

## Régimes transitoires dans un réacteur à eau lourde

V. Raievski

► **To cite this version:**

V. Raievski. Régimes transitoires dans un réacteur à eau lourde. J. Phys. Radium, 1953, 14 (7-9), pp.473-477. <10.1051/jphysrad:01953001407-9047300>. <jpa-00234776>

**HAL Id: jpa-00234776**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00234776>**

Submitted on 1 Jan 1953

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## RÉGIMES TRANSITOIRES DANS UN RÉACTEUR A EAU LOURDE

Par V. RAIEVSKI,

Division des Constructions électriques (1),  
Centre d'Études nucléaires de Saclay (Seine-et-Oise).

**Sommaire.** — On étudie la variation de la puissance et de la réactivité d'un réacteur à eau lourde quand on lève d'une façon continue les plaques de démarrage.

On démontre que durant le régime subcritique (réactivité négative), la puissance est déterminée par la réactivité, et par l'intensité des sources de photoneutrons résultant de la marche antérieure du réacteur.

Quand, au cours de la montée des plaques, le réacteur passe par le régime critique (réactivité nulle), on constate que la puissance atteinte est indépendante de la réactivité initiale.

Durant le régime surcritique (réactivité positive), l'élévation de température des barres d'uranium ralentit l'accroissement de réactivité produite par le retrait des plaques. La puissance tend alors vers une valeur qui ne dépend plus que du régime de refroidissement du réacteur et de la réactivité disponible.

Le but de cette étude est de choisir une vitesse de montée, telle que la réactivité reste constamment inférieure à une valeur au delà de laquelle le pilotage du réacteur est réputé difficile. Ce résultat n'est plus valable si l'intensité des sources est insuffisante, ce qui a lieu pendant la première divergence et après un arrêt de longue durée.

**1. Introduction.** — Dans un réacteur de puissance, à eau lourde, la radioactivité induite pendant la marche antérieure produit des photoneutrons qui, à l'arrêt, entretiennent une puissance notable, décroissant lentement avec le temps.

Pour atteindre des puissances élevées, on rend le réacteur surcritique. Pour une valeur constante, positive de la réactivité, la puissance croît, ainsi que la température des barres d'uranium, et le nombre de neutrons en cours de ralentissement, capturés par l'uranium 238 augmente; il en résulte une diminution de la réactivité. Ce processus conduit à un état d'équilibre où la puissance atteinte dépend du régime de refroidissement et de la position des plaques. Il faut évidemment que le dispositif de refroidissement soit suffisamment efficace pour permettre le fonctionnement à cette puissance.

Des mesures faites sur un réacteur montrent que, lorsqu'on lève une plaque de démarrage, la réactivité croît linéairement avec la position de la plaque, pour atteindre une valeur constante quand celle-ci est en dehors du milieu multiplicateur. Dans le cas où la plaque est entraînée par un moteur à vitesse constante, l'accroissement de la réactivité due au retrait de la plaque est donc proportionnel au temps. On étudie ici la variation de puissance et de réactivité qui en résultent.

**2. Puissance résiduelle.** — L'énergie libérée à l'arrêt dans le réacteur est due à deux phénomènes caractérisés par des périodes différentes :

— l'énergie provenant des fissions provoquées par les neutrons différés qui disparaissent en quelques minutes après l'arrêt du réacteur;

— l'énergie due à la radioactivité des produits de fission, qui décroît lentement pendant plusieurs heures. Elle se présente sous deux formes : l'énergie due aux radioactivités ( $\beta$ ,  $\gamma$ ), et celle provenant des fissions provoquées par les photoneutrons. Nous considérons ici cette dernière forme. Elle dépend de la réactivité et détermine la puissance du réacteur dans la période du démarrage.

La puissance résiduelle est proportionnelle à la puissance  $P_A$  du réacteur avant l'arrêt. Elle dépend du temps  $t_1$  de fonctionnement à cette puissance, de la durée  $t_2$  de l'arrêt et de la réactivité  $\rho_r$ . On peut écrire d'une façon approchée

$$P_r = f(\rho_r) f_1(t_1) f_2(t_2) P_A. \quad (2.1)$$

Nous avons mesuré le rapport  $\frac{P_r}{P_A}$  pour un réacteur à eau lourde, en utilisant des plaques photographiques chargées au lithium. Dans les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} P_A &= 5 \text{ kW}, \\ \rho_r &= -3 \cdot 10^{-2}, \\ t_1 &= 4 \text{ h}. \end{aligned}$$

Les résultats sont donnés dans le tableau I.

TABLEAU I.

$t_2$ ....	0	7 mn	1h 45 mn	3h 35 mn	5h 25 mn	26h 35 mn
$\frac{P_r}{P_A}$ ...	1	$135 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$

(1) M. Raievski est actuellement au Service de la Pile de Saclay.

Nous n'avons pas déterminé la fonction  $f_1(t_1)$ , mais on peut dire que c'est une fonction croissante, qui tend vers l'unité après quelques heures de fonctionnement, quand l'équilibre radioactif s'est établi.

**3. Régime subcritique.** — Nous donnons les relations entre le nombre total  $N$  de neutrons contenus à un instant donné dans le réacteur, le coefficient de multiplication  $k$  ( $k = 1 + \rho$ ) et les sources  $S$  autres que celles dues aux fissions induites.

Soit  $\tau_0$  le temps moyen qui s'écoule entre la naissance et la disparition par capture d'un neutron.

Soit  $\beta$  la fraction des neutrons latents produits au cours de la fission.

Pour ces neutrons de vie moyenne  $\lambda_i^{-1}$  on définit :  $\beta_i$ , fraction de ces neutrons produits au cours de la fission ( $\beta = \sum_i \beta_i$ );

$c_i$ , le nombre de ces neutrons contenus à un instant donné dans le réacteur.

Ces quantités sont liées par les relations suivantes [1] :

$$(I) \begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{k(1-\beta) - 1}{\tau_0} N + \sum_i \lambda_i c_i + S, & (3.1) \\ \frac{dc_i}{dt} = \frac{k\beta_i}{\tau_0} N - \lambda_i c_i. & (3.2) \end{cases}$$

Étudions ce système d'équations dans les cas particuliers suivants :

1° *La réactivité est constante.* — La solution du système est

$$\begin{aligned} N &= \frac{S\tau_0}{\rho}, \\ c_i &= \frac{k\beta_i N}{\lambda_i \tau_0} \end{aligned}$$

où

$$k = 1 + \rho.$$

Puisque la puissance  $P$  est proportionnelle au nombre  $N$  de neutrons, on voit que le produit  $P\rho$  est proportionnel à  $S\tau_0$ . La fonction  $f(\rho_r)$  de l'équation (2.1) est donc de la forme  $\frac{1}{\rho_r}$ , et en incorporant le facteur de proportionnalité dans une des fonctions  $f_1$  ou  $f_2$ , on peut écrire

$$P\rho = P_r \rho_r = f_1(t_1) f_2(t_2) P_A. \quad (2.1 bis)$$

2° *La réactivité varie lentement.* — L'approximation au premier ordre consiste à écrire (3.2) sous la forme

$$\lambda_i c_i = \frac{k\beta_i N}{\tau_0} - \frac{\beta_i}{\tau_0} \frac{d(kN)}{dt}.$$

Portons cette valeur dans (3.1), on obtient la relation

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho N}{\tau} + \frac{S\tau_0}{\tau}, \quad (3.3)$$

où l'on a posé

$$\tau = \tau_0 + \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i}.$$

*Cas particulier : La réactivité varie suivant la loi linéaire :*

$$\rho = \rho_r + at,$$

où  $t$  est le temps et  $a$  une constante proportionnelle à la vitesse de montée des plaques.

L'équation (3.3) s'écrit

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho}{\alpha\tau} N + \frac{S\tau_0}{\alpha\tau}, \quad (3.3 bis)$$

avec la condition initiale

$$N = N_r = \frac{S\tau_0}{\rho_r} \quad \text{pour } \rho = \rho_r \quad (\text{solution à l'équilibre}).$$

La solution de l'équation (3.3 bis) est

$$\frac{N}{N_r} = e^{-x^2 - c^2} + \sqrt{\pi} x_r e^{x^2} (\operatorname{erf} x - \operatorname{erf} x_r),$$

où

$$x = -\frac{\rho}{\sqrt{2\alpha\tau}}.$$

La fonction erf est définie par la relation

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy.$$

Quand la réactivité s'annule, la valeur atteinte par  $N$  est  $N_0$ , donnée par

$$\frac{N_0}{N_r} = e^{-c^2} - \sqrt{\pi} x_r \operatorname{erf} x_r. \quad (3.4)$$

Les valeurs calculées du rapport  $\frac{N_0}{N_r}$ , sont données pour un réacteur à eau lourde ( $\tau = 0,14$  s), en fonction de diverses valeurs de  $\rho_r$  et de  $a$  dans le tableau II.

TABLEAU II.

$10^5 a.$	$-10^3 \rho_r \dots$	1000.	2000.	2400.	3000.
0,5.....		15	30	36	45
1.....		10,5	21	25	31,5
2.....		7,5	15	18	22,5

La condition  $x_r \gg 1$  (réactivité initiale grande en valeur absolue, faible vitesse de montée des plaques), est généralement remplie, ce qui est le cas pour les valeurs données dans le tableau II.

Dans ces conditions, l'expression (3.4) devient

$$\frac{N_0}{N_r} = -\sqrt{\pi} x_r,$$

d'où l'on tire, en remplaçant  $x_r$  par  $-\frac{\rho_r}{\sqrt{2\alpha\tau}}$ , et

le rapport  $\frac{N_0}{N_r}$  par  $\frac{P_0}{P_r}$ .

$$P_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2a\tau}} P_r \rho_r \quad (3.5)$$

Remplaçons  $P_r \rho_r$  par l'expression (2.1 bis), d'où

$$P_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2a\tau}} f_1(t_1) f_2(t_2) P_A.$$

Cette relation montre que lorsque le réacteur passe par le régime critique au cours de la montée des plaques, la puissance atteinte  $P_0$  ne dépend pas de la réactivité initiale. Ce résultat est intéressant, car la réactivité avant le démarrage est inconnue.

**Application.** — Supposons qu'un réacteur ait fonctionné quelques heures à 1500 kW, puis a été arrêté pendant 24 h. On veut connaître la puissance atteinte quand on passe par le régime critique, si la vitesse de retrait des plaques correspond à  $a = 10^{-5}$  par seconde.

Utilisons l'expression (3.5) qui s'écrit

$$\frac{P_0}{P_A} = \sqrt{\frac{\pi}{2a\tau}} \frac{P_r}{P_A} \rho_r$$

et les valeurs du tableau I qui ont été mesurées pour  $\rho_r = -3.10^{-2}$ . Le produit  $\frac{P_r \rho_r}{P_A}$  ne dépend pas de  $\rho_r$  comme nous l'avons vu. Après 24 h, on a

$$\frac{P_r \rho_r}{P_A} = 3,5.10^{-7}$$

(obtenu par interpolation des valeurs du tableau I), d'autre part :

$$\sqrt{\frac{\pi}{2a\tau}} = \sqrt{\frac{\pi}{2.10^{-5}.0,14}} = 10^3,$$

d'où

$$P_0 = 1500.10^3.3,5.10^{-7} = 0,5 \text{ kW.}$$

**4. Régime surcritique.** — La puissance en régime surcritique est toujours suffisamment élevée pour que l'on puisse négliger l'effet des sources.

**1° La réactivité est constante.** — La solution du système (I) est une somme d'exponentielles de la forme

$$N = \sum_i a_i e^{p_i t},$$

où les  $p_i$  sont les racines de l'équation

$$p = \frac{k(1-\beta) - 1}{\tau_0} + \sum_i \frac{k\beta_i \lambda_i}{\tau_0(p + \lambda_i)} \quad (4.1)$$

La condition  $k(1-\beta) - 1 < 0$  doit toujours être satisfaite pour éviter un fonctionnement incontrôlable. Une seule racine de l'équation (4.1) est alors positive, et la puissance croît suivant la loi [2] :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{N}{N_0} = e^{p t}.$$

Sur la figure 1, on a porté  $p$  en fonction de la réactivité  $\rho$ .

**2° La réactivité varie lentement.** — La solution du système (I) se met alors sous la forme [3] :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{P}{P_0} = e^{\int_0^t p(y) dy},$$

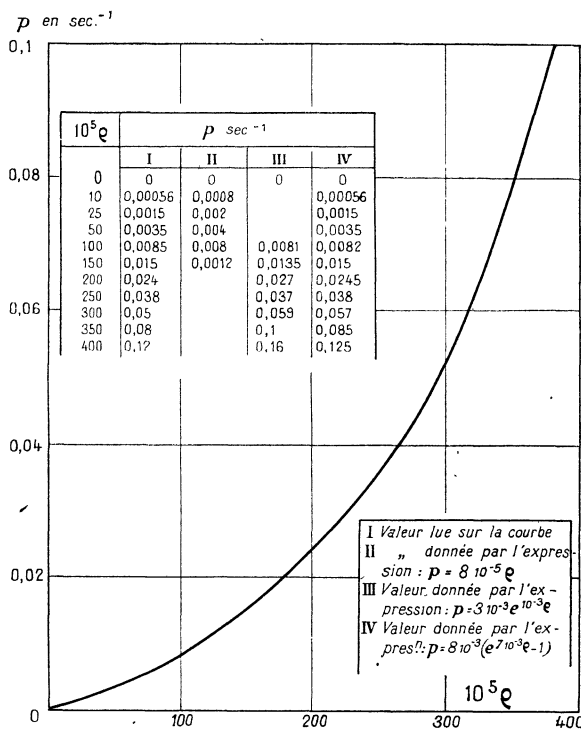


Fig. 1. — Courbe donnant l'inverse du temps de montée de la pile en fonction de la réactivité.

On a porté dans le tableau les valeurs des expressions approchées  $p = f(\rho)$  utilisées dans le calcul.

ou la forme équivalente

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = p. \quad (4.2)$$

Prenons comme origine du temps l'instant où le réacteur passe par le régime critique, et comme origine des températures celle de l'uranium à cet instant. La réactivité résultant du mouvement des plaques et de l'élévation de la température s'écrit

$$\rho = at - bT.$$

On a admis pour  $b$  la valeur

$$b = 2,5.10^{-5} \text{ par } ^\circ\text{C.}$$

Soit

$T_f$ , la température moyenne du fluide réfrigérant;  
 $C$ , la capacité calorifique totale de l'uranium;

$\alpha$ , le coefficient de transmission de chaleur, uranium-fluide réfrigérant;

$P$ , la puissance du réacteur à l'instant  $t$ .

Dans le temps  $dt$ , les fissions produites dans l'uranium dégagent une quantité de chaleur  $dQ = P dt$ .

Dans le même temps, la quantité de chaleur  $CdT$  est absorbée par l'uranium dont la température

Le bilan s'écrit

$$\frac{dT}{dt} + \frac{\alpha}{C} T = \frac{1 + \alpha m}{C} (P - P_0).$$

Posons

$$\frac{C}{\alpha} = \theta, \quad \frac{1 + \alpha m}{C} = \frac{K}{\theta},$$

d'où

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\theta} = \frac{K}{\theta} (P - P_0). \quad (4.4)$$

La signification des coefficients  $\theta$  et  $K$  est immédiate :  $\theta$  est la constante de temps thermique du réacteur.  $K$  indique la température de l'uranium à une puissance donnée quand l'équilibre thermique est établi. Ces deux coefficients dépendent du régime de refroidissement.

La puissance et la température sont alors données par le système (II) :

$$\begin{cases} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \rho, & (4.2) \\ \rho = at - bT, & (4.3) \\ \frac{dT}{dt} + \frac{T}{\theta} = \frac{K}{\theta} (P - P_0). & (4.4) \end{cases}$$

La solution de ce système a été obtenue par une méthode d'approximation, et les résultats sont traduits sous forme de courbes sur la figure 2. Les calculs sont effectués pour les valeurs suivantes [4] :

$$a = 10^{-5} \text{ par seconde}; \quad \theta = 20 \text{ s}; \quad K = 0,135^\circ\text{C/kW}.$$

La réactivité croît d'abord linéairement, puis l'effet de température devient prépondérant, la réactivité décroît et tend à s'annuler. On peut calculer aisément le comportement asymptotique de la puissance, en effet, écrivons que la réactivité tend vers zéro dans l'équation (4.3). On en tire

$$T \rightarrow \frac{a}{b} t,$$

négligeons  $\frac{dT}{dt}$  et  $P_0$  dans l'équation (4.4), d'où

$$T \rightarrow KP.$$

En comparant ces deux relations, on voit que la puissance croît suivant la loi linéaire

$$P \rightarrow \frac{a}{Kb} t.$$

Avec les valeurs numériques choisies, la puissance croît de 3 kW/s.

Sur la figure 2 on a tracé trois courbes représentant la puissance en fonction du temps. Ces courbes correspondent aux valeurs suivantes de  $P_0$  :

$$0,1, 0,5 \text{ et } 5 \text{ kW}.$$

Toutes les trois tendent asymptotiquement vers la même droite.

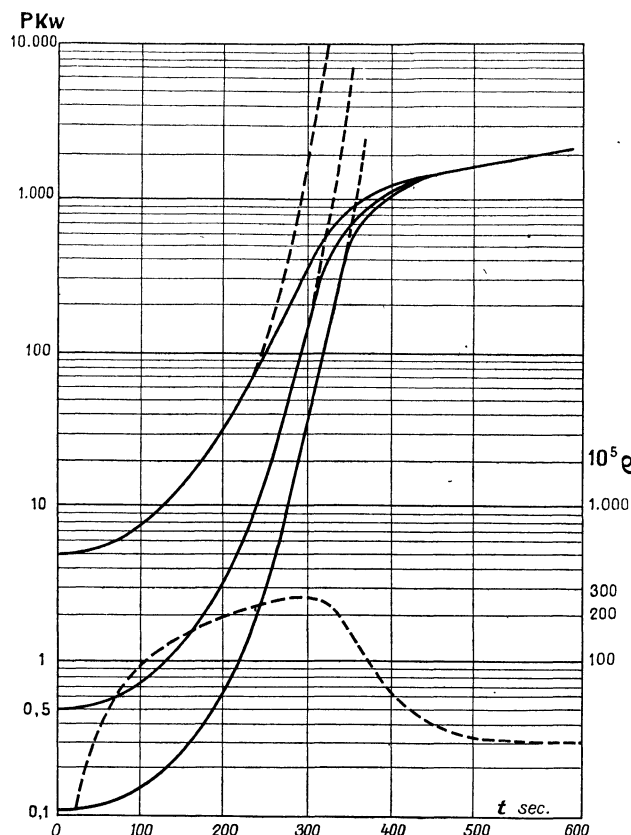


Fig. 2.

Les courbes en traits pleins indiquent la puissance en fonction du temps pendant le régime surcritique; elles sont tracées pour les valeurs suivantes de  $P_0$  : 0,1, 0,5 et 5 kW. Les prolongements en tirets de ces courbes indiquent la variation de puissance dans le cas où il n'y a pas d'effet de température. On trace également en pointillés la courbe représentant la variation de la réactivité en fonction du temps pour la valeur 0,1 kW de  $P_0$ .

s'élève de  $dT$ , et la quantité  $\alpha(T - T_f)$  est transmise au fluide réfrigérant. Le bilan s'écrit

$$C dT + \alpha(T - T_f) dt = P dt.$$

Faisons l'hypothèse que la variation de température du fluide est petite devant celle de l'uranium. On peut considérer avec une bonne approximation que  $T_f$  est proportionnel à la puissance. Appelons  $m$  le coefficient de proportionnalité, et tenons compte des conditions initiales :

$$T = 0 \quad \text{pour} \quad P = P_0.$$

Pour une valeur de  $P_0$  supérieure à 0,1 kW, la réactivité reste constamment inférieure à  $3 \cdot 10^{-3}$ .

**Conclusion.** — Cette étude montre que pour un réacteur à eau lourde dont l'arrêt n'a pas excédé quelques jours et pour une vitesse de montée des

plaques convenablement choisie, on peut effectuer un démarrage sans précautions spéciales.

**Remerciements.** — Je tiens à remercier M. Yvon pour les conseils qu'il a bien voulu me donner.

Manuscrit reçu le 13 février 1953.

#### BIBLIOGRAPHIE.

- [1] The Science and Engineering of Nuclear Power, vol. I, Addison, Wesley Press Inc., Cambridge, 1947.
- [2] ERTAUD A., BEAUGE R., FAUQUEZ H. et VAUTREY L. — Étude expérimentale de la cinétique de la pile de Châtillon. *J. Physique Rad.*, 1951, **12**, 17 A.
- [3] HURWITZ H. — Derivation and Integration of the Pile Kinetic Equation. *Nucleonics*, 1949, 61.
- [4] Les valeurs de  $\theta$  et  $K$  nous ont été communiquées par MM. Le Meur et Roche.
- 
-