

Le CEA de Cadarache et le Nucléaire en général

LE CEA CADARACHE

1600 hectares dont 900 cloturés

Environ 480 bâtiments dont 20 INB civiles et 1 INB défense

Environ 2400 salariés dont 130 doctorants et post-doctorants

Environ 2000 emplois indirects (sous-traitance)

Environ 1000 emplois induits

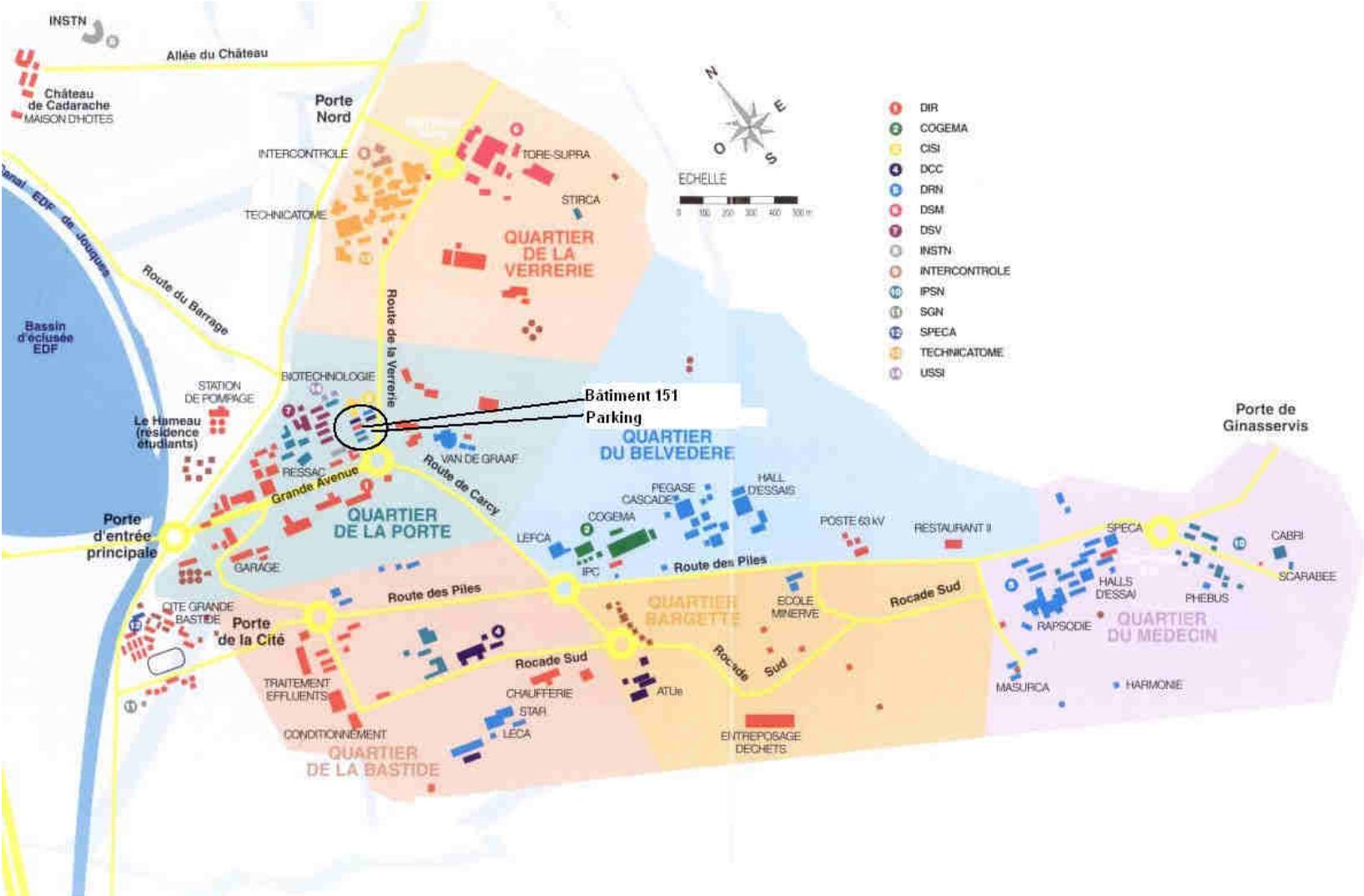
700 collaborateurs extérieurs

200 brevets actifs et environ 300 publications par an

300 M€ d'achats par an (dont 40 % en région PACA)

Cadarache (CEA) aura 60 ans en 2019

Plan du Centre de Cadarache



ACTIVITES

Soutien à l'industrie nucléaire (Démantèlement UNGG, amélioration des REP, des combustibles, conception de nouveaux combustibles)

Développer les systèmes nucléaires du futur (4^{ème} génération – ASTRID)

Promouvoir les énergies alternatives aux énergies fossiles

Présents également sur le site :

TA (propulsion nucléaire navale)

IRSN (sûreté des réacteurs et radioprotection)

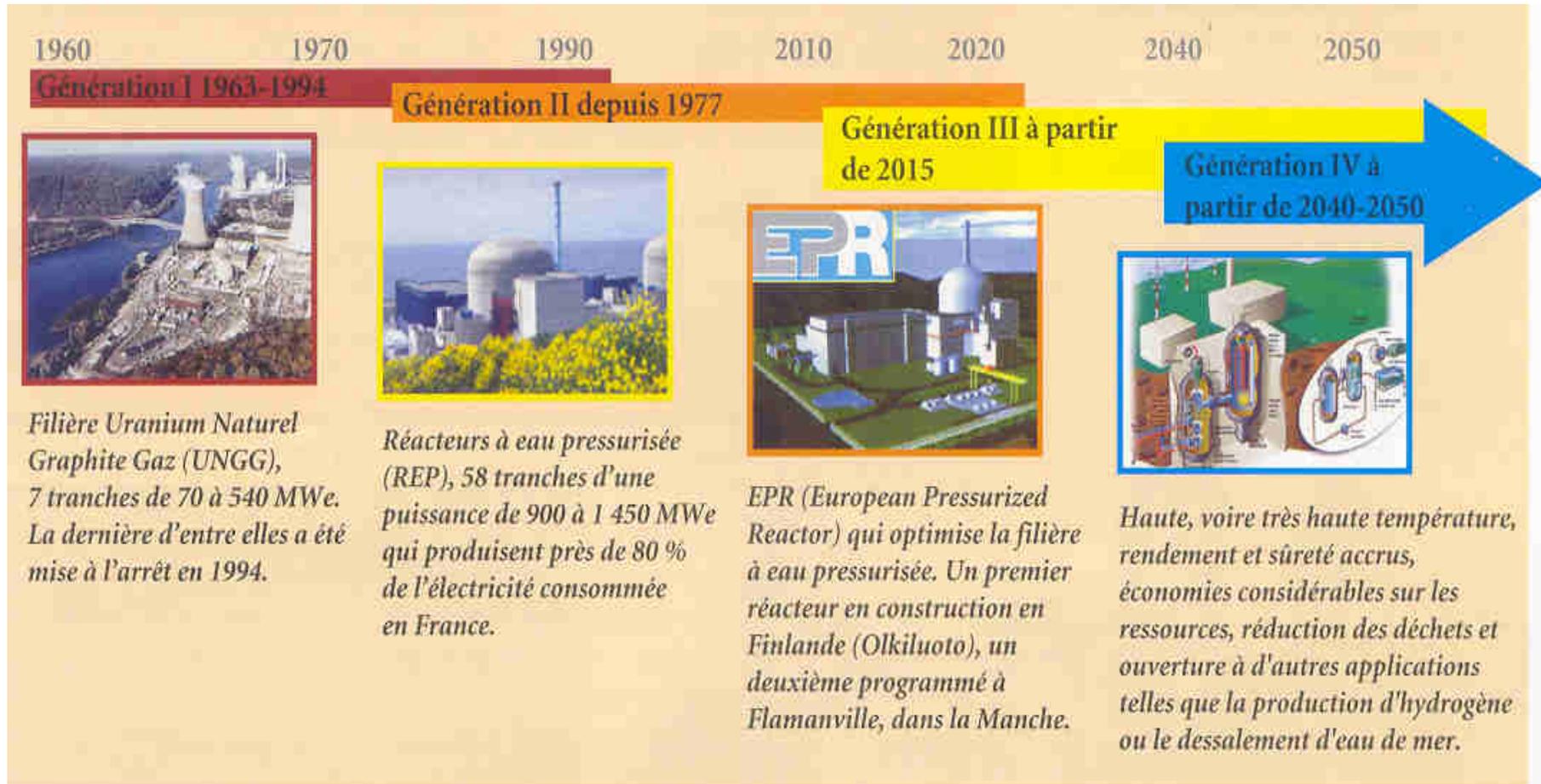
ITER (étude de la fusion thermonucléaire contrôlée)

Soutien à l'industrie nucléaire

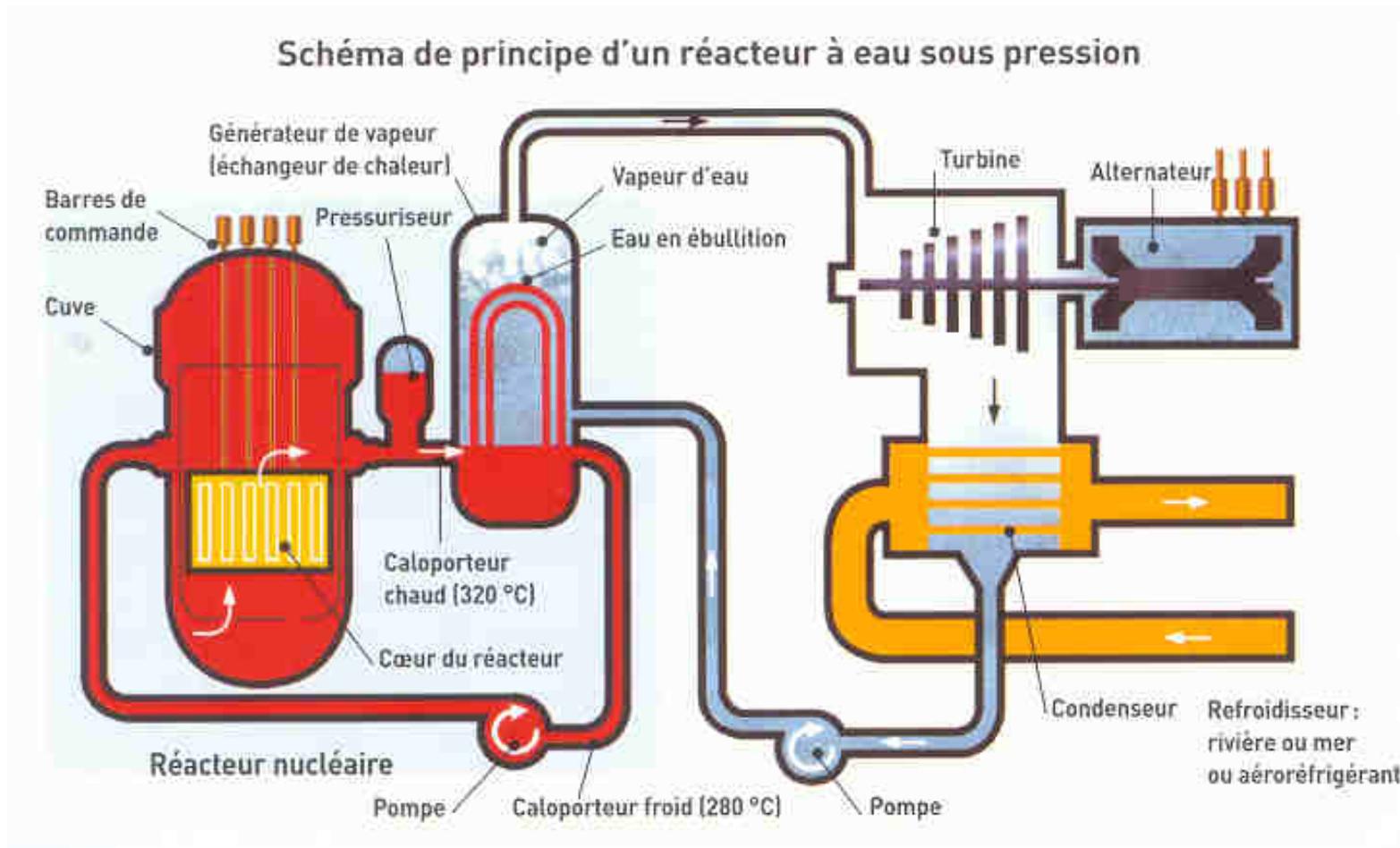
Améliorer la compétitivité du parc nucléaire français avec pour objectifs :

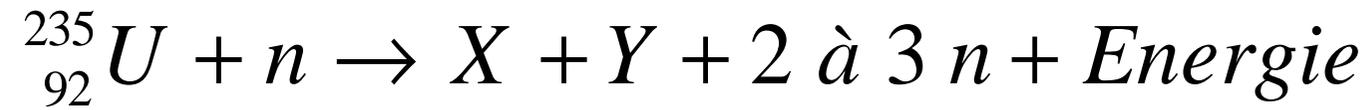
- Augmenter la performance des réacteurs
- Augmenter la sûreté
- Augmenter la durée de fonctionnement des réacteurs
- Concevoir et qualifier les combustibles pour les réacteurs actuels et à venir
- Tester et comprendre le comportement des combustibles sous irradiation

Les différentes filières de réacteurs

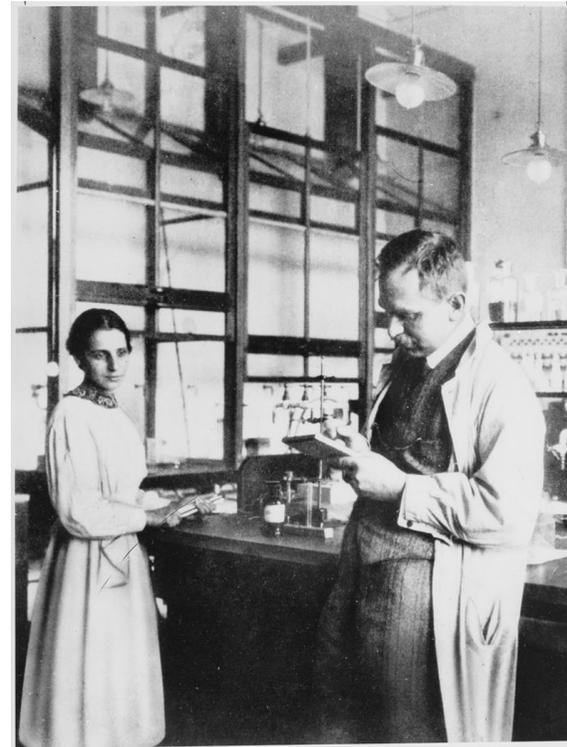


Rappel : Le nucléaire actuel et les REP





Otto Hahn (1879-1968)
Prix Nobel 1944



Lise Meitner (1878-1968) et Otto Hahn
en 1920 dans le laboratoire de chimie
du KWI

Les réacteurs actuels (REP) nécessitent d'enrichir l'U (à environ 4 %) en isotope 235 (seul fissile) mais qui ne représente que 0,7 % de l'U naturel.

Les 99,3 % restants (^{238}U) ne sont, aujourd'hui, pas valorisés

Les RNR permettant de brûler l' ^{238}U \Rightarrow multiplication par 100 des ressources en uranium

Possibilité d'utiliser l'U appauvri et l'U de retraitement

Les neutrons doivent rester « rapides » et ne pas être ralentis par un modérateur
L'eau est modératrice et ne peut donc pas être utilisée pour refroidir le cœur et transporter la chaleur

RNR : saut technologique important / REP (contrairement à l'EPR)

Les RNR

Au plan international, la nécessité de déployer le moment venu les réacteurs à neutrons rapides pour tirer pleinement parti de la ressource en U fait l'objet d'un consensus

En France deux filières étudiées (simulation) en parallèle :

- Le RNR sodium – ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration).

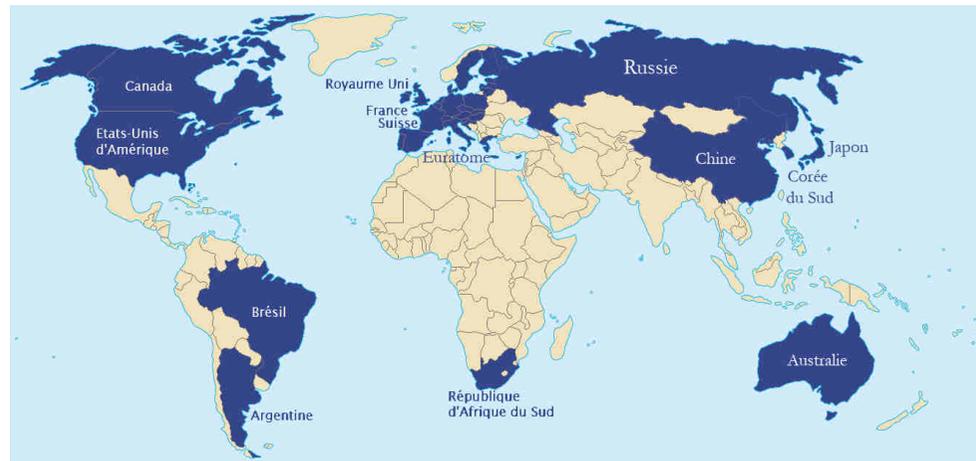
- Le RNR Gaz – option à long terme – projet ALLEGRO
Du potentiel mais des verrous technologiques importants (combustible réfractaire, sûreté)

Les systèmes nucléaires du futur

Réacteurs de 4^{ème} génération :

Le CEA participe aux programmes internationaux de recherche sur les réacteurs et combustibles nucléaires du futur.

Forum Génération 4.



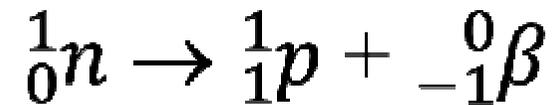
RNR

Intérêts :

Réduction de la quantité de déchets produite par transmutation « in situ » des AM.

Utilisation de la totalité de l'uranium naturel et non plus de seulement l' U^{235} car transformation ^{238}U en ^{239}Pu .

Formation du Pu²³⁹ à partir de U²³⁸



Les combustibles nucléaires

Les différentes filières et leur combustible

UNGG : U naturel – surtout pour production du Pu – puissances modérées

REP (REB) : U enrichi à environ 4-5 %

REP Moxé : U enrichi + Pu ($\approx 5\%$)

EPR \approx REP

RNR-Na : (U,Pu)O₂ (20 % de Pu)

(**HTR** : UO₂ dans « particules »)

Réacteurs de recherche (hauts flux) : U₃Si₂, UMo,

L'amont du cycle

Extraction de l'uranium





1 à 200 kg d'U par tonne de minerai extrait

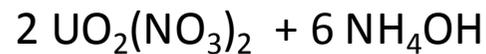
Dans le cas de l' U : 2 isotopes naturels :

${}_{92}^{238}\text{U}$ 99,3 % de l'uranium naturel

${}_{92}^{235}\text{U}$ 0,7 % de l'uranium naturel

Mais seul ${}^{235}\text{U}$ est fissile, (or les réacteurs nucléaires ont besoin de ${}^{235}\text{U}$ enrichi à environ 4 %)

Sur place, le minerai est concassé, broyé puis dissout par voie alcaline ou acide. Le nitrate d'uranyle obtenu $\text{UO}_2^{2+}(\text{NO}_3^-)_2$ est précipité en milieu basique sous forme d'une poudre jaune : le yellow cake (**di uranate d'ammonium** (DUA)).



A ce niveau, les 2 isotopes sont toujours présents dans leur proportion naturelle.

La conversion : du concentré à l'UF₆

La conversion est réalisée par la société COMURHEX (filiale d'Aréva).

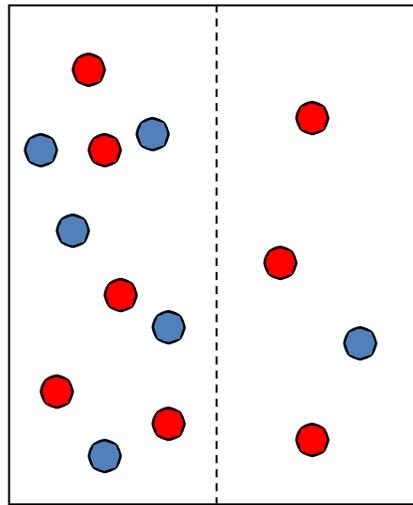
Les concentrés arrivent par bateaux en fûts de 200 l ou en conteneurs de 1 m³.

Les étapes du procédé voie humide :

- dissolution par HNO₃ : concentré → UO₂(NO₃)₂ impur
 - extraction par le TBP : nitrate impur → nitrate purifié
 - dénitration chimique : nitrate purifié → UO₃
 - réduction par NH₃ et H₂ : UO₃ → UO₂
 - hydrofluoration par HF : UO₂ → UF₄
- } Usine de Malvési (Narbonne)
-
- fluoration par F₂ : UF₄ → UF₆ pur
 - cristallisation de l'hexafluorure
- } Usine de Pierrelatte

Principe de l'enrichissement (pour les REP)

Par diffusion gazeuse : des molécules de masse (taille) différente ne vont pas diffuser de la même façon à travers une membrane poreuse.



Procédé abandonné

Enrichissement par ultracentrifugation : procédé actuel

On fait tourner, à très haute vitesse, un bol cylindrique contenant le gaz UF₆. Par entraînement visqueux, s'établit une distribution radiale des pressions dans le bol selon une loi exponentielle :

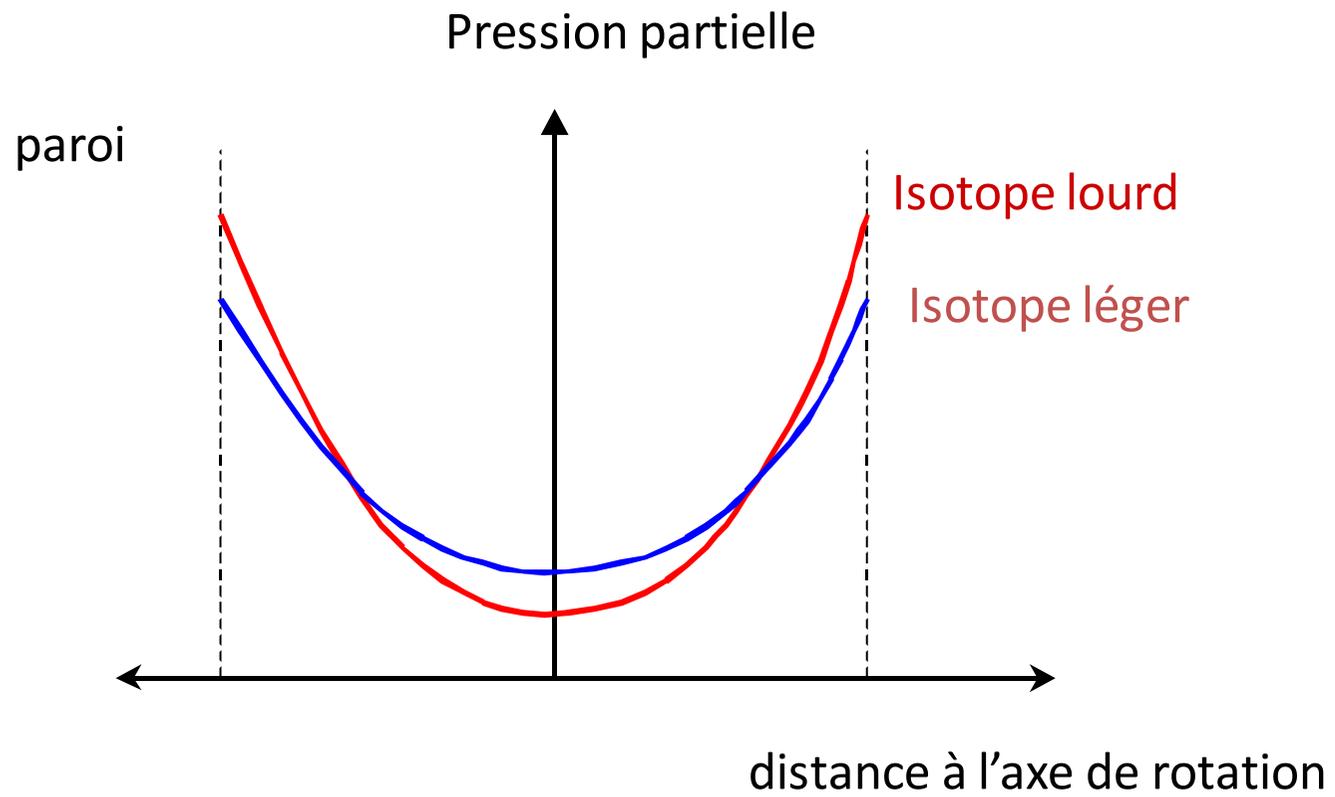
$$P(r) = P(0) \exp\left(\frac{M^2 \Omega r^2}{2RT}\right)$$

P: pression partielle

Ω : vitesse angulaire

M: masse molaire du gaz

r : distance à l'axe de rotation

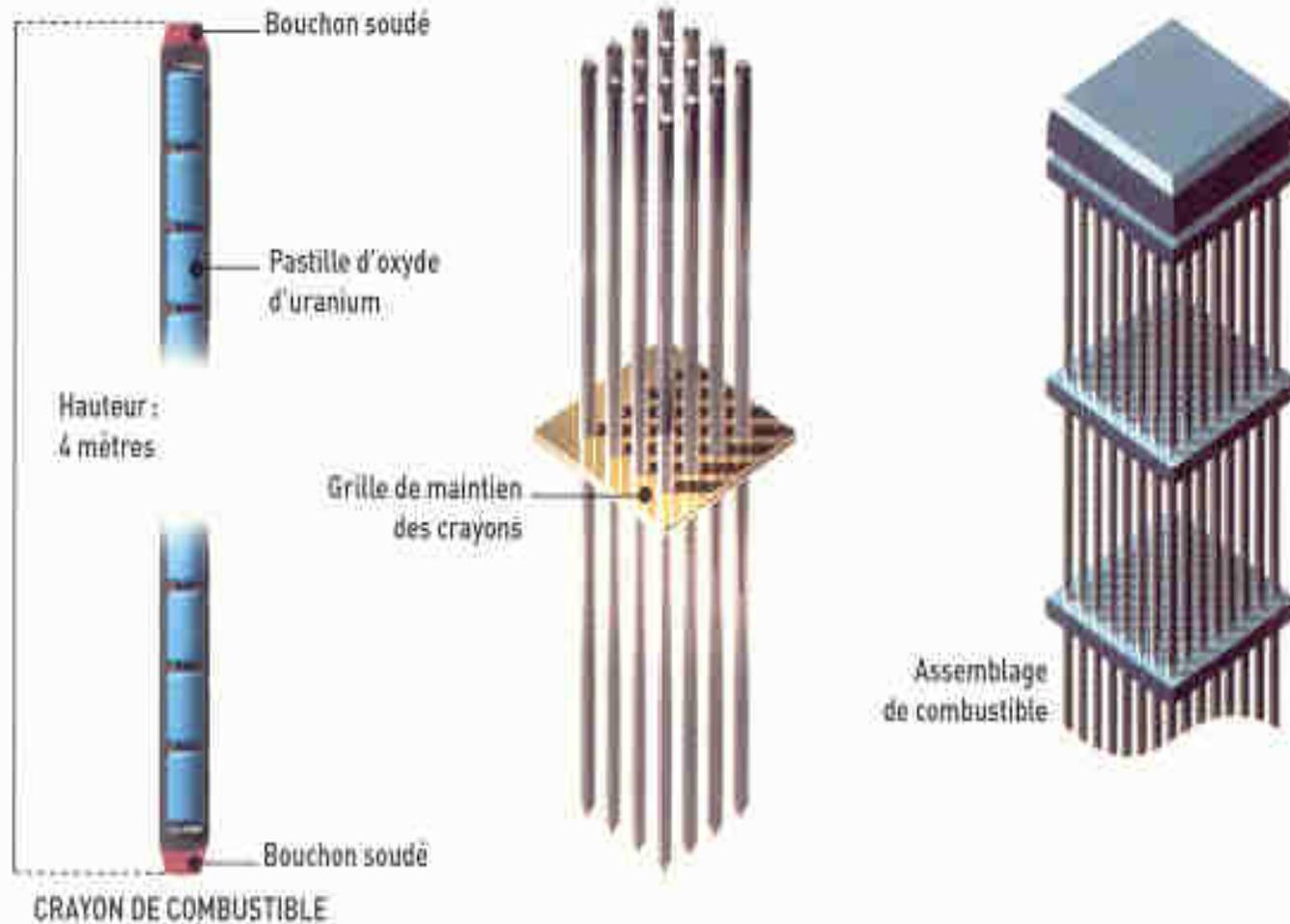


Après l'enrichissement, on repasse de la forme UF_6 à la forme UO_2 .

L 'oxyde d 'uranium va être conditionné (après pressage, frittage) sous la forme de pastilles cylindriques de 1,35 cm de haut et 8,19 mm de diamètre qui seront empilées dans des crayons (gainés) en Zircaloy 4.

1 pastille pèse environ 7 g

La préparation des assemblages de combustible



Etudes menées à Cadarache dans le domaine des combustibles

Augmenter la flexibilité (nucléaire versus renouvelables)

Réduire les coûts de fabrication

Garantir l'intégrité de la première barrière de confinement (gaine) en situation normale et accidentelle.

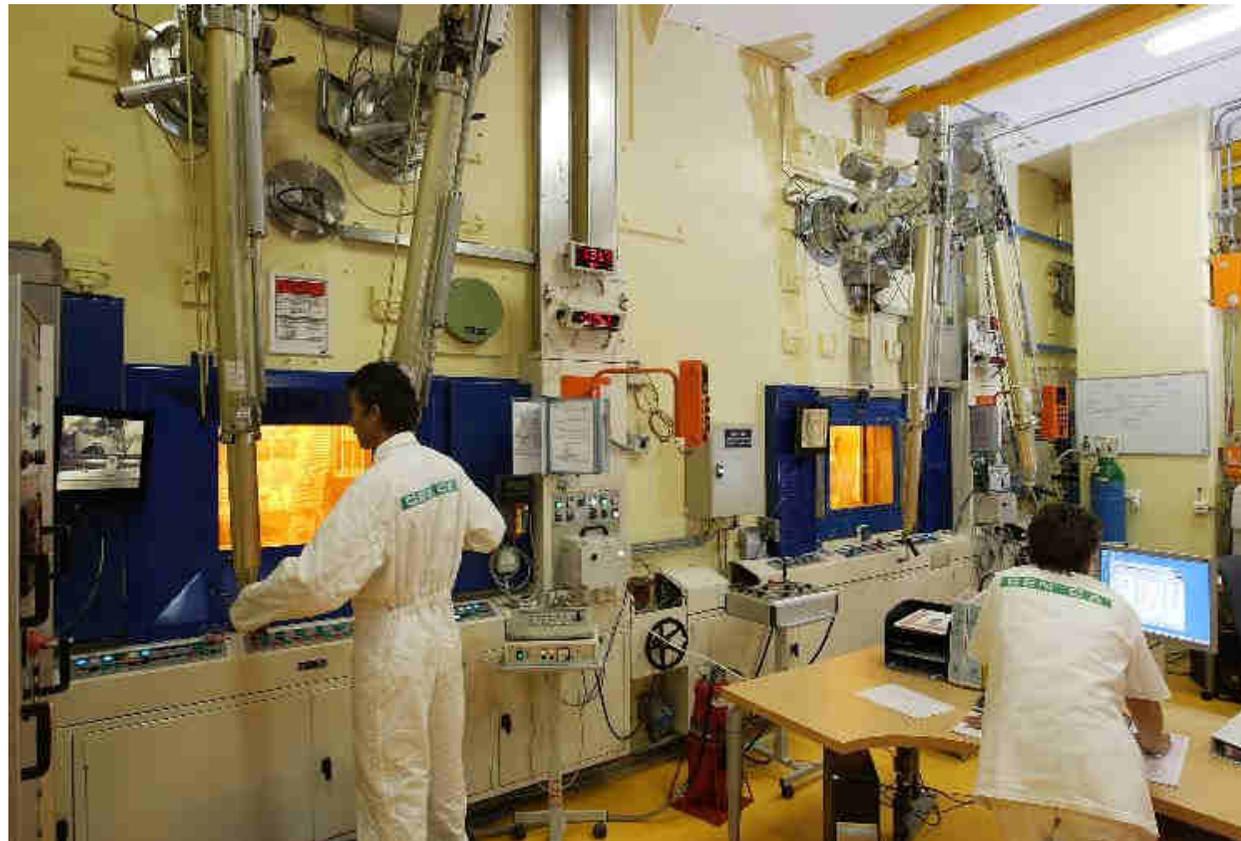
Limiter les conséquences pour les situations accidentelles (concept ATF)

Mettre en œuvre les combustibles au Pu (MOX)

Le Laboratoire d'Examen des Combustibles Actifs (LECA)

Objectif : réalisation d'examens post-irradiatoires afin de surveiller et d'améliorer les combustibles + amélioration des connaissances, capitalisation du savoir.

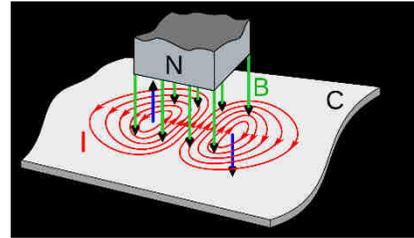
LECA : 12 cellules blindées pouvant accueillir des crayons combustibles allant jusqu'à 2,5 mètres.



Examens non destructifs :

Courants de Foucault,

Mesure de densité et de porosité,
Spectrométrie gamma, corrosion



Microanalyse :

MEB + MEB-FIB

MET

Microsonde électronique

Microsonde ionique (SIMS)

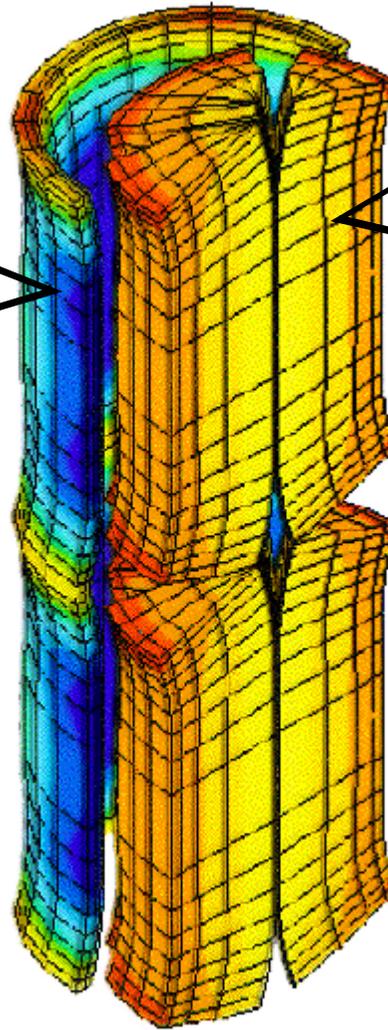
Analyse d'images

DRX (analyse structurale)

Problématique Interaction pastille - gaine (IPG)

GAINÉ : réaction

- Viscoplasticité sous flux
- Condensation I
- Fissuration par CSC

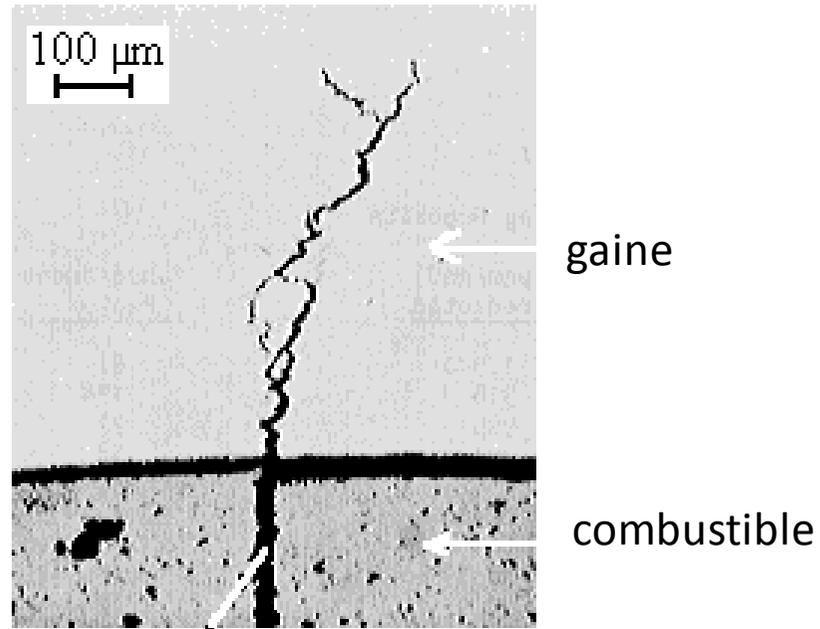


PASTILLE : moteur

- Forte dilatation thermique
- Diabolo + fragmentation de la pastille
- Viscoplasticité (fluage)
- Relâchement PF (I)



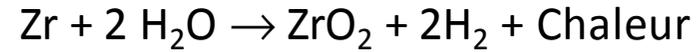
Problématique liée à la corrosion interne de la gaine



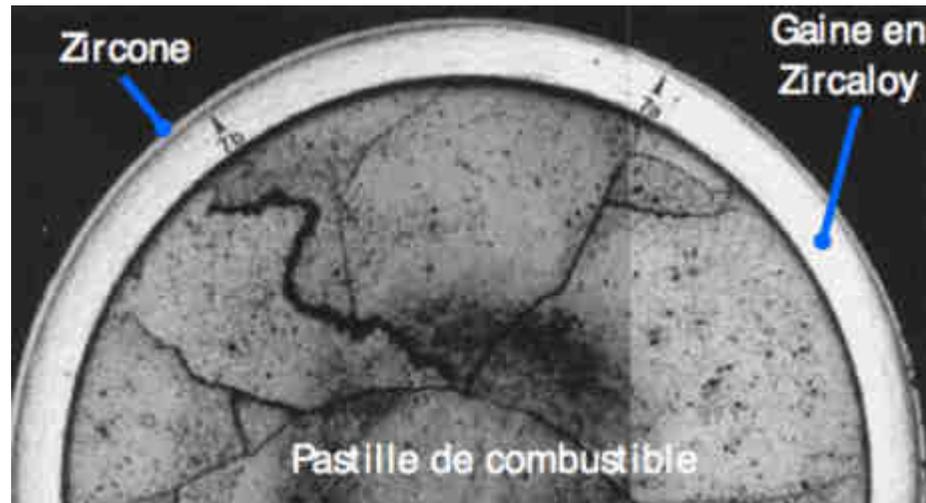
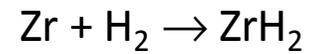
Après rampe de puissance : fissures localisées aux inter-pastilles et en face des fissures radiales des pastilles. Risque de fissure traversante et de rupture de gaine.

Remède à l'IPG : UO_2 dopé Cr (combustible plus malléable)

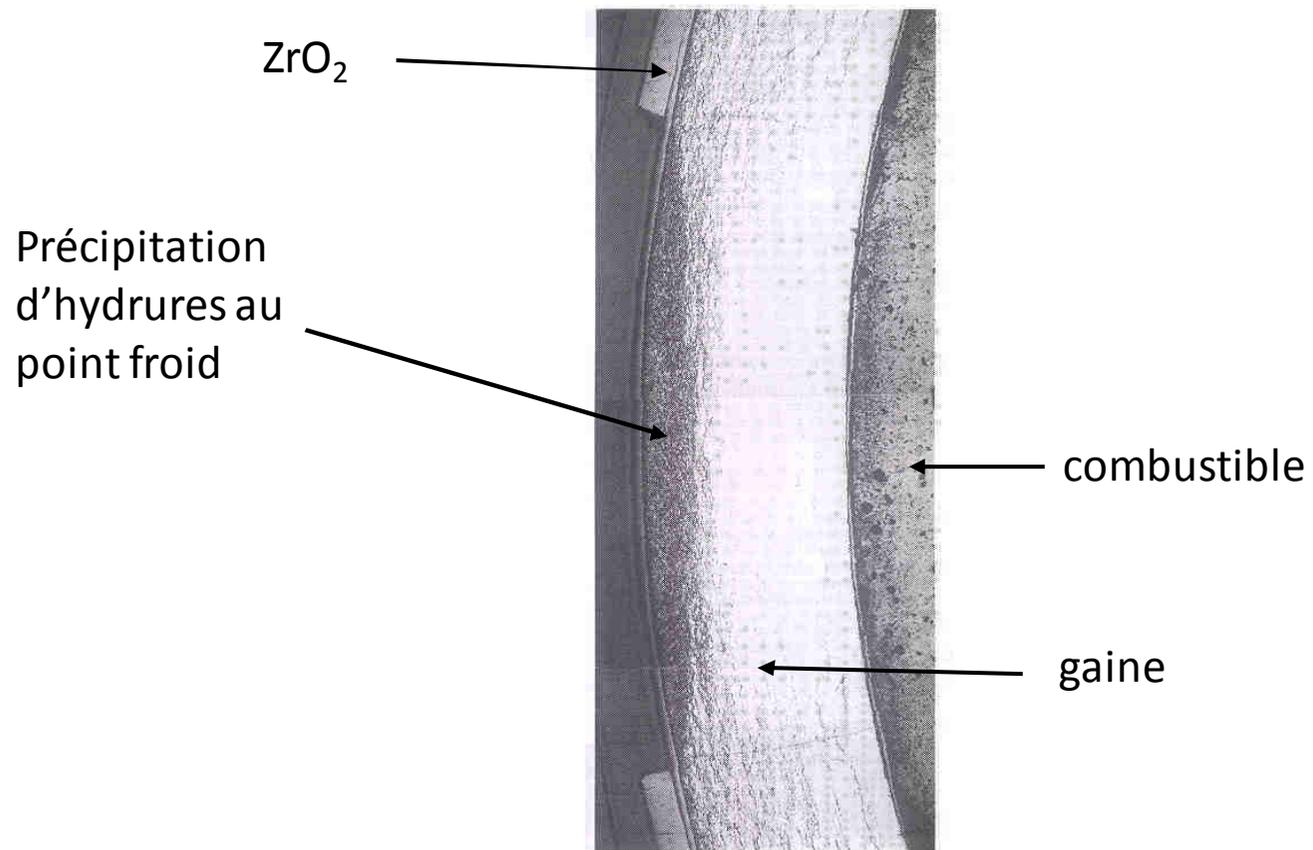
Problématique liée à la corrosion externe du Zircaloy (gaine)



Et

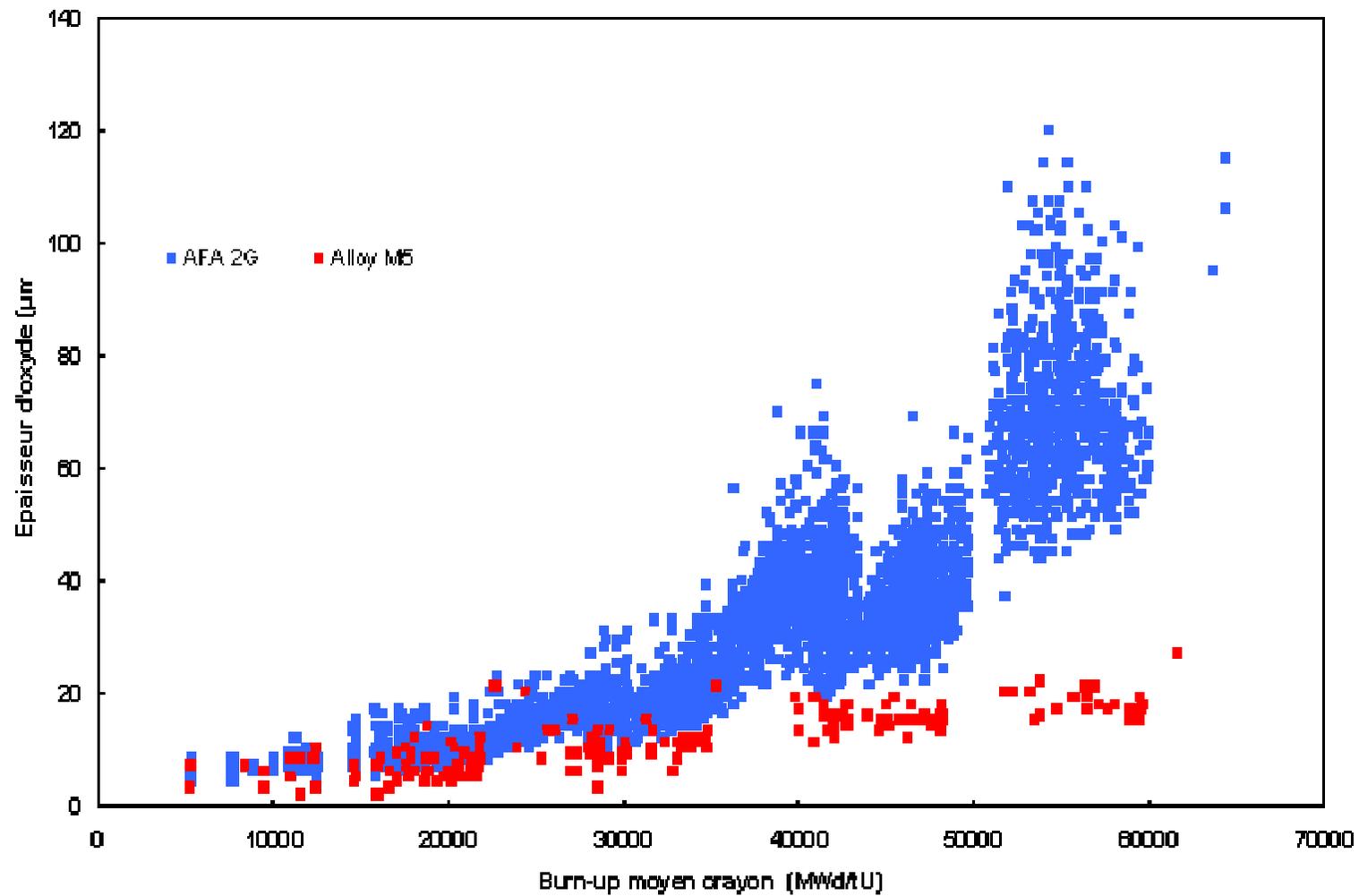


Si $e(\text{ZrO}_2) > 100 \mu\text{m}$ \Rightarrow desquamation (l'oxyde se libère par plaques) \Rightarrow point froid et précipitation d'hydrures \Rightarrow fragilisation



⇒ Remplacement du Zircaloy par un autre alliage : le M5 (Zirlo aux USA, E110 en Russie)

Comparaison AFA2G / Alliage M5™ en réacteur 900 MWe



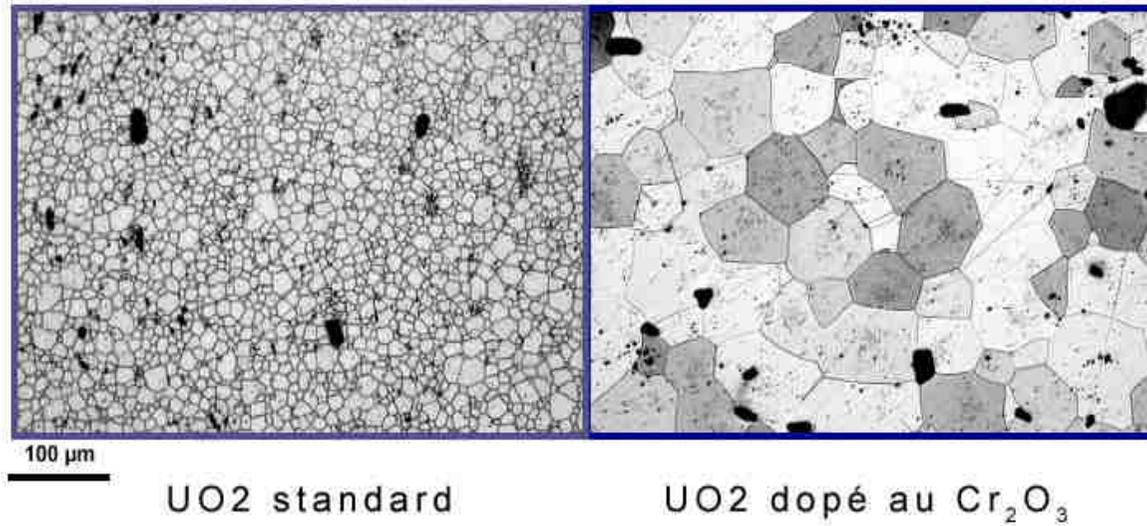
Problématique des gaz de fission

Chaque fission $\Rightarrow \approx 0,3$ atome de gaz rare (Xe, Kr)

Gaz de fission rapidement insoluble dans UO_2

Xe inséré dans lacune du réseau ou sur le site de l'U disparu

Très grandes quantités de gaz occlus dans le combustible (à 60 GWj/t on a $1,6 \text{ cm}^3$ (TPN) de Xe + Kr par g d'oxyde) soit 3200 cm^3 dans un crayon.



Accroissement de la taille des grains de façon à allonger le trajet à parcourir pour atteindre le joint de grain ⇒ les GF restent davantage dans le combustible.

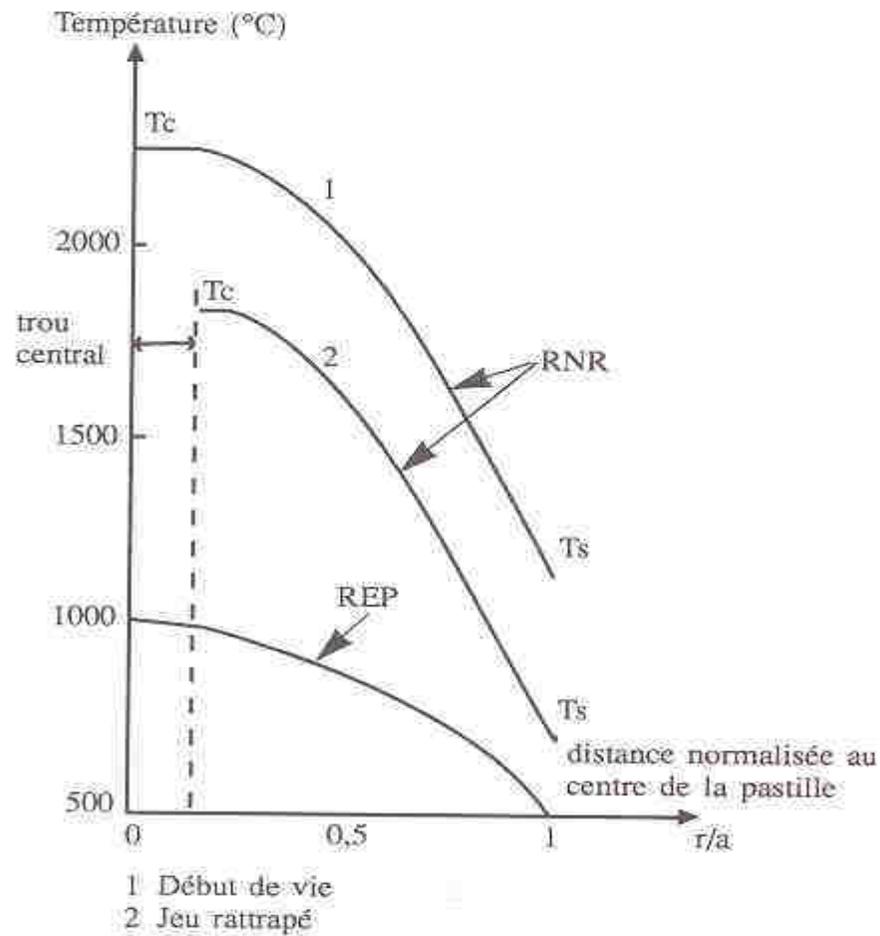
Cas des combustibles RNR-Na

Migration du combustible (vaporisation) à partir de la zone centrale car T très élevée (2200 °C) au centre.

Trou central anticipé (pré usiné)

Enrichissement en Pu au bord du trou central

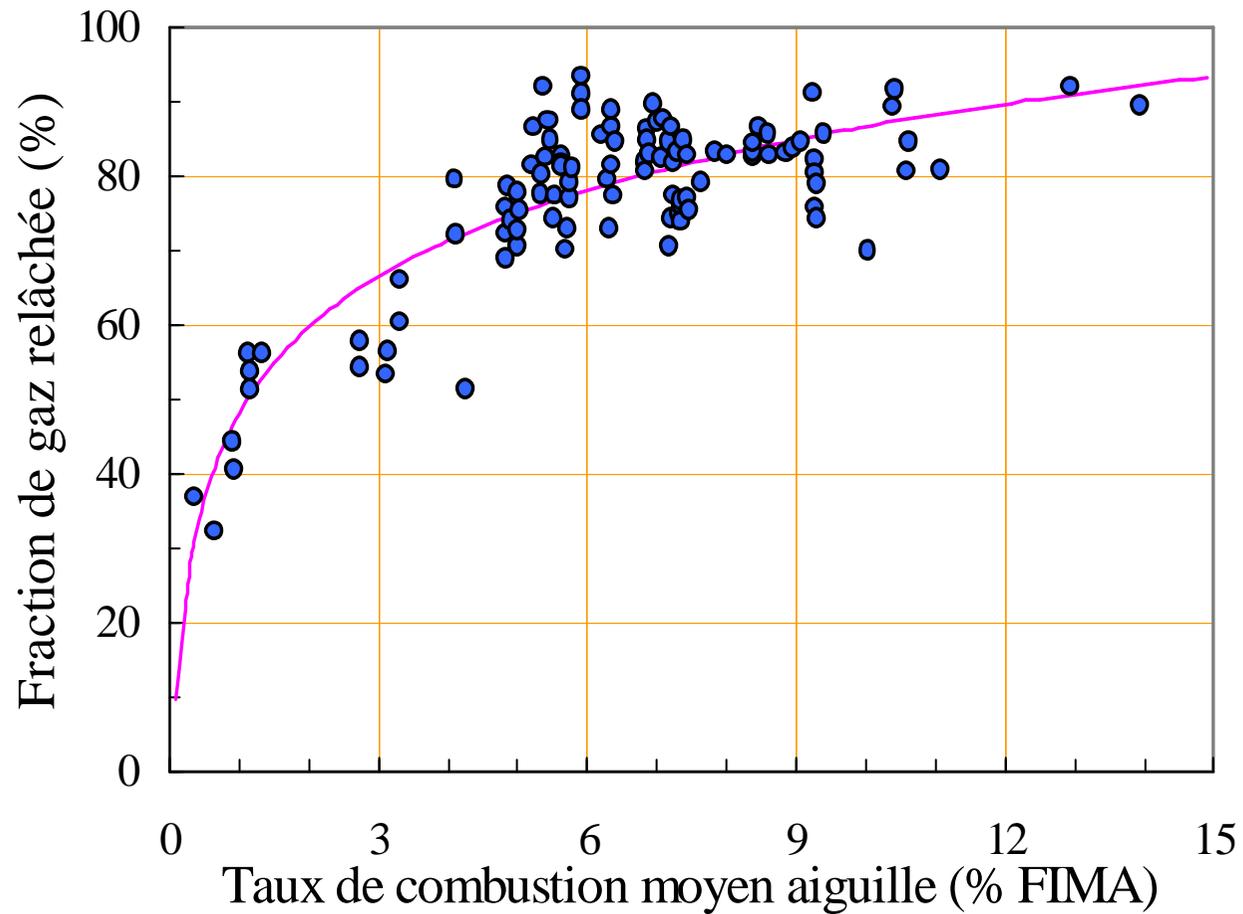




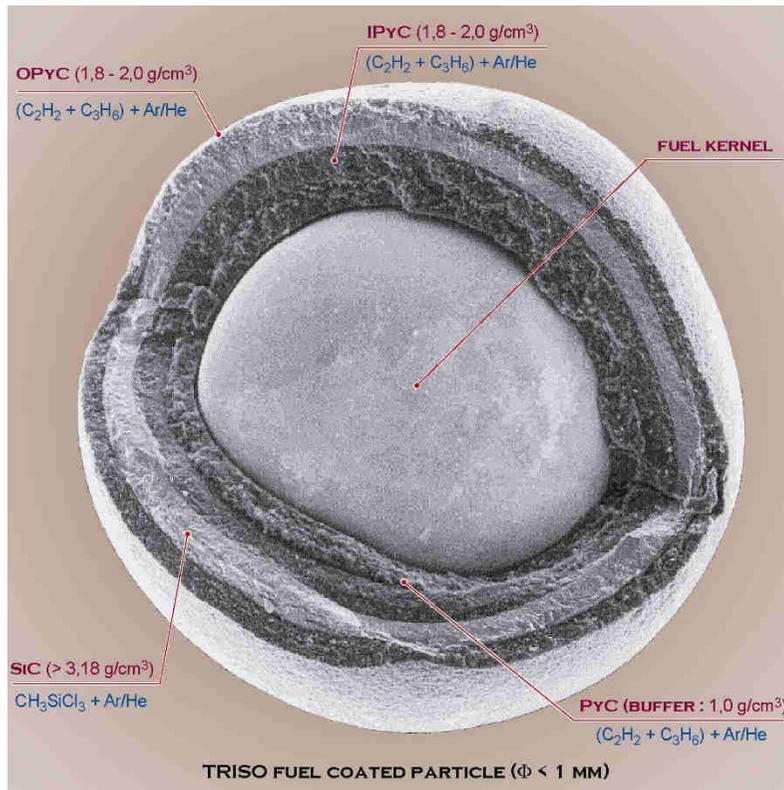
$$\Delta T = \frac{P_v r^2}{4\lambda}$$

En REP la majorité des gaz de fission reste dans le combustible.

En RNR la majorité des gaz de fission est relâché dans le plenum. Prise en compte dans le dimensionnement.



Cas du combustible HTR - VHTR



Noyau fissile : UO_2 ou UC

Produit l'énergie de fission (chaleur)
Retient une grande part des FP

Couche carbone poreux (Buffer) :

Protège couches externes du recul des PF
Volume libre pour le relâchement des GF
Accommode le gonflement du noyau

Couche carbone dense interne IPyC:

Protège le noyau de la corrosion par le chlorure pendant la fabrication
Soutient mécaniquement la couche de SiC
Retient les gaz de fission

Couche de SiC:

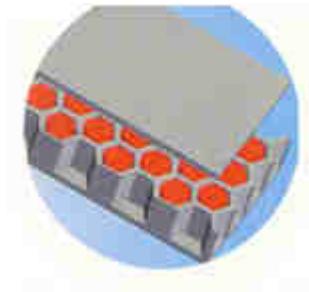
Garantit l'étanchéité
Retient GF, PF volatils and métalliques

Couche carbone dense externe OPyC:

Soutient mécaniquement la couche de SiC
Joue un rôle de barrière de PF pour les particules avec SiC défectueux
Surface de liaison pour le compactage

Cas du combustible pour les futurs RCG

Pour les futurs (futur lointain) RCG, on envisage des combustibles carbure et/ou nitrure avec une géométrie « plaque ».



Intérêt des carbures et nitrures : des λ élevés (> à celui de UO_2)

Inconvénients : nitrures $(\text{U, Pu})\text{N} \Rightarrow {}^{14}\text{C}$ et se décompose à haute température
carbures $(\text{U, Pu})\text{C}$: gonfle sous irradiation et pas traitables par PUREX

Cas des combustibles expérimentaux

Il faut des flux neutroniques importants mais sans enrichissement « militaire » (UAl abandonné car 93 % en U^{235}).

⇒ On fait en sorte d'avoir une plus grande concentration volumique d'atomes fissiles

⇒ Utilisation de U_3Si_2 mais ce composé a une densité en atomes lourds insuffisante pour les réacteurs à haut flux (5 g d'U/cm³). Il sera utilisé pour le démarrage du RJH.

⇒ On développe actuellement combustible **UMo** avec forte densité en atomes lourds (8 g d'U/cm³). En phase de recherche (pour le RJH).

Densités de fission très élevées ⇒ beaucoup de U^{235} . Il faut donc des λ très élevés et une évacuation des calories très efficace ⇒ plaques, crayons très fins.

Un nouveau réacteur de recherche à Cadarache :

Le RJH

Le Réacteur Jules Horowitz

Arrêt du réacteur Osiris à Saclay

RJH : Projet majeur du CEA :

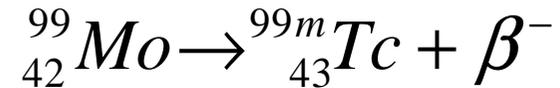
- Etude du comportement des matériaux et des combustibles sous irradiation – 1 an de test en RJH \Leftrightarrow 10 ans de fonctionnement. Le RJH est en effet une source intense de neutrons.
- Assurer la production de radioéléments et surtout du ^{99}Mo (25 à 50 % des besoins européens) – 2 à 4 millions de patients par an.



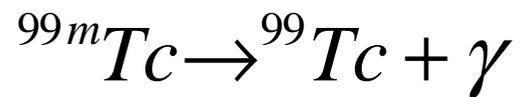
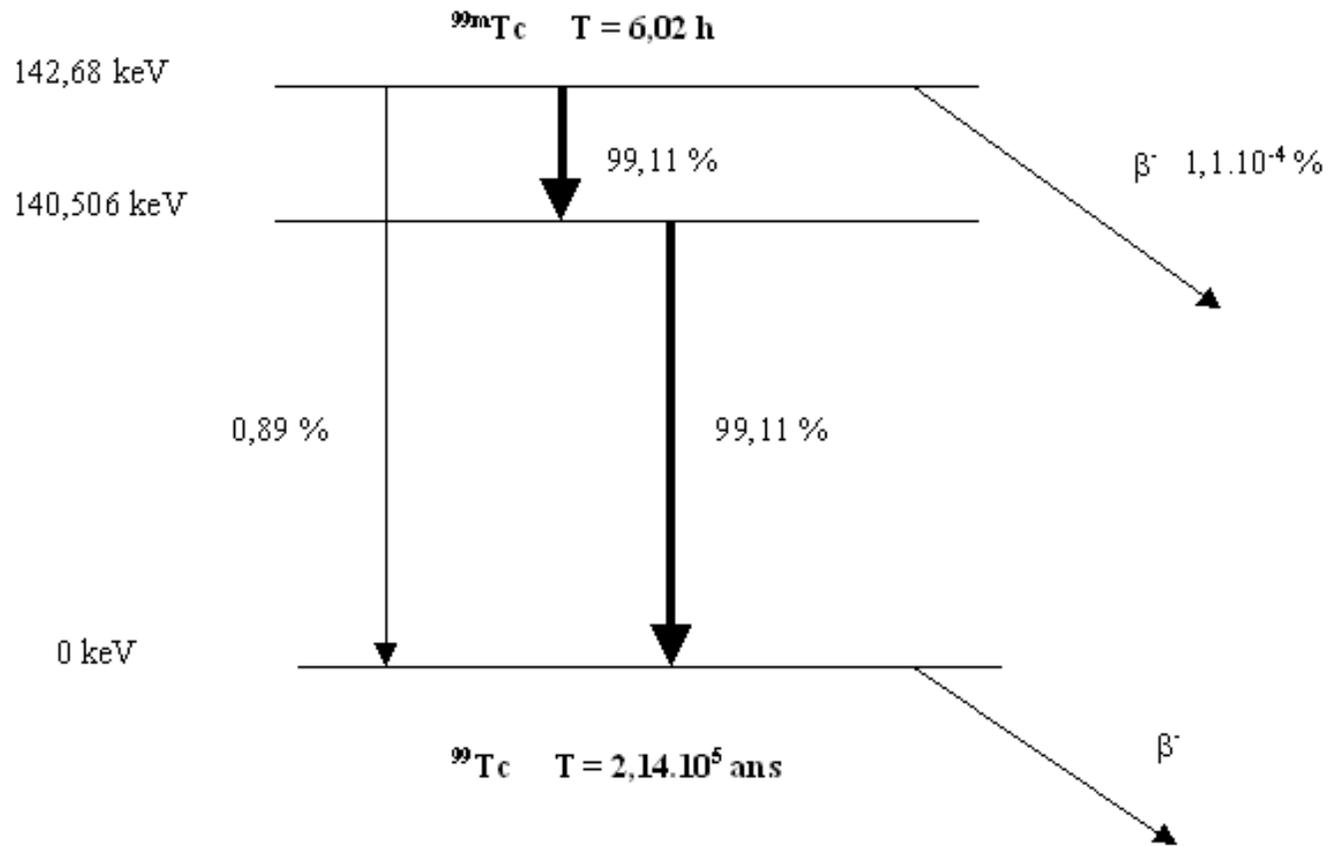
Jules Horowitz (1921-1995) débuta sa carrière au Service de physique mathématique ; il fut ensuite directeur des Piles atomiques, puis de la Recherche fondamentale du CEA.

Irradiation de cibles :

⇒ Production de ^{99}Mo issu de la fission (MOLFI) d' ^{235}U enrichi
(Attention ! Période de seulement quelques jours)



Le ^{99}Mo est isolé (utilisation de REI) puis fixé sur une colonne de chromatographie liquide. Le générateur isotopique ainsi constitué permet ensuite d'extraire, par élution avec une solution saline, le ^{99m}Tc formé par désintégration du Mo.

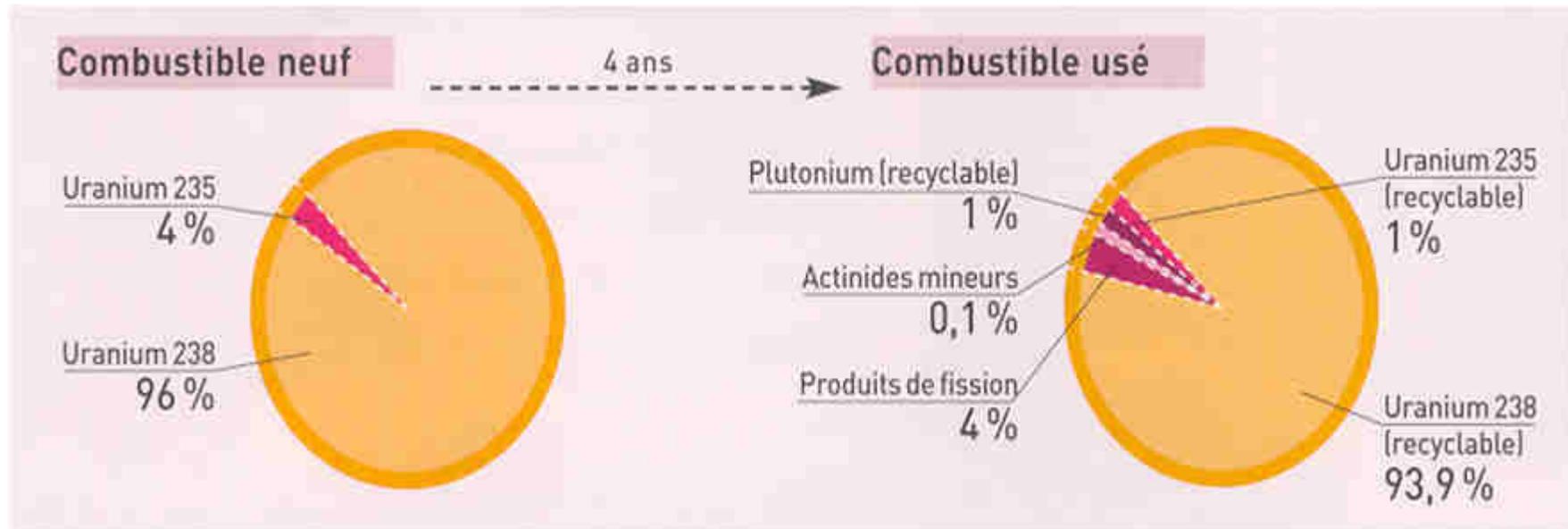


γ de 140 keV monoénergétiques

Le RJH en construction



Problématique des déchets ou l'aval du cycle



Les étapes du procédé PUREX (à La Hague, mais mis au point à Marcoule)

Entreposage du combustible en piscine

Découpe en enceinte blindée des crayons (géométrie sûre)

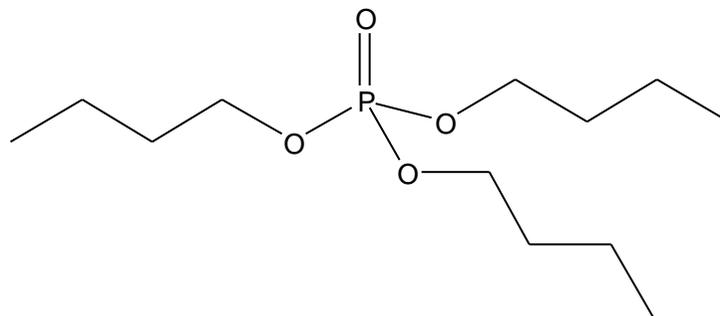
Dissolution par acide nitrique concentré

Séparation solution/tronçons évidés

Extraction liquide/liquide pour isoler PF + AM

Principe de l'extraction

Le tributyl phosphate (TBP) possède la propriété d'extraire l'U et le Pu aux degrés d'oxydation respectifs +6 (ion uranyle) et +4 (ion Pu^{4+}).

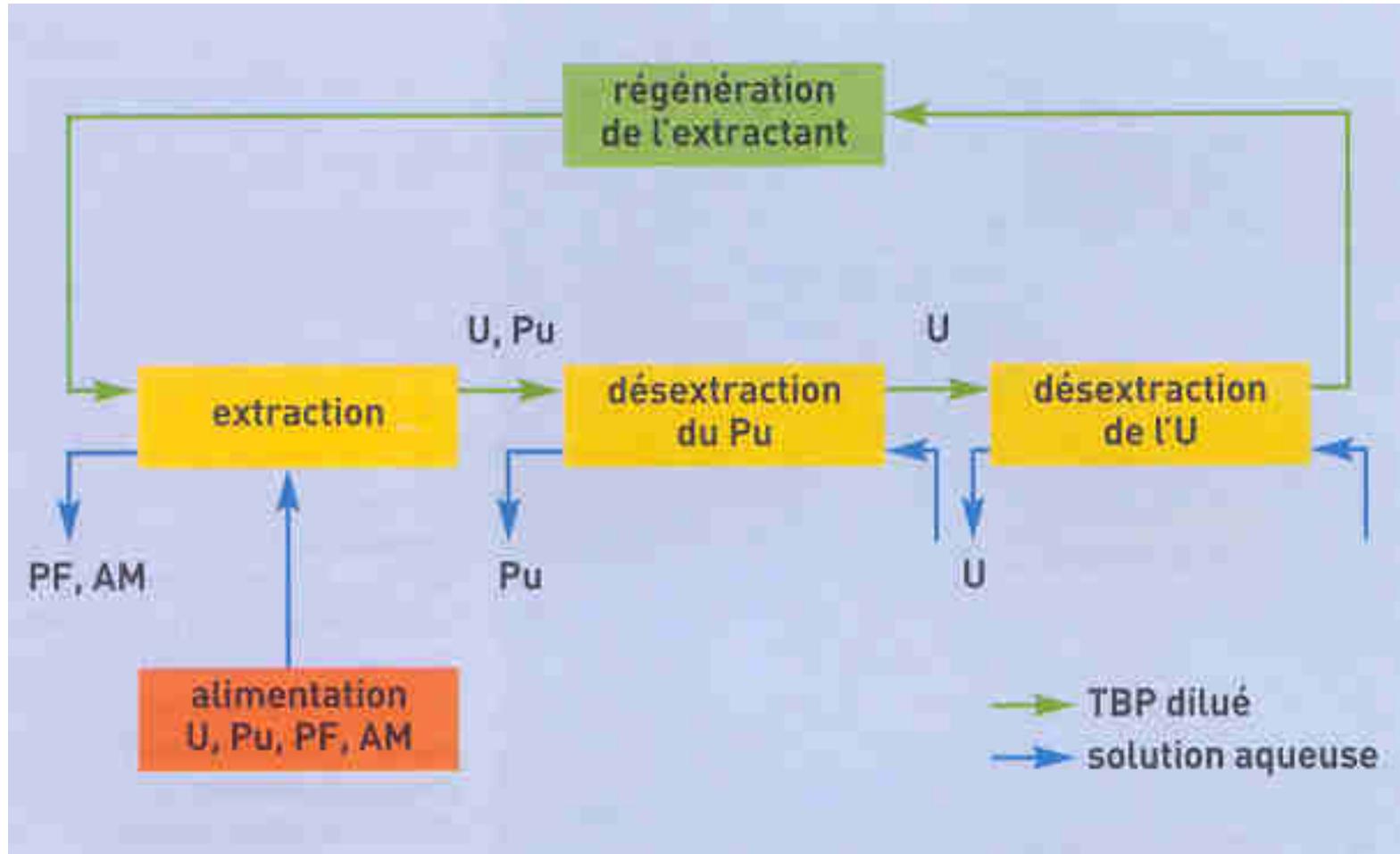


En revanche il n'extrait pas les degrés d'oxydation +3 et inférieurs (soit la plupart des actinides mineurs et des PF).

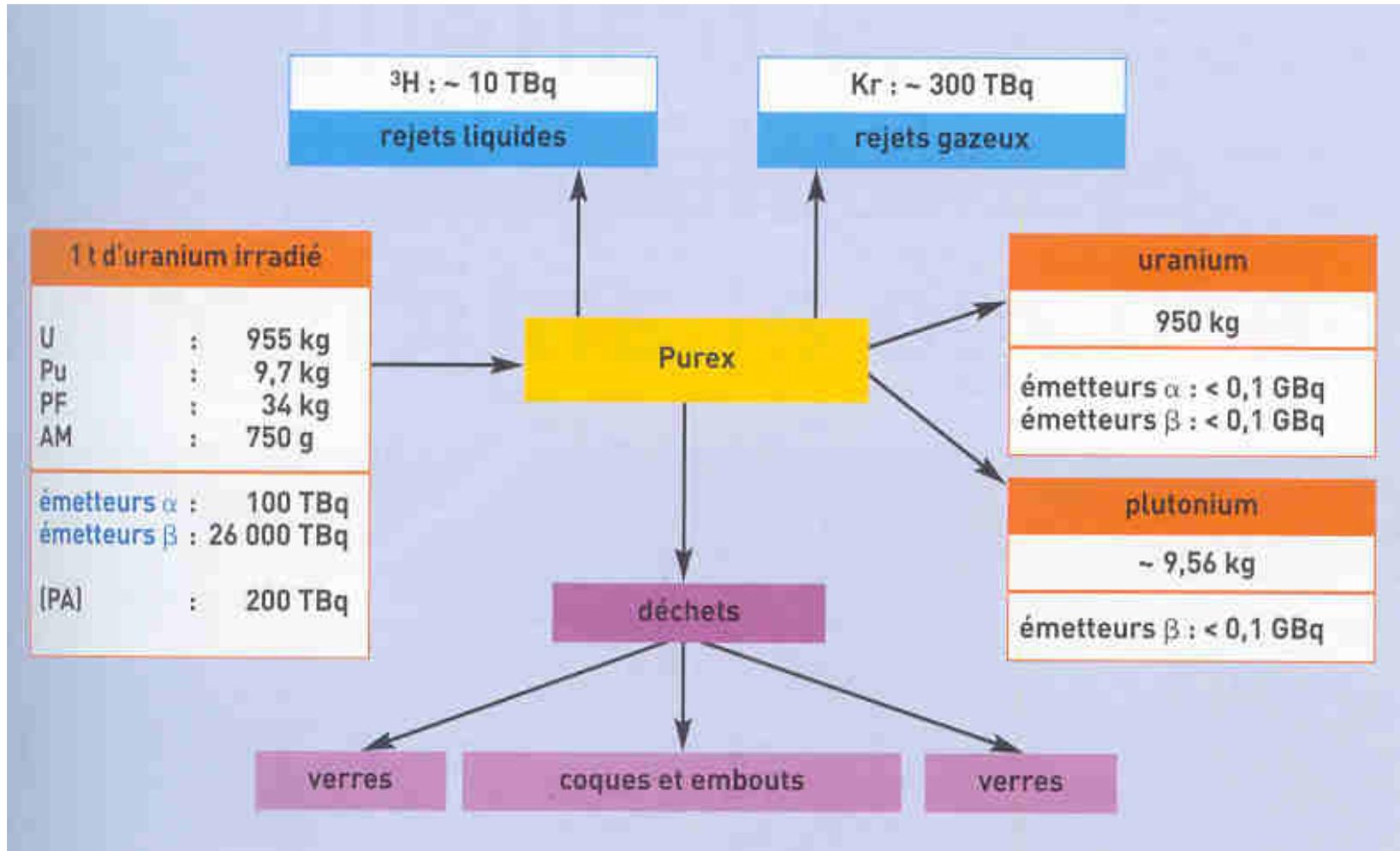
Extraction de l'U et du Pu par le TBP



Réextraction en phase aqueuse et régénération du TBP



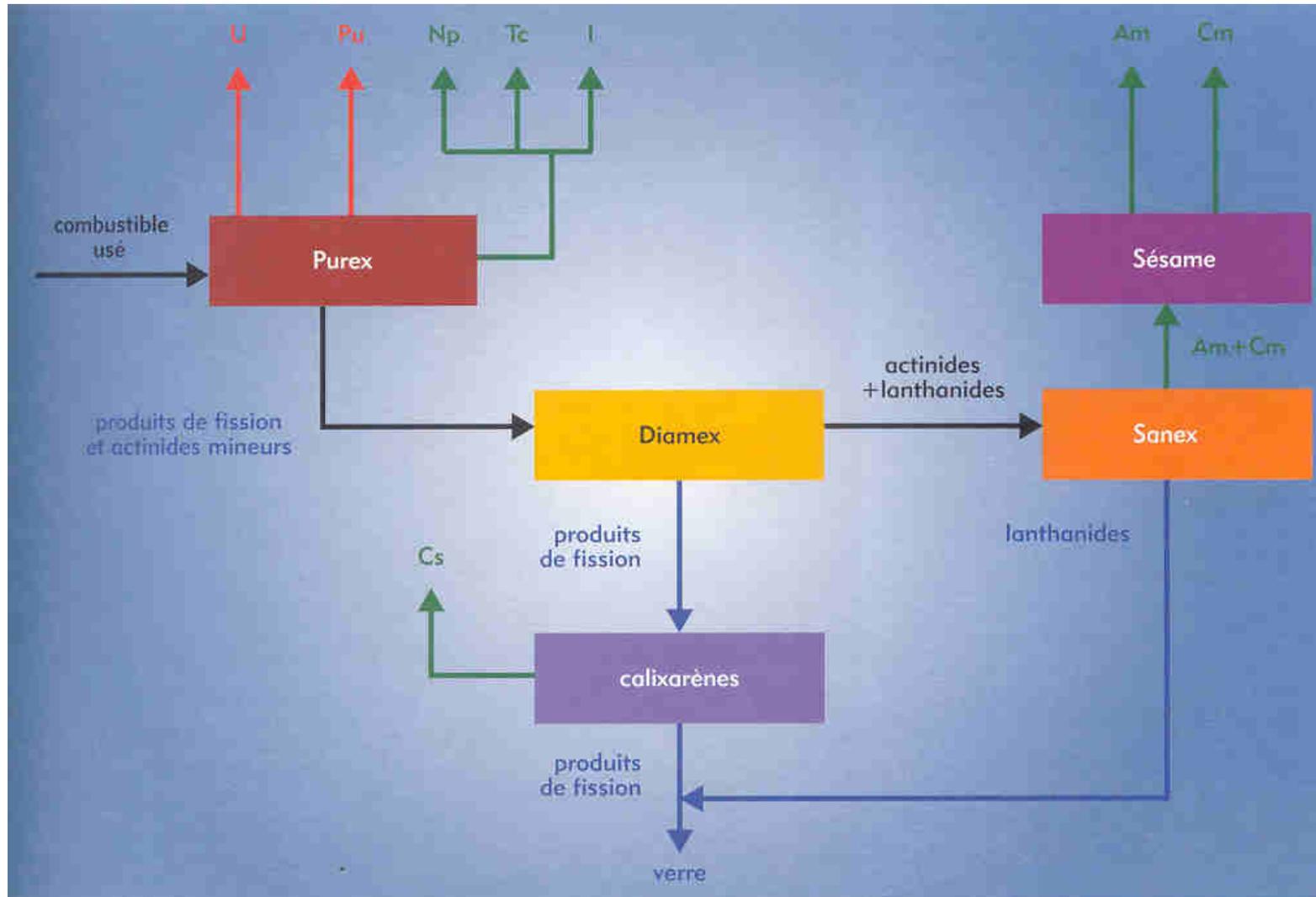
Bilan quantitatif du procédé PUREX



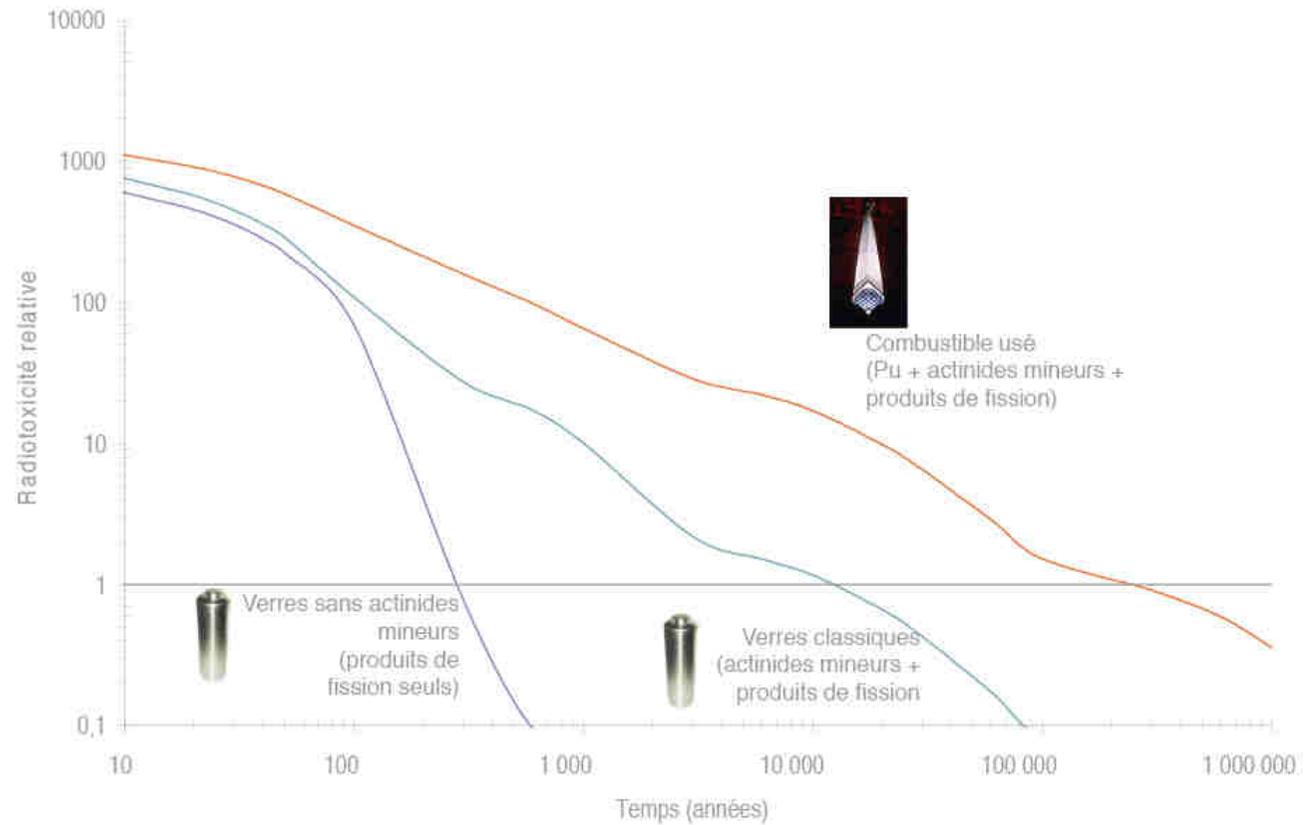
La solution aqueuse nitrique résiduelle contenant les PF et AM est évaporée et le résidu est coulé dans du verre (nucléaire) en fusion \Rightarrow déchets HA-VL



La séparation poussée (étudiée dans Atalante – Marcoule)



Décroissance de l'activité résiduelle en fonction du scénario de retraitement

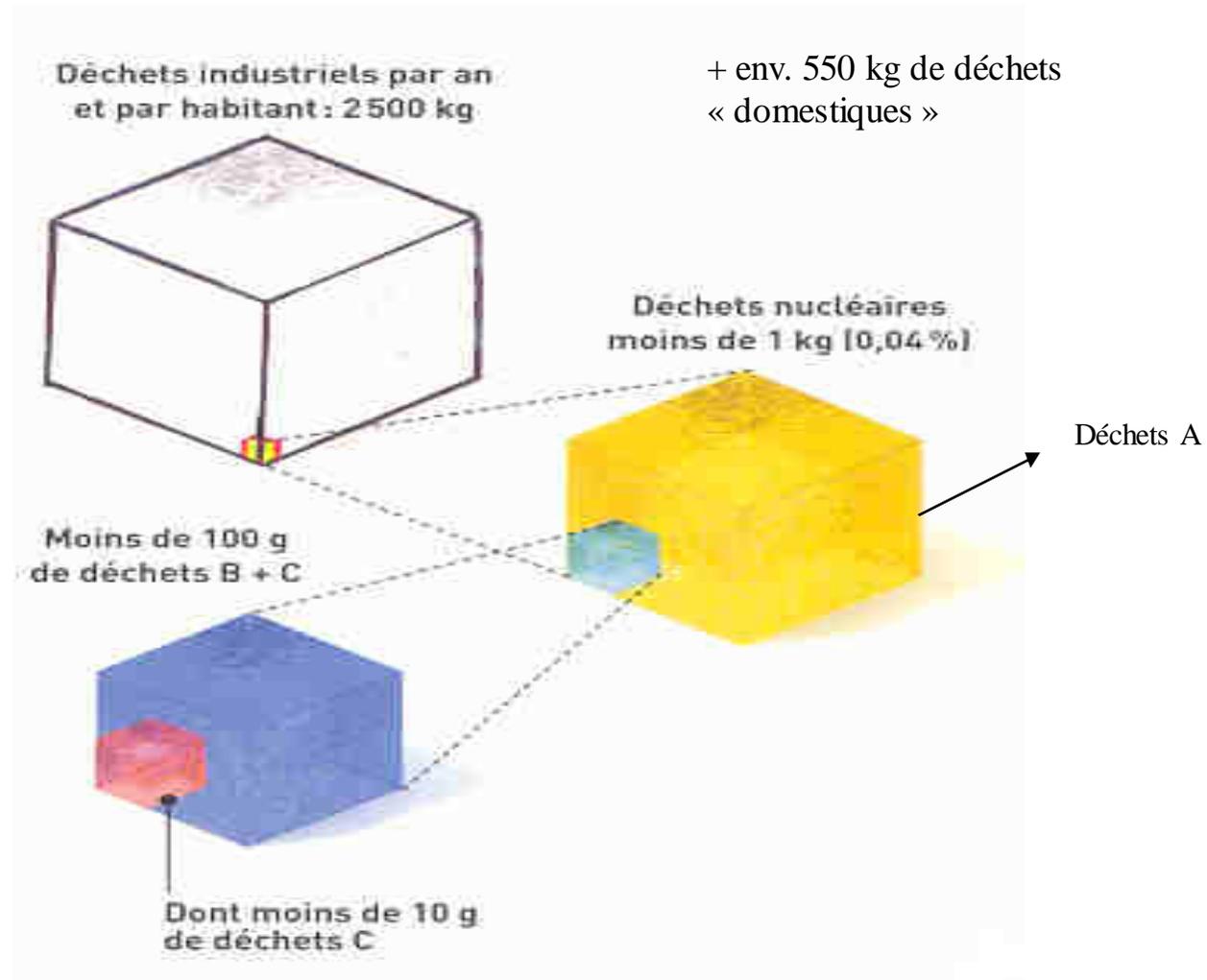


Production annuelle des différents types de déchets radioactifs.

Type de déchets	Volume annuel (m ³)	Volume annuel (%)	Activité totale correspondante (%)
Faible et moyenne activité – vie courte	15000	90	0,5
Moyenne activité – vie longue	1300	8,7	9,5
Haute activité (verres)	180	1,3	90

Source ANDRA : production annuelle des différents types de déchets radioactifs

Les déchets par an et par habitant en France



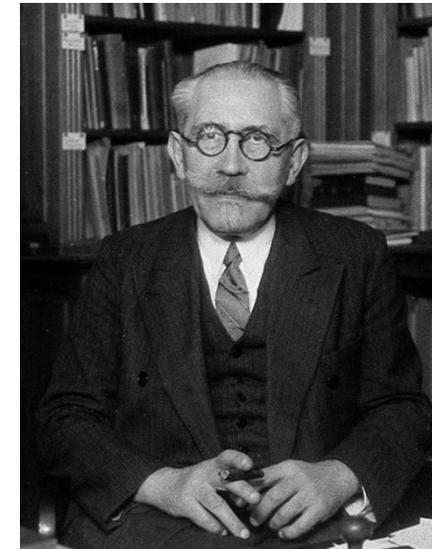
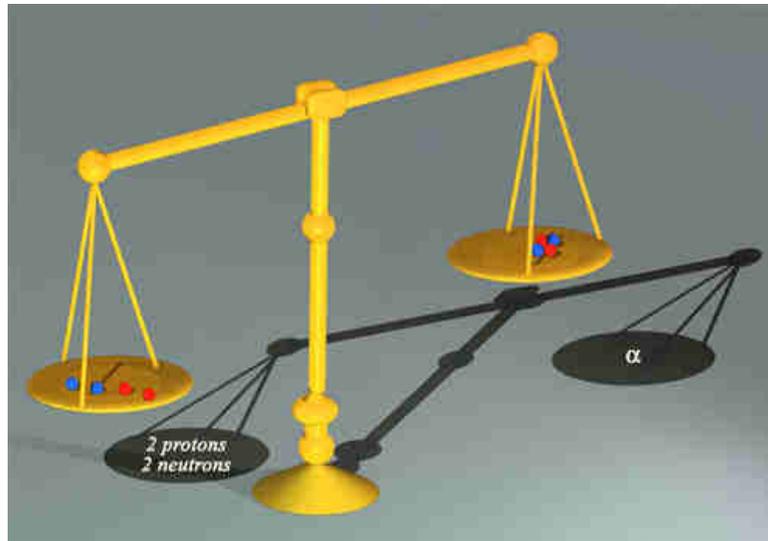
L'avenir du nucléaire : la fusion ?
ou
Les atomes : un concentré
d'énergie de liaison

Einstein (1879 – 1955)

$$E = mc^2 \quad (1905)$$



Paul Langevin (1872 – 1946) : idée d'une énergie de liaison (en 1913)

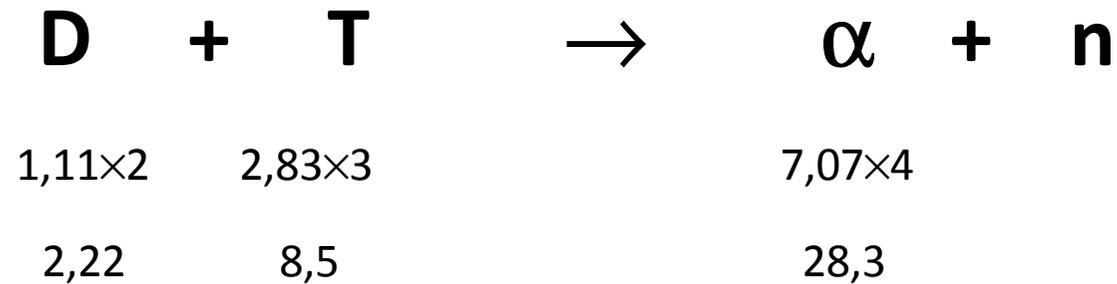


La masse de l'atome constitué est inférieure à celle de ses constituants pris séparément.
Ce ΔM correspond à l'énergie libérée = énergie de liaison des nucléons.

Energie de liaison D : 1,11 MeV/nucléon

Energie de liaison T : 2,83 MeV/nucléon

Energie de liaison α : 7,07 MeV/nucléon



$$28,3 - (2,22 + 8,5) = \mathbf{17,6 \text{ MeV/fusion}}$$

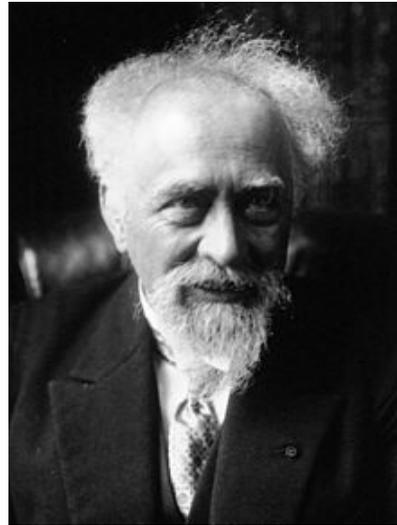
Le même calcul réalisé dans le cas de la fission de ^{235}U conduit à $\approx \mathbf{200 \text{ MeV/fission}}$

Soit :

Fusion : 4,4 MeV/nucléon

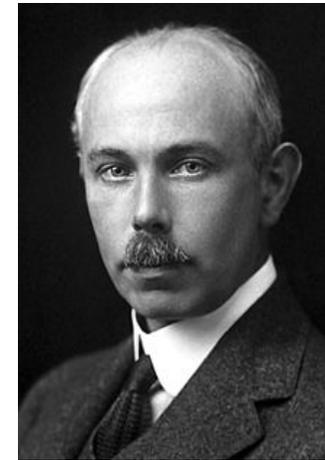
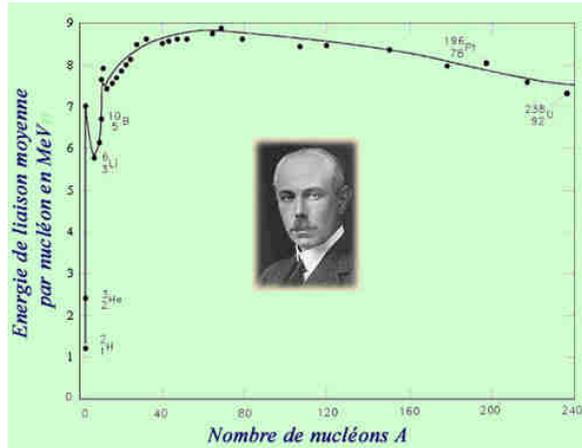
Fission : 0,85 MeV/nucléon

J. Perrin (1870 – 1942) : en 1919 il a recours à des réactions nucléaires (fusion), pour expliquer le fonctionnement du Soleil (mais il reste qualitatif).



Il publie ses travaux dans « La revue du mois », revue littéraire et scientifique de très bon niveau scientifique.

F. W. Aston (1877 – 1945) : « peser » les atomes.
 Δ de 120/1000 entre 4H et He
Différence petite mais significative (= bien réelle).



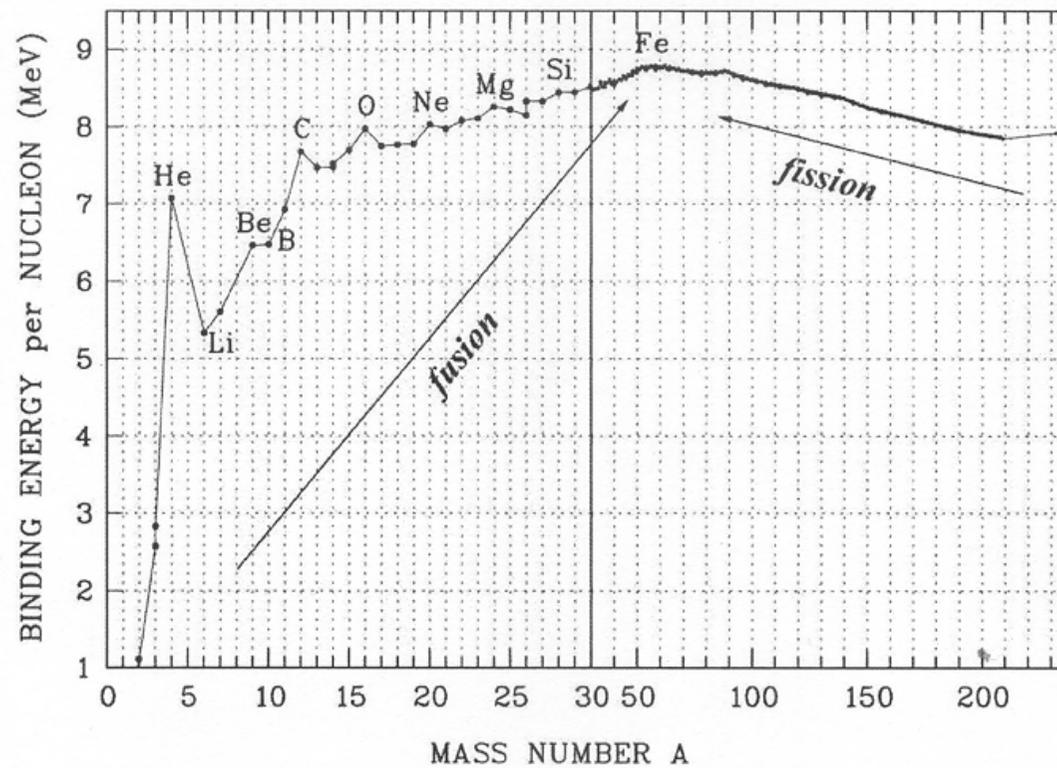
Prix Nobel 1922

J. Perrin (fév. 1920) calcule les énergies – quelques milliards d’années pour le Soleil.

Eddington (août 1920) : ayant en tête l’équivalence masse énergie et les résultats d’Aston il en déduisit que les étoiles peuvent briller durablement grâce à $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ (environ 15 milliards d’années pour le Soleil).

$$E_l = [M - Zm_e - Zm_p - Nm_N].c^2$$

$$\frac{E_l}{A} = \left[\frac{M - A}{A} \cdot 10^3 - 8,665 + \frac{Z}{A} \cdot 0,8395 \right] \cdot 0,9315$$



En chimie, le défaut de masse existe aussi mais il est pratiquement imperceptible. En effet :

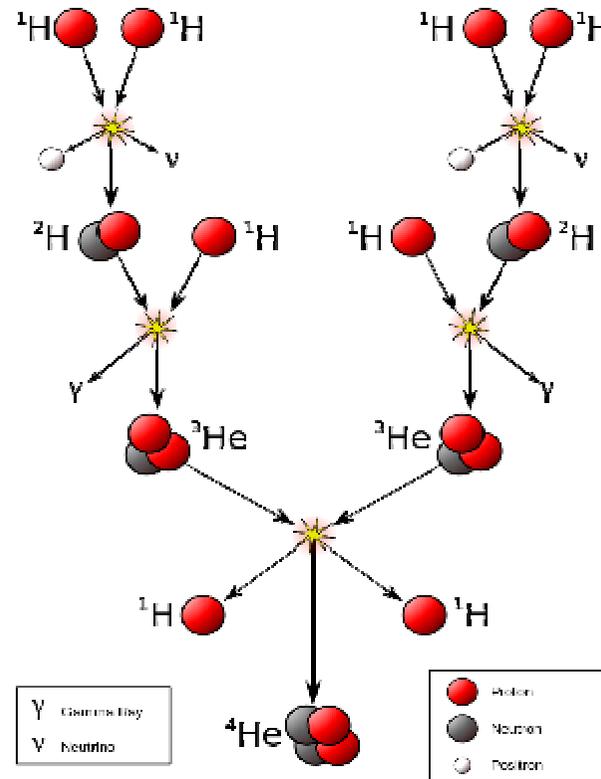
Fission **d'un** atome d' ^{235}U : environ **200 MeV**

Rupture d'une liaison C-C par exemple par combustion : **quelques eV**



Combustion de **1000 tonnes de charbon** (37 à 38 TJ) : $\Delta M \approx 0,4$ grammes
La même énergie sera produite par **0,46 kg d' ^{235}U** soit ≈ 7 kg d' UO_2 (enrichissement REP)

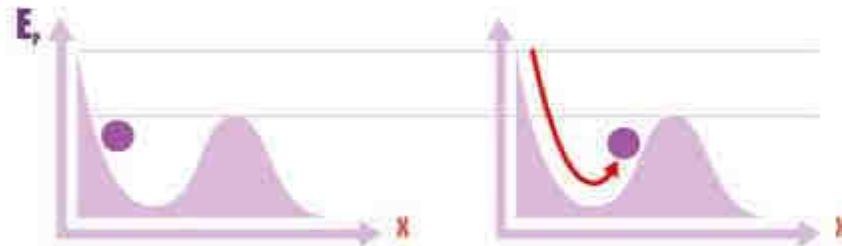
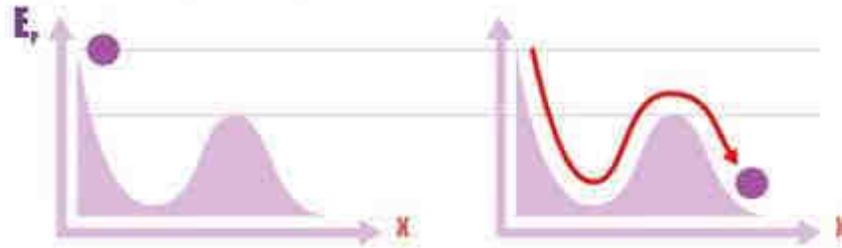
Les étoiles – premiers réacteurs de fusion



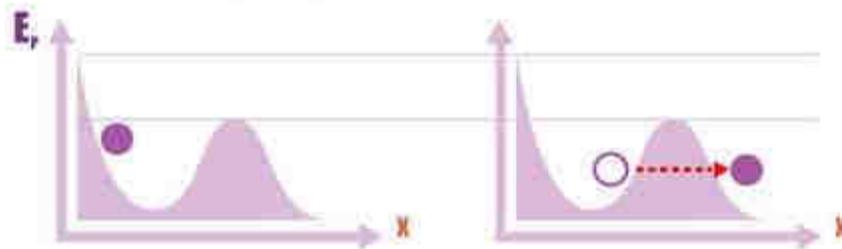
Il faut que la force nucléaire attractive forte l'emporte sur la répulsion coulombienne \Rightarrow il faut plusieurs centaines de millions de degrés pour franchir la barrière énergétique \Rightarrow **normalement la fusion est impossible** \Rightarrow physique quantique (*vide infra*).

Un (tout petit) peu de physique quantique

EN MECANIQUE CLASSIQUE



EN MECANIQUE QUANTIQUE



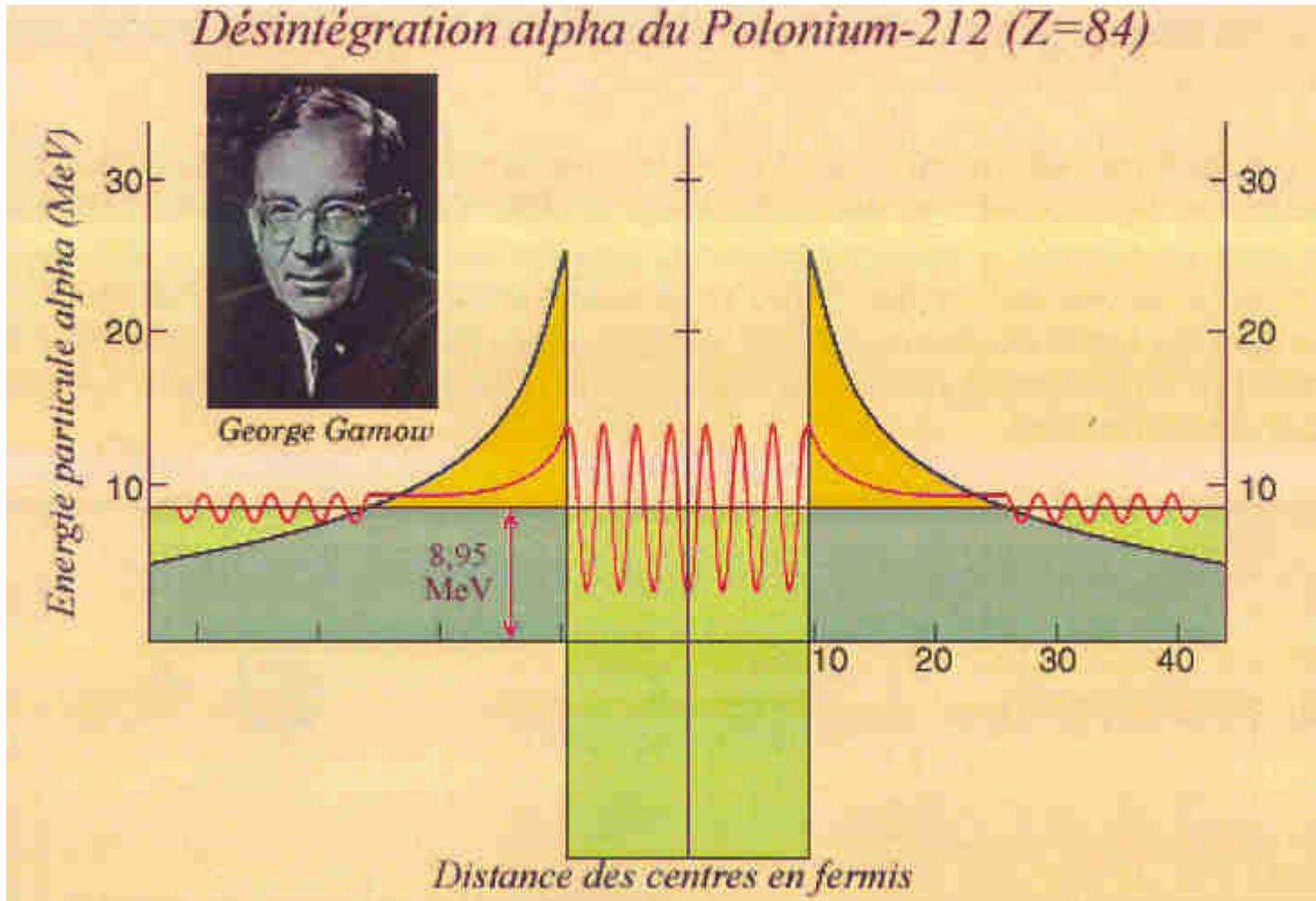
Louis de Broglie (1892 – 1987)



Dualité onde - corpuscule

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Gamow (1904 – 1968) - Explication de la désintégration α par l'effet tunnel





Nébuleuse de
l'haltère.

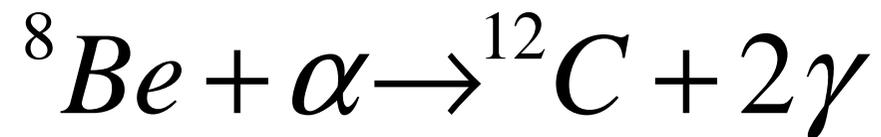
1360 AI

"Au cours de sa vie, une étoile est en équilibre entre les forces de gravitation qui tendent à la contracter et les forces de pression qui tendent à la dilater. En leur cœur, l'existence de réactions thermonucléaires a non seulement pour conséquence de fournir une source d'énergie pour des milliards d'années, mais modifie constamment la composition chimique interne d'une étoile. **L'évolution est donc inéluctable. Quand le carburant au centre a été consommé, l'équilibre est rompu et la gravitation reprend le dessus, l'étoile se contracte pour dégager de l'énergie gravitationnelle de façon à alimenter son rayonnement. La température au centre augmente jusqu'à ce qu'une autre réaction thermonucléaire faisant intervenir des noyaux plus lourds démarre**".



André Brahic (1942 – 2016)

Réaction 3α



Oliphant (1901 – 2000). En 1934 : choc de particules.

Les noyaux des isotopes lourds de H peuvent réagir ensemble. Oliphant accèdera au tritium et à l'hélium 3.

C'est le physicien Edward Teller qui proposera d'utiliser (en 1944) la découverte d'Oliphant pour fabriquer une bombe H.

« [...] nous n'avions pas la moindre idée que ceci pourrait être appliqué un jour pour faire des bombes H. Notre curiosité était simplement de la curiosité à propos de la structure du noyau atomique ».

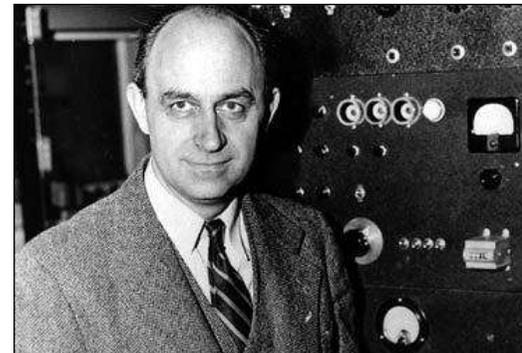


Mais tout celà est antérieur à la fission !!!

Lettre d'Einstein et L. Szilard au président Roosevelt : 02 août 1939.

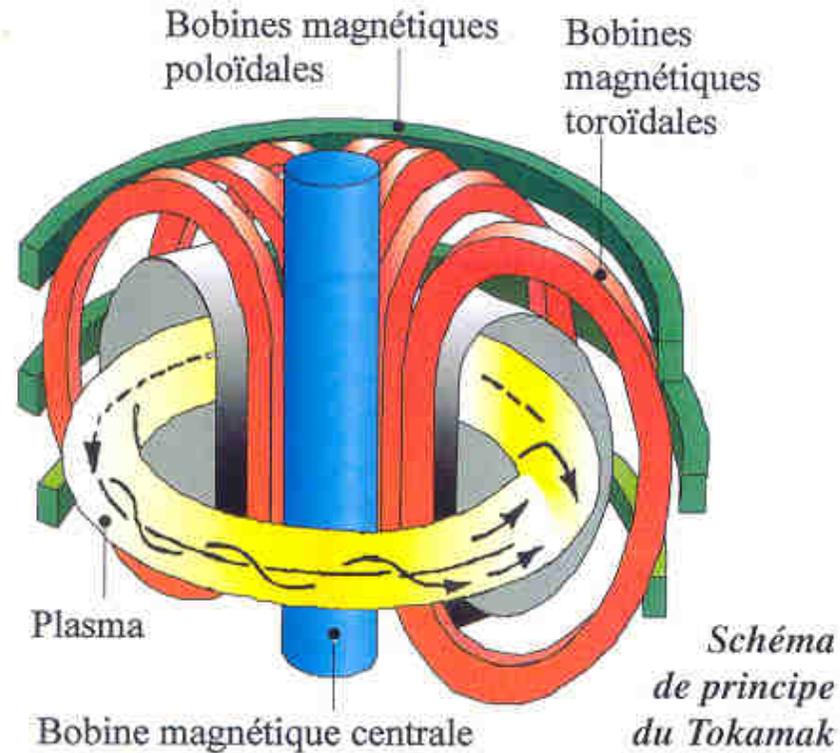
Projet Manhattan : pendant la seconde guerre mondiale

Enrico Fermi (1901-1954) : 1^{ère} pile atomique : fin 1942



A Cadarache : Torre Supra (\rightarrow WEST)

TOKAMAK (acronyme russe) : chambre toroïdale avec bobines magnétiques.



1^{ères} études avec Torre Supra datent des années 80.

Bobines toroïdales (18) : elles ont pour rôle de confiner le plasma (Japon, Europe)

Bobines poloïdales : elles « pincent » le plasma, en conjonction avec le courant induit dans le plasma lui-même et contribuent à l'éloigner des parois de la chambre (Russie, ...)

Solénoïde central : il induit le courant dans le plasma et contribue à son chauffage (USA)

Bobines refroidies à 1,8°K pour les rendre supra conductrices

Aujourd'hui Tore Supra évolue pour devenir dans le cadre du projet WEST (W (tungstène) Environment in Steady state Tokamak), une plate forme de tests, unique au monde, pour le développement de technologies-clés pour ITER.

WEST (W (tungstène) Environment in Steady state Tokamak) : le divertor situé sur le « plancher » de la chambre à vide, assure l'extraction des effluents gazeux et des impuretés ainsi qu'une partie de la chaleur générée par les réactions de fusion.

ITER - le chemin

Chine, Union européenne, Inde, Japon, Corée, Russie, Etats Unis.



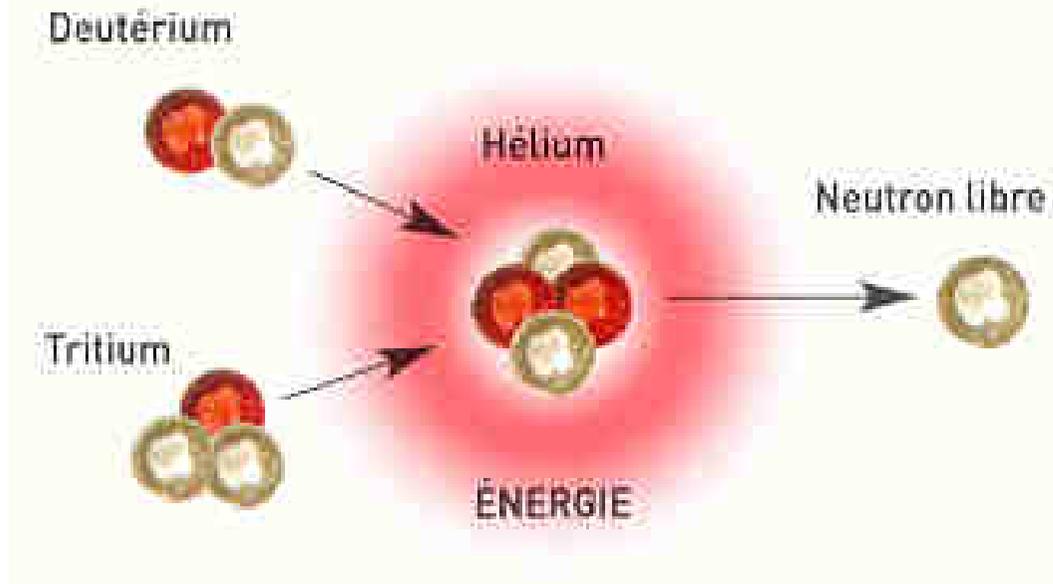
Cadarache 2005



ITER \neq Soleil : réactions proton – proton

Soleil : très mauvais réacteur de fusion
(Heureusement pour nous !)

Exemple de réaction de fusion



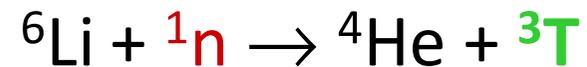
n de 14 MeV
qui chauffe le
caloporteur

Le noyau d'He est intéressant pour maintenir la réaction

L'installation ITER sera donc une INB.

Deutérium : relativement abondant dans l'eau de mer : 40 g/m³

Tritium : peut être fabriqué à partir du lithium 6 (couverture de Li) :



Principales caractéristiques de ITER :

Puissance de chauffe du plasma : 50 MW

Puissance thermique de la fusion : 500 MW

Rendement : 10 (si tout va bien)

Petit rayon du plasma : 2 m

Grand rayon du plasma : 6,2 m

Hauteur du plasma : 6,8 m

Volume du plasma : 840 m³

Masse du plasma : de l'ordre du gramme

Courant du plasma : 15 MA

Champ magnétique toroïdal : 5,3 T (champ magnétique terrestre : 47 μ T)

ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor :

coût investissement total : 4 milliards d'euros

coût total : 10 milliards d'euros

environ 13 ans de construction (2010 - 2023), puis environ 30-40 ans d'exploitation.

1^{er} plasma : prévu en 2025

Plasma : D/T : prévue en 2035

Puis, réacteur de démonstration (pilote) DEMO, avant de construire un réacteur électrogène.
La production industrielle d'électricité par fusion est attendue pour le milieu du XXII^{ème} siècle mais certains sont plus optimistes.

Merci pour votre
attention

