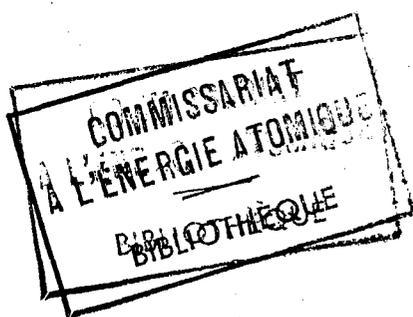


31. 237

- NOTE C.E.A. N° 166 -

Département des Etudes de Piles  
Service de Physique Mathématique



**PROCÉDE DE PILOTAGE D'UNE PILE EN RÉGIME SOUS-CRITIQUE**

par

**J. LACOUR et V. RAJEVSKI**

- Janvier 1957 -

MF / PA / RE

LACOUR J., RAIEVSKI V.

Note C.E.A. n° 166

Piloting procedure for a pile running below critical level.

Summary.- The knowledge of the sub-critical state of a reactor in the course of starting up makes it possible to avoid passing too quickly through the critical state. The problem arises every time the pile is put into action again following, for example, an appreciable modification in the fuel charge, or an accidental fall of the security rods during a run at high flux or at high temperature.

The method described provides a means of knowing at each moment the antireactivity value of the pile by means of a direct-reading instrument mounted on the control board.

This result is obtained by superimposing a fixed frequency oscillation on the normal movement of a control rod, and reading on a phasemeter the dephasing of the neutron density. Theory shows, and experiments confirm, that for a given frequency the dephasing depends only on the lifetime of the fast neutrons, the characteristics of the slow neutrons and the antireactivity of the pile.

The minimum time necessary for an antireactivity determination is equal to a modulation period (from 1 to 4 seconds).

1957

8 pages

LACOUR J., RAIEVSKI V.

Note C.E.A. n° 166

Procédé de pilotage d'une pile en régime sous-critique.

Sommaire.- La connaissance de l'état sous-critique d'un réacteur au cours de son démarrage permet d'éviter un passage trop rapide par l'état critique. Le problème se pose lors de tout redémarrage suivant, par exemple, une modification importante du chargement en combustible ou une chute accidentelle des barres de sécurité dans une marche à haut flux ou à haute température.

Le procédé décrit permet de connaître à chaque instant la valeur de l'antiréactivité de la pile grâce à un appareil à lecture directe monté sur le tableau de contrôle.

Ce résultat est obtenu en superposant au mouvement normal d'une barre de réglage, une oscillation à fréquence fixe, et en lisant sur un phasemètre le déphasage de la densité neutronique. La théorie montre, et l'expérience confirme, que pour une fréquence déterminée, le déphasage dépend uniquement du temps de vie des neutrons prompts, des caractéristiques des neutrons retardés et de l'antiréactivité de la pile.

Le temps minimum nécessaire à la détermination d'une antiréactivité est de l'ordre de quelques périodes de modulation (de 1 à 4 s).

1957

8 pages

## PROCEDE DE PILOTAGE D'UNE PILE EN REGIME SOUS-CRITIQUE

### I.- INTRODUCTION

Dans les méthodes classiques d'approche sous-critique, on détermine l'état critique en extrapolant une courbe représentant l'inverse de la densité des neutrons mesurée en un point en fonction d'un paramètre représentant l'augmentation de réactivité due à une modification de l'état de la pile.

Cette méthode, très précise, s'apparente davantage par ses difficultés à une expérience de physique qu'à un procédé de pilotage. Elle est d'ailleurs inapplicable dans le cas d'un démarrage consécutif à l'arrêt momentané d'une pile à haut flux car la perte de réactivité provoquée par l'accroissement de la concentration en xénon impose un démarrage rapide.

On peut cependant résoudre ce problème à l'aide d'un calculateur analogique donnant l'état de l'empoisonnement d'après le fonctionnement antérieur de la pile. Mais ce calculateur devient très complexe lorsqu'il doit, en plus, faire intervenir l'effet de la température et de tous les absorbeurs. Enfin, si complexe soit-il, un tel calculateur sera parfaitement impuissant devant une variation de réactivité due à un phénomène aléatoire.

L'état sous critique d'une pile peut être étudiée à l'aide d'une source de neutrons pulsée [1] mais la précision sur la mesure de l'antiréactivité par cette méthode décroît avec l'antiréactivité. Elle devient nulle à l'état critique, ce qui interdit l'emploi de cette méthode pour la détermination de cet état. De plus l'intensité de la source pulsée doit être grande devant l'intensité des autres sources existant dans la pile ce qui écarte son emploi dans une pile à modérateur d'eau lourde ou de béryllium ayant déjà fonctionné à haut flux.

### II.- BASE THEORIQUE

La densité modulée des neutrons thermiques représentée par un nombre complexe :  $\frac{dn}{n}$ , et l'amplitude de modulation de la réactivité  $\delta\rho$  sont reliées par

l'expression suivante déduite des équations usuelles de la cinétique des piles :

$$\frac{\delta n}{n} = \delta \rho \frac{1 - i\omega \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + i\omega}}{\rho - i\omega \left( \frac{\theta}{k_e} + \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + i\omega} \right)} \quad (1)$$

La démonstration en est donnée en appendice.

Les caractéristiques des neutrons retardés étant constantes, ainsi que la pulsation " $\omega$ ", l'argument de  $\frac{\delta n}{n}$  ou déphasage ne dépend que de  $\rho$  et de  $\theta$ .

La vie moyenne dépend également de  $\rho$  mais cette dépendance est suffisamment faible pour être négligée dans la mesure du déphasage ; elle s'annule avec la fréquence d'oscillation.

Il est important de remarquer que le déphasage ne dépend pas de l'amplitude  $\delta \rho$ .

Nous pouvons donc admettre avec une très bonne approximation que le déphasage de  $\frac{\delta n}{n}$  ne dépend que de l'antiréactivité de la pile. Il suffit donc de mesurer ce déphasage de façon continue pour suivre la variation d'antiréactivité de la pile.

### III.- DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

#### 1° Modulation

La modulation de la réactivité peut être obtenue en donnant à une plaque de réglage un mouvement d'oscillation linéaire en maintenant le plus possible cette plaque dans son domaine d'efficacité linéaire,  $\rho = f(z)$ .

Le mécanisme de déplacement des plaques se prête en général à la superposition de ce deuxième mouvement et cette transformation n'affecte que des organes extérieurs au bloc pile.

#### 2° Détection

La densité modulée est mesurée par une des chambres d'ionisation servant au contrôle de la puissance pendant le démarrage.

#### 3° Analyse du signal de modulation

Le signal reçu par la chambre est transmis à un bloc "amplificateur passe bas" qui compense automatiquement la composante continue au cours des variations de puissance et amplifie uniquement le fondamental.

Cette compensation permet d'éviter la saturation de la chaîne d'amplification et peut suivre une variation de puissance beaucoup plus rapide que celle permise par la sécurité de fonctionnement.

Le signal sinusoïdal est ensuite transformé en signal carré et dirigé sur un commutateur électronique qui reçoit symétriquement le signal carré de référence de phase nulle. Ce commutateur délivre pendant son temps d'ouverture qui représente le déphasage entre les deux signaux carrés, un certain nombre d'impulsions à front raide, délivrées par un générateur étalon de 1 000 Hz.

Le temps d'ouverture du commutateur peut alors être exploité de trois façons différentes suivant le but et la précision recherchés.

a) Le signal de référence est fixé à la valeur zéro et le commutateur délivre X impulsions par période. Un système de comptage enregistre ces impulsions pendant un nombre entier, réglable, de périodes. Il est alors facile de déduire avec une bonne précision le déphasage moyen correspondant au temps de la mesure. Ce temps dépend de la dérive de la puissance résiduelle et ne peut dépasser quelques minutes.

b) Les impulsions sont dirigées vers un système de comptage double simplifié dont une partie enregistre les impulsions correspondant à un déphasage positif et l'autre celles correspondant à un déphasage négatif. Le générateur du signal carré de référence est alors décalé, par télétransmission, dans le sens opposé à celui du déphasage, de sorte que le commutateur reste fermé et ne délivre aucune impulsion au système double de comptage.

Ce système de comptage est remis à zéro périodiquement par une commande manuelle ou automatique. De la phase du signal de référence on déduit l'antiréactivité qui se lit directement sur un cadran.

Il suffit de maintenir un taux de comptage nul, pour suivre au cours du temps, sur l'indicateur, la variation de l'antiréactivité de la pile jusqu'au régime critique.

La variation de réactivité peut se suivre avec un retard du à l'appareil de mesure très peu supérieur à la durée d'une période d'oscillation (de 1 à 4 s pour une fréquence variant de 1 Hz à 0,25 Hz).

c) Enfin il est possible d'utiliser la durée d'ouverture du commutateur pour agir directement sur la télécommande de décalage du générateur fournissant le signal de référence. Ce procédé est certainement le plus intéressant du point de vue de la conduite de la pile bien qu'il soit moins précis que les deux précédents.

Néanmoins il doit être possible de mesurer un déphasage à 1 degré près aux environs de l'état critique, ce qui correspond par exemple pour EL3, avec une fréquence de modulation égale à 0,5 Hz, à une incertitude de  $\pm 20 \cdot 10^{-5}$ . La description de cet appareillage fera l'objet d'une note ultérieure.

#### RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les mesures ont porté sur la vérification de la formule n° 1. Nous avons utilisé l'appareillage existant à la pile à eau lourde de Châtillon.

La plaque de réglage fin oscille à une fréquence de 0,25 Hz avec une amplitude de  $\pm 50$  mm correspondant dans la partie droite de sa caractéristique à une réactivité de  $\pm 12 \cdot 10^{-5}$ . L'appareillage de détection est un velodyne qui donne la tangente du déphasage [2].

Une antiréactivité variable connue est réalisée à l'aide d'une plaque de compensation ou de la plaque de réglage fin elle-même. Nous avons fait 2 séries de mesures.

1° La plaque de réglage fin produit la modulation, et la plaque de compensation l'antiréactivité variable. Les déphasages mesurés sont représentés sur la figure par des points.

2° La plaque de réglage fin produit à la fois la modulation et l'antiréactivité variable, les déphasages mesurés sont représentés par des triangles.

La courbe théorique a été tracée en prenant pour les neutrons retardés les valeurs indiquées par KEEPIN [3], pour les photoneutrons celles de BERNSTEIN [4] avec les probabilités calculées par ERTAUD et BEAUGE [5] et en tenant compte, en outre, des neutrons retardés provenant de la fission rapide de l'uranium-238 [6].

On peut remarquer, dans la deuxième expérience où les deux fonctions (modulation et antiréactivité variable) ne sont pas séparées que les résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans la première expérience bien que l'amplitude de modulation diminue rapidement vers les deux extrémités de la course de la plaque.

L'amplitude de modulation de la densité neutronique décroît avec la réactivité de la pile et la dispersion des points augmente. Une partie de cette dispersion doit d'ailleurs être imputée à une incertitude sur la valeur de l'antiréactivité de la plaque de compensation.

#### CONCLUSION

L'expérience a vérifié la validité de la formule (1). Le déphasage peut être mesuré avec une assez bonne précision pour une antiréactivité comprise entre 0 et  $500 \cdot 10^{-5}$ .

La formule (1) est valable pour un régime sous-critique statique. Lors d'un démarrage, la densité moyenne croît, mais les densités des émetteurs de neutrons retardés n'atteignent pas leurs valeurs d'équilibre. Cette évolution retarde la

variation du déphasage. Ce retard croit avec la vitesse de montée des barres de réglage et décroît avec la fréquence d'oscillation comme l'indique le calcul du taux de modulation de la densité en régime moyen variable, donné en appendice. Au passage par le régime critique le déphasage est donc différent du déphasage vrai du fait du retard introduit par la pile et le dispositif de mesure. L'erreur qui en résulte sur la réactivité instantanée de la pile peut être ramenée à une valeur faible, négligeable dans un problème de pilotage, si on choisit une fréquence d'oscillation d'autant plus grande que la vitesse de montée des barres est plus élevée.

Dans le cas particulier d'une pile à haut flux où la vitesse de montée des barres peut être de l'ordre de quelques  $10^{-5}$  par seconde, la fréquence d'oscillation de la barre de pilotage peut être insuffisante, ce qui nécessite l'emploi d'un modulateur séparé [7].

#### REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur VIDAL, ingénieur à la pile de Châtillon qui a bien voulu mettre à notre disposition l'appareillage nécessaire à la réalisation de ces mesures.

#### APPENDICE

La fréquence d'oscillation est faible, on peut alors utiliser les équations de la cinétique des piles sous leur forme usuelle (7), (8); définissons les symboles suivants :

$k_{\infty}, \delta k_{\infty}$	facteur de multiplication en milieu infini, et amplitude de la variation sinusoïdale de ce facteur
$L, L_s$	longueurs de diffusion et de ralentissement
$B^2$	laplacien géométrique de la pile
$v, \sum_c$	vitesse moyenne des neutrons thermiques et section de capture moyenne du milieu pour des neutrons de vitesse $v$
$p$	facteur antitrappe
$\beta_i, \lambda_i$	caractéristiques des neutrons retardés
$n$	densité des neutrons thermiques
$C_i$	densité des émetteurs de neutrons retardés
$\delta n, \delta C_i$	amplitude des variations sinusoïdales de ces densités,
$S$	sources constantes de neutrons rapides
$\frac{\omega}{2\pi}$	fréquence d'oscillation des grandeurs variables.

Les équations de la cinétique s'écrivent en théorie de l'âge pour une pile sans réflecteur :

$$-L^2 B^2 n + \left[ k_{\infty} (1-\beta) e^{-L_s^2 B^2} - 1 \right] n + \frac{pe}{v \Sigma_c} \sum \lambda_i C_i + \frac{pe}{v \Sigma_c} S = \frac{1}{v \Sigma_c} \frac{dn}{dt}$$

$$- \lambda_i C_i + k_{\infty} \beta_i \frac{v \Sigma_c}{p} n = \frac{d C_i}{dt}$$

Considérons le cas où on superpose à une variation d'ensemble du facteur de multiplication, une variation sinusoïdale. Le facteur de multiplication infini s'écrit :

$$(a.1) \quad k_{\infty} = k_{\infty}(t) + \delta k_{\infty} e^{i\omega t}$$

Cherchons une solution de la forme :

$$(a.2) \quad \begin{cases} n = n(t) (1 + \epsilon_n e^{i\omega t}) \\ C_i = C_i(t) (1 + \epsilon_i e^{i\omega t}) \end{cases}$$

Les termes  $\epsilon_n$  et  $\epsilon_i$  ne dépendent que de la fréquence.

Par la suite on écrira :

$$(a.3) \quad \begin{cases} n(t) \epsilon_n = \delta n \\ C_i(t) \epsilon_i = \delta C_i \end{cases}$$

Définissons la réactivité de la pile par la relation suivante :

$$\rho = \frac{k_e - 1}{k_e}$$

$k_e = L_s^2 B^2$

avec :  $k_e = \frac{k_{\infty} e^{-L_s^2 B^2}}{1 + L^2 B^2}$

et :  $\delta \rho = \frac{\delta k_{\infty}}{k_{\infty}}$

et la vie moyenne des neutrons thermiques par la relation :

$$\theta = \frac{1}{v \Sigma_c (1 + L^2 B^2)}$$

Si on porte les expressions (a.1.2.3) dans les équations de la cinétique, on obtient, en identifiant les termes dépendant de la fréquence, la solution sous la forme :

$$(a.4) \quad \frac{\delta n}{n} = -\delta\rho \frac{1 - \sum \frac{\beta_i (i\omega + \frac{C'_i}{C_i})}{\lambda_i + \frac{C'_i}{C_i} + i\omega}}{\rho - \frac{\theta}{k_e} \frac{n'}{n} - \sum \frac{\beta_i \frac{C'_i}{C_i}}{\lambda_i + \frac{C'_i}{C_i} + i\omega} - i\omega \left[ \frac{\theta}{k_e} + \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + \frac{C'_i}{C_i} + i\omega} \right]}$$

$n'$  et  $C'_i$  sont les dérivées en fonction du temps des densités moyennes.

$$\text{avec : } \frac{C'_i}{C_i} = \frac{\beta_i k_{\infty}}{p} v \sum_C n - \lambda_i C_i$$

Quand l'équilibre est atteint on a :

$$\lambda_i C_{i0} = \frac{\beta_i k_{\infty} v \sum_C n}{p} \quad \text{d'où l'on tire :}$$

$$\frac{C'_i}{C_i} = \lambda_i \frac{C_{i0}}{C_i} - \lambda_i$$

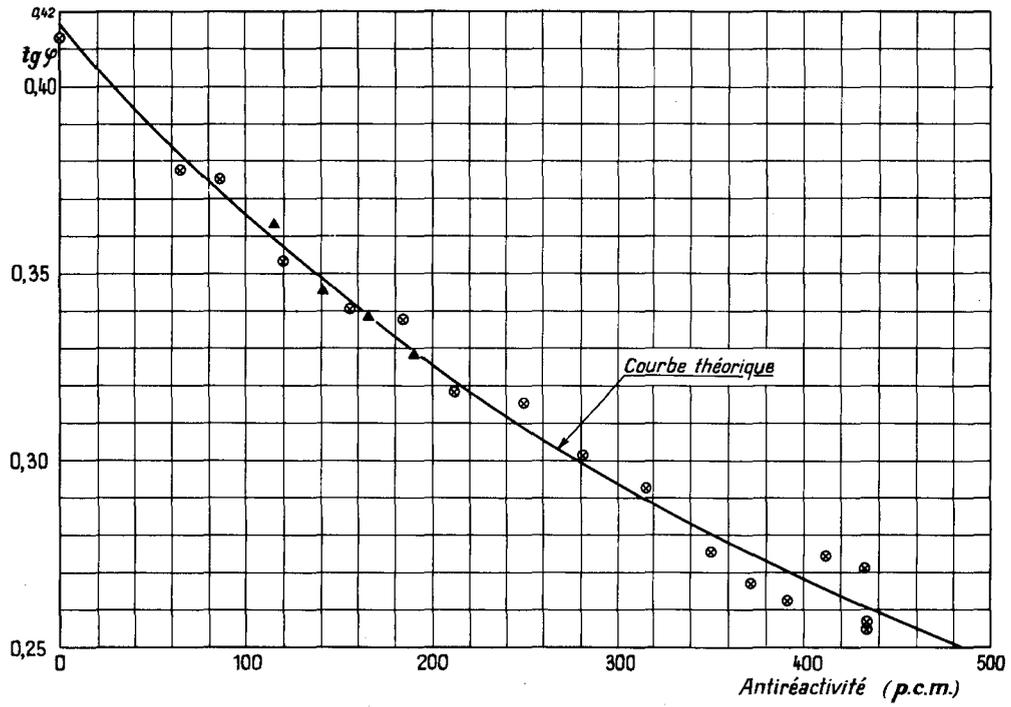
$$\text{et } \lambda_i + \frac{C'_i}{C_i} = \lambda_i \frac{C_{i0}}{C_i}$$

Si la réactivité reste constante en moyenne, la solution (a.4) devient :

$$(1) \quad \frac{\delta n}{n} = -\delta\rho \frac{1 - i\omega \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + i\omega}}{\rho - i\omega \left( \frac{\theta}{k_e} + \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + i\omega} \right)}$$

REFERENCES

- [ 1 ] SJOSTRAND N.G. - Conférence de Genève, rapport P/789
- [ 2 ] POTTIER J. - Un analyseur harmonique analogique. Onde électrique  
t XXXV, octobre 1955, 343
- [ 3 ] KEEPIN - Physics and Mathematics, (Progress in Nuclear Energy)
- [ 4 ] BERNSTEIN - Rapport M.O.N.P. 172 du Clinton Laboratory
- [ 5 ] ERTAUD A., BEAUGE R. - Caractéristiques physiques de la pile de Châtillon  
modifiée. Octobre-décembre 1953
- [ 6 ] RAIEVSKI V., TANGUY P. - Note C.E.A. n° 161 - Effets des fissions rapides  
sur la cinétique d'un réacteur thermique.
- [ 7 ] RAIEVSKI V. - C.R. acad. Sc., 1953, 237, 1513-1515
- [ 8 ] GLASSTONE, EDLUND - Elements of Nuclear Reactor Theory
- [ 9 ] LUNDBY A. - Journal of Nuclear Energy, 1, n° 1



- Fig. 1 -

Mesure d'antiréactivité par modulation en régime sous-critique sur ZOE.

Fréquence de modulation : 0,25 Hz ; Amplitude :  $\pm 12$  p.c.m.