

Contrôle de la réactivité d'un cœur

Trois contraintes sont données à l'exploitant : (1) contrôler la réactivité à long terme, c'est à dire compenser l'usure, les effets de variations lentes de la réactivité, (2), réguler les paramètres thermodynamiques des fluides primaires et secondaires pour optimiser les échanges thermiques, et (3) s'adapter à la demande du réseau électrique pour des raisons économiques le plus longtemps possible. Le tout dans le cadre strict des trois critères de sûreté...

Introduction

En début de vie, **un cœur de réacteur, sans les grappes de contrôle, a une réactivité positive**. Cette réactivité positive est appelée **réserve de réactivité** et notée ρ_R . Elle sert à **compenser les antiréactivités** introduites par les effets de température, les empoisonnements de certains produits de fission (xénon, samarium) et, bien entendu, l'usure du combustible.

Pour qu'un réacteur puisse fournir une **puissance donnée P, pendant une durée donnée J** (*valeurs imposées par l'utilisateur*), il faut que le cœur dispose d'une certaine réserve de réactivité en début de vie.

Aussi, il faut utiliser des moyens de contrôle permettant :

- d'amener le cœur à l'état sur-critique pour **faire diverger** le réacteur (passer d'une puissance nulle à la puissance souhaitée par le réseau, et donc, le client),
- **maintenir le réacteur critique** pour le fonctionnement normal,
- puis à l'état **sous-critique pour l'arrêt**,

ceci à tout moment de la vie du réacteur.

Nous aborderons donc la façon d'évaluer la réserve de réactivité d'un cœur, puis les moyens de contrôle et leurs fonctions. Enfin nous aborderons les modes de pilotage d'un réacteur électrogène.

1. Nature de la réserve de réactivité

Il importe qu'un réacteur déclaré **disponible** à la production d'électricité puisse être critique quel que soit l'avancement dans le cycle (300 à 450 JEPP), ce qui est la condition la plus pénalisante. Il doit pouvoir à **tout moment diverger, rester stable** ou **converger** si les conditions normales d'exploitation sont respectées. L'opérateur doit donc en permanence **effectuer un bilan de réactivité**, calcul qui lui permet de prévoir le niveau de réactivité à atteindre par rapport à celui qu'il a déjà, afin de respecter le programme de production de puissance préétabli.

Cela permet ainsi de **maîtriser à tout moment l'évolution de la réaction en chaîne** alors que la réactivité évolue en permanence.

Par définition, le **point de référence d'un bilan de réactivité**, lorsqu'il n'est pas précisé, correspond à un **réacteur en Arrêt Chaud** : réacteur sous critique aux conditions de pression et de température du primaire. Si l'on souhaite diverger, il est alors nécessaire de porter l'installation aux conditions de pression et de température de l'exploitation en puissance. Dès qu'un paramètre de ce bilan favorise la divergence, sa réactivité sera positive, dès qu'il favorisera la convergence du réacteur, il sera négatif (*on parle alors d'antiréactivité*).

1.1 Montée à l'arrêt chaud et aux conditions d'exploitation

A partir d'un cœur froid où toutes les grappes de contrôle sont extraites, on souhaite porter le réacteur aux conditions de pression et de température de fonctionnement.

Ces conditions imposent :

a. Reprise froid - chaud.

Cela entre dans le cadre des effets de température. Dans le cas d'une reprise froid - chaud, la variation de température du modérateur (ΔT_m), comme du combustible (ΔT_u), est positive (*température finale – température initiale*).

Lorsque la température de l'eau primaire (*caloporteur*) croît, elle introduit, par contre - réaction, une **antiréactivité** (*correspondant à l'effet MODERATEUR*) notée :

$$\Delta\rho_m = \alpha_m \cdot \Delta T_m$$

Dans tous les cœurs dont l'uranium est faiblement enrichi (enrichissement commercial inférieur à 5% en U235), lorsque la température du combustible croît par augmentation de la puissance dégagée dans le cœur, il apparaît de l'anti-réactivité non négligeable, c'est l'**effet DOPPLER** :

$$\Delta\rho_u = \alpha_u \cdot \Delta T_u$$

Remarque : $\Delta\rho_m$ et $\Delta\rho_u$ sont alors des valeurs négatives (car α_m et α_u sont négatifs).

b. Démarrage sur un empoisonnement maximum (pic xénon).

Une dizaine d'heures après un arrêt de réacteur, l'empoisonnement en xénon est maximum. L'antiréactivité associée est de l'ordre de **plusieurs milliers de pcm**. Il faut être capable de diverger lors de ce pic en antiréactivité (*disponibilité indispensable uniquement dans le cas de réacteurs embarqués ou de quelques réacteurs de recherche*).

Nous noterons cette antiréactivité particulière, due à l'empoisonnement de la façon suivante :

$$\Delta\rho_x < 0$$

Cette valeur est toujours négative, quelque soit l'évolution de température imposée, car il s'agit d'un élément neutrophage, ou "poison". De plus, si l'on veut être précis, il est nécessaire de tenir compte également du samarium ; son effet s'ajoutera donc alors à celui du xénon.

c. Mécanisme de contrôle défaillant (*disponibilité d'un réacteur embarqué*)

Nous avons supposé que toutes les grappes pouvaient être extraites du cœur. Or il est possible qu'une grappe reste coincée, insérée dans le cœur. Pour un réacteur embarqué, cette hypothèse, bien qu'improbable, doit même être considérée au regard de la disponibilité indispensable à la sécurité du "porteur". On dimensionne donc les moyens sur l'**hypothèse la plus pénalisante**, tout en restant probable. Imaginons alors que la grappe de contrôle, la plus efficace, reste bloquée en position basse. On ne peut la remonter. Ceci maintient dans le cœur une antiréactivité, due à ce mécanisme de contrôle, notée :

$$\Delta\rho_g < 0$$

1.2 Premier bilan : réactivités vitale et totale

En rassemblant toutes les conditions défavorables, nous obtenons **la réactivité que le cœur doit compenser à tout moment pour pouvoir diverger**. Celle-ci est négative lors d'un passage d'un état froid à un état chaud.

a. Réactivité vitale

On appellera donc cette réactivité positive à garantir, la **réserve de réactivité vitale**, notée ρ_v :

$$\rho_v = -(\Delta\rho_m + \Delta\rho_u + \Delta\rho_x + \Delta\rho_g)$$

Cette réserve de réactivité vitale n'évolue pratiquement pas au cours du cycle.

b. Réactivité totale

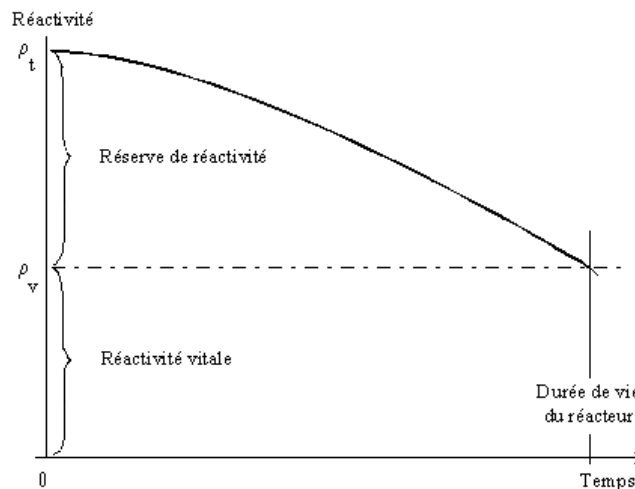
En outre, le cœur doit être capable de fournir sa puissance maximale P, pendant J jours (exprimés en JEPP). Il faut donc que le combustible dispose, tout au long du cycle, d'une réserve de réactivité suffisante pour satisfaire à cette demande d'énergie ; cette réserve de réactivité qui compense l'usure du combustible est notée ρ_r . Ainsi, la **réserve de réactivité totale ρ_T** que doit avoir le cœur à chaud, les grappes de contrôle non insérées (*sauf celle bloquée, indisponible*), est de :

$$\rho_T = \rho_R + (\Delta\rho_m + \Delta\rho_u + \Delta\rho_x + \Delta\rho_g)$$

La **réactivité diminue dans le temps** (*usure*), car le combustible fournissant de l'énergie, le nombre de noyaux fissiles diminue de même que l'enrichissement.

La réserve de réactivité en début de vie est obtenue pour un enrichissement initial e_i . Il ne faut pas augmenter cette réserve de réactivité au delà de certaines limites, car l'efficacité des moyens de contrôle d'un réacteur est limitée. C'est surtout le cas des réacteurs embarqués où l'encombrement du cœur est réduit au maximum, et on ne peut disposer de bore soluble pour garantir des contre réactions suffisantes pour assurer les changements fréquents d'allure.

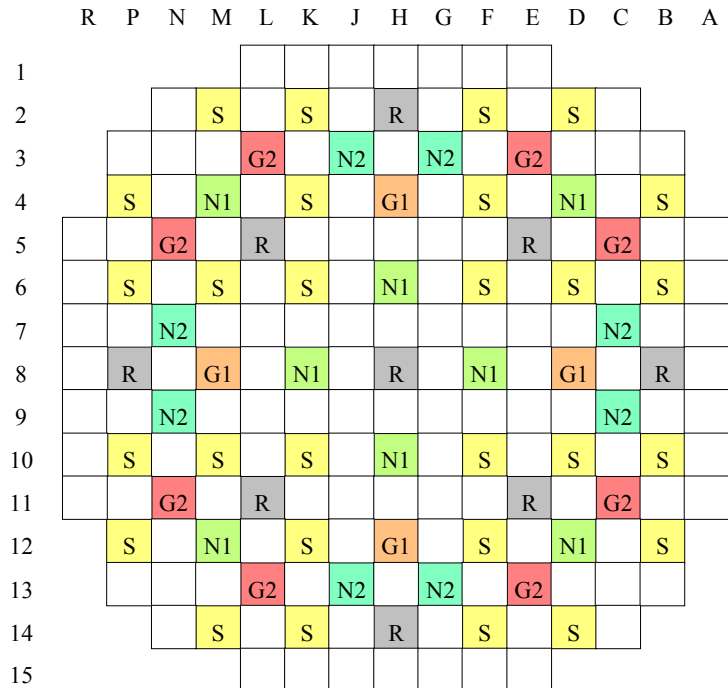
Le cœur doit disposer au minimum de la réactivité vitale en fin de vie. On ne peut donc pas descendre en dessous d'un certain enrichissement en fin de vie. On limite donc l'usure du combustible. La redivergence au pic xénon n'est pas limitative de la durée de vie pour un réacteur électrogène. Cela retarde seulement la divergence de quelques heures. Pour augmenter la durée de vie du cœur à puissance constante, il faut augmenter la masse de combustible. Cela réduit alors la puissance linéique extraite le long des crayons combustible.



2. Contrôle de la réactivité d'un cœur

Il faut disposer de moyens de contrôle de la réactivité afin de pouvoir rendre le cœur critique ou sous-critique à tout moment. Les moyens de contrôle du cœur sont les suivants :

- les **grappes de commande** regroupées et manœuvrées selon **différents groupes** (dans un réacteur de 1300 MWe, on trouve les groupes SA, SB, SC, SD, N1, N2, G1, G2, R comme indiqué dans le schéma ci-dessous),



- **le bore soluble**,
- les **poisons consommables** qui aident les grappes de contrôle en compensant la réactivité en diminution. Ils disparaissent au long de la vie du réacteur.

2.1 Fonctions des moyens de contrôle

2.1.a Fonctions de sécurité

Le réacteur doit pouvoir être rendu sous-critique très rapidement et à tout moment de sa vie. Lorsque le cœur est froid (*état le plus réactif du cœur*), l'**antiréactivité** doit être au moins de 1000 pcm ($k_{eff} < 0,99$).

L'arrêt par alarme se fait par la chute de toutes les grappes de contrôle jusqu'à la position basse, plus éventuellement par une injection de bore. On procède alors à l'étouffement du cœur.

2.1.b Fonction de compensation

En **régime permanent**, le **réacteur est critique** (réactivité nulle). Le rôle de compensation est de **maintenir le réacteur critique** vis à vis de la variation de réactivité dont la cause peut être l'usure du combustible ou un empoisonnement variable par les produits de fission.

La disparition des noyaux de poisons consommables, par capture neutronique, participe à la compensation de la baisse de réactivité liée à l'usure du combustible.

2.1.c Fonction de régulation

Le réacteur étant couplé à la turbine via le circuit secondaire, toute variation de puissance extraite, conduit, par des effets de contre-réactions de température, à une variation de la puissance neutronique fournie par le cœur : il y a autorégulation.

Cependant, il peut être nécessaire dans certains cas (grande variation de puissance, démarrage), de manœuvrer les grappes de contrôle. La réponse du circuit de borication n'est pas assez rapide. De plus le primaire, du fait des fluctuations thermodynamiques, doit être maintenu dans le domaine de fonctionnement (*température et pression*) optimal de l'échangeur.

2.2 Les grappes de contrôle

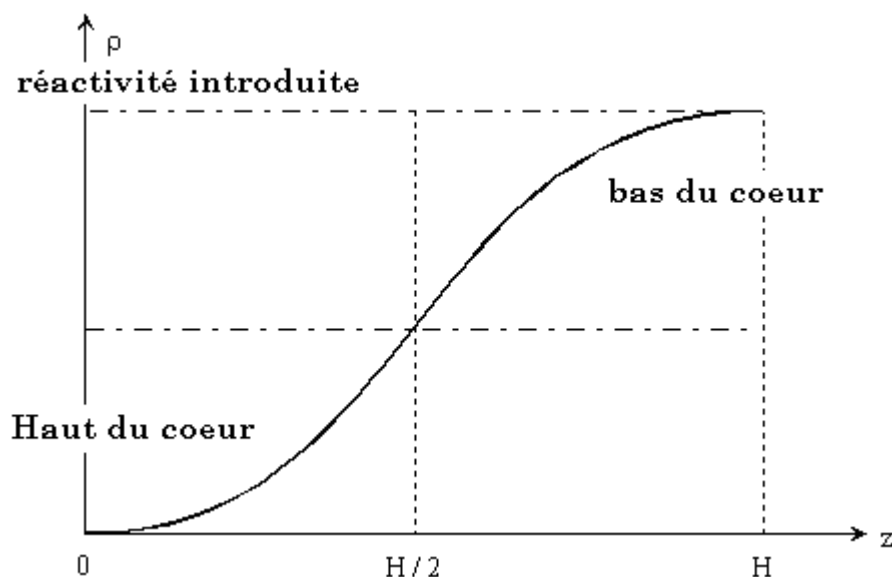
Les grappes de contrôle, ou de commande, sont des **absorbants mobiles** dont l'insertion, ou le retrait, est ordonné depuis la salle de commande. Leur constituant de base est un alliage d'argent, d'indium et de cadmium (AIC, respectivement à 80%, 15% et 5 %).

La répartition des grappes de contrôle dans le cœur répond à certaines exigences. Il est inutile de placer les grappes dans les régions à faible flux, la périphérie du cœur par exemple. Il serait aussi totalement inefficace de placer deux grappes de contrôle côte à côte (effet d'ombre).

Il existe **3 principaux types de grappes** ayant chacune un rôle bien défini :

- les **grappes d'arrêt** (fortement antiréactives, utilisées pour étouffer la réaction en chaîne et pour garantir à l'arrêt une réactivité totale suffisamment négative pour se prémunir de tout risque d'accident de réactivité, totalement extraites en puissance),
- les **grappes de régulation de température** (fortement antiréactives, toujours un peu insérées dans le cœur),
- les **grappes de régulation de puissance** (peu antiréactives, rarement totalement extraites).

La réactivité introduite par un mouvement de grappe n'est pas constante : en effet, cela dépend de la cote d'insertion de la grappe. Une grappe est peu efficace en début et en fin de course du fait de la concavité du flux sur les bord du cœur.



Afin d'avoir une **vitesse d'insertion de réactivité** constamment **proportionnelle** à la **vitesse d'insertion des grappes**, celles-ci s'insèrent avec un certain **recouvrement** (*pour les grappes de régulation de puissance, c'est à dire N1, N2, G1 et G2*). Ceci permet de s'affranchir des faibles efficacité différentielles en limite de course.

- **Avantage** : l'antiréactivité introduite par ces grappes est importante, et facilement variable. Elles permettent des **variations de réactivité quasi-instantanées**. Ceci est important lors des arrêts d'urgence ou des démarrages sur pic xénon.
- **Inconvénient** : l'introduction d'une grappe très absorbante provoque des pics de flux, et peut conduire à des points chauds. Lors du retrait d'une grappe, nous libérons du combustible neuf, provoquant ainsi, des pics de flux. Le combustible n'est alors pas uniformément utilisé.

2.3 Poison soluble

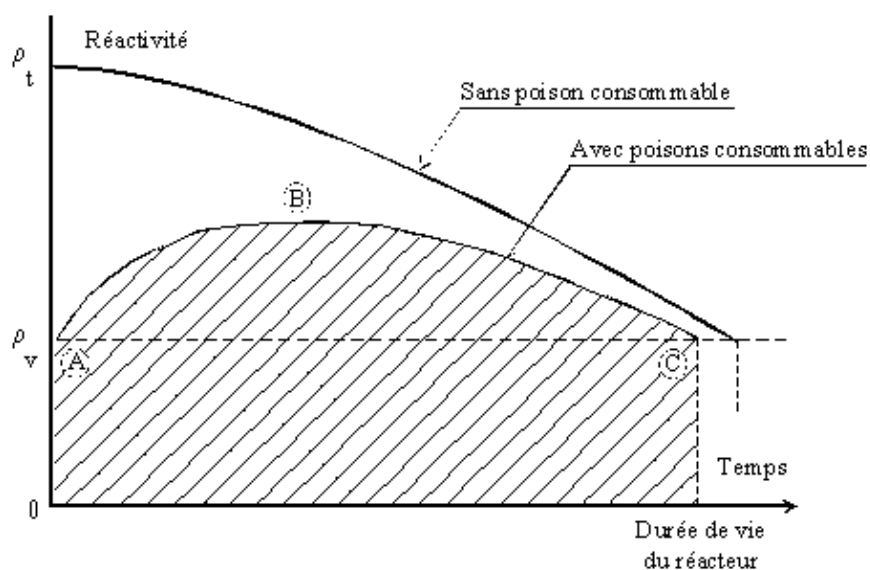
Nous employons du bore dilué, à ces concentrations plus ou moins importante, dans l'eau du circuit primaire. Afin de garantir les contre-réactions indispensables à la sûreté, la concentration est limitée vers 1200 ppm. Ce dispositif va permettre de contrôler la réactivité en dosant la quantité de bore. Mais, il est également possible en cas d'incident de réactivité d'utiliser une borication automatique afin d'« étouffer » le cœur.

2.4 Poison consommable

Les poisons consommables sont des corps qui disparaissent par capture neutronique. Ces poisons consommables permettent de **limiter le nombre et l'efficacité des grappes** de contrôle. Les points chauds sont ainsi mieux répartis, avec la possibilité d'aplatir le flux. Ils sont utilisés sous forme de grappes en acier, contenant des pastilles de silicate de bore, ou de gadolinium.

En début de vie, les noyaux de poisons consommables sont suffisamment nombreux pour compenser la réactivité du combustible :

- Entre les points A et B, (*voir schéma*) le poison consommable s'use plus vite que le combustible : **on augmente donc la borication**.
- Au delà du point B, le poison s'use moins vite que le combustible : **on dilue** pour avoir suffisamment de réactivité.



Il ne sera pas possible de jouer en permanence sur la dilution-borication, car on s'interdit de descendre en dessous d'une certaine concentration en bore. A ce moment là, il est nécessaire de baisser progressivement les grappes de régulation de puissance : c'est le stretch. De toute façon, on s'interdira d'empiéter sur la réserve de réactivité vitale : on atteint donc la fin de vie au point C. Nous noterons une légère diminution de la durée de vie du réacteur, les noyaux de poisons consommables n'étant jamais tous consommés.

La réserve de réactivité du cœur empoisonné est contrôlée par les **grappes d'arrêt**, c'est à dire SA, SB, SC et SD (*surface comprise entre 0 et ρ_v*).

2.4.1 Choix du poison consommable

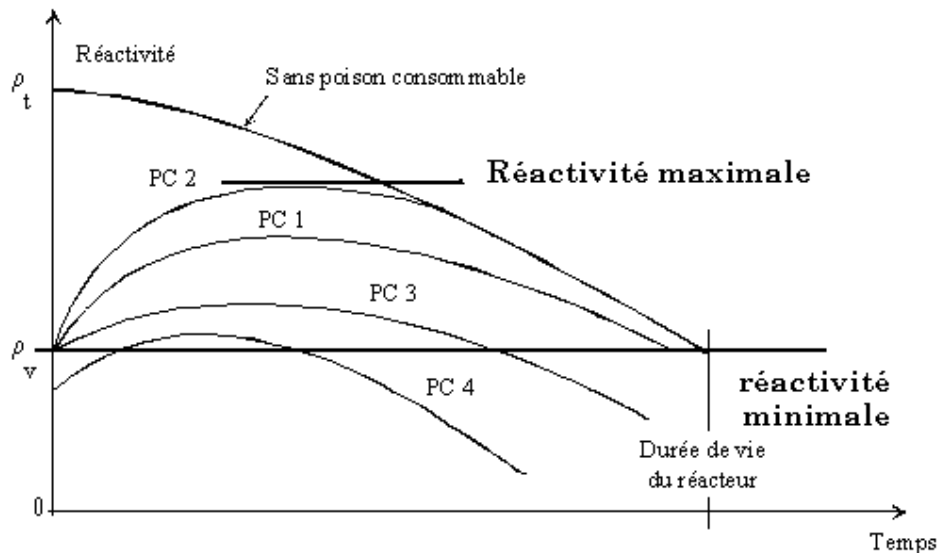
Le poison consommable doit permettre au réacteur de disposer à tout moment de sa réserve de réactivité vitale ρ_v . L'efficacité maximale $\rho_{pc\ max}$ de ce poison consommable doit donc être de :

$$-\rho_{pc\ max} \leq \rho_T$$

Lorsque le poison consommable disparaît, il faut que les grappes de contrôle puissent rendre le cœur sous-critique de -1000 pcm (*à l'arrêt froid*), à tout moment, et notamment **au maximum de la réserve de réactivité** (point B). Ainsi l'**efficacité minimale** des poisons consommables ρ_g min doit être telle que : $\rho_g^* + \rho_{pc\ min}(t) = -\rho_T(t) + (-1000)$

- où
- $\rho_g(t)$: efficacité des poisons consommables à l'instant t
 - ρ_g^* : efficacité du système de grappes de contrôle lorsque la grappe la plus efficace reste en position haute
 - $\rho_T(t)$: réserve de réactivité du cœur à l'instant t

2.4.2 Exemple d'empoisonnement



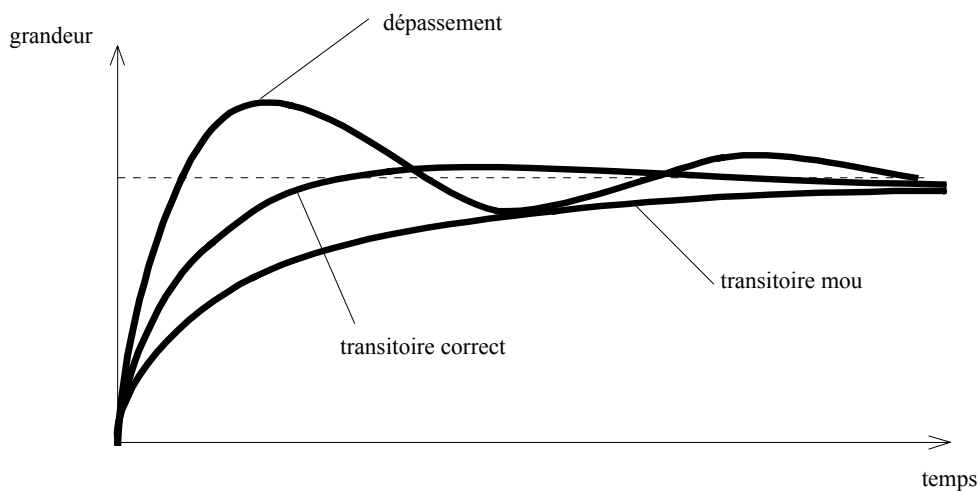
- Seul le poison consommable "PC 1" est correct : la réserve de réactivité maximale permet aux grappes de contrôle de remplir leur rôle de sécurité dans les conditions les plus défavorables.
- Le poison consommable "PC 2" disparaît trop vite.
- Le poison consommable "PC 3" disparaît trop lentement : diminution sensible de la durée du cœur car il reste encore des poisons consommables dans le cœur.
- Le poison consommable "PC 4" est trop efficace en début de vie car il ne laisse pas la réserve de réactivité vitale à la disposition du cœur.

3. gestion des transitoires de puissance

Un régime transitoire est une évolution d'un régime permanent vers un autre régime permanent.

Le comportement en transitoire sera jugé satisfaisant :

- si la **durée est suffisamment brève** afin de faciliter la conduite,
- s'il ne se produit **pas de dépassement de nature à endommager le réacteur**. Dans le cas contraire, il faudra mettre en place des automatismes visant à ramener les paramètres à des valeurs acceptables (*par exemple ouverture des soupapes de sécurité pour limiter une montée en pression*).



3.1 Différents transitoires

On distinguera deux types de transitoires :

- les **transitoires de conduite normale** :
 - variations d'allures
 - changements de pompage primaire
 - variations de température primaire,

qui peuvent se dérouler en **dynamique libre**, c'est-à-dire sans intervention extérieure, les contre-réactions du réacteur permettant d'atteindre un état final stable sans dommage et en un temps assez court.

- les **transitoires accidentels**, par exemple :
 - fermeture vanne SAA
 - rupture collecteur de vapeur
 - perte de pompage primaire
 - mise en service d'une boucle froide

qui imposent des actions automatiques pouvant aller jusqu'à l'arrêt d'urgence. Les contre-réactions ne sont pas suffisantes, soit en intensité, soit en temps.

3.2 Méthode d'étude des transitoires

On étudiera successivement les transitoires de conduite normale:

- introduction de réactivité,
- variation de la puissance extraite,
- changement de débit.

L'étude consiste à tracer l'évolution des paramètres au cours de la perturbation et à examiner les risques que comporte le transitoire.

3.2.a identifier le paramètre initiateur

Pour pouvoir commencer l'étude du transitoire, il faut identifier le paramètre qui subit le premier l'influence de la perturbation et qui va **déstabiliser l'ensemble des autres paramètres**. Il est important de bien différencier les paramètres qui subissent instantanément des effets de ceux qui réagissent avec retard, dû en particulier au temps de transit dans les circuits.

3.2.b évaluer les contre-réactions en jeu

Une fois déterminée l'évolution initiale de l'ensemble des paramètres de la centrale, il faut intégrer **l'influence des contre-réactions de températures** qui vont s'opposer à ces évolutions, et en principe **ramener automatiquement le système** vers un nouvel équilibre.

3.2.c caractériser l'état final

L'état final peut être caractérisé grâce aux équations de bilan en régime permanent:

- bilan de réactivité ;
- équations de transfert thermique.

3.2.d évolution globale et examen des risques

Il ne reste plus qu'à relier les évolutions initiales à l'état final pour obtenir la réponse globale à la perturbation. On s'intéressera alors aux **paramètres dont l'évolution peut présenter des risques** dans des conditions plus sévères (*augmentation des températures du cœur, excursion de puissance, pic de réactivité...*).

3.3 exemple : perturbation de puissance extraite

3.3.a conditions initiales

- débit primaire constant, donc températures en équilibre.
- la centrale évolue en dynamique libre ($\delta\rho_e = 0$). Le système est autostable.
- à l'instant initial, on élève la puissance extraite (*échelon de puissance*)

3.3.b paramètre initiateur : refroidissement du secondaire

En effet, la centrale répond à la demande supplémentaire de puissance extraite en puisant sur la réserve de puissance contenue dans le générateur de vapeur : on observe une **chute immédiate de la température de la vapeur du secondaire**.

Ce refroidissement du secondaire **se transmet au fluide primaire**.

- La température de sortie échangeur baisse instantanément
- la température entrée échangeur reste constante dans un premier temps.
- Après un léger temps de retard, le cœur subit l'influence de cette baisse de température.

3.3.c contre-réaction de température

Le refroidissement de l'eau primaire provoque un **gain de réactivité** : la puissance neutronique commence à monter, la baisse des températures s'atténue.

3.3.d état final du système

La puissance neutronique s'est alignée sur la puissance extraite : $W_n = W_e$
C'est une caractéristique d'un système autostable.

L'augmentation de W_n (*puissance neutronique due aux fissions*) s'accompagne donc d'une augmentation de la température combustible.

Pour ramener à un bilan de réactivité nul, la température du modérateur a chuté et compense l'effet DOPPLER :

$$T_m = T_{m0} - \text{effet Doppler}$$

$$\alpha_u \Delta T_u = - \alpha_m \Delta T_m$$

α_u étant plus faible que α_m , l'augmentation de T_u est plus forte que la diminution de T_c

θ étant la température du primaire dans l'échangeur, l'écart $T_e - \theta$ a augmenté, la puissance extraite étant plus forte. ($W_e = \lambda_e (T_e - \theta)$)

Les écarts ΔT_e échangeur, et ΔT_c caloporteur ont également augmenté ($W = M C_p \Delta T$)

3.3.e évolution globale et examen des risques

- L'introduction d'eau froide dans le cœur provoque une **augmentation de puissance**.
- Le refroidissement du primaire se traduit par une **chute de la pression**.

Ces deux évolutions peuvent prendre des proportions non négligeables si le transitoire de puissance est violent (*rupture d'un collecteur de vapeur*).

L'augmentation de l'écart de températures entrée-sortie cœur peut être important.
Le régime de pompage devra éventuellement être augmenté pour diminuer l'écart ($W = M C_p \Delta T$).

Remarquons que dans le cas inverse d'une diminution de la puissance extraite, il faudra s'intéresser aux augmentations des températures du secondaire et du primaire.

4. Modes de pilotage des REP EdF

4.1 Critères de conception et limites de fonctionnement

Parmi les critères de conception, la neutronique retient :

- **température maximale de surface de gaine**
- température maximale du combustible : la valeur de conception est de 2260°C, ce qui correspond à une **puissance linéique maximale** de 590W/cm pour un combustible 17*17.
- critère de **non caléfaction** : prévention de la crise d'ébullition
- **limites mécaniques** pour la gaine

Cela se traduit par des limites physiques de fonctionnement visant à la tenue de la première barrière, la gaine :

- **non-fusion à cœur du combustible**, contrainte qui sera traduite en terme de **puissance linéique maximale** admissible en fonctionnement.
- prévention de la crise d'ébullition, liée elle aussi à la **valeur de la puissance linéique**.
- **prévention contre les ruptures de gaine** par interaction pastille-gaine (IPG), problème assez complexe par le grand nombre de phénomènes mis en jeu.

Le point commun à ces 3 contraintes concerne la **puissance linéique maximum admissible**. Nous limiterons notre étude à **la protection par surpuissance neutronique**.

4.2 Protection par surpuissance neutronique

La protection par surpuissance neutronique doit assurer l'intégrité du combustible. Le critère adopté est une limite sur la **température du combustible égale à 2260°C**, soit pour du combustible 17*17 une **puissance linéique limite de 590 W/cm** (*valeur de conception*).


4.2.a Facteur de point chaud neutronique

Nous appellerons facteur de point chaud neutronique, noté F_Q le pic de puissance existant dans le cœur suivant l'axe Z puisque les gradients de température se font axialement.

4.2.b rappel sur l'axial Offset

Concernant donc la valeur du flux neutronique selon l'axe Z du cœur, les **seules mesures accessibles à l'opérateur** sont les courants I_H et I_B des chambres longues disposées dans les moitiés supérieure et inférieure du cœur.

Le déséquilibre axial de puissance ou " axial offset " s'écrit :

$$AO = \frac{I_H - I_B}{I_H + I_B}$$


C'est à puissance nominale que l'Axial Offset est le plus faible, les barres étant en position haute. Dans ce cas, il vaut -7% pour un cœur en début de cycle du fait des différences de température en parties basses et hautes.

En fonctionnement, le facteur de point chaud n'étant pas mesurable, Westinghouse, EDF et Framatome ont établi une **corrélation entre FQ et l'Axial Offset**, accessible à la mesure, pour un très grand nombre de cas de fonctionnement (*diverses côtes de barre, différents burn-up, diverses répartitions du Xénon, etc...*).

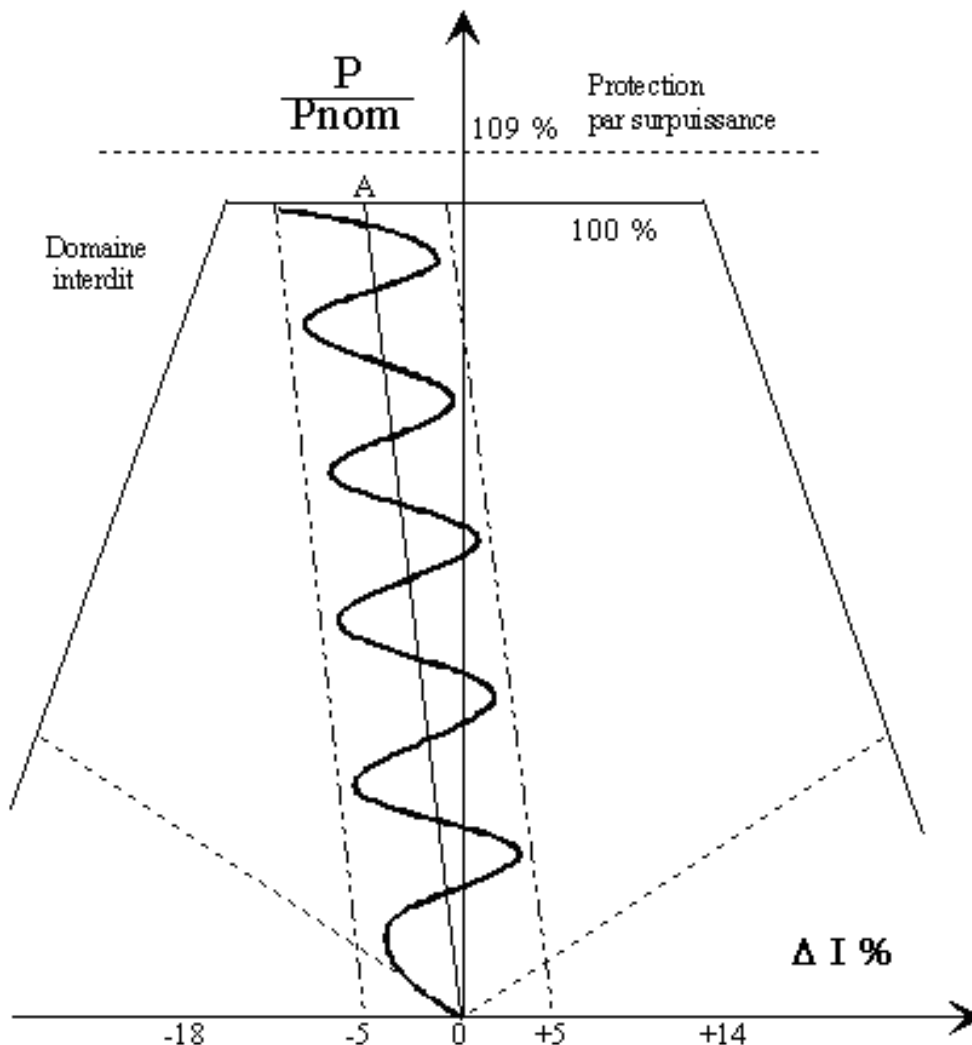
Si nous transposons cette corrélation $FQ = f(AO)$ en un diagramme $P_{max}(\Delta I) / P_{nom} = f(\Delta I)$ avec $\Delta I = AO * P / P_{nom}$ (*normalisation de l'Axial Offset à la puissance nominale*), nous obtenons un domaine limité de fonctionnement.

De plus, **afin d'éviter le développement d'oscillations Xénon** (voir le chapitre sur le xénon), on cherchera à **peu déformer le flux**. Une condition nécessaire, bien que non suffisante, consiste à travailler à **déséquilibre axial AO constant**.

Conséquences : si $AO = cste$, et puisque $\Delta I = AO * P / P_{nom}$

- pour $P = P_{nom}$, $\Delta I = AO_{nom} = -7\%$ en début de cycle
- pour $P = 0$, $\Delta I = 0$.

On travaillera donc suivant la droite de fonctionnement OA sur la figure suivante. La protection doit également assurer une limitation en surpuissance (109%).



On tolère toutefois une marge de +/- 5% par rapport à cette droite.

L'interdiction de sortie du parallélogramme de fonctionnement n'est cependant pas formelle, un fonctionnement limité en temps hors de celui-ci est toléré. L'opérateur doit maintenir constamment le point de fonctionnement dans ce diagramme.

4.3 Modes de pilotage EdF

Nous avons vu que la protection du réacteur par surpuissance neutronique ainsi que la maîtrise du phénomène d'oscillations Xénon conduisait l'opérateur à **surveiller la valeur de l'Axial Offset**. Les stratégies de pilotage EDF sont basées, en partie, sur ces considérations.

4.3.a à l'origine, le " mode B "

C'était un mode de pilotage **NOIR**. Ce mode comprenait :

- 6 groupes de **8 grappes longues**
- **5 grappes courtes** pour le contrôle de l'axial offset.

Les grappes courtes, positionnées en partie centrale du cœur (*maximal de flux*), permettaient le contrôle parfait de l'axial offset. Cependant, les pics de puissance étaient mal contrôlés du fait de pincements de flux de part et d'autre de la partie centrale du cœur. Ces **pincements de flux** pouvaient occasionner à terme l'apparition d'oscillations Xénon et donc, des **pics de puissance importants**.

De plus, ce mode conduisait à une mauvaise utilisation du combustible. Il a donc été logiquement abandonné.

4.3.b Mode A

Mis en place après l'abandon du mode B, c'est un mode de pilotage **NOIR**. Ce mode prévoit **l'interdiction d'utilisation de grappes courtes**, les pics de puissance sont ainsi évités, et un **temps de séjour limité** des grappes noires en position basse afin d'éviter l'apparition d'oscillations Xénon.

Ce mode est peu souple et présente une incompatibilité du contrôle de l'axial offset avec les besoins de contrôle de la réactivité. En effet, pour ce mode de pilotage, l'obtention d'un axial offset correct n'est possible qu'avec des barres situées en position haute.

4.3.c Mode G et X (palier N4)

Le mode de pilotage utilisant des grappes noires ne pouvait satisfaire pleinement EDF confronté aux problèmes de suivi de charge entraînant des mouvements de grappes importants. Des grappes grises ont donc remplacé fonctionnellement les grappes courtes ainsi qu'un certain nombre de grappes noires. Elles sont composées de 8 à 12 crayons absorbants, le complément étant composé de crayons "blancs" peu absorbants. Elles perturbent donc moins les répartitions de puissance.

Les grappes de commande sont manœuvrées par recouvrement, recouvrement plus élaboré pour le mode X du palier N4.

5. Sûreté et exploitation

La **sûreté** regroupe l'ensemble des dispositions prises à tout les stades de la conception, de la construction, de l'exploitation et de l'arrêt des installations nucléaire pour protéger en toute circonstances l'homme et son environnement naturel contre la dispersion des produits radioactifs, c'est à dire **3 dispositions** :

- assurer le fonctionnement normal,
- prévenir les incidents et accidents,
- limiter les conséquences en cas d'incident ou d'accident.

La **défense en profondeur** consiste à prendre en compte de façon systématique les défaillances techniques, humaines ou organisationnelles et à s'en prémunir par des lignes de défense successives (**3 lignes de défense**) :

- la prévention,
- la surveillance ou la détection,
- les moyens d'action ou le traitement.

Pour **éviter la défaillance des barrières** ou pour limiter les conséquences de leurs défaillances, il faut respecter les 3 fonctions de sûreté suivantes (3 fonctions de sûreté) :

- contrôler la réactivité,
- contrôler le refroidissement du combustible,
- contrôler le confinement des produits radioactifs.

Ce dernier survol de la sûreté permet de passer en revue l'ensemble du cours de neutronique. Chacun de ces éléments se traduisant, soit par des dispositions à la conception, soit par des dispositions à la conduite de l'exploitation. Le tout étant vérifié par des codes de calculs et des suivis permanents des paramètres essentiels à la sûreté.

Questions à réviser

- Nature de la réserve de réactivité. Utilisation et dimensionnement
- Nécessité de la réactivité vitale et durée d'exploitation
- Origine et importance de la reprise froid-chaud
- Description des différents moyens de contrôle
- Justifications des trois fonctions des moyens de contrôle
- Nature et emploi des poisons consommables
- Exemples de transitoires normaux et accidentels
- Méthode d'étude d'un transitoire : expliquer les étapes paramètres initiateurs, contre-réactions, état final et examens des risques
- Etude d'un transitoire : perturbation de la puissance extraite
- Différents types de grappes, dispositions, nature, avantages et inconvénients
- Modes de pilotage EdF. Pourquoi a-t-on supprimé les modes B et A ?
- Expliquer en quoi les oscillations Xénon sont-elles dangereuses et comment le contrôle de l'axial-offset permet de les éviter.
- Diagramme de fonctionnement, contrôle de la puissance et de l'axial offset.
- Sûreté et neutronique : lignes de défense, dispositions et fonctions de sûreté

Exercice 1 : révision générale, problèmes de pilotage du fait de l'usure.

Durant son exploitation, le chargement fissile va être confronté à des cyclages de puissance, de l'usure neutronique et les éléments mobiles ; les éléments fixes comme le panier, les grilles, la cuve, vont subir de l'usure technologique à long terme, et des arrêts brutaux du fait de problèmes de sûreté.

En reprenant les critères de sûreté, les dispositions et les lignes de défense, développez ce que vous savez sur **les conséquences sur la sûreté** en matière de :

- Evolution de la réactivité en puissance et lors des arrêts
- Comportement du combustible selon l'usure
- Effets de l'usure et de la puissance sur l'aplatissement du flux
- Consignes générale de conduite du réacteur
- Effet sur le pilotage et les disponibilités du cœur

Pour chacun de ces sujets proposez des solutions (réponses simples mais justifiées)

Exercice 2 : inventaire des éléments influents sur la réactivité

Entretien, contrôler la réaction en chaîne, est un problème permanent.

Faire l'inventaire des ordres de grandeur, des moyens d'intervention ou de contrôle, et des facteurs limitant les paramètres suivants :

- Réglages extérieurs de la réactivité (Bore, grappes de réglage et d'arrêt, poisons consommables, enrichissement variables) ;
- Perturbations internes à compenser par le réglage de la réactivité ;
- Empoisonnement à moyen terme (effet xénon) ;
- Empoisonnement à long terme (effet samarium) ;
- Variation du flux dans l'espace ;
- Variations du flux liés à l'usure du combustible (conversion comprise) ;
- Variations de réactivité liées aux variations de température ou de puissance.

Exercice 3 : Démarrage de pompe : transitoire lié à une perturbation de débit

A un instant donné, à partir d'une situation stable de l'installation, on est amené, avant de monter en puissance, à démarrer une boucle de pompage.

1. Quels sont les **processus et les dispositions** permettant de placer le système en équilibre ?
2. En reprenant la **méthode d'étude d'un transitoire**, vous rechercherez :
 - Le paramètre initiateur qui subit le premier la perturbation ;
 - Les différents paramètres déplacés par le processus et les contre-réactions en évaluant les temps de réponse associés ;
 - Les paramètres de l'état final ;
3. Proposez les **courbes d'évolution des différents paramètres** listés ci-dessous au cours du transitoire.

Cœur combustible et moyens de contrôle

P	réactivité du cœur
W_n	puissance dégagée par les fissions
T_u	température moyenne du combustible

Circuit du caloporteur

T_{ce}, T_{cs}	températures du caloporteur à l'entrée et à la sortie du cœur
T_m	température moyenne du caloporteur-modérateur
P	pression primaire.

Circuit secondaire

T_{ee}, T_{es}	températures du primaire à l'entrée et à la sortie du G.V.
T_e	température moyenne du primaire dans le G.V.
θ	température moyenne du secondaire
P_s	pression secondaire

4. Examinez les **paramètres à surveiller** au cours du transitoire et dont l'évolution peut présenter des risques.
5. Imaginer les **conséquences sur le fonctionnement** de l'installation : diagramme de fonctionnement puissance axial-offset, contraintes thermomécaniques, régulations de niveaux des pressuriseurs, sécurité sur l'octavemètre, etc.