Cinétique des neutrons

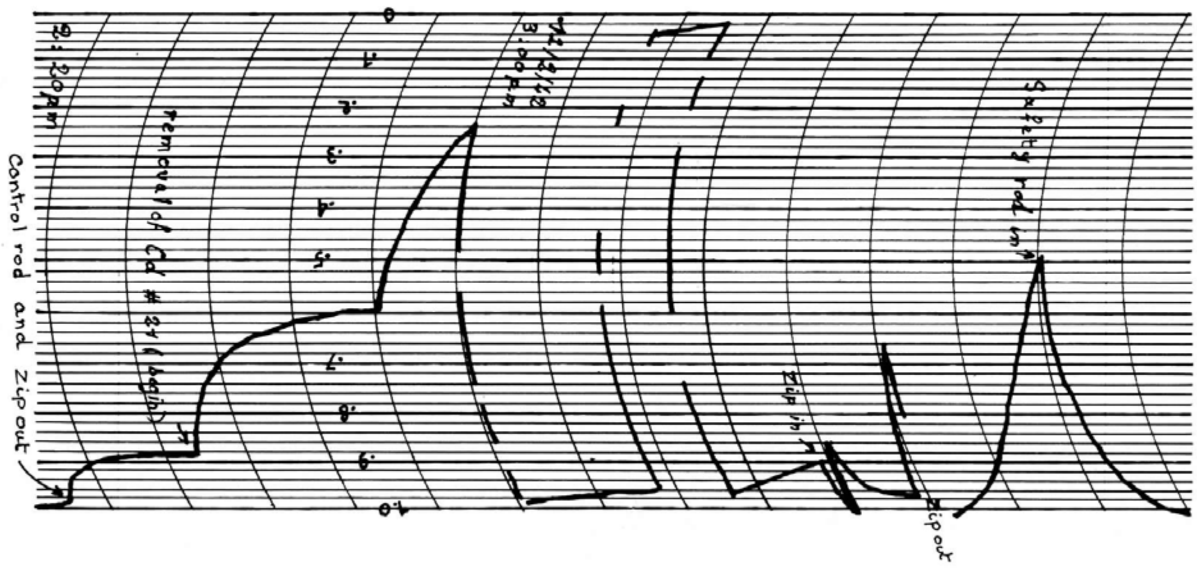
La durée de vie très faible d'un neutron, l'existence de neutrons retardés produits 10 secondes après la fission, les écarts très petits autour de la criticité, tout impose une étude cinétique précise de renouvellement des populations neutroniques.

Introduction

La concurrence entre les productions, par source ou par fission, et les disparitions par absorption ou fuite, entraîne un **coefficient multiplicateur effectif** de renouvellement des générations, et conditionne l'évolution de la densité de neutrons de manière plus ou moins rapide.

La population neutronique pilotant directement la puissance fournie par les taux de réaction de fission, la cinétique des neutrons est donc d'une importance capitale pour la **sûreté** et **l'exploitation** du réacteur. Nous allons voir qu'en cinétique, les neutrons retardés, même générés en faible quantité, ont une importance capitale pour le pilotage de la réaction en chaîne.

Cette cinétique avait déjà été envisagée dès les premiers calculs, et expérimentée dans le premier réacteur CP1 de Fermi comme le dessin ci-dessous le montre.



Enregistrement de la première divergence du réacteur CP1 (Chicago Pile n° 1)
le mercredi 2 décembre 1942.

Cette figure illustre la première divergence de la pile CP1. L'objectif de ce chapitre est de pouvoir comprendre l'évolution progressive de la population neutronique au fur et à mesure de l'extraction des "barres" d'absorbant (control rod), et l'effet des "barres de sécurité" (safety rod). Document Fermi, 1942.

1. Populations de neutrons

On distingue deux moyens de générer les neutrons :

(1) les **sources** comme la réaction ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}(\alpha,\mathrm{n})\,{}^{12}_{6}\mathrm{C}$ découverte par Chadwick et toujours exploitée, et

(2) les neutrons générés par les **fissions**. Dans ce dernier cas, deux populations pourraient-être envisagées : les **neutrons prompts**, émis dans les 10^{-12} secondes après la formation du noyau composé par l'absorption du neutron incident, et les **neutrons retardés**, émis par désintégration de certains produits de fission instables, appelés précurseurs.

La fraction β de neutrons retardés, même si leur énergie cinétique moyenne (400 keV) est un peu plus faible que celle des neutrons prompts (2 MeV), est de faible importance (entre 210 et 650 pcm du total des neutrons).

Rappel important : on ne peut pas distinguer un neutrons en déplacement dans la matière autrement que par son énergie cinétique. Ce qui veut bien dire que la vie d'un neutron libre est indépendante de son origine, prompte ou retardée.

1.1 Nature des précurseurs

Lors d'une fission nous avons vu qu'il y avait émission d'un certain nombre de neutrons prompts et de produits de fission. Si un produit de fission se désactive en émettant encore un neutron (retardé), on dira que c'est un **précurseur**.

Cette évolution radioactive des précurseurs ne donne naissance qu'à un (et un seul) neutron. **Un précurseur est donc un noyau radioactif** ; il possède ainsi une **constante radioactive** de **décroissance notée λ.**

On distingue en fait **six groupes de neutrons retardés**, mais il est d'usage de les grouper en **un seul groupe "moyen" de neutrons retardés** qui rend compte assez correctement de leur influence.

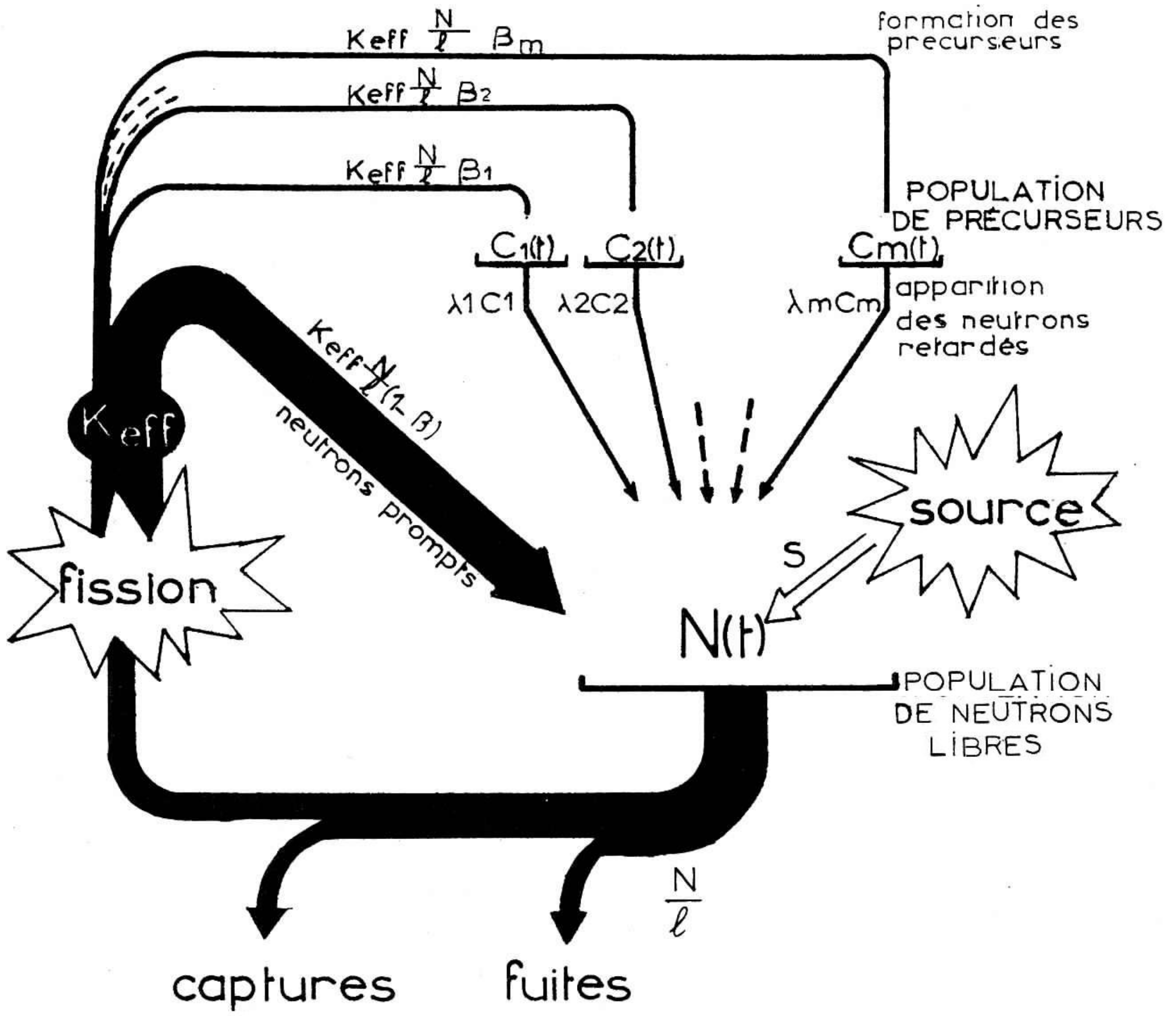
1.2 Pourcentage de neutrons retardés : le β

Le coefficient moyen β est défini comme étant le rapport des neutrons retardés sur le total des neutrons émis.

Donc, pour une fission, on aura en moyenne $\nu\beta$ précurseurs (donc $\nu\beta$ neutrons retardés émis ultérieurement) et $\nu(1-\beta)$ neutrons prompts émis dans un délai très court après la fission.

Ceci peut être résumé par le bilan présenté page suivante.

On retiendra donc deux paramètres essentiels : la durée de vie 10 secondes, et la fraction β de neutrons retardés (de l'ordre de 650 pour cent mille pour l'uranium 235).



1.3 Bilan de la population neutronique

L'équilibre neutronique, ou l'écart à la criticité, traduit par le coefficient de multiplication effectif K_{eff}, est obtenu par les effets des fuites ou des captures (fertiles et stériles)

Les neutrons sont produits par fission, ou augmentés par un terme source "extérieure". La fraction de neutrons retardés (en plusieurs groupes correspondant à des durée de vie des P.F. entre 0,2 et 55 secondes) est libérée progressivement et contribue à la population neutronique plus lentement.

Comme il dépend du noyau fissionné, le β dépend du combustible adopté.
Retenons les deux principaux éléments suivants :

β pour l'uranium 235	=	**650 pcm**
β pour le plutonium 239	=	**210 pcm**

*De cette première remarque on conclut que **le β du cœur évolue** en fonctionnement, puisque, lorsque le combustible s'use, la proportion de plutonium (fabriqué par les captures fertiles de l'uranium 238) augmente.*

Plus un cœur est "vieux", plus son β est faible. Il est aussi évident que la présence de combustibles MOX dans un réacteur modifie ce coefficient dès le début du cycle d'exploitation et peut le ramener vers 450 pcm en moyenne.

1.4 Echelles de temps entre deux générations

Il nous faut d'abord définir deux durées associées au comportement statistique des neutrons dans le milieu : la **durée de vie**, liée à la probabilité de disparaître soit par absorption, soit par fuite ; et le **temps de génération**, délai de production d'un neutron "remplaçant".

- La **durée de vie,** notée **l,** est définie comme étant le temps moyen qui s'écoule entre l'apparition d'un neutron à l'état libre et sa disparition par fuite ou par absorption. La durée de vie correspond évidemment à la **durée d'une génération**. Les neutrons d'une même génération auront disparus pour $\Delta t = l$.

- Le **temps de génération l*** est défini comme le temps que met en moyenne un neutron pour en produire un autre. L'interprétation physique de la définition de l* est moins simple que dans le cas de la durée de vie, puisqu'un neutron produit 2 à 3 nouveaux neutrons au cours d'une fission.

Nous admettons facilement que le nombre de neutrons produits est proportionnel à la durée de vie du neutron, puisque ces évènements sont statistiques.

C'est à dire que lorsqu'un neutron vit pendant un intervalle de temps :

l* secondes → production de 1 neutron,
2 l* secondes → production de 2 neutrons,
3 l* secondes → production de 3 neutrons.

Il ne faut cependant pas confondre **durée de vie** (ou durée de génération) et **temps de génération**, que l'on pourrait appeler aussi temps de production d'un neutron qui peuvent être différents.

1.5 Expressions des durée de vie et temps de génération

Considérons une population monocinétique, à la vitesse (v). Cette approximation est valide puisque l'on cherche à ralentir les neutrons dans le domaine thermique, et que, calculs faits (voir exercices), le neutron passe environ 10^{-6} seconde rapide ou épithermique, et 10^{-4} seconde dans le domaine thermique.

La vie du neutron se termine **soit par la fuite** (probabilité de fuite P_f, ou de non-fuite P_{nf}), ou par **une absorption** par le milieu supposé homogène, et de section efficace macroscopique d'absorption variable (effets des absorbants mobiles par exemple).

Il en ressort un libre parcours moyen d'absorption, que le neutron, survivant des fuites, parcourt à la vitesse (v).

La **durée de vie** est donc facilement appréciée par $l = \frac{1}{v\,\Sigma_a} P_{NF}$

La totalité des neutrons prompts existant au temps t = 0 auront disparu au temps t = l, puisque ce temps correspond à leur durée de vie.

Avec le même raisonnement, on peut estimer le **temps de génération** à partir de la durée que met un neutron monocinétique à parcourir son libre parcours de fission, et au bout duquel il génère plusieurs neutrons.

On démontre ainsi que : $l^* = \dfrac{1}{\nu\ \upsilon\ \Sigma_f}$

La durée de vie des neutrons augmente proportionnellement au K_{eff} selon :

$$\frac{l}{l^*} = \frac{\nu\ \Sigma_f}{\Sigma_a}\ P_{nf} = k_\infty\ P_{nf} = k_{eff} \qquad l = l^*\ k_{eff}$$

Remarquons tout de suite que la **durée de vie est pilotable** par variation des absorptions (mouvements de grappes d'absorbants, mise en alarme des groupes d'absorbants, concentration en bore du fluide primaire, par exemple).

Le **temps de génération** n'évolue que par disparition des éléments fissiles, donc par **usure du combustible**. L'ordre de grandeur de ces deux termes est de 10^{-4} secondes pour un REP modéré à l'eau légère.

2. Les équations de la cinétique

La fraction de neutrons retardés étant faible (0.65%), et leur délai de libération élevé (10 à 12 secondes) devant la durée de vie des neutrons libres (10-4 secondes), il est **envisageable** de les négliger (dans un premier temps)….

2.1 Sans tenir compte des neutrons retardés

Dans un premier temps, nous allons établir les équations de la cinétique, en faisant l'approximation que **chaque fission ne produit que des neutrons prompts** et aucun précurseur.

A partir de l'instant t on effectue le **bilan sur l'intervalle de temps (l)**,
qui n'est autre que la durée de vie des neutrons.

- Au temps t : il y a dans le cœur une densité neutronique de n(t) neutrons par cm^3

- Au temps t + l : n(t) ont disparu
  (puisqu'ils sont arrivés en fin de vie)

- En revanche keff.n(t) sont apparus, keff étant le coefficient multiplicateur
  (puisque keff neutrons apparaissent quand 1 neutron disparaît)

Le **bilan neutronique par unité de volume** donne :

VARIATIONS = APPARITIONS - DISPARITIONS

$$dn(t) = n(t+l) - n(t) = k_{eff}.n(t) - n(t) = (k_{eff} - 1)\, n(t)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{k_{eff}\,.\, n(t) - n(t)}{l} \qquad \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho}{l^*}\, n(t)$$

En utilisant les propriétés de (l) et de (l*), on arrive à une intégration simple :

$$n(t) = n_0 \cdot e^{\left(\frac{\rho}{l^*}\right).t} = n_0\,.\, e^{\left(\frac{t}{T}\right)}$$

n_0 étant le nombre de neutrons à t = 0

On constate logiquement que la réactivité ρ gouverne l'évolution de la population neutronique car l^* est constante pour un réacteur donné.

- Si ρ > 0 ⇒ le nombre de neutrons augmente de plus en plus vite,
  le réacteur est surcritique. (exponentielle fortement croissante)
- Si ρ = 0 ⇒ $n = n_0$, le réacteur est critique
  car la population neutronique est constante.
- Si ρ < 0 ⇒ le nombre de neutrons diminue et tend vers zéro,
  le réacteur est sous critique (exponentielle décroissante)

2.2 Temps de doublement et octavemètre

A partir de l'équation d'évolution, on peut définir un **Temps de doublement T_d** comme le **temps nécessaire pour doubler la population neutronique initiale :**

$$n_0 \exp\left(\frac{\rho}{l^*} T_d\right) = 2n_0 \Leftrightarrow \exp\left(\frac{\rho}{l^*} T_d\right) = 2 \Leftrightarrow \ln 2 = \frac{\rho}{l^*} T_d \qquad \boxed{T_d = \ln(2)\, T = 0.693 \cdot \left(\frac{l^*}{\rho}\right)}$$

Dans l'hypothèse d'une évolution sans tenir compte des neutrons retardés, et si l'on insère une réactivité de ρ = 100 pcm (réactivité usuelle), c'est à dire en augmentant la population de 0.1% à chaque génération, le temps de doublement serait alors de :

$$T_d = 0.693.10^{-4} / (100.10^{-5}) \sim 0.07\ s$$

Cela signifie qu'en 1 s , la population neutronique initiale est multipliée par :

$$n_1 = n_0 e^{\frac{100.10^{-5}}{10^{-4}}} = n_0\, e^{10} = 22000\ n_0$$

Ces 2 calculs montrent que la réaction en chaîne serait **humainement incontrôlable** si, seule hypothèse faite, il n'y avait pas les neutrons retardés.

Il faut absolument tenir compte des neutrons retardés, soit en faisant une pondération sur le temps de génération (*voir exercices*), soit en écrivant exactement le bilan neutronique avec les précurseurs.

Le temps de génération est en fait plus long pour les neutrons retardés puisqu'ils attendent 10 à 12 secondes avant d'être libérés et de pouvoir donner éventuellement des fissions.

3. Bilan exact des neutrons

Les équations sont plus difficiles à écrire.

Les neutrons peuvent apparaître de deux façons

- neutrons **prompts issus de fission**
- et **décroissance radioactive des précurseurs**.

La concentration en précurseurs est une autre inconnue notée C(t).

Si l'on considère n(t) neutrons libres par cm^3 , il y a aussi C(t) précurseurs par cm^3. Cette concentration de précurseurs distille les neutrons retardés.

Il y a donc **C(t).λ précurseurs qui se désintègrent par seconde**,
et donc **C(t).λ neutrons, dit retardés, libérés par seconde**.

3.1 Ecriture des équations-bilan :

Le bilan des neutrons et des précurseurs est fait comme précédemment :

VARIATIONS = APPARITIONS - DISPARITIONS

a) Bilan des neutrons libres

nombre de neutrons à (t+l) = nombre à (t) + apparitions - disparitions

où : disparitions = n(t)
les neutrons disparaissent au bout de (l) secondes (durée de vie)

apparitions = apparitions neutrons prompts : K_{eff}.n(t).(1-β)
les neutrons sont renouvelés par le coefficient de multiplication effectif, à la fraction près des neutrons retardés qui sont identifiés par les précurseurs.

apparitions neutrons retardés (ou précurseurs) : C(t).λ.l *les précurseurs libèrent les neutrons retardés stockés selon une loi radioactive et en fonction de leur concentration.*

En procédant de la même façon que précédemment, on obtient :

$$\frac{dn}{dt}(t) = \frac{\rho - \beta}{l^*}.n(t) + \lambda.C(t)$$

b) Bilan des précurseurs

Nombre de précurseurs à (t+l) = nombre à (t) + apparitions - disparitions

où : disparitions = C(t).λ.l
les précurseurs sont des produits radioactifs qui évoluent selon une loi de décroissance classique, durant l'intervalle de temps (l)

apparitions = $K_{eff}.n(t).\beta$
la formation des précurseurs se fait à partir de la fraction de neutrons retardés non libérés

on obtient donc la seconde équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dc}{dt}(t) = \frac{\beta}{l^*}.n(t) - \lambda.C(t)$$

Nous obtenons ainsi un **système de deux équations à deux inconnues n(t) et C(t)** :

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l^*}.n(t) + \lambda.C(t)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\beta}{l^*}.n(t) - \lambda.C(t)$$

La résolution mathématique est assez lourde et nécessite des outils mathématiques particuliers. Les solutions sont nécessairement de la forme :

$$n(t)=A_1.e^{\omega_1 t}+A_2.e^{\omega_2 t}$$

$$C(t)=B_1.e^{\omega_1 t}+B_2.e^{\omega_2 t}$$

Il suffit donc de trouver les pulsations qui dépendent évidemment de la réactivité imposé par le milieu aux deux populations. Les conditions initiales permettront de déterminer les constantes A et B.

En remplaçant cette formulation dans ces équations, on trouve une relation entre les pulsations. Cette équation s'appelle l'**équation de NORDHEIM**, et s'écrit :

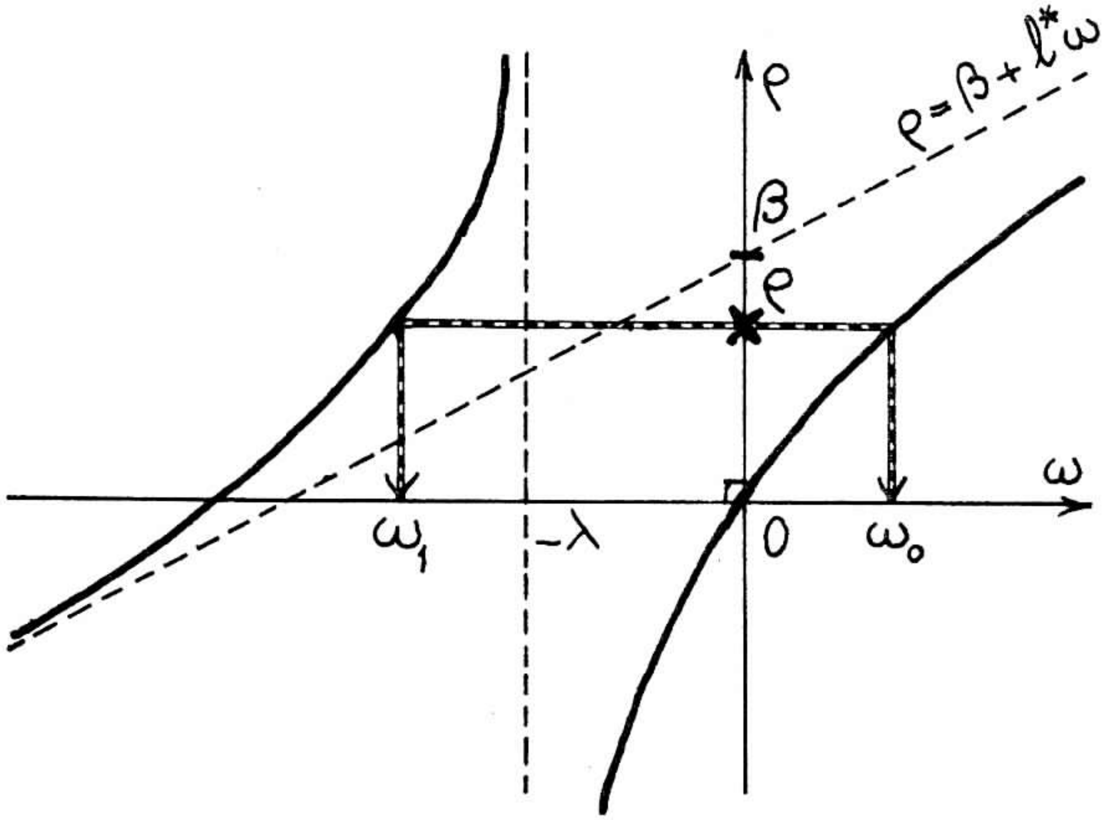
$$\boxed{\rho=l^*\omega+\beta-\frac{\lambda\beta}{\omega+\lambda}}$$

Une autre écriture permet un traitement graphique plus simple de la résolution de cette équation :

$$\boxed{\omega^2 + \left(\lambda - \frac{\rho-\beta}{l^*}\right)\omega - \frac{\lambda\rho}{l^*} = 0}$$

Les courbes représentatives des relations donnant les valeurs des deux pulsations en fonction de la réactivité ($\omega_0 = f(\rho)$ et $\omega_1 = f(\rho)$) s'appellent les courbes de NORDHEIM.

Pour une réactivité donnée (imposée par le milieu nucléaire), on peut trouver les **deux pulsations qui conduisent l'évolution cinétique des deux populations**.



3.2 Résolution graphique de l'équation de Nordheim

Pour une réactivité donnée, c'est à dire pour une ordonnée, on sépare deux branches de la courbe qui déterminent les deux pulsations, dont une est forcément négative notée ω_1 (et supérieure en valeur absolue à la constante de décroissance moyenne des précurseurs), et l'autre, notée ω_0, sur la branche passant par l'origine, a un signe qui dépend du signe de la réactivité.

Retenons les conclusions suivantes :

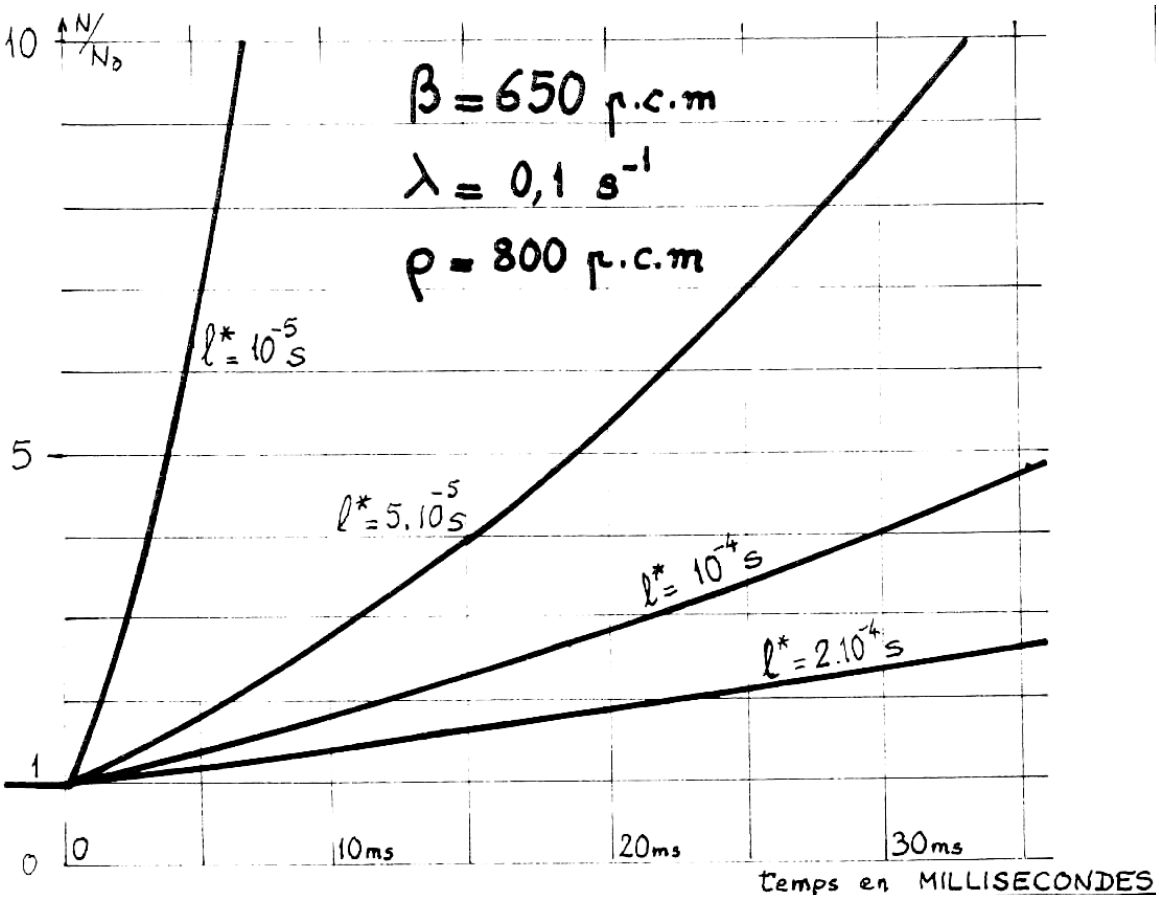
si $\rho > \beta$, la pulsation positive (ω_0) est très élevée, la population évolue très vite.

La seconde pulsation (ω_1) est toujours négative, mais n'intervient que comme un transitoire pratiquement inexistant devant la croissance très rapide de la population.

Les neutrons retardés n'ont aucun rôle ; le cœur réagit comme s'ils n'existaient pas, mais avec une croissance qui prend en compte une réactivité diminuée de la fraction retardée :

$$\omega_1 \approx -\lambda \quad \omega_0 \approx \frac{\rho-\beta}{l^*}$$

On dit que la population est **prompt-critique**, le réacteur est incontrôlable.



Effet d'une excursion importante de réactivité à partir d'une situation critique.

si $0 < \rho < \beta$ l'évolution de la population neutronique est régie par :

$$\left\{ \omega_0 \approx \frac{\rho\,\lambda}{\beta-\rho} > 0 \qquad \omega_1 \approx -\frac{\beta-\rho}{l^*} < 0 \qquad \Rightarrow \ |\,\omega_0\,| << |\,\omega 1\,| \right.$$

La population neutronique est donc estimée par l'équation :

$$\boxed{n(t)=\frac{n_0}{\beta-\rho}\left[-\rho.\exp\left(-\frac{\beta-\rho}{l^*}.t\right)+\beta.\exp\left(\frac{\lambda.\rho}{\beta-\rho}.t\right)\right]}$$

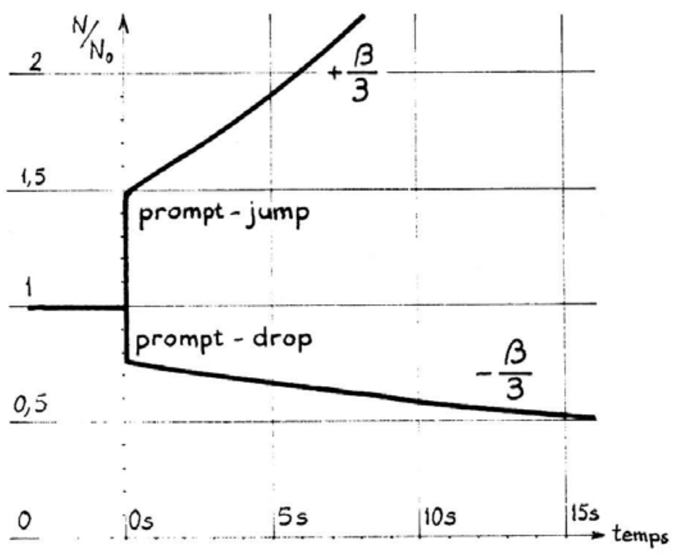
On observe un **premier terme négatif exponentiel, décroissant très rapidement** (pulsation ω_1 toujours négative) et provoquant donc une augmentation brusque de la densité neutronique "terme transitoire".

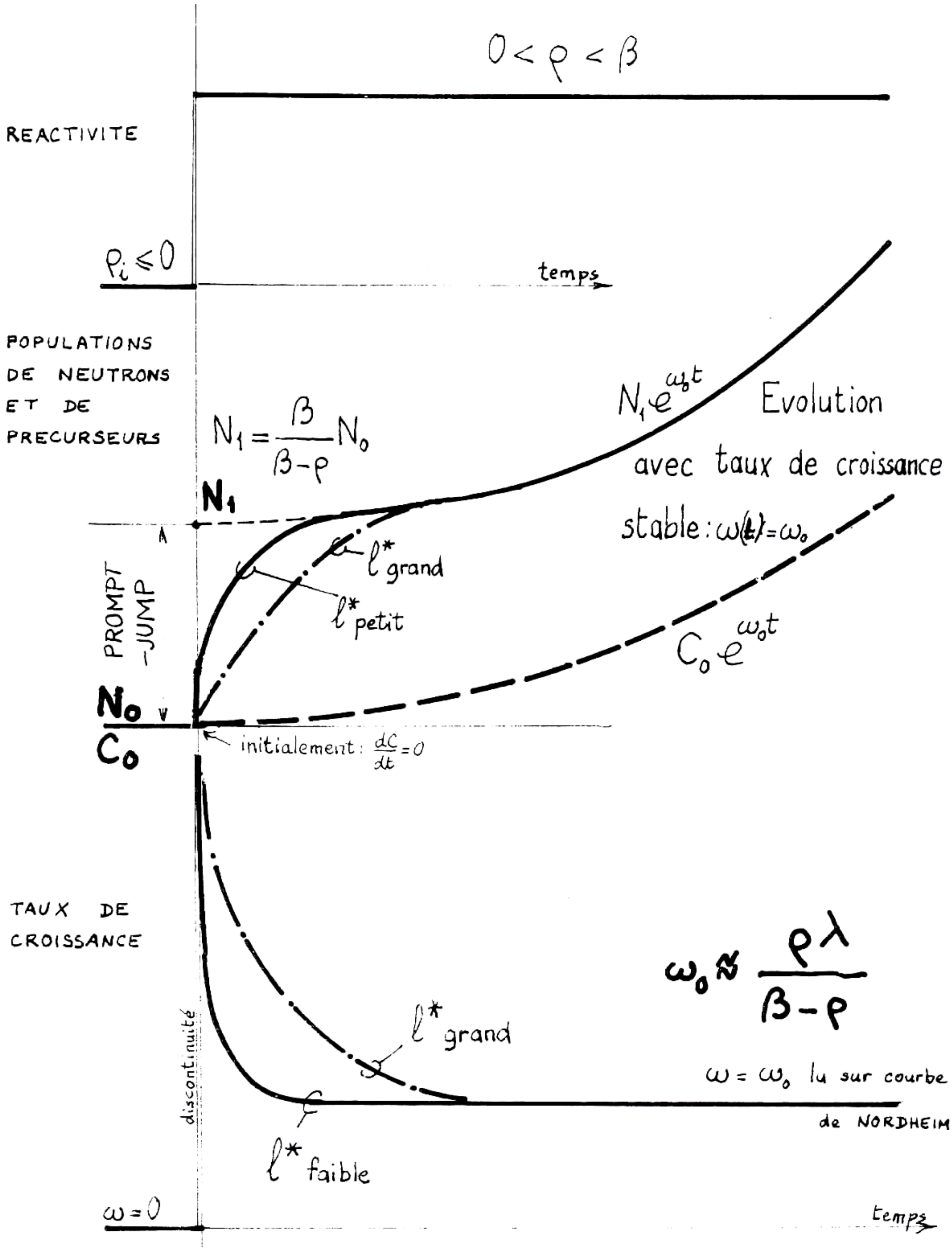
Ce terme provoque ce que l'on appelle, en neutronique, le **"prompt jump"** (ou saut prompt) dont l'amplitude est donnée par : $n_1=\frac{\beta}{\beta-\rho}.n_0$

Le deuxième terme est positif : c'est une exponentielle divergente, mais de façon assez lente (pulsation ω_0). C'est un terme asymptotique et c'est lui qui rend compte exactement de la croissance de la population neutronique donc de la puissance dégagée.

On pourrait reprendre la même discussion avec un **échelon de réactivité négatif**, c'est à dire, à partir d'une situation critique, passer légèrement sous-critique, et observer la variation de densité neutronique.

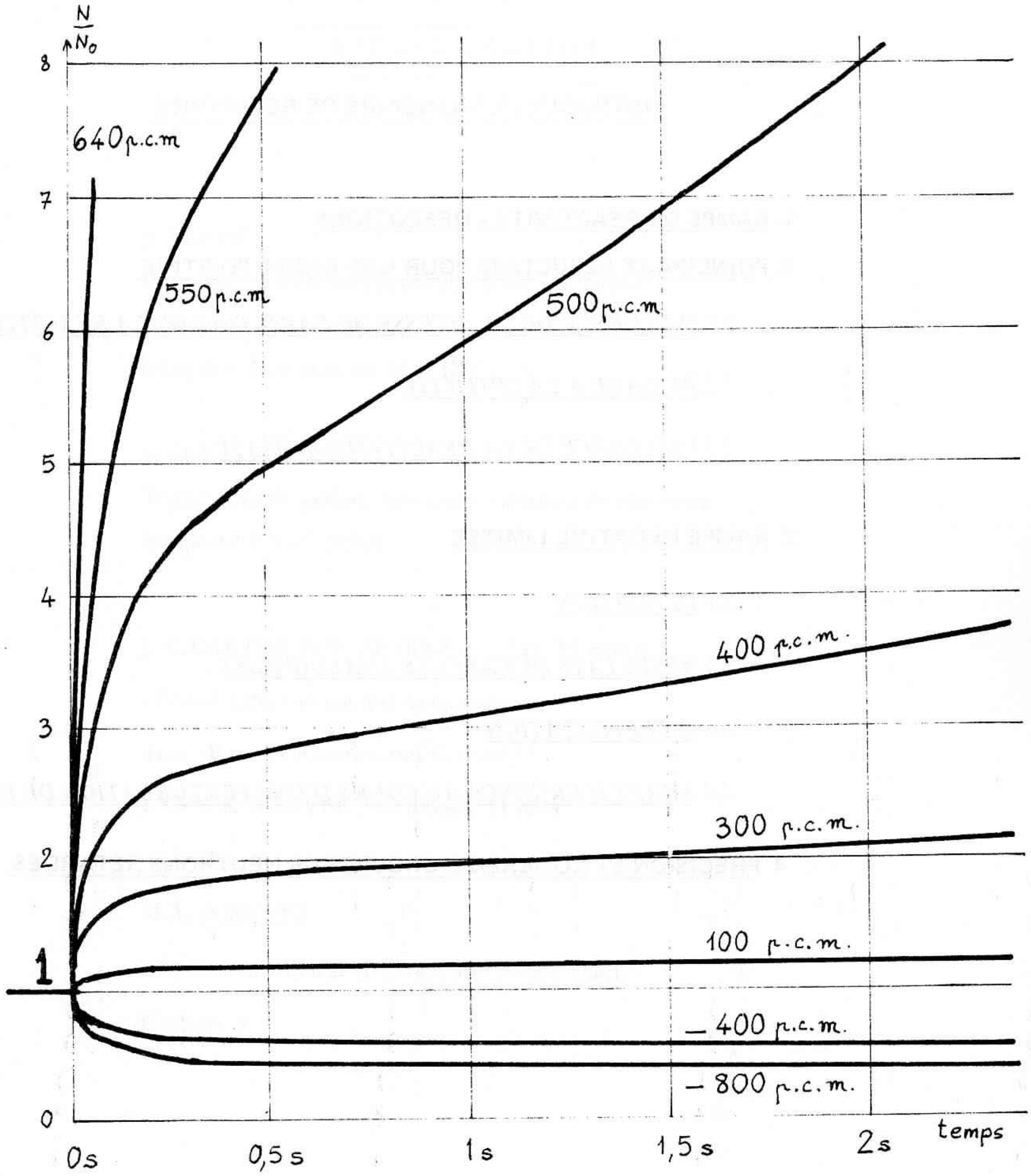
La population subit très rapidement une diminution sensible de sa densité, qui se traduit par une "**chute prompte**", puis une décroissance plus lente de la population par une exponentielle décroissante.





Les différentes populations (neutrons et précurseurs) et les différents termes intervenant dans les équations précédents sont ici illustrées. Remarquez que la population de précurseurs n'est que très lentement affectée par l'échelon de réactivité. Nous verrons en conclusion pourquoi.

Sur la courbe suivante on a tracé l'évolution de la population neutronique, lors de différents sauts en réactivité avec $0 < \rho < \beta$:



On constate que **plus on se rapproche de la prompt criticité**, plus le saut prompt est important, et **plus la population évolue vite**, donc le dégagement de puissance qui lui est associé aussi.

C'est pour cela **qu'on se limite à des réactivités inférieures à la moitié de la fraction de neutrons retardés** (actions automatiques du contrôle commande ou des moyens de pilotage des grappes de commande).

3.3 Intérêt des neutrons retardés

Prenons un réacteur à eau pressurisée dont voici quelques caractéristiques :

$\lambda = 0{,}1\ s^{-1}$ (constante radioactive des précurseurs),
$l^{*} = 10^{-4}\ s$ (temps de génération),
$\beta = 650$ pcm (proportion de neutrons retardés).

Si l'on impose un saut en réactivité de 100 pcm, ce qui correspond à une diminution de quelques pas des grappes de commande ou à une diminution faible de la concentration en bore soluble (8 à 10 pcm/ppm), calculons le temps de doublement sans tenir compte, puis en tenant compte, des neutrons retardés.

- **sans tenir compte** des neutrons retardés (*en théorie*) :

  Temps de doublement = 0,069 s

- **en tenant compte** des neutrons retardés (*détermination empirique*) :

  Temps de doublement = 28,7 s

Les résultats que nous venons de calculer sont sans équivoque sur l'importance des neutrons retardés pour garantir le contrôle des réacteurs.

Si les neutrons retardés n'existaient pas, il serait impossible de contrôler la réaction en chaîne nucléaire (*la population neutronique, donc la puissance, doublerait en moins d'un dixième de seconde*).

Grâce à ces neutrons retardés ce temps passe à 29 secondes, la cinétique d'un réacteur nucléaire est donc humainement contrôlable pour 100 pcm de réactivité (ordre de grandeur cohérent qui pourrait être injecté).

Cependant, plus ρ croît, plus la cinétique s'accélère et il est indispensable que l'on se dispose à **rester en deçà de** $\boldsymbol{\rho = \beta / 2}$.

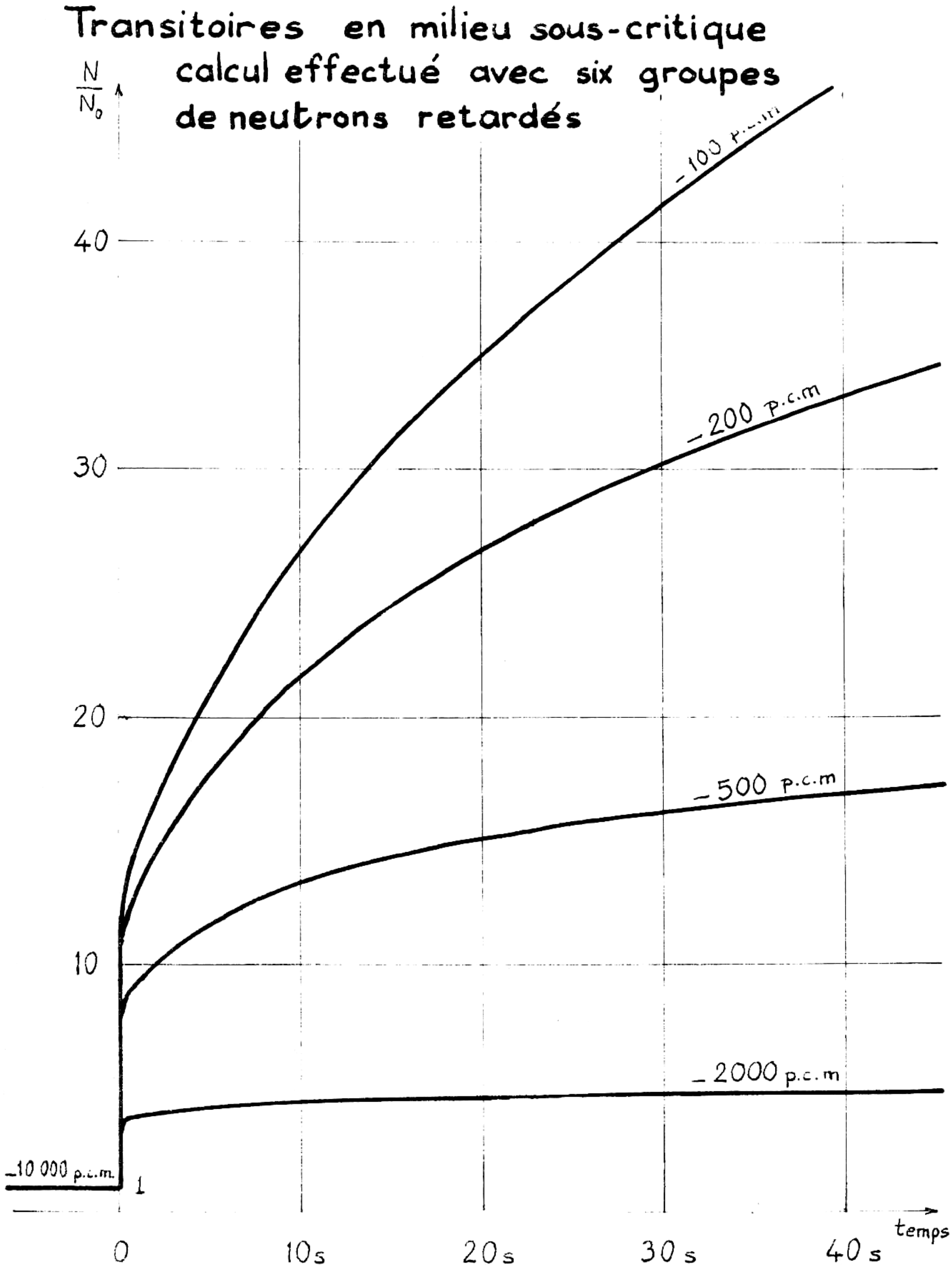
3.4 Divergence et approche sous-critique

Lors d'une divergence, la réactivité monte avec la remontée des grappes de contrôle ou l'extraction du bore soluble. Cependant ces échelons de réactivité sous-critiques imposent des cinétiques de plus en plus lentes, des **stabilisations sous-critiques lentes**, et il est très difficile de savoir à quel moment le réacteur est juste critique.

L'opérateur surveille l'octavemètre qu'il voit décoler sans savoir si la population augmente pour se stabiliser ou augmente de manière sur-critique…

L'existence de contre-réactions garantit tout de même contre une excursion trop importante, mais il est nécessaire de s'approcher lentement de la criticité.

On aborde alors la divergence (passage légèrement sous-critique) soit en **prédisant la côte critique** (ou la concentration critique en bore) par un calcul théorique, soit **par comparaison avec les côtes critiques précédentes** en fonctionnement.



Sous-critique, la population de neutrons reste stationnaire du fait des neutrons de la source dite de "démarrage" (voir exercices). Cet équilibre est perturbé au moment de l'échelon de réactivité, et si après le milieu est encore sous-critique, la population de neutrons libre se stabilise mais plus lentement à un niveau lié à cette nouvelle réactivité.

4. Conclusion

Les neutrons retardés sont un **frein aux grandes excursions de puissance**, à condition de se limiter à des sur-criticité très inférieures à la fraction de ces neutrons retardés. Il est cependant intéressant d'évaluer la concentration en précurseur à l'équilibre pour mieux comprendre l'importance de ces neutrons retardés.

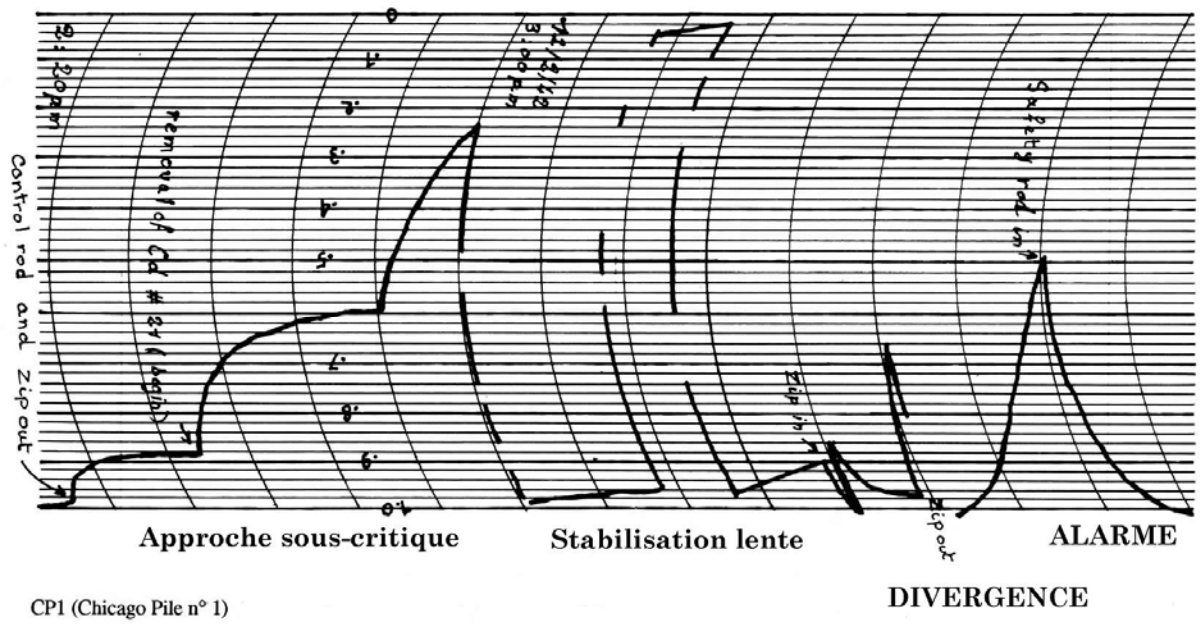
Supposons que l'on soit à l'équilibre avec la source de démarrage, ou juste à la criticité (voir exercices) : les concentrations sont donc stationnaires, et l'on écrit les deux équations sous la forme :

$$\frac{\rho - \beta}{l^*}.n(t) + \lambda.C(t) = 0$$

$$\frac{\beta}{l^*}.n(t) - \lambda.C(t) = 0$$

La résolution de ce système conduit à $n(t) = \frac{\lambda l^*}{\beta} C(t) = Cte$

L'application numérique nous indique que **la concentration en précurseurs est 650 fois plus importante que celle des neutrons libres**… qui sont seuls affectés par la réactivité. Les neutrons retardés sont bien des freins à la cinétique des neutrons, tant que la croissance des neutrons libres n'est pas supérieure à la fraction mise de coté à chaque génération.



CP1 (Chicago Pile n° 1)

5. Exercices proposés

Calcul simplifié en tenant compte des neutrons retardés

En reprenant la formule trouvée en l'absence des neutrons retardés et en recalculant le temps de génération par pondération avec ces neutrons retardés, comparer pour un échelon de réactivité de 100 pcm, et au bout de 10 secondes :

- l'évolution de population sans tenir compte des neutrons retardés,
- en tenant compte des neutrons retardés, par pondération de l*,
- avec le calcul exact du cours (sans oublier le saut-prompt)

Refaire le calcul pour 250 pcm. Conclure.
Application numériqu
e : $\beta = 650$ pcm ; $\lambda = 0{,}1\ s^{-1}$; l* (sans retardés) = 10^{-4}s

Populations stationnaires et milieu sous-critique

On considèrera un milieu sous-critique de coefficient multiplicateur k<1 dans lequel est placée une source de neutrons produisant (S) neutrons par seconde et par cm^3.

Ecrire les bilans en neutrons et en précurseurs, et déterminer les conditions pour lesquelles ces populations peuvent être stationnaires.

Effet d'une source de démarrage en milieu sous-critique

On considère un milieu multiplicateur sous-critique dans lequel est placée une source de neutrons, indépendante du temps, qui débite S_0 neutrons par seconde et par cm^3.

- Montrer que le nombre de neutrons en stationnaire dans le réacteur est proportionnel à : $\frac{S_o l_o}{1-k}$ avec k : coefficient de multiplication, l_0 : durée de vie des neutrons

Echelons de réactivité

On considère un milieu multiplicateur (c'est à dire pouvant donner des fissions) sans source. La population initiale est supposée critique, donc la réactivité est nécessairement nulle.

On impose un échelon de réactivité $\rho > 0$ pendant un intervalle de temps T.
Puis on redescend à la criticité.

- En supposant que le saut-prompt (ou la chute-prompte) est immédiat (on dit aussi "approximation du saut-prompt", ou durée de vie des neutrons prompts nulle, voir dessin), calculer la densité de neutrons en fonction du temps.

Conseils : *reprendre les bilans. Lors d'une variation de réactivité (de ρ_0 à ρ), le mouvement "prompt" est donné par la formule plus générale* $n_1 = \frac{\beta-\rho_0}{\beta-\rho}.n_o$ *que l'on peut appliquer pour un temps très court. On dit alors que les neutrons prompts ont une durée de vie infiniment courte…*

6. Questions à réviser

Caractéristiques sur les neutrons (à connaître) :

Fissions thermiques :
Neutrons prompts :
Nombre :
Energie cinétique moyenne :
Domaine de répartition de cette énergie :
Neutrons retardés :
Nombre :
Retard d'apparition par rapport à la fission :
Energie cinétique moyenne :
Domaine de répartition de cette énergie :

Précurseurs, caractéristiques nucléaires (durée de vie, fraction).

Réaction nucléaire et intérêt d'une source de démarrage.

Durée de vie d'un neutron et temps de génération (définitions, calculs, ordre de grandeur, lien entre ces deux temps).

Savoir écrire les bilans en neutrons et en précurseurs.

Courbe de Nordheim (à bien connaître) : origine, utilisation, approximations.

Circonstances conduisant à la prompt criticité : coefficient de croissance.

Saut-prompt et chute-prompte : valeur en fonction de la réactivité.

Savoir expliquer l'approche sous-critique.

Notion de temps de doublement et octavemètre.

Coefficient de croissance de la population après les sauts-prompt.

Savoir commenter les enregistrements de la pile de Fermi.