

PA13 ENBACA.

Technologie des Réacteurs Nucléaires.

F. Ravelet^a

^a *Arts et Métiers Sciences et Technologie, LIFSE,*
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

18 avril 2023

Le but est d'estimer la température du combustible dans une centrale à eau sous pression de type N4, afin par exemple de vérifier que l'on reste en dessous de sa température de fusion, ou encore de prévoir sa dilatation thermique et donc de dimensionner le jeu initial entre le combustible et sa gaine.

Les paramètres globaux de ce palier sont donnés dans le Tab. 1.

Puissance thermique (MW)	4250
Puissance électrique (MW)	1470
Nombre de boucles	4
Température d'entrée (°C)	292
Température de sortie (°C)	329
Débit volumique (m ³ /h)	98000
Pression primaire (bar)	155

TABLE 1 – Caractéristiques globales du réacteur N4

Le combustible est contenu dans des crayons rassemblés en assemblages, eux-mêmes disposés pour former une structure cylindrique. La géométrie des crayons, ainsi que l'organisation du réseau constituant un assemblage sont fournies dans le Tab. 2 et la Fig. 1.

<i>Crayon</i>	
Diamètre du crayon (mm)	9.5
Longueur du crayon (m)	4.3
<i>Assemblage</i>	
Réseau carré	17 × 17
Pas du réseau (mm)	12.6
Tubes guides	24
Tube d'instrumentation	1
Nombre de crayons / assemblage	264 = (17 × 17) – 24 – 1
<i>Cœur</i>	
Nombre d'assemblages	205

TABLE 2 – Organisation en réseau du combustible dans le cœur du réacteur N4

Le crayon combustible cylindrique contient un ensemble de pastilles d'oxyde d'Uranium UO_2 empilées dans une gaine en Zircalloy (alliage à base de Zirconium). Il existe également un jeu entre les pastilles et la gaine. Une coupe d'un crayon est donnée en Fig. 2, et les dimensions principales sont rappelées dans le Tab. 3.

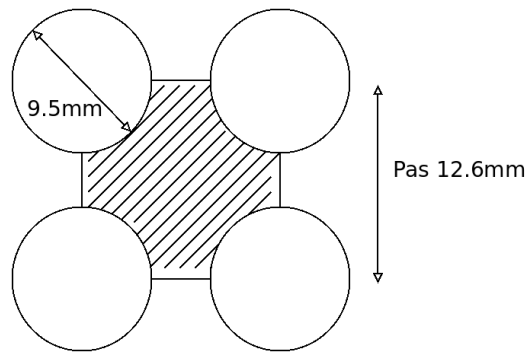


FIGURE 1 – Maille élémentaire du réseau dans un assemblage. Cercles blancs : crayon combustible ou tube guide. Surface hachurée : surface débitante élémentaire (« sous-canal »)

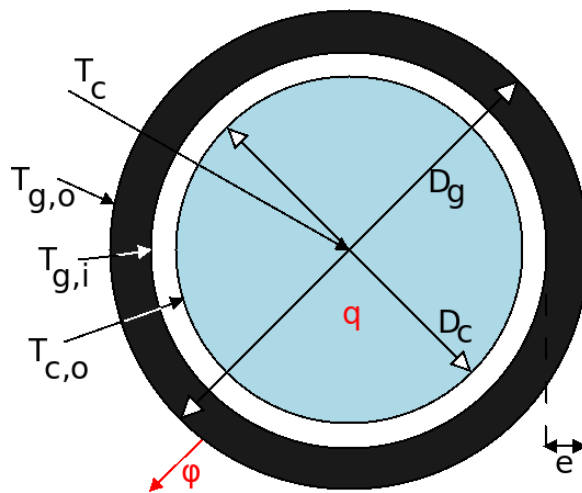


FIGURE 2 – Coupe d'un crayon de combustible. En noir : gaine en Zircalloy de diamètre extérieur D_g et d'épaisseur e . En blanc : jeu contenant de l'Helium. En gris : pastille d' UO_2 de diamètre D_c . Notez également la définition des températures aux interfaces.

Longueur du crayon (m)	4.3
Diamètre de gaine D_g (mm)	9.5
Epaisseur de gaine e (mm)	0.53
Diamètre de pastille combustible D_c (mm)	8.2

TABLE 3 – Caractéristiques d'un crayon combustible (réacteur N4)

Questions

A Transfert thermique entre le caloporteur et la gaine

L'échange de chaleur entre le combustible et le fluide primaire se fait par convection forcée, dans un réseau de tubes verticaux. On va supposer pour le calcul que le flux de chaleur est homogène, de même que les vitesses débitantes. On prendra de plus les propriétés de l'eau à 155 bars et à la température moyenne de 310°C :

ρ (kg.m ⁻³)	μ (10 ⁻⁶ Pa.s)	c (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
747	90	5.2	0.45

1. Calculer la surface débitante élémentaire S_m d'une maille, ainsi que le diamètre hydraulique D_h correspondant.
2. Calculer la surface débitante totale, en déduire la vitesse débitante V .
3. En déduire le nombre de Reynolds basé sur le diamètre hydraulique $Re = \frac{VD_h}{\nu}$.
4. Utiliser la corrélation de Dittus et Boelter afin de calculer le nombre de Nusselt $Nu = \frac{hD_h}{\lambda}$:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

5. En déduire la valeur du coefficient de transfert thermique h .
6. A partir des données des Tabs. 1 et 2, calculer la densité surfacique de flux de chaleur φ (W.m⁻²) au niveau de la paroi des crayons.
7. En déduire l'élévation de température entre le fluide caloporteur et la paroi externe du crayon combustible.
8. Déterminer la température de la paroi externe du crayon en prenant pour température du fluide la valeur 310°C.

Si vous ne trouvez pas la solution, appelez la température de paroi à la surface du crayon $T_{g,o}$ (extérieur de la gaine) et continuez le problème.

B Transfert thermique dans le crayon

Les conductivités thermiques des matériaux sont les suivants :

λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)		
Zircalloy	Helium	UO ₂
17.3	0.32	3.5

Le but étant de trouver la température au centre de la pastille combustible, connaissant la température et φ sur l'extérieur du crayon, nous allons procéder par étapes, de l'extérieur vers l'intérieur.

1. Résoudre l'équation de la chaleur en géométrie axisymétrique pour trouver la température à l'interface entre la gaine et le jeu $T_{g,i}$. Utiliser la température $T_{g,o}$ et la densité surfacique de flux φ .

Rappels : équation de la chaleur en régime stationnaire, sans source volumique

$$\lambda \Delta T = 0$$

Et en exprimant le laplacien en géométrie axisymétrique :

$$\frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

Densité surfacique de flux de chaleur :

$$\varphi = -\lambda \nabla T$$

2. Calculer la densité surfacique de flux de chaleur à l'interface entre la gaine et le jeu φ_i (il y a deux méthodes).
3. Reprendre le raisonnement pour trouver la température à l'interface entre le jeu et la pastille combustible $T_{c,o}$.
4. Dans la pastille, il y a une source de chaleur en volume. Calculer la densité volumique de cette source q (W.m^{-3}).
5. Résoudre enfin l'équation de la chaleur avec source volumique afin de trouver la température au centre de la pastille T_c .

Rappel :

$$\frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -q$$

6. Est-on en dessous de la température de fusion (2750°C) ? Dans la réalité, où la puissance n'est pas homogène (distribution axiale et radiale) et le débit non plus, cette température est comprise entre 900°C et 1200°C .