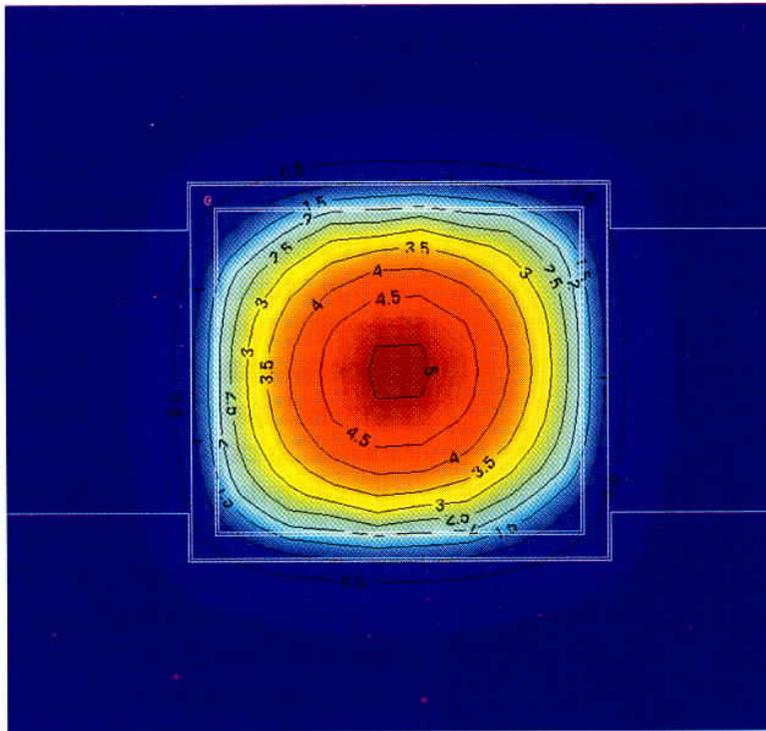
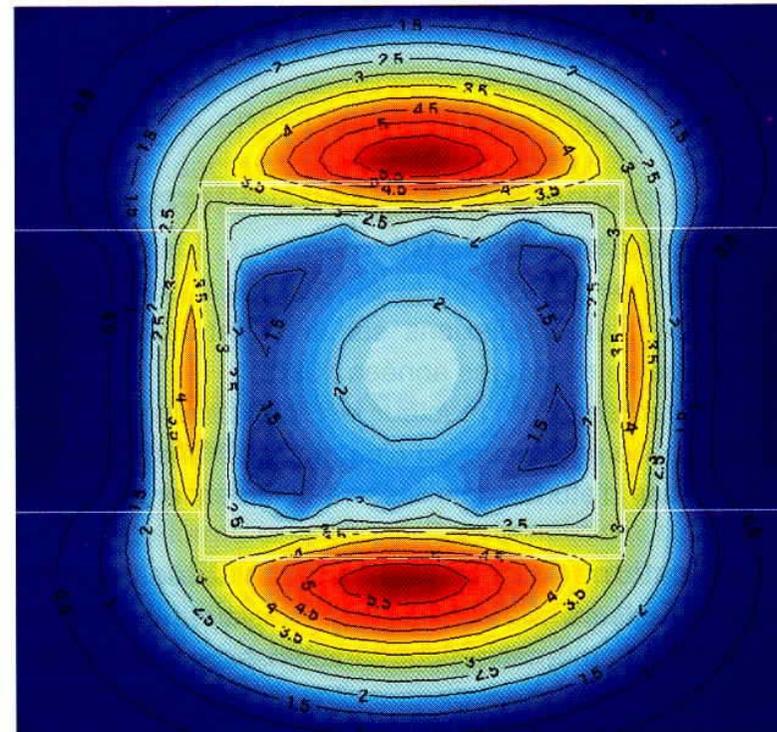


REPARTITION SPATIALE DU FLUX ET DE LA PUISSANCE



Cœur UMo, $0,907 \text{ MeV} < E$, flux rapide intégré axialement
 $\times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$



Cœur UMo, $E < 0,625 \text{ eV}$, flux thermique intégré axialement
 $\times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$

RELATION ENTRE FLUX ET PUISSANCE

REPARTITIONS SPATIALES FLUX ET PUISSANCE

- Principe de calcul par homogénéisation
- Cas d'un cœur idéal sans absorbant
- Répartition des flux au niveau du faisceau de crayons
- Répartition du flux au niveau du cœur
- Cas d'un cœur avec absorbant, effets hétérogènes

APPLATISSEMENT DE LA PUISSANCE

- Nécessité d'aplatir la puissance
- Principes de l'aplatissement du flux
- Utilisation de poisons consommables
- Utilisation d'un réflecteur de neutrons
- Zones d'enrichissement variable

La population neutronique dans un cœur est fonction

- de **l'énergie** (spectre multigroupe)
- du **temps** (cinétique des populations)
- et de **l'espace** (répartition de la puissance)

Φ (énergie, position, temps)

Spectre multigroupe

L'objectif est de déplacer les neutrons vers le **domaine thermique**
où ils sont le plus longtemps et font de la **puissance**

Le spectre **rapide** caractérise les neutrons **juste issus de fissions**
mais génèrent de la **fluence** sur la **cuve**

deux études :

en un point particulier du cœur

regardons évoluer la population neutronique dans le temps

Φ (temps) à un endroit donné
C'est un problème dit "**de cinétique**"

à un instant donné

comment se répartissent les neutrons dans le cœur

Φ (position) à un instant donné
C'est la **répartition spatiale** de la population neutronique.

Deux remarques fondamentales :

A la **criticité**, la population est **stationnaire en tout point**

En tout point elle n'est **pas uniforme dans l'espace**

- Il y a plus de fuites sur les bords du réacteur
- Il y a des différences entre matériaux multiplicateurs ou absorbants

RELATION ENTRE LE FLUX ET LA PUISSANCE

La connaissance de la répartition spatiale des neutrons conduit à la répartition spatiale de la puissance neutronique et la puissance spécifique des crayons, des pastilles et globale

densité neutronique n [neutron/cm³]
flux neutronique [densité neutronique] x [v vitesse des neutrons]

$$\Phi = n \cdot v \text{ [neutron/cm}^2\text{.s]}$$

nombre de fission par cm³ et par seconde

$$R_{\text{fission}} = \Phi \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{\text{fission}} \cdot N_i$$

grandeurs prises dans le domaine thermique (REP)

avec le taux de fission qui dépend de la **position**
et l'énergie dégagée par une fission E_f ,
on obtient la **puissance volumique P_v**
exprimée en **Watt par cm³ de cœur**

$$P_v = R_{\text{fission}} \cdot E_f \quad [\text{W/cm}^3]$$

deux informations essentielles pour

- l'évacuation de la puissance
- la tenue des matériaux aux contraintes (usure)

REPARTITION SPATIALE FLUX ET PUISSANCE

Cœur de réacteur hétérogène :

plusieurs milieux, composés d'un certain nombre d'éléments

Chaque milieu a des effets particuliers sur les neutrons
agit donc différemment sur la répartition des neutrons
au sein du cœur donc nécessité d'homogénéiser

Pour un Réacteur à Eau Pressurisée,

- le cœur est formé par la juxtaposition d'assemblages
- à 17 x 17 crayons (*25 tubes d'instrumentation*),
- noyés dans l'eau légère (*modérateur et caloporteur*)

structure homogène :

milieu fictif,

possédant des caractéristiques

rassemblant celles des différents milieux réels d'origine

L'homogénéisation, procédé purement imaginaire,
apporte une **simplification** au niveau des **calculs de**
neutronique

attention à la rigueur dans le processus :

conserver les taux de réactions pour le bilan neutronique

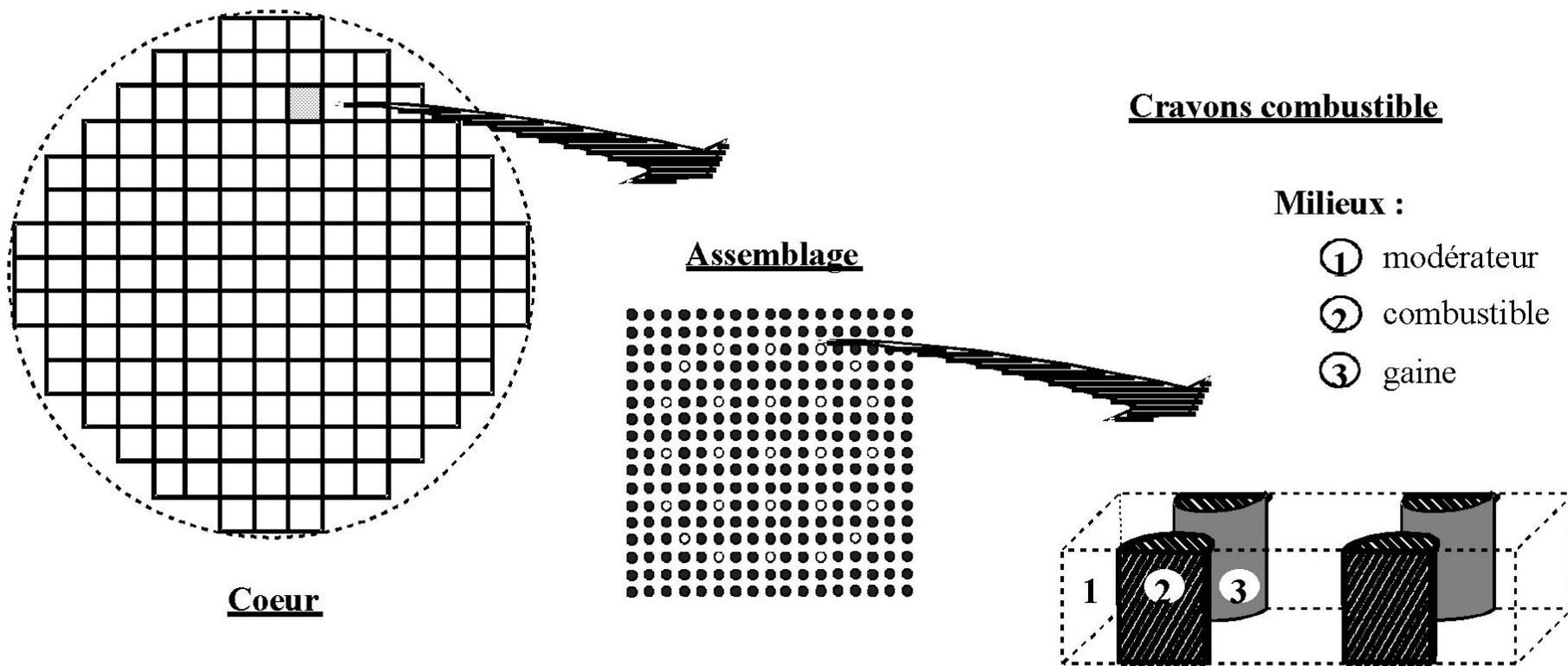
problème d'équivalence à vérifier

autoprotection des résonances

(diminution du flux à cause des résonances)

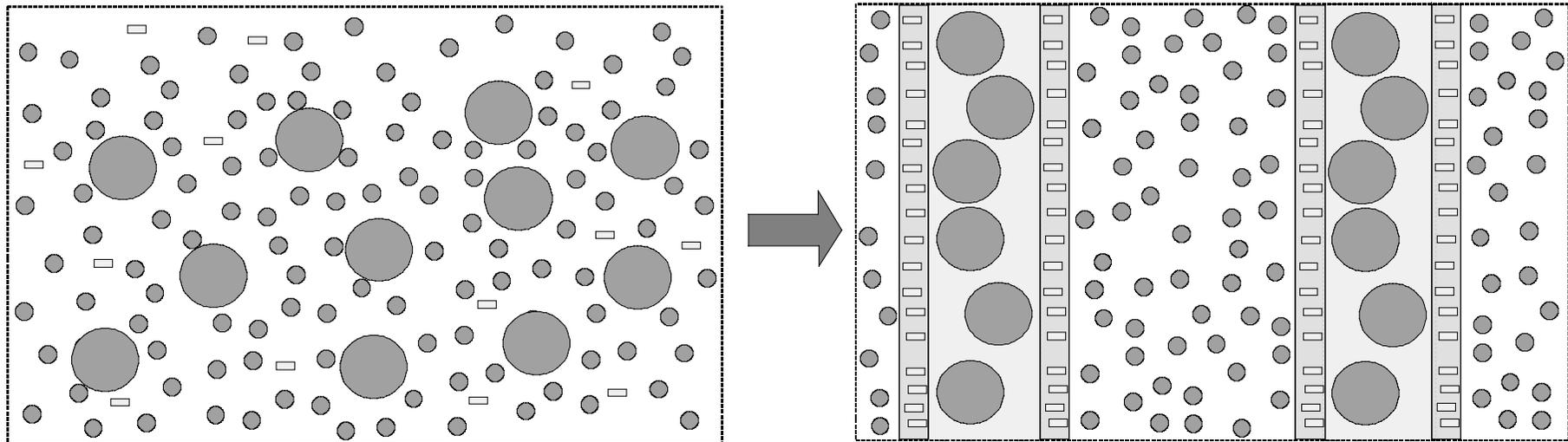
flux macroscopique perturbé

d'où calcul de sections homogènes équivalentes



Principe de l'équivalence homogène-hétérogène

PRINCIPE DE L'HOMOGENEISATION



Structure homogène

Structure hétérogène

On définit une cellule équivalente (*fictive*)
qui produit les mêmes taux de réaction
que la cellule hétérogène (*réelle*)

Approche homogène : cas d'un cœur sans absorbant

1. Répartition au niveau du faisceau de crayons

Le flux de neutrons thermique ou rapide est différent selon les milieux

Au sein du **combustible**, les neutrons naissent **rapides**

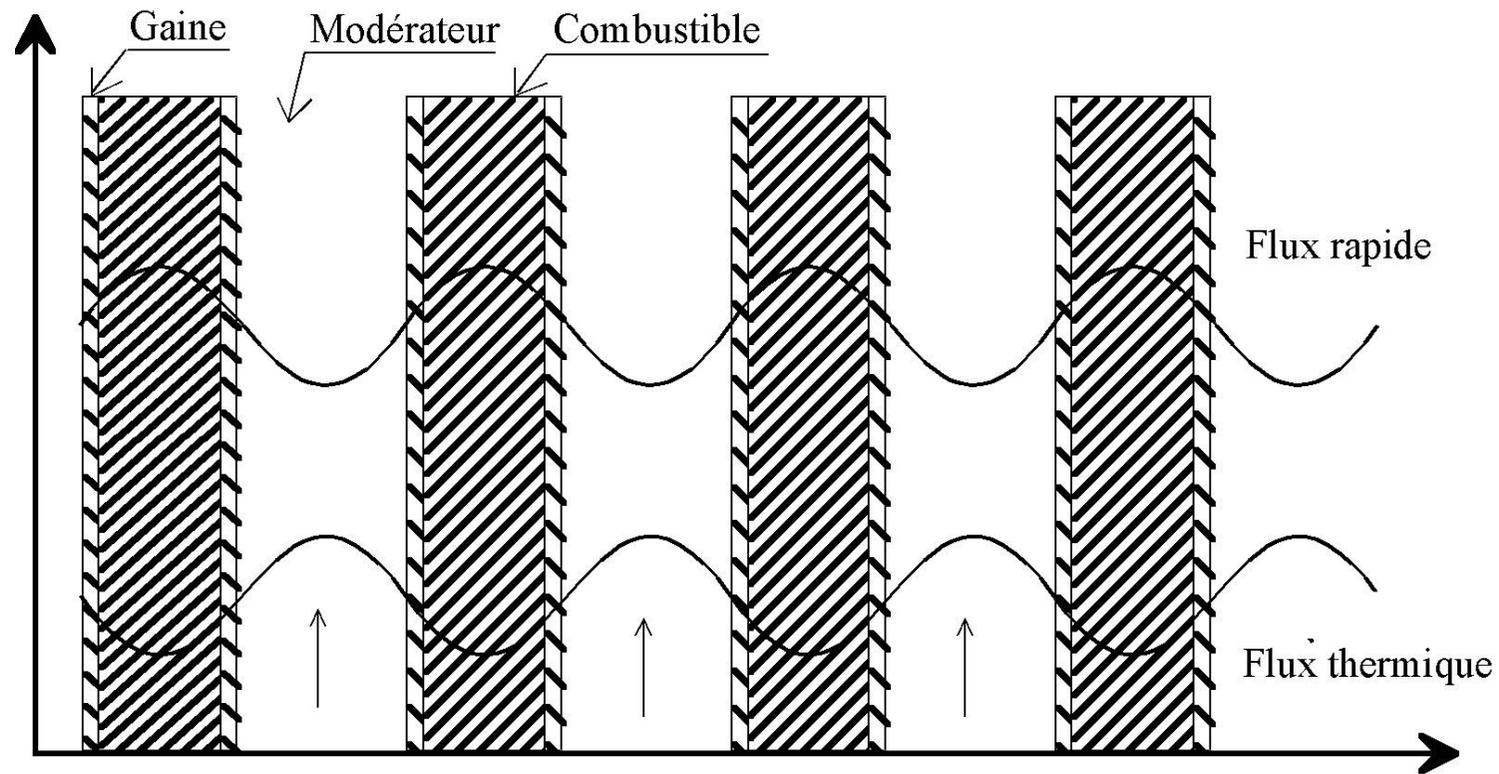
Ils perdent peu de vitesse dans le combustible

Ils passent dans le modérateur

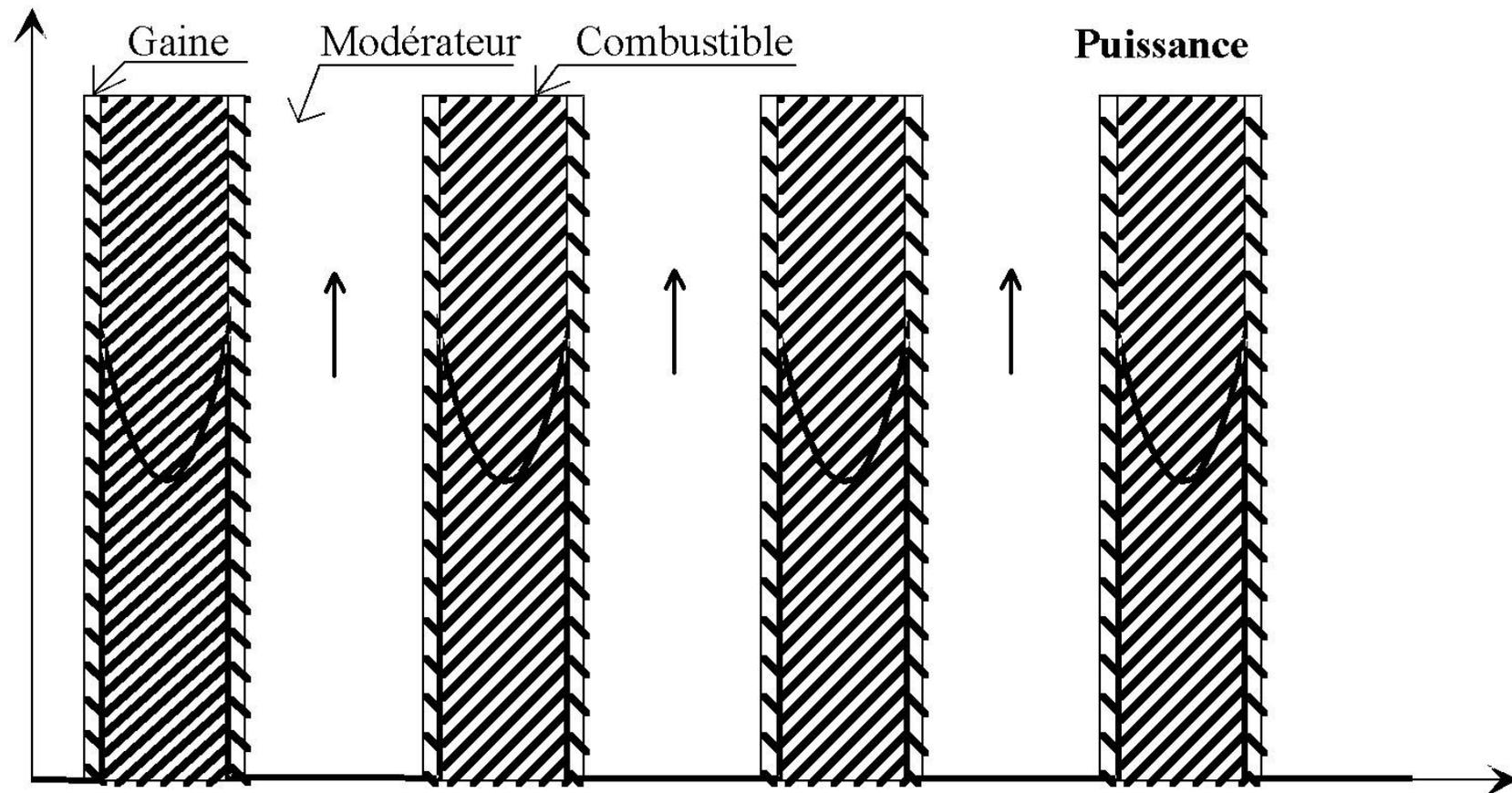
Au sein du **modérateur**, les neutrons deviennent **thermiques**

Ils se thermalisent

Et s'ils reviennent dans le combustible, ils sont absorbés (fission)



Les fissions sont provoquées par les neutrons thermiques.
 La distribution de puissance dépend du flux de neutrons thermiques
 dans le milieu multiplicateur (milieu combustible)



répartition de la puissance selon les milieux
(attention température différente...)

2. Répartition au niveau du cœur

Modèle simplifié : **cylindre de rayon R et de hauteur H**

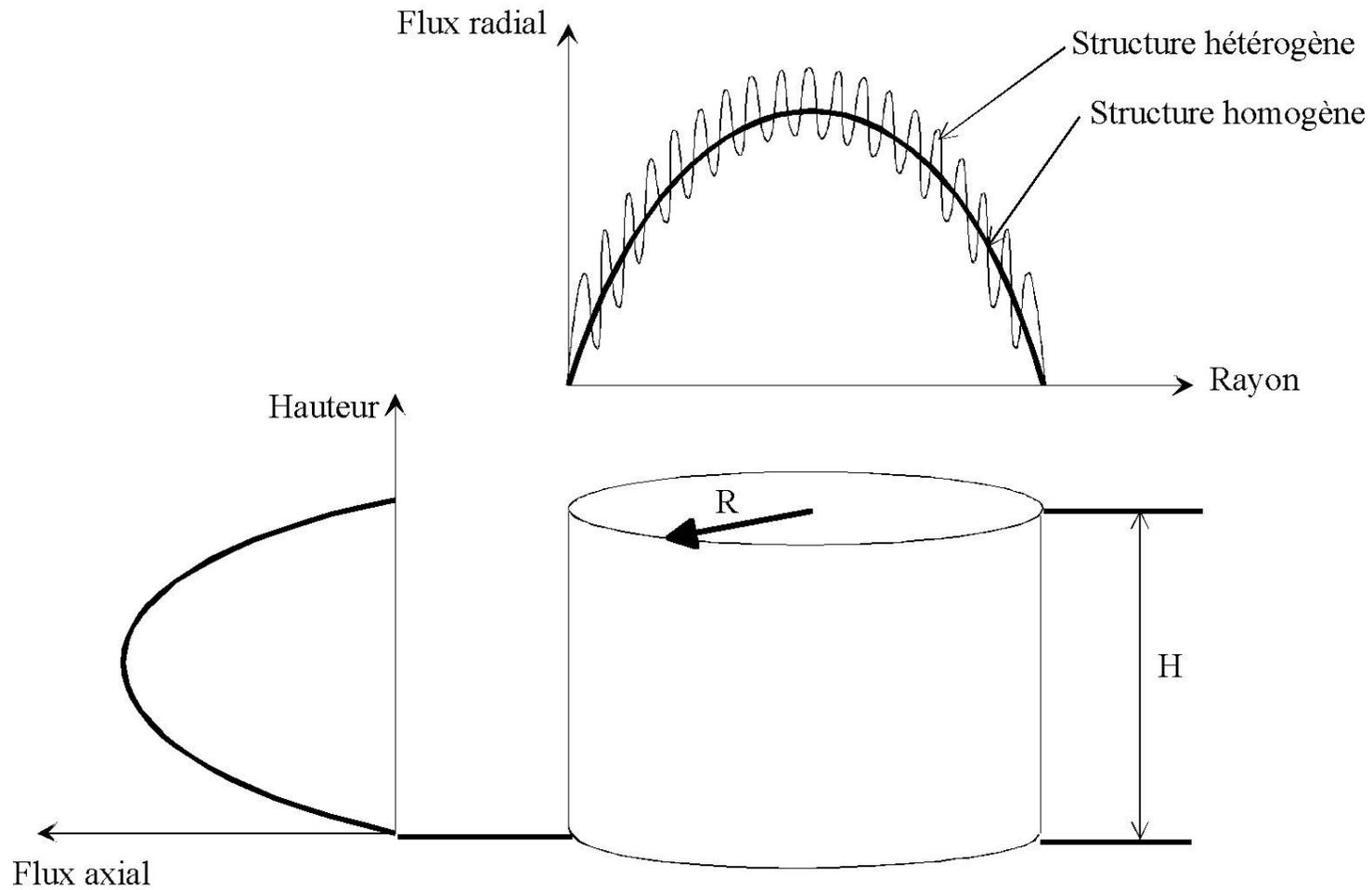
Les neutrons situés en **périphérie**
fuients plus facilement
que ceux situés au **centre du cœur**

Le flux est donc **déprimé en périphérie**

La répartition du flux s'exprime comme :

- **Une composante radiale (selon R)**
- **Une composante axiale (selon Z)**

Et une composante temporelle...



**flux en cosinus (*axial*)
et en fonction de Bessel (*radial, équivalent à cosinus*)**

Chaque élément combustible dégage de l'énergie proportionnelle à la **puissance spécifique de la pastille**

canal, l'espace qui existe entre deux éléments combustibles dans lequel **passe le caloporteur**

canal chaud, là où le **caloporteur est le plus chaud**

le canal chaud se situerait dans la **zone centrale du cœur**
la température du caloporteur étant liée à la puissance spécifique
l'usure y est maximale

le **canal froid** est plus vers la **périphérie**
l'usure y est minimale

attention à la caléfaction...

3. effet d'un absorbant sur le flux

absorbant section efficace de capture importante σ capture [barns]

Hafnium	103
Bore10	759
Cadmium	2450

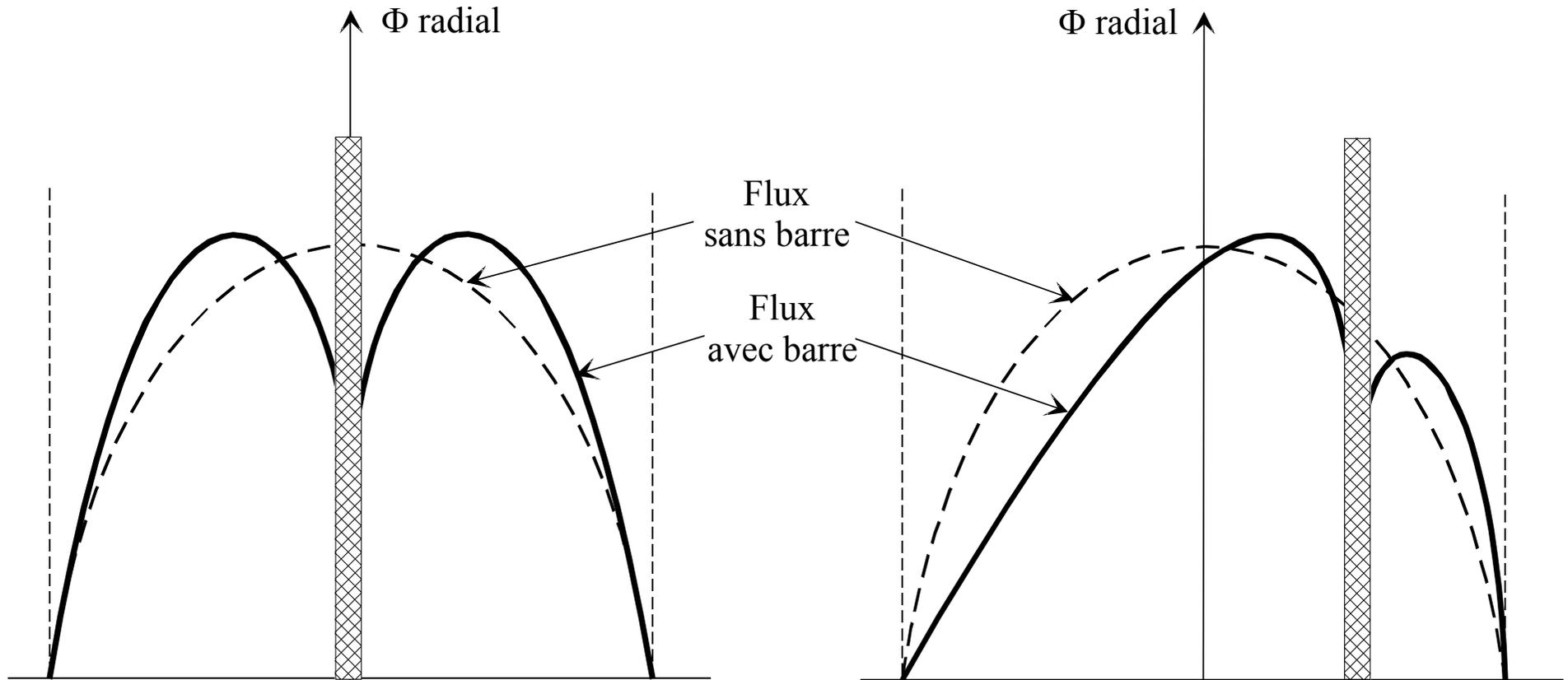
grappes de contrôle constituées d'absorbant

dans leur voisinage **dépression importante du flux**
et donc de la **puissance**

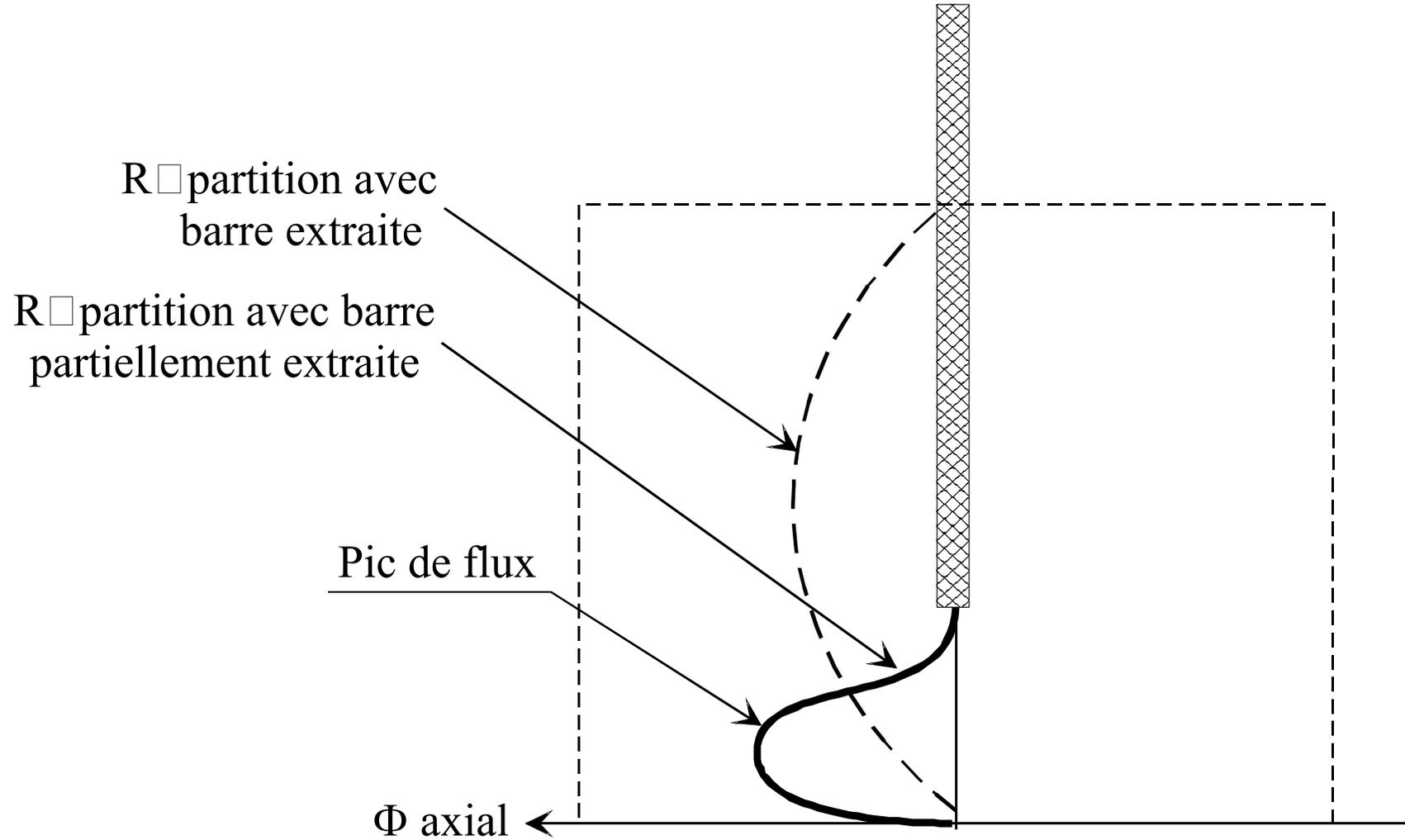
les grappes de contrôle permettent de **maintenir l'état critique**

ou de **garantir la sous-criticité à l'arrêt**

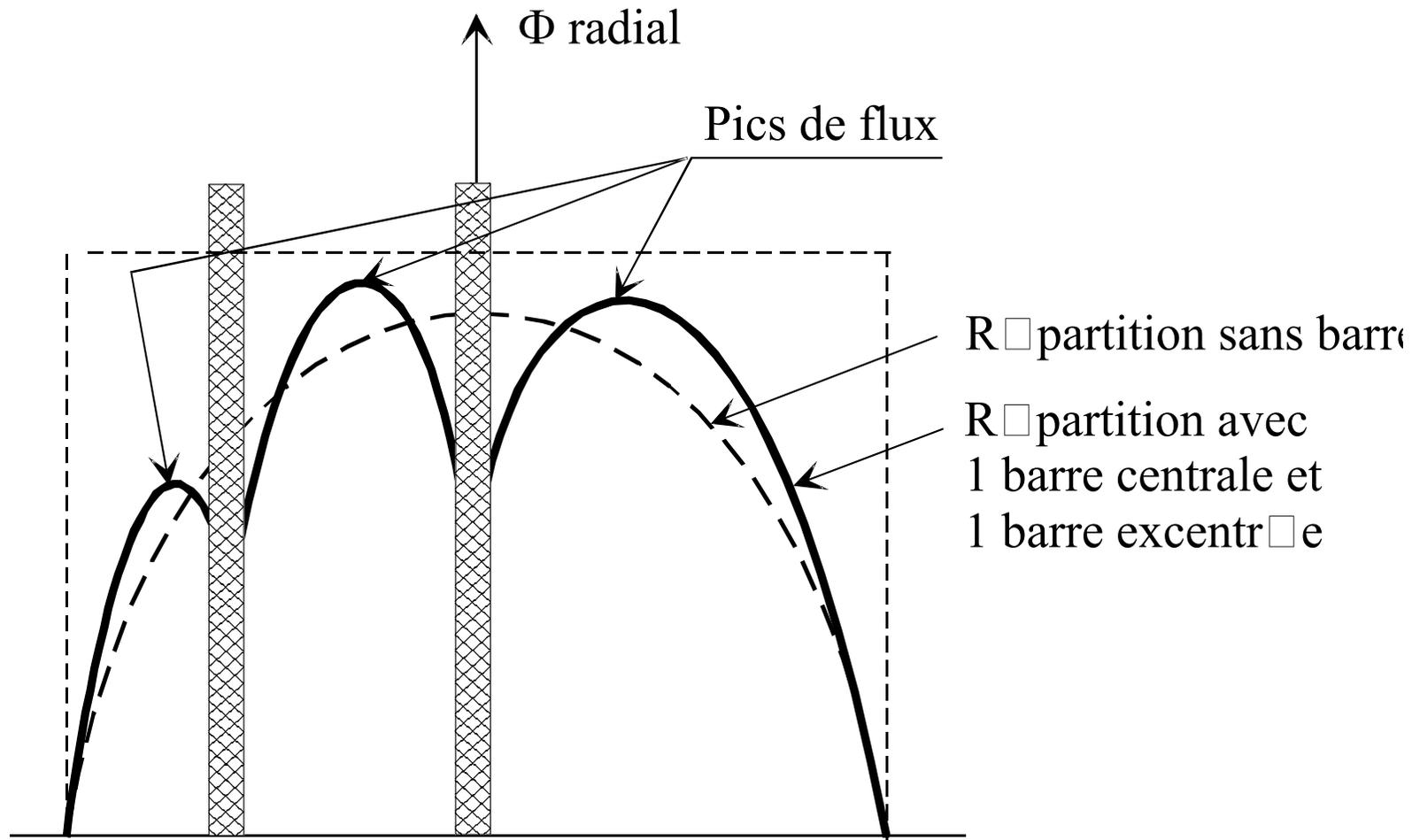
Bascule de flux radiale



Pincement de flux axial



pic de puissance dépend de l'efficacité des grappes insérées
grappes efficaces, flux "pincé" **pics de puissance élevés**



Attention les grappes déforment le flux

Donc :

Limiter leur nombre.... mais sûreté nécessaire

Compenser au Bore (*concentration limite...*)
car effet uniforme sur le cœur

Barreaux d'absorbants solides (*pyrex boré*)
Particulièrement pour les cœurs neufs

choisir le nombre et l'efficacité des grappes de contrôle

APPLATISSEMENT DE LA PUISSANCE

contraintes thermiques, technologiques et de sûreté limitent la **puissance locale** d'un élément combustible

capacité de refroidissement du canal chaud limitée par les caractéristiques **thermiques** (*coefficient d'échange*) et le **débit** (*pompes primaires*) du caloporteur

Pour éviter la fusion de la gaine,
il faut **limiter la puissance produite** par les assemblages

idéal : aplatir le flux donc la puissance...

distribution de puissance la plus uniforme possible en minimisant la présence et la valeur des pics

objectifs :

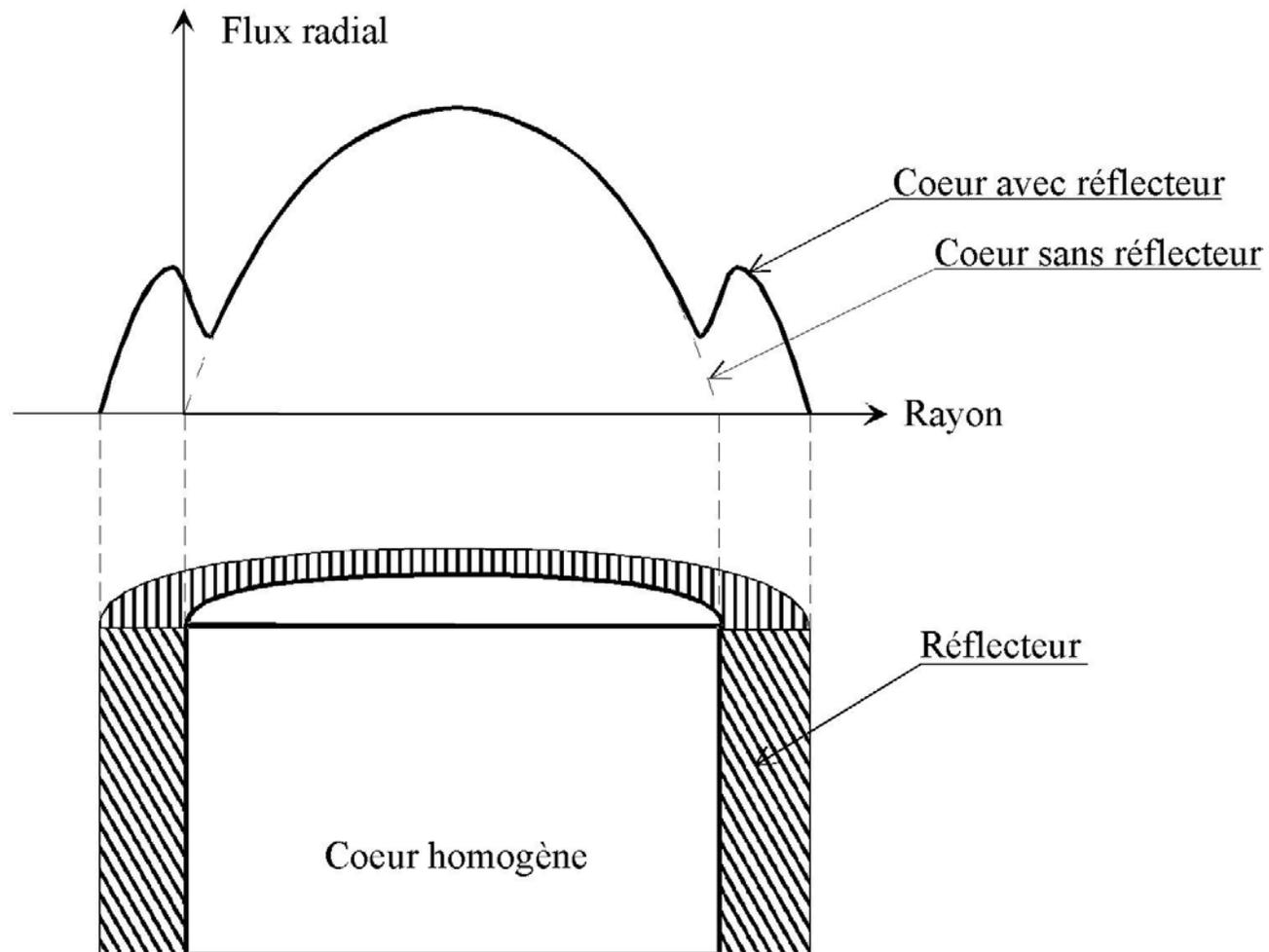
- **faciliter le contrôle du cœur**
- **soutirer plus d'énergie** pour une même masse de combustible
- **éviter les pics de puissance**
- **uniformiser l'usure**

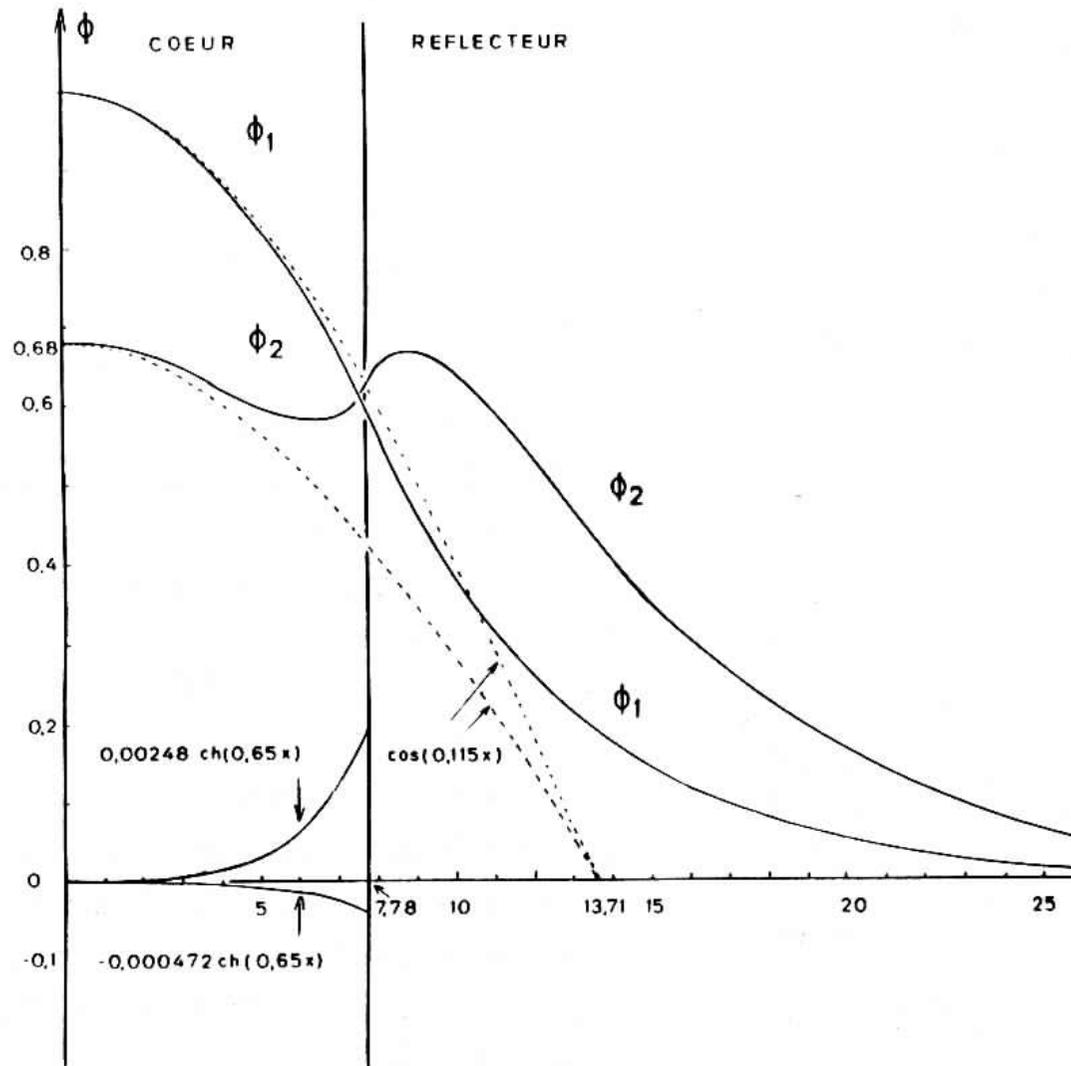
Pour l'aplatissement de la puissance
nous disposons de plusieurs moyens,
selon les membres de la formule suivante :

$$\text{Puissance} = E_f \cdot R_{\text{fission}} = E_f \cdot \Phi \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{\text{fission}} \cdot N_i$$

- remonter le flux sur les bords (effet réflecteur)
- diminuer le flux au centre (schémas de grappes)
- répartir les absorbants (poisons consommables)
- augmenter la production sur les bords
(enrichissement variable et gestion du combustible)

A. effet réflecteur : ramener au sein du cœur les neutrons fuyards





calculs des flux thermiques et rapide (2 groupes)

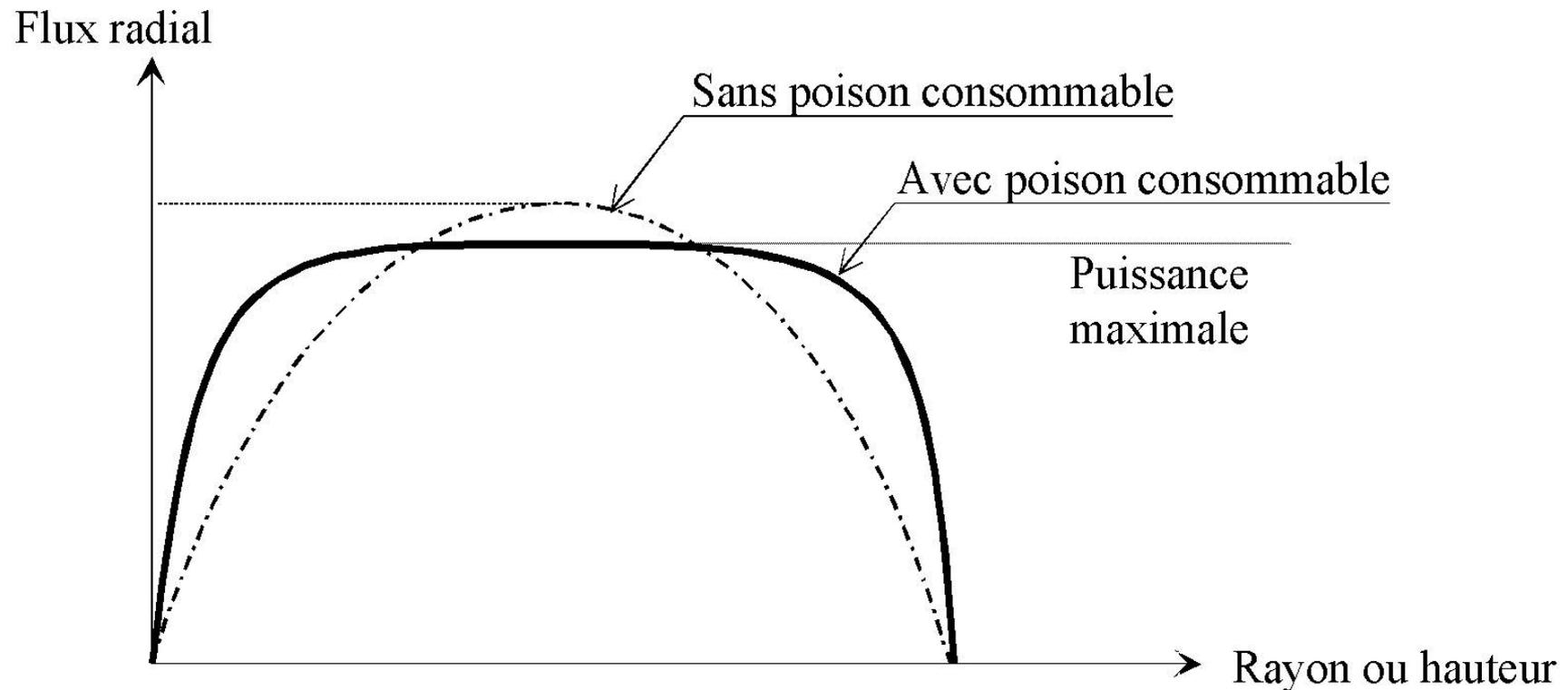
B. Utilisation de poisons consommables

poisons consommables (bore, hafnium, gadolinium)
absorbants fixes dans le cœur,

- soit **mélangés** au sein du combustible, ou de la gaine,
- soit sous forme de **barreaux** indépendants

souplesse d'emploi

possible de répartir, à souhait, ces poisons dans le cœur,
de façon à optimiser la répartition spatiale du flux
(*aplatissement du flux radial et axial*).



crayons de gadolinium ou de pyrex boré
dans les assemblages centraux ou neufs
nécessaire de mettre quand même du bore soluble

attention à ne pas diminuer la durée de vie

C. Zones d'enrichissement variable

puissance proportionnelle à la concentration en Noyaux fissiles

enrichissement variable selon les **assemblages**
et l'usure selon le rechargement
(gestion des REP EdF)

enrichissement selon **les types d'assemblages** (*MOx ou UOx*)

enrichissement **dans les assemblages** (*MOx, effet du Plutonium*)

CONCLUSION

Trois contraintes imposent l'aplatissement du flux et de la puissance

- **Sûreté** : éviter les pics de puissance
Assurer un contrôle de la réactivité efficace
Maintenir la sous-modération
- **Economie** garantir une **combustion optimale (durée de vie)**
Prix du KWh minimale, optimisation usure
- **Pilotage souple**, contre-réactions efficaces (problèmes du bore)

injection de sécurité

système d'empoisonnement du cœur
avec de **l'acide borique très concentré**