

Devoir surveillé d'écoulements diphasiques du 25 mars 2009

Hervé Lemonnier, DTN/SE2T/LIEX, CEA/Grenoble, 38054 Grenoble cedex 9, France
Phone: +33 (0)4 38 78 45 40, Fax: +33 (0)4 38 78 50 45, E-Mail: *herve.lemonnier@cea.fr*

Modalités

Le devoir comporte, d'une part, des questions de cours et un problème dont certaines questions sont indépendantes. Tous les documents et moyens de calcul sont autorisés. On demande des réponses justifiées et concises qui peuvent éventuellement être accompagnées d'un croquis dont la légende sera bien explicitée. Il *est inutile de détailler* les développements analytiques pourvu que le passage d'une expression à la suivante soit expliqué avec soin.

1 Relation entre titre et taux de vide

En considérant un écoulement en conduite dans l'approche monodimensionnelle, montrer en utilisant les définitions du débit masse de chaque phase et du titre massique, que le taux de présence moyen de gaz dans la section, α et le titre x de l'écoulement sont liés par la relation suivante,

$$\alpha = \frac{x}{x + (1 - x) \frac{\rho_G v_G}{\rho_L v_L}}. \quad (1)$$

où $v_L = \langle w_L \rangle_2$ et $v_G = \langle w_G \rangle_2$ sont les vitesses moyennes dans la section du liquide et du gaz, ρ est la masse volumique.

2 Variations de pression

Indiquer comment les variations de pression dans une conduite monodimensionnelle sont modélisées. On considérera les écoulements liquide-vapeur en général et les écoulements dont le titre évolue en raison d'un chauffage à flux constant en particulier.

3 Fonctionnement d'un réacteur à eau bouillante

Un réacteur à eau bouillante (REB) permet de produire directement, par le chauffage nucléaire, la vapeur qui sera utilisée à la turbine pour produire de l'énergie électrique. Le cycle du REB est donc un cycle direct, voir figure 1. Le problème propose d'étudier les écoulements dans la cuve d'un tel réacteur dans les deux configurations suivantes :

- l'évacuation de la puissance du coeur est assurée par un débit d'eau imposé par des pompes de recirculation à rotor noyé situées en fond de cuve,
- l'évacuation de la puissance du coeur est assurée entièrement par de la convection naturelle dans la cuve.

Conditions de fonctionnement. Les conditions de fonctionnement du réacteur sont les suivantes,

- Puissance thermique, $W = 3900$ MW.
- Pression de fonctionnement, $p = 7,00$ MPa.

On supposera que la température à l'intérieur de la cuve est constante et égale à la température de saturation à la pression de fonctionnement p .

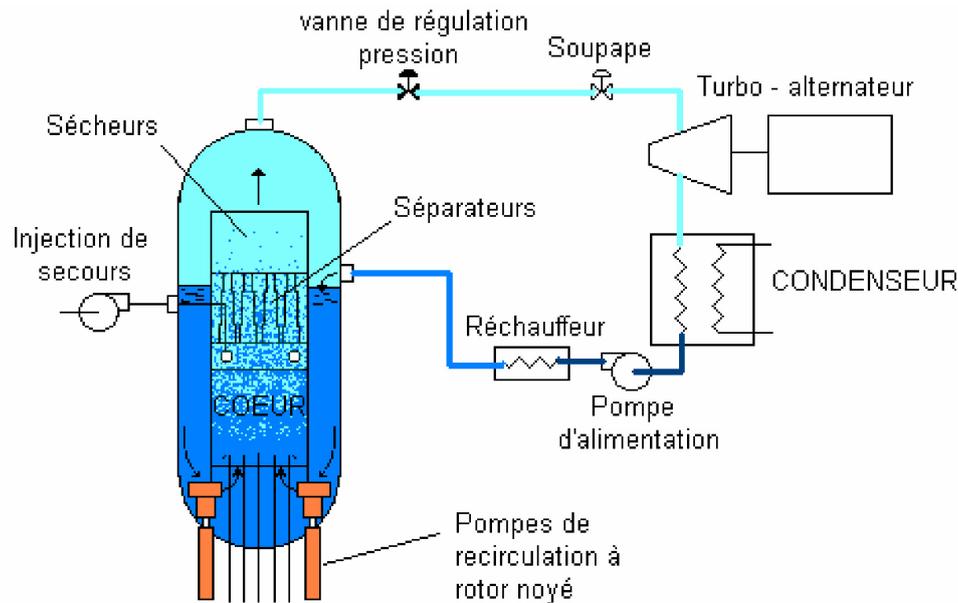


Figure 1: Description schématique d'un réacteur à eau bouillante fonctionnant en convection forcée.

Géométrie du coeur. Les caractéristiques du coeur du réacteur sont les suivantes

- Nombre d'assemblages combustibles, $N_A = 872$.
- Nombre de crayons combustibles par assemblage, $N_C = 62$.
- Diamètre des crayons combustibles $D_C = 12,30$ mm.
- Hauteur des crayons combustibles $L_C = 3,70$ m.
- Section de passage du fluide dans le coeur $S_C = 8,30$ m².

Propriétés thermodynamiques et de transport. Les propriétés physiques de l'eau à $p = 7,00$ MPa sont les suivantes,

- Enthalpie du liquide à saturation, $h_{Lsat} = 1267,4$ kJ/kg.
- Enthalpie de la vapeur à saturation, $h_{Vsat} = 2773,5$ kJ/kg.
- Volume spécifique du liquide à saturation, $v_{Lsat} = 0,0013513$ m³/kg.
- Volume spécifique de la vapeur à saturation, $v_{Vsat} = 0,02737$ m³/kg.
- Température de saturation $T_{sat} = 285,7^\circ\text{C}$.

3.1 Débit de refroidissement du coeur

Pour éviter l'assèchement le long des crayons combustibles, le refroidissement du réacteur est assuré par échange thermique en ébullition nucléée. On considère que le titre massique de vapeur en sortie du coeur, x_C , est de 15%. En écrivant le bilan d'énergie du coeur, calculer le débit massique de refroidissement M nécessaire au refroidissement du combustible. M est le débit masse de liquide entrant dans le coeur.

3.2 Taux de vide à la sortie du coeur

On considère l'écoulement dans le coeur comme monodimensionnel. Déterminer le taux de présence de vapeur moyen à la sortie du coeur. On donne le glissement $\gamma = v_G/v_L = 1,5$ à la sortie du coeur. On notera α_C cette valeur.

3.3 Variation de pression au travers du coeur

On supposera que la puissance de chauffage est répartie uniformément dans le coeur. On propose de déterminer la variation de pression au passage du coeur que l'on considérera comme un conduit monodimensionnel. Le coeur possède une hauteur égale à la longueur des crayons et on ne considérera que le périmètre des crayons combustibles pour évaluer le diamètre hydraulique. Déterminer la variation de pression au travers du coeur. Pour cela on propose de déterminer successivement,

3.3.1 La variation de pression par accélération

3.3.2 La variation de pression par frottement

On utilisera le modèle de Thom et on justifiera ce choix. Pour calculer la perte de pression monophasique de référence, on utilisera une valeur du coefficient de frottement constant,

$$C_F \triangleq \frac{\tau_W}{\frac{1}{2}\rho w^2} = \frac{0,015}{4} \quad (2)$$

où τ_W est la contrainte de frottement pariétale. On a reproduit le graphe donné en cours à la figure 2.

3.3.3 La variation de pression hydrostatique

Pour simplifier, on considérera que le taux de vide évolue linéairement dans le coeur et que le taux de présence moyen de la vapeur dans le coeur est égal à la moitié de la valeur en sortie.

3.3.4 La variation de pression à travers le coeur

On justifiera soigneusement le signe de chaque contribution en utilisant la convention $\Delta p = p_S - p_E$ (sortie moins entrée) pour chaque contribution et le total.

3.4 Variation de pression au travers des séparateurs

Les séparateurs sont placés au dessus du coeur et assurent la séparation du liquide et de la vapeur. En sortie de séparateur on considère les hypothèses suivantes.

- L'écoulement composé de vapeur pure.
- La vitesse axiale du liquide nulle.
- Le liquide s'écoule vers l'espace annulaire qui entoure le coeur, appelé le *downcomer*, où l'eau se mélange à celle qui revient du condenseur (eau alimentaire) pour retourner dans le coeur.

On considérera les séparateurs comme un espace libre et on y négligera la perte de pression par frottement et par accélération. Les caractéristiques de ce composant sont les suivantes,

- Hauteur des séparateurs, $L_S = 3,40$ m.
- Section de passage du fluide, $S_S = 20$ m².
- Section de passage du fluide à l'entrée des séparateurs égale à celle en sortie du coeur, $S_C = 8,30$ m².

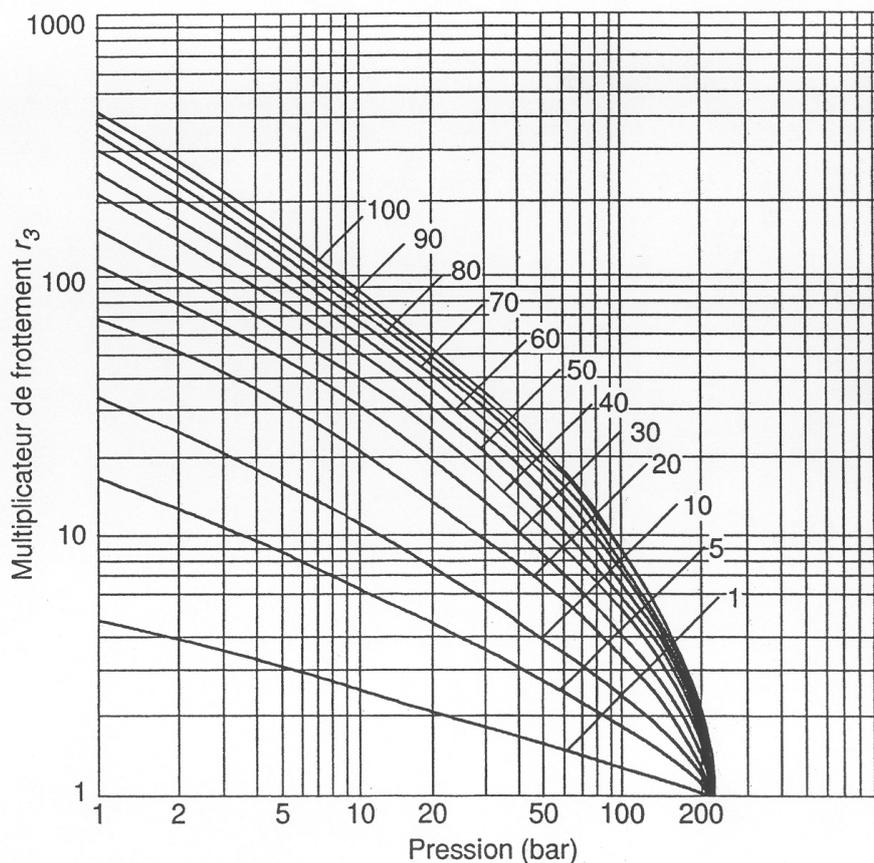


Figure 2: Perte de pression par frottement en écoulement bouillant avec chauffage rapportée à la perte de pression monophasique pour le même débit de liquide seul, selon le modèle de Thom. L'abscisse du graphe est la pression en bar et il est paramétré en titre de sortie x_s exprimé en %. On rappelle que $r_3 = \frac{1}{x_s} \int_0^{x_s} \Phi_{Lo}^2 dx$.

3.4.1 Singularité à l'entrée

A l'entrée des séparateurs la section de passage varie brusquement de S_C à S_S . En utilisant le bilan de quantité de mouvement au passage de cette singularité, montrer que la variation de pression est donnée par l'expression suivante,

$$p_S - p_E = \Delta p = G_C^2 \left(\frac{x_C^2}{\alpha_C \rho_V} + \frac{(1 - x_C^2)}{(1 - \alpha_C) \rho_L} \right) \left(1 - \frac{S_C}{S_S} \right) \left(\frac{S_C}{S_S} \right) \quad (3)$$

où $G_C = M/S_C$ est la vitesse massique du mélange en sortie de coeur, x_C et α_C sont respectivement le titre massique et le taux de présence de la vapeur en sortie du coeur.

On identifiera les hypothèses permettant d'arriver à ce résultat, puis on calculera la variation de pression singulière à l'entrée des séparateurs.

3.4.2 Variation de pression hydrostatique

Pour estimer la variation de pression hydrostatique dans les séparateurs, on considérera un taux de vide moyen et uniforme dans le séparateur égal à la moyenne entre l'entrée et la sortie des séparateurs.

3.4.3 Variation de pression totale

Déduire des résultats précédents la variation de pression au passage des séparateurs.

3.5 Fonctionnement en convection forcée

On modélise l'écoulement dans le réacteur en considérant quatre éléments : le coeur, les séparateurs, le downcomer et les pompes, voir figure 3(a). Les caractéristiques géométriques du downcomer sont les suivantes.

- Hauteur, $L_D = 7,10$ m.
- Section de passage du fluide, $S_D = 3,60$ m².

En régime nominal, on considérera que la variation de pression entre l'entrée du coeur et la sortie des séparateurs est de 0,7124 bar.

3.6 Débit d'eau alimentaire

En régime permanent, déterminer la valeur du débit masse d'alimentation en eau du réacteur, M_A .

3.7 Variation de pression dans le downcomer

En négligeant la perte de pression par frottement dans le downcomer, calculer la variation de pression aux bornes de la pompe.

3.8 Puissance de pompage

Calculer la puissance de pompage. En considérant un rendement de 30% calculer la puissance électrique consommée par le fonctionnement des pompes.

3.9 Fonctionnement en convection naturelle

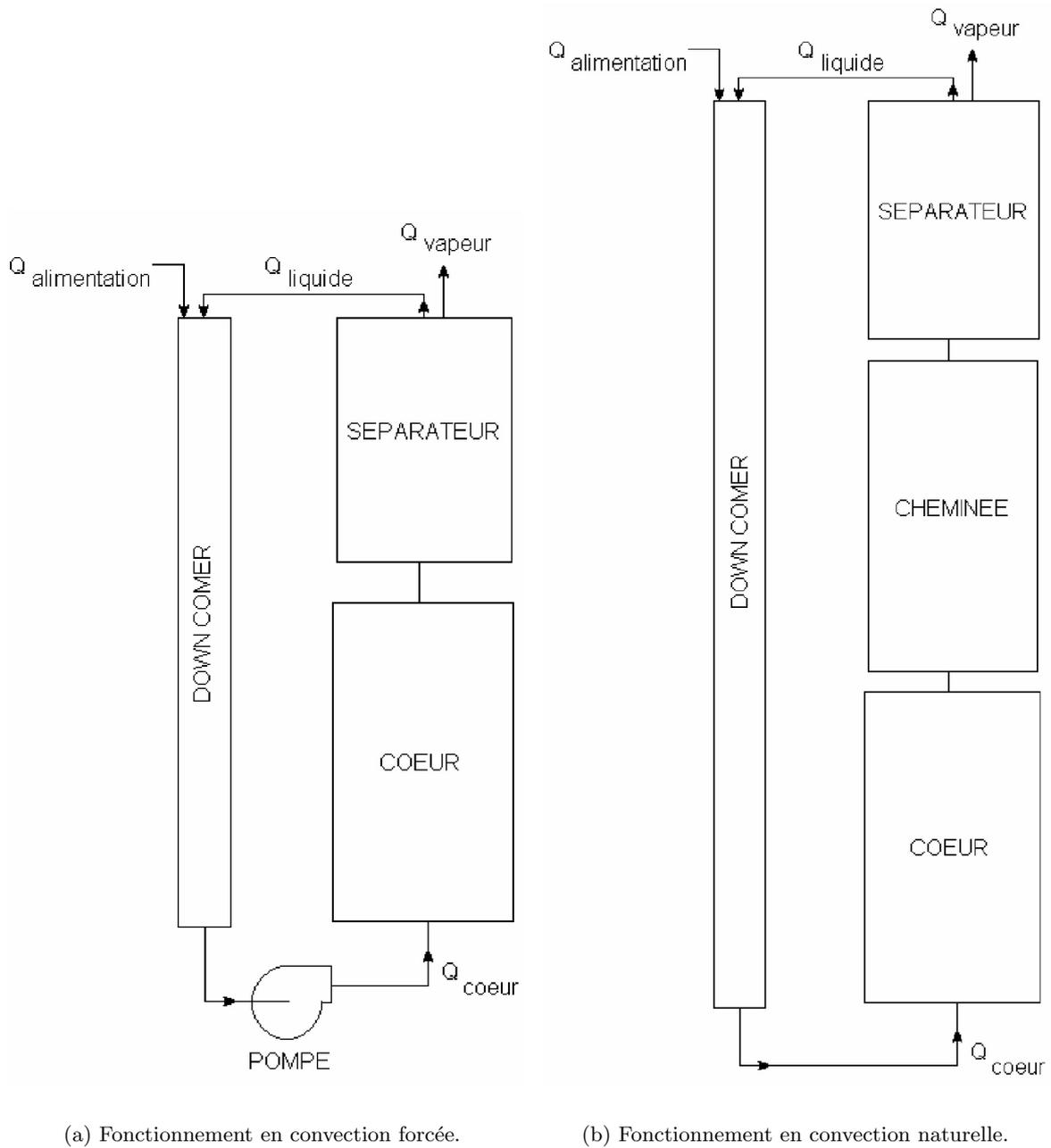
Les nouveaux concepts de réacteurs à eau bouillante permettent de supprimer les pompes de recirculation en ajoutant une cheminée entre le coeur et les séparateurs (voir figure 3(b)). Par conséquent, les hauteurs de la cuve et du downcomer sont augmentées. Dans la cheminée, l'écoulement est adiabatique et on négligera le frottement. La section de passage du fluide dans la cheminée est égale à celle des séparateurs, $S_S = 20,00$ m².

3.9.1 Principe du fonctionnement en convection naturelle

Expliquer pourquoi en ajoutant une cheminée au dessus du coeur on peut supprimer les pompes.

3.9.2 Hauteur de cheminée minimale

En calculant la variation de pression au passage de la cheminée et la modification de la variation de pression dans le downcomer résultant de son allongement, calculer la hauteur minimale de cheminée permettant un fonctionnement sans pompes.



(a) Fonctionnement en convection forcée.

(b) Fonctionnement en convection naturelle.

Figure 3: Description schématique des deux modes de fonctionnement d'un réacteur à eau bouillante.