

Répartition spatiale du flux et de la puissance

Les fissions étant directement liées aux neutrons, la répartition du flux dans le combustible fournit la carte de puissance, la quantité de chaleur à évacuer, l'usure des différents assemblages, et donc intéresse la sûreté nucléaire. Nous allons donc étudier de manière qualitative la répartition du flux neutronique.

1. Introduction

Du fait des probabilités d'interaction, la population neutronique dans un cœur est **fonction du temps et de l'espace** : Φ (position, temps)

Il s'avère inutile d'étudier cette population neutronique en fonction de ces deux paramètres simultanément. Les mathématiques nous démontrent par ailleurs que les variables sont le plus souvent séparables.

Il est donc plus commode de scinder le problème en deux parties présentées comme suit :

- Nous nous plaçons en un point particulier du cœur et nous regardons évoluer la population neutronique dans le temps. Nous étudions dans ce cas l'évolution de la population neutronique. C'est un **problème dit "de cinétique"**. Ce n'est pas l'objet de ce chapitre et nous l'avons déjà envisagé ailleurs. La réactivité, et l'influence des neutrons retardés sont très importants. Nous étudions alors : **Φ (temps) à un endroit donné**
- Nous pouvons également nous placer à un instant donné, et regarder comment se répartissent les neutrons dans le cœur. Nous étudions dans ce cas la **répartition spatiale** de la population neutronique : **Φ (position) à un instant donné**

A la criticité, ce qui est le cas d'un réacteur en puissance, quelque soit son niveau de puissance, nous avons vu que la population neutronique est constante dans le temps. Dans ce cas, il est évident que l'étude se limite uniquement à la répartition spatiale du flux neutronique.

Quatre remarques fondamentales avant d'aborder l'allure générale du flux dans un réacteur :

- 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**

La répartition spatiale des neutrons dans un cœur n'est pas uniforme car, entre autres, les fuites de neutrons sont plus importantes en périphérie qu'au centre du cœur. La connaissance de la répartition spatiale des neutrons nous permet de déterminer la répartition spatiale de la puissance neutronique et ainsi de connaître la puissance globale du cœur.

Nous allons voir dans ce chapitre pourquoi il est intéressant d'obtenir une répartition du flux ou de la puissance la plus uniforme possible dans l'ensemble du cœur et les moyens d'y parvenir.

2. Relation entre le flux et la puissance.

Rappelons d'abord que la population neutronique peut être caractérisée par sa densité neutronique n . Cette grandeur fait abstraction de certaines caractéristiques du neutron telles sa vitesse et sa direction.

Il est logique de considérer que les **neutrons** sont plutôt **monocinétiques** puisque l'on a tout fait pour les envoyer rapidement dans le domaine thermique (10^{-6} secondes pour les ralentir, 10^{-4} secondes dans le domaine thermique).

On prendra donc comme fonction de départ la **densité neutronique** : n [neutron/cm³]

Pour tenir compte de la **vitesse du neutron**, donc de son déplacement, faisons intervenir le flux neutronique exprimé par le produit : [densité neutronique] x [v vitesse des neutrons].

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

La direction des neutrons est prise en compte par une grandeur vectorielle appelée le **courant** dont la définition nécessite une approche plus fine, trop longue pour être exposée ici. Le comportement des neutrons étant généralement isotrope, on peut également négliger cet aspect, et se contenter d'une **approche isotrope du flux**.

Grâce au flux neutronique Φ , nous pouvons accéder au taux de réaction, et en particulier au taux de fission représentant le nombre de fission par cm³ et par seconde.

Pour les réacteurs à eau, le calcul du taux de fission doit être effectué avec des grandeurs prises dans le domaine thermique.

$$R_{\text{fission}} = \Phi \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i^{\text{fission}} \cdot N_i \quad [\text{fissions/seconde cm}^3]$$

i : noyaux subissant la fission(ex : U²³⁵, Pu²³⁹)

N_i : nombre de noyaux i par cm³ de cœur

$\sigma_i^{\text{fission}}$: section efficace de fission du noyau i [cm²]

Connaissant le taux de fission R_{fission} et l'énergie dégagée par une fission E_f , on calcule la puissance volumique P_v exprimée en Watt par cm³ de cœur.

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

Cette puissance volumique nous permettra de connaître la puissance locale dégagée, donc à évacuer et à supporter pour la gaine.

3. Répartition spatiale du flux et de la puissance

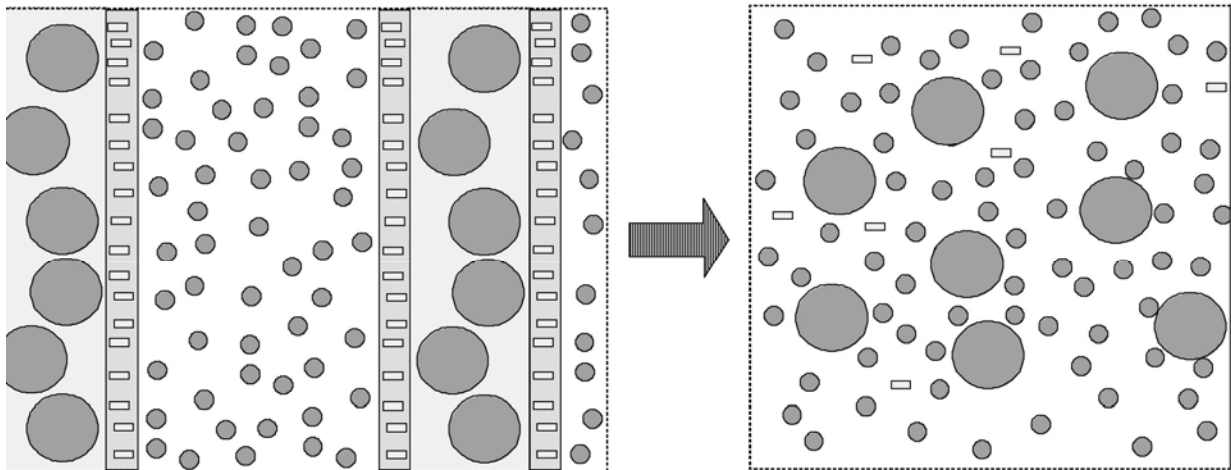
3.1 Homogénéisation

Un cœur de réacteur nucléaire est constitué de plusieurs milieux, eux mêmes composés d'un certain nombre d'éléments. Chaque milieu a des effets particuliers sur la population neutronique et agit donc différemment sur la répartition des neutrons au sein du cœur.

Dans la technologie des **Réacteurs à Eau Pressurisée**, le cœur est formé par la juxtaposition d'assemblages à 17×17 crayons (25 de ces crayons sont des tubes d'instrumentation ou des tubes guides pour les crayons d'absorbants mobiles), l'ensemble étant noyé dans l'eau légère qui sert à la fois de modérateur et de caloporteur.

La considération de cette **structure dite "hétérogène"** (*présence de plusieurs milieux*) est relativement complexe. Aussi nous procédons à ce que l'on appelle l'"homogénéisation". Ce processus transforme une structure hétérogène en une structure dite "homogène".

La structure homogène est un **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.



Nous conserverons l'hétérogénéité due à la présence de l'absorbant, afin d'expliquer certains phénomènes physiques. Ceci justifie l'étude d'un cœur avec ou sans absorbant. Il faut être rigoureux dans le processus et conserver les taux de réaction. Du fait de l'absorption très importante, le flux macroscopique est déprimé au niveau des résonances. Il faut donc calculer des **sections homogènes équivalentes** qui rendent compte pour cette **cellule équivalente (fictive)** des mêmes taux de réaction que la **cellule hétérogène (réelle)**.

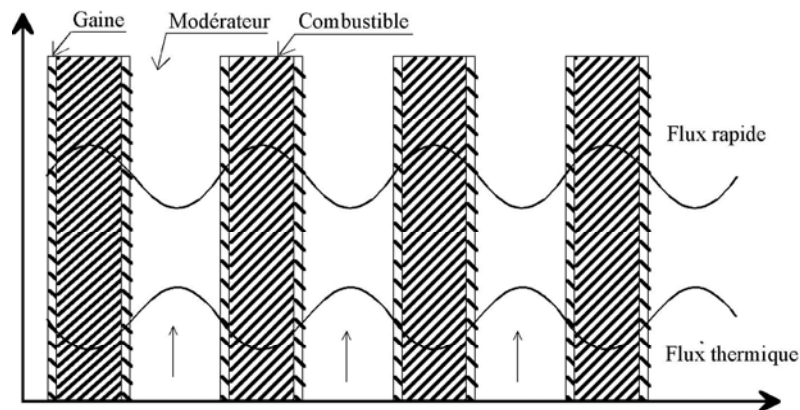
Chaque milieu ayant des effets particuliers sur les neutrons agit donc différemment sur la répartition des neutrons au sein du cœur donc il y a nécessité d'homogénéiser sinon les calculs sont trop compliqués.

3.2 Cas d'un cœur sans absorbant

a. Répartition au niveau du faisceau de crayons

Au sein du combustible, **les neutrons naissent rapides**. Au sein du modérateur, les neutrons deviennent thermiques. Le flux de neutrons thermique ou rapide subit donc des variations.

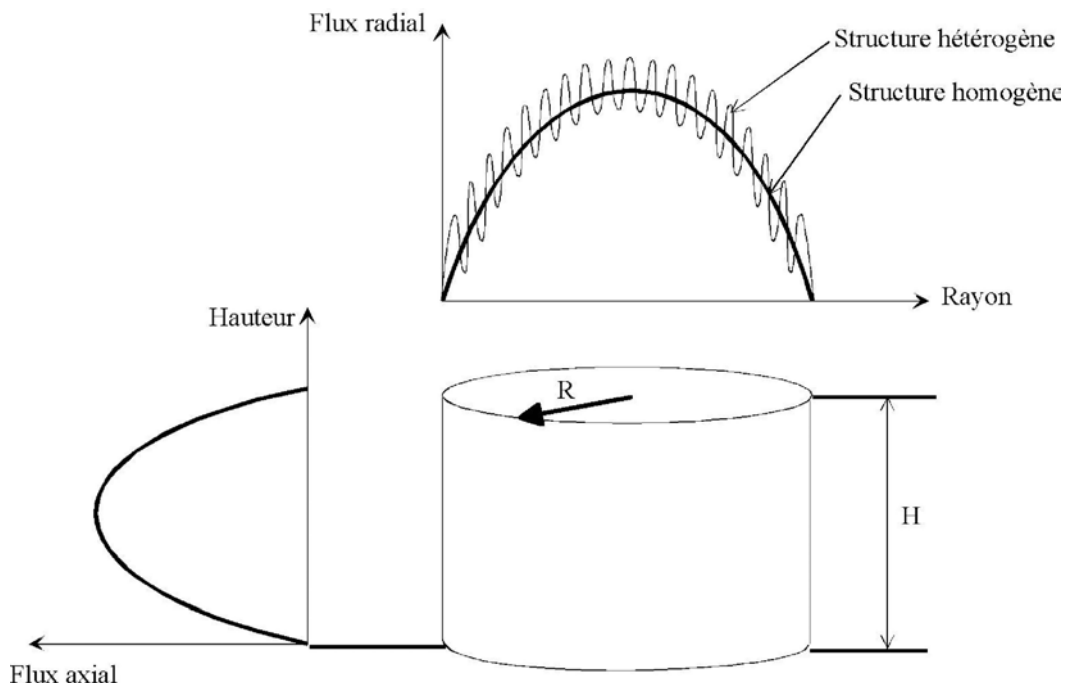
On constate que le flux de **neutrons rapides** est **plus important au centre du combustible** (il sont plus loin des bords des pastilles, donc des fuites possibles). De même le **flux thermique est plus important au centre du canal d'eau qui les thermalise**. On constate que le flux généré est de forme concave, le flux absorbé ou diminuant est de forme convexe. En ce qui concerne la puissance, générée par les fissions thermiques, donc le flux thermique dans le combustible, il est donc de forme convexe, la puissance étant déposée préférentiellement sur les bords de la pastille.



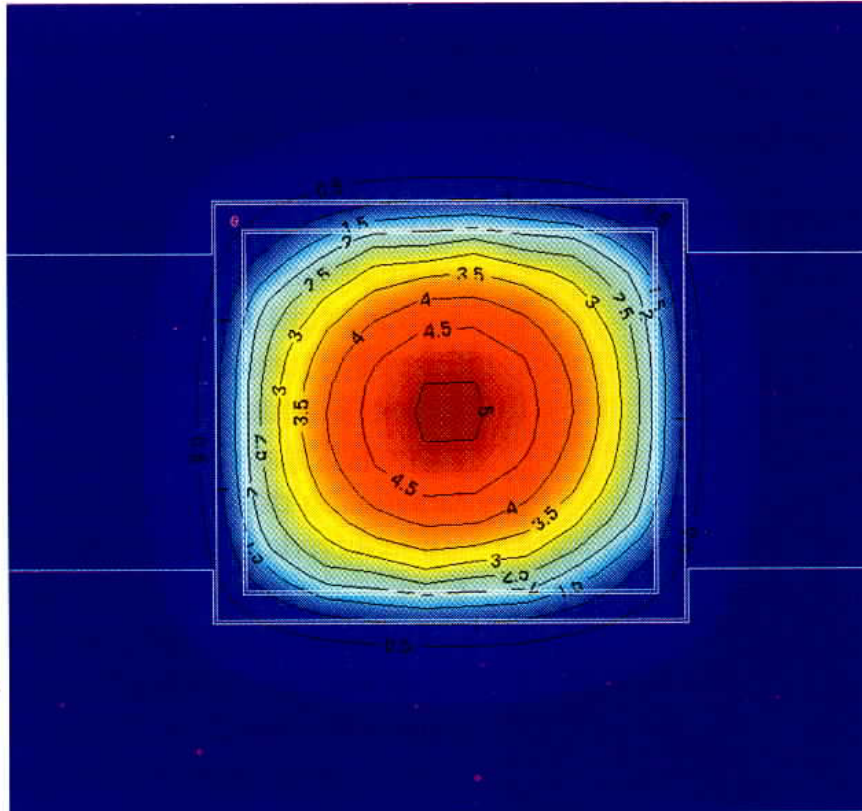
L'objectif est bien de déplacer les neutrons vers le domaine thermique où ils stationnent plus longtemps et font de la puissance. Le spectre rapide caractérise les neutrons juste issus de fissions qui génèrent, par les fuites, de la **fluence** sur la cuve. Les fissions sont provoquées par les neutrons thermiques. La distribution de puissance est donc dépendante du flux de neutrons thermiques dans le milieu multiplicateur (milieu combustible).

b. Répartition au niveau du cœur

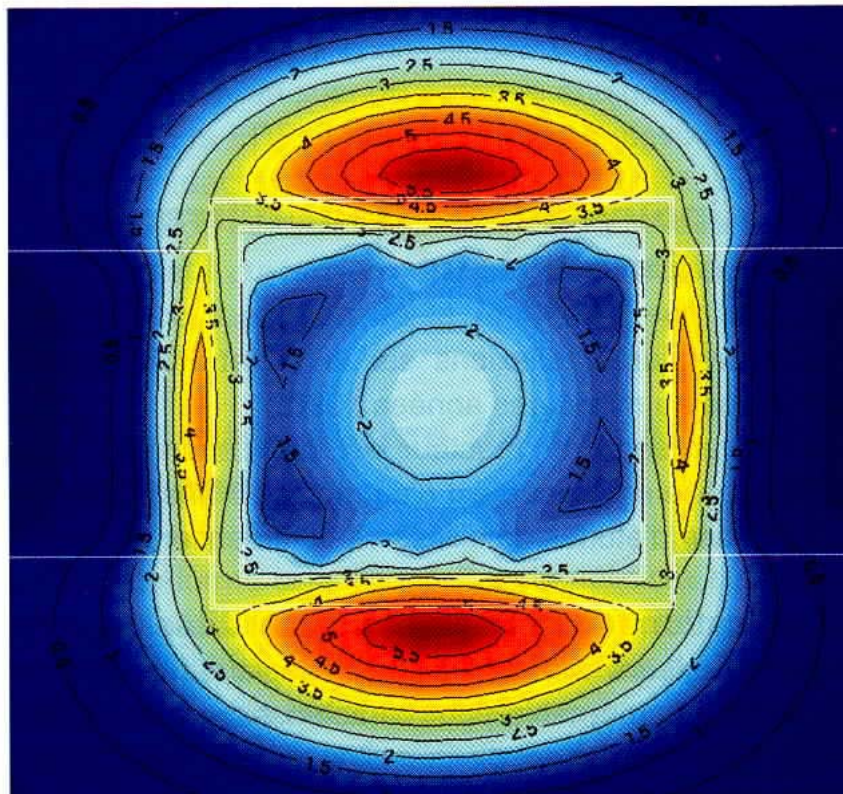
Par souci de simplification, nous assimilons le cœur du réacteur à un cylindre de rayon R et de hauteur H . Les neutrons situés en périphérie fuient plus facilement que ceux situés au centre du cœur. Le flux est donc déprimé en périphérie comme l'indique la figure suivante :



On considère un modèle très simplifié : le cœur est assimilé à un cylindre de rayon R et de hauteur H . Les neutrons situés en périphérie fuient plus donc facilement que ceux situés au centre du cœur. Le flux est ainsi déprimé en périphérie. La répartition du flux s'exprime comme le produit d'une composante radiale (selon R) en fonction de Bessel (*radial*, équivalent à *cosinus*) et d'une composante axiale (selon Z) soit flux en *cosinus* (*axial*).

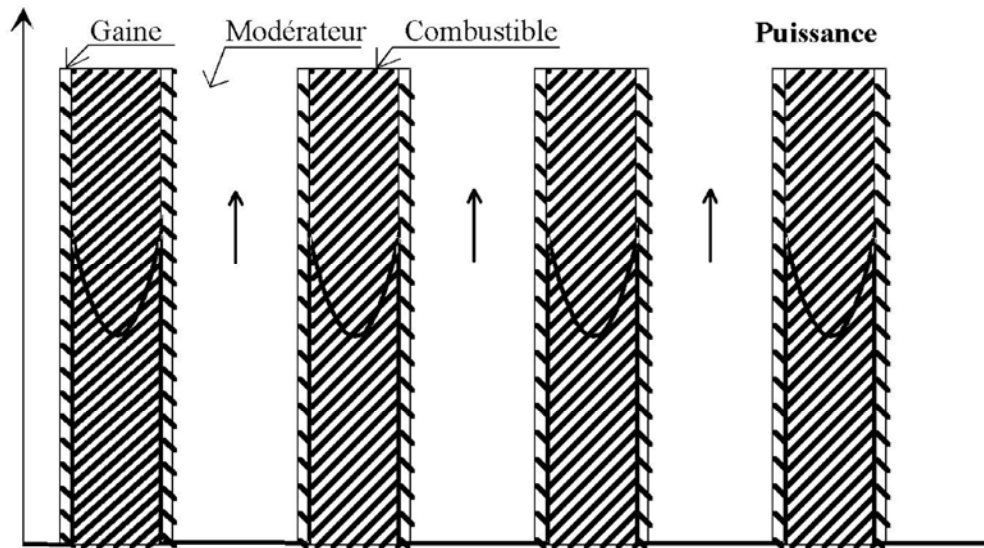


Cœur UMo, $0,907 \text{ MeV} < E$, flux rapide intégré axialement
 $\times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$



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

Répartition calculée des flux pour une pastille de combustible métal (projet du réacteur Jules Horowitz à Cadarache). Le ralentissement est dû à H₂O et au béryllium. On constate l'atténuation du flux thermique en s'éloignant de la pastille (absorption des neutrons thermique par l'eau).



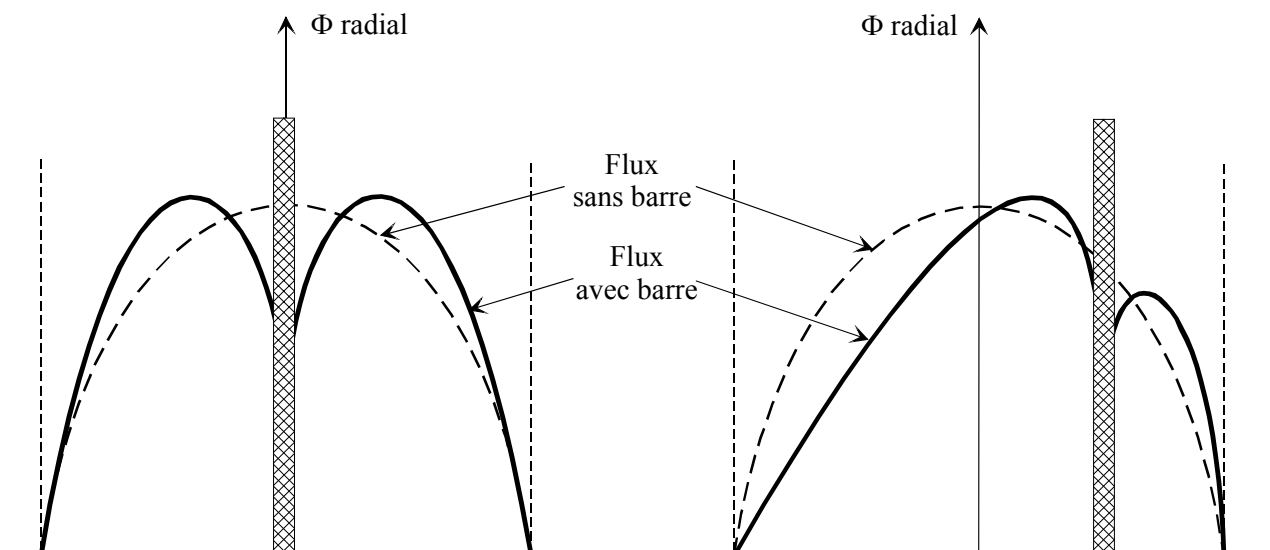
La **température moyenne du canal chaud** ne doit pas dépasser une valeur maximale afin de respecter les contraintes thermiques, technologiques et de sûreté du cœur (marge en regard de la fusion des gaines). La puissance spécifique doit donc être limitée (limitation du flux ou plus souvent de l'enrichissement). Généralement on se limite à environ 1000 W/cm³.

3.3 Cas d'un cœur avec absorbant

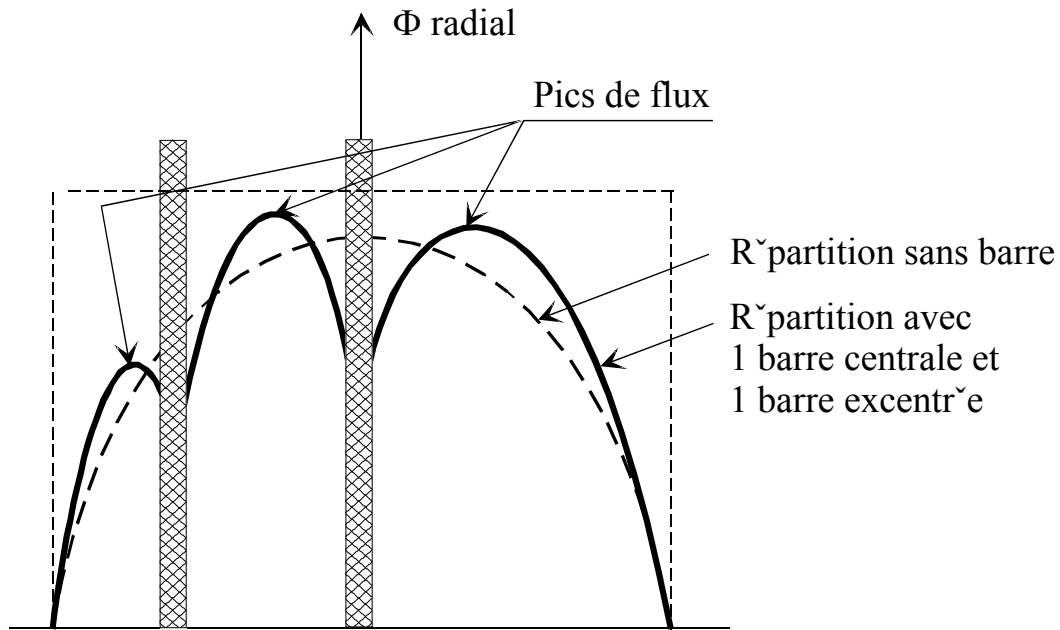
Un absorbant est un matériau qui possède une section efficace de capture importante, dont voici quelques exemples :

	σ_{capture} [barns]
Hafnium	103
Bore ¹⁰	759
Cadmium	2450

Les grappes de contrôle mobiles sont principalement constituées d'absorbant. Elles provoquent dans leur voisinage une dépression importante du flux et donc de la puissance (forme convexe donc). Lorsque le réacteur fonctionne, les grappes de contrôle permettent de maintenir le cœur à l'état critique. A l'arrêt, elles sont insérées totalement de manière à assurer une sous-criticité suffisante.



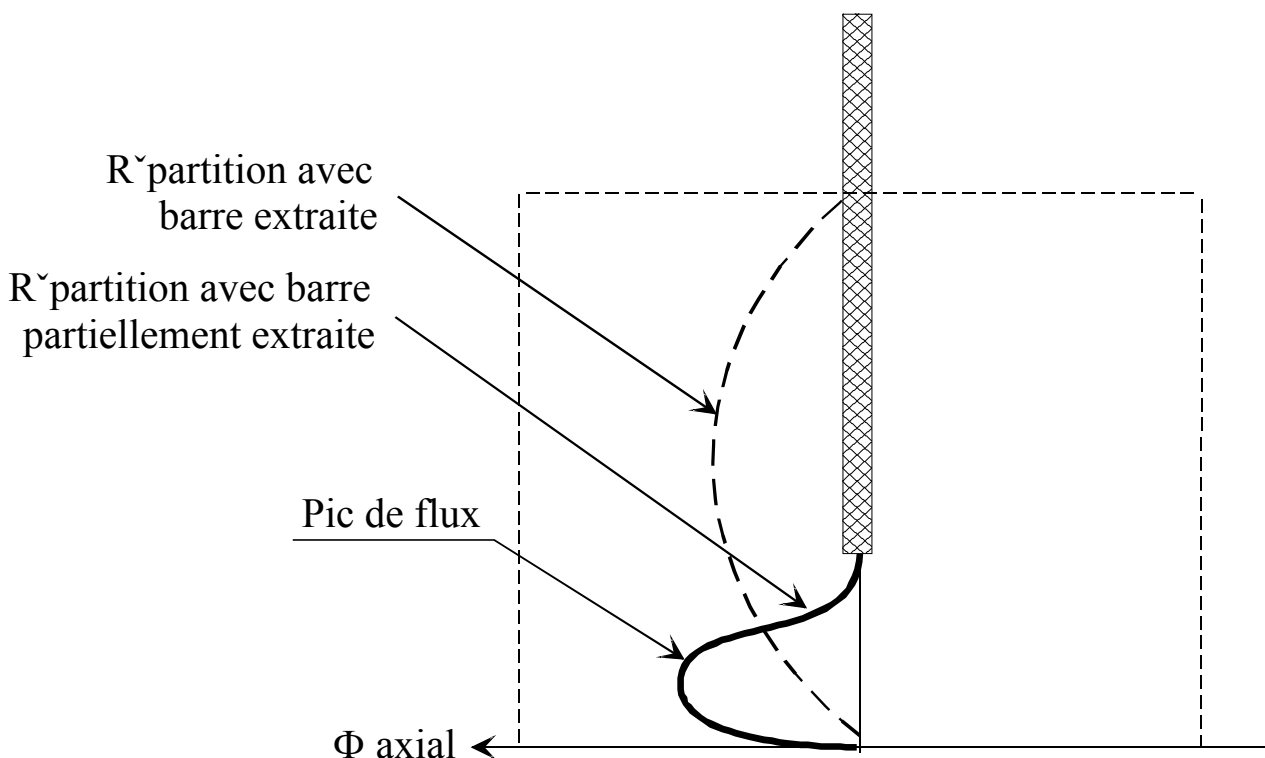
Les grappes de contrôle participent donc à l'**aplatissement du flux radial**. Ceci est très intéressant, car le flux neutronique est alors plus uniforme sur l'ensemble du cœur. Nous reviendrons sur les effets positifs de cet aplatissement. Nous aurons de plus tendance à placer les grappes de contrôle dans la région centrale du cœur, région où le flux est élevé. Le taux de réaction d'absorption est donc plus important, et l'efficacité maximale.



La **répartition axiale du flux**, avec les grappes de contrôle montre cependant un pic de flux donc de puissance. Cet effet conduit à un **échauffement local** susceptible de dépasser les capacités du caloporteur à évacuer la chaleur. Il y a un risque d'ébullition locale du caloporteur, notamment dans le canal chaud, pouvant provoquer la fusion de la gaine.

La valeur du **pic de puissance** dépend essentiellement de l'efficacité des grappes de contrôle insérées puisque la convexité du flux est imposée par l'importance de l'absorption.

L'**efficacité** représente l'aptitude d'un absorbant à "empoisonner" le cœur, à **diminuer sa réactivité**.



Plus les grappes seront efficaces, plus le flux sera "pincé" engendrant des pics de puissance élevés. L'utilisation des **absorbants** est donc **nécessaire au contrôle du réacteur**, mais **leur action hétérogène engendre des déformations trop importantes** du flux, donc de la **puissance**.

Le bore, par sa répartition uniforme dans le caloporteur, permet une atténuation de la réactivité, mais de manière uniforme. L'emploi du bore est cependant limité à des concentrations limites de manière à conserver des contre-réactions efficaces.

Il faut donc choisir judicieusement le nombre et l'efficacité des grappes de contrôle. L'utilisation de poisons consommables, répartis de manière plus uniforme, permet de pallier les problèmes dus, en fait, au caractère hétérogène des grappes de contrôle.

4. Applatissage de la puissance

4.1 Nécessité d'aplatir la puissance

Les **contraintes thermiques, technologiques** et les **exigences de sûreté** limitent la puissance locale d'un élément combustible. La capacité de refroidissement du canal chaud est contrainte par les caractéristiques thermiques (coefficient d'échange) et le débit (pompes primaires) du caloporteur. Pour éviter la fusion de la gaine, il est donc impératif de **limiter la puissance produite par les assemblages**.

Etant limités en puissance, nous avons intérêt à obtenir une **distribution de puissance la plus uniforme possible** en minimisant la présence et la valeur des pics. Cela permet d'une part, de faciliter le contrôle du cœur et d'autre part, de soutirer plus d'énergie pour une même masse de combustible.

Les **contraintes** thermiques, technologiques et de sûreté limitent la **puissance locale** d'un élément combustible. La **capacité de refroidissement** du canal chaud reste 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.

On assure ainsi une **distribution de puissance la plus uniforme possible** en minimisant la présence et la valeur des pics. Les objectifs sont donc :

- 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'**aplatissage de la puissance** nous disposons de plusieurs méthodes, selon les différents 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**).

Il est donc possible d'intervenir soit sur le flux Φ soit sur l'enrichissement du combustible N_i .

Chacun de ces principes doit être optimiser pour ne pas diminuer la durée de vie, être garanti tout au long de vie du chargement, et en cas de transitoire significatif, ne pas être à la limite de provoquer la caléfaction du fluide primaire le long de la gaine. Cela nécessite donc (1) des **calculs théoriques**, (2) la **qualification** de ces calculs par des essais sur des **boucles expérimentales** et le retour d'expérience et bien sûr (3) des **marges** couvrant les incertitudes de calcul ou de mesure.

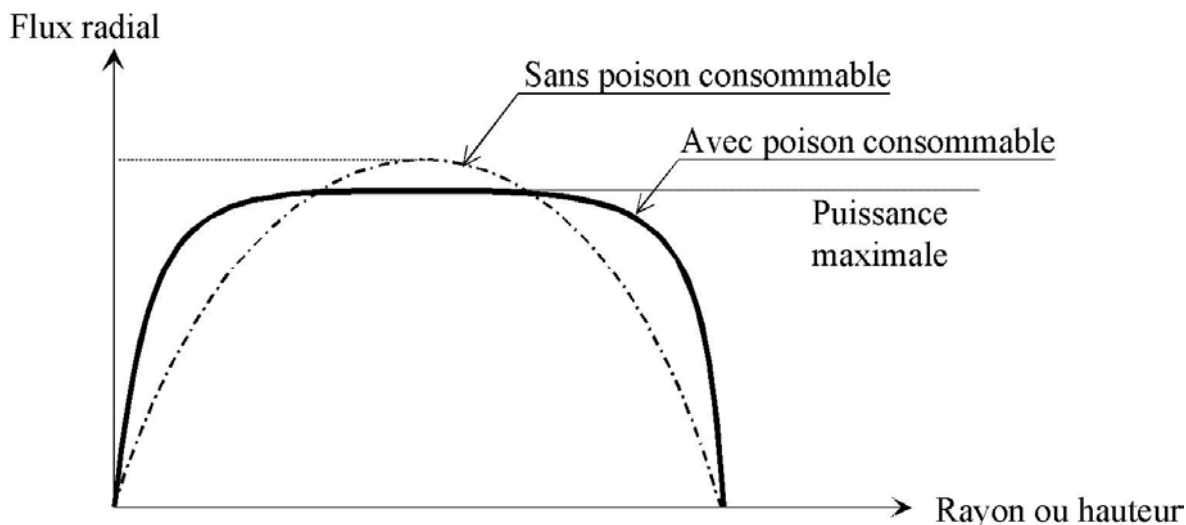
4.2 Utilisation de poisons consommables

Afin d'aplatir la puissance, nous devons aplatir le flux. Nous avons vu que le fait d'introduire des grappes de contrôle dans le cœur permet d'uniformiser la répartition radiale des neutrons dans le cœur. Cependant, au niveau de la répartition axiale, nous observons un pic de flux, donc de puissance que nous essayons justement de combattre.

Afin d'éviter l'apparition de pics axiaux, nous limitons l'efficacité des grappes de contrôle en disposant de matériaux moins absorbants, mais plus nombreux. Dans ces conditions, le contrôle du cœur risque de ne pas être entièrement assuré.

Nous introduisons alors des poisons consommables dans le cœur, compensant le déficit des grappes de contrôle limitées en efficacité.

Les poisons consommables (bore, hafnium, gadolinium) sont des absorbants fixes dans le cœur, soit mélangés au sein combustible, soit sous forme de crayons indépendants. Cette technique offre une souplesse d'emploi car il est 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). Ce peut être le cas lors d'un chargement neuf complet.



Les poisons consommables aidant au contrôle du cœur, nous pouvons accroître ainsi la durée de vie du cœur en augmentant le nombre de noyaux fissiles en début de vie, tout en conservant le même nombre de grappes de contrôle dans le cœur.

Les cœurs étant enrichis de façon à assurer une certaine durée de vie (l'équivalent de 18 mois de fonctionnement à pleine puissance par exemple), les grappes de contrôle sont insuffisantes, à elles seules, pour compenser la réactivité, d'où le caractère obligatoire des poisons consommables.

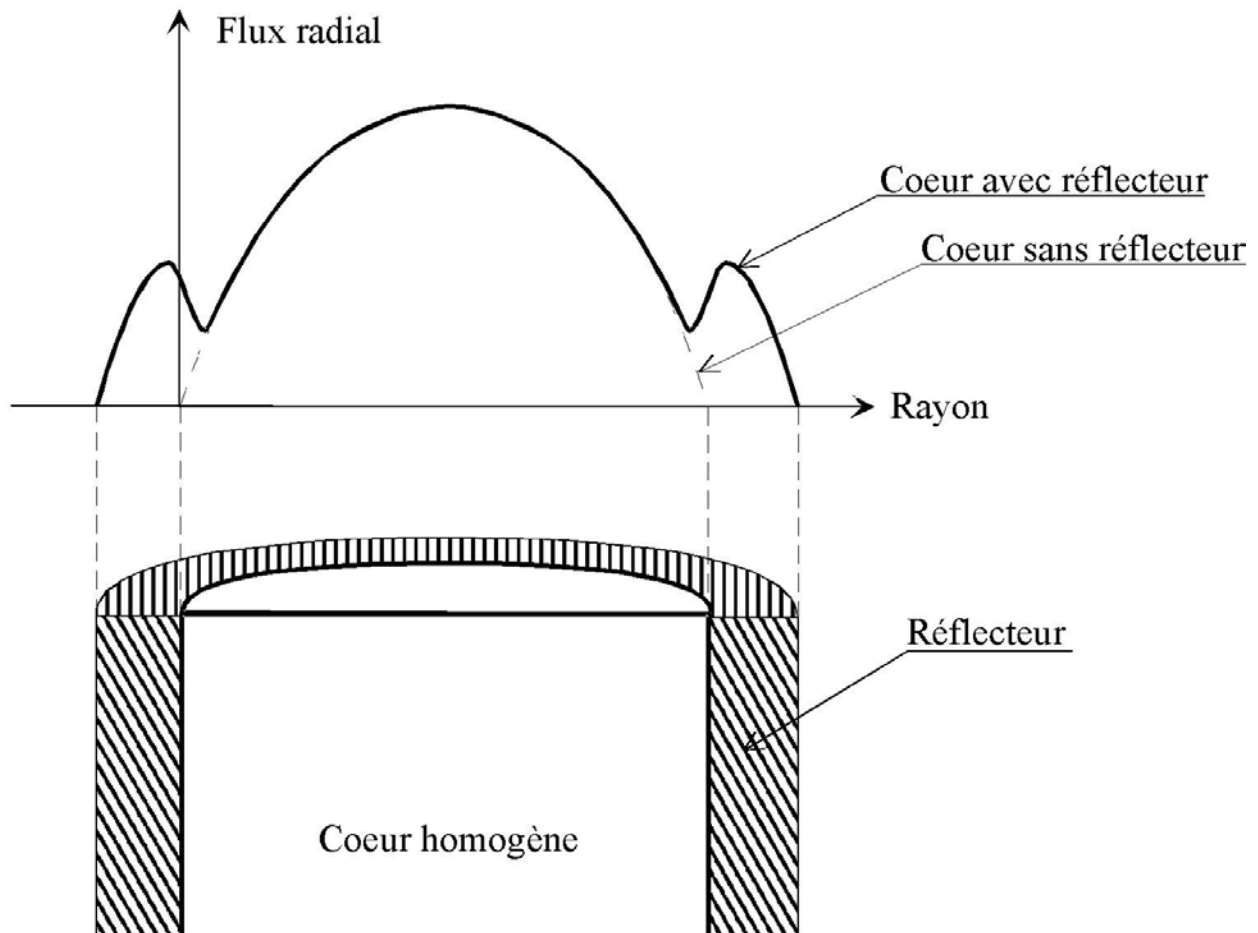
Les poisons consommables disparaissent peu à peu par captures neutroniques et leur influence sur l'aplatissement du flux devient de moins en moins sensible au fur et à mesure que le cœur vieillit.

A noter que les calculs théoriques doivent être conduits "en évolution" pour garantir que l'usure des poisons consommables et du combustible ne mettra jamais en défaut les critères de contrôle de la réactivité dans les conditions les plus défavorables.

4.3 Utilisation d'un réflecteur

Toujours dans le but d'aplatir la puissance, nous procédons à l'aplatissement du flux. Un autre moyen pour y parvenir est la mise en place d'un réflecteur autour du cœur. En effet, la cause principale de la répartition non uniforme des neutrons provient des fuites importantes en périphérie du cœur.

Pour pallier ce problème, il suffit de placer un matériau qui aurait tendance à ramener au sein du cœur les **neutrons fuyards**. L'eau, excellent diffuseur de neutrons, présente un pouvoir réflecteur lui permettant d'être utilisée comme tel.



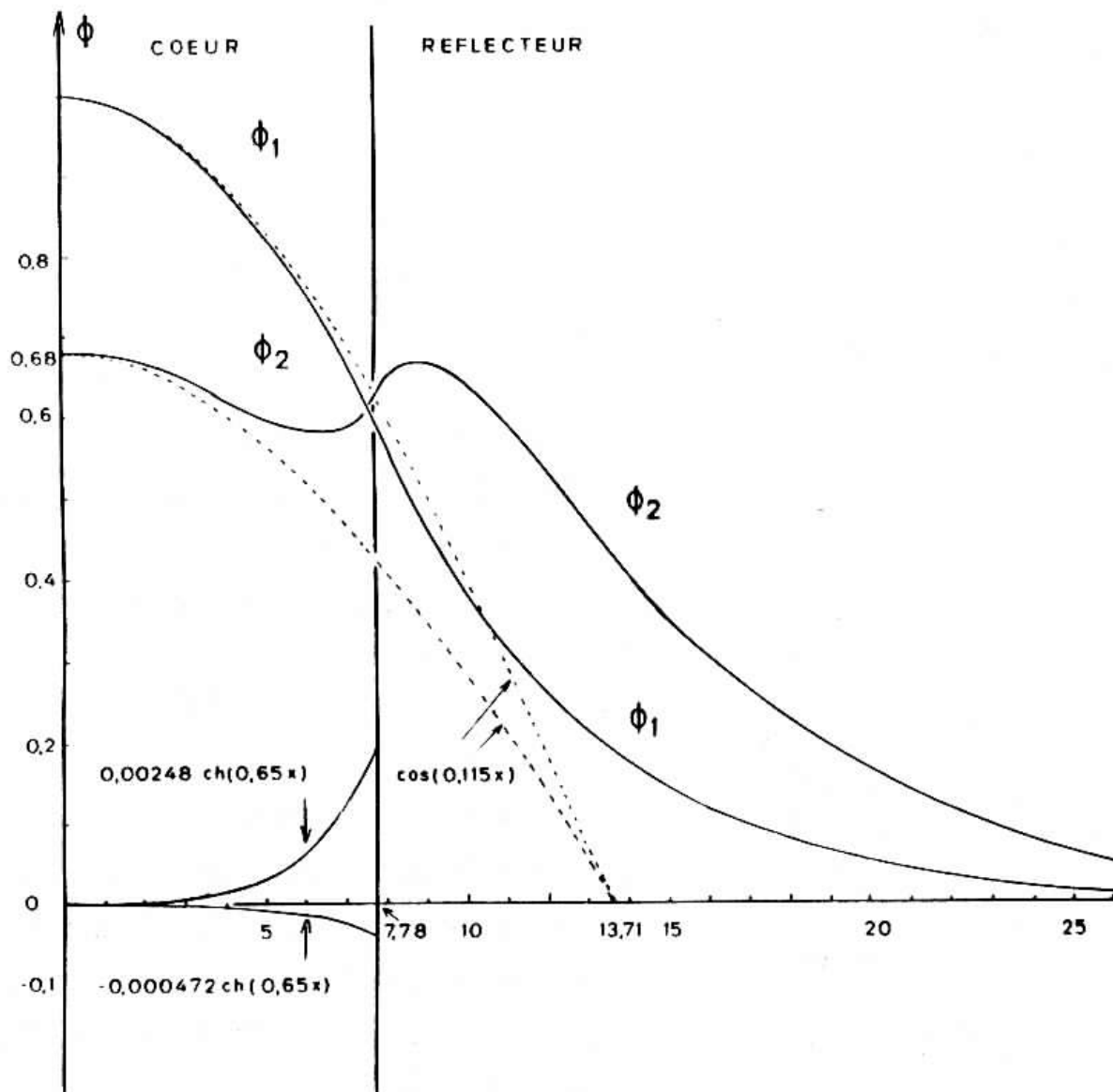
Deux questions peuvent être posées :

Quel matériau choisir comme réflecteur ?

Il est évident que pour des raisons neutroniques (un maximum de diffusion pour assurer le retour éventuel des neutrons, comme une absorption minimale) que pour des raisons technologiques (matériau facile à utiliser ou déjà présent), on ajoutera une couche de caloporteur en périphérie du cœur.

Quelle épaisseur pour limiter l'encombrement et optimiser l'effet réflecteur ?

Les calculs montrent que l'épaisseur optimale est liée à la "longueur de diffusion", c'est à dire la racine carrée de l'aire de diffusion déjà citée dans la probabilité de non-fuite, c'est à dire une grandeur liée au comportement moyen des neutrons et le domaine dans lequel le neutron passe sa vie "en moyenne". L'épaisseur optimale est de trois longueur de diffusion, soit environ 8 cm pour l'eau légère.



Cette figure illustre l'effet d'un réflecteur sur les flux rapide (qui disparaît dans le réflecteur modérateur) et thermique (qui se renforce en frontière du réflecteur, ramenant ainsi plus de neutrons thermique en frontière). Le flux thermique, donc la puissance, est donc aplati sur l'essentiel du cœur.

4.4 Zones d'enrichissement variable

La puissance est directement proportionnelle à la concentration en noyaux fissiles, c'est-à-dire à l'enrichissement. Pour **compenser la baisse du flux neutronique en périphérie du cœur**, il faut que l'enrichissement y soit plus important.

4.5 Effet d'un enrichissement ou d'un rechargement partiel

La répartition de l'enrichissement peut aussi se faire au niveau de l'assemblage des éléments combustibles. Ceci permet d'atténuer l'oscillation du flux radial autour du flux homogénéisé. L'EDF procède à de tels dispositions en pratiquant le rechargement par tiers : le combustible neuf est placé en périphérie du réacteur. Puis, après 18 mois, il est déplacé vers les positions plus centrales, avant de finir au centre où il est exploité jusqu'aux 52 000 MW / tonne (limite imposée par les autorités de sûreté).

5. Conclusion

La conception et l'optimisation des échanges avec le caloporteur impose l'utilisation d'un **réflecteur**.

Grâce à une disposition judicieuse des **poisons consommables** (*répartition homogène dans certains crayons, contenant pastilles gadoliniés*), et pour un **enrichissement de l'uranium** plus élevé en périphérie du cœur qu'en son centre (*obtenu par la disposition d'assemblages neufs en périphérie de cœur et d'assemblages plus vieux au centre*), nous pouvons obtenir un aplatissement important de la puissance, ce qui permet d'optimiser l'usure du combustible : sa durée de combustion en est allongée (aspect économique) et le niveau de puissance moyenne peut être augmenté.

De plus, nous utilisons du **bore soluble** (acide borique). Le bore est dilué dans le caloporteur. Il est alors présent en tous points du cœur ; il n'a donc aucune influence sur la répartition spatiale du flux, mais il aide au contrôle du cœur (notamment lors de l'arrêt froid de celui-ci). On évite ainsi des pics de puissance trop importants.

En cas d'accident de réactivité important sur le cœur, il est prévu un système d'empoisonnement du cœur avec de l'acide borique très concentré : l'injection de sécurité.

Trois aspects sont associés à l'**aplatissement du flux et de la puissance** :

Sûreté :

- Eviter les pics de puissance
- Assurer un contrôle de la réactivité efficace
- Maintenir la sous-modération

Economie

- garantir une **combustion optimale (durée de vie) et un taux de combustion raisonnable** du point de vue limites technologiques ;
- **assurer un prix du KWh minimal** par optimisation de l'usure

Pilotage souple,

- Maintenir des contre-réactions efficaces (problèmes du bore ¹)

Ce chapitre étant qualitatif ne donne pas lieu à des calculs, donc à des exercices. Par contre il doit conduire l'étudiant à s'interroger sur les problèmes de déformation de la nappe de flux et des conséquences sur la sûreté ou l'usure du combustible.

¹ Ce problème sera abordé dans le chapitre prochain des effets de température.