

Devoir Surveillé 3

Les calculatrices sont autorisées

Samedi 12 octobre 2019 : 8h30 - 12h30

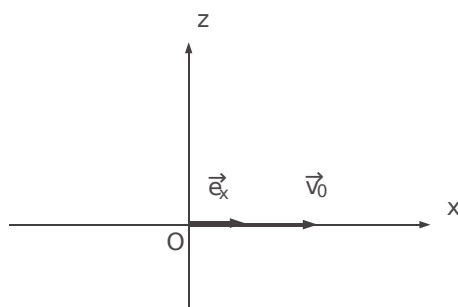
Influence de l'état de la route sur la distance d'arrêt

DOCUMENT : Quelques coefficients de frottement dynamique

matériaux	coefficient de frottement dynamique λ
acier sur glace	0.050
acier sur acier	0.40
verre sur verre	0.40
pneu sur béton sec	0.70
pneu sur béton mouillé	0.50
semelle de cuir sur bois	0.20
semelle de cuir sur tapis	0.50

On considère dans un premier temps que la route est en béton, rectiligne, horizontale et sèche. Le véhicule de masse $m = 1000$ kg est assimilé à un point matériel.

1. En admettant que l'action du conducteur sur la pédale de frein se traduit par une force \vec{f} colinéaire au déplacement s'exerçant sur le véhicule et s'opposant à son déplacement, établir un bilan des forces s'exerçant sur le véhicule et, reproduire et compléter le schéma ci-dessous en représentant ces forces.

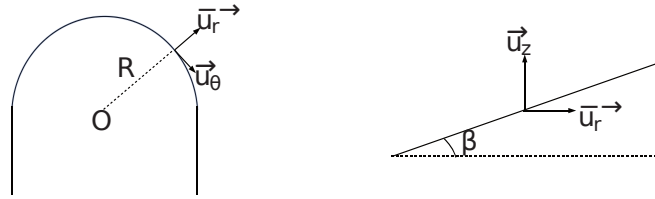


2. Déterminer la réaction normale de la route supposée horizontale.
3. Rappeler les lois de frottement de Coulomb-Amontons. On notera \vec{N} et \vec{T} respectivement les composantes normale et tangentielle de la réaction en notant λ le coefficient de frottement dynamique qu'on suppose égal au coefficient de frottement statique.
4. Dans le cas où il y a glissement par exemple lors d'un freinage où les roues se bloquent, déterminer la force de frottement exercée par la route sur le véhicule.
5. Exprimer la norme de la force de freinage si le véhicule subit une décélération de norme $a_0 = 12 \text{ m.s}^{-2}$. Comparer les forces de freinage et de frottement.

6. Toujours dans cette situation de glissement en bloquant les roues, calculer l'énergie dépensée pour arrêter un véhicule roulant initialement à une vitesse de 90 km.h^{-1} .
7. Pour garder le contact du véhicule sur la route, il ne doit pas y avoir glissement. Établir l'inégalité que doit vérifier la force de freinage en l'absence de glissement.
8. En comparant les valeurs limites sur béton sec et béton mouillé, conclure sur l'influence de l'état de la route sur le freinage.
9. On s'intéresse à la situation où le véhicule aborde une descente sur une route inclinée d'un angle α par rapport à l'horizontale. Exprimer la réaction normale dans ce cas.
10. Établir la nouvelle inégalité que doit vérifier la force de freinage en descente en l'absence de glissement.

Relèvement d'un virage

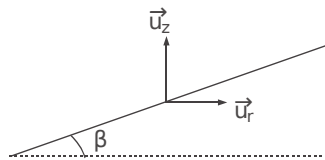
11. On revient au cas d'une route sèche et horizontale mais elle n'est plus rectiligne. On la modélise par un arc de cercle horizontal de rayon R et de centre O . Rappeler les expressions de la vitesse et de l'accélération d'un mouvement circulaire en coordonnées cylindriques (r, θ, z) d'origine O et d'axe vertical Oz .
12. On veut parcourir cette portion de route à vitesse constante v avec un véhicule de masse m . Que peut-on dire de la vitesse angulaire de rotation sur l'arc de cercle? En déduire l'expression de l'accélération du véhicule en coordonnées cylindriques.
13. En projetant le principe fondamental de la dynamique sur la verticale, exprimer la composante normale N de la réaction de la route.
14. Montrer qu'il y a forcément une force radiale \vec{T} au cours du mouvement. On donnera l'expression de sa norme en fonction de m , v et R .
15. Pour que le virage soit pris dans de bonnes conditions de sécurité, cette force doit correspondre à la composante tangentielle de la réaction de la route lorsqu'il n'y a pas glissement c'est-à-dire que sa norme T doit être inférieure à λN où N est la composante normale de la réaction et λ le coefficient de frottement (pour les éventuelles applications numériques, on se reportera au document en début d'énoncé si nécessaire). Montrer que pour qu'il en soit ainsi, la vitesse ne doit pas dépasser une valeur maximale v_{max} qu'on exprimera en fonction de λ , g et R . Donner sa valeur numérique sur route sèche avec $R = 50 \text{ m}$.
16. Si le virage est mouillé voire verglacé, que peut-on dire du coefficient de frottement? de la vitesse maximale avec laquelle on peut aborder le virage? Vers quelle limite tend v_{max} quand le frottement tend à s'annuler?
17. Pour améliorer le contact pneu-route, on relève le virage d'un angle β . La valeur de β est obtenue en cherchant à annuler l'accélération verticale. On suppose ici qu'il n'y a pas de frottement. Dans ce cas, déterminer l'expression de la norme de la réaction normale N en fonction de m , g et β .



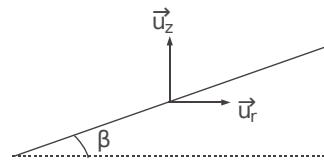
projection perpendiculaire à \vec{u}_z projection perpendiculaire à \vec{u}_θ

Figure 2: Deux projections du relèvement d'un virage

18. Montrer que l'accélération radiale correspond à la composante horizontale de la réaction normale. En déduire la valeur de la vitesse constante v dans le virage en fonction de g , R et β . Donner sa valeur pour $\beta = 20^\circ$ et $R = 50$ m.
19. Calculer la valeur de β pour retrouver la vitesse v_{max} obtenue précédemment en question 15.
20. La valeur de β correspond à une vitesse v_{ref} donnée. Que se passe-t-il lorsque la vitesse est plus faible ? plus grande ? On reproduira et complètera les figures ci-dessous pour justifier sa réponse.



vitesse plus faible que v_{ref}



vitesse plus grande que v_{ref}

Un traîneau sur la glace

Un traîneau à chiens est un dispositif de masse totale M (le pilote, ou musher, est compris dans cette masse) qui peut glisser sur la surface de la glace avec des coefficients de glissement statique (avant le démarrage) μ_s et dynamique (en mouvement) μ_d .

21. Les chiens sont reliés au traîneau par des éléments de corde tendus, de masse négligeable et inextensibles. Montrer qu'un tel élément de corde transmet les tensions et que celles-ci sont colinéaires à la corde.
22. Le trajet se fait soit à l'horizontale, soit sur une faible pente ascendante caractérisée par l'angle α avec l'horizontale. Montrer que, dans ce dernier cas, tout se passe comme dans un mouvement horizontal sous réserve de remplacer μ_d par μ'_d , que l'on exprimera.

L'intensité de la force de traction totale F exercée par l'ensemble des chiens dépend de leur vitesse v et on adoptera le modèle $F = F_0 - \beta v$ où F_0 et β sont des constantes positives. On prendra les valeurs $M = 5,0 \times 10^2$ kg, $\alpha = 0$, $\mu_d = 5,0 \times 10^{-2}$ et $\mu_s = 8,0 \times 10^{-2}$.

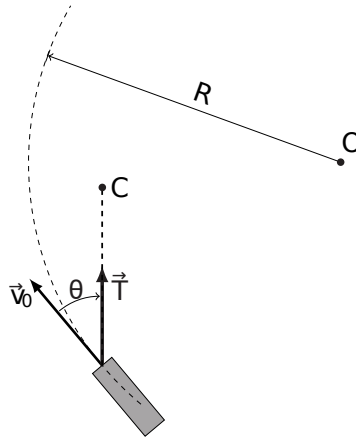


Figure 4 – Trajectoire circulaire du traîneau

23. Déterminer la valeur minimale de F_0 permettant le démarrage du traîneau.
24. La vitesse du traîneau en régime stationnaire est $v_0 = 3 \text{ m.s}^{-1}$, atteinte à 5% près au bout d'un temps $t_1 = 5 \text{ s}$. Exprimer d'une part β en fonction de M et t_1 et d'autre part F_0 en fonction de β , v_0 , μ_d , M et g . Calculer leurs valeurs respectives.

Toujours à vitesse constante v_0 , le traîneau aborde une courbe à plat qu'on assimilera à un cercle de centre O et de rayon R (cf. fig. 4). Les chiens (modélisés ici en un seul point C) doivent donc tirer vers l'intérieur du cercle.

25. Déterminer en fonction des données la tension \vec{T} de la corde et l'angle θ entre la force de traction et la trajectoire.

Refroidissement du supraconducteur

Pour arriver à des températures critiques basses, un supraconducteur doit être refroidi en utilisant des procédés sophistiqués. Pour les supraconducteurs haute-température, type cuprates, les températures critiques sont facilement atteignables en utilisant du diazote liquide. Dans cette partie, on étudie le processus de Linde-Hampson de liquéfaction du diazote.

Le principe de la machine est représenté en figure ci-dessous.

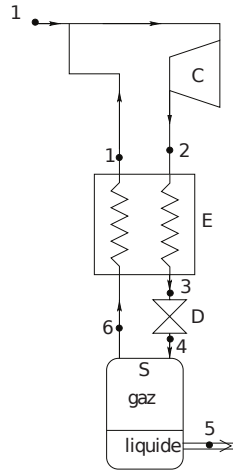


Fig. - Cycle de Linde-Hampson

- Au repère 1, le diazote entre dans le compresseur, noté C, dans l'état 1 à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 290$ K.
- Dans le compresseur, le diazote subit une compression isotherme réversible qui l'amène au repère 2 à la pression $P_2 = 200$ bar.
- Le diazote sortant du compresseur passe dans l'échangeur thermique E (repère 3) où il y est refroidi à pression constante.
- Le détendeur D détend le gaz jusqu'à la pression atmosphérique P_1 . Le détendeur est un simple robinet et ne comporte donc pas de parties mobiles. À sa sortie, le diazote est un mélange de gaz et de liquide.
- Le liquide formé est extrait au niveau du séparateur S et la vapeur saturée (repère 6) est renvoyée dans l'échangeur thermique E. Le repère 5 ne fait pas partie du cycle. Le diazote gazeux est ramené à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.
- Le détendeur D, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés. Lors du passage dans le séparateur et l'échangeur thermique, les transformations sont considérées comme isobares.

Premier et deuxième principes dans un écoulement

Prenons un fluide qui s'écoule en passant d'un état thermodynamique 1 à un état thermodynamique 2. Ce dernier échange de l'énergie avec l'extérieur sous forme de travail et de transfert thermique. L'écoulement est considéré permanent dans toute la suite du problème.

Les principes appliqués à chaque organe s'écrivent

$$\begin{aligned} h_s - h_e &= w_u + q \\ s_s - s_e &= \frac{q}{T_{ext}} + s_c \text{ avec } s_c \geq 0 \end{aligned}$$

26. Quelle est la signification de chaque terme du système d'équations précédent.
27. Quelle hypothèse fondamentale permet d'établir ce système ?

Étude du cycle

Le diagramme enthalpique (P, h) est donné dans le document page suivante.

28. Placer les points 1, 2, 5 et 6 sur le diagramme (P, h) du document page suivante.
29. Par lecture graphique, déterminer pour ces points leurs enthalpies et entropies massiques.

On s'intéresse à la validité du modèle du gaz parfait.

30. Pour un gaz parfait, comparer les isothermes et les isenthalpes dans un diagramme (P, h).
31. En déduire à partir du diagramme, dans quel domaine de pression on peut considérer le diazote comme un gaz parfait.

On étudie maintenant la transformation $1 \rightarrow 2$ dans le compresseur.

32. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique $q_{1 \rightarrow 2}$. Faire l'application numérique.
33. En déduire le travail massique $w_{1 \rightarrow 2}$ fourni par le compresseur au système.

On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation $3 \rightarrow 4$) et du séparateur (transformation $4 \rightarrow 6$). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

34. Déterminer la nature de la transformation $3 \rightarrow 4$.
35. On note y la fraction massique en diazote liquide. À partir du point 4, le diazote est séparé en deux : le liquide d'enthalpie massique h_5 est extrait et le gaz d'enthalpie massique h_6 est envoyé dans l'échangeur thermique. Déterminer l'expression de h_4 en fonction de y , de l'enthalpie massique du liquide h_5 et celle du gaz h_6 .

On regarde maintenant l'échangeur thermique E (transformation $2 \rightarrow 3$ et $6 \rightarrow 1$). On peut montrer en utilisant le premier principe que

$$h_3 - h_2 + (1 - y)(h_1 - h_6) = 0$$

36. En déduire l'expression de y en fonction des enthalpies massiques h_1 , h_2 et h_5 . Faire l'application numérique.
37. Calculer numériquement le travail pour extraire 1 kg d'azote liquide.
38. En utilisant la question 36, placer le point 4 sur le diagramme (P, h). En déduire l'enthalpie massique h_4 et l'entropie massique s_4 .
39. Placer alors le point 3 sur le diagramme (P, h). En déduire l'enthalpie massique h_3 et l'entropie massique s_3 .
40. Calculer la différence entre les entropies à l'entrée et à la sortie du détendeur. En déduire l'entropie massique créée. Préciser l'origine de l'irréversibilité si elle existe.
41. Sachant que le prix du kWh (kilowatt-heure) en France en 2017 est de 0,15 euros, déterminer l'énergie nécessaire et le coût pour liquéfier un volume de 10 L de diazote.

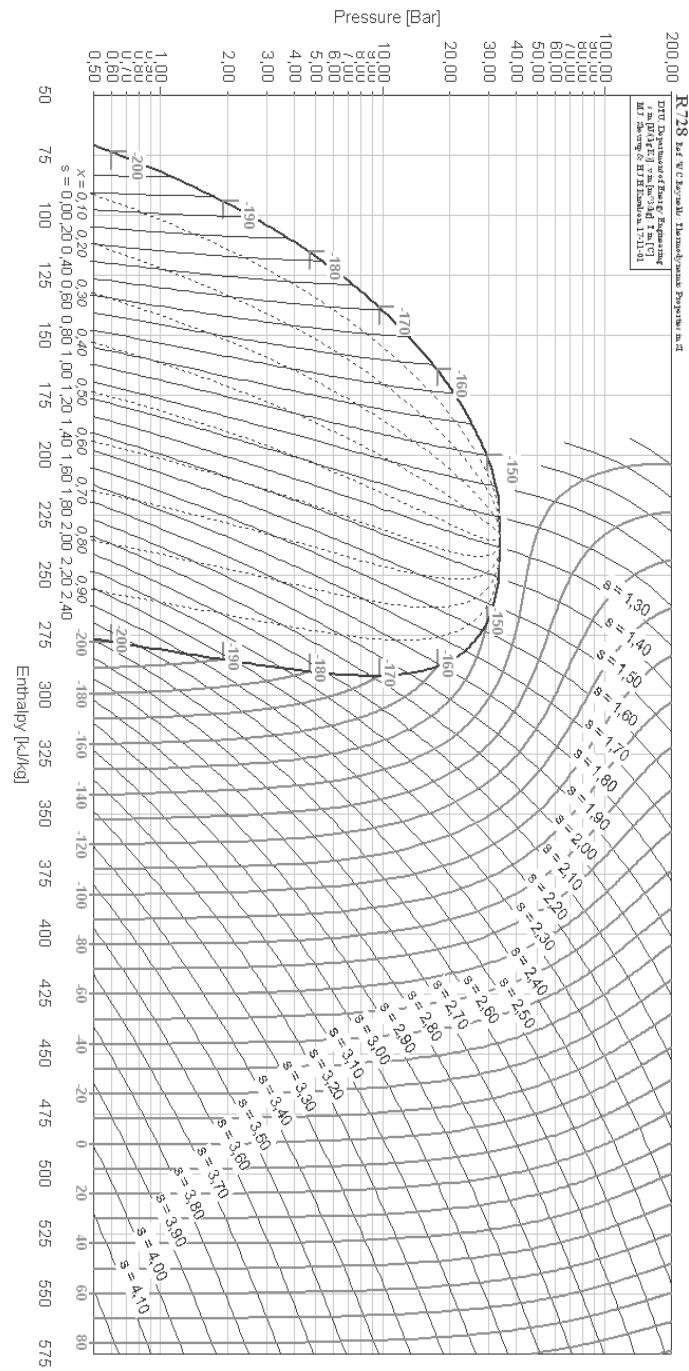


Fig. - Les entropies massiques s sont en kJ/K/kg , les volumes massiques en m^3/kg et les températures en degrés Celsius.

Étude d'une installation nucléaire REP

La France compte 19 centrales nucléaires en exploitation, dans lesquelles tous les réacteurs (58 au total) sont des réacteurs à eau pressurisée. Actuellement, ces installations produisent près de 80% de l'électricité produite en France. Chaque centrale est soumise à un référentiel de normes de sûreté et de sécurité évoluant en fonction des enseignements des incidents passés nationaux ou internationaux. Le but de ce problème est d'étudier quelques aspects liés au fonctionnement d'une centrale nucléaire REP, ainsi que plusieurs dispositions prises en matière de sûreté nucléaire : contrôle des rejets de la centrale et surveillance sismique d'un site nucléaire.

Circuit secondaire et enrichissement de l'uranium

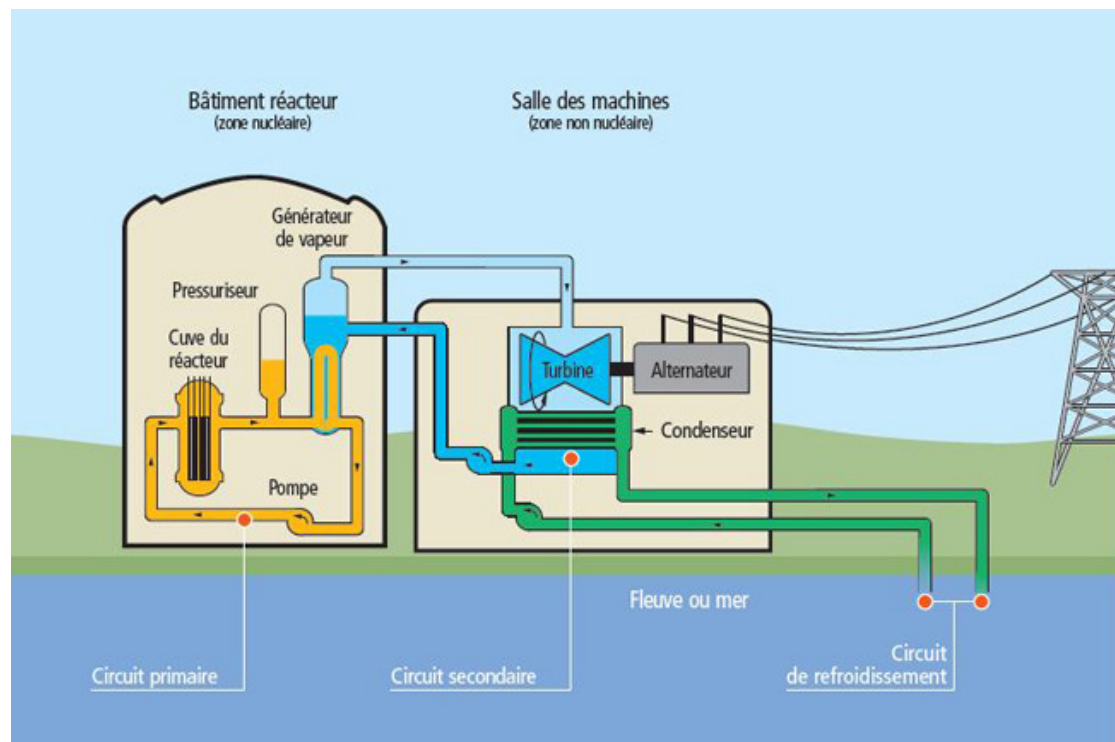


Figure Schéma global d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire est un site industriel destiné à la production d'électricité, qui utilise comme chaudière un réacteur nucléaire pour produire de la chaleur. Une centrale nucléaire REP (Réacteur à Eau Pressurisée) est constituée de deux grandes zones (voir figure ci-dessus) :

- une zone non nucléaire (salle des machines). Dans cette partie, semblable à celle utilisée dans les centrales thermiques classiques, s'écoule de l'eau dans un circuit secondaire. Cette eau est évaporée dans le Générateur de Vapeur (GV) par absorption de la chaleur produite dans la zone nucléaire, puis elle entraîne une turbine (T) couplée à un alternateur produisant de l'électricité, ensuite elle est condensée au contact d'un refroidisseur (rivière ou mer ou atmosphère via une tour aéroréfrigérante) et enfin, elle est comprimée avant d'être renvoyée vers le générateur de vapeur ;
- une zone nucléaire (dans le bâtiment réacteur), où ont lieu les réactions nucléaires de fission, qui produisent de l'énergie thermique et chauffent ainsi l'eau sous pression circulant dans

le circuit primaire. Le transfert d'énergie thermique entre le circuit primaire et le circuit secondaire se fait dans le générateur de vapeur, où la surface d'échange entre les deux fluides peut atteindre près de 5000 m^2 (réseau de tubulures).

Description du circuit secondaire de la centrale

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $P_e = 900 \text{ MW}$. Le fluide circulant dans le circuit secondaire est de l'eau, dont l'écoulement est supposé stationnaire. Le cycle thermodynamique décrit par l'eau est un cycle ditherme moteur. L'eau liquide sera supposée incompressible et de capacité thermique massique isobare supposée constante. Le tableau en fin d'énoncé donne diverses données thermodynamiques relatives à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.

Cycle de Carnot Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux sources de température T_{ch} et T_{fr} ($T_{fr} < T_{ch}$).

42. Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.
43. Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant $T_{ch} = 543 \text{ K}$ et $T_{fr} = 303 \text{ K}$, les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.
44. Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_t = 2785 \text{ MW}$, que vaut le rendement thermodynamique réel de l'installation ? On supposera que la puissance mécanique transmise à la turbine est intégralement convertie en puissance électrique. Commenter.

Cycle de Rankine L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes (représentées dans la figure ci-dessous)

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55 \text{ bar}$ jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état B) ;
- de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression P_2 à la pression $P_1 = 43 \text{ mbar}$;
- en C , le fluide est diphasé ;
- de C à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

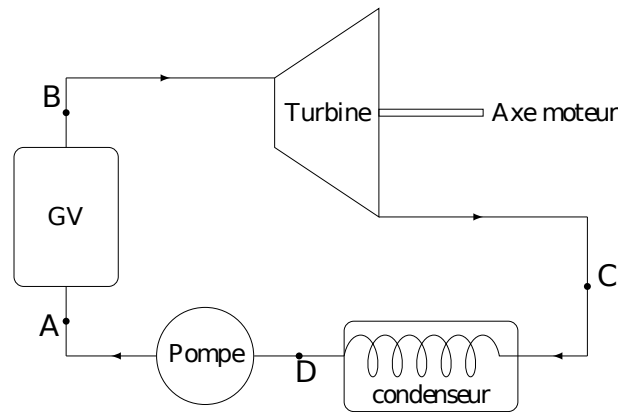


Figure Cycle de Rankine

45. Représenter dans le diagramme de Clapeyron (P, v) l'allure de la courbe de saturation de l'eau, ainsi que les isothermes T_B , T_D et $T_{critique}$, cette dernière température étant celle du point critique de l'eau. Préciser les domaines du liquide, de la vapeur, de la vapeur saturante. Représenter sur ce même diagramme l'allure du cycle décrit par l'eau du circuit secondaire. Indiquer le sens de parcours du cycle et placer les points A , A' , B , C et D .
46. D'après l'extrait de table thermodynamique donné en fin d'énoncé, quelles sont les valeurs des températures, des enthalpies massiques et des entropies massiques aux points A' , B et D ? On pourra donner les valeurs sous forme de tableau.
47. Dans le document réponse figure le diagramme enthalpique (P, h) de l'eau. Placer, avec soin et à l'échelle, les points A' , B , C , D du cycle. On explicitera la méthode.
48. Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Exprimer alors, sans démonstration, le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile w_u et le transfert thermique massique q .
49. Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.
50. Exprimer le transfert thermique massique $q_{AA'}$ reçu par l'eau liquide quand elle passe de manière isobare de la température T_A à la température $T_{A'}$ dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique : on considérera $T_A \simeq T_D$.
51. Exprimer le transfert thermique massique $q_{A'B}$ reçu par l'eau quand elle se vaporise complètement dans le générateur de vapeur. Donner sa valeur numérique.
52. Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.
53. Dans quel état se trouve l'eau à la fin de la détente de la turbine? Donner le titre massique en vapeur à l'aide du diagramme enthalpique. En quoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la turbine?

Cycle de Rankine avec détente étagée Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment (voir figure ci-dessous). En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations sont maintenant modélisées par

- de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression $P_2 = 55$ bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A'), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B) ;
- de B à C' : détente adiabatique réversible dans la turbine « haute pression », de la pression P_2 à la pression $P_3 = 10$ bar ;
- de C' à B' : échauffement isobare à la pression P_3 , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B') ;
- de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine « basse pression », de la pression P_3 à la pression $P_1 = 43$ mbar ;
- de C'' à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant ;
- de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression P_1 à la pression P_2 , du liquide saturant sortant du condenseur. On négligera le travail consommé par cette pompe devant les autres énergies mises en jeu.

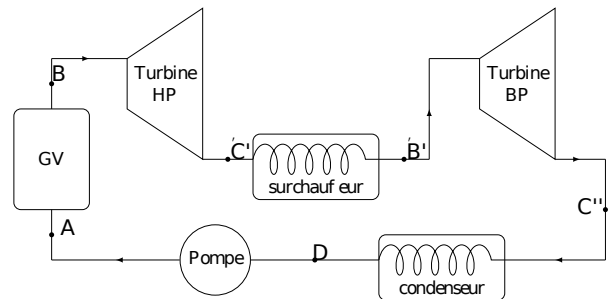


Figure Cycle de Rankine avec une détente étagée

- Placer les nouveaux points C' , B' , C'' sur le diagramme enthalpique du document réponse.
- Comparer les titres massiques en vapeur des points C' et C'' au titre massique en vapeur du point C . Quel est l'intérêt de la surchauffe ?
- À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

Extrait de table thermodynamique relatif à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau

θ (°C)	P_{sat} (bar)	Liq. sat. v_l (m ³ .kg ⁻¹)	Liq. sat. h_l (kJ.kg ⁻¹)	Liq. saturant s_l (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)	Vap. sat. v_v (m ³ .kg ⁻¹)	Vap. sat. h_v (kJ.kg ⁻¹)	Vap. sat. s_v (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
30	0,043	1,0047	125,22	0,4348	32,892	2555,92	8,4530
180	10	1,1276	763,18	2,1395	0,119404	2777,84	6,5854
270	55	1,3053	1190,10	2,9853	0,03505	2788,46	5,9226

θ température

P_{sat} pression de vapeur saturante

v_l volume massique du liquide saturant

h_l enthalpie massique du liquide saturant

s_l entropie massique du liquide saturant

v_v volume massique de la vapeur saturante sèche

h_v enthalpie massique de la vapeur saturante sèche

s_v entropie massique de la vapeur saturante sèche

$c = 4,18$ kJ.K⁻¹.kg⁻¹ capacité thermique isobare de l'eau

Les températures sont exprimées en °C

