

Empoisonnement par les P.F.

1. Effets des produits de fission
2. Empoisonnement par le Xenon 135
3. Empoisonnement par le Samarium 149
4. Conséquences sur la conduite

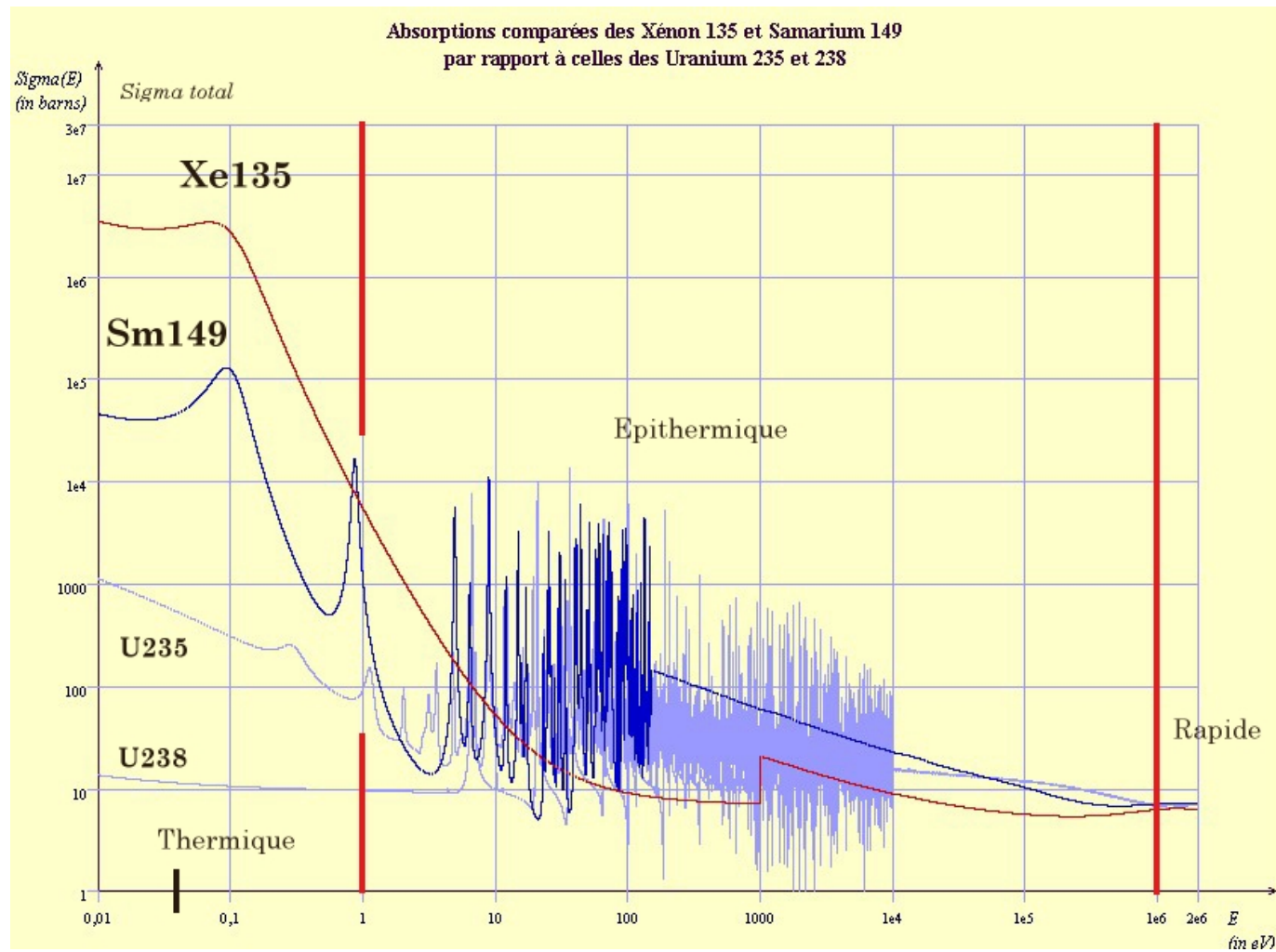
2.1. Effets des produits de fission

produits de fissions éléments plus ou moins stables

deux PF présentent des sections efficaces de capture élevées
dans le domaine thermique le **xénon 135** et le **samarium 149**

	capture [barns] à 2200 m/s
Xénon	$2,7 \cdot 10^6$
Samarium	40 000

Allure des sections de capture



Effet en réactivité des poisons (domaine thermique)

$$\text{soit : } \frac{\delta f}{f} \approx (1 - f).P$$

$$\delta \rho = \frac{\delta K_{\text{eff}}}{K_{\text{eff}}} = - \frac{f.P}{1 + L_2.B_g^2}$$

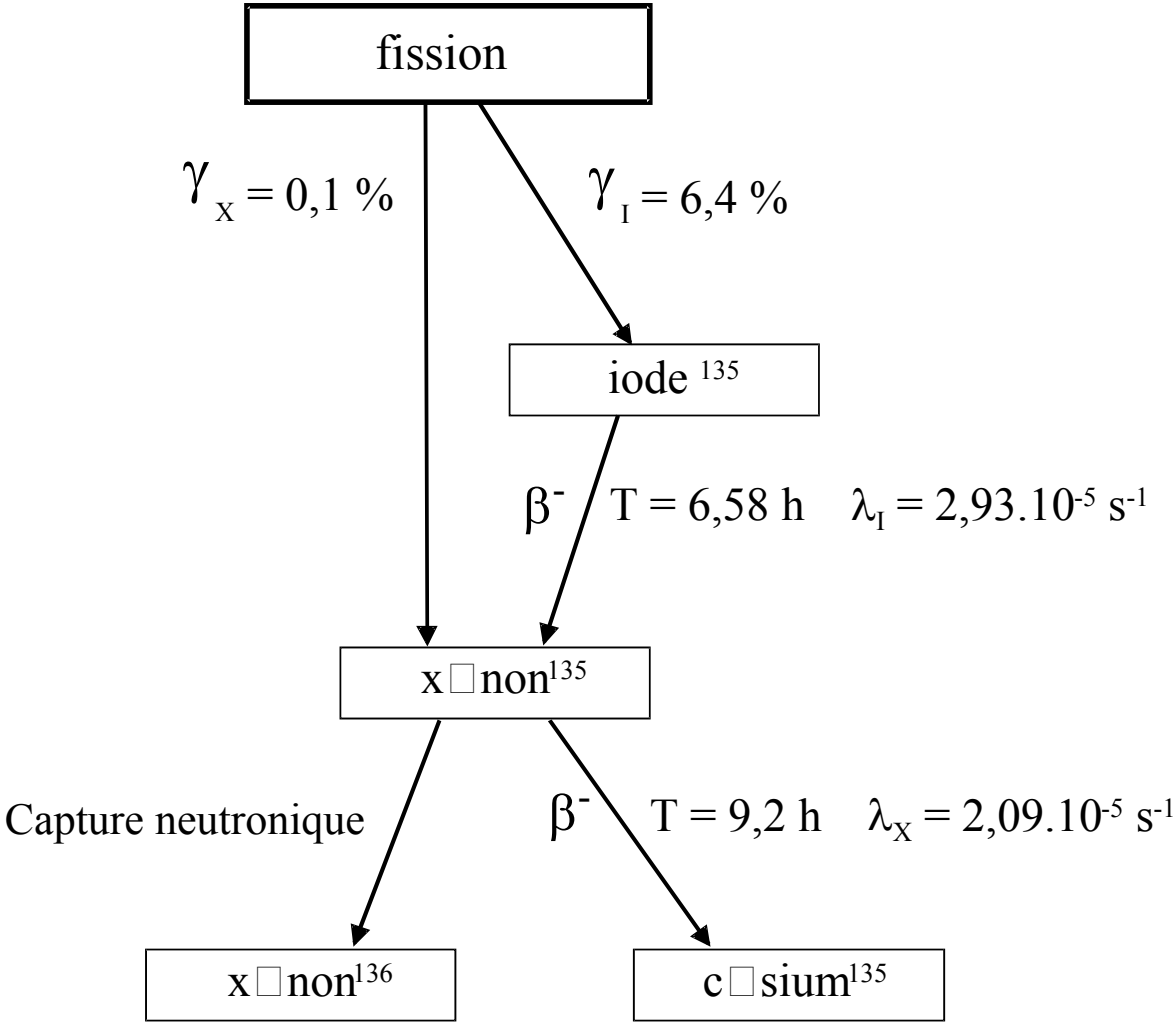
$$\delta \rho = - \frac{\Sigma_a^{P.F}}{\Sigma_a^u + \Sigma_a^m + D.B_g^2} \leq 0$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{\nu.\Sigma_f}{\Sigma_a^u + \Sigma_a^m + D.B_g^2} \approx 1$$

$$\text{donc : } \Sigma_a^u + \Sigma_a^m + D.B_g^2 \approx \nu.\Sigma_f$$

$$\delta \rho = - \frac{\Sigma_a^{P.F}}{\nu.\Sigma_f} \leq 0$$

2.2 Empoisonnement du cœur par le xénon



Equation d'évolution du xénon 135

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

$$\boxed{dI/dt} = \boxed{\gamma_I \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi} - \boxed{\lambda_I \cdot I}$$

$$\boxed{dX/dt} = \boxed{\gamma_X \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi + \lambda_I \cdot I} - \boxed{(\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi) \cdot X}$$

Résolution générale à flux constant

$$I(t) = \frac{\gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_I} \left[1 + \frac{\lambda_I \cdot I(0) - \gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi} \cdot e^{-\lambda_I t} \right]$$
$$X(t) = X(0) \cdot e^{-(\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi) \cdot t} + \frac{(\gamma_X + \gamma_I) \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi} \cdot \left[1 - e^{-(\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi) \cdot t} \right]$$
$$+ \frac{\lambda_I \cdot I(0) - \gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_X - \lambda_I + \sigma_X \cdot \Phi} \cdot \left[e^{-\lambda_I t} - e^{-(\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi) \cdot t} \right]$$

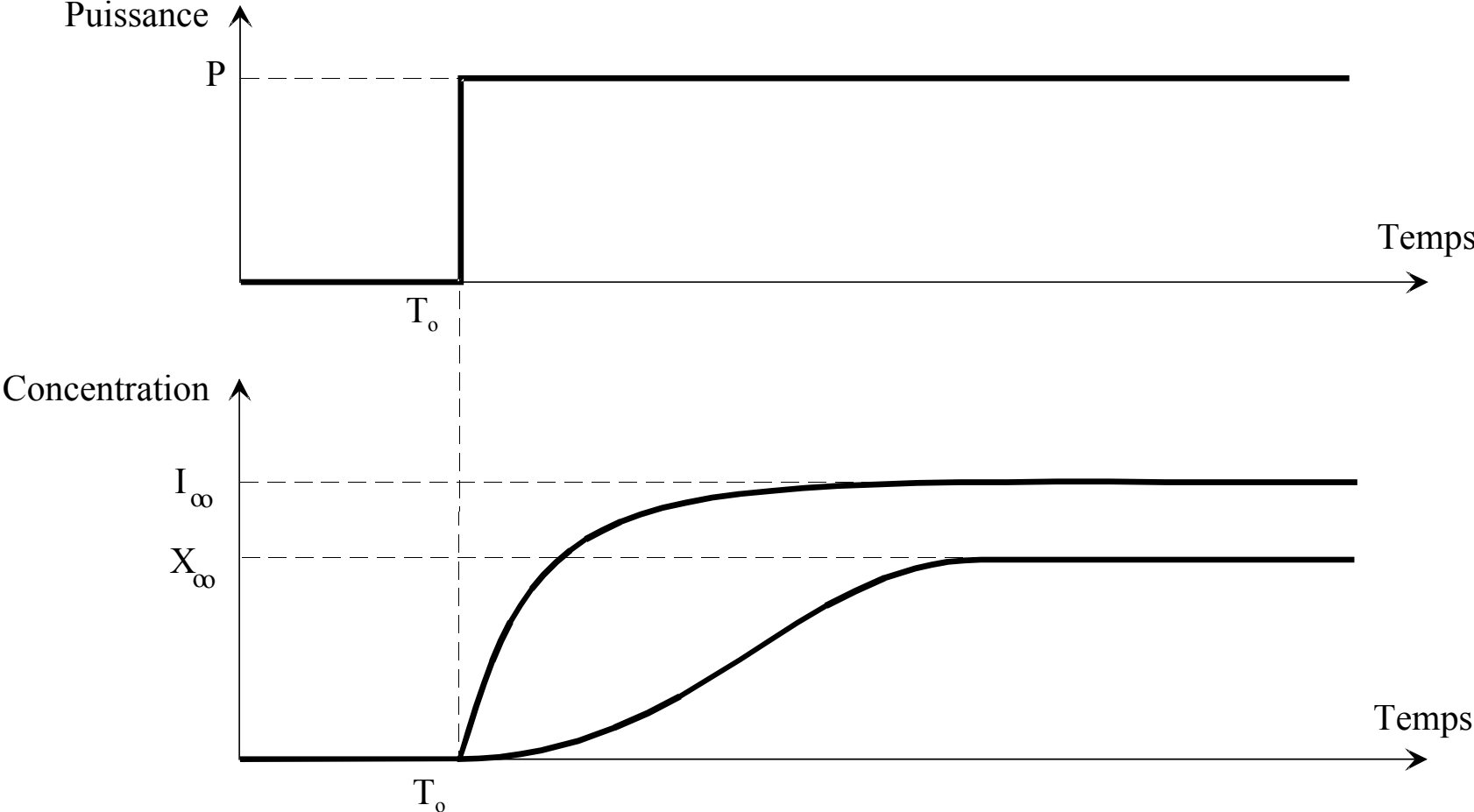
Evolution du xénon dans un réacteur

situations particulières

- **démarrage** du réacteur après un **arrêt prolongé**
- **arrêt** du réacteur après un **fonctionnement prolongé**
- **démarrage** du réacteur au "**pic xénon**"

On suppose que le réacteur est "neuf", sans xénon et sans iode.

Démarrage du réacteur après un arrêt prolongé



équilibre atteint au bout de quelques dizaines d'heures

$$\left(\gamma_I N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi\right) - \left(\lambda_I \cdot I_\infty\right) = 0$$

$$I_\infty = \frac{\gamma_I N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_I}$$

$$\left(\gamma_X \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi\right) + \left(\lambda_I \cdot I_\infty - \lambda_X \cdot X_\infty\right) - \left(\sigma_X \cdot \Phi \cdot X_\infty\right) = 0$$

$$X_\infty = \frac{\left(\gamma_X + \gamma_I\right) N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_X + \sigma_X \cdot \Phi}$$

flux faible : $\sigma_x \cdot \Phi$ négligeable devant λ_x $\Phi \leq 10^{12}$ neutrons / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$

$$X_\infty = \frac{(\gamma_X + \gamma_I) \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_x}$$

flux fort : λ_x négligeable devant $\sigma_x \cdot \Phi$ $\Phi \geq 10^{14}$ neutrons / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$

$$X_\infty = \frac{(\gamma_X + \gamma_I) \cdot N_f \cdot \sigma_f}{\sigma_x}$$

$$\rho = -\frac{\Sigma_a^X}{\nu \cdot \Sigma_f} = -\frac{X_\infty \cdot \sigma_x}{\nu \cdot N_f \cdot \sigma_f}$$

$$\rho = -\frac{(\gamma_I + \gamma_X)}{\nu}$$

U5 $\rho = - 2700$ pcm .

	Antiréactivité due au X_{∞}
REP type EDF	2800 pcm
Réacteur à Eau Lourde	2800 pcm

*dépend de la **concentration en noyaux fissiles**
augmente avec l'enrichissement*

***temps** pour rejoindre valeur à l'équilibre
d'autant plus faible que le **flux est élevé***

Temps de stabilisation et de montée du xénon

flux de 10^{13} neutrons/cm ² .s	équilibre atteint en 52 heures
flux de 5.10^{13} neutrons/cm ² .s	équilibre atteint en 35 heures
flux de 10^{14} neutrons/cm ² .s	équilibre atteint en 30 heures

Arrêt du réacteur après un fonctionnement prolongé

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = -\lambda_I I \\ \frac{dX}{dt} = \lambda_I I - \lambda_X X \end{cases}$$

$$I(t) = I_{\infty} e^{-\lambda_I t}$$

$$X(t) = X_{\infty} e^{-\lambda_X t} + \frac{\lambda_I}{\lambda_I - \lambda_X} I_{\infty} (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})$$

1° cas : $\lambda_I \cdot I_\infty \geq \lambda_X \cdot X_\infty$ c'est-à-dire : $\frac{dX}{dt}(t=0) \geq 0$

ce qui correspond à un flux avant arrêt :

$$\Phi \geq \lambda_X \cdot \frac{\gamma_X}{\gamma_I} \cdot \frac{1}{\sigma_X}$$

soit : $\Phi \geq 10^{11}$ neutrons / cm² s.

*La concentration en xénon commence par **croître***

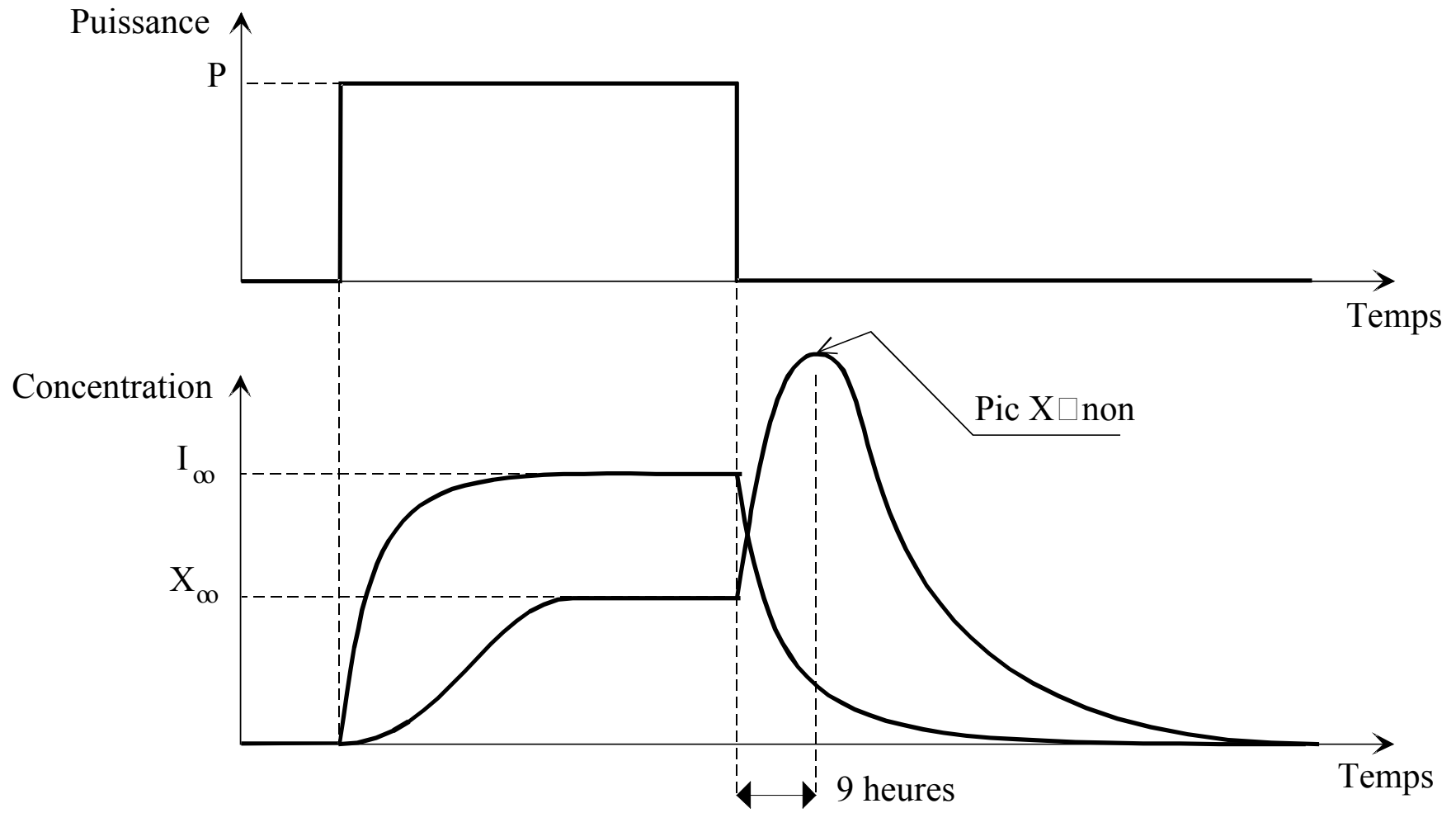
car sa formation par décroissance de l'iode l'emporte

sur sa disparition par décroissance

ceci jusqu'à un **maximum** atteint **au bout de quelques heures**

$$\lambda_I \cdot I = \lambda_X \cdot X$$

C'est le pic xénon

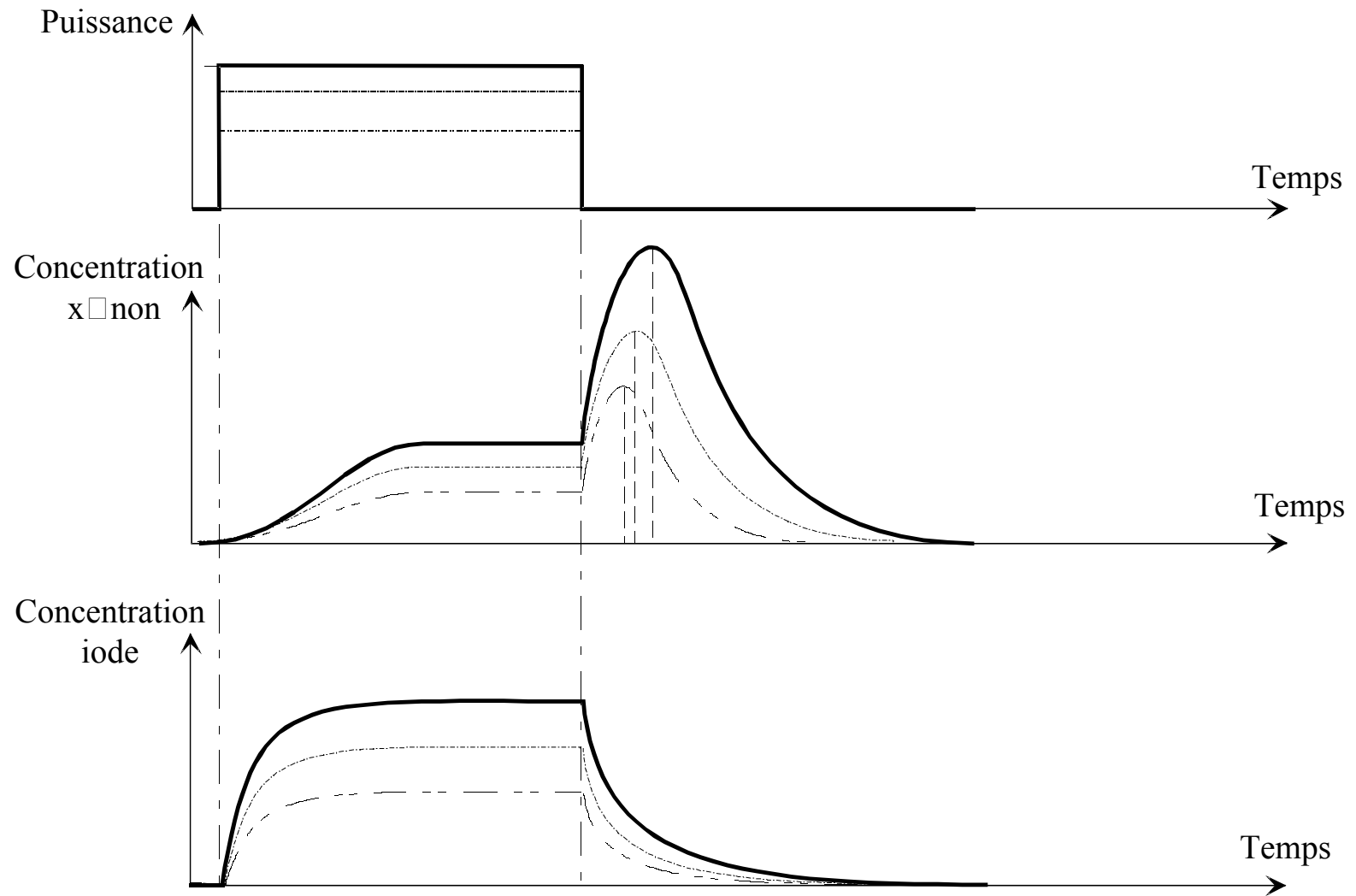


Apparition du "pic Xénon" au bout de 8 à 10 heures

Ordres de grandeur de l'antiréactivité due au pic xénon

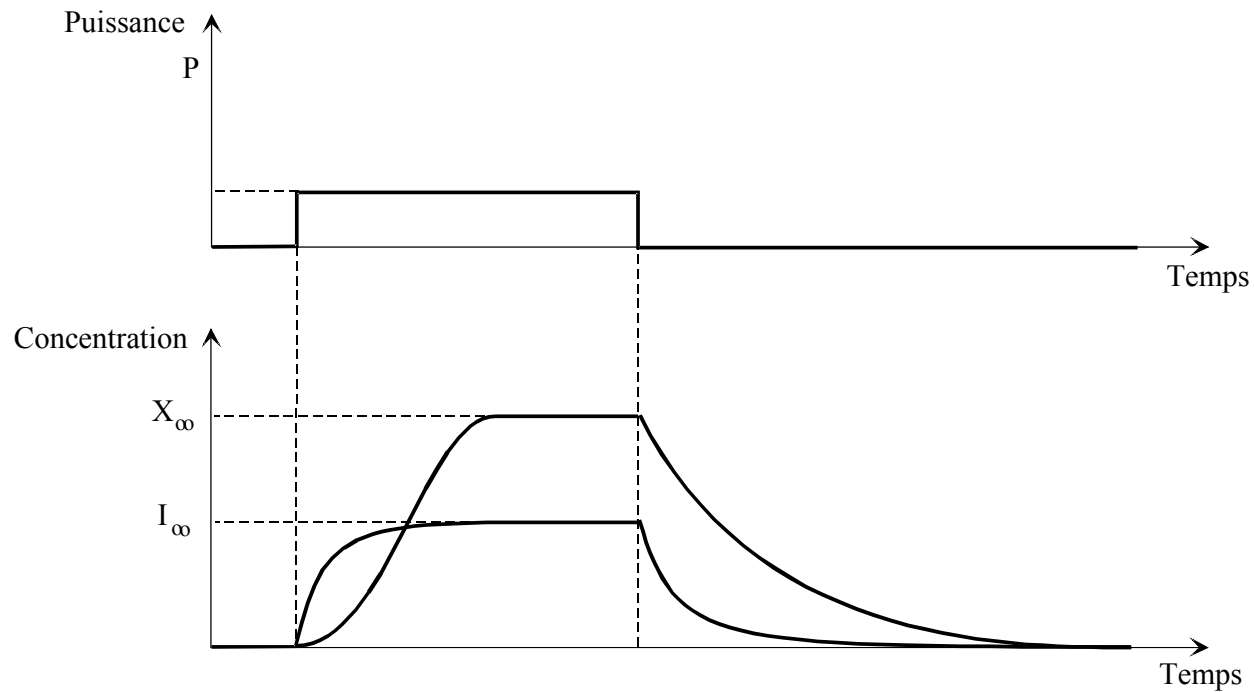
	Antiréactivité pic xénon
REP type EDF	5200 pcm
Réacteur à Eau Lourde	10000 pcm

- valeur du pic xénon fonction du flux avant arrêt
 - à puissance donnée, pic d'autant plus élevé que le cœur est usé
 - d'autant plus tard que le flux avant arrêt était élevé
- flux de 10^{13} neutrons/cm².s pic 7 heures après l'arrêt,*
- flux de $5 \cdot 10^{13}$ neutrons/cm².s pic 9 heures après l'arrêt*
- flux de 10^{14} neutrons/cm².s pic 10 heures après l'arrêt*

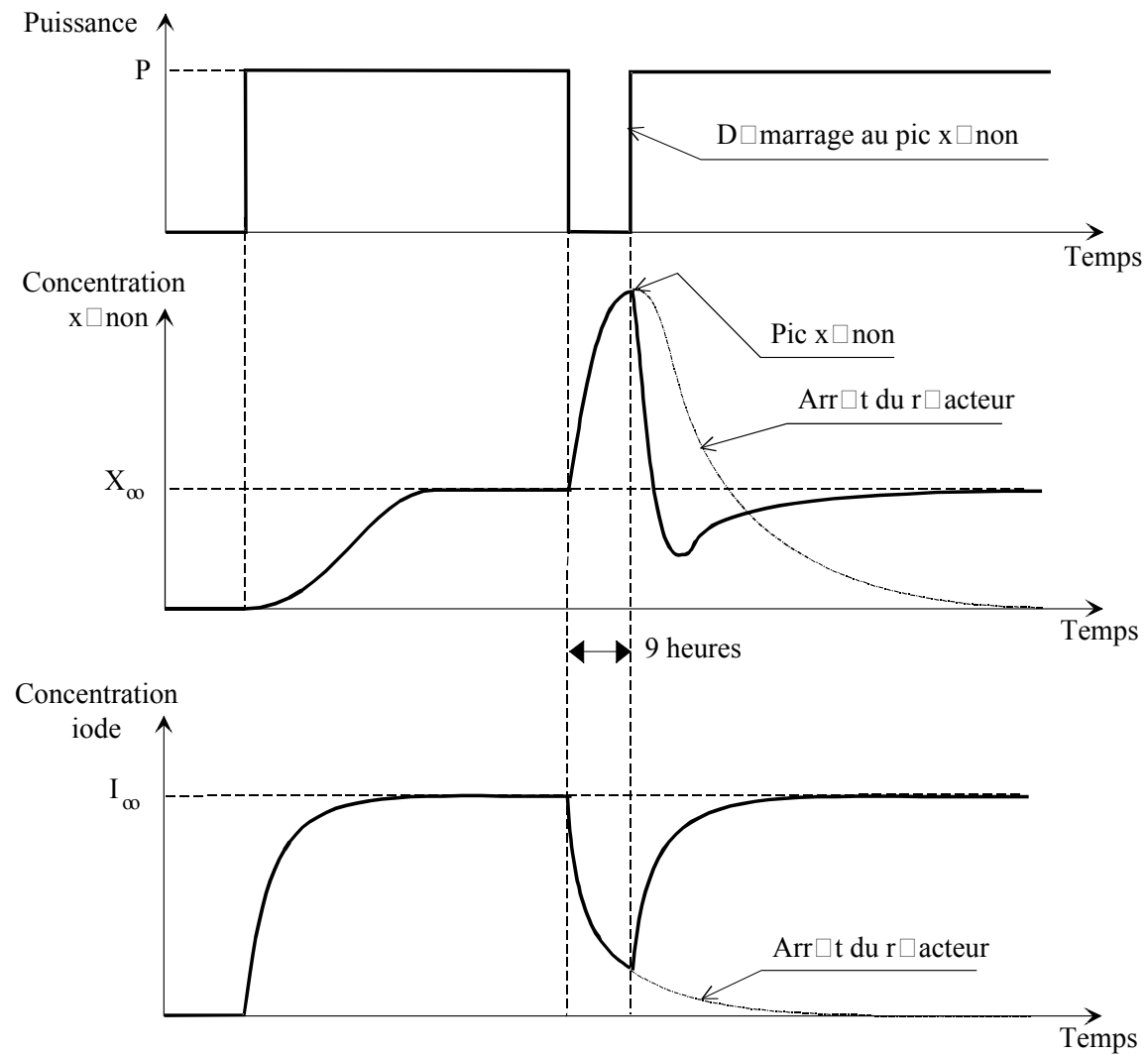


2° cas : $\lambda_I I_\infty \leq \lambda_X X_\infty$, c'est-à-dire : $\frac{dX}{dt}(t=0) \leq 0$

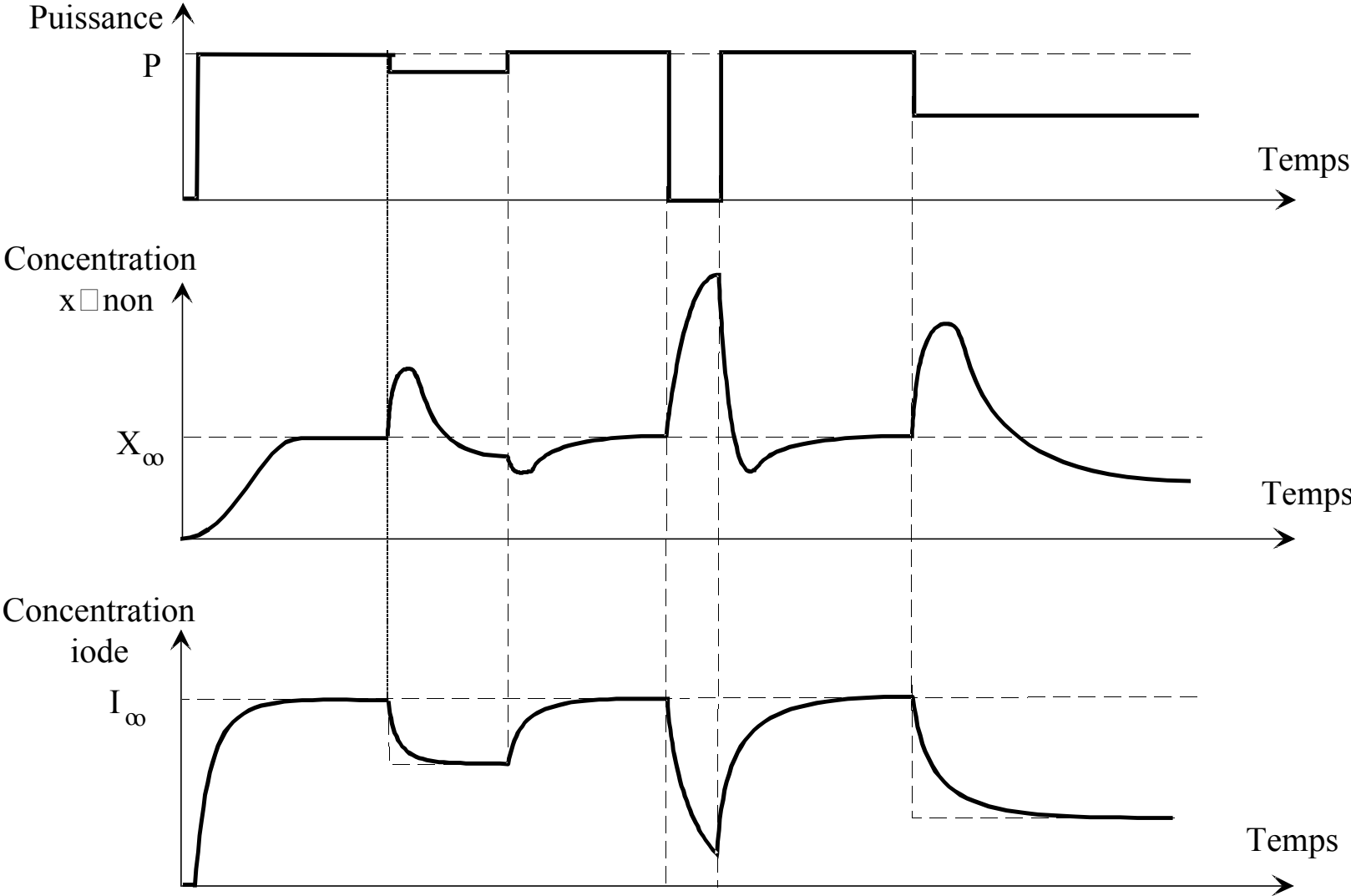
flux avant arrêt : $\Phi \leq \lambda_X \frac{\gamma_X}{\gamma_I} \frac{1}{\sigma_X}$ $\Phi \leq 10^{11}$ neutrons/cm²s.



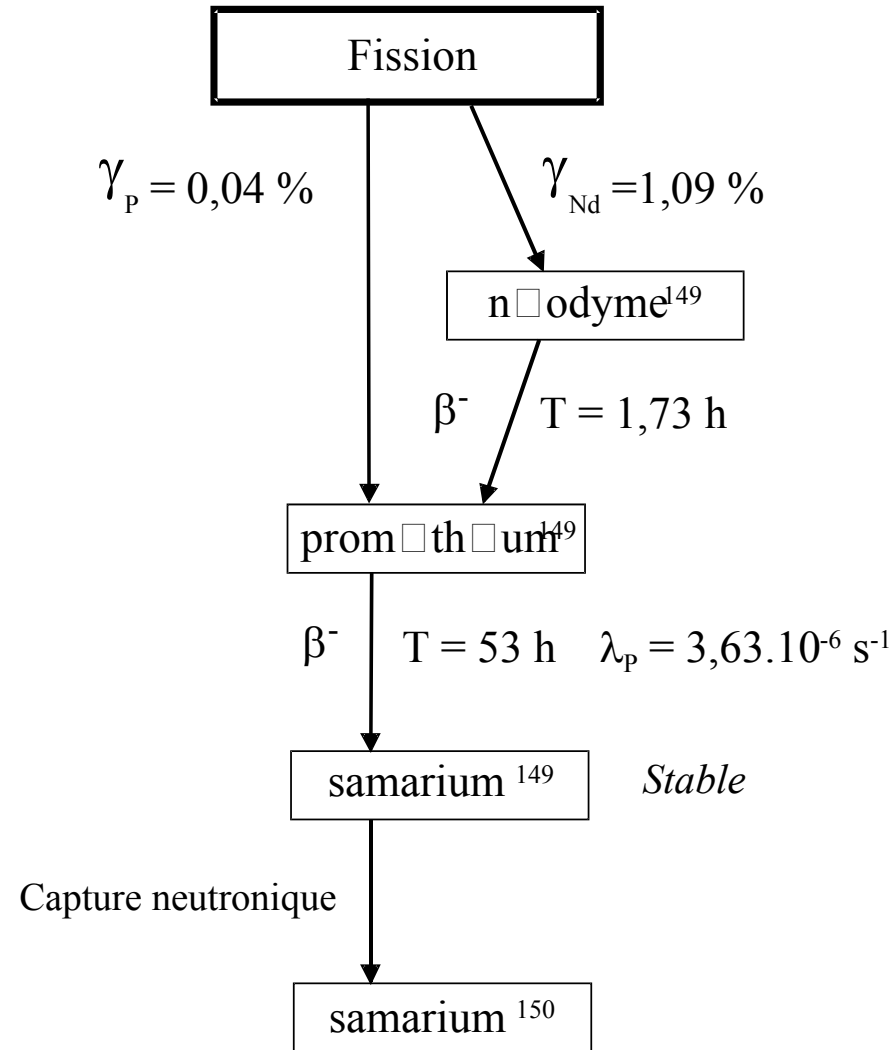
Redémarrage du réacteur au pic xénon



Exemples de variation de l'empoisonnement



2.3 Empoisonnement par le samarium 149



Equation d'évolution du samarium 149

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

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

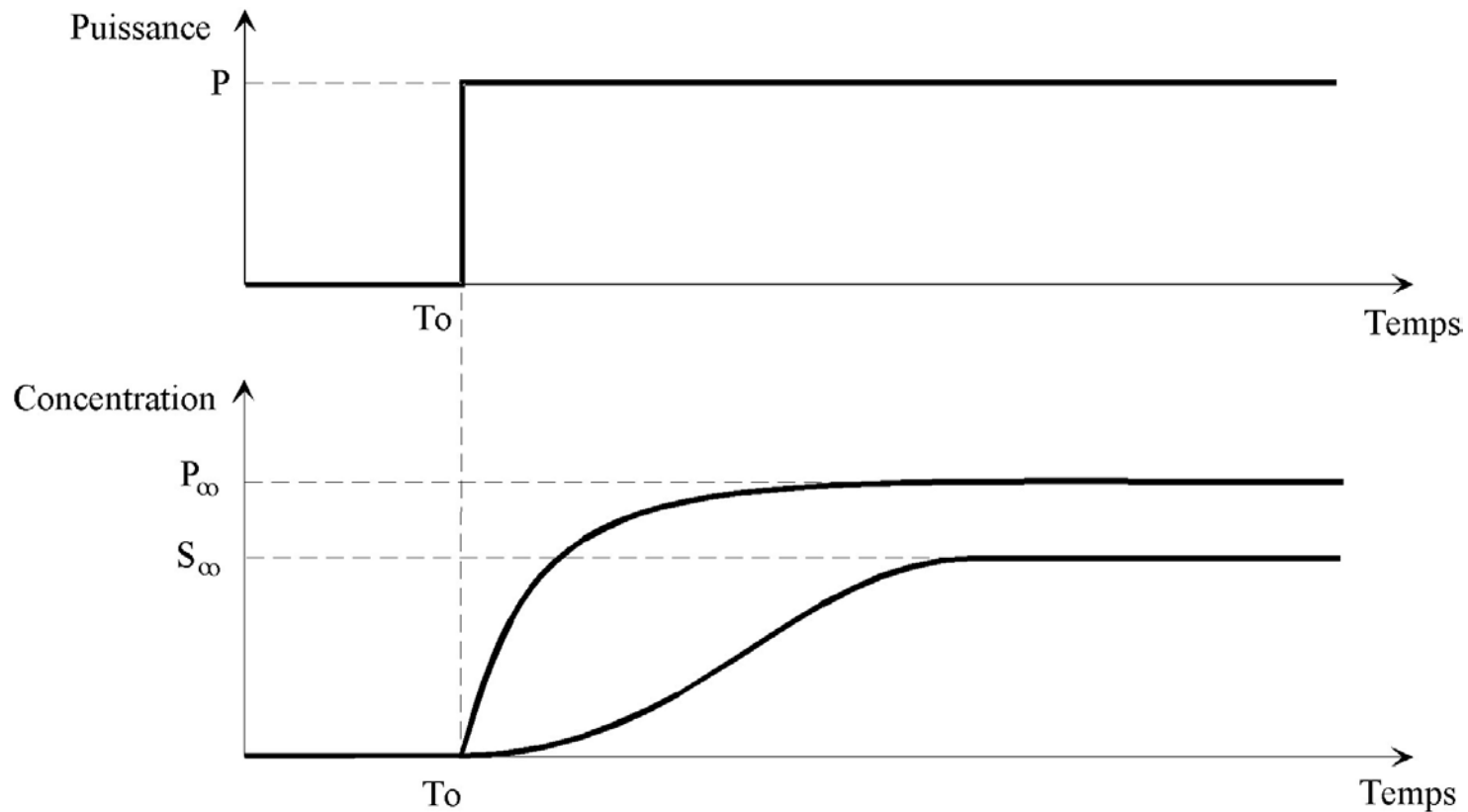
Solutions dans le cas particulier où : $P(0) = 0$ et $S(0) = 0$

$$P(t) = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_p} \cdot [1 - e^{-\lambda_p t}]$$

$$S(t) = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f}{\sigma_s} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s \cdot \Phi}{\sigma_s \cdot \Phi - \lambda_p} \cdot e^{-\lambda_p t} - e^{-\sigma_s \cdot \Phi \cdot t} + \frac{\sigma_s \cdot \Phi}{\sigma_s \cdot \Phi - \lambda_p} \cdot e^{-\sigma_s \cdot \Phi \cdot t} \right)$$

Evolution du samarium dans un réacteur

- démarrage du réacteur, cœur neuf
- arrêt du réacteur après un fonctionnement prolongé



Concentrations à l'équilibre (temps infini)

on écrit qu'à l'équilibre le terme de variation est nul

$$P_{\infty} = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f \cdot \Phi}{\lambda_P}$$

$$S_{\infty} = \frac{\gamma \cdot N_f \cdot \sigma_f}{\sigma_S}$$

Contrairement au xénon,

la concentration en samarium ne dépend pas du flux

$$\rho = - \frac{\sigma_S \cdot S_{\infty}}{\nu \cdot N_f \cdot \sigma_f}$$

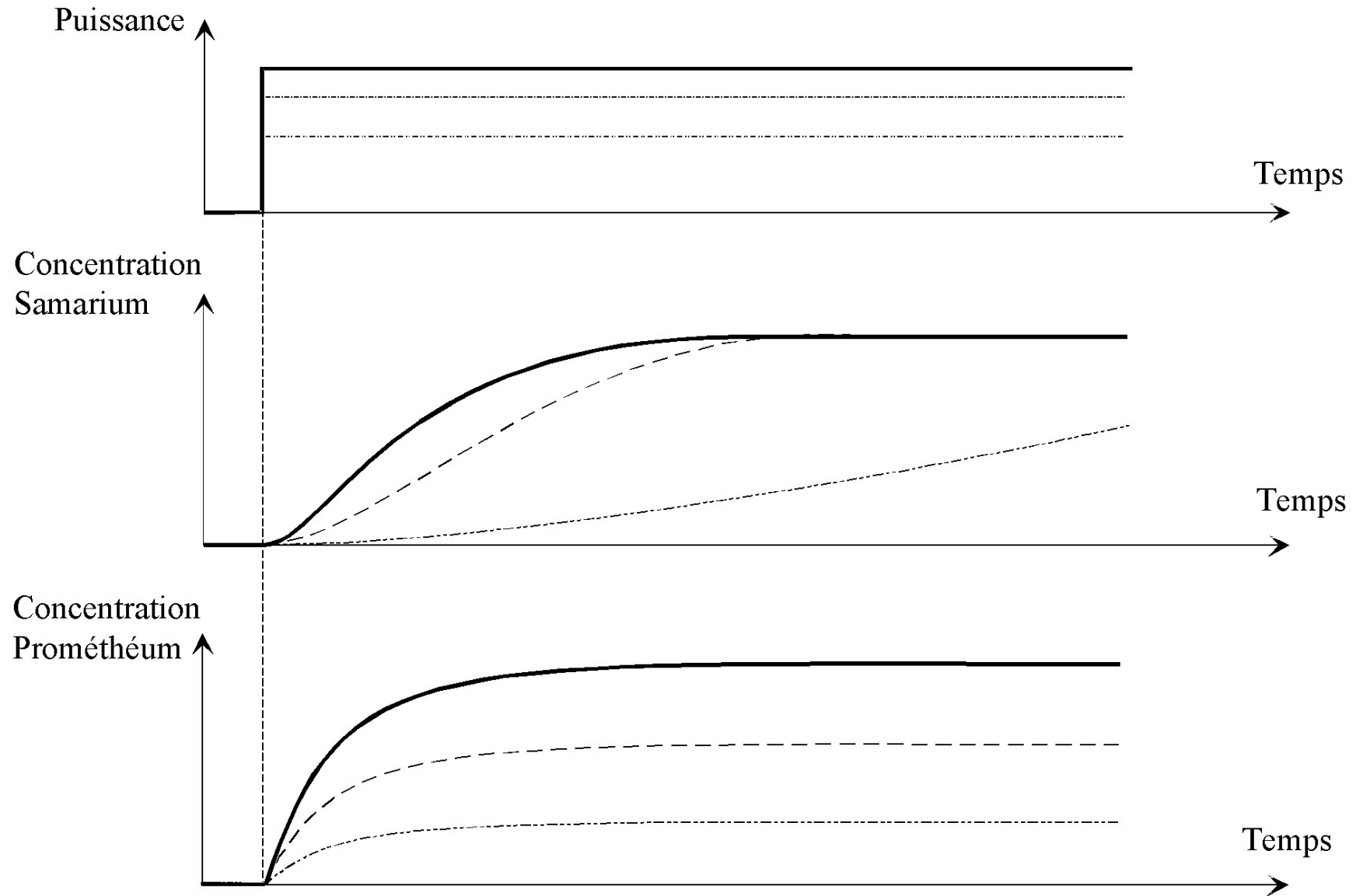
$$\rho = - \frac{\gamma}{\nu}$$

avec U235 : $\rho = - 500 \text{ pcm}$

Ordres de grandeur de l'antiréactivité à l'équilibre

	Antiréactivité due au Sm
REP	800 pcm
Réacteur à Eau Lourde	500 pcm

- pour un flux de 10^{14} neutrons/cm².s équilibre atteint en **20 jours**
- pour un flux de $5 \cdot 10^{13}$ neutrons/cm².s équilibre atteint en **53 jours**
- pour un flux de 10^{13} neutrons/cm².s équilibre atteint en **100 jours**



Arrêt du réacteur après fonctionnement prolongé

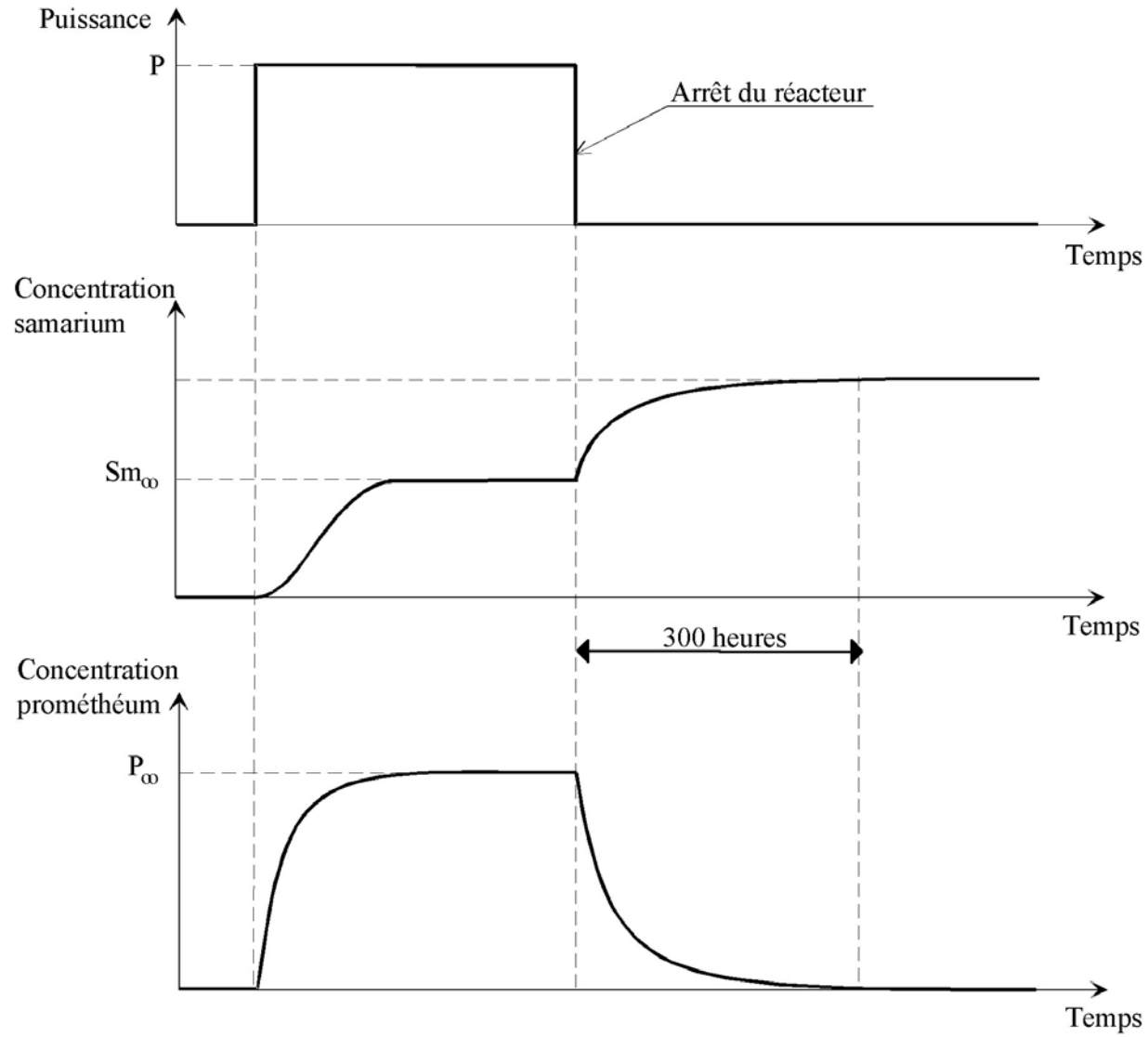
$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\lambda_p.P \\ \frac{dS}{dt} = \lambda_p.P \end{cases} \quad \text{avec pour } t = 0 : \Phi = 0, S = S_\infty \text{ et } I = I_\infty$$

$$S(t) = \frac{\gamma.N_f.\sigma_f}{\sigma_S} + \frac{\gamma.N_f.\sigma_f.\Phi}{\lambda_P} \cdot (1 - e^{-\lambda_P t})$$

$$S(t) = S_\infty + P_\infty \cdot (1 - e^{-\lambda_P t})$$

$S(t)$ croit jusqu'à $S_{\max} = S_\infty + P_\infty$

$$\rho = -\frac{S_{\max}.\sigma_S}{v.N_f.\sigma_f}$$



Ordres de grandeur de l'antiréactivité due au Sm après arrêt

	Antiréactivité (samarium) après arrêt
REP	1500 à 2000 pcm 750 pcm (RPN)
Réacteur à eau lourde	1500 pcm

2.4 Empoisonnement et pilotage du réacteur

variation de puissance l'empoisonnement varie vite

- l'opérateur ou le contrôle commande doivent sans arrêt compenser par les croix les variations de ρ
maintenir les conditions thermodynamiques de consigne

reprise au pic xénon, c'est là ou ρ varie le plus vite

- la vitesse d'injection du bore ou la descente des absorbants pour suivre la criticité doit maintenir la criticité

Bilans de réactivité permanents

Pour les mesures se ramener aux **conditions de référence**

empoisonnement stabilisé T_m et P de consigne

pour comparer les évolutions (*borications, essais périodiques*)

Le xénon et le samarium ne sont pas mesurables...

ils sont **calculés en permanence** par le contrôle commande pour que l'opérateur fasse son **bilan de réactivité**

Protection par surpuissance neutronique

Facteur de point chaud neutronique

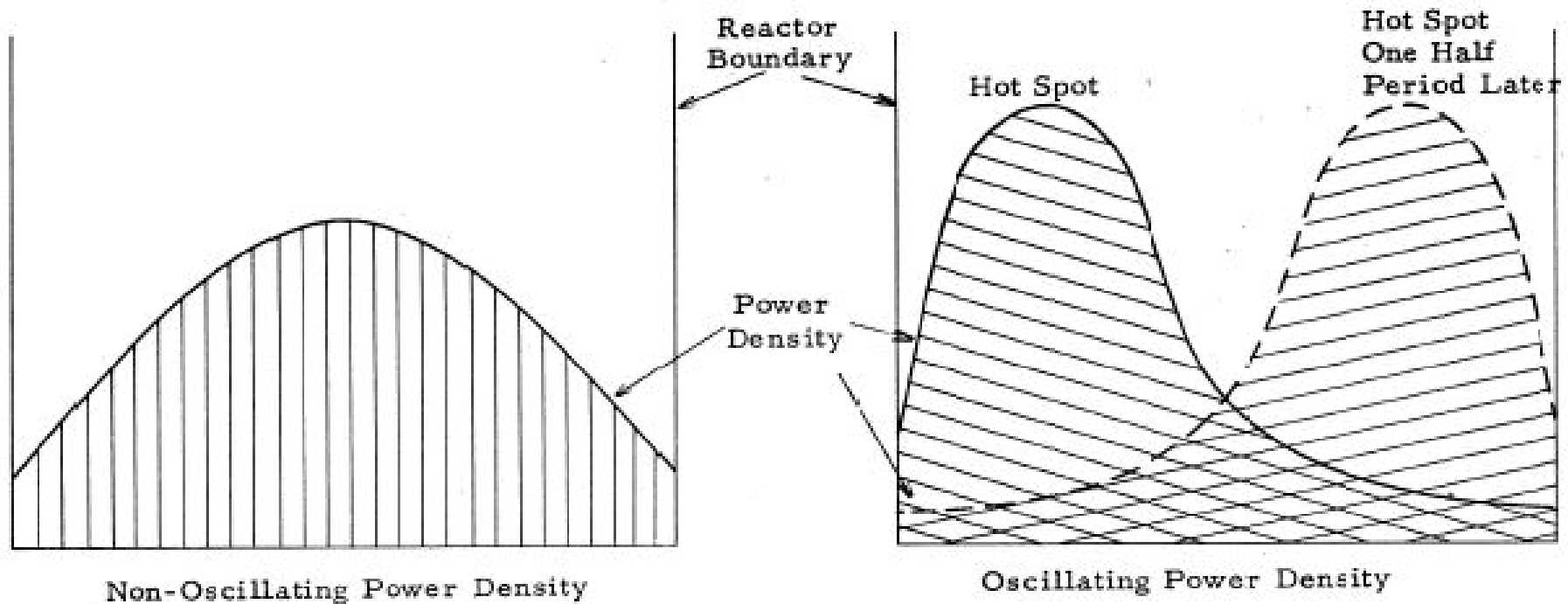
Problème des oscillations xénon dans les grands cœurs...

*insertion partielle d'un rideau de grappes
limitée en partie supérieure*

*variation des empoisonnements xénon
et variations de flux.*

variations cycliques de la réactivité locale ...

Consignes de pilotage et suivi de l'axial offset...



***Oscillations entretenues
conduisant à des pics de flux périodiques (30 heures)***

axial Offset

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



corrélation entre FQ et l'Axial Offset

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),

domaine limité de fonctionnement

