

PSI*
2024/2025

DEVOIR EN TEMPS LIBRE N° 15
A rendre seul ou par groupe de 2 ou 3
pour le mardi 11 mars 2025 au plus tard

Autour d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire utilise l'énergie dégagée par la fission nucléaire des atomes d'uranium placés au cœur du réacteur. La chaleur générée par la fission est transférée à un fluide caloporteur, généralement de l'eau qui circule dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire est portée à très haute température par l'effet des réactions de fission nucléaire qui ont lieu au sein du cœur du réacteur. Elle passe ensuite dans un pressuriseur qui maintient sa pression constante et égale à $p = 155 \text{ bar}$, puis effectue un échange thermique avec le circuit secondaire dans un générateur de vapeur: l'énergie thermique dégagée par l'eau du premier circuit vaporise alors l'eau du second, qui fait ensuite tourner plusieurs turbines génératrices d'énergie mécanique, elle-même enfin transformée en énergie électrique par un alternateur.

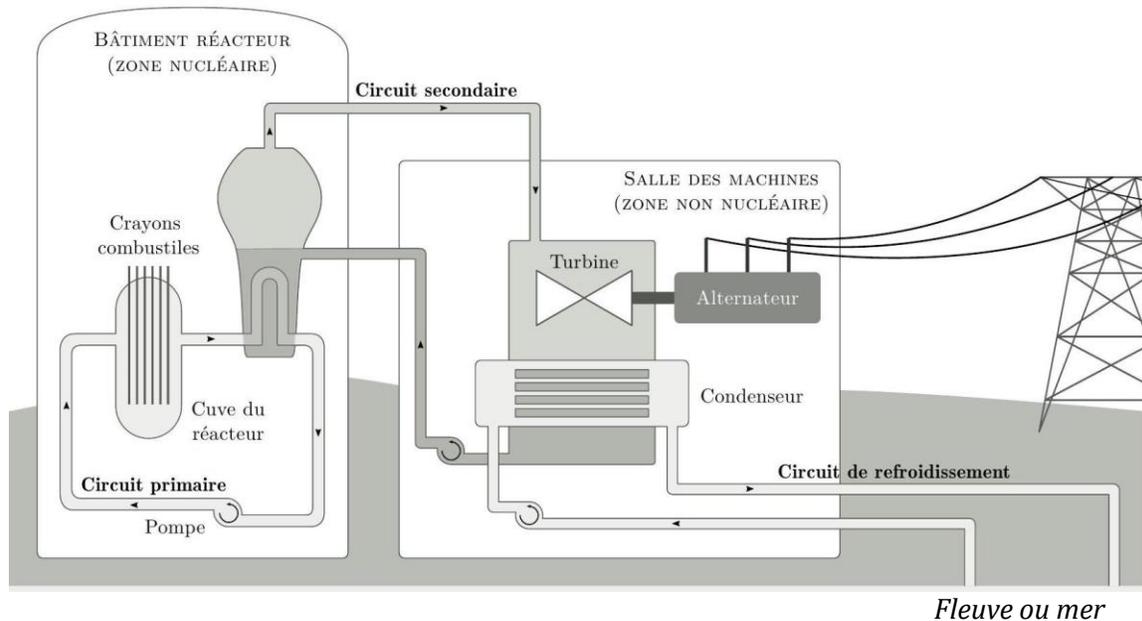


Figure 1 Principe d'un réacteur nucléaire. Librement adapté d'une illustration EDF.

II Étude du circuit secondaire

II.A - Préliminaire

On considère un fluide en écoulement stationnaire, sans variation notable de son énergie mécanique, dans une machine. Il y entre dans l'état E (pression p_e , température T_e , enthalpie massique h_e) et en sort dans l'état S (pression p_s , température T_s , enthalpie massique h_s). On note w_u le travail utile massique et q le transfert thermique massique reçus algébriquement par le fluide lors de la traversée de la machine.

Q 16. Établir soigneusement la relation vérifiée dans ce cas par $h_s - h_e$, w_u et q .

II.B - Cycle de Hirn

On considère le circuit secondaire, décrit par la figure 5 :

- la pompe d'alimentation porte l'eau liquide juste saturée (état 0) de la basse pression $p_3 = 0,040 \text{ bar}$ du condenseur à la pression $p_2 = 85,8 \text{ bar}$ du générateur de vapeur (GV) de façon isentropique (état 1) ;
- l'eau liquide entre ensuite dans le générateur de vapeur, où elle est chauffée de façon isobare jusqu'à la température T_2 du changement d'état (état 1' - liquide juste saturant), puis est totalement vaporisée jusqu'à l'état 2 (vapeur saturante sèche). Le surchauffeur (2 - 2') fonctionne de façon isobare ;
- la vapeur sèche produite (état 2') subit ensuite une détente isentropique dans une turbine calorifugée amenant le système dans l'état 3, à la température T_0

- le mélange diphasé (état 3) pénètre ensuite dans le condenseur pour y être totalement condensé (état 0).

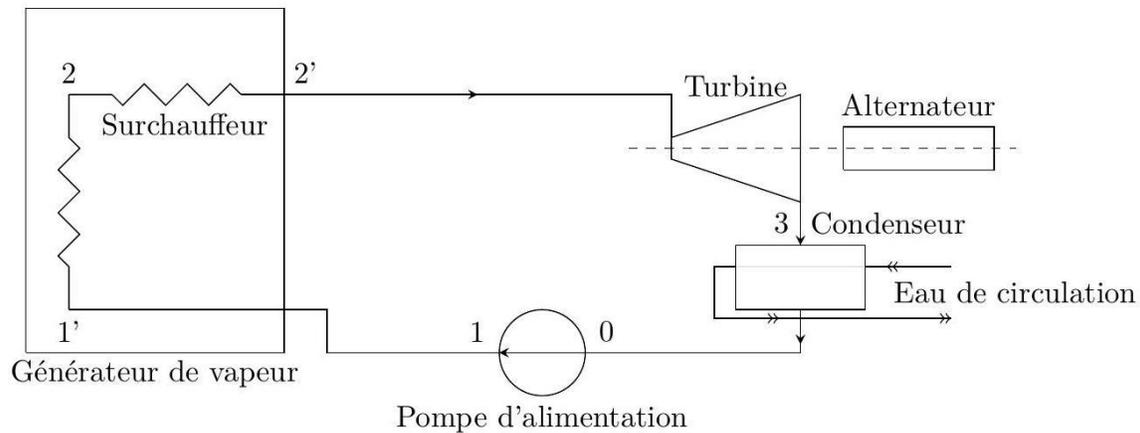


Figure 5 Cycle de Hirn.

On se place en régime stationnaire. On suppose l'eau liquide incompressible et on néglige le travail consommé par la pompe devant les autres termes énergétiques de l'installation.

Dans la suite, les grandeurs thermodynamiques indicées par i sont relatives à l'état i .

On donne $T_0 \simeq T_1 = 29^\circ\text{C}$, $T_2 = 300^\circ\text{C}$ et $T_{2'} = 500^\circ\text{C}$, ainsi qu'un extrait de tables thermodynamiques pour l'eau sur le tableau 1. Les données suivantes sont également fournies :

chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à T_2 : $L_v(T_2) = 1404 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

enthalpie et entropie massiques respectives de la vapeur d'eau sèche à 500°C et $85,8 \text{ bar}$: $h = 3391 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $s = 6,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pression de vapeur saturante (bar)	Température ($^\circ\text{C}$)	Liquide juste saturé		Vapeur saturante sèche	
		s	h	s	h
		85,8	300	3,25	1345
0,040	29	0,42	121	8,47	2554

Tableau 1 Quelques données thermodynamiques pour l'eau. L'enthalpie massique h est exprimée en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ et l'entropie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Q 17. Expliquer pourquoi $T_0 \simeq T_1$ et $h_0 \simeq h_1$. Préciser l'allure d'une transformation isentropique dans le domaine liquide du diagramme des frigoristes (p, h).

Q 18. Donner le nom des différentes courbes du diagramme des frigoristes (p, h) du document réponse 1 et y représenter précisément le cycle décrit par le fluide.

Q 19. Calculer, à partir de données du tableau 1 pour plus de précision, le titre massique en vapeur ainsi que l'enthalpie massique de la vapeur à la sortie de la turbine. Positionner le point représentatif de cet état sur le diagramme des frigoristes du document réponse 1.

Q 20. Définir et calculer l'efficacité η de ce cycle.

Q 21. Établir l'expression de l'efficacité de Carnot η_c d'une machine cyclique ditherme fonctionnant en moteur entre une source chaude à la température T_c et une source froide à la température T_f . La calculer en prenant respectivement pour T_f et T_c les températures minimale et maximale du fluide dans le circuit secondaire. Commenter en justifiant l'écart éventuel avec la valeur de l'efficacité obtenue à la question précédente.

II.C - Cycle à double surchauffe

Les gouttes d'eau liquide peuvent endommager la turbine. Aussi, est-il avantageux d'utiliser une turbine à deux corps permettant d'obtenir un titre massique en vapeur en sortie de turbine proche de 1 grâce à une double surchauffe. Le cycle de Hirn précédent est modifié :

- de l'eau (état 1) est admise dans le générateur de vapeur (GV) d'où elle sort à l'état de vapeur saturante sèche (état 2) ;
- elle passe ensuite dans le premier surchauffeur isobare (2 – 2'), pour être détendue dans la turbine haute pression (HP) (2' – 4) ;
- la vapeur sèche (état 4) est envoyée dans un second surchauffeur isobare (4 – 4') pour être ensuite détendue dans l'étage de turbine basse pression (BP) (4' – 5). Le titre massique en vapeur dans l'état 5 est sensiblement égal à 1 ;
- le fluide dans l'état 5 se condense totalement à la température T_0 dans le condenseur isobare (5 – 0) ;
- le liquide juste saturé (état 0) est ensuite comprimé de façon isentropique à la pression p_2 du générateur de vapeur (état 1).

Les détentes dans les turbines, calorifugées, sont supposées isentropiques. On se place encore une fois en régime stationnaire et on a toujours $T_0 \approx T_1 = 29^\circ\text{C}$, $T_2 = 300^\circ\text{C}$ et $T_{2'} = 500^\circ\text{C}$. De plus, $T_4 = 300^\circ\text{C}$ et $T_{4'} = 500^\circ\text{C}$.

Q 22. Représenter précisément le cycle décrit par le fluide dans le diagramme des frigoristes du document réponse 1. Définir et calculer l'efficacité de ce cycle.

II.D - Cycle réel d'une tranche nucléaire

Pour des raisons technologiques, des limitations de pression et de température interviennent directement dans le choix des caractéristiques du cycle eau-vapeur de ces centrales thermiques nucléaires, d'où des cycles moins « poussés » que dans les centrales thermiques classiques.

Le cœur du réacteur est réfrigéré et modéré par l'eau, laquelle vient se refroidir dans les échangeurs principaux (appelés générateurs de vapeur). Les mélangeurs ou réchauffeurs sont notés R1, R2, R3, R4, R5 et R6 (figure 6).

On se place toujours en régime stationnaire.

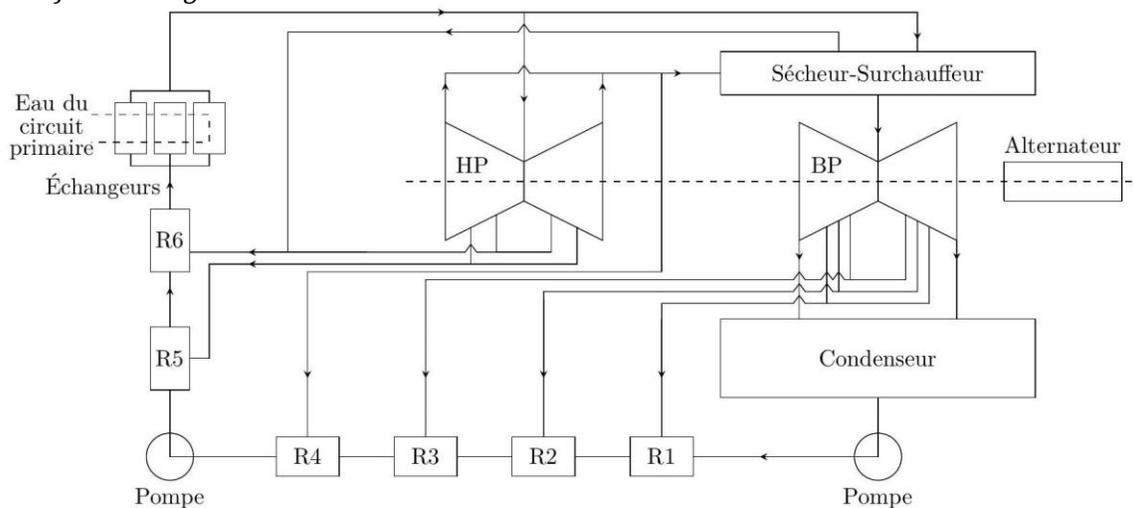


Figure 6 Schéma simplifié du circuit eau-vapeur d'une centrale nucléaire.

Q 23. Calculer l'efficacité du cycle en vous appuyant notamment sur les caractéristiques thermodynamiques du cycle fournies dans le tableau 2. En déduire la puissance disponible aux bornes de l'alternateur. En réalité, cette puissance disponible n'est que de 960MW : proposer une explication.

<i>Eau du circuit</i>	<i>Débit massique (t · h⁻¹)</i>	<i>Température (°C)</i>	<i>Pression (bar)</i>	<i>Enthalpie massique (kJ · kg⁻¹)</i>
<i>Eau sortie condenseur</i>		32,5	0,050	136,0
<i>Eau sortie réchauffeur 4</i>		181,1		768,0
<i>Eau sortie réchauffeur 5</i>		181,7		772,2
<i>Eau entrée échangeurs principaux</i>	5412,1	219,3	60	941,7
<i>Vapeur sortie échangeurs principaux</i>	5412,1	268,7	54	2788,4
<i>Vapeur admission turbine HP</i>	5001,9	266,4	52	2787,1
<i>Vapeur alimentant le sécheur surchauffeur</i>	403,7	266,4	52	2787,1
<i>Vapeur soutirage 6 sortie turbine HP</i>	214,3	223,3	26	2682,5
<i>Vapeur soutirage 5 sortie turbine HP</i>	208,4	203,4	17,6	2622,6
<i>Vapeur soutirage 4 sortie turbine HP</i>	402,1	183,8	11,5	2562,8
<i>Vapeur à l'échappement de la turbine HP</i>	4177,1	183,8	11,5	2562,8
<i>Vapeur admission turbine BP</i>	3704,0	264,1	11,2	2970,4
<i>Vapeur soutirage 3 sortie turbine</i>	281,4	137,8	3,6	2731,5
<i>Vapeur soutirage 2 sortie turbine</i>	235,4	97,4	0,97	2538,9
<i>Vapeur soutirage 1 sortie turbine</i>	134,2	60,8	0,22	2377,8
<i>Vapeur entrée condenseur (en provenance de la turbine BP)</i>	3053,0	32,9	0,050	2242,2

Tableau 2 Caractéristiques thermodynamiques du cycle.

Document réponse DM15

