

Pilotage d'un réacteur nucléaire

Importance des neutrons "retardés"¹

L'énergie nucléaire peut apporter une réponse aux besoins croissants d'énergie. Elle ouvre des perspectives très intéressantes, mais également suscite bien des inquiétudes. Il s'agit en effet d'une réaction en chaîne très rapide, qu'il faut absolument contrôler, les neutrons provoquant les fissions se renouvelant rapidement, avec une durée de vie de l'ordre de 10^{-4} seconde.

10

1. Phénomène de la fission

En 1934, voulant produire des éléments transuraniens par irradiation de neutrons sur de l'uranium naturel, Enrico FERMI constate que le bilan nucléaire est bien plus complexe qu'une simple réaction de transmutation. Il faut alors attendre trois ans pour que Otto HAHN, Fritz STRASSMAN et Lise MEITNER expliquent qu'Enrico FERMI a réussi la fission de noyaux d'uranium 235. Cette réaction produit une énergie très importante, mais également renouvelle les neutrons, selon une réaction en chaîne divergente : pour un neutron fissionnant le noyau cible, et donc absorbé, la réaction libère deux à trois neutrons disponibles pour de nouvelles fissions. Il faut donc absolument contrôler cette réaction pour en exploiter l'énergie.

20

1.1 Interactions neutron-matière

On considère un neutron libre de se déplacer dans la matière. Il peut y subir différentes interactions avec les noyaux : soit des diffusions qui contribuent à le ralentir, soit des absorptions qui le font disparaître et conduisent généralement à de nouveaux isotopes plus ou moins stables. En effet lorsque le neutron s'approche en dessous de la portée effective des forces nucléaires, il peut être absorbé, pénétrer la surface du noyau et s'intégrer dans l'ensemble des nucléons. Il donne naissance à une entité particulière : le "noyau composé". C'est Niels BOHR qui propose en 1935 ce modèle comme intermédiaire réactionnel dans les interactions d'absorption d'une particule incidente par un noyau. Il suggère, et les expériences l'ont confirmé depuis, que lorsqu'une particule incidente (ici un neutron) est absorbée par un noyau cible A_ZM , les deux entités forment un seul noyau dit "composé", et noté $({}^A_ZM + {}^1_0n)^*$, où la parenthèse et l'étoile indiquent que le noyau composé a acquis une énergie d'excitation du fait des interactions fortes entre tous les nucléons initiaux et le neutron absorbé. Le neutron incident perd son identité, et l'énergie d'excitation du noyau composé est égale à l'énergie de liaison du neutron avec les autres nucléons, à laquelle s'ajoutent les énergies cinétiques respectives des deux entités initiales. Ce noyau composé se comporte alors comme s'il se trouvait dans un état quasi-stationnaire, de vie assez moyenne longue (10^{-16} s) vis-à-vis du temps de passage du neutron à proximité du noyau (10^{-22} s). D'après les postulats énoncés alors par Niels BOHR, les propriétés du noyau composé sont indépendantes de son mode de formation. On admet que le noyau composé "oublie" la façon dont il a été formé.

30

40

1.2 Évolution du noyau composé : capture neutronique, fission des noyaux lourds

La seconde étape de la réaction nucléaire d'absorption est sa stabilisation énergétique. Elle a lieu selon des "voies de sortie", en accord avec les lois de conservation de l'énergie totale, de la charge, du moment angulaire, etc. Parmi les différentes voies de sortie que l'on peut rencontrer dans les réacteurs nucléaires de fission, la "capture" et la fission sont les deux plus importantes.

50

¹ Les questions relatives au document se trouvent en dernière page, lisez d'abord le texte.

Dans le premier cas, le noyau se stabilise par émission γ , et conservant le neutron absorbé, il passe à l'isotope supérieur. Cette "capture" permet le contrôle des populations de neutrons, puisque l'introduction d'éléments plus ou moins absorbants (grappes mobiles ou bore dissous dans le fluide caloporteur) régule la population en excès. L'introduction rapide d'éléments très absorbants (ou neutrophages) permet de surtout mettre le réacteur "en alarme" pour arrêter de manière presque instantanée la production d'énergie issue des fissions. Mais lorsque le neutron est absorbé par certains noyaux lourds, dits "fissiles" comme l'uranium 235, l'absorption peut conduire à une "voie de sortie" différente : l'excitation se traduisant par une agitation des nucléons, peut conduire à séparer ce noyau composé en deux fragments de fission (notés FF). Ces fragments de fission constituent bien sûr de nouveaux noyaux excités. Fortement chargés, ils se repoussent et s'arrêteront par diffusion avec les noyaux voisins en cédant leur énergie cinétique sous forme de chaleur. Ils deviennent alors des "produits de fission". On considère qu'il y a environ 500 produits de fission possibles.

1.3 Neutrons prompts et neutrons retardés

On observe en physique nucléaire que le nombre de neutrons dans les noyaux augmente plus vite que celui des protons. Il y a donc proportionnellement plus de neutrons dans les fragments de fission que nécessaire. On comprend alors que 2 à 3 neutrons (avec une énergie cinétique moyenne de 2 MeV) soient émis presque instantanément pendant le temps de déplacement de ces fragments : ces neutrons sont dits "prompts". Ils sont émis en moins de 10^{-12} seconde. C'est ainsi que le noyau composé excité peut plus ou moins rapidement se stabiliser, en même temps que des photons γ "prompts" sont émis.

Par décroissance radioactive de ces produits de fission, des rayonnements de différente nature (β γ ...) sont encore émis mais sur des périodes parfois très longue. Cependant, dans un petit nombre de cas, pour quelques produits de fission particuliers (38 sur 500) appelés "précurseurs", un seul neutron dit "retardé" est émis en moyenne 10 à 12 secondes après la fission (par opposition au neutron prompt émis instantanément). Ces neutrons retardés sont d'énergie légèrement inférieure à celle des neutrons prompts (environ 500 keV).

L'origine de ces quelques rares neutrons retardés peut s'expliquer par des décroissances radioactives mettant en jeu des voies complexes, ce qui rend leur probabilité faible. Néanmoins on considère que, pour une fission, un neutron ayant été absorbé pour la provoquer, il s'ensuit une émission très rapide d'un total de 2,42 neutrons dont seulement 0,65 % sont émis en retard par ces noyaux très particuliers, appelés "précurseurs". On note β cette fraction de neutrons retardés. β vaut $650 \cdot 10^{-5}$ (ou 650 "pour cent mille", noté 650 pcm).

On distingue généralement 6 groupes de noyaux "précurseurs" avec des périodes radioactives de 0,2 à 58 secondes. La moyenne de ces périodes de demi-vie est de 10 secondes. Bien que peu nombreux, ces neutrons jouent un rôle fondamental pour le contrôle du réacteur comme nous allons le voir.

2. Pilotage d'un réacteur nucléaire

Un réacteur doit fournir de l'énergie de manière sûre, la plupart du temps à puissance constante, et pouvoir être **ramené le plus rapidement possible dans un état sûr**, en cas de problème. La puissance fournie par un réacteur est liée au nombre de fissions qui s'y déroulent. Elle est donc proportionnelle et varie avec le nombre de neutrons.

Paramètres d'état d'un réacteur nucléaire

Quatre paramètres principaux sont à considérer :

110 ➤ On appelle **coefficient de multiplication effectif**, noté K_{eff} , le rapport entre deux générations successives. Il doit être de 1 exactement quand on veut stabiliser la quantité de neutrons pour assurer un nombre constant de fission, donc une puissance constante. Le réacteur est alors dit "critique". Il doit être très inférieur à 1 quand on veut conserver le réacteur arrêté, dans un état sûr. Il est alors "sous-critique". Mais il arrive que l'on s'écarte de ces situations références, soit pour des variations de la puissance extraite, soit dans des situations incidentelles ou accidentelles... Le réacteur peut alors être sur-critique ($k_{\text{eff}} > 1$). Dans tous les cas, une génération n de neutrons disparaissant par absorption (ou fuite) est renouvelée par une nouvelle génération comptée par $k_{\text{eff}} n$.

➤ Pour quantifier ces **écarts relatifs à la criticité**, on parle alors de "réactivité" ρ , avec :

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \quad \text{avec} \quad k_{\text{eff}} = \frac{1}{1 - \rho}$$

120 ➤ On considèrera la **durée de vie** de ces neutrons en cours de déplacement, du fait des interactions possibles. Cette durée de vie notée " l " est liée aux probabilités d'absorption, selon l'énergie des neutrons et selon les matériaux traversés. On comprend facilement que cette durée de vie soit pilotable par les opérateurs qui introduiront plus ou moins de matériaux absorbants (grappes d'aciers avec des teneurs en éléments neutrophiles ou bore dissous dans le fluide caloporteur évacuant la chaleur produite) pour "libérer" ou "limiter" les neutrons.

130 ➤ Il faut aussi considérer le "**temps de génération**", noté l^* , qui évalue le temps que met en moyenne un neutron pour en produire un autre par fission. Elle dépend de la quantité de noyaux pouvant être fissionnés, et n'est donc pas pilotable par l'opérateur. Elle est de l'ordre de 10^{-4} seconde. De ces deux définitions, l en déduit qu'il y aura compétition permanente entre disparition des anciennes générations de neutrons, et production de nouvelles générations, dans un intervalle de temps assez court. On démontre en effet que k_{eff} relie ces deux durées par la relation $l = l^* k_{\text{eff}}$

Paramètres de pilotage d'un réacteur

140 C'est bien le paramètre k_{eff} qui doit être surveillé, à la fois pour sa valeur instantanée, mais aussi de manière dynamique. Le **flux de neutrons** dans le réacteur est mesuré en permanence par des chaînes de mesure situées en périphérie de la cuve (neutrons de fuite). Un calculateur analyse ces mesures pour en déterminer la dynamique, c'est à dire le **taux de croissance** $\omega(t)$, le **temps de doublement** T_d , et le nombre de doublement de la population de neutrons par minute (**octave par minute** $\Omega(t)$). Cet "octavemètre" indique à quelle vitesse la puissance évolue. Ces éléments sont fournis en permanence sur le pupitre de contrôle, analysés pour d'éventuelles actions automatiques, et sont calculés par les équations suivantes :

$$\omega(t) = \frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} \quad T_d = \frac{\ln(2)}{\omega(t)} \quad \Omega(t) = \frac{60}{T_d}$$

3. Établissement des équations de la cinétique

- 150 Il faut considérer trois sources de production de neutrons libres :
- Les **neutrons prompts** issus directement des fragments de fission ;
 - Les **neutrons retardés**, issus des décroissances radioactives des précurseurs ;
 - Les neutrons fournis par des **sources** dites de démarrage indépendamment des fissions.

Dans la pratique, les sources de démarrage d'un réacteur sont introduites au chargement du combustible, et restent en place jusqu'au déchargement suivant. Ces sources sont à base de Curium 244 (émetteur α) mélangé à une poudre de Béryllium 9. Les neutrons sont produits par réaction (α, n) sur le Béryllium pour environ 10^8 neutrons par seconde.

- 160 Nous allons donc considérer **deux populations** : (1) les neutrons libres, de densité notée $n(t)$, et (2) les précurseurs, noyaux émetteurs de neutrons retardés, et de densité notée $c(t)$.

3.1 Bilan en neutrons libres entre t et $t+dt$

Pendant un temps dt , très court devant la durée de vie l des neutrons :

Il disparaît : $n(t) \frac{dt}{l}$ et il apparaît immédiatement $(1-\beta) k_{\text{eff}} n(t) \frac{dt}{l}$ neutrons prompts.

Il apparaît aussi $\lambda c(t) dt$ neutrons retardés, par désintégration des précurseurs.

La source fournit aussi $S dt$ neutrons libres.

Le bilan en neutrons libres est :

$$d n(t) = - n(t) \frac{dt}{l} + n(t) k_{\text{eff}} (1-\beta) \frac{dt}{l} + \lambda c(t) dt + S dt$$

170 Ou encore
$$\frac{d n(t)}{dt} = (k_{\text{eff}} (1-\beta) - 1) \frac{n(t)}{l} + \lambda c(t) + S$$

On peut utiliser la relation qui existe entre **durée de vie l et temps de génération l^*** , mais également la réactivité, c'est à dire **l'écart relatif à la criticité ρ**

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{k_{\text{eff}} l^*} \quad \frac{1}{k_{\text{eff}}} = 1 - \rho \quad \text{soit} \quad \frac{d n(t)}{dt} = (k_{\text{eff}} (1-\beta) - 1) \frac{n(t)}{k_{\text{eff}} l^*} + \lambda c(t) + S$$

$$L'équation bilan des neutrons libres devient : \quad \frac{d n(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l^*} n(t) + \lambda c(t) + S$$

On retiendra les valeurs numériques moyennes $\beta = 650 \cdot 10^{-5}$, $l^* = 10^{-4}$ s, et $\lambda = 0,1 \text{ s}^{-1}$

3.2 Bilan des précurseurs entre t et $t + dt$

- 180 Les précurseurs disparaissent par désintégration radioactive, selon la loi classique $\lambda c(t) dt$

et sont régénérés par la fraction β des nouveaux neutrons émis par fission : $\beta k_{\text{eff}} n(t) \frac{dt}{l}$.

$$\frac{d c(t)}{dt} = k_{\text{eff}} \beta \frac{n(t)}{l} - \lambda c(t)$$

L'équation bilan des précurseurs est donc plus simple :

On peut la simplifier comme la précédente, et regrouper le système des deux équations différentielles du premier ordre à deux fonctions inconnues, dites équations de la cinétique :

$$(1) \quad \boxed{\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(\rho - \beta)}{l^*} n(t) + \lambda c(t) + S}$$

$$(2) \quad \boxed{\frac{dc(t)}{dt} = \frac{\beta n(t)}{l^*} - \lambda c(t)}$$

190 Deux remarques sont importantes : dans l'équation (1), le premier taux de croissance peut être **positif ou négatif selon la valeur de ρ devant β** , et l'équation (2) qui régit la population des précurseurs apparaît indépendante de la réactivité ρ du réacteur.

3.3 Situations stationnaires : nécessité d'une source de neutrons, et criticité

Lorsque les précurseurs et les neutrons restent constants (**arrêt, ou puissance stabilisée**), on constate que le rapport de ces populations est important.

En effet, si $0 = \frac{\beta n}{l^*} - \lambda c$ alors $\frac{c}{n} = \frac{\beta}{l^* \lambda}$ soit environ 650 !

200 Les neutrons retardés constituent un **réservoir énorme de neutrons**, qui ne sont libérés qu'avec une constante de temps de l'ordre de $1/\lambda$ soit environ 10 s. Ils jouent le rôle de frein.

$$0 = \frac{(\rho - \beta)}{l^*} n + \lambda c + S \quad n = S \frac{l^*}{-\rho}$$

Pour les neutrons libres, on constate que pour

La population de neutrons ne peut être stationnaire que si le réacteur est sous-critique à l'arrêt (ρ négatif), et avec une source "externe". La source entretient ainsi un minimum de neutrons libres quand s'il y a trop d'absorbants pour assurer le renouvellement cette population par les seules fissions. En revanche, quand le réacteur est critique, c'est **en puissance**. La source devient alors **négligeable** devant la population totale des neutrons.

210 Pour étudier l'évolution de la densité de neutrons libres, selon la réactivité, on partira donc de situations stationnaires bien connues : **réacteur sous-critique avec une source**, ou **marche en puissance stabilisée** (source alors négligée)

3.4 Premières conclusions : risque de prompt criticité et alternance neutron-précurseur

Dans les deux équations différentielles, on peut évaluer l'ordre de grandeur de chacun des taux de croissance. Rappelons que β vaut $650 \cdot 10^{-5}$, l^* est de l'ordre de 10^{-4} s, et λ à $0,1 \text{ s}^{-1}$.

220 Pour une réactivité de quelque 100 pcm soit $100 \cdot 10^{-5}$ (pour un coefficient de multiplication de l'ordre de 1,001) on calcule que, pour la première équation :

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

$$(a) \quad \boxed{\frac{(\rho - \beta)}{l^*} = -55 \text{ s}^{-1}} \quad (b) \quad \boxed{\lambda = 0,1 \text{ s}^{-1}}$$

On constate que le premier taux de croissance (a) est très négatif si la réactivité reste inférieure à la fraction des neutrons retardés.

En revanche, **dès que la réactivité va dépasser la valeur de β** , ce taux de croissance devient positif et vite très élevé. Il impose donc une croissance très rapide de la population de neutrons libres : le réacteur devient, dans ces conditions, **incontrôlable**.

230

Lorsque l'excès de neutrons produits à chaque génération (figuré par ρ) dépasse la part des neutrons mis de côté dans les précurseurs (identifiée par β), les seuls neutrons prompts renouvellent exactement la génération précédente : on parle alors de "**prompt-criticité**". Comme le second taux de croissance (b) reste faible avec une constante de temps de l'ordre de 10 secondes, **il ne faut jamais que la réactivité dépasse la valeur de β** .

240

Les **précurseurs** apparaissent ainsi comme une **réserve importante de neutrons**, libérés à une vitesse bien plus lente que celle de disparition des neutrons libres. On parle parfois d'alternance neutrons-précurseurs : dans les conditions normales de fonctionnement ($\rho < \beta$), le renouvellement limité des neutrons prompts, en quantité inférieure à la population libre, est plus ou moins compensé par les neutrons retardés. Les neutrons prompts ont tendance à disparaître. En effet, à chaque génération, on produit, pour un neutron initial, une quantité de

$$(1-\beta) k_{\text{eff}} = \frac{1-\beta}{1-\rho} < 1$$

neutron prompt :

quelque soit $\rho < \beta$

La différence est plus ou moins compensée par l'arrivée, plus lente, des neutrons retardés. Au-delà de β , les neutrons prompts imposent leur taux de croissance élevé au réacteur. **Pour une réactivité supérieure à β les neutrons retardés ne servent plus de frein !**

250

4. Résolution des équations de la cinétique

Il y a plusieurs méthodes pour résoudre ce système d'équations différentielles : par les transformées de Laplace, en dérivant les équations (1) et (2) pour arriver à une équation différentielle du second ordre pour la fonction $n(t)$, ou encore en recherchant directement des solutions exponentielles, du type $n(t) = A \exp(\omega t)$.

4.1 Approche exponentielle

Par cette dernière méthode, on trouve l'équation caractéristique donnant les 2 taux de croissance solutions de ce système :

260

$$(3) \quad \omega^2 + \omega \left(\lambda - \frac{\rho - \beta}{l^*} \right) - \frac{\lambda \rho}{l^*} = 0$$

En appliquant directement les valeurs numériques connues de β , de l^* , et de λ , on peut, pour chaque valeur de ρ , calculer les 2 taux de croissance qui vont régir $n(t)$. On peut donc résoudre cette équation du second degré directement, ou proposer une solution graphique qui rende compte des deux taux de croissance. L'équation (3) peut s'écrire également :

$$(4) \quad \rho = l^* \omega + \frac{\beta \omega}{\omega + \lambda} \quad \text{c'est l'équation dite de Nordheim.}$$

4.2 Résolution graphique de l'équation de Nordheim (figure 1)

Pour trouver les 2 taux de croissance régissant la population neutronique libre $n(t)$, on impose une valeur de ρ par une droite horizontale, les intersections de cette droite avec la courbe de Nordheim fournissent les valeurs des 2 taux de croissance. On constate que :

- Lorsque la **réactivité imposée est négative**, la population neutronique évolue avec 2 taux de croissance ω_0 et ω_1 négatifs, c'est-à-dire retrouve plus ou moins rapidement un état d'équilibre régi par la source "externe" de neutrons. ω_1 est très négatif.
- Lorsque la **réactivité est positive**, un seul taux de croissance ω_0 est faiblement positif, et traduit la croissance logique de la population neutronique. Le second taux de croissance ω_1 , toujours très négatif, traduit un transitoire plus ou moins rapide de la population.
- **Si la réactivité atteint la valeur de β** , le taux de croissance positif ω_0 devient très élevé. La population est alors incontrôlable comme nous l'avions déjà observé.

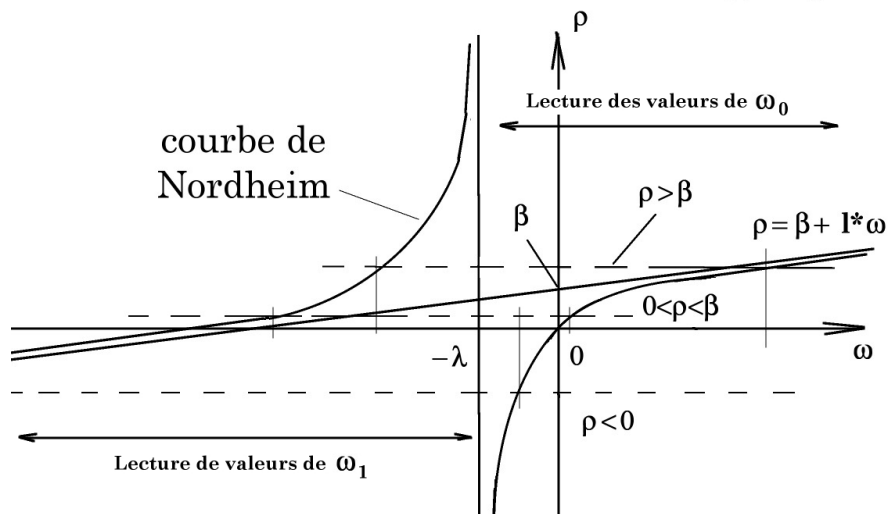


Figure 1 : Lecture graphique des taux de croissance de la population de neutrons libres

Réactivité	ω_0 <i>s-1</i>	ω_1 <i>s-1</i>	Td <i>s</i>	Octavemètre <i>octave/mn</i>	
-1000	-0,06	-165,0	11	5,2	<i>Situation sous-critique</i>
-500	-0,04	-115,1	16	3,8	<i>Réacteur à l'arrêt</i>
-300	-0,03	-95,1	22	2,7	
-200	-0,02	-85,1	29	2,0	
-100	-0,013	-75,1	52	1,2	<i>Approche de la divergence</i>
-50	-0,007	-70,1	97	0,6	
-10	-0,002	-66,1	458	0,1	<i>Oscillations autour de la criticité</i>
10	0,002	-64,1	444	0,1	
20	0,003	-63,1	219	0,3	<i>Zone de fonctionnement normale</i>
50	0,008	-60,1	83	0,7	
100	0,02	-55,1	38	1,6	
120	0,02	-53,1	31	2,0	<i>Divergence normale</i>
200	0,04	-45,1	16	3,8	
300	0,09	-35,2	8,1	7,4	<i>Limites du contrôle commande</i>
400	0,16	-25,3	4,4	13,7	<i>Zone interdite : alarme</i>
600	0,99	-6,09	0,70	85,3	
800	15,42	-0,52	0,04	1334,7	

Tableau 1 : Valeurs calculées des taux de croissance selon la réactivité imposée

5. Importance des neutrons retardés pour le pilotage et la sûreté des réacteurs

290 Les calculs précédents permettent donc de trouver l'expression numérique de l'évolution de la densité de neutrons, donc les fissions, dans le réacteur. Pour illustrer l'intérêt des neutrons retardés, mais aussi les limites de leur action, on considérera trois actions de pilotage : (a) la phase de préparation du réacteur avant marche en puissance, dite "**approche sous-critique**"; (b) à partir d'un état de marche en puissance stabilisée, une **variation de réactivité** liée à un mouvement d'absorbants, et (c) **l'arrêt du réacteur** par insertion des absorbants.

5.1 Approche sous-critique : préparation à la marche en puissance (figure 2)

300 À l'arrêt, le réacteur est largement sous-critique. La totalité des absorbants mobiles sont insérés, et pour démarrer le réacteur, il va falloir les extraire progressivement. On va donc remonter la réactivité de plusieurs milliers de pcm en dessous de la criticité (ρ très négative), jusqu'à des valeurs très proches de zéro, d'où l'expression "d'approche sous-critique".

310 Considérons la réactivité autour de -10000 pcm. Grâce à la source, il y a une population de neutrons faible, mais stable. Remontons les mécanismes absorbants pour passer le réacteur à une réactivité de -1000 pcm. Les taux de croissance calculés sont de -165 s^{-1} et de $-0,06 \text{ s}^{-1}$. Il y a donc un réarrangement très rapide dans un premier temps, les neutrons prompts réagissant très vite à ce changement de réactivité, puis une phase plus lente correspondant au réarrangement des précurseurs au fur et à mesure des émissions retardées. On assiste donc à un "**saut-prompt**", c'est-à-dire une **variation nette de la population prompte**, suivi d'une stabilisation lente.

La population de neutrons finira par se stabiliser à une nouvelle valeur, fonction de l'intensité

$$n = S \frac{\lambda^*}{-\rho}$$

de la source et de la valeur de la nouvelle réactivité :

La réactivité passant de -10000 à -1000 pcm, la population stabilisée est multipliée par 10.

320 Lorsque l'on va continuer à remonter les mécanismes par paliers (voir figure 2), ce saut prompt va être également observé, mais avec un **taux de croissance plus faible** : -115 s^{-1} à -500 pcm, et -75 s^{-1} à -100 pcm. **L'amplitude du saut-prompt diminue** également.

En revanche **la stabilisation est de plus en plus lente**, et l'opérateur pourrait hésiter pour savoir si la population tend à augmenter ou à se stabiliser.

L'approche sous-critique demande un peu de prudence, mais si la montée des mécanismes reste lente, ce sont bien toujours les neutrons retardés qui freinent.

330 L'opérateur ne visualise que la **valeur instantanée du flux**, et le contrôle commande calcule le **taux de doublement**. Les taux de croissance restent très voisins de zéro. L'opérateur et le contrôle-commande ont donc largement le temps de réagir : ω_0 reste autour de $-0,007$ à $+0,008 \text{ s}^{-1}$ ce qui donne des temps de doublement voisins de une à plusieurs minutes. On est à très faible puissance, et les neutrons sont encore très peu nombreux par rapport à un réacteur en marche.

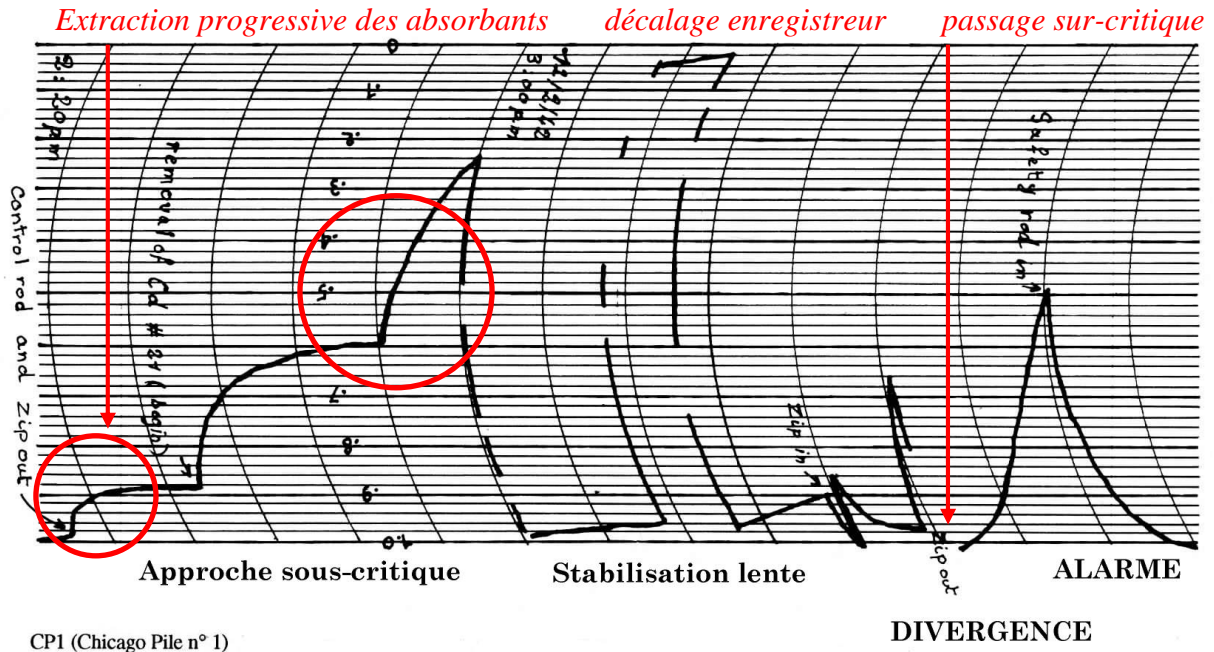


Figure 4 : enregistrement de la divergence du premier réacteur, la pile CP1, le 2 décembre 1942 à Chicago (réacteur conçu par Enrico FERMI).

340

Généralement, pour atteindre une puissance suffisante, on règle la réactivité autour de +120 pcm, ce qui correspond à un temps de doublement de 30 secondes, soit 2 octaves par minute. L'opérateur ou le contrôle-commande ajustent la position des mécanismes absorbants pour stabiliser l'octavemètre à 2, jusqu'au moment où le niveau de puissance nécessaire sera atteint. À ce stade, on redescend un peu les mécanismes, pour ramener la réactivité à zéro : l'octavemètre est à zéro, le réacteur est alors critique : la population de neutrons libres reste stable (*la source est négligeable en puissance*). Si la réactivité montait trop, comme le **contrôle-commande surveille l'octavemètre**, l'interdiction mécanique de montée, la descente automatique, voire la chute des mécanismes en alarme serait **imposée** pour des valeurs supérieures à 4 ou 6 octaves par minutes (doublement en moins de 15 à 10 secondes).

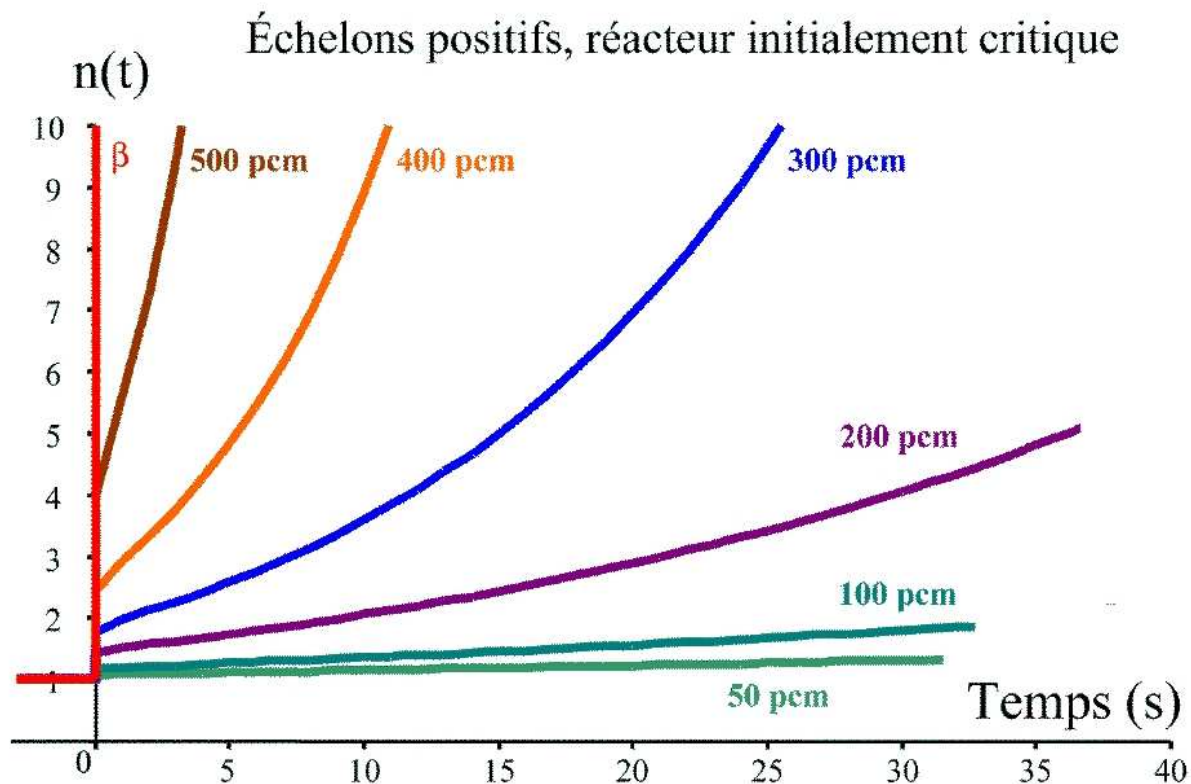
350

5.2 Variations de puissance : paliers de réactivité (figure 3)

Si pour une raison ou une autre (mouvements d'absorbants, dilution du bore soluble, effets de température par appel de vapeur au secondaire), la réactivité devient légèrement positive, on observera également les mêmes phénomènes que précédemment : saut-prompt dû au réarrangement rapide des neutrons prompts, puis montée plus lente de la population neutronique du fait du réarrangement lent de l'importante population de précurseurs. **Tout ira bien si ce palier de réactivité reste inférieur à β .**

360

En effet on constate sur la figure 3 que si la réactivité est proche de β , ou supérieure à β , la population prompte réagit alors très vite, et même la quantité de neutrons retardés ne suffit plus à freiner la croissance. **Ce sont les neutrons prompts en excès par rapport à la fraction de neutrons retardés qui vont alors dicter leur croissance à l'ensemble des neutrons.** Là aussi c'est le contrôle-commande qui va surveiller la croissance de la population, et si l'octavemètre observe un doublement inférieur à 6 secondes (plus de 10 octaves par minute), c'est la **chute des mécanismes en alarme**. On interdit donc ainsi toute excursion au-delà de 350 pcm (soit $\beta/2$ comme le tableau 3 l'indique).



370 **5.3 Arrêt du réacteur par insertion des mécanismes (figure 4 et tableau 2)**

Lorsque l'on veut arrêter le réacteur, cela se fait par insertion des mécanismes mobiles, ou augmentation de la concentration du bore dilué dans l'eau du circuit primaire. Il faut insérer nettement les grappes d'absorbants pour maintenir le réacteur sous-critique. On observera le même type d'effets : baisse brutale et très brève de la population de neutrons, c'est la "**chute-prompte**", puis **stabilisation lente** de la densité de neutrons vers une quantité stable de neutrons, en équilibre avec la source avec le milieu maintenant sous-critique (ρ négatif).

380 Mais c'est en comparant l'effet d'un palier positif de réactivité avec celui d'un palier négatif, que l'on constate que le "**freinage**" est bien plus difficile que "**l'accélération**". Le tableau 2 montre l'effet d'un créneau de réactivité : on impose, dans un réacteur initialement critique, un mouvement d'absorbant plus ou moins important durant une minute. Puis on revient à la criticité. Selon la réactivité imposée, il y a d'abord un **saut-prompt** (respectivement chute-prompte), une évolution lente de la population, puis au retour à la criticité, une **chute-prompte** (respectivement saut-prompt) puisqu'il y a à **chaque variation de réactivité**, un **réarrangement très rapide des neutrons prompts**.

390 On constate que, **pour multiplier par 5 la population** (donc la puissance), **200 pcm suffisent**, alors qu'il faut **plus de -570 pcm pour la diviser par 5**. Cela est encore plus marqué pour un facteur 20. Les précurseurs, par leur grand nombre, constituent une réserve dont il faut tenir compte.

Tout cela a donc des conséquences sur la vitesse de descente des mécanismes, et sur la quantité de mécanismes absorbants devant rester disponibles pour l'alarme.

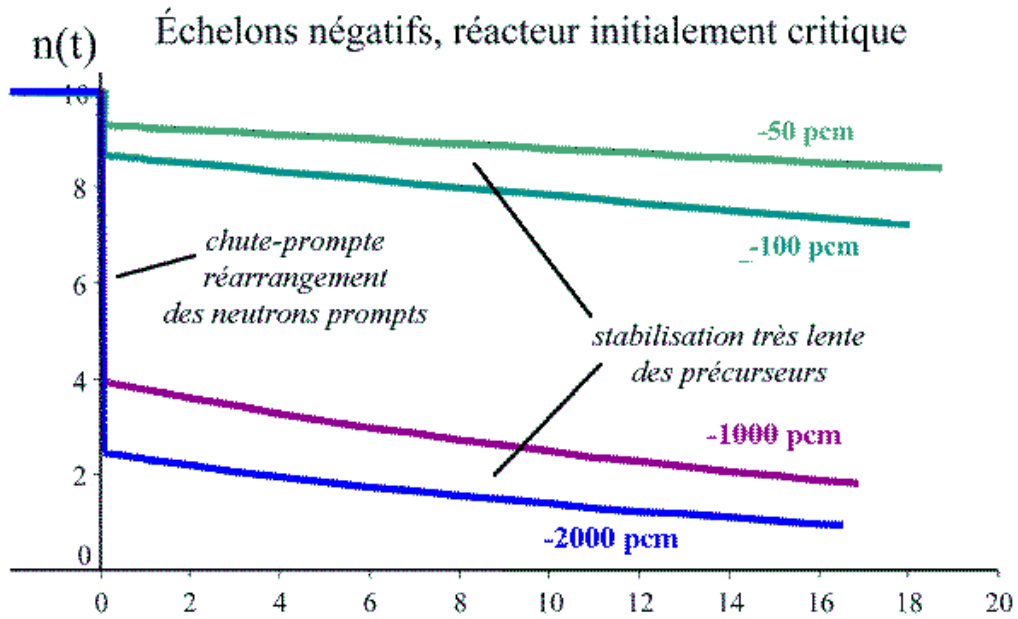


Figure 4 : Effet d'un passage sous-critique par insertion des absorbants

Réactivité	Saut-prompt	Situation à 60 s	Chute prompte	Final	
50	1,083	1,45	0,92	1,3	
100	1,182	2,22	0,85	1,9	
200	1,444	6,74	0,69	4,7	
300	1,857	36,22	0,54	19,5	
Réactivité	Chute-prompte	Situation à 60 s	Saut-prompt	Final	Division
-100	0,867	0,55	1,15	0,63	1,6
-300	0,684	0,23	1,46	0,33	3,0
-500	0,565	0,13	1,77	0,22	4,5
-1000	0,394	0,05	2,54	0,12	8,2
-2000	0,245	0,02	4,08	0,07	13,7
-3000	0,178	0,01	5,62	0,06	17,3

Tableau 2 : Effets d'un créneau de réactivité imposé durant 60 s. On comparera les réactivités imposés pour de mêmes facteurs de multiplication ou de division.

Conclusion

420

La fission nous fournit elle-même les éléments indispensables à son contrôle. **À condition de respecter des limites bien précises ($\rho < \beta/2$)**, ce sont bien les neutrons retardés, pourtant produits en faible quantité, mais conservés très longtemps devant la durée de vie des neutrons libres, qui vont freiner les variations de neutrons.

430

Des calculs plus détaillés sont bien sûr effectués pour évaluer la réponse du système lors de **phases accidentelles**. Ces transitoires risquent de faire grimper la densité de neutrons à des valeurs très élevées, donc un nombre de fissions important avec un risque de fondre la gaine du combustible qui constitue une première barrière de confinement des produits radioactifs.

Ces études sont exigées par les **autorités de sûreté** qui contrôlent la mise en service et l'exploitation des réacteurs nucléaires.

Partie obligatoire

440 *Les trois premières questions sont obligatoires. Elles sont destinées à vous faire prendre conscience des **ordres de grandeur**, populations, vitesses, énergies, échelle de temps, mais également de vous faire réagir comme **ingénieur** plus que comme mathématicien. ²*

Cela veut aussi dire qu'au travers des calculs simples et des résultats basiques, vous devriez être capable de porter un jugement et proposer des solutions techniques. Lancez-vous !

1. Evaluation du nombre de neutrons libres (*)

450 ➤ En prenant comme énergie libérée 200 MeV lors d'une fission d'un noyau d'uranium 235, évaluer le nombre de fissions nécessaires au dégagement d'un joule, la quantité de noyau d'uranium qu'il faut fissionner pour réchauffer une tasse de café de 20 cl de 20 à 35°C, et enfin la quantité d'uranium fissionné pour produire un MW pendant une journée.

Connaissant la puissance du projet de centrale EPR (1600 MW électrique), le rendement de la conversion de puissance (30%), le volume du réacteur (5,5 m de haut pour 4.2 m de diamètre), calculer

460 ➤ La masse d'Uranium 235 fissionnée par seconde dans l'EPR, sachant que seules 85% des interactions avec un neutron conduisent à la fission (les autres conduisent à la formation d'un U236) ;

➤ Le nombre de fissions par cm³ et par seconde et la puissance volumique dégagée en moyenne dans le combustible ;

➤ Peut-on déduire de ce nombre la densité de neutrons par centimètres cube, sachant que un neutrons "survit" 10⁻⁴ s dans un réacteur ?

2. Importance des neutrons retardés (questions de réflexion sans calculs) (*)

470 En une page, expliquer **l'intérêt des neutrons retardés pour le pilotage du réacteur.**

Si vous deviez concevoir un système de contrôle commande pour surveiller le fonctionnement du réacteur, **quels paramètres à surveiller** choisiriez-vous, et à quelles **valeurs** imposeriez-vous des **actions correctrices** ? Justifiez vos réponses.

3. Calculs de paramètres pour un réacteur MOXé (**)

480 Vous avez remarqué que le facteur β a une importance capitale pour la sûreté. Dans les réacteurs MOXés, le combustible contient une certaine quantité de plutonium dont le β est nettement inférieur (**210 pcm**) à celui de l'uranium 235 (650 pcm). En vous inspirant du texte, **refaire le tableau 1 (résolution sous Excel par exemple)**, et donner les valeurs quelques **réactivité "cibles"** pour lesquelles le contrôle commande devra **réagir, et imposer** (1) les interdictions de montée (ou de dilution), (2) les insertions de grappes ou (3) l'alarme.

² Vous pouvez toujours demander des conseils en envoyant un courriel à "neutronique@free.fr"

Partie facultative (cela ne veut pas dire de ne pas tenter...)

490

Compléments et calculs (***, plus difficile)

Les équations de la cinétique (ligne 185) peuvent être résolues en utilisant les **transformées de Laplace**³. Les transformées de Laplace permettent de passer d'un système d'équations différentielles à un système d'équations linéaires, puis par les transformées inverses, de revenir sur les fonctions solutions du problème. Le tableau joint en annexe permet le passage de l'un à l'autre des systèmes. A partir d'une situation supposée critique ($\rho = 0$), d'une population stable dans le temps n_0 (et donc c_0), vous imposerez un "palier" de réactivité $\rho=120$ pcm.

500

- Reprendre le **système des équations de la cinétique**, pour un système sans source ;
- Comme tout système d'équations différentielles, proposer des **conditions initiales** (puissance stable donc situation critique) et **définir un n_0 et un c_0 et leur rapport** ;
- Transformer ces équations par la **transformation de Laplace** ;

Montrer que l'on doit arriver au système suivant :

$$\begin{cases} pN(p) - n_0 = \frac{\rho - \beta}{l^*} N(p) + \lambda C(p) \\ pC(p) - c_0 = \frac{\beta}{l^*} N(p) - \lambda C(p) \end{cases}$$

510

- Résoudre le **système linéaire** en $N(p)$ et $C(p)$ ainsi formé et écrire la solution de la forme :

$$N(p) = \frac{A}{p} + \frac{A_0}{p - \omega_0} + \frac{A_1}{p - \omega_1}$$
 ; retrouver la relation entre les ω , dite équation de Nordheim (voir le document) ; chercher les coefficients A , A_0 et A_1

- Reprendre la **transformée inverse de Laplace** pour établir l'équation donnant $n(t)$ en fonction des paramètres β , λ , l^* , et ρ ;

520

- **Discuter des valeurs** des coefficients des exponentielles et conclure sur ce qui se passe pour un temps très court après le saut de réactivité de 120 pcm.

Fonction initiale (en t)	Transformée de Laplace (en p)
$f(t)$	$F(p)$
A (constante)	A/p
$\frac{df}{dt}(t)$	$p F(p) - f(0)$
$(1/a) \exp(-t/a)$ a constante	$\frac{1}{1 + a p}$

³ Les formules classiques peuvent se retrouver rapidement sur Wikipedia (Internet).