

USURE DU COMBUSTIBLE

- L'uranium **238**, **capture neutronique fertile**, donne naissance à un corps fissile : le plutonium 239 (**taux de conversion**)
- Quel que soit l'état du combustible, il faut que le cœur puisse diverger, d'où un certain **enrichissement minimum, même en fin de vie**
- Le combustible reçoit un **flux neutronique et radiatif** très important, ceci sous de **fortes températures et hautes pressions**

La durée de vie limite d'un combustible
dépend de paramètres **neutroniques et technologiques**

ENERGIE FOURNIE PAR LE COMBUSTIBLE

JEPC Jour Equivalent puissance contractuelle

on impose la puissance nominale, et la **durée effective** (en JEPC) de fonctionnement (maintenance, rechargements).

A partir de ces grandeurs on détermine l'énergie que doit fournir le cœur

$$E_i = P \cdot J \cdot 24 \cdot 3600$$

où : P est la puissance nominale (*ou contractuelle*) du réacteur en Watts

J est le nombre de JEPP

24 convertit J en heures

3600 converti ($J \cdot 24$) en secondes

d'où : $E_i = P \cdot J \cdot 86400$ avec E_i en Joules

Energie que fournit le coeur

énergie fournie par le combustible égale au produit du nombre de fissions par l'énergie libérée par fission $E_{fc} = \text{nombre de fission}$

nombre de fissions égal au nombre de noyaux disparaissant par fission

➤ **sans tenir compte des captures stériles** de l'uranium 235 :

$$E_{fc} = \text{nombre de noyaux disparaissant par fission} \cdot E_f$$

➤ **en tenant compte des captures stériles** de l'uranium 235 :

$$E_{fc} = \text{nombre de noyaux disparaissant} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f$$

$$\text{ou } E_{fc} = \text{nombre de noyaux fissiles consommés} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f$$

$$\text{ou } E_{fc} = N_{\text{cons}} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f$$

$$E_{fc} = N_{\text{cons}} \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \cdot E_f \cdot 1,6 \cdot 10^{13}$$

*Même en fin de vie, il faut que le réacteur fournisse de la puissance,
et pour ce faire il faut que le cœur puisse diverger*

**un réacteur ne peut en aucun cas consommer
la totalité de ses noyaux fissiles**

l'énergie que peut fournir un cœur est proportionnelle à

- **La masse de combustible.**
- **La différence entre les enrichissements initial et final.**

Pour augmenter la durée de vie d'un réacteur on peut :

- 1. augmenter la masse du combustible** (*augmenter la taille du réacteur*),
- 2. augmenter l'enrichissement initial,**
- 3. diminuer l'enrichissement final,** en concevant un cœur qui soit critique avec le moins de noyaux fissiles possible

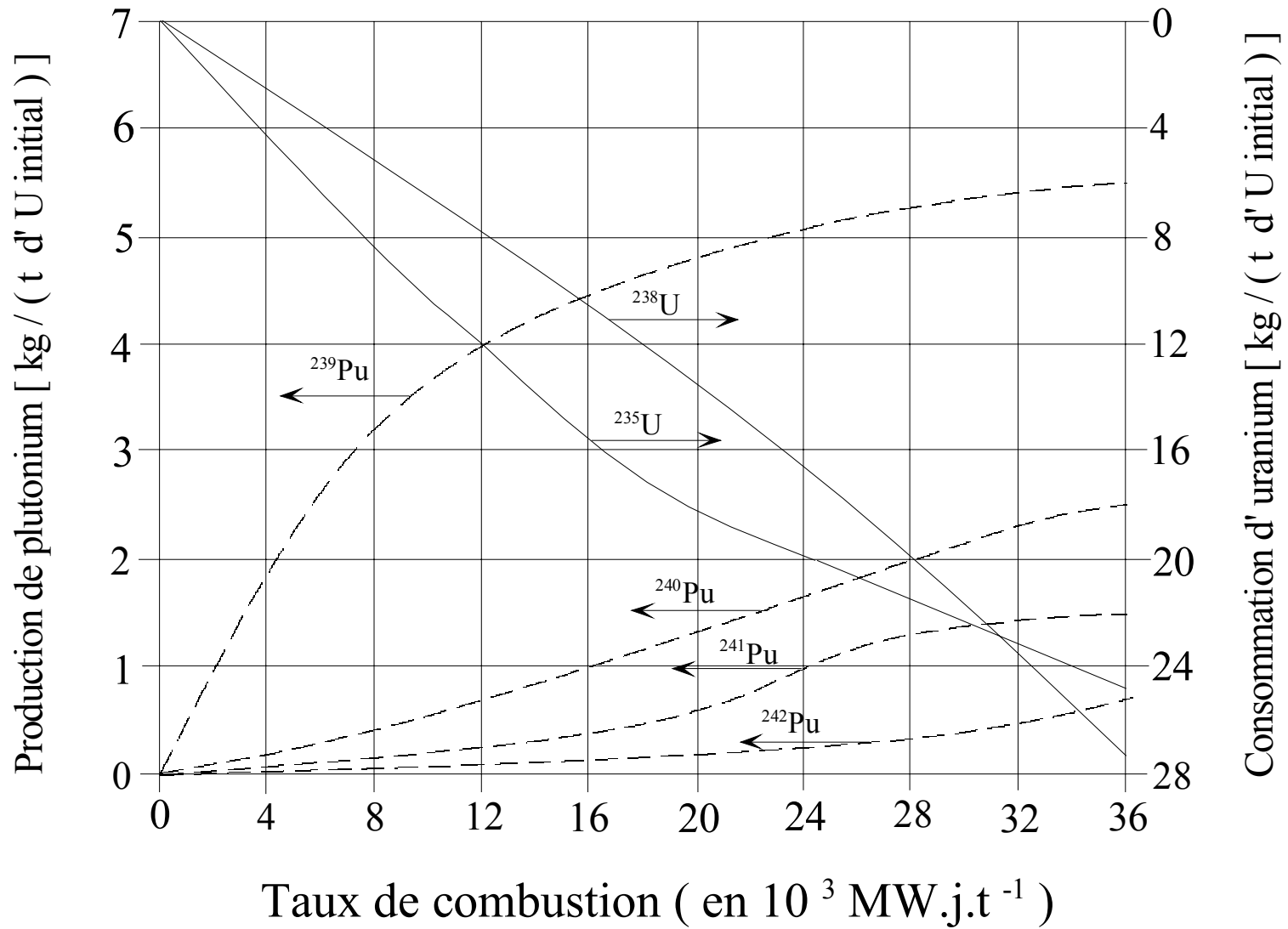
Production du Pu239 par captures fertiles

probabilités croissantes de **fission** pour le Pu 239 formé,
avec des **productions faibles** de Pu240, puis Pu241 par des captures

Le "**vecteur plutonium**" formé évolue avec le temps,
et la production d'énergie passe du "tout U235" initial,
à **près de 20% voire 30% par les fissions du Pu239**

La durée de vie est donc "*allongée*" par rapport à une estimation
sur le seul U235 présent en début de vie

La teneur en U235 finale peut donc être inférieure à celle estimée
sans tenir compte du Pu239 formé en cours de production



La flèche indique l'échelle sur laquelle il faut lire les valeurs.

LIMITES TECHNOLOGIQUES - TAUX DE COMBUSTION

taux de combustion
quantité d'énergie fournie par une tonne de combustible

- la masse de l'uranium 235 et 238
- plus la masse de l'oxygène
- plus la masse des produits de fission
- plus la masse des transuraniens (Pu239, Pu240,... U236, U237,...)

soit tout ce qui se trouve dans la gaine....

$$\tau = \frac{P.J}{M_c}$$

où : P est la puissance du réacteur en [MW]

J est le nombre de JEPP en [jour]

M_c est la masse de combustible en [tonne]

τ est le taux de combustion en [MW.j / t]

taux de combustion maximal fixé par les autorités de sûreté.

R.E.P. max = 50000 MW.j / t U.N.G.G. max = 5000 MW.j / t

Dommmages occasionnés dans un cœur

Irradiation des gaines

flux neutronique (*d'environ 10^{14} n/cm².s*) et radiatif très intenses
température très élevée (*de 300°C à l'extérieur du combustible
à plus de 400°C à l'intérieur*)

Si l'on ne limitait pas le temps d'exposition, ces gaines pourraient :

- **se fissurer, voire se rompre**
- **se déformer par un phénomène de fluage** (*déformation plastique*).

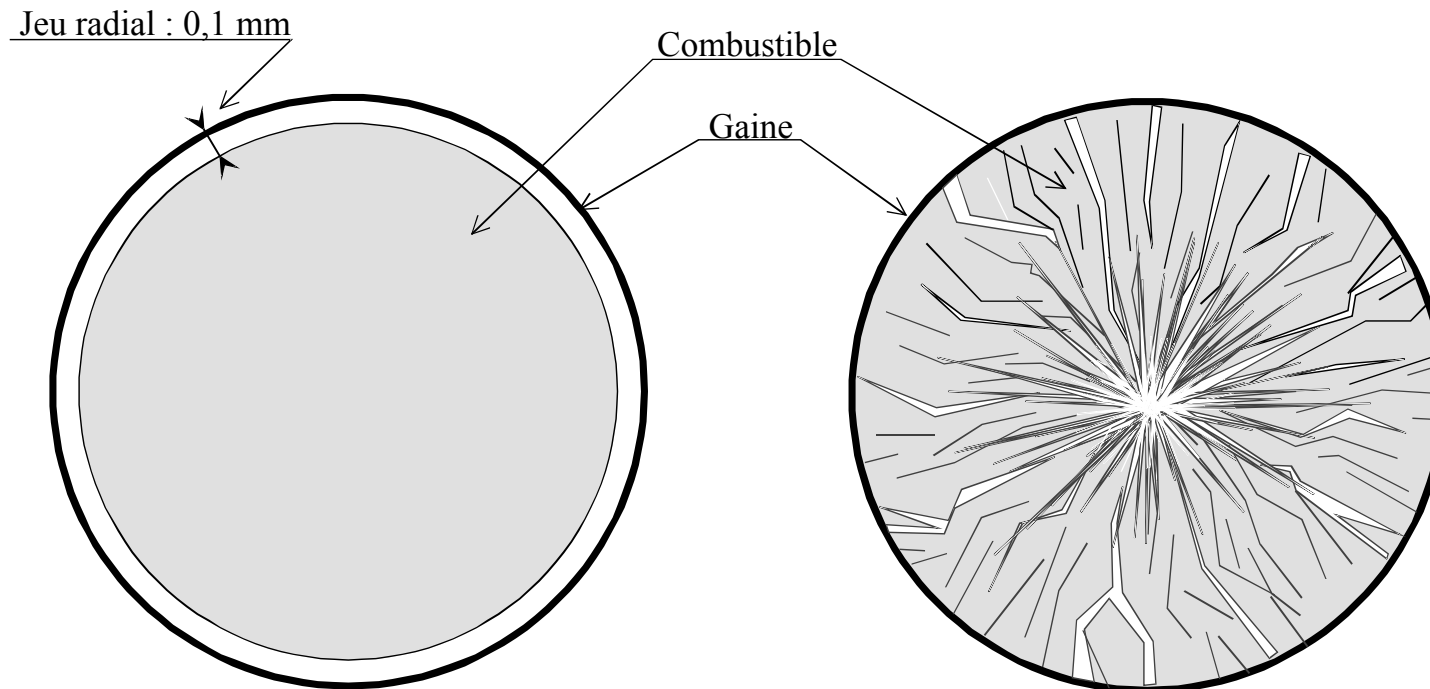
Le **zirconium** est un matériau qui supporte bien l'irradiation

Le bombardement neutronique entraîne des transferts d'énergie cinétique aux noyaux collisionnés. Les dommages causés par l'irradiation sur un matériau quelconque, sont évalués par le **nombre de déplacement par atome** (D.P.A). Les aciers austénitiques peuvent supporter près de 8 DPA. Les conditions thermiques sous contrainte permettent toutefois des réarrangements par diffusion atomique.

Dégazage du combustible

Gonflement et dégradation du combustible

le combustible va gonfler (*par inclusion de gaz*), se déformer, se fissurer, et peut même, en son centre (*là où la température est la plus élevée*), fondre.



Pastille d'oxyde d'uranium neuve

Combustible Pastille d'oxyde d'uranium usagé

Limites de fonctionnement

- **taux de combustion maximal**
- **température centrale du combustible.**
- **puissance émise**
- **épaisseur du combustible**

Nécessité de calculer les **puissances volumiques**

Et d'en déduire les **températures du combustible**

Ainsi que les **taux de combustion maximaux**