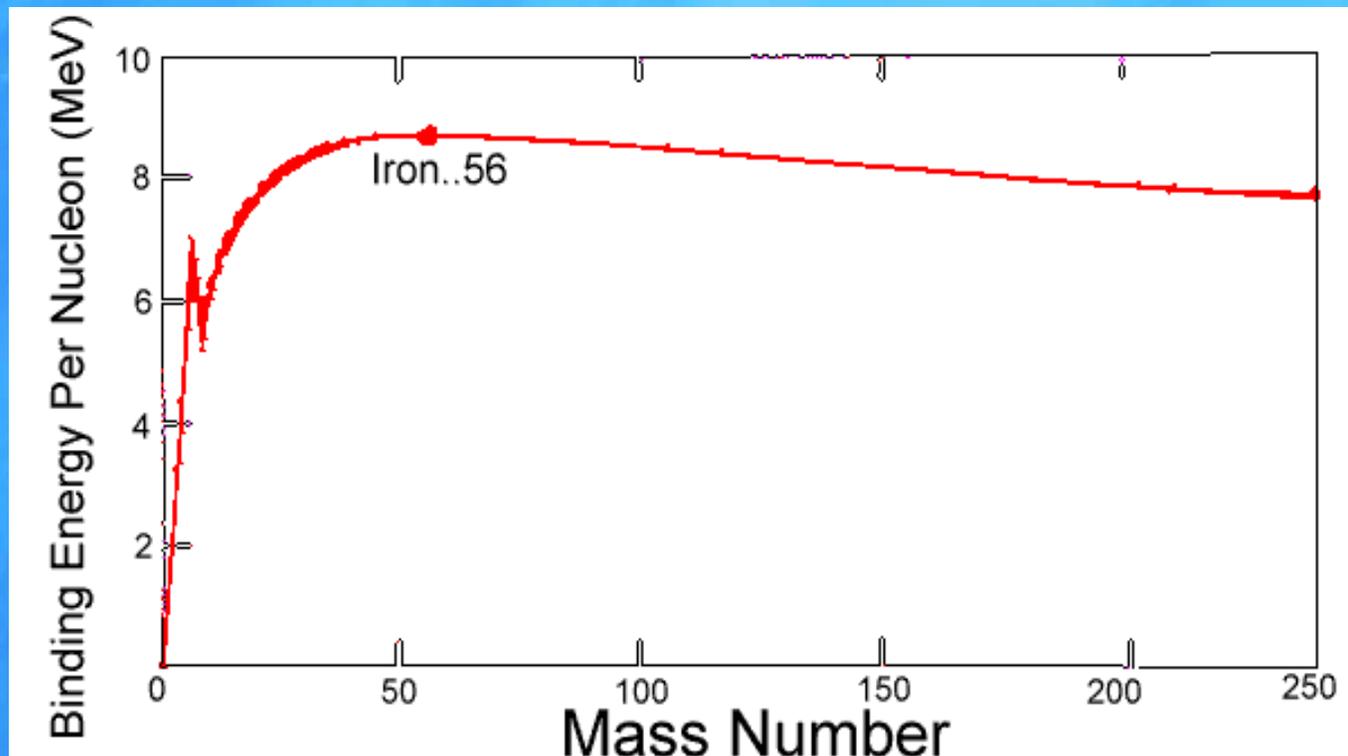


Le nucléaire

- La fission
 - Quelques rappels
 - Réacteurs à neutrons lents
 - Réacteurs à neutrons rapides
 - Le cycle du combustible (utilisé pour la fission)
 - Le problème des déchets
- La fusion
 - Quelques rappels
 - le projet ITER
- Le coût (économique et écologique) du nucléaire

Quelques rappels

L'énergie de liaison d'un noyau atomique est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en ses nucléons



Quelques rappels

FISSION: nous dissociions un noyau X en deux noyaux U et V

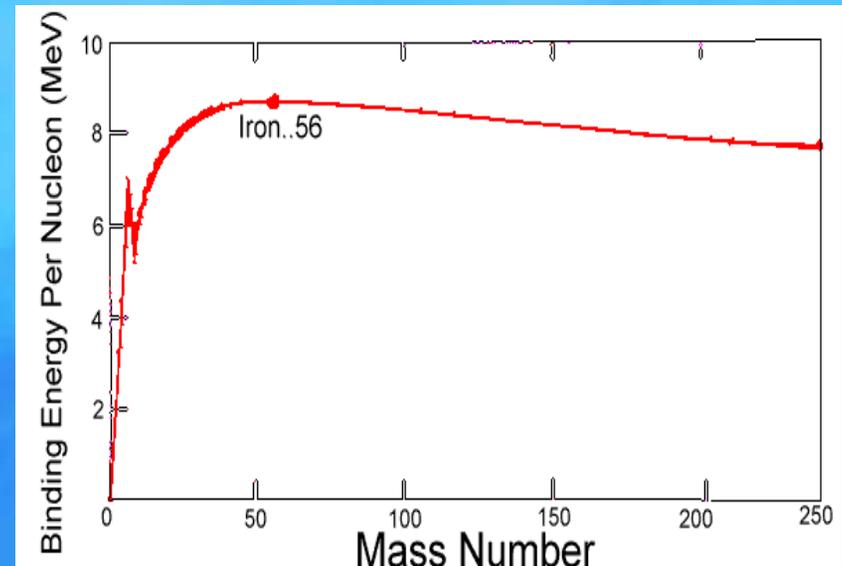
Soit W_i l'énergie de liaison d'un noyau i

=> la fission dégagera de l'énergie si:

$$W_X < W_U + W_V$$

=> en pratique, on utilise des noyaux de masse atomique comprise entre 90 et 100

ex.: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu



Quelques rappels

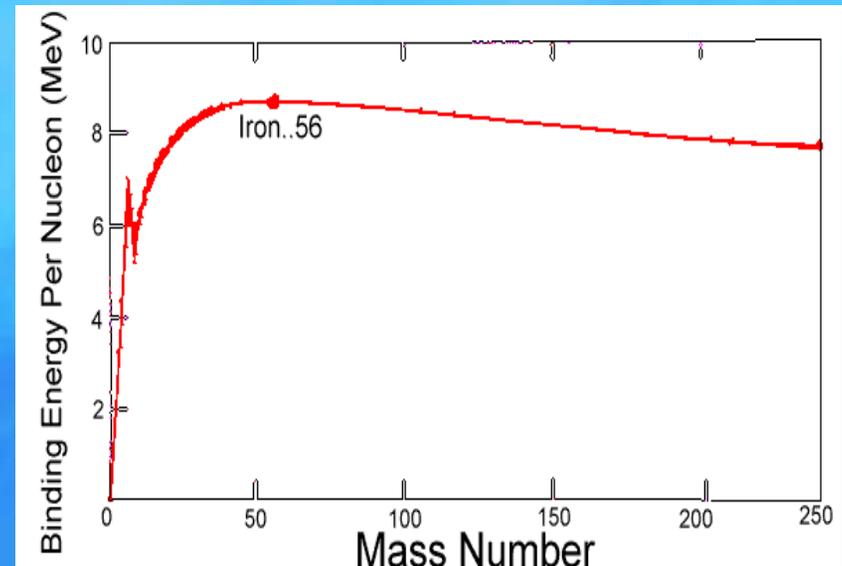
FUSION: nous créons un noyau X à partir de deux noyaux U et V

Soit W_i l'énergie de liaison d'un noyau i

=> la fusion dégagera de l'énergie si:

$$W_X > W_U + W_V$$

En pratique, on utilise un noyau de deutérium (^2H) et un noyau de tritium (^3H) qu'on fusionne en un noyau d'hélium et un neutron



Quelques rappels: la fission

Au-delà de $Z=100$,
le noyau est
instable, et sa
fission est
instantanée

(Mendélévium
-> Ununoctium)

Table périodique des éléments

Groupe → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

↓ Période

1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

* Lanthanides

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

** Actinides

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Métaux alcalins	Métaux alcalino-terreux	Lanthanide	Actinides	Métaux de transition
Métaux pauvres	Métalloïdes	Non-métaux	Halogènes	Gaz rares

Quelques rappels: la fission

Pour les atomes dont $90 \leq Z \leq 100$, le noyau possède une période de demi-vie.

ex.:

^{235}U $4,5 \cdot 10^9$ ans
 ^{238}U $0,7 \cdot 10^9$ ans
 ^{239}Pu $2,4 \cdot 10^4$ ans

Table périodique des éléments

Groupe →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
↓ Période																			
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	* 	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	** 	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
			* Lanthanides																
			** Actinides																
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		
			Métaux alcalins			Métaux alcalino-terreux			Lanthanide			Actinides			Métaux de transition				
			Métaux pauvres			Métalloïdes			Non-métaux			Halogènes			Gaz rares				

Quelques rappels: la fission

On peut toutefois provoquer la fission de ces noyaux, en leur apportant de l'énergie

En pratique, on utilise des neutrons

$$\text{Energie} = E_C + \Delta E_L \geq E_{CR}$$

E_C = énergie cinétique du neutron

ΔE_L = énergie libérée par la liaison du neutron avec le noyau

E_{CR} = énergie critique

Quelques rappels: la fission

Nombre de neutrons **impair** $\Rightarrow \Delta E_L$ plus élevée

Nombre de neutrons **pair** $\Rightarrow \Delta E_L$ plus faible

\Rightarrow pour les noyaux possédant un nombre de neutrons pair, il faudra utiliser des neutrons possédant une énergie cinétique plus grande

Ex.: Pour l' ^{238}U , il faut $E_C \geq 0,8 \text{ MeV}$
Pour l' ^{235}U , E_C peut être $\leq 1 \text{ eV} !!!$

Quelques rappels: la fission

Différents types de neutrons:

Neutrons rapides: $0,8 \text{ MeV} \leq E_C \leq 2 \text{ MeV}$
peuvent provoquer la fission de l' ^{238}U , de l' ^{235}U et du ^{239}Pu

Neutrons épithermiques: $1 \text{ eV} \leq E_C \leq 0,8 \text{ MeV}$
ne provoquent aucune fission, sont captés par les noyaux d'Uranium et de Plutonium

Neutrons lents: $E_C \leq 1 \text{ eV}$
peuvent provoquer la fission de l' ^{235}U et du ^{239}Pu ,
mais pas de l' ^{238}U

Quelques rappels: la fission

=> 2 types de réacteurs:

- réacteurs à neutrons lents
- réacteurs à neutrons rapides

Réacteurs à neutrons lents

fission de l' ^{235}U

La probabilité de fission de l' ^{235}U est beaucoup plus élevée si on utilise des neutrons lents plutôt que des neutrons rapides

=> on utilise des neutrons lents

Or les neutrons résultant de la fission de l' ^{235}U sont des neutrons rapides !

=> il faut ralentir les neutrons aussitôt après leur émission

=> utilisation d'un **modérateur**

Réacteurs à neutrons lents

Les modérateurs les plus efficaces pour ralentir les neutrons sont:

- l'eau « légère »: H_2O
- l'eau « lourde »: ${}^2\text{H}_2\text{O}$ dont l'hydrogène est remplacé par du deutérium
- le carbone

Le modérateur le plus efficace est l'hydrogène, mais, comme celui-ci a une capacité de capture de neutron assez élevée, il n'est pas le seul utilisé

Réacteurs à neutrons lents

Utilisation de l'eau « légère »: utilisée dans la majorité des pays

L'eau utilisée est

- soit sous pression
- soit à l'état de vapeur

Eau sous pression => l'eau sert d'agent modérateur ET d'agent caloporteur. Le circuit primaire sert à réchauffer l'eau d'un circuit secondaire qui, lui, passera par les turbines. (ex.: centrales belges)

Eau à l'état de vapeur => l'eau radioactive passera directement dans les turbines (plus simple, mais plus délicat) (surtout aux USA, Allemagne, Suède et Japon)

Réacteurs à neutrons lents

Utilisation de l'eau « lourde »: surtout au Canada

avantages de l'eau « lourde »: bon agent modérateur, et capture moins de neutrons que l'eau « légère » => on peut utiliser de l'Uranium moins enrichi que dans le cas de l'eau « légère »

désavantages: la fabrication et l'importation de l'eau « lourde » augmente les coûts
=> procédé abandonné en Europe

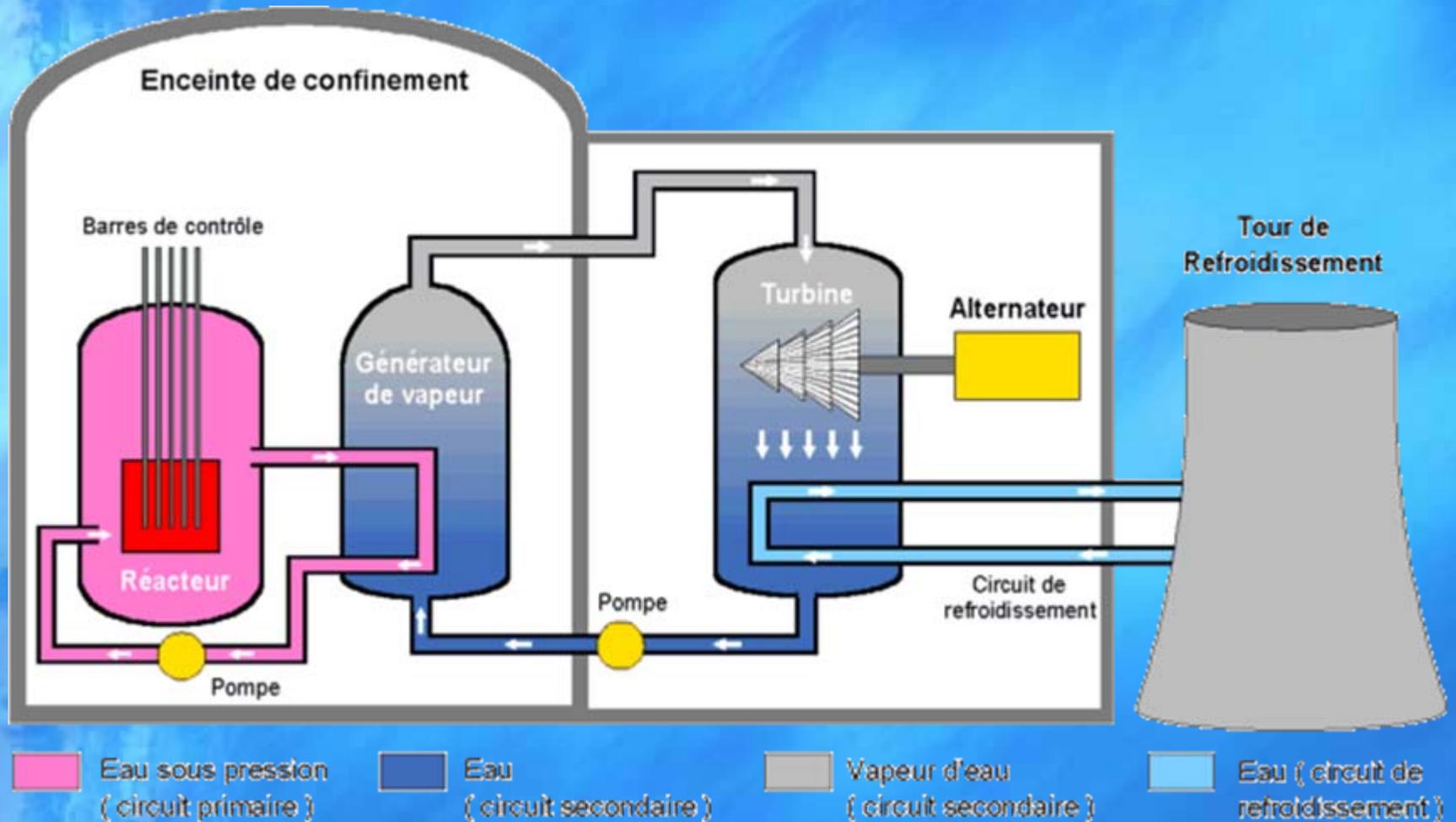
Réacteurs à neutrons lents

Utilisation du carbone: surtout en Grande-Bretagne, et un peu en France

Le carbone graphite (solide) est utilisé comme agent modérateur.

Le CO_2 est utilisé pour transporter la chaleur jusqu'au circuit secondaire qui, lui, contient de l'eau qui va se vaporiser et faire tourner les turbines...

Réacteurs à neutrons lents



Réacteurs à neutrons rapides (ou « surgénérateurs »)

Ces réacteurs ont un coût initial plus élevé que les autres, ce qui explique leur faible succès dans le passé (seulement 2 en Allemagne et 3 en France).

Toutefois, ces générateurs pourraient, à l'avenir, être beaucoup plus rentables que ceux à neutrons lents.

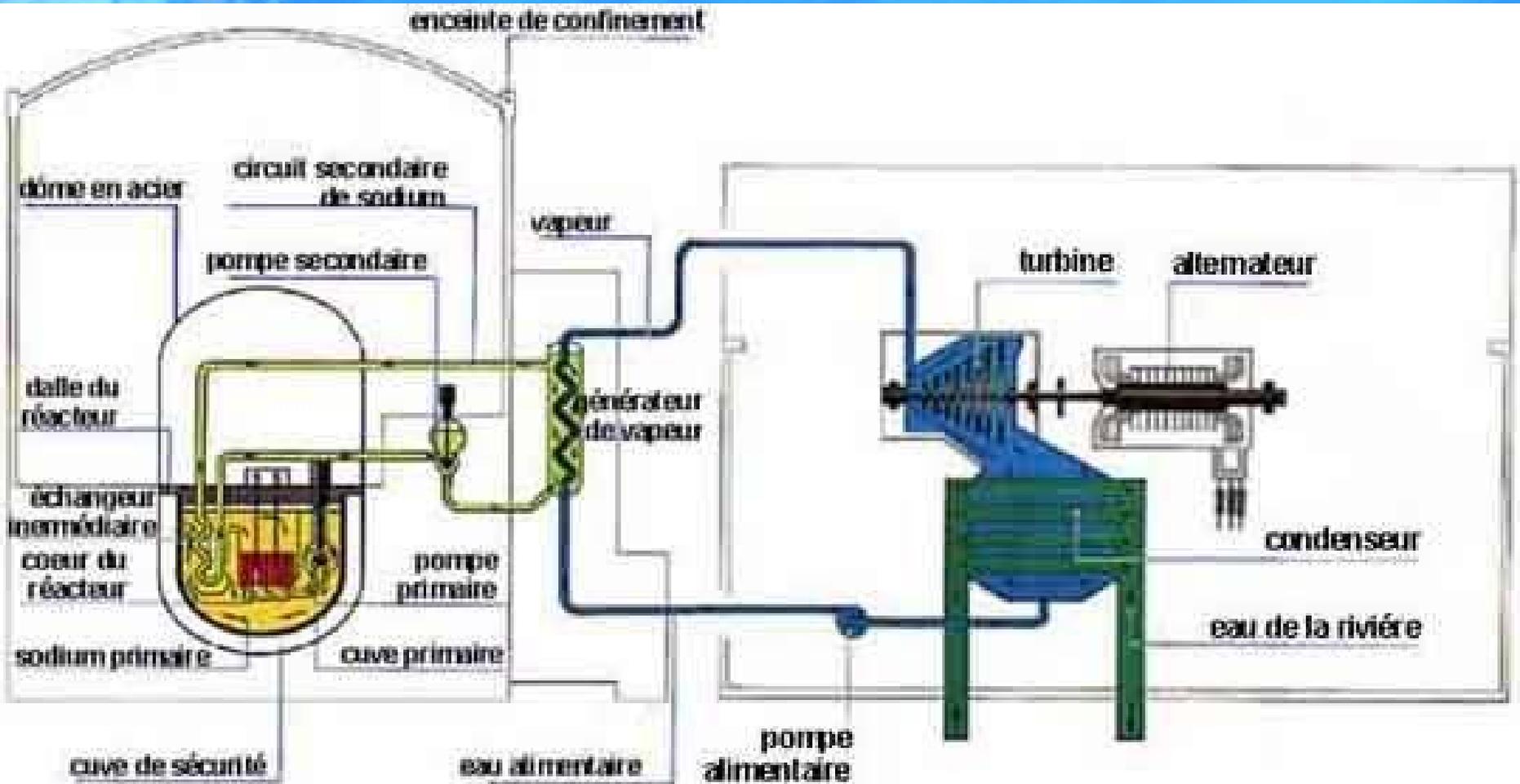
En effet, les neutrons rapides permettent aussi la fission de l' ^{238}U , du ^{232}Th , mais aussi les noyaux lourds “transuraniens” (produits de la transmutation du plutonium dans les réacteurs).

Réacteurs à neutrons rapides (ou « surgénérateurs »)

Ces éléments transuraniens sont des déchets dont la période de demi-vie est longue (plus de 3000 ans)

=> Les réacteurs à neutrons rapides seraient une solution car on ne devrait plus stocker ces déchets

Réacteurs à neutrons rapides (ou « surgénérateurs »)



Le cycle du combustible (pour les réacteurs à neutrons lents)

- Extraction du minerai
- Concentration et raffinage du minerai
- Enrichissement de l'Uranium
- Traitement des déchets

Le cycle du combustible

Extraction du minerai

Les composés d'uranium (oxydes, silicates, phosphates) se dispersent facilement dans les roches et les eaux de ruissellement

⇒ La teneur en uranium est faible dans les gisements

Teneur moyenne: 0,2 %

Maximum: Canada: 12 %

Minimum: Namibie: 0,035 %

N.B.: en Europe: seulement en France

Le cycle du combustible

Concentration et raffinage du minerai

Concentration du minerai -> sur le lieu d'extraction

⇒ 1000 t de minerai -> 1,5 t de “sel jaune” (Na_2UO_4)
contenant 75% d'uranium

Raffinage du minerai (dans des usines de raffinage):
 $\text{Na}_2\text{UO}_4 \Rightarrow \text{UF}_4$

Pour les réacteurs graphite-gaz, on réduit du UF_4 par le calcium, pour obtenir du combustible

Pour les autres réacteurs, on crée du UF_6 , puis on l'envoie à des usines d'enrichissement de l'uranium

Le cycle du combustible

Enrichissement de l'uranium

Pour les réacteurs utilisant de l'eau comme modérateur:
Problème car l'eau absorbe beaucoup de neutrons

⇒ Pour compenser, on augmente la teneur en ^{235}U

On passe de 0,7% d' ^{235}U (contre 99,3% d' ^{238}U) à 3,25% d' ^{235}U (contre 96,75 d' ^{238}U).

⇒ Deux procédés: diffusion gazeuse et ultracentrifugation

Le cycle du combustible

Traitement des déchets à faible radioactivité

Déchets liquides (ex.: eaux de vidange, échantillons prélevés de l'eau du circuit primaire, ...)

⇒ Traités sur place

Déchets gazeux (ex.: réservoirs contenant les gaz de fission, air de ventilation des bâtiments, ...)

⇒ Stockés de 60 à 90 jours, puis rejetés dans l'atmosphère

Déchets solides (filtres, gants contaminés, ...)

⇒ Stockés dans du ciment sur le site de la centrale

Le cycle du combustible Traitement des déchets à moyenne ou haute radioactivité

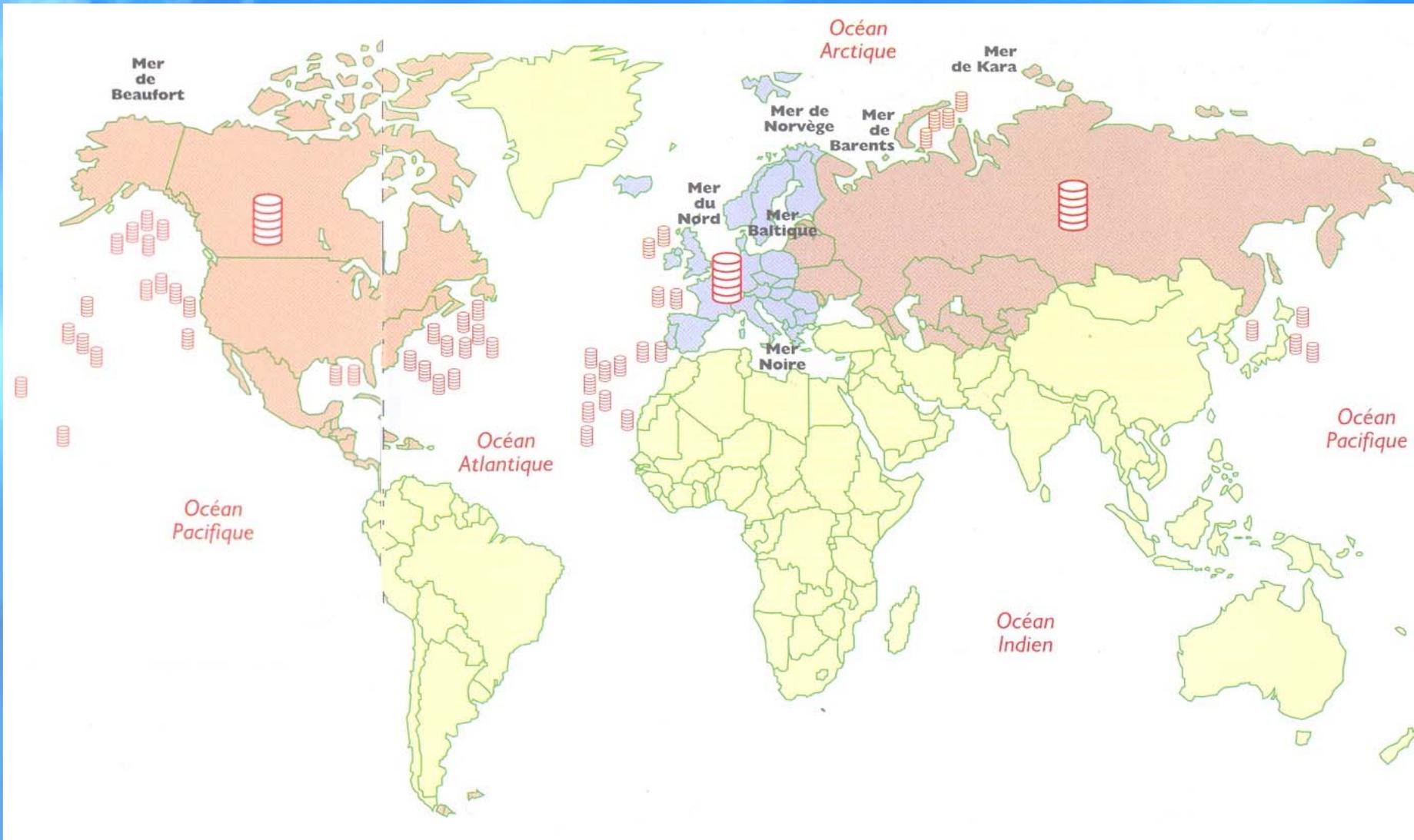
Ces déchets sont le combustible utilisé

On sépare les différents constituants

⇒ Uranium et plutonium => usines de raffinage

⇒ Autres éléments: stockés dans des sites protégés

Le stockage des déchets



Le stockage des déchets

Avant 1982, on stockait les déchets au fond des mers...

Depuis, les déchets sont stockés soit

- sous terre (en Europe) pour les déchets moyennement radioactifs
 - > sites en Espagne, France, Allemagne, Grande-Bretagne, Finlande, et sous la mer Baltique (pour la Suède)
- dans les centrales ou usines de retraitement de déchets
 - => tous les déchets en Amérique du Nord
 - => seulement les déchets hautement radioactifs en Europe

Le stockage des déchets

Avant 1982, on stockait les déchets au fond des mers...

Depuis, c'est interdit...

- dans les pays de l'ex-URSS, on parle de 35 sites en-dehors des centrales
- ces pays ont toutefois continué à déverser des déchets (même hautement radioactifs) dans la mer des Barents et la mer de Kara... et ce jusque 1993



Fusion thermonucléaire: un peu de physique...

Fission:

<i>Énergie de fission de $^{235}_{92}\text{U}$</i>	énergie MeV	% énergie totale	Commentaire
Énergie cinétique des fragments de fission	166	81,5	énergie instantanée localisée
Énergie cinétique des neutrons de fission	5	2,5	énergie instantanée délocalisée
Énergie des rayons γ de fission	8	3,9	
Énergie des neutrinos	11	5,5	
Total	190	93,1	énergie instantanée
Énergie de radioactivité β des produits de fission	7	3,4	énergie différée
Énergie de radioactivité γ des produits de fission	7	3,4	
Total	14	6,9	

Fusion thermonucléaire: un peu de physique...

Fission:

La fission d'un noyau d' ^{235}U libère 204 Mev

Fusion:



Deutérium -> présent en grande quantité dans l'eau de mer
Tritium -> période de demi-vie de 12,6 ans -> plus rare

Mais les neutrons possèdent 80% de l'énergie produite

-> on les absorbe avec du Lithium:



Fusion thermonucléaire: un peu de physique...



N.B.: le Lithium est abondant dans la croûte terrestre
(92,5% de ${}^7\text{Li}$ et 7,5% de ${}^6\text{Li}$)

=> avantage: la réaction produit du tritium

=> désavantage: la section efficace du Lithium est environ
100 fois moins importante entre 1 et 100 keV que celle de
la réaction D-T

-> importantes recherches à ce sujet

Fusion thermonucléaire: un peu de physique...

EN RESUME:

Fission:

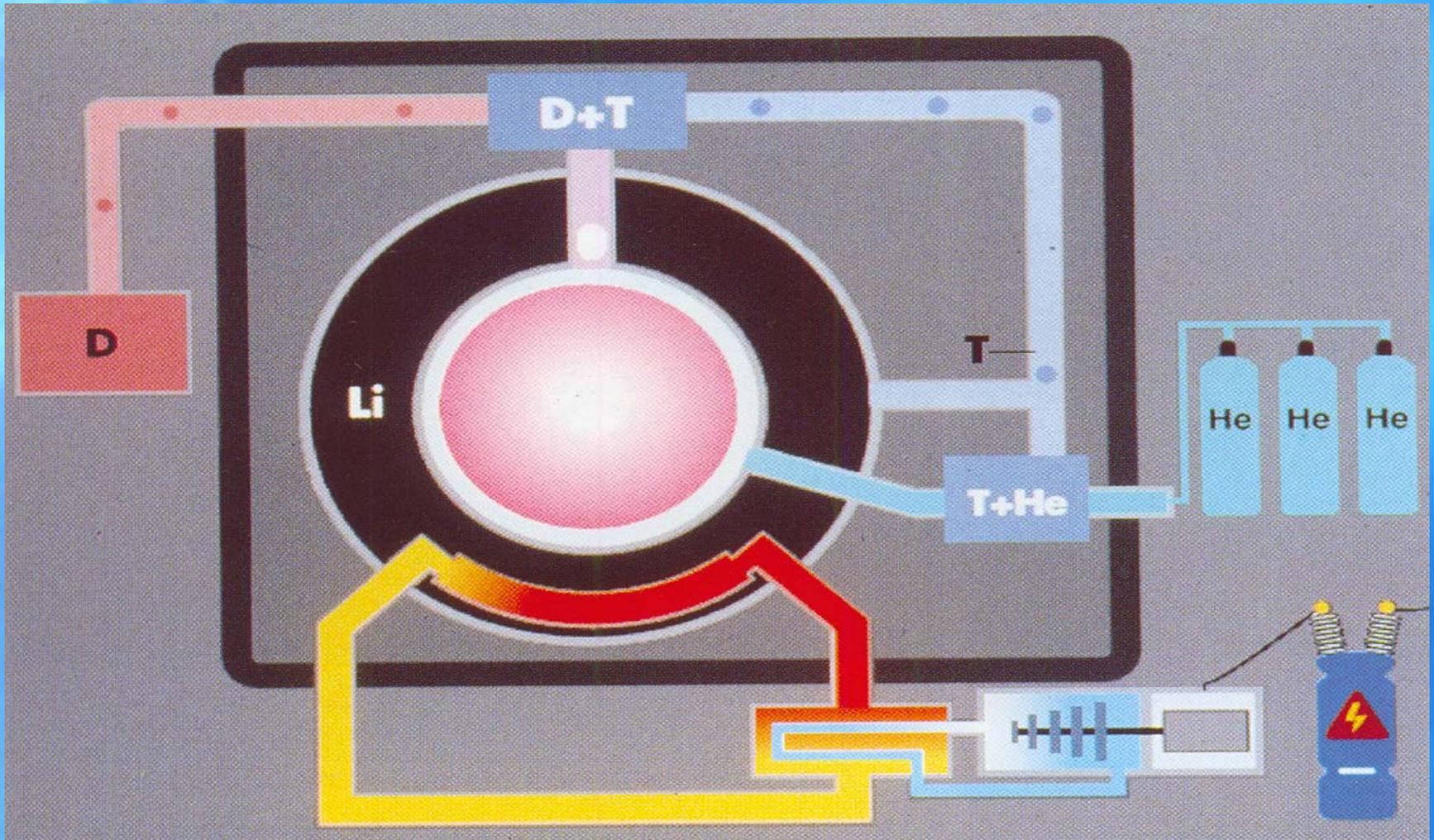
La fission d'un noyau d' ^{235}U libère 204 MeV

Fusion:

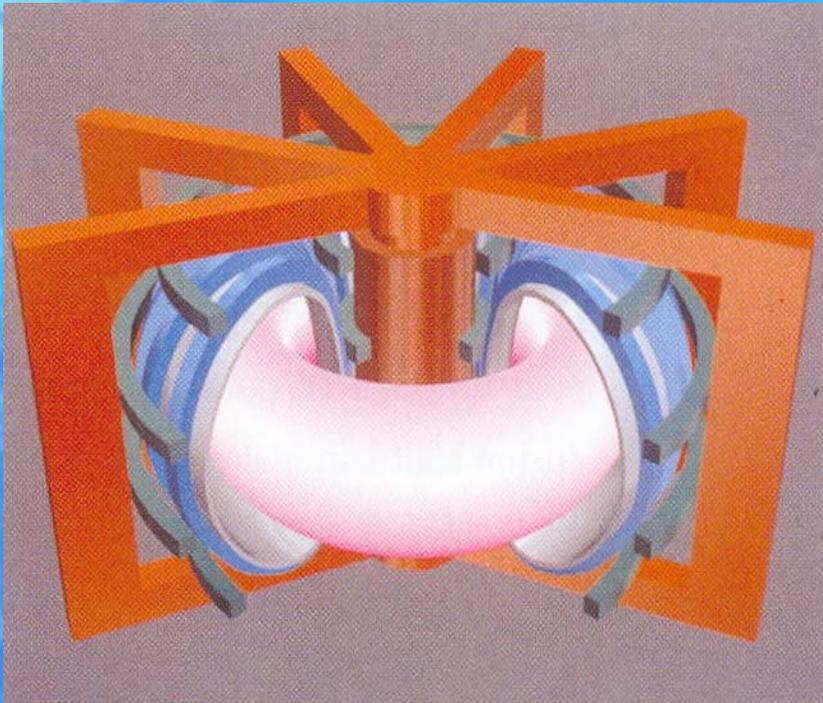


=> à masse de combustible égal, la fusion D-T libère 3,08 fois plus d'énergie que la fission de l' ^{235}U

Fusion thermonucléaire: le réacteur



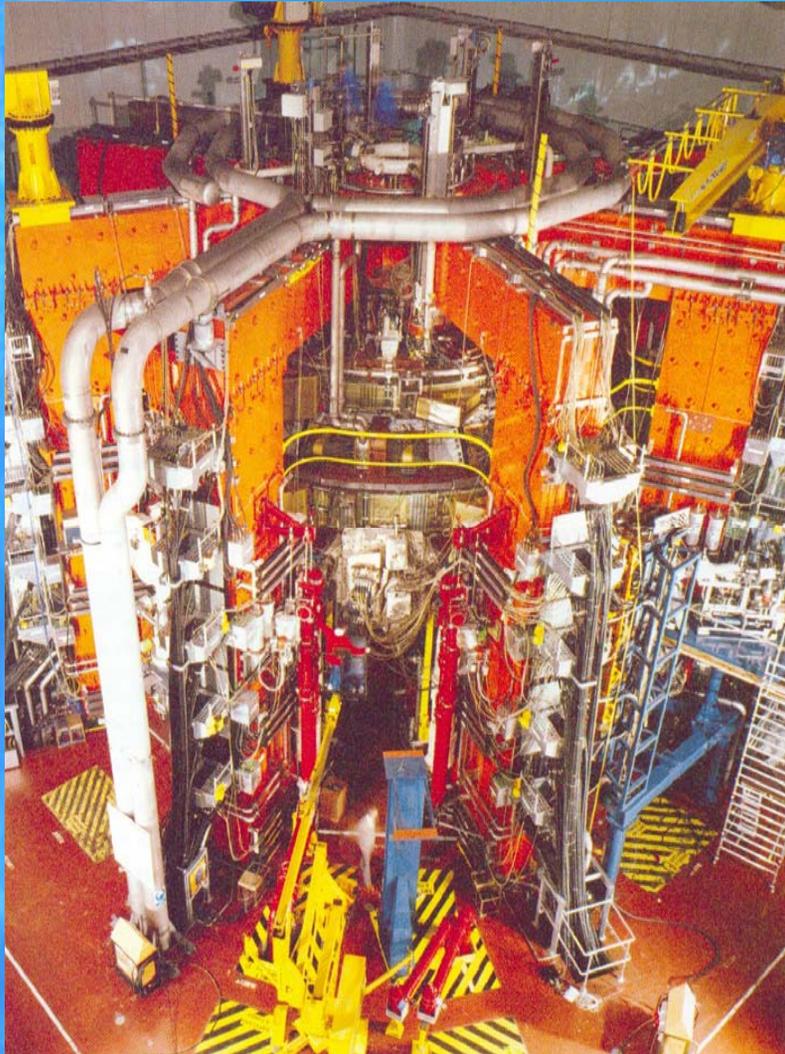
Fusion thermonucléaire: le réacteur



Le plasma est confiné à l'intérieur du Tokamak grâce à un champ magnétique puissant

Un courant circulant dans le plasma permet de maintenir celui-ci à une température très élevée (plusieurs millions de degrés).

Fusion thermonucléaire: le réacteur



Le tomakak européen JET
(actuellement le plus
grand et le plus
performant au monde)

Fusion thermonucléaire: le projet ITER

En 1992, un accord entre l'Europe, le Japon, la Russie et les USA a été signé pour créer en commun un réacteur

=> but: montrer que la fusion nucléaire est réalisable au moins pendant une durée limitée (1000 secondes)

Caractéristiques du futur tokamak:

Puissance de fusion:	1,5 GW
Temps de combustion:	1000 secondes
Courant plasma:	21 MA
Rayon du tore:	8,15 m
Rayon maximum du plasma:	2,8 m
Champ magnétique toroïdal:	5,7 Tesla

La « fusion froide »

Principe: électrolyse de l'eau lourde avec des électrodes de palladium

-> production aux électrodes de noyaux d'hélium

=> Expériences non-concluantes en termes de gain d'énergie ET de production de réactions de fusion

=> Sujet à sensation, mais non encore vérifié

Ressources disponibles dans le monde

Réserves:	Pétrole	40 ans
	Gaz	66 ans
	Charbon	156 ans
	Uranium	60 à 260 ans (si réacteurs à neutrons lents) 3000 ans (si réacteurs à neutrons rapides)

Ressources:	Pétrole:	x 2,9
	Gaz:	x 3
	Charbon	x 9,7
	Uranium	x 2,9

N.B.: Thorium: ressources 3 fois plus grandes que pour l'Uranium !!!

Ressources disponibles dans le monde

=> les ressources disponibles pour la fission nucléaire sont beaucoup plus durables que pour les autres sources d'énergie

... et sans parler des ressources nécessaires à la fusion nucléaire !

=> peut-on envisager l'avenir sans le nucléaire ?

L'avenir du nucléaire en Belgique

Question: peut-on respecter le protocole de Kyoto en abandonnant le nucléaire en Belgique ?

Le gouvernement actuel veut:

- supprimer le nucléaire (actuellement 55% de la production d'électricité en Belgique)
- remplacer ces centrales par des centrales au gaz
=> problèmes économiques possibles.
-> Devra-t-on ajouter aussi du charbon ?
... et les énergies renouvelables
- diminuer la consommation des gens

Conclusion

La consommation en énergie augmentera de 40 à 140% d'ici 2050

Les ressources s'amenuisent

Les énergies renouvelables émergent... mais jusqu'où iront-elles ?

On veut supprimer le nucléaire

Sources:

Internet:

- <http://schools.sd68.bc.ca/PAUL/Webquest/Webquestenergie.html>
- <http://www.ciele.org/filieres/>
- http://energy.cr.usgs.gov/energy/stats_ctry/Stat1.html#3foot3
- http://www.ifp.fr/IFP/fr/decouvertes/cles/contexte_eco/demande/index.htm
- <http://www.cea.fr/Fr/pedagogie/Cycle/index.html>
- <http://perso.id-net.fr/~brolis/softs/domodidac/thermic.html>
- <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>
- http://www-drfc.cea.fr/en_savoir_plus/lithium/lithium.htm
- http://www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/ampere/ampere1.html
- <http://fr.wikipedia.org>

Sources:

Non-internet:

- Document: « Il faut économiser la planète, notre bien commun » Géo n°307 (septembre 2004)
- Quelques vérités bonnes à dire et à entendre à propos du nucléaire en Belgique (Jean-Marie Streydio) – Louvain Ingénieur 2004
- Kyoto est irréalisable sans le nucléaire – La libre Belgique 2004
- « Les centrales nucléaires » Centre technique de l'enseignement de l'état
- 2001 Energie – les défis à venir – Science et Vie mars 2001
- Fusion thermonucléaire contrôlée – Science Recherche Développement
- Métaux carburants – Science et Vie février 2006
- La fin du nucléaire ? Valérie Landon – Les compacts de l'info (ed. Casterman)
- 2003-2100 Le siècle du nucléaire – Science et Vie décembre 2003
- Quelle énergie pour demain ? ActualQuarto 7 – mars 2001
- L'énergie nucléaire – livre « Copain de sciences » pp 156-157
- Une journée pour l'énergie – Le Soir Junior N°26 – semaine du 5 au 11 mars 2002