

# Empoisonnement du cœur par les produits de fission : effets xénon et samarium

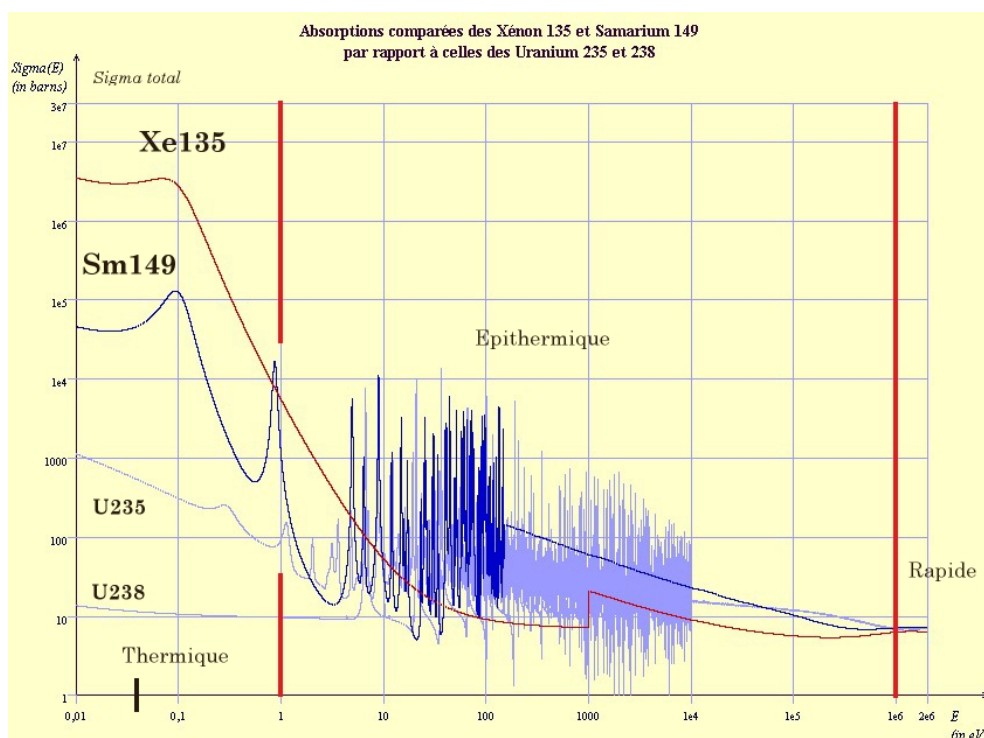
## Introduction

Lors d'une fission, deux fragments de fissions sont émis. Au moment de leur formation, ils ont un très faible parcours au sein de la matière du fait de leur charge fortement positive. Une fois arrêtés, les fragments de fission sont appelés produits de fission. Ils déposent instantanément leur énergie cinétique sous forme de chaleur (2 fois 80 MeV).

Ces **produits de fissions** sont des atomes souvent instables, et donnent donc naissance à d'autres produits par décroissance radioactive plus ou moins rapidement. Parmi tous ces produits de fission, certains possèdent des propriétés neutroniques remarquables et perturbent alors le fonctionnement du cœur.

Nous nous limiterons à l'étude de deux produits de fission très particuliers qui présentent des **sections efficaces de capture** neutronique très élevées dans le domaine thermique :

Le xénon 135, avec une section de capture de 2,7 millions de barns, et le samarium 149, pour 40 000 barns dans le domaine thermique (*voir figure ci-dessous*).

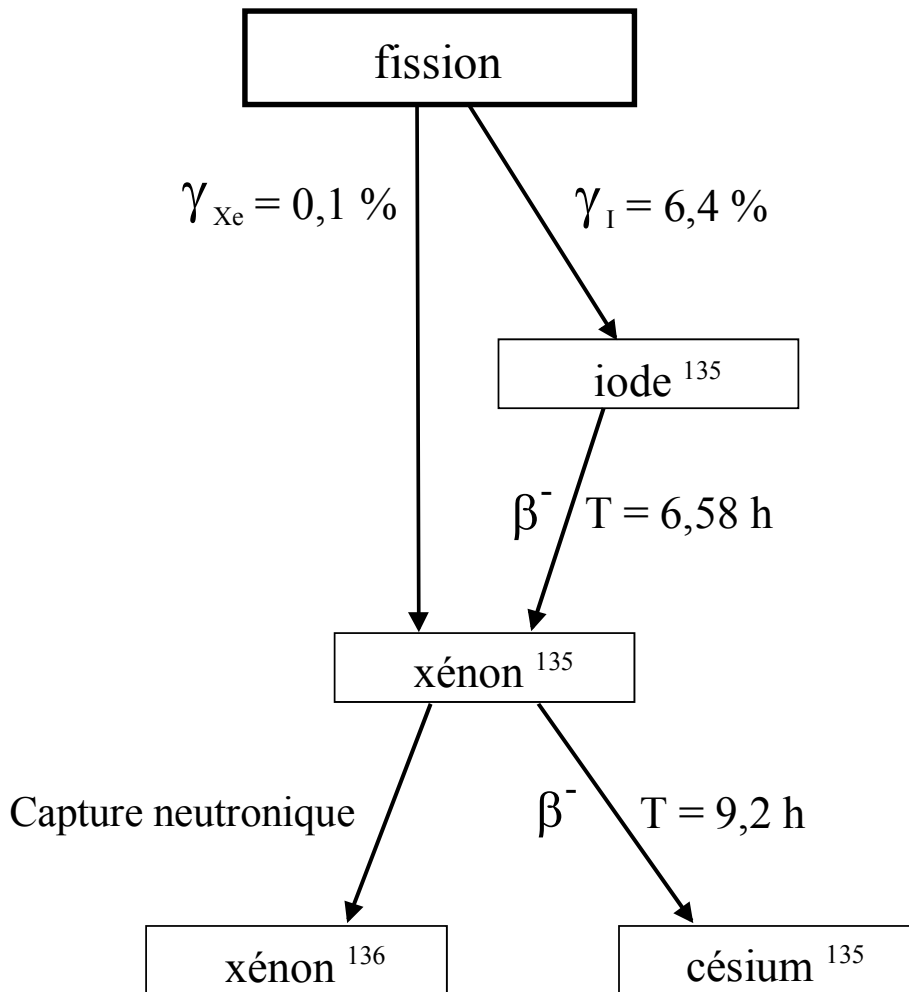


La présence de ces noyaux contribue donc fortement aux capacités d'absorption du combustible, et donc **diminue le coefficient de multiplication effectif**.

# 1. Empoisonnement du cœur par le xénon 135

## 1.1. Chaîne d'évolution du xénon 135

On appellera  $\gamma_{Xe}$  et  $\gamma_I$  les rendements de fission pour l'iode et le xénon. Un rendement de 6,4 %, par exemple, indique que pour 1000 fissions, 64 noyaux d'iode 135 seront produits en moyenne, contre 1 seul noyau de xénon 135 (rendement de fissions de 0,1 %).



Deux périodes de décroissance sont à comparer : celle **de l'iode 135** (6,58 heures) est **plus courte que celle du xénon 135** (9,2 heures). D'autre part le **xénon 135**, instable, peut **disparaître simplement par décroissance**, même sans flux neutronique. Le xénon est donc un "poison" non définitif. Un cœur arrêté depuis plus d'une trentaine d'heure ne contient pratiquement plus de xénon.

## 1.2. Equation d'évolution du xénon 135

L'établissement des équations d'évolution est basé sur un simple bilan des densités nucléaires exprimé de la façon suivante :

$$\text{VARIATION} = \text{APPARITIONS} - \text{DISPARITIONS}$$

Les différents termes s'expriment alors de la façon suivante :

### ➤ pour l'iode noté I

$$\text{Variation du nombre de noyaux d'iode /cm}^3 \quad \frac{dI}{dt}$$

$$\text{Apparition de noyaux d'iode comme produits de fission} \quad \gamma_I N_f \sigma_f \Phi$$

$N_f$ : nombre de noyaux fissiles/cm<sup>3</sup>

$\sigma_f$  : section efficace de fission

$$\text{Disparition des noyaux d'iode par décroissance radioactive} \quad - \lambda_I I$$

$\lambda_I$  : constante radioactive de décroissance de l'Iode 135 [s<sup>-1</sup>]

### ➤ pour le xénon noté X

$$\text{Variation du nombre de noyaux de xénon /cm}^3 \quad \frac{dX}{dt}$$

$$\text{Production de xénon par fission, et désintégration de l'iode} : \gamma_{Xe} N_f \sigma_f \Phi + \lambda_I I$$

$N_f$ : nombre de noyaux fissiles/cm<sup>3</sup>

$\sigma_f$  : section efficace de fission[cm<sup>2</sup>]

$$\text{Disparition des noyaux de xénon par décroissance radioactive, et par capture neutronique} \quad -\lambda_{Xe} X - \sigma_c^{Xe} X \Phi$$

$\lambda_{Xe}$  : constante radioactive du xénon[s<sup>-1</sup>]

$\sigma_x$  : sect. eff. de capture du xénon[cm<sup>2</sup>]

On remarquera que **le xénon est essentiellement formé par la décroissance radioactive de l'iode**, et que les fissions contribuent très peu à l'apparition directe du xénon 135.

D'où les deux équations bilan :

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I N_f \sigma_f \Phi - \lambda_I I$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_{Xe} N_f \sigma_f \Phi + \lambda_I I - \lambda_{Xe} X - \sigma_c^{Xe} X \Phi$$

### 1.3. Evolution du xénon dans un réacteur

Etudions la variation de la concentration de xénon pour les cas suivants :

1. démarrage du réacteur après un arrêt prolongé,
2. arrêt du réacteur après un fonctionnement prolongé,
3. démarrage du réacteur au niveau du pic xénon.

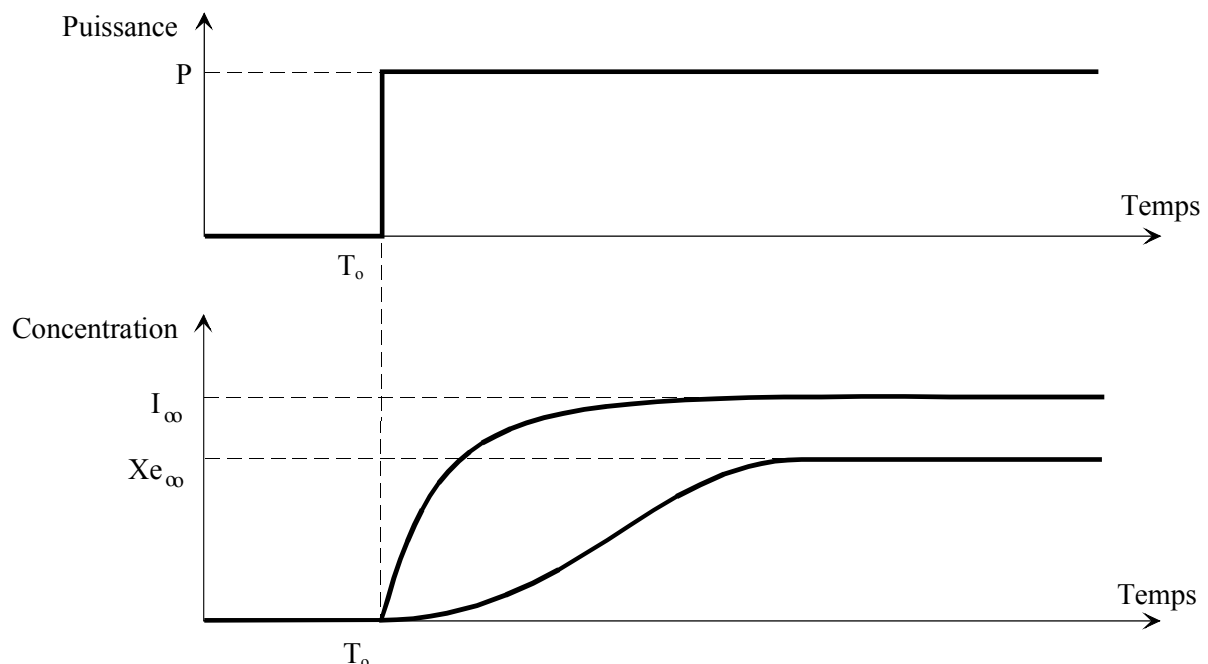
#### ➤ Démarrage du réacteur après arrêt prolongé.

A l'instant de démarrage  $T_0$ , nous considérons que les concentrations en iode et en xénon sont nulles, ce qui équivaut soit à un cœur neuf, soit à un arrêt prolongé du réacteur.

A l'instant  $T_0$ , nous passons d'un flux neutronique nul à un flux  $\Phi$ , correspondant à une puissance donnée du cœur.

L'iode et le xénon vont apparaître par fission, et disparaître par décroissance radioactive, le xénon disparaissant aussi par capture neutronique. Au bout d'une certaine durée, **les apparitions et les disparitions se compenseront** de sorte que les concentrations en iode et en xénon se **stabiliseront**.

Nous obtenons alors les courbes suivantes :



Les valeurs  $Xe_\infty$  et  $I_\infty$  sont les concentrations à l'équilibre du xénon et de l'iode.

Lorsque l'équilibre est atteint, le terme de variation devient nul, ce qui se traduit mathématiquement par les relations simples suivantes :

$$\text{Variations} = \text{apparitions} - \text{disparitions} = 0$$

➤ Soit pour l'iode

$$\boxed{(\gamma_i \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi) - (\lambda_i \cdot I_\infty) = 0}$$

➤ Et pour le xénon

$$\boxed{(\gamma_x \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi) + (\lambda_i \cdot I_\infty - \lambda_x \cdot X_\infty) - (\sigma_x \cdot \Phi \cdot X_\infty) = 0}$$

En simplifiant, nous obtenons :

➤ pour l'iode, une **valeur à saturation** :

$$\boxed{I_\infty = \frac{\gamma_i \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_i}}$$

➤ Pour le xénon, cet **empoisonnement maximal** est donné par :

$$\boxed{X_\infty = \frac{(\gamma_x + \gamma_i) N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_x + \sigma_x \cdot \Phi}}$$

La concentration du xénon à l'équilibre dépend du flux  $\Phi$  et du nombre de noyaux fissiles par  $\text{cm}^3$ . Ceci montre que **plus le flux est élevé, plus l'empoisonnement par le xénon est important**. De plus, si l'enrichissement est fort, cet empoisonnement devient plus sensible. Cet empoisonnement limite (ou stabilisé) est obtenu au bout de **30 heures** (flux fort, à puissance élevée), voire plus tard (à puissance réduite).

➤ **Conséquences sur le pilotage**

On doit comprendre donc que l'opérateur, devant **maintenir la criticité, et la température de consigne** pour l'efficacité des processus d'extraction de puissance, devra donc **diminuer l'antiréactivité apportée par les grappes ou le bore**, la compensation se faisant alors moins nécessaire du fait de l'arrivée d'antiréactivité interne, par le xénon 135.

**L'opérateur remonte donc les grappes (ou dilue le bore)** durant les 30 à 50 premières heures de fonctionnement.

L'empoisonnement a un effet sur la réactivité d'un cœur. Pour quantifier cet effet, nous exprimerons plus souvent cet empoisonnement en pcm représentant, en d'autres termes, le **poinds relatif en antiréactivité**.

Le tableau, ci-dessous, indique les ordres de grandeur des **effets d'antiréactivité** liés à la concentration du **xénon à l'équilibre** :

Cœur oxyde UO<sub>2</sub> à bas flux  
REP (type EDF)

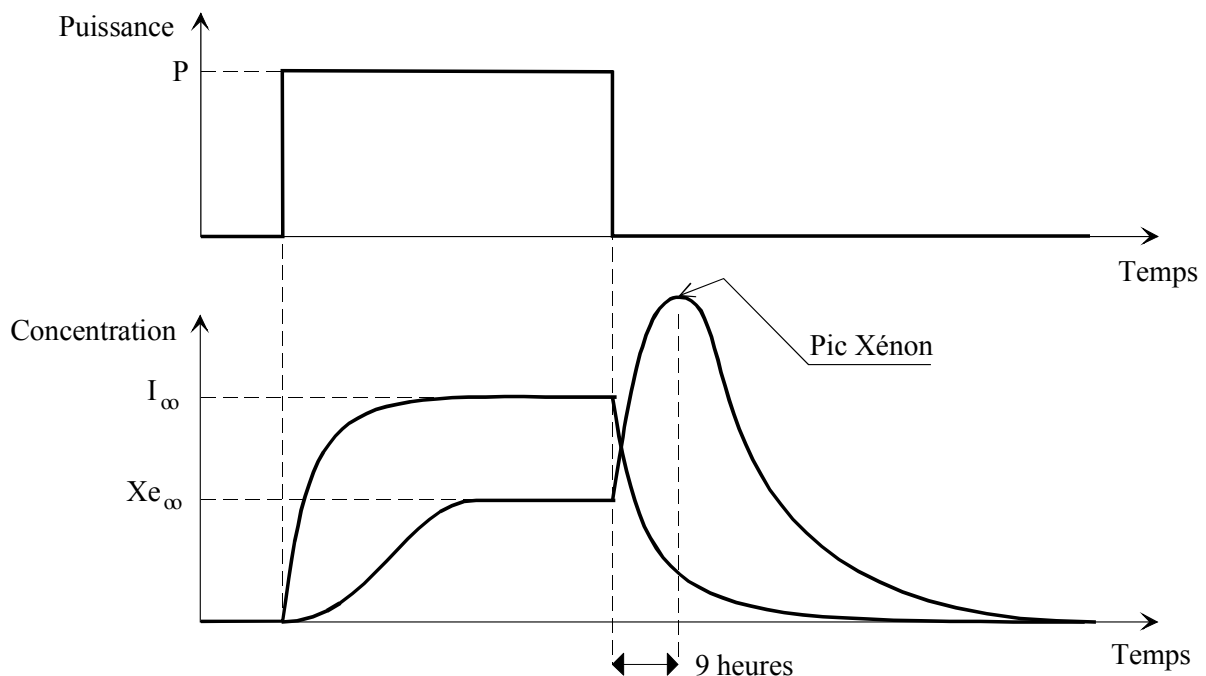
1500 pcm à 2800 pcm  
2800 pcm

On pourrait démontrer que la **variation de réactivité due aux produits de fission** pour un réacteur proche de la criticité est calculée facilement en comparant la "**perturbation**" par rapport aux **productions des neutrons** par fission :

$$\Delta\rho = -\frac{\Sigma_a^{Xe}}{\nu\Sigma_f}$$

➤ **Arrêt du réacteur après fonctionnement prolongé**

Après avoir atteint les concentrations d'équilibre, nous décidons d'arrêter le réacteur. Les concentrations évolueront de la façon suivante :



Avant l'arrêt du réacteur, la concentration d'iode est importante, à cause du rendement de fission élevé qui lui est associé. A l'arrêt du réacteur, du fait des **périodes différentes**, la production de xénon par décroissance radioactive de l'iode peut excéder sa disparition par décroissance radioactive.

La concentration en xénon commence alors par croître, passe par un **maximum** lorsque la production équilibre la disparition, puis décroît. Ce phénomène est appelé le "**pic xénon**".

Le tableau suivant indique les ordres de grandeur d'antiréactivité due au pic xénon :

### **Antiréactivité due au pic xénon**

<i>Cœur UO<sub>2</sub> à bas flux</i>	<i>4000 pcm à 6000 pcm</i>
<b>REP (type EDF)</b>	<b>5200 pcm</b>

L'effet en antiréactivité du pic xénon dépend du flux avant l'arrêt du réacteur. On parlera ainsi "**d'historique de puissance**". Si le flux avant arrêt a une valeur suffisamment faible, la concentration en iode est telle qu'il peut ne pas y avoir de pic xénon.

#### ➤ **Redivergence du réacteur au pic xénon**

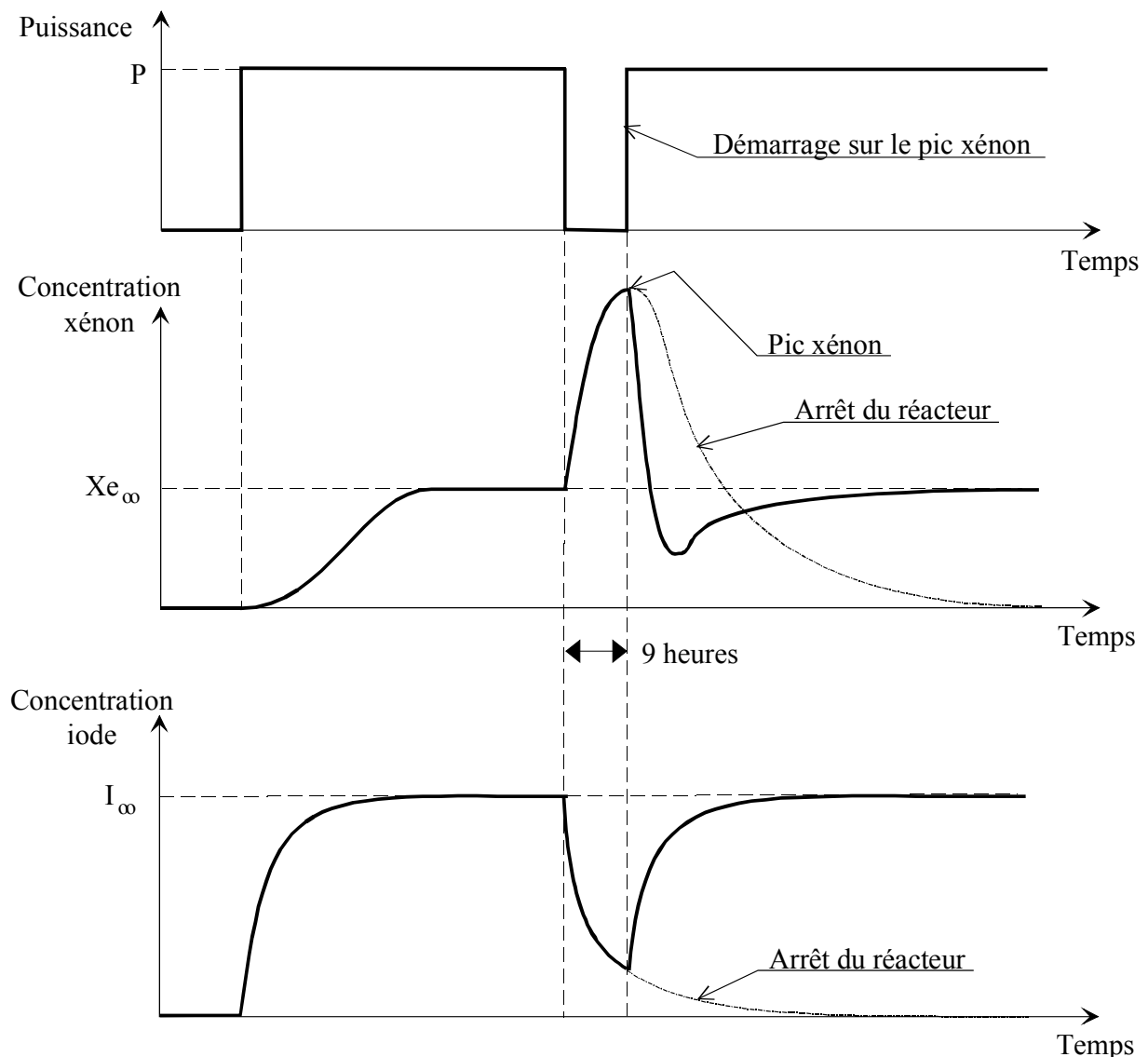
L'empoisonnement par le xénon 135, au moment du pic, peut être très important. Si nous ne prenons aucune précaution, le cœur atteint ainsi un état très sous-critique pendant lequel il serait même **impossible de rediverger**.

La **disponibilité de la propulsion** fait partie des objectifs de conception. Un réacteur doit pouvoir être disponible quel que soit l'état du cœur. Il faut donc que ce cœur ait une réserve de réactivité suffisante pour diverger dans les pires conditions, soit ainsi au pic xénon (empoisonnement maximal) à tout moment de la vie du réacteur.

#### ➤ **Critère de fin de vie**

**L'intensité maximale du pic xénon** que le réacteur doit pouvoir combattre est donc défini comme les effets d'un empoisonnement **8 heures après arrêt** (*instant du pic xénon*), après une **marche en puissance prolongée** (*stabilisation atteinte*) à **puissance élevée**. On précise également que la redivergence doit pouvoir se faire avec le **mécanisme mobile le plus efficace défaillant**, resté en fin de course basse (*critère de défaillance unique*).

La redivergence du réacteur au pic xénon est précisé sur la courbe suivante.



Lors de la redivergence au pic xénon, la formation de xénon par décroissance radioactive de l'iode, qui est en quantité faible, n'est pas suffisante pour compenser sa **très forte disparition par capture neutronique**. La **concentration en xénon chute fortement**, et très vite, au rythme de la capture neutronique. **La réactivité du cœur remonte donc très vite**.

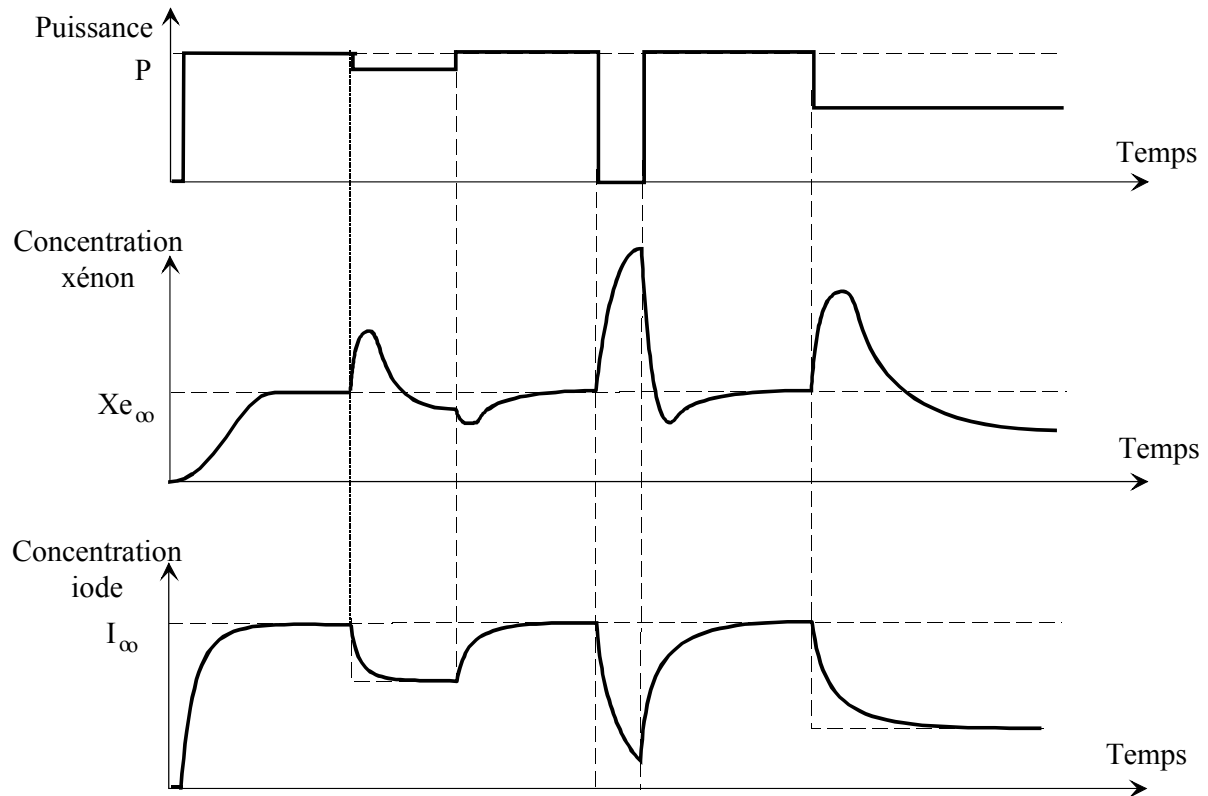
Cela a donc pour conséquence un **dimensionnement** particulier des **vitesse de descente des mécanismes** (en propulsion navale 3 fois la vitesse de montée) sur la base du pic xénon le plus élevé susceptible d'être rencontré.

L'équilibre se rétablit lorsque la concentration en iode devient suffisante, en terme de production du xénon. Nous revenons ensuite, s'il y a eu équilibre, donc selon les délais de stabilisation, aux concentrations "infinies" correspondantes au niveau de puissance atteint.



## 1.4. Exemples de variations de l'empoisonnement

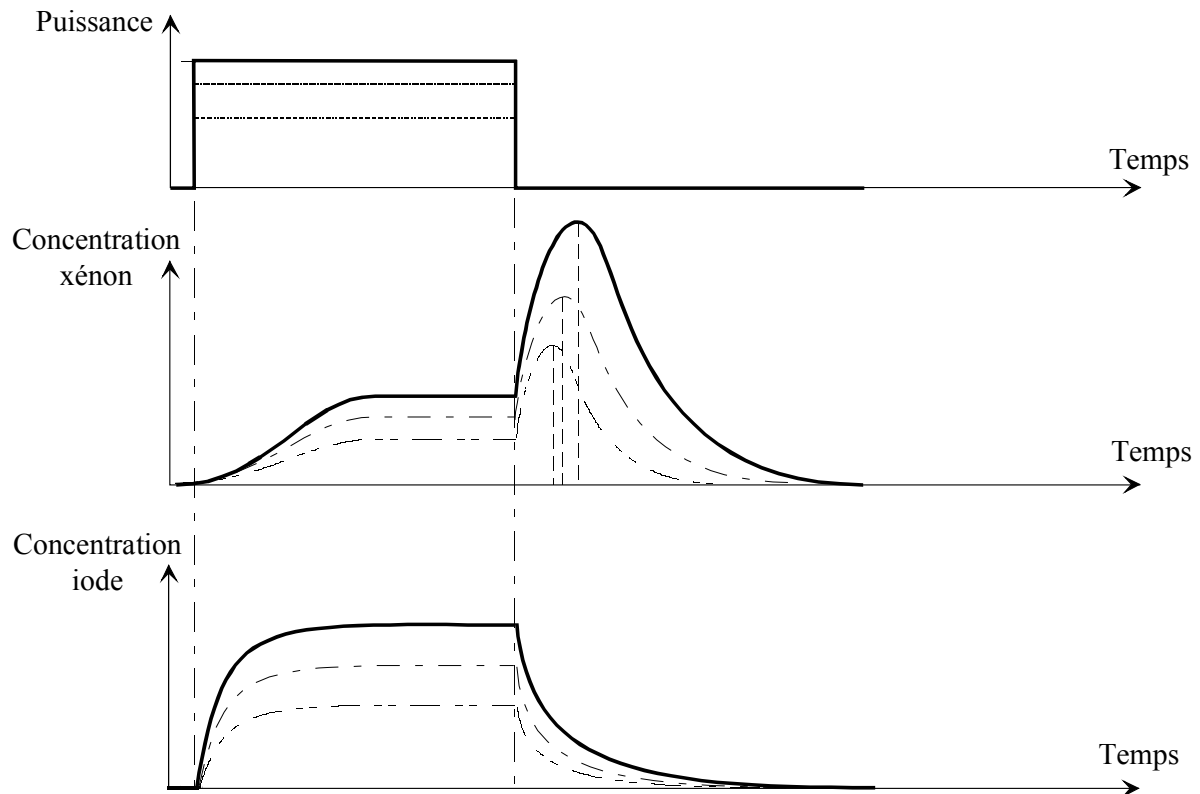
Lorsque les variations de puissance sont significatives, à toute baisse de puissance correspond un "pic" et à toute remontée en puissance correspond un "creux", comme nous le montre la figure suivante :



Il ne faut pas oublier que ces variations importantes de réactivités sont compensées assez efficacement par les effets de température, contre-réactions très efficaces. Les variations de la réactivité dues au xénon sont donc **compensées par des variations de température du modérateur**. La puissance extraite restant constante, la différence  $T_u - T_m$  reste stable.

Cependant, comme l'opérateur doit assurer une température moyenne du primaire à une valeur de consigne, il monte et descend les mécanismes mobile pour garantir cette  $T_m$ . Dans la plupart des cas, il ajuste la  $T_m$  en diluant ou ajoutant du bore soluble si le phénomène est suffisamment lent. Dans le cas d'un pic xénon (phénomène rapide), il régule avec des grappes de régulation.

La valeur et l'instant du pic xénon dépendent sensiblement du niveau de puissance précédant l'arrêt et de la variation de cette dernière.



### ➤ Suivi neutronique et conséquences de l'empoisonnement

Les opérateurs doivent régulièrement relever les côtes de grappes ou la concentration en bore, pour surveiller l'usure du chargement. Les **contre réactions de température** risquent de masquer l'information recherchée.

Il faut donc **relever les côtes de grappes ou le bore** à température de consigne bien stabilisée ( $T_m$  reproductible), à un niveau de puissance extraite identique ( $T_u$  reproductible) et à xénon stabilisé. Pour **contrôler la stabilisation du xénon**, un équipement approprié (calculateur au poste de commande) fournit ces informations sur la base des équations précédentes et de l'historique de puissance.

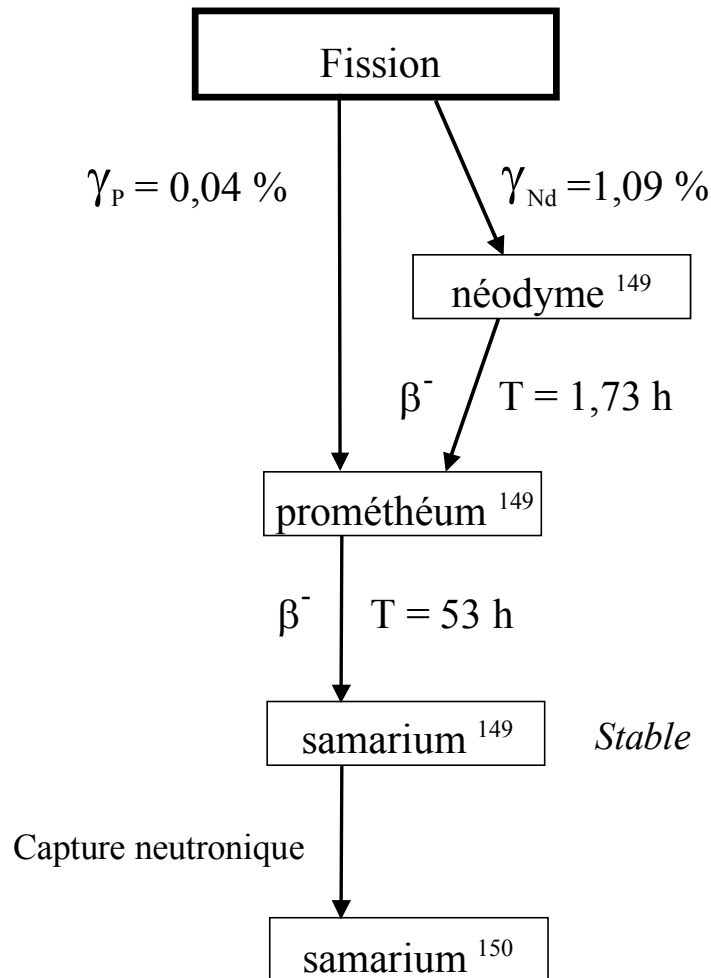
### 1.5 Oscillations Xénon dans les grands cœurs

On retrouvera dans le chapitre sur le contrôle de la réactivité l'importance du xénon dans le pilotage du fait d'oscillation lors du mouvement de grappes d'absorbants mobiles, découvrant des zones pauvres en iode, ou recouvrant des zones riches en iode.

## 2. Empoisonnement du cœur par le Sm 149

Le samarium 149 présente une section efficace de capture neutronique plus petite que celle du xénon mais suffisante pour poser des problèmes d'empoisonnement. Nous verrons, dans ce paragraphe, qu'il existe des différences fondamentales, entre le samarium et le xénon, autres que celle d'un empoisonnement moindre.

### 2.1. Chaîne d'évolution du samarium 149



Le samarium 149 est un **élément stable**. La seule évolution possible consiste en la capture d'un neutron. Le samarium formé dans un réacteur constitue donc un empoisonnement irrémédiable.

La très longue période de décroissance radioactive du prométhéum contribue à une **formation très lente du samarium 149**. La cinétique d'évolution s'échelonne en jours voire en semaines pour le samarium et en heures, comme nous l'avons vu, pour le xénon.

Nous négligerons l'apparition et la disparition du **néodyme** en raison de sa faible période radioactive (1,73 h) par rapport à celle du prométhéum (53 h). Pour les calculs, nous prendrons simplement, pour la production de prométhéum, la somme des rendements de fission, soit  $\gamma = \gamma_{Nd} + \gamma_{Pm}$ .

## 2.2. Equation d'évolution du samarium 149

L'établissement des équations d'évolution pour le prométhéum et le samarium est basé sur le même bilan que nous rappelons :

VARIATION = APPARITIONS - DISPARITIONS

Cela peut se formuler de la façon suivante :

### ➤ pour le prométhéum noté P

Variation du nombre de Noyaux de prométhéum /cm<sup>3</sup>  $\frac{dP}{dt}$

Apparition de noyaux de prométhéum comme produits de fission  $\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi$

$N_f$  : nombre de Noyaux fissiles/cm<sup>3</sup>

$\sigma_f$  : section efficace de fission

Disparition des noyaux de prométhéum par décroissance radioactive  $-\lambda_p \cdot P$

$\lambda_p$  : constante radioactive[s-1]

### ➤ pour le samarium noté S

Variation du nombre de noyaux de samarium/cm<sup>3</sup>  $\frac{dS}{dt}$

Apparition de noyaux de samarium par la désintégration du prométhéum  $\lambda_p \cdot P$

Disparition des noyaux de samarium par capture neutronique  $-S \cdot \sigma_s \cdot \Phi$

$\sigma_s$  : section efficace de capture du samarium

Cela se traduit donc par les équations suivantes :

$$\frac{dP}{dt} = \gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi - \lambda_p \cdot P$$

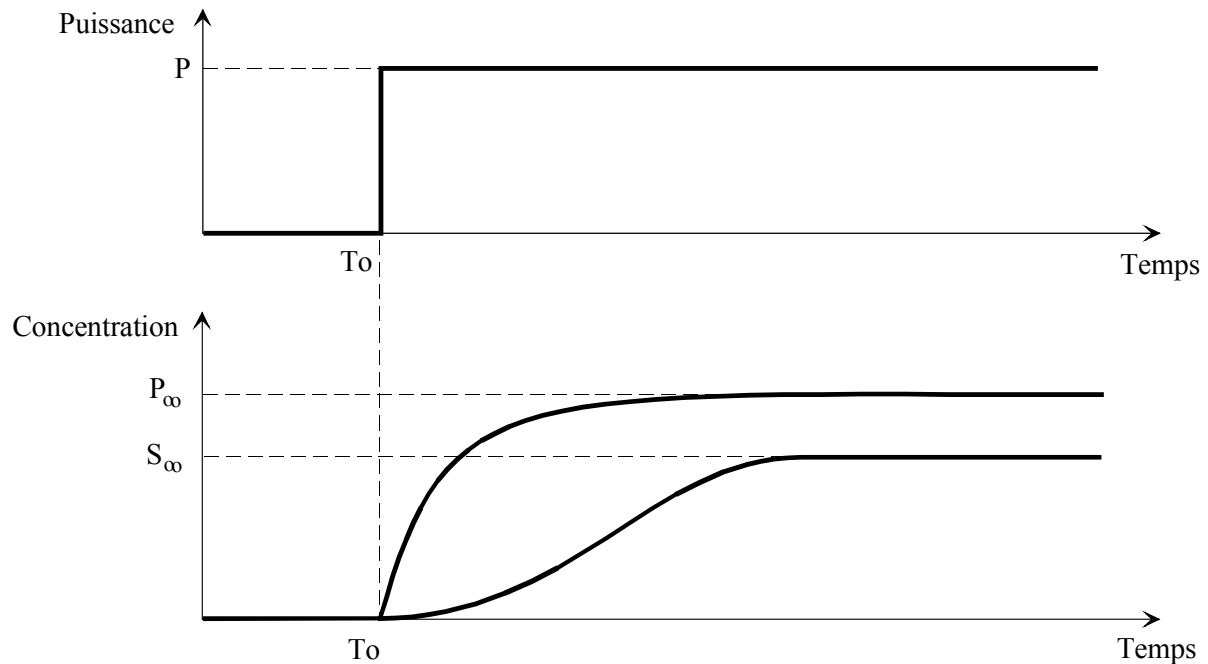
$$\frac{dS}{dt} = \lambda_p \cdot P - S \cdot \sigma_s \cdot \Phi$$

### 2.3. Evolution du samarium dans un réacteur

Nous allons suivre la variation de la concentration en samarium pour des cas identiques à ceux du xénon :

1. démarrage du réacteur, chargement neuf
2. arrêt du réacteur après un fonctionnement prolongé

➤ Démarrage du réacteur, cœur neuf.



Comme nous l'avons fait pour le xénon, nous écrivons qu'à l'équilibre le terme de variation est nul, afin d'obtenir les concentrations "à l'infini".

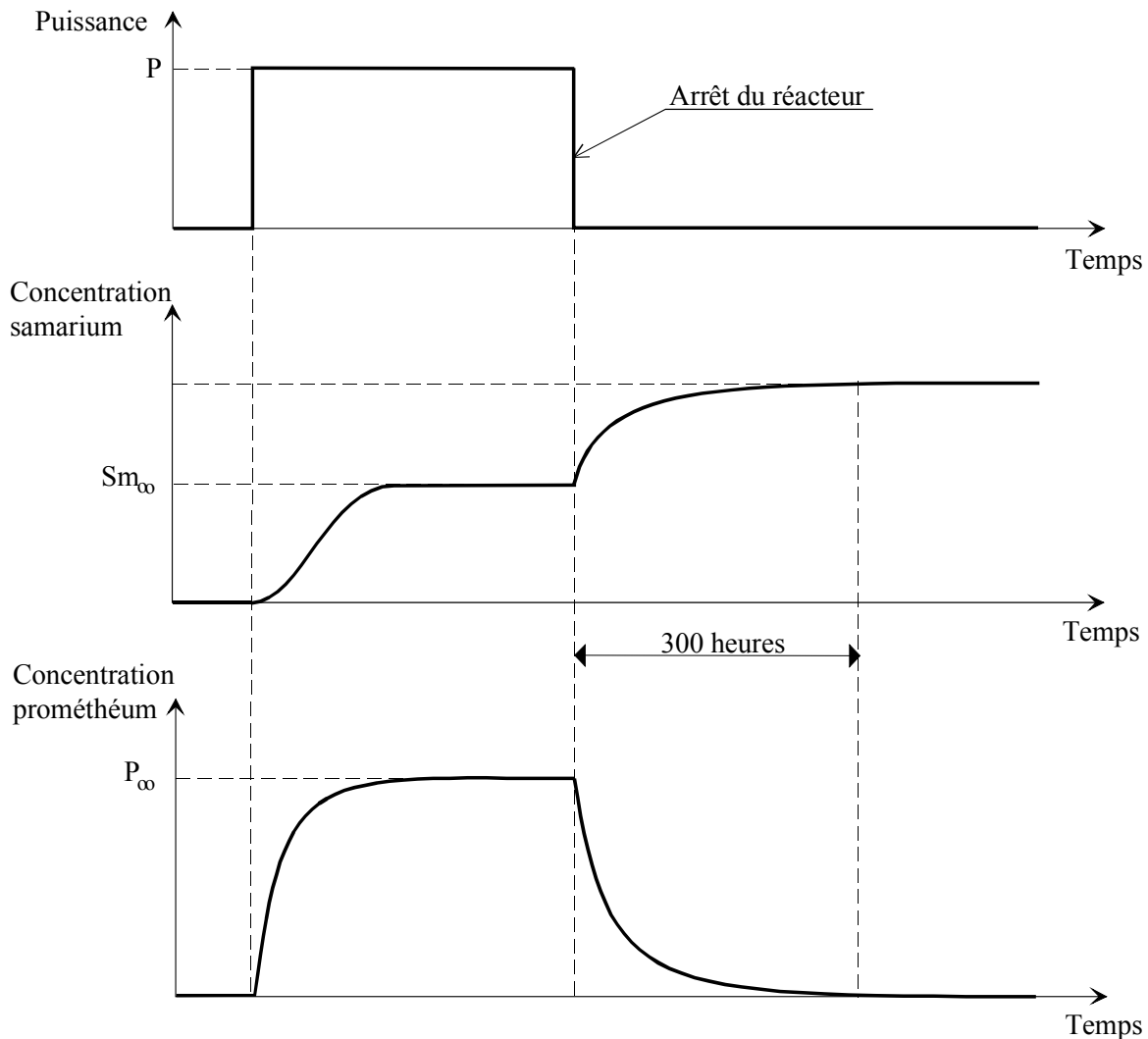
Nous obtenons, après simplification :

➤ Pour le **samarium** 
$$S_{\infty} = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f}{\sigma_s}$$

➤ Pour le **prométhéum** 
$$P_{\infty} = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_p}$$

Contrairement au xénon, la concentration en **samarium ne dépend pas du flux**. L'effet de l'empoisonnement dû au samarium est de l'ordre de 500 pcm à 800 pcm d'antiréactivité, à comparer à celui du xénon, qui est en moyenne de 2500 pcm. En revanche, la concentration en **prométhéum** est fonction de l'**historique de puissance**.

➤ **arrêt du réacteur après un fonctionnement prolongé**



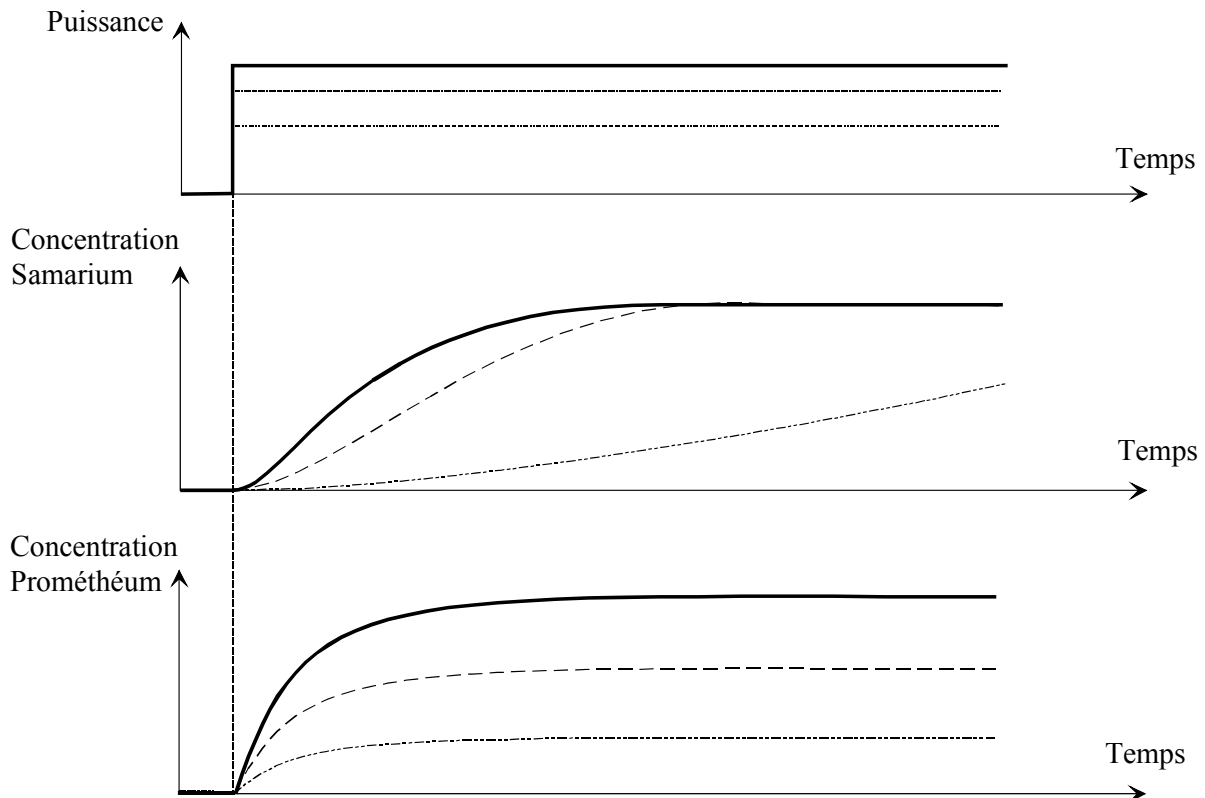
Lorsque nous procédons à l'arrêt du réacteur, la disparition du samarium devient nulle (élément stable), la capture neutronique s'est, elle aussi, arrêtée. Par contre, l'apparition du samarium est entretenue par la décroissance radioactive du prométhéum. Nous observons donc une montée de la concentration en samarium jusqu'à l'épuisement du prométhéum. L'effet de l'empoisonnement dû à l'augmentation de la concentration en samarium après arrêt est **de l'ordre de 1500 pcm**. Il dépend de l'historique de puissance (réserve de prométhéum).

La concentration en samarium revient à sa valeur d'équilibre si nous divergeons le réacteur, et ceci plus ou moins rapidement suivant le niveau de puissance extraite. L'empoisonnement en samarium est définitif, mais **il n'est pas cumulatif**, c'est à dire que le samarium ne s'accumule pas à chaque arrêt du réacteur.

## 2.4. Exemples de variations de l'empoisonnement.

L'observation des courbes nous confirme la non-dépendance de la concentration du samarium vis-à-vis du flux. Cependant, plus la puissance du réacteur est importante, plus le régime d'équilibre est atteint rapidement.

Pour un flux de l'ordre de  $10^{14}$  n / cm<sup>2</sup>.s, l'équilibre en samarium est atteint en 400 heures, alors que pour un flux de l'ordre de  $10^{12}$  n / cm<sup>2</sup>.s, il est atteint en 60 jours environ.



Comme nous l'avons vu pour le xénon, la remise en route d'un réacteur, resté en arrêt prolongé, provoque la **disparition brutale du samarium**, contribuant à une hausse de la réactivité du cœur, dont il faut être conscient pour le contrôle du réacteur. Cependant la disparition du samarium ne s'accompagne pas d'une remontée trop rapide de la réactivité, l'empoisonnement étant plus limité et la section de capture plus faible. Le dimensionnement de la vitesse de descente des mécanismes, établie sur la base du pic xénon, est donc suffisant.

Pour le bilan de réactivité, la teneur en samarium, calculée en continu par le contrôle commande, varie peu d'un jour sur l'autre si le régime de puissance varie peu.

## Conclusion

L'antiréactivité samarium après arrêt du réacteur est environ dix fois plus faible que celle du xénon, et n'est donc pas gênante tant qu'elle reste inférieure à la réserve de réactivité nécessaire pour compenser l'antiréactivité xénon à l'équilibre.

Un combustible irradié n'est que momentanément empoisonné par le xénon, mais l'est définitivement par le samarium. Dans certains réacteurs à haut flux, le prométhéum étant formé en grande quantité, l'empoisonnement est alors élevé à l'arrêt prolongé, rendant pratiquement impossible toute redivergence. On a recours alors à un arrêt progressif pour consommer le prométhéum avant l'arrêt (exemple du LIL de Grenoble).

Pour les **réacteurs à neutrons rapides**, il n'y a pas d'effets d'empoisonnement xénon et samarium car les résonances d'absorption de ces poisons sont situées dans le domaine thermique.

Il existe d'autres produits de fission qui peuvent être considérés comme des poisons, sachant que leurs effets sont faibles par rapport à ceux du xénon 135 et du samarium 149. Les poisons radioactifs sont traités comme le xénon 135, et les poisons stables comme le samarium 149.

On trouve par exemple les samarium 151, néodyme 143, gadolinium 155, rhodium 103, xénon 131...



## Questions à approfondir :

Origine des poisons xénon et samarium, caractéristiques neutroniques.

Connaître les chaînes d'évolution du xénon 135 et du samarium 149.

Savoir établir les équations bilan à partir des chaînes d'évolution.

Etablir les concentrations "infinies" en xénon et samarium.

Connaître les ordres de grandeur des empoisonnements, et les délais de formation selon le niveau de puissance.

Expliquer l'influence de l'historique de puissance sur les empoisonnements (marche et arrêt) et les délais d'apparition (xénon et samarium)

Expliquer les problèmes que rencontre l'opérateur du fait des variations de réactivité dans les heures qui suivent une divergence

Expliquer les problèmes liés à une redivergence au pic xénon

Commentez les problèmes posés par une redivergence au pic xénon.

*Commenter : L'opérateur, pour suivre l'évolution de la réactivité du chargement, doit relever la position des moyens de contrôle mobiles (grappes d'absorbant) et la concentration en bore à des conditions précises de température et de pression du coloporteur. Cela doit également se faire à puissance stabilisée de référence.*

## Exercice de révision

<b>DONNEES :</b>	$\sigma_{a8} = 2,4$ barn	$\sigma_{a5} = 680$ barn
	$\sigma_{f5} = 580$ barn	$\rho_{UO_2} = 10,4$ g.cm <sup>-3</sup>
	$\nu_5 = 2,42$	$\phi = 3.10^{13}$ n.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
	$e = 3$ %	$N = 6,02.10^{23}$
	$\lambda_I = 2,93.10^{-5}$ s <sup>-1</sup>	$\gamma_I = 6,4$ %
	$\lambda_{Xe} = 2,1.10^{-5}$ s <sup>-1</sup>	$\gamma_{Xe} = 0,3$ %
	$\lambda_{Pm} = 3,5.10^{-6}$ s <sup>-1</sup>	$\gamma_{Pm} = 1,1$ %
	$\sigma_{a,Sm} = 4,1.10^4$ barns	$\sigma_{a,Xe} = 2,7.10^6$ barns

L'antiréactivité apportée par les poisons se calcule sous la forme  $\rho = -\frac{\sum_a^P}{\nu\Sigma_f}$

### ➤ Concentration des poisons de fission

Calculer  $N_{UO_2}$ ,  $N_5$ ,  $N_O$ . Expressions littérales et valeurs numériques.

Retrouver  $Xe_{\infty}$  et  $Sm_{\infty}$ . Expressions littérales et valeurs numériques.

### ➤ Empoisonnement du au samarium, cinétique de formation

A  $t = 0$  s, on démarre le réacteur ( $\phi = 3.10^{13}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>). Etablir  $S_m(t)$  par les équations bilans et calculer l'antiréactivité associée :  $\rho_m(t)$ . On suppose que les **concentrations** initiales en poisons sont **nulles** et que le Prométhéum a atteint son équilibre ( $P(t) = P_{\infty}$ ).

Quelle est l'antiréactivité due au SAMARIUM à l'équilibre ?

### ➤ Arrêt du réacteur et concentration en samarium

On arrête brusquement le réacteur ( $\phi = 0$ ) qui était à ce moment dans un état de fonctionnement prolongé ( $\phi = 3.10^{13}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>).

Etablir  $P(t)$ ,  $S_m(t)$ , l'antiréactivité associée  $\rho_m(t)$  et son antiréactivité limite. Tracer la **courbe d'évolution** du samarium dans ce cas précis.

➤ **Arrêt du réacteur et pic xénon**

On arrête brusquement le réacteur ( $\phi = 0$ ) qui était à ce moment dans un état de fonctionnement prolongé ( $\phi = 3.10^{13} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ).

L'équation d'évolution de la **concentration du xénon** dans le cœur du réacteur a pour **expression** (après quelques simplifications) :

$$X_e(t) = \frac{\gamma \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \times (e^{-\lambda_{Xe} \cdot t} - e^{-\lambda_I \cdot t})$$

Avec  $\gamma = \gamma_I + \gamma_{Xe}$

L'instant du pic Xénon a lieu à  $t = \frac{1}{\lambda_I - \lambda_{Xe}} \text{Ln} \left( \frac{\lambda_I}{\lambda_{Xe}} \right)$

Quelle est l'**antiréactivité limite apportée par le seul xénon** ( $t = \infty$ )?

Calculer l'**instant du pic xénon**.

Quelle est l'**antiréactivité maximale** apportée par le **xénon** à ce moment ?

Tracer la **courbe de variation** du xénon dans ce cas précis. Que devez vous en conclure sur la vitesse de mise en places moyens de contrôle de la réactivité lors d'une redivergence (descente des mécanismes, ajout éventuel de bore, etc.).