau.

$$m_{\text{noyau}} < Z \times m_p + N \times m_n$$

Ceci est vrai, que le noyau soit stable ou radioactif !
Il n'y a pas d'exceptions.



Énergie du noyau

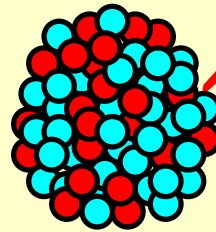


Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Énergie du noyau

$$E = \Delta mc^2$$



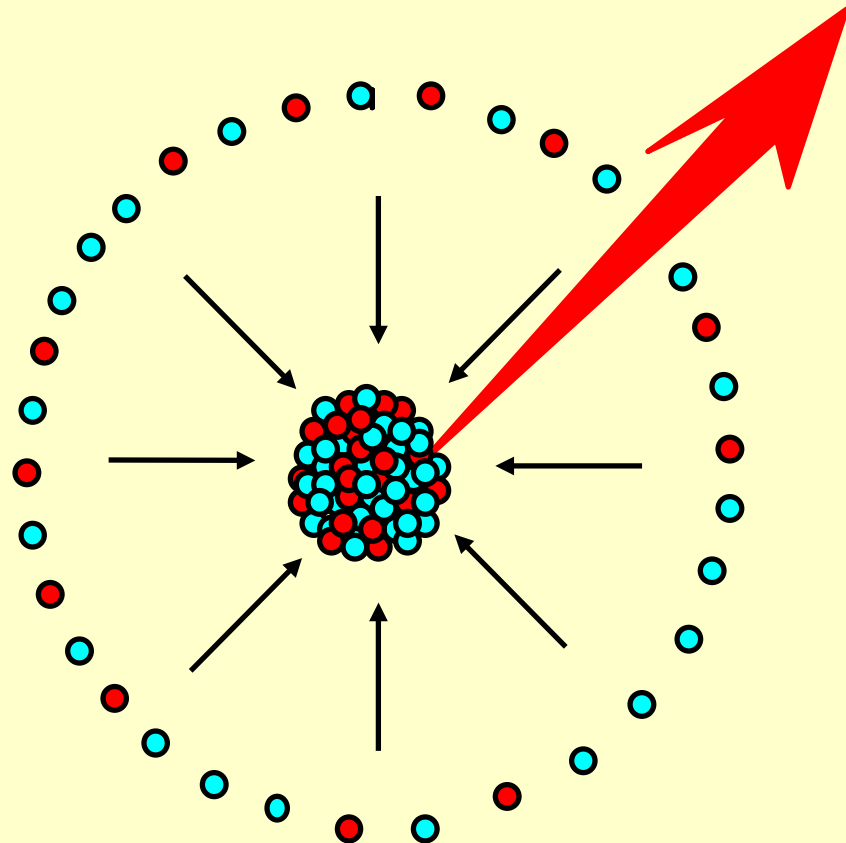
Énergie du noyau

$\Delta m = \text{masse du noyau} - \Sigma (\text{masse des nucléons})$

Δm est négatif

$\Rightarrow \Delta E$ est fournie par le système

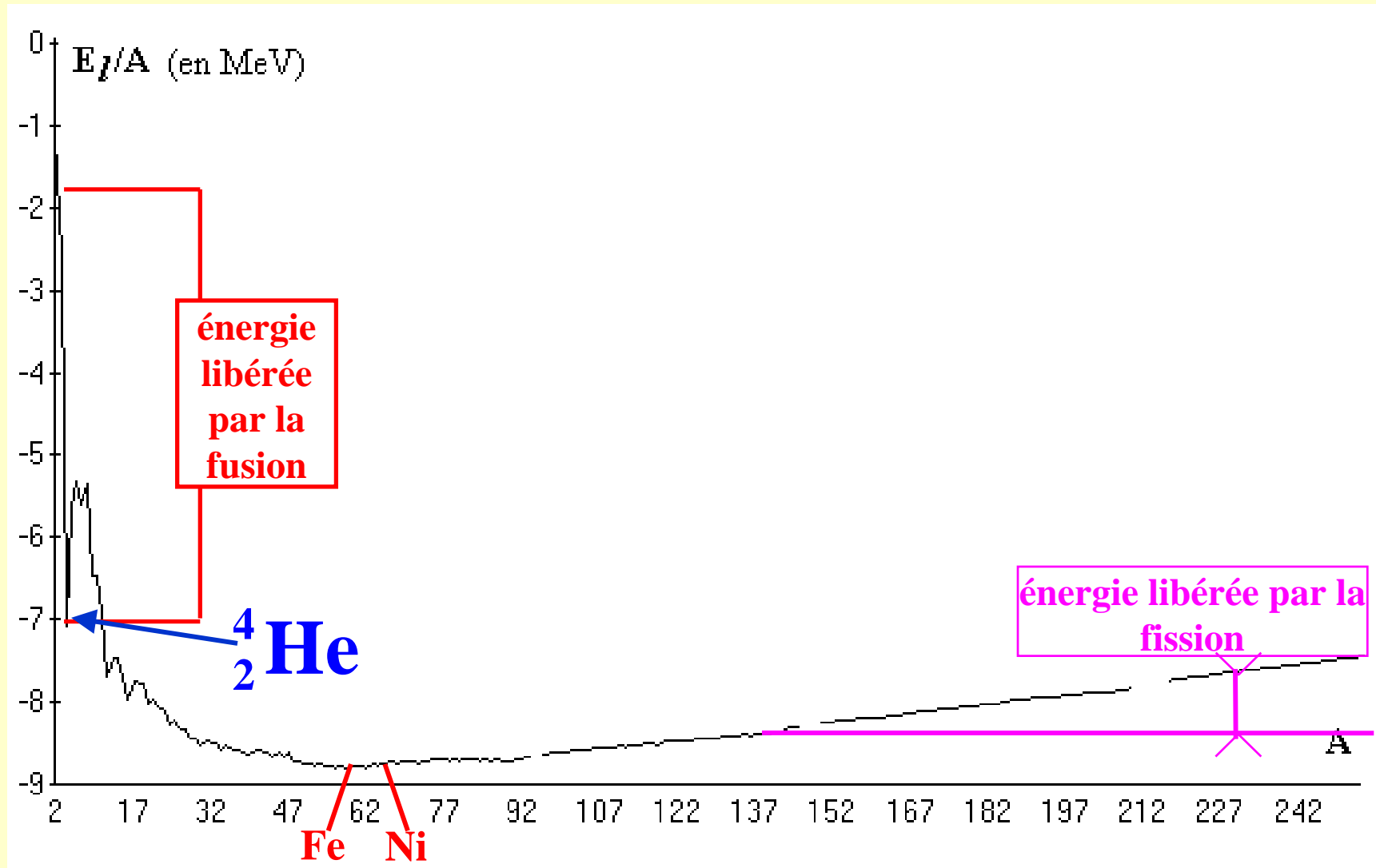
$$E = \Delta mc^2$$



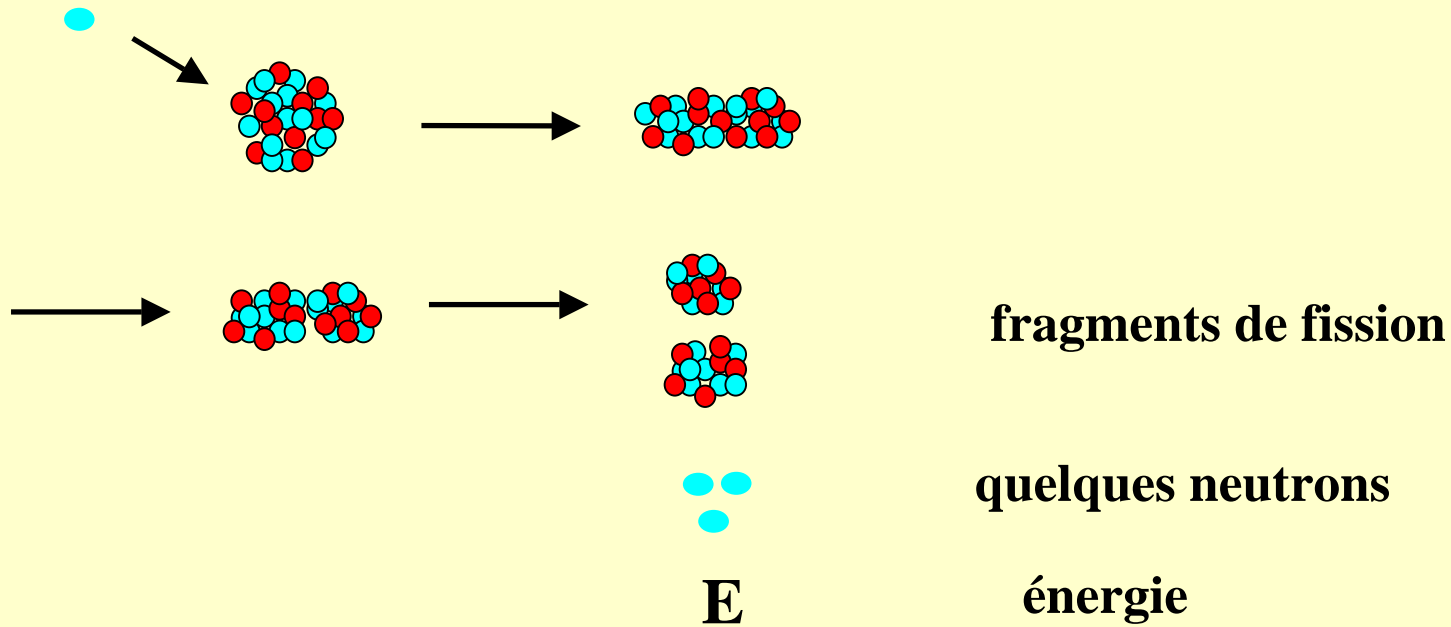
Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Énergie libérée fonction de A



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 pair-pair 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 pair (Z) - impair (N).

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



Les combustibles nucléaires vont donc être :

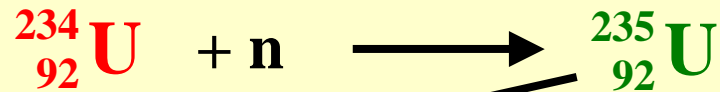
- des noyaux très lourds
- les plus lourds rencontrés dans la nature
- de numéro atomique pair
 - (\Rightarrow limité à Th (thorium) $Z = 90$
 - et à U (uranium) $Z = 92$)
- et les plus efficaces \Rightarrow le numéro atomique le plus élevé

\Rightarrow uranium

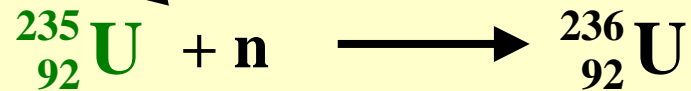


L'uranium naturel est composé de 3 isotopes :

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



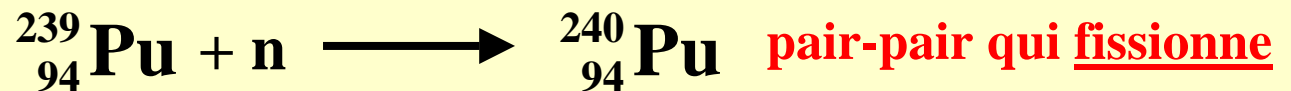
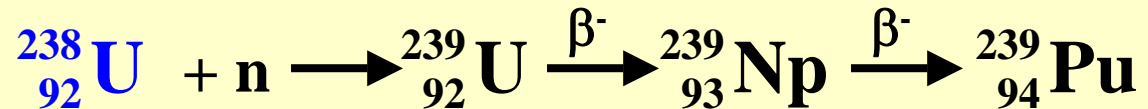
$^{235}_{92}\text{U}$ 0,718%



pair-pair qui fissionne

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



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**



Eau légère

Toutefois, l'eau légère (par H.) absorbe les neutrons 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) :

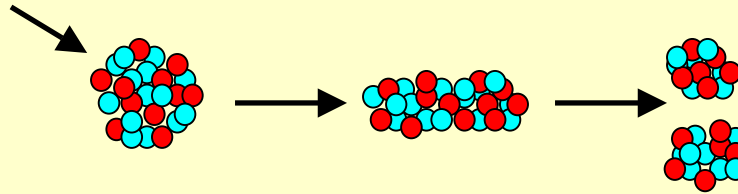
- **à eau lourde (type Brennilis)**
- **UNGG (uranium naturel-graphite-gaz)**
- **à eau légère (REP)**



Comment piloter un réacteur nucléaire ?

1 neutron lent

-1,5



fragments de fission
+ des neutrons rapides

(2,5 en moyenne)

modérateur

2,5 neutrons lents

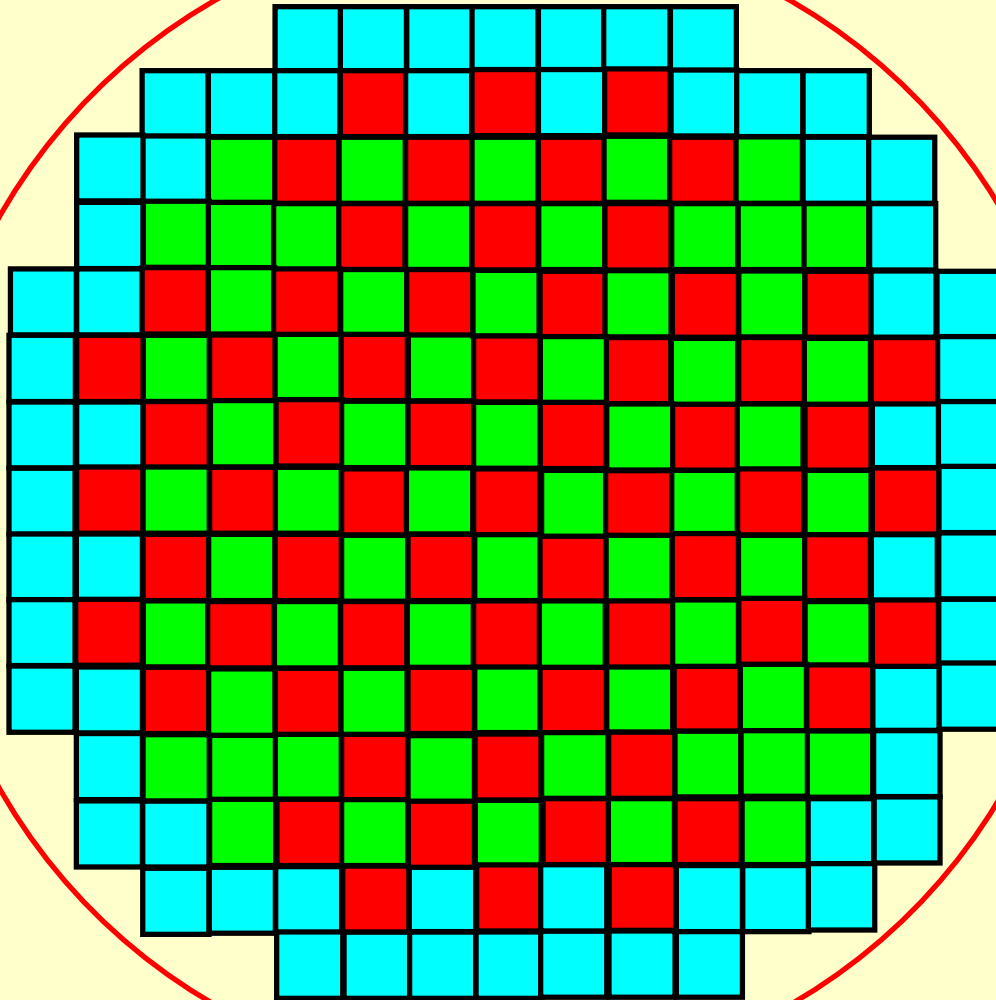
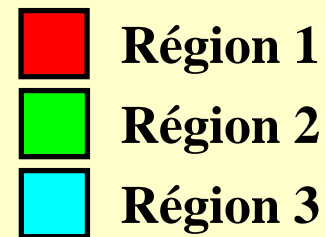
absorbeur de neutrons

Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Le cœur

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



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.

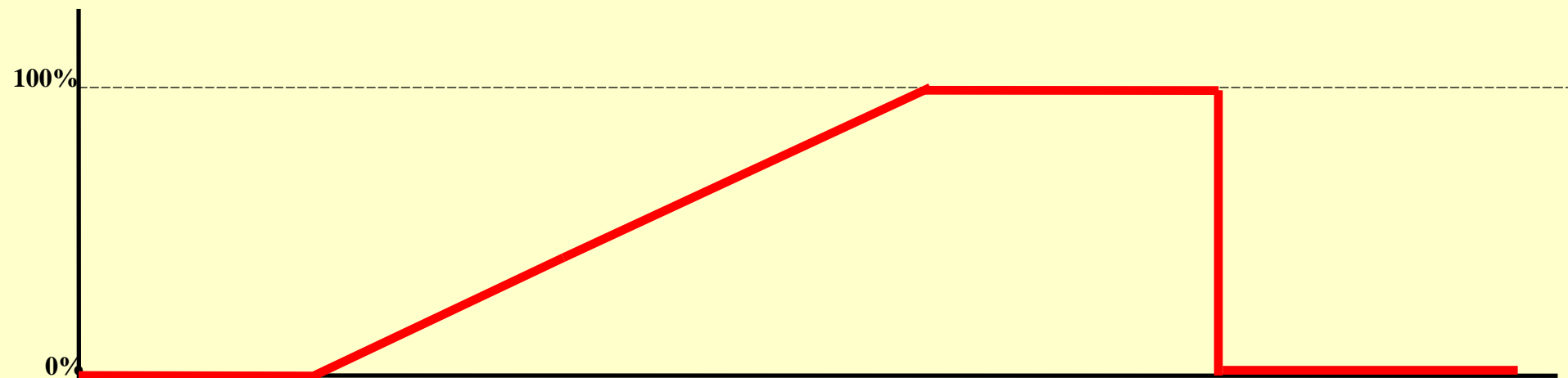
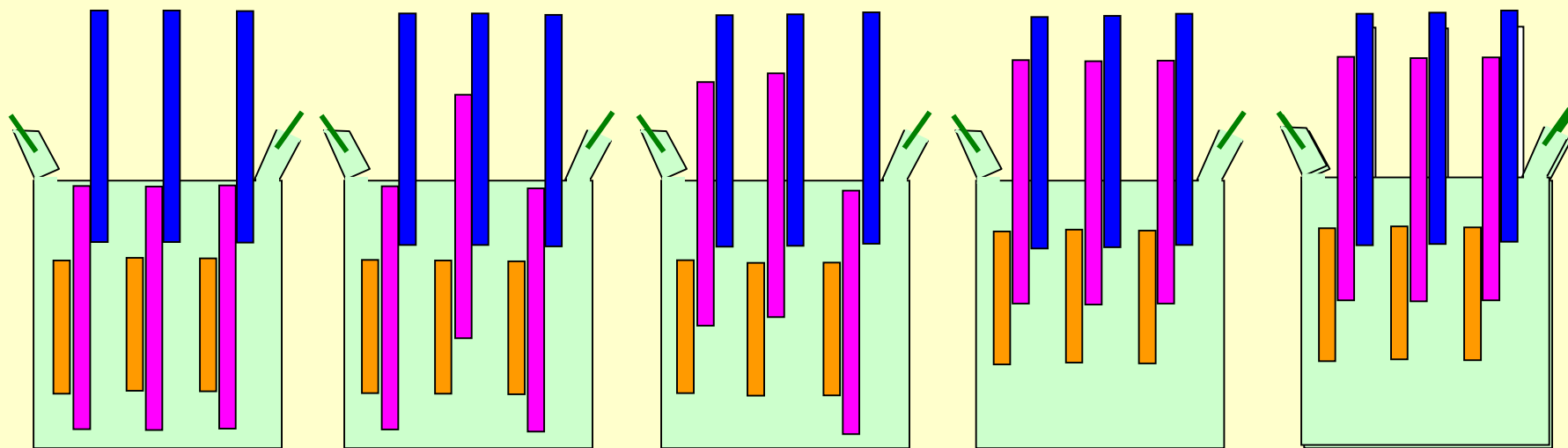
Si N est **égal** à F , la réaction est **auto-entretenu** (comme dans les centrales nucléaires en fonctionnement).

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

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



Schéma de pilotage



Combustibles

34 REP 900 MW (e)

24 REP 1 300 MW (e)

Premiers cœurs	900 MW	1 300 MW
enrichissement	1,8 2,4 3,1	2,1 2,6 3,1
tonnes d'UO₂ enrichi	82,22	118,0
Recharges annuelles	900 MW	1 300 MW
enrichissement	3,25	3,15
tonnes d'UO₂ enrichi	27,2	39,1

**⇒ chaque année, la France produit 1 700 tonnes
environ de combustibles usés**

**Pour mémoire, les USA produisent annuellement
+ 3 000 tonnes de CU**

Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Le combustible nucléaire

7 000 kg U naturel

50 kg U-235

6950 kg uranium 238

Enrichissement en U-235 à 3,5%
Rejet à 0,25%

1000 kg U
3,5% en 235

6000 kg U
0,25% en 235

3 ans en réacteur

8 kg U-235
9 kg Pu
948 kg U-238
35 kg PF

956 kg U
0,83%

35 kg PF

9 kg Pu

Enrichissement

120 kg

129 kg MOX

réacteur

Le combustible nucléaire

7 000 kg U naturel

50 kg U-235

6950 kg uranium 238

Enrichissement en U-235 à 3,5%
Rejet à 0,25%

1000 kg U
3,5% en 235

6000 kg U
0,25% en 235

3 ans en réacteur

44 kg

53 kg combustible RNR

Après passage en réacteur

9,5 kg Pu

6 kg PF

37,5 kg U appauvri

8 kg U-235

9 kg Pu

948 kg U-238

35 kg PF

956 kg U
0,83%

35 kg PF

9 kg Pu

Enrichissement



Et le surgénérateur ?

Principe :

un cœur fissile ^{239}Pu

entouré d'une couverture fertile ^{238}U



fissile

Après quelques années de fonctionnement, et production d'énergie,

on a fabriqué plus de combustible fissile qu'on en a consommé !

c'est la surgénération.



Et le surgénérateur ?

La surgénération n'est pas le seul concept intéressant dans ce type de réacteur

il nécessite : un cœur – pile à neutrons

une couverture qui peut contenir

- soit un élément fertile**
- soit un élément fissile**
- soit des éléments à vie longue (déchets) qu'il convient de transmuter**



Et le surgénérateur ?

C'est donc un réacteur électrogène qui

- 1 – assure **la maîtrise complète du plutonium**
- 2 – permet de résoudre, grâce à la transmutation, un des grands problèmes liés à **la gestion et au stockage des déchets radioactifs à vie longue**

En France :

Rapsodie (Cadarache) déclassé

Phénix (Marcoule) arrêté le 6 avril 2009

Superphénix (Creys-Malville) déclassé



Production française d'électricité

1955

50 milliards de kWh (TWh)

thermique classique

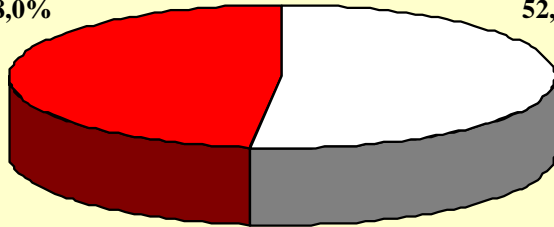
24 TWh

48,0%

hydraulique

26 TWh

52,0%



1980

247 milliards de kWh (TWh)

hydraulique

70 TWh

28,3%

nucléaire

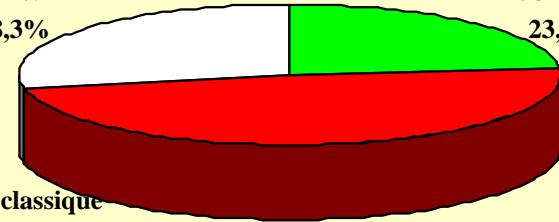
58 TWh

23,5%

thermique classique

119 TWh

48,2%



2005

547 milliards de kWh (TWh)

thermique classique

55 TWh

10,1%

hydraulique

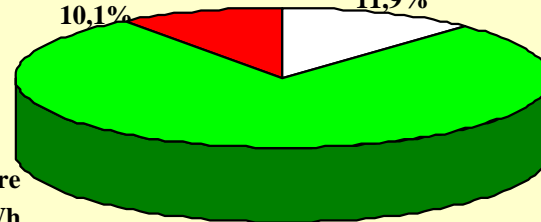
65 TWh

11,9%

nucléaire

427 TWh

78,0%



Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009

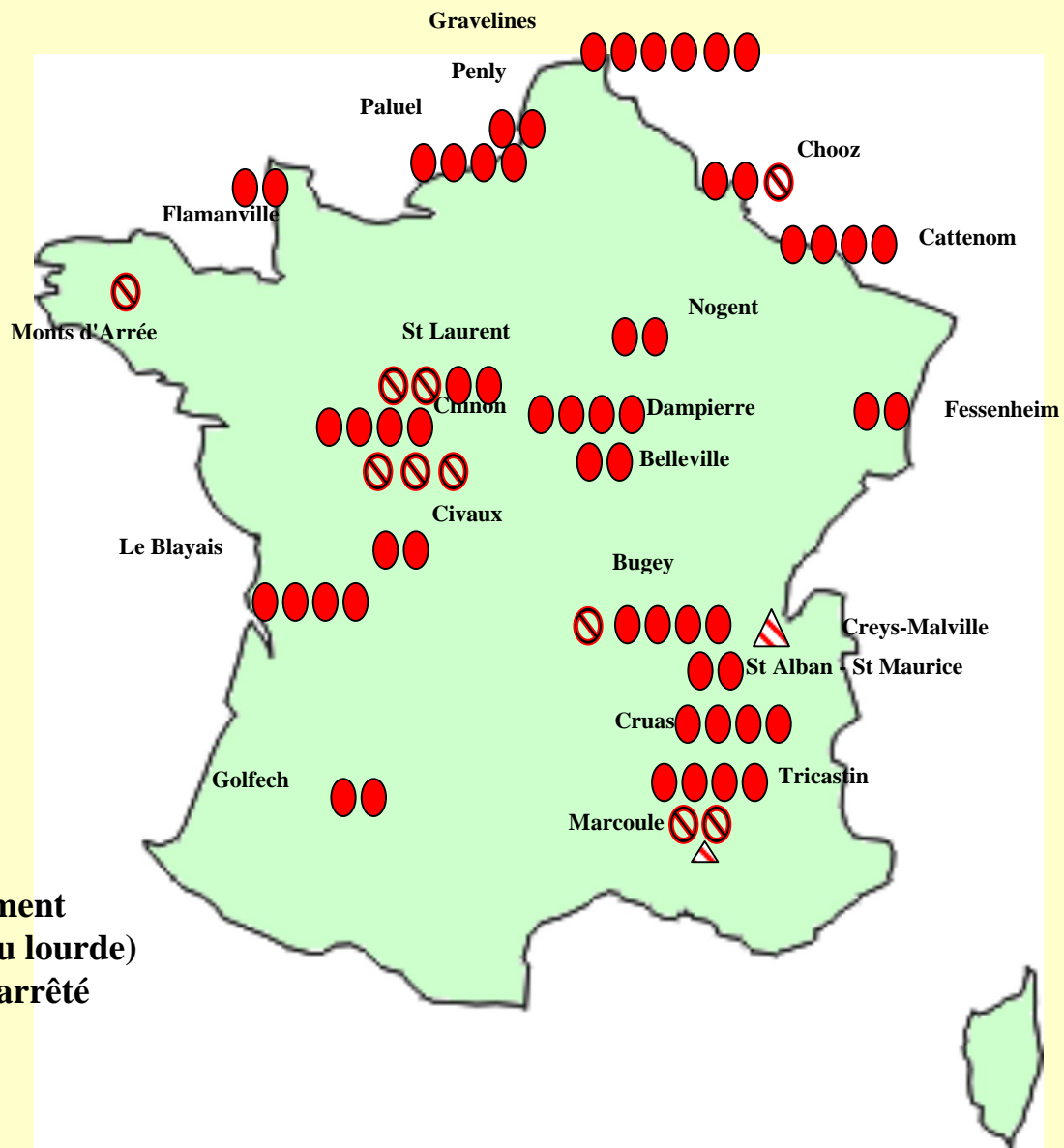


L'électricité d'origine nucléaire en Europe

Allemagne	31,8%
Belgique	55,1%
Espagne	22,9%
Finlande	26,6%
France	78,1%
Hongrie	33,8%
Lituanie	72,1%
Pays-Bas	3,8%
République Tchèque	31,2
Royaume-Uni	19,4%
Slovaquie	55,2%
Slovénie	38,8%
Suède	51,8%
<i>Suisse</i> <small>Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009</small>	40,0%



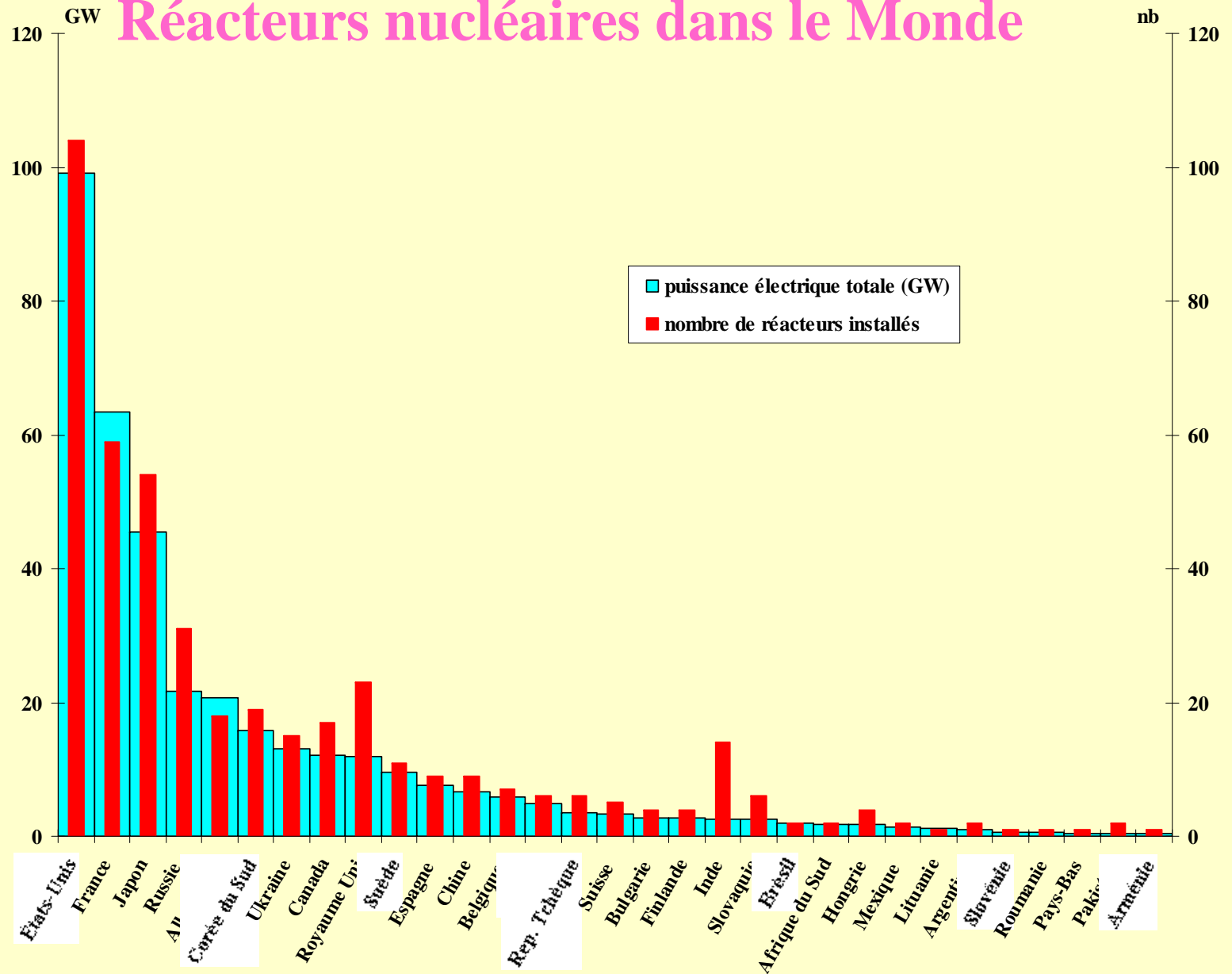
Sites électronucléaires en France



- Réacteur REP en fonctionnement
- ⊘ Réacteur arrêté (UNGG + eau lourde)
- ⚠ Réacteur à neutrons rapides arrêté



Réacteurs nucléaires dans le Monde



Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



émissions comparées pour 10 TWh d'électricité

	CO ₂	Particules fines			dose de radiation
		Suie	sulfates-nitrates	total	microsievert(s)
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	
Charbon	7 500 000	800	7 800	8 600	2
Pétrole	6 200 000	800	7 800	8 600	1
Gaz naturel	3 800 000	0	2 900	2 900	1
Bio (bois)	3 000 000	860	3 000	3 900	
Nucléaire	75 000	0	0	0	0,2
Hydroélect	30 000	0	0	0	
en. Éolienne	75 000	0	0	0	
en. Solaire	55 000	0	0	0	

10 TWh : quantité d'électricité produite par an par une centrale nucléaire de 1 300 MW

Doses naturelles de radiations en Europe : entre 1000 et 4000 µSv

Source : Commission de la Science et de la Technologie, Assemblée Parlementaire, Conseil de l'Europe



Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Le projet EPR

**1992 : Lancement du projet entre FRAMATOME, SIEMENS et les
Électriciens franco- allemands**

**1993 : Recommandations communes des autorités de sûreté franco-allemandes
au sujet des nouveaux réacteurs nucléaires**

1995 : Engagement de l'avant-projet détaillé

1999 : Fin de l'avant-projet détaillé de l'îlot nucléaire

2000 : Conclusions de l'autorité de sûreté sur le projet

2003 : EPR choisi par TVO , l'électricien finlandais

2004 : FLAMANVILLE retenu pour EPR France



Objectifs de sûreté

- 1 : réduire la probabilité d'occurrence d'un accident grave**
- 2 : Prendre en compte l'accident grave à la conception**
- 3 : Renforcer la protection contre les agressions**



EPR : un choix industriel pour la FINLANDE.....

.....et bientôt pour la FRANCE

... à Flamanville



Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009

Flamanville – la Hague

2008	commande du combustible
2008/11	enrichissement - fabrication
2012	livraison
2012/17	en réacteur
2019	retour à la Hague
2027	retraitement
2031	fabrication du Mox et livraison
2035	déchargement du Mox
2037	retour à la Hague



Réacteur d'après-demain

→ Fission : réacteurs de 4^{ème} génération

**Gas-cooled
Fast
Reactor**

**Lead-cooled
Fast
Reactor**

**Molten
Salt
Reactor**

**Sodium-cooled
Fast
Reactor**

**SuperCritical
Water-cooled
Reactor**

**Very High
Temperature
Reactor**

*Les filières à neutrons rapides font passer les réserves de
67 ans à plusieurs dizaines de siècles.*

Elle en fait même une source d'énergie renouvelable.



Forum International Génération IV

**Gas-cooled
Fast
Reactor**

**Lead-cooled
Fast
Reactor**

**Molten
Salt
Reactor**

**Sodium-cooled
Fast
Reactor**

**SuperCritical
Water-cooled
Reactor**

**Very High
Temperature
Reactor**

10 pays membres (en 2001) : Argentine, Brésil, Canada, France, Japon, Corée du Sud, Afrique du Sud, Suisse, Royaume-Uni, USA. Un 11^{ème} en 2003 : la Communauté Européenne ; le 30 novembre 2006, la Russie et la Chine rejoignent le Forum.

4 thèmes majeurs :

Développement durable

Compétitivité (ouverture aux nouvelles applications)

Sûreté et fiabilité

Résistance à la prolifération



Forum International Génération IV

**Gas-cooled
Fast
Reactor**

**Lead-cooled
Fast
Reactor**

**Molten
Salt
Reactor**

**Sodium-cooled
Fast
Reactor**

**SuperCritical
Water-cooled
Reactor**

**Very High
Temperature
Reactor**

	Arg	Brés	Can	Fr	Jap	Co_S	Af_S	Suis	UK	USA
GFR	N	N	O	F	M	M	M	F	F	A
LFR	N	N	O	B	B	B	O	A	O	M
MSR	N	N	O	B	O	B	O	O	B	B
SFR	N	N	O	F	A	F	O	O	M	M
SWR	N	N	A	M	M	M	O	F	B	F
HTR	N	N	O	A	F	F	M	M	F	M

A : animateur **N** : neutre **implication** forte **F**, moyenne **M**, basse **B**, nulle **O**



Forum International Génération IV

**Gas-cooled
Fast
Reactor**

2

**Lead-cooled
Fast
Reactor**

5

**Molten
Salt
Reactor**

5

**Sodium-cooled
Fast
Reactor**

2

**SuperCritical
Water-cooled
Reactor**

4

**Very High
Temperature
Reactor**

1

La France :

Pays animateur pour le VHTR

Forte implication pour le GFR et le SFR

Implication moyenne pour le SWR et basse pour le LFR et le MSR



Le réacteur d'après-après demain

→ Réacteurs à fusion

Projet ITER :

prototype pour

2050 - 2060

Source d'énergie inépuisable

Technologie encore plus lourde que pour la fission

**Déchets : autant de Bq que pour la fission par kWh fourni
mais tritium et produits d'activation (neutrons de 14 MeV)**



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 1 : anomalie de fonctionnement (pouvant éventuellement conduire à l'utilisation justifiée de systèmes de sécurité)

1 par an et par centrale française

1

0

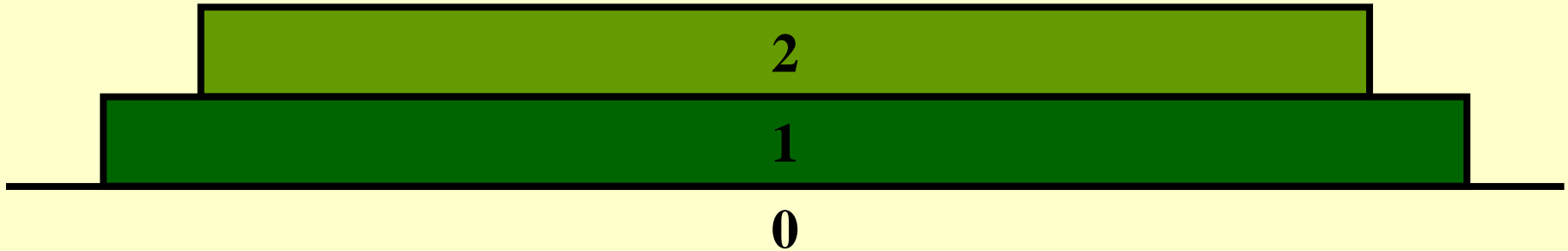
Aucune importance sur le plan de la sûreté



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 2 : incident ayant potentiellement des conséquences significatives pour la sûreté et/ou entraînant des réparations ou des travaux prolongés

1 tous les dix ans par centrale française

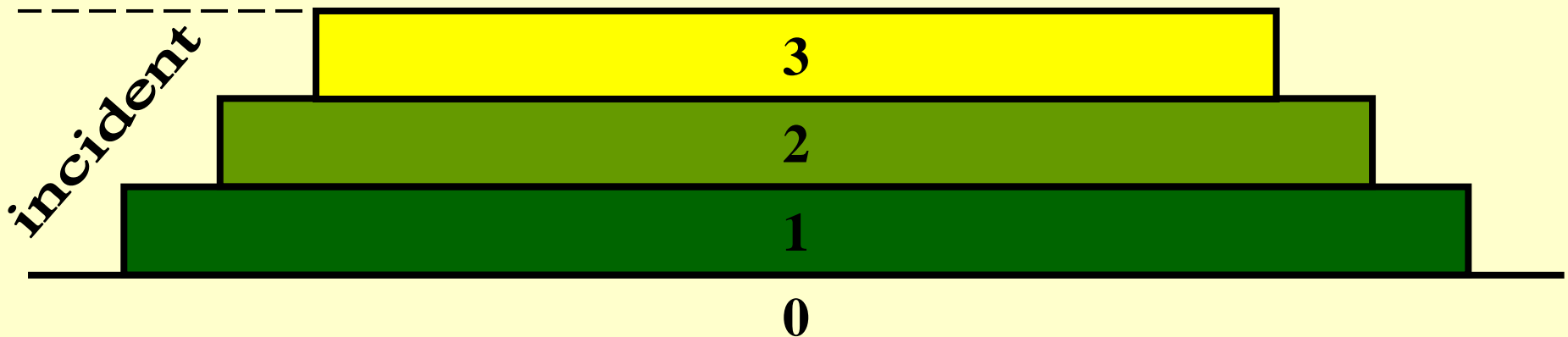


Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 3 : incident affectant la sûreté

Par exemple : incident conduisant à des rejets \geq au dixième
des limites annuelles autorisées

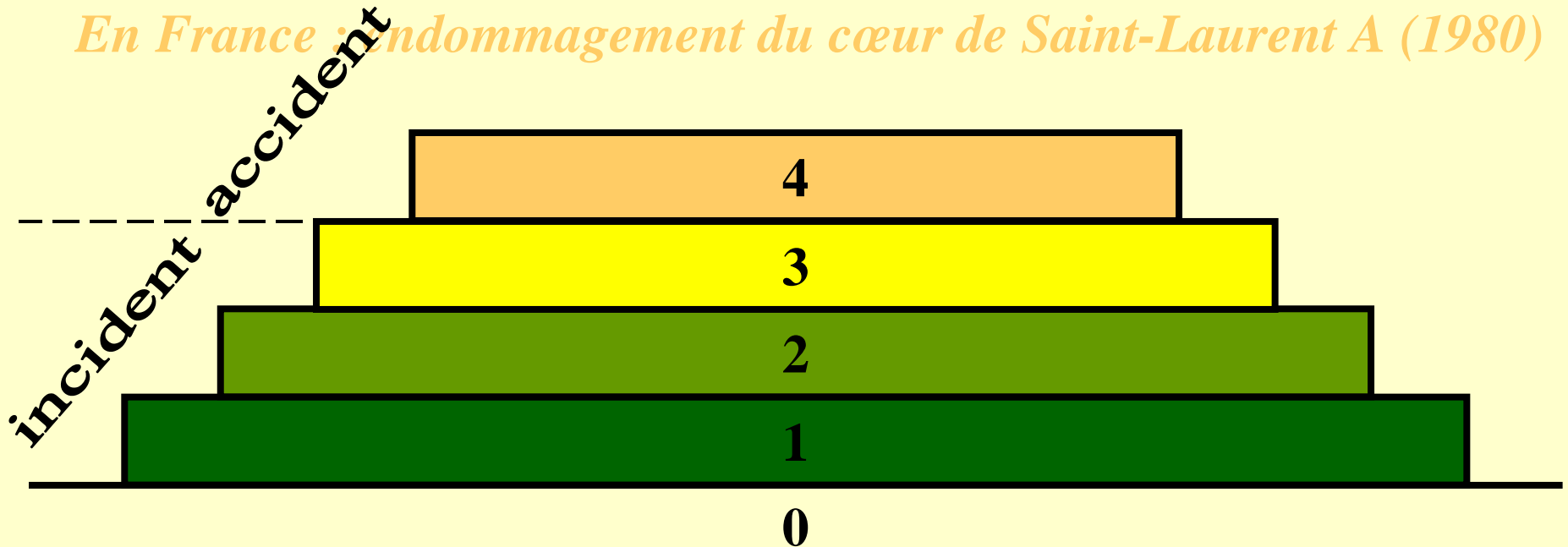
1 tous les 100 ans par centrale française



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 4 : accident sur l'installation.
Par exemple endommagement partiel du cœur

En France : endommagement du cœur de Saint-Laurent A (1980)

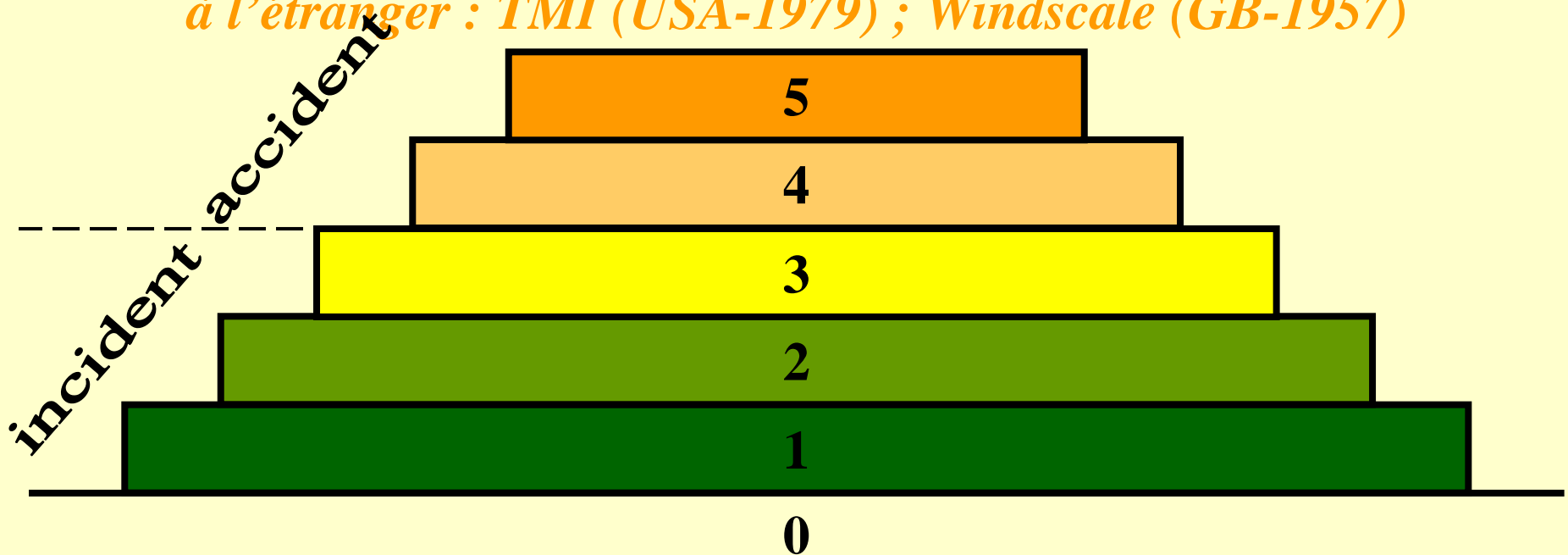


Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 5 : accident présentant des risques à l'extérieur du site

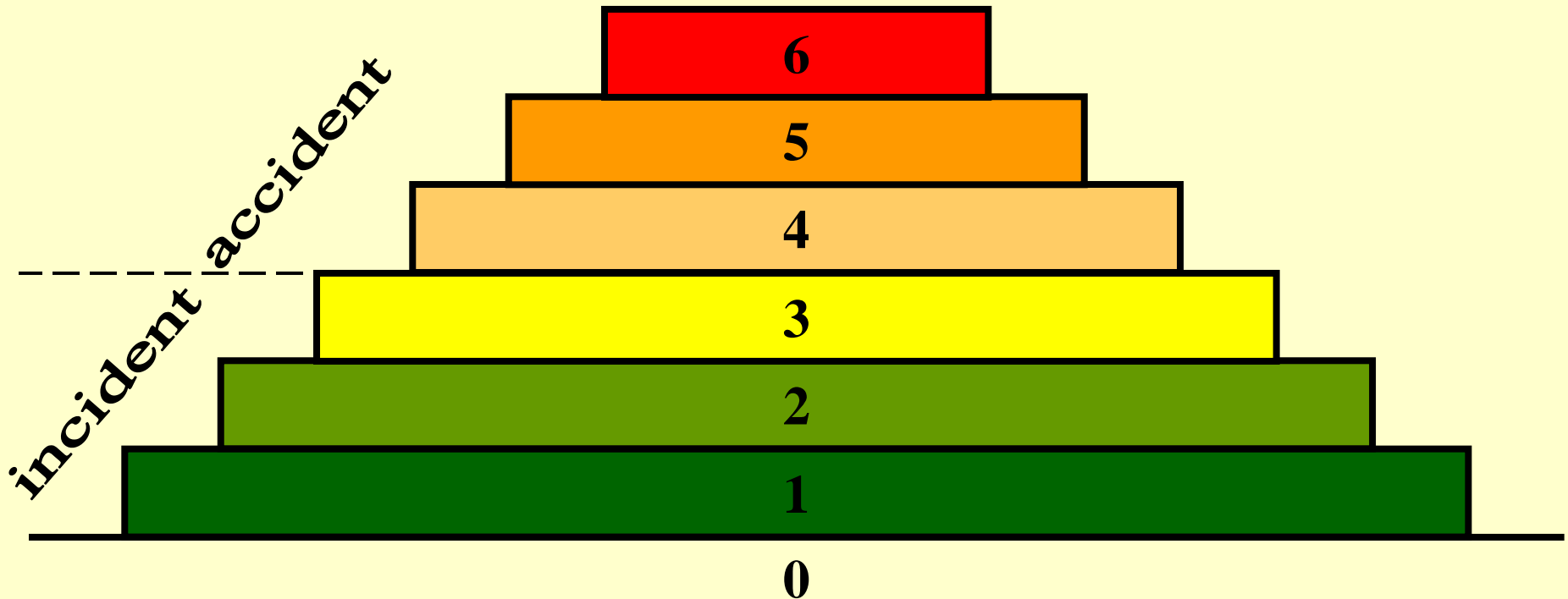
Pas d'exemple en France

à l'étranger : TMI (USA-1979) ; Windscale (GB-1957)



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)

Niveau 6 : accident majeur avec rejet à l'extérieur d'une fraction significative de l'inventaire du cœur en produits de fission

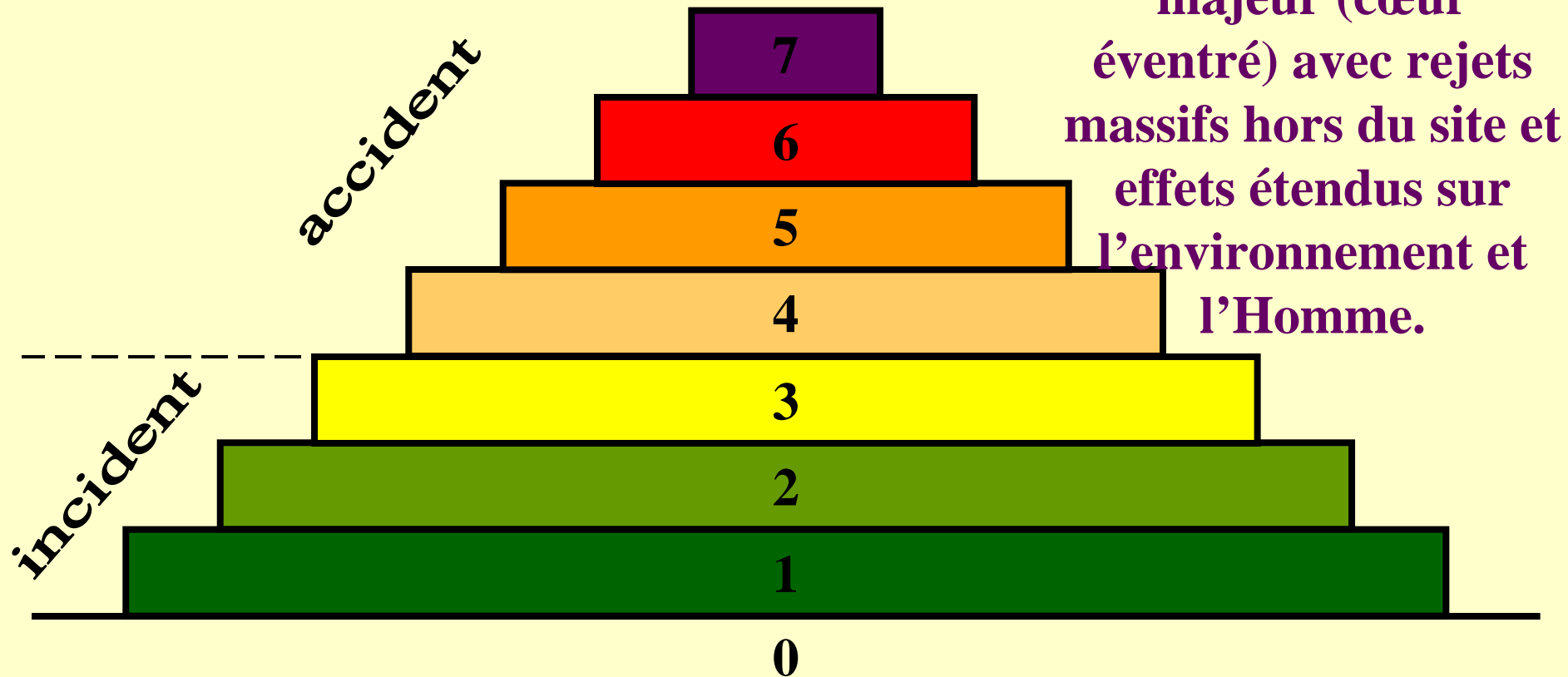


*Un seul exemple au monde : usine de retraitement de Kyshtym
en Russie (1957)*

Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires (dite échelle INES)



*Un seul exemple au monde : réacteur de Tchernobyl en
Ukraine (1986)*

Professeur Jacques Foos - 5 octobre 2009



Accident de TMI

(Three Mile Island)

Pennsylvanie - 18 km capitale Harrisburg

900 MWe mise en service le 30-12-78

accident le 28-03-79 à 4 h du matin

Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009



impact

Impact quasi-nul sur la population (teneur en iode variant entre 0,1 et 0,3% de la valeur maximale admissible dans un rayon de 20 km autour de la centrale).

Une personne qui serait demeurée à la limite du site de la centrale pendant toute la durée de l'incident : 0,8 mSv

1,5 Sv cumulé pour les 250 travailleurs



Tchernobyl

Réacteur de type RBMK

modérateur : graphite

fluide caloporteur : eau ordinaire

Mise en service du réacteur n° 4 : décembre 1983

Accident le 25-04-1986

à 21 h 23 GMT



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« Jusqu'à 4 000 personnes au total pourraient décéder à terme des suites d'une radio-exposition consécutive à l'accident survenu il y a 20 ans dans la centrale nucléaire de Tchernobyl. »



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« Fin juin 2005, moins de 50 décès peuvent être attribués directement à cette catastrophe. Pratiquement tous : membres des équipes de sauvetage, exposés à des doses très élevées et morts dans les mois qui ont suivi l'accident. D'autres ont survécu jusqu'en 2004. »



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« Sur les 4 000 patients atteints d'un cancer de la thyroïde (essentiellement enfants et adolescents au moment de l'accident), imputable à la contamination résultant de l'accident, tous ont guéri, à l'exception de 9 qui sont décédés. »



La situation sanitaire sur place 20 ans après

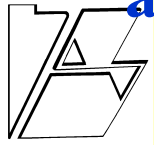
Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« Aucune indication d'une quelconque augmentation de l'incidence de la leucémie et du cancer chez les habitants affectés par Tchernobyl (on estime à cinq millions le nombre de personnes résidant actuellement dans des zones contaminées par des radionucléides à la suite de l'accident). La classification actuelle des zones doit être revue et assouplie à la lumière des nouvelles conclusions. »

Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« La plupart des membres des équipes d'intervention et des habitants des zones contaminées ont reçu **des doses à l'organisme entier relativement faibles**, comparables aux niveaux du fond naturel de rayonnement. Aucune indication ni probabilité d'une **diminution de la fertilité** parmi les populations touchées, ni aucune indication d'une **augmentation des malformations congénitales** pouvant être attribuées à une radio-exposition n'a donc pu être établie. »

Professeur Jacques Foos -5 octobre 2009



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

«La pauvreté, les maladies liées au 'mode de vie' qui se généralisent dans l'ex-Union soviétique, et les troubles mentaux constituent, pour les populations locales, une menace beaucoup plus grave que l'exposition aux rayonnements. »



La situation sanitaire sur place 20 ans après

Rapport ONU du 5 septembre 2005

OMS, AIEA, FAO, UNSCEAR, PNUD, PNUE, OCHA, BM

Rapport de 600 pages en 3 volumes, synthèse d'une centaine de communications émanant de scientifiques, d'économistes et de spécialistes de la santé.

« La persistance de mythes et d'idées fausses sur le risque d'irradiation ont provoqué chez les habitants des zones touchées un 'fatalisme paralysant'. »

