

# Étude d'une centrale nucléaire

L'étude qui suit donne une assez bonne idée de la constitution des réacteurs nucléaires, du type de ceux opérés en France par EDF. Elle aborde quelques-unes des problématiques de leur conception et de leur fonctionnement. L'exercice comprend trois parties indépendantes, qui mettent en œuvre des méthodes classiques de la thermique, de la thermodynamique des systèmes et de la mécanique des fluides macroscopique :

- Une étude du transfert de chaleur dans les crayons combustibles ;
- L'analyse du fonctionnement du circuit secondaire et l'évaluation du rendement (cette partie reprend quasi-intégralement l'exercice « Centrale nucléaire » de l'abrégé de thermodynamique de Daniel Fargue [2]).
- Le pré-dimensionnement du circuit de refroidissement, dans le cas d'une centrale en cycle ouvert sur la mer ou une rivière, tel que représenté sur la figure 1.

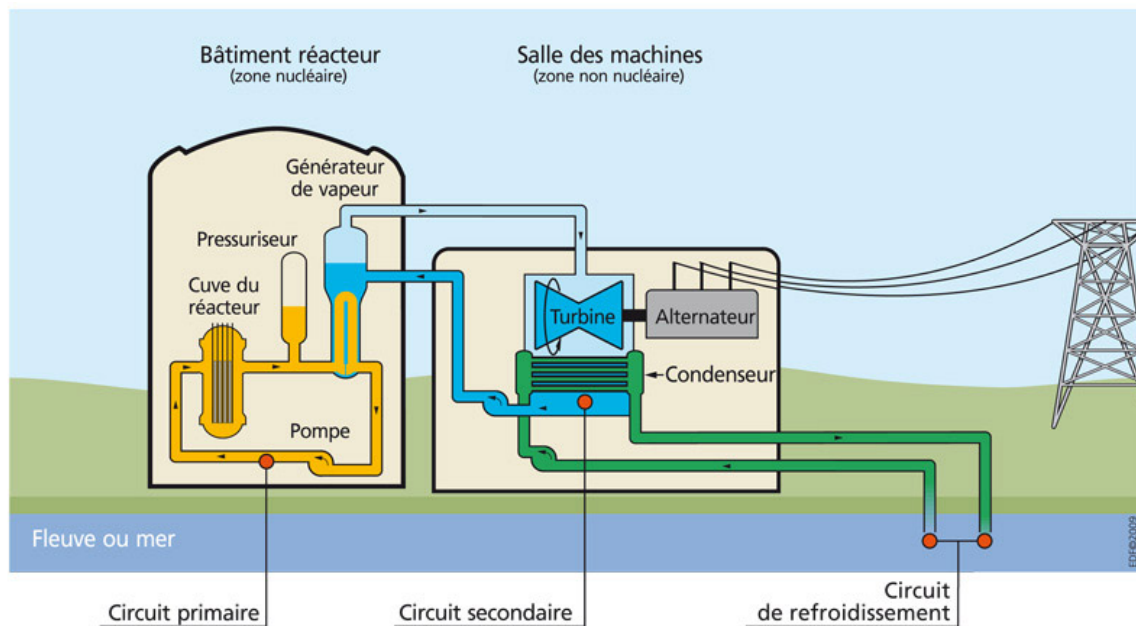


FIGURE 1 – Schéma de principe d'une centrale nucléaire sans aéroréfrigérant (d'après [4])

## I. Transfert thermique dans un crayon combustible

Les cœurs des réacteurs à eau pressurisée tels que ceux exploités par EDF sont composés de plusieurs centaines d'assemblages combustibles, constitués de crayons contenant des pastilles d'oxyde d'uranium  $\text{UO}_2$ , matériau fissile dans lequel se produit la réaction nucléaire (figure 2). Le caloporteur (de l'eau sous une pression de 155 bar) circule le long des crayons et évacue la puissance thermique qui est transférée au générateur de vapeur (circuit primaire).

L'objectif de cette partie est de réaliser une évaluation de premier niveau des températures atteintes dans les crayons de combustible nucléaire.

### I-1 Données et hypothèses

On considère un crayon combustible. Il s'agit d'un tube en zirconium (la gaine), contenant sur toute sa longueur des pastilles d'uranium (le combustible) (figure 2).

Les hypothèses du calcul sont les suivantes :

- On néglige les effets d'extrémité. La modélisation sera donc réalisée en 1D axisymétrique (figure 3) ;

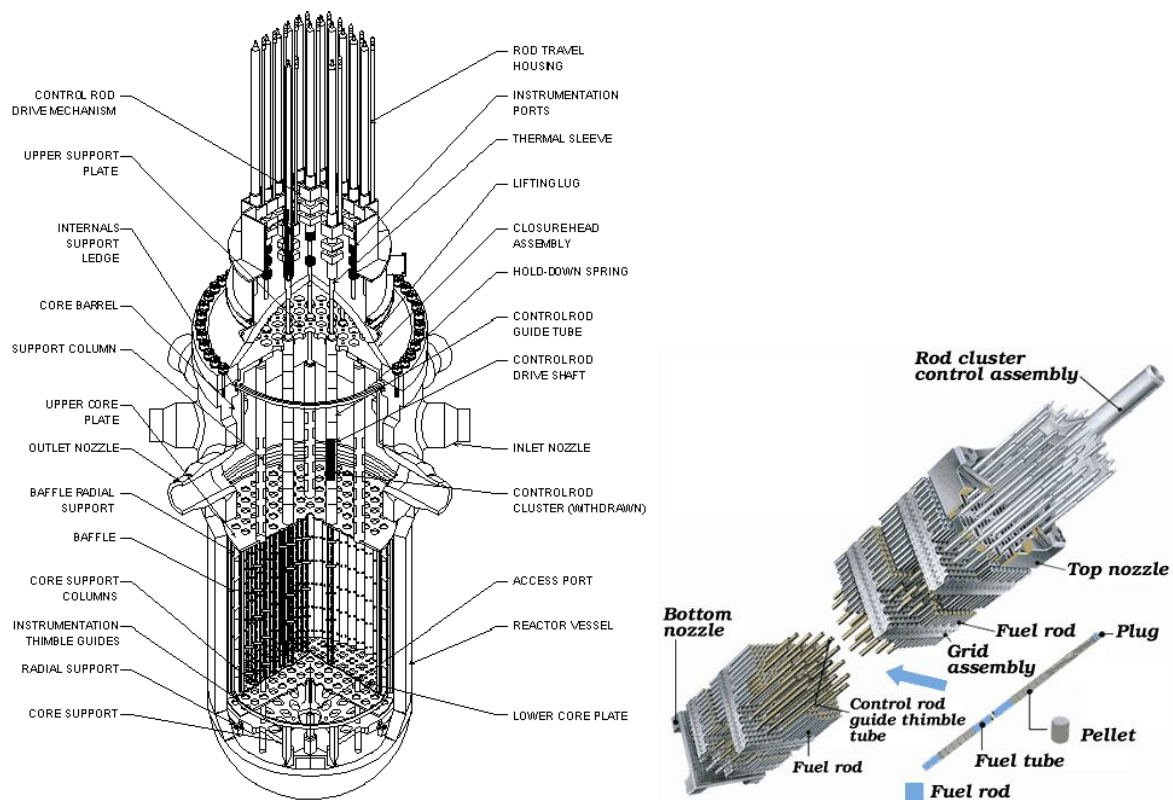


FIGURE 2 – Cuve de réacteur PWR (à gauche) - Détail d'un assemblage combustible (à droite)

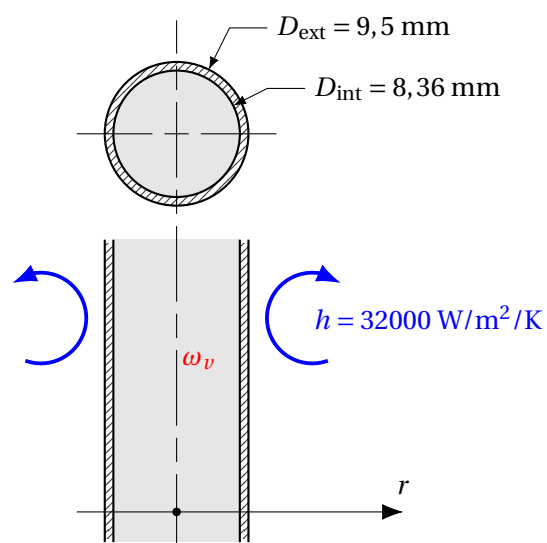


FIGURE 3 – Configuration d'un crayon combustible

- La gaine en alliage de zirconium a pour diamètre extérieur  $D_{\text{ext}} = 9,5$  mm, pour épaisseur 0,57 mm soit un diamètre intérieur  $D_{\text{int}} = 8,36$  mm et pour longueur  $L_c = 3,66$  m;
- La puissance volumique apportée dans le combustible par la réaction nucléaire est de  $\omega_v = 333$  MW/m<sup>3</sup>.
- La température de l'eau est supposée constante :  $T_e = 300^\circ\text{C}$
- Le coefficient d'échange à l'interface gaine/caloporteur vaut  $h = 32000$  W/m<sup>2</sup>K.
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux sont données sur la table 1 (d'après [3]).
- La conductivité thermique du combustible est considérée indépendante de la température.

TABLE 1 – Propriétés des matériaux

| Propriété<br>(indice) | Unité             | Gaine<br>(g) | Combustible<br>(c) | Eau (@ 155 bar)<br>(e) |
|-----------------------|-------------------|--------------|--------------------|------------------------|
| $\rho$                | kg/m <sup>3</sup> |              | 10970              | 726                    |
| $C_p$                 | J/kg/K            |              | 320                | 5458                   |
| $\lambda$             | W/m/K             | 14,3         | 4,4                | 0,562                  |
| $\mu$                 | Pa.s              |              |                    | $8,85.10^{-5}$         |

## I-2 Profil de température en régime établi

**Q-2.1 :** Dans le cas du régime permanent, déterminer l'expression du profil de température interne  $T(r)$  et la température maximale atteinte dans le combustible, en fonction de la température  $T_{\text{int}}$  à l'interface entre les pastilles et la gaine.

**Q-2.2 :** Déterminer l'écart de température à travers la gaine en zirconium en fonction des conditions extérieures. En déduire la température maximale au centre du crayon.

Pour la suite, on définit le coefficient d'échange global englobant la résistance en série de la gaine et de l'interface gaine/eau :

$$\Phi = K S_{\text{int}} (T_{\text{int}} - T_e)$$

**Q-2.3 :** Déduire de ce qui précède l'expression littérale de  $K$  et sa valeur numérique.

## I-3 Régime transitoire

La puissance interne produite est soudainement changée et devient  $\omega_v = 500$  MW/m<sup>3</sup>. On cherche à connaître l'évolution de la température à l'intérieur de l'élément. Pour ce faire, on va mettre en place une méthode de résolution numérique simple.

**Q-3.1 :** La résolution sera faite en utilisant la méthode des différences finies. Compte-tenu des dimensions du crayon, on propose de discrétiser le domaine en  $N = 10$  mailles (voir figure 4). Proposer une approximation des dérivées partielles et justifier l'ordre des approximations.

Les valeurs discrétisées sont définies de la manière suivante :

$$T_i^n = T(r_i, t_n) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} t_n = n \Delta t \\ r_i = i \Delta r \end{cases} \quad \text{et} \quad \Delta r = \frac{R_{\text{int}}}{N}$$

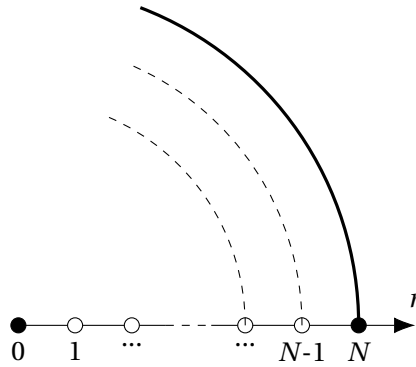


FIGURE 4 – Maillage du crayon

- Q-3.2 :** On partira du champ de température initial correspondant au régime permanent précédemment calculé. Écrire l'équation de la chaleur pour chacun des nœuds courants ( $r \neq 0$ ), en choisissant une discrétisation explicite.
- Q-3.3 :** Écrire la condition à la limite en  $r = 0$  et en déduire la récurrence pour  $T_0^n$ .
- Q-3.4 :** Écrire la condition à la limite en  $r = R_{\text{int}}$ . On négligera les effets d'inertie thermique dans la gaine de combustible.
- Q-3.5 :** Résoudre et dessiner les profils à  $t = 1$  s,  $t = 2$  s et  $t = 5$  s. Pour ce faire, compléter les cellules du fichier `combustible.xlsx` avec les équations discrétisées et choisir les paramètres numériques adéquats.

#### I-4 Pour aller plus loin

- Q-4.1 :** Discuter de la stabilité du schéma numérique proposé précédemment.
- Q-4.2 :** Dans la configuration réelle, un jeu existe entre la gaine et les pastilles de combustible et évolue au cours du fonctionnement du réacteur. Quelles peuvent être les conséquences sur la température atteinte?
- Q-4.3 :** Rechercher dans la littérature des lois empiriques permettant de déterminer des valeurs réalistes du coefficient d'échange gaine-caloporteur  $h$ .

## II. Étude du circuit secondaire - performances de la centrale

### II-1 Hypothèses

Cette partie donne une assez bonne idée, malgré ses simplifications, de la manière dont sont conçus les cycles secondaires assez complexes mis en œuvre dans les centrales nucléaires. Les contraintes techniques qui guident la conception sont nombreuses, mais pour ce qui suit, les plus importantes sont les suivantes.

- Pour des raisons mécaniques (sécurité) et d'efficacité (un échangeur est beaucoup plus économique avec des liquides), le fluide sortant du générateur de vapeur (GV) est constitué de vapeur d'eau saturante à une pression limitée réglementairement à 56 bar.
- Le point de fonctionnement du condenseur découle d'une condition simple : la température de l'eau de refroidissement (rivière, mer, aéro-réfrigérant) est à peu de chose près l'ambiante. Pour des raisons de rapidité de transfert, on garde une marge d'une quinzaine de degrés, et le choix d'EDF s'est porté sur  $T = 39^\circ\text{C}$  comme température froide du fluide de travail.
- La valeur de la chute de pression (taux de détente) dans les turbines est liée avant tout aux problèmes dus à l'apparition d'eau de condensation. Les gouttelettes ainsi formées sont en effet néfastes, elles diminuent le rendement de l'appareil et risquent de provoquer une érosion rapide des aubes. On limite donc autant que possible la teneur en liquide en sortie. Le choix actuel est le suivant :
  - Le fluide subit une première détente (de B à C sur le schéma) dans une turbine haute pression, de 50 bar à 11 bar.
  - La vapeur humide passe ensuite dans un sécheur-surchauffeur qui sépare la fraction liquide, et remonte la température de la vapeur (sèche) à  $253^\circ\text{C}$  (valeur fixée pour le bon fonctionnement du surchauffeur).
  - Cette vapeur est ensuite détendue dans deux corps de turbine (moyenne pression, basse pression) jusqu'à la pression régnant dans le condenseur. Dans ces conditions, on considérera que les turbines ont un rendement isentropique  $\eta = 0,816$ .
- La remise en pression a lieu, après condensation totale, par l'intermédiaire de deux pompes (d'extraction et d'alimentation) qui remontent la pression de l'eau à 15 bar (point I) puis à 70 bar (point M). Le travail nécessaire, bien que non négligeable, reste assez faible, car il s'effectue en phase condensée (c'est d'ailleurs ce qui permet au cycle de fournir globalement du travail mécanique!). On supposera que les pompes ont un rendement isentropique de 0,9.
- L'ensemble des condensats est réuni dans une cuve (maintenue à la pression intermédiaire de 11 bar) appelée bache, avant d'être pompé, puis réinjecté à 70 bar dans le générateur de vapeur.
- On admettra que les pertes de charge dans les conduites et les vannes font chuter la pression de 70 à 56 bar dans le GV, et de 56 à 50 bar entre ce dernier et la turbine HP, ou le surchauffeur.
- Au point E l'eau est à l'état de vapeur surchauffée à 11 bar et  $253^\circ\text{C}$ .
- Pour les besoins de l'exercice, le tableau 2 donne les informations essentielles, avec  $P$  en bar,  $T$  en  $^\circ\text{C}$ ,  $h$  et  $u$  en kJ/kg,  $s$  en kJ/kg/K et  $v$  en  $\text{m}^3/\text{kg}$ . On pourra les utiliser, ou bien extraire les valeurs des fonctions thermodynamiques du logiciel CoolProp (voir paragraphe II-5).

### II-2 Détermination des états

**Q-2.1 :** En partant de la sortie du générateur de vapeur, déterminer les valeurs des principales grandeurs d'état (parmi  $P$ ,  $T$ ,  $h$ ,  $x$  et  $s$ ) jusqu'au point L exclu.  $x$  désigne le titre (ou fraction massique) en vapeur

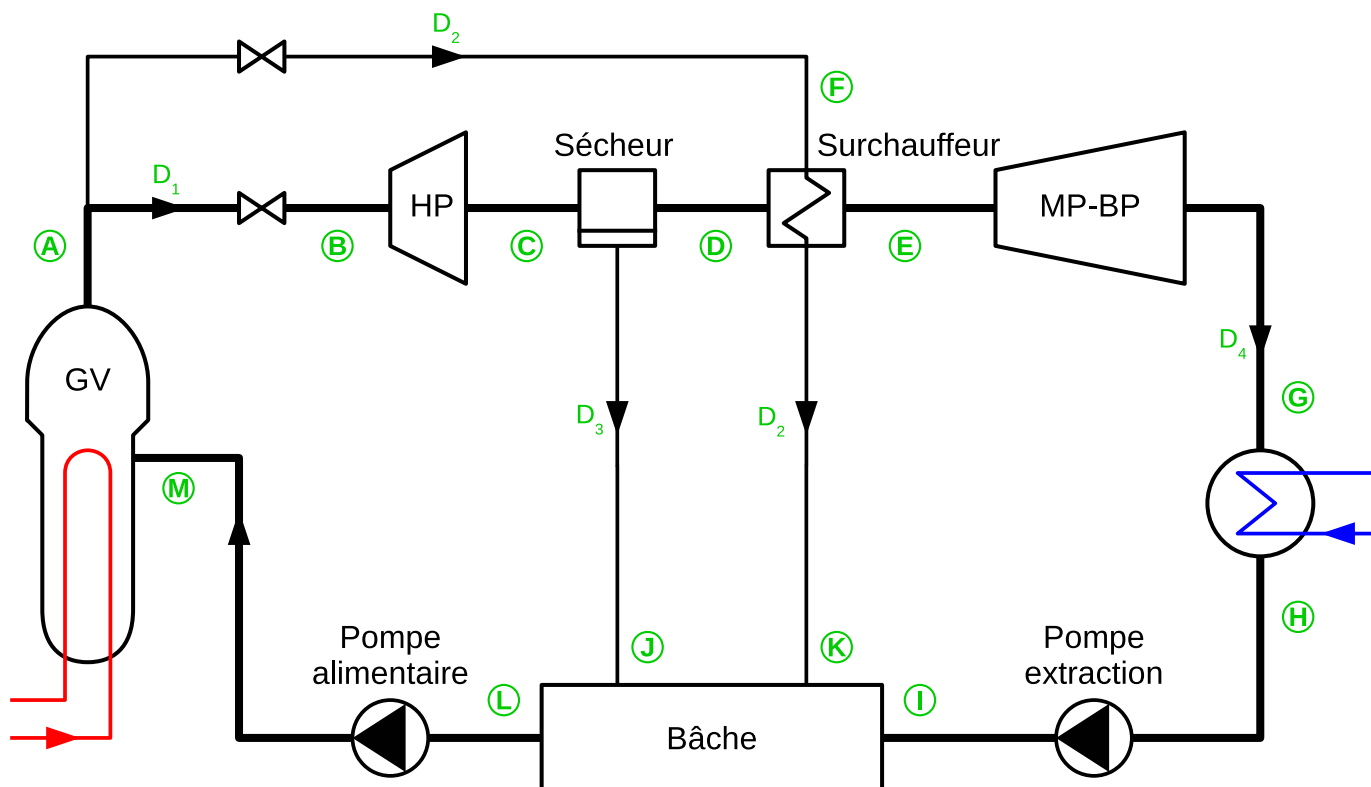


FIGURE 5 – Schéma simplifié du circuit secondaire

TABLE 2 – Propriétés de l'eau/vapeur utiles pour l'étude

| $P$<br>(bar) | $T$<br>(°C) | $X$<br>(-) | $h$<br>(kJ/kg) | $u$<br>(kJ/kg) | $s$<br>(kJ/kg/K) | $v$<br>(m <sup>3</sup> /kg) |
|--------------|-------------|------------|----------------|----------------|------------------|-----------------------------|
| 0,06991      | 39,0        | 0          | 163,311        | 163,304        | 0,55892          | 0,00100742                  |
| 0,06991      | 39,0        | 1          | 2572,609       | 2428,903       | 8,2773           | 20,55594                    |
| 11           | 184,1       | 0          | 781,138        | 779,892        | 2,1788           | 0,00113309                  |
| 11           | 184,1       | 1          | 2779,684       | 2584,562       | 6,5499           | 0,177384                    |
| 11           | 253         | 1          | 2946,05        | 2712,663       | 6,8895           | 0,21217                     |
| 50           | 263,9       | 0          | 1154,467       | 1148,038       | 2,9208           | 0,00128582                  |
| 50           | 263,9       | 1          | 2794,175       | 2597,032       | 5,9736           | 0,0394285                   |
| 56           | 271,1       | 0          | 1190,771       | 1183,46        | 2,9865           | 0,0013056                   |
| 56           | 271,1       | 1          | 2788,988       | 2593,288       | 5,9229           | 0,0349465                   |

de la vapeur humide, fluide diphasique qui contient à la fois de l'eau sous forme gazeuse et sous forme de liquide dispersé en fines gouttelettes, comme dans un brouillard.

Pour ce faire, renseigner les tableaux 3 et placer les transformations sur le diagramme ( $h - s$ ) (figure 6), en utilisant l'une des méthodes suivantes :

- déduire les valeurs pour les différents points du tableau 2;
- utiliser la feuille de calcul [Cycle\\_secondaire.xlsx](#) dans laquelle la macro de la bibliothèque [CoolProp](#) [1] est disponible (voir II-5)

Les débits des fluides circulant dans les différentes branches sont définis à un facteur d'ensemble près.  $D_0$  représente le débit de vapeur produite au GV. Les débits  $D_1$  à  $D_4$  sont définis sur la figure 5.

## II-3 Puissances échangées

**Q-3.1 :** La puissance thermique du GV est de 2970 MW. Calculer le débit total réel  $D_0$ .

**Q-3.2 :** Renseigner numériquement le tableau des transformations de chaque appareil (table 4).

**Q-3.3 :** Proposer enfin une formule définissant le *rendement* global de la centrale, et donner sa valeur. La comparer à la valeur maximale atteignable.

## II-4 Pour aller plus loin

**Q-4.1 :** Établir appareil par appareil les bilans exergétiques et les dissipations associées. Où se situent les principales pistes d'optimisation du cycle?

**Q-4.2 :** La bûche alimentaire telle que décrite ici est une représentation simplifiée du fonctionnement. Rechercher dans la littérature et expliquer quel système est réellement mis en œuvre et expliquer son fonctionnement.

## II-5 Utilisation de CoolProp

[CoolProp](#) [1] est une bibliothèque permettant le calcul des propriétés thermodynamiques et de transport de nombreux corps et mélange. La bibliothèque est téléchargeable librement à [cette adresse](#) pour de nombreux environnements dont Excel.

### Installation

Télécharger la [version pour Windows](#) et l'exécuter. Le paramétrage des macros Excel est en principe automatique.

Un fichier [TestExcel.xlsx](#) est disponible. Il donne de nombreux exemples pour prendre en main l'outil.

### Utilisation

Pour les besoins de l'exercice, la seule fonction utile est `PropsSI`. Les variables thermodynamiques portent les noms suivants :

- T : température (K)
- P : pression (Pa)
- Q : titre vapeur (-)
- H : enthalpie (J/kg)

TABLE 3 – Tableau des états

| Point | $P$ (bar) | $T$ (°C) | $x$ (-) | $h$ (kJ/kg) | $s$ (kJ/kg/K) | $\dot{m}$ |
|-------|-----------|----------|---------|-------------|---------------|-----------|
| A     |           |          |         |             |               |           |
| B     |           |          |         |             |               |           |
| C     |           |          |         |             |               |           |
| D     |           |          |         |             |               |           |
| E     |           |          |         |             |               |           |
| F     |           |          |         |             |               |           |
| G     |           |          |         |             |               |           |
| H     |           |          |         |             |               |           |
| I     |           |          |         |             |               |           |
| J     |           |          |         |             |               |           |
| K     |           |          |         |             |               |           |
| L     |           |          |         |             |               |           |

TABLE 4 – Tableau des transformations

| Appareil          | $\sum_{e-s} \dot{m}h$ | $\dot{Q}$ | $\dot{W}$ |
|-------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| Laminage          |                       |           |           |
| Turbine HP        |                       |           |           |
| Sécheur           |                       |           |           |
| Surchauffeur      |                       |           |           |
| Turbine BP        |                       |           |           |
| Condenseur        |                       |           |           |
| Pompe extraction  |                       |           |           |
| Bâche             |                       |           |           |
| Pompe alimentaire |                       |           |           |
| GV                |                       |           |           |



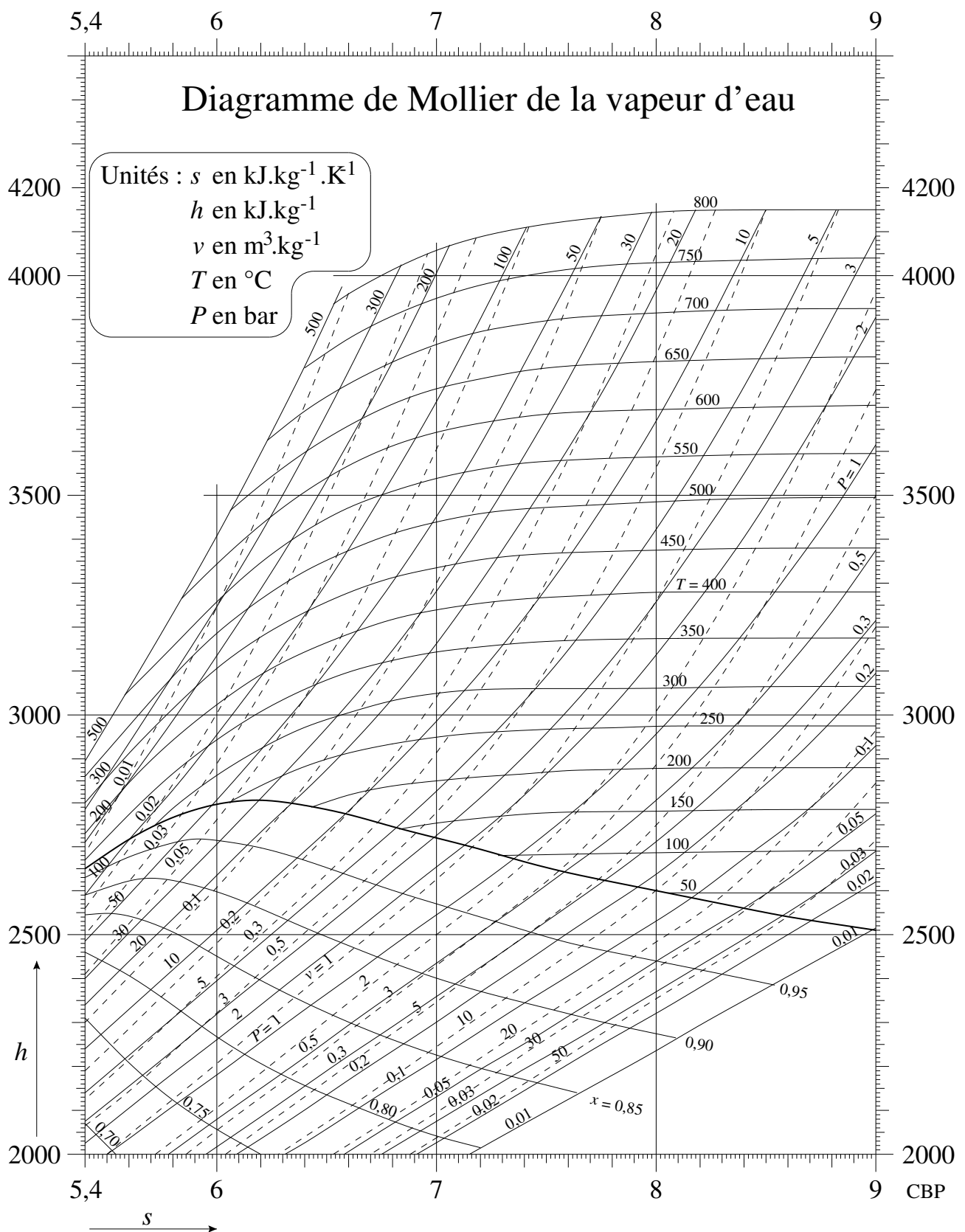


FIGURE 6 – Diagramme  $h - s$

- U : énergie interne (J/kg)
- S : entropie (J/kgK)
- Dmass : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

Par exemple, le calcul de l'enthalpie en fonction de la pression et de l'entropie s'écrit dans une case Excel :

=PropsSI("H","P",101325,"S",7.1,"Water")

### III. Étude du condenseur et du circuit tertiaire

L'objectif de cette partie est de parvenir à un dimensionnement sommaire du circuit tertiaire de la centrale : évaluer la quantité de tubes nécessaires pour le condenseur (et donc son encombrement) et la puissance de pompage d'eau de refroidissement.

Le circuit de refroidissement est constitué d'une boucle de circulation d'eau en prise directe sur la mer, comprenant une pompe, des canalisations aller/retour et le condenseur (cf. figure 7).

Les spécifications de l'étude sont les suivantes :

- Le condenseur doit évacuer  $\Phi = 2,083$  GW thermiques;
- La puissance à évacuer est répartie sur 6 modules identiques du condenseur alimentés par 2 circuits tels que celui de la figure 7.
- L'écart de température entre le prélèvement et le rejet de l'eau de refroidissement ne doit pas excéder  $10^\circ\text{C}$  (valeur imposée par la réglementation environnementale);
- La température d'eau de refroidissement est de  $20^\circ\text{C}$ ;
- Dans les conditions opératoires du circuit de refroidissement, l'eau est considérée comme un fluide incompressible, avec  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 4180 \text{ J/kg/K}$  et  $\mu = 1.10^{-3} \text{ Pa.s}$ .
- La température de condensation est de  $39^\circ\text{C}$ ;
- L'évacuation de la chaleur est réalisée par l'intermédiaire d'un faisceau de tubes en parallèle (nombre et longueur à déterminer);
- Les tubes du condenseur ont pour diamètre extérieur 19,05 mm et pour épaisseur 1,65 mm;
- La distance entre le condenseur et la prise d'eau est de 185 m;
- La vitesse débitante dans les tubes et canalisations ne doit pas excéder 3 m/s (valeur classique issue des règles de conception d'ingénierie).

#### III-1 Débit d'eau de refroidissement

**Q-1.1 :** Calculer le débit d'eau  $q_v$  nécessaire pour évacuer la chaleur au condenseur.

**Q-1.2 :** Proposer un diamètre de canalisation permettant de faire passer ce débit.

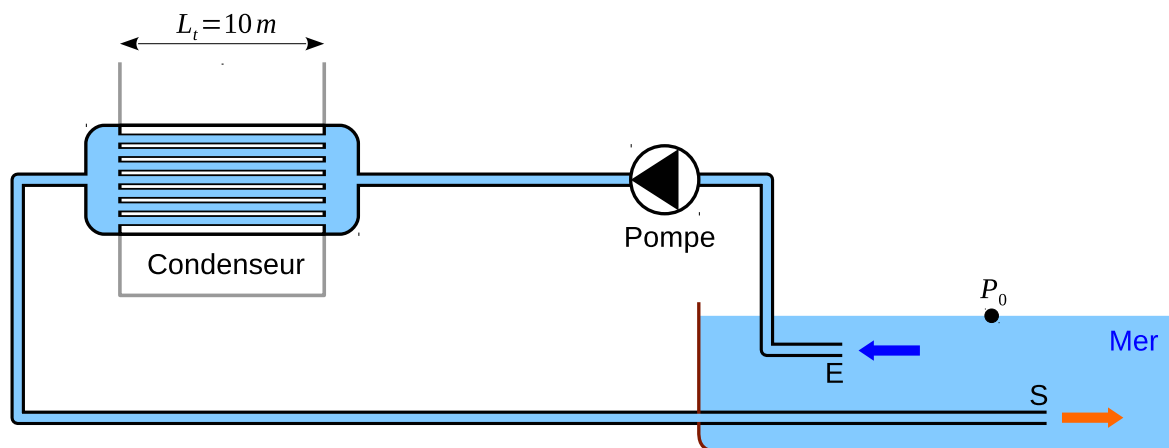


FIGURE 7 – Schéma de principe du circuit de refroidissement

### III-2 Nombre de tubes du condenseur

En première approximation, on assimile le condenseur à un échangeur unidimensionnel à contre-courant (figure 8). Avec cette hypothèse, la théorie des échangeurs donne l'expression suivante pour la puissance échangée à travers la paroi du faisceau de tubes :

$$\Phi = KS.\Delta T_{LM}$$

Où  $\Delta T_{LM}$  est l'écart de température défini de la manière suivante :

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln \frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}}$$

Où  $\Delta T_0$  et  $\Delta T_L$  sont les écarts de température entre les deux fluides à l'une et l'autre extrémité de l'échangeur (cf. figure 8).

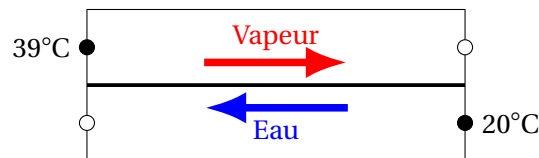


FIGURE 8 – Échangeur unidimensionnel à contre-courant

Pour cette application, le coefficient d'échange global  $K$  se détermine à partir des formules empiriques des résistances thermiques en échange convectif (côté vapeur), conductif (à travers le métal) et convectif (côté eau de refroidissement) .

Tous calculs faits, on prendra  $K = 3000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ .

**Q-2.1 :** Déterminer la surface  $S$  d'échange nécessaire, en déduire le nombre de tubes et l'encombrement du condenseur (longueur, hauteur, profondeur).

### III-3 Puissance de pompage

On désigne par  $V_c$  la vitesse débitante dans les canalisations et  $V_t$  la vitesse débitante dans les tubes du condenseur.

On désigne par  $P_0$  la pression à la surface de la mer.

L'analyse dimensionnelle permet d'établir des expressions pour les pertes de charge dans les tubes :

$$\delta E = \lambda \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

Le coefficient de frottement  $\lambda$  dépend de l'état de surface du matériau et du régime d'écoulement .

Pour les conditions de fonctionnement du circuit considéré, on prendra  $\lambda_t = 0,033$  et  $\lambda_c = 0,015$ .

**Q-3.1 :** Écrire le théorème de Bernoulli généralisé sur le circuit de refroidissement entre la surface de l'eau et le rejet, en prenant en compte, sans chercher à les calculer,  $\delta E_c$ ,  $\delta E_t$  et  $\delta W_p$  les pertes de charge par frottement dans les conduites, tubes d'échangeur et l'apport de charge par la pompe, respectivement. Faire apparaître le débit volumique dans un circuit  $q_{v1}$ .

**Q-3.2 :** Peut-on appliquer le théorème de Bernoulli entre la sortie S et la surface 0? En justifiant, proposer une relation entre  $P_S$  et  $P_0$ . L'utiliser pour simplifier la relation précédente.

**Q-3.3 :** Comment s'exprime la puissance de la pompe en fonction de  $\delta W_p$ , et de son rendement isentropique  $\eta$ ?

**Q-3.4 :** Calculer numériquement les pertes de charge en bar et la puissance de la pompe, en considérant un rendement interne de l'appareil  $\eta = 90 \%$ .

### **III-4 Pour aller plus loin**

**Q-4.1 :** Justifier les valeurs choisies pour  $\lambda_t$  et  $\lambda_c$ . Quels autres éléments devraient être pris en compte pour une modélisation plus réaliste?

**Q-4.2 :** Rechercher dans la littérature d'autres variantes des systèmes de refroidissement. Commenter leurs avantages et leurs inconvénients.

## Bibliographie

- [1] *Coolprop*. URL : <http://www.coolprop.org> (visité le 24/11/2019).
- [2] Daniel FARGUE. *Abrégé de thermodynamique. principes et applications*. 2<sup>e</sup> éd. Presses de l'École des Mines de Paris, mai 2004. ISBN : 2-911762-49-5.
- [3] Christophe HERER et Daniel GALLORI. « Thermohydraulique des réacteurs à eau sous pression ». In : *Techniques de l'ingénieur*. traité Génie nucléaire BN 3 050.
- [4] *Le parc des réacteurs nucléaires français en exploitation*. IRSN. Fév. 2017. URL : [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/0-sommaire-parc-reacteurs-nucleaires-France.aspx](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France/Pages/0-sommaire-parc-reacteurs-nucleaires-France.aspx) (visité le 03/11/2019).