

THE LAST ONE ;-)

JEUDI 13 JUIN 2024 - DURÉE 3H

Ce devoir se compose d'une partie chimie et d'une partie physique. L'énoncé de physique sera distribué au bout de 1h20 (donc à 15h35), et les copies de chimie seront ramassées au bout de 1h40 (donc à 15h55).

Les consignes suivantes sont valables pour l'intégralité du devoir :

- * Il sera tenu le plus grand compte du soin, de la présentation, et de la rédaction
- * Chaque réponse doit être justifiée
- * Même lorsque ce n'est pas explicitement demandé, toute application numérique doit être précédée d'une expression littérale
- * La calculatrice n'est pas autorisée (pendant toute la durée du devoir)

Partie chimie

I. Le bioéthanol (Chimie Mines-Ponts MP 2018)



A2018 – CHIMIE MP



ÉCOLE DES PONTS PARISTECH,
ISAE-SUPAERO, ENSTA PARISTECH,
TELECOM PARISTECH, MINES PARISTECH,
MINES SAINT-ÉTIENNE, MINES NANCY,
IMT Atlantique, ENSAE PARISTECH.

Concours Centrale-Supélec (Cycle International),
Concours Mines-Télécom, Concours Commun TPE/EIVP.

CONCOURS 2018

ÉPREUVE DE CHIMIE

Durée de l'épreuve : 1 heure 30 minutes

L'usage de la calculatrice et de tout dispositif électronique est interdit.

*Les candidats sont priés de mentionner de façon apparente
sur la première page de la copie :*

CHIMIE - MP

L'énoncé de cette épreuve comporte 6 pages de texte.

*Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur
d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les
raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.*

DEBUT DE L'ENONCE

le bioéthanol

Des données utiles pour la résolution du problème sont fournies à la fin de l'énoncé.

L'épuisement des ressources fossiles ainsi que l'augmentation de l'effet de serre impliquent de trouver des solutions économes en consommation de pétrole notamment dans le domaine des transports. Une voie consiste à mélanger l'essence à des biocarburants: le bioéthanol est ainsi présent à hauteur de 10% dans l'essence SP95-E10, et jusqu'à 85% dans le superethanol E85.

Les biocarburants de seconde génération sont issus de sources ligno-cellulosiques (bois, feuilles, pailles). Afin de fabriquer le biocarburant, la cellulose contenue dans ces végétaux est tout d'abord séparée de la lignine et de l'hémicellulose par cuisson acide puis par explosion à la vapeur. La cellulose, polymère de glucose, est ensuite transformée en glucose (sucre à six atomes carbone de formule brute $C_6H_{12}O_{6(s)}$) par hydrolyse enzymatique. Le glucose est enfin transformé en éthanol lors d'une étape de fermentation utilisant des levures.

1- Représenter la structure de Lewis de la molécule d'éthanol. Expliquer pourquoi l'eau et l'éthanol sont miscibles. Quelle est la conséquence sur les carburants à base de mélange d'essence et d'éthanol ?

2- Ecrire l'équation chimique (réaction (1)) de la synthèse de l'éthanol liquide à partir de la fermentation anaérobie d'une mole de glucose ($C_6H_{12}O_{6(s)}$), seul du dioxyde de carbone est produit en même temps que l'éthanol.

~~3- Calculer et commenter l'enthalpie standard de cette réaction à 298 K.~~

On cherche à présent à mesurer la quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète de l'éthanol dans l'air. On brûle complètement 3g d'éthanol dans une bombe calorimétrique à partir de la température $T_i=298,0$ K. A la fin de l'expérience, l'eau du calorimètre est à la température $T_f= 318,0$ K. Le volume d'eau est de 1000 mL et on négligera la capacité calorifique du calorimètre par rapport à celle du volume d'eau.

4- Ecrire l'équation bilan de la réaction (notée (2)). Pourquoi dit-on que le bioéthanol est un carburant propre alors que sa combustion produit des gaz à effet de serre ?

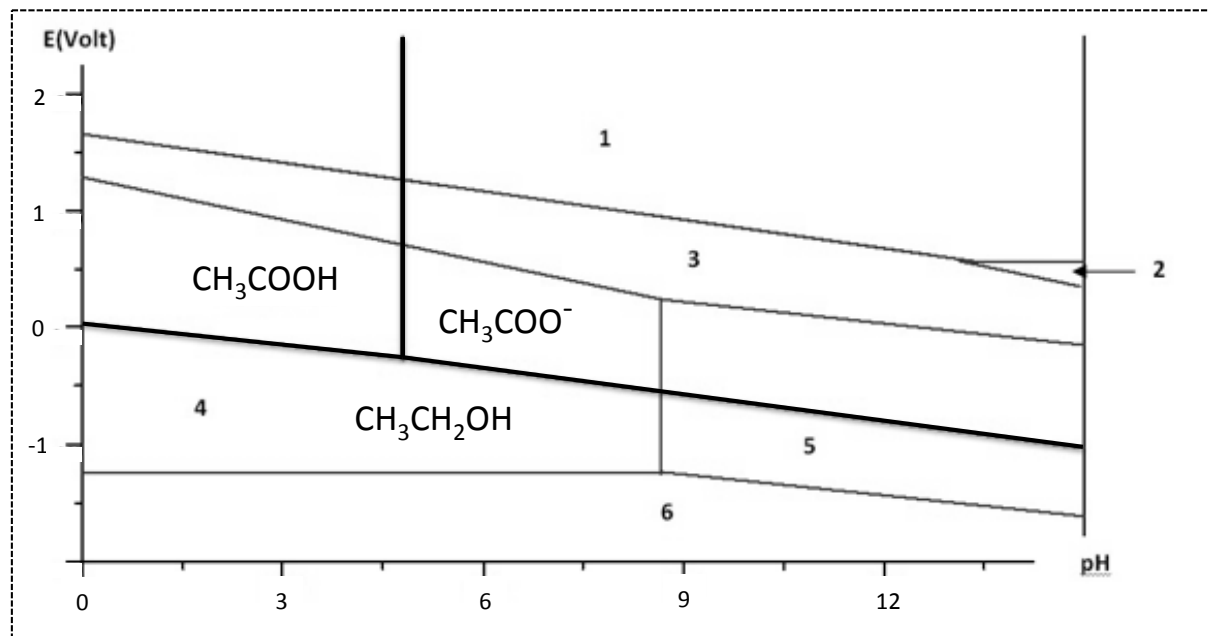
~~5- Calculer grâce à l'expérience de calorimétrie l'enthalpie standard molaire de la réaction de combustion de l'éthanol (liquide) à 298 K.~~

~~6- Calculer grâce aux données fournies en annexe l'enthalpie standard molaire de la réaction de combustion de l'éthanol (liquide) à 298 K. Conclure.~~

Ont été superposés ci-après les diagrammes potentiel-pH du manganèse (traits fins) et de l'éthanol (traits épais).

Conventions de tracé :

- Concentration totale en espèce dissoute : $C = 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$.
- On considérera qu'il y a égalité des concentrations aux frontières séparant deux espèces en solution.



7- Associer aux différents domaines du diagramme potentiel-pH de l'élément manganèse les espèces solides Mn , MnO_2 et Mn(OH)_2 ainsi que les ions en solution Mn^{2+} , MnO_4^- et MnO_4^{2-} . Justifier. On précisera pour chaque espèce du manganèse son degré d'oxydation.

8- Déterminer l'équation de la frontière verticale séparant l'espèce 4 de l'espèce 5.

9- Donner (en justifiant) l'équation de la frontière verticale séparant CH_3COOH et CH_3COO^- ainsi que celle de la frontière séparant CH_3COOH et $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$.

10- En utilisant le graphique, déterminer le potentiel standard du couple $\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}$.

11- En justifiant, donner la configuration électronique de l'ion Mn^{2+} .

On souhaite doser l'éthanol contenu dans un flacon étiqueté « équivalent biocarburant ». Le protocole à suivre est le suivant.

1^{ère} étape : Extraction de l'éthanol du mélange initial

Placer le biocarburant dans une ampoule à décanter, introduire 20 mL d'eau distillée, agiter et laisser décanter. Récupérer la phase aqueuse. Renouveler cette opération 2 fois. Mélanger les 3 phases aqueuses obtenues dans une fiole jaugée de 100 mL. Compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée ; on obtient ainsi la solution S_1 de concentration molaire C_1 en éthanol. Cette solution contient a priori tout l'éthanol provenant du biocarburant.

2^{ème} étape : Préparation de la solution à titrer

La solution S_1 étant trop concentrée, il est nécessaire de réaliser une dilution. On veut obtenir 50 mL de solution S_2 de concentration $C_2 = C_1/10$.

3^{ème} étape : Oxydation de l'éthanol

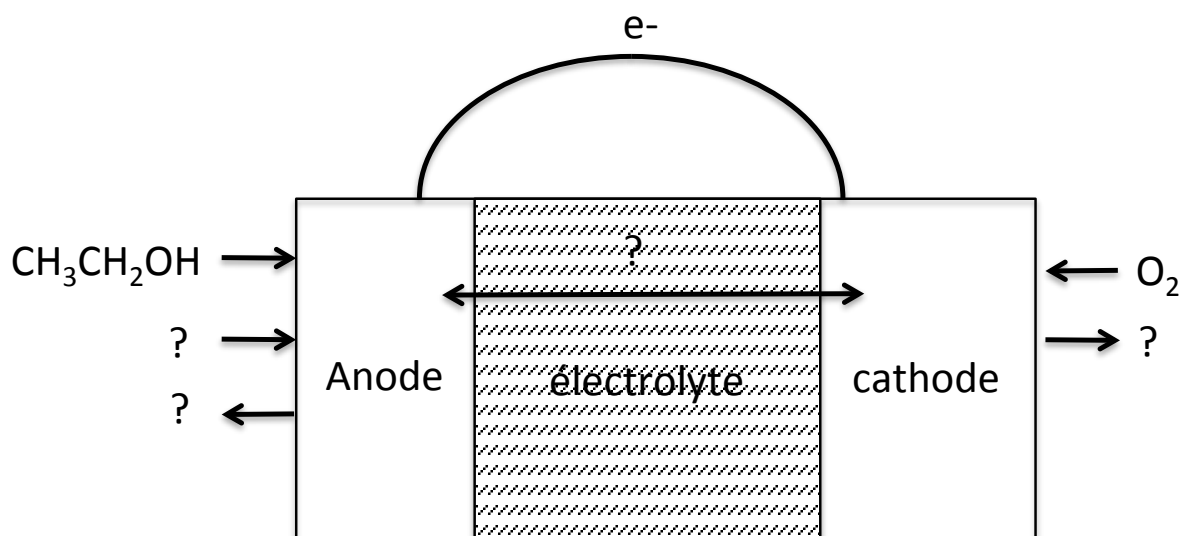
Dans un erlenmeyer, introduire : précisément $V_3 = 100$ mL de solution de permanganate de potassium de concentration $C_3 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$, un volume $V_2 = 2,00$ mL de S_2 prélevé à la pipette jaugée, environ 2 mL d'acide sulfurique concentré manipulé avec précaution. Boucher l'erlenmeyer puis le fixer dans un cristallisoir rempli d'eau chaude et laisser pendant 20 à 30 minutes.

4^{ème} étape : Dosage de l'excès d'ions MnO_4^- dans la solution

Doser le contenu de l'erlenmeyer par une solution contenant des ions Fe^{2+} de concentration $C_4 = 2 \cdot 10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$. Noter le volume V_E versé à l'équivalence. Le titrage doit être réalisé suffisamment lentement sur la fin pour dissoudre le précipité brun de MnO_2 qui se forme pendant la réaction.

- 12- Décrire un protocole pour l'étape de dilution en précisant la verrerie et le matériel utilisé.
- 13- Ecrire l'équation de la réaction qui a lieu entre l'éthanol et MnO_4^- en milieu acide.
- 14- Ecrire l'équation de la réaction de dosage entre Fe^{2+} et MnO_4^- en milieu acide.
- 15- Pourquoi ne dose-t-on pas directement l'éthanol par MnO_4^- ?
- 16- Sachant que $V_E = 10,0$ mL, calculer la quantité d'éthanol n_2 contenue dans la solution S_2 . En déduire la concentration C_1 en éthanol de la solution S_1 .
- 17- A l'aide du diagramme potentiel-pH, expliquer pourquoi on doit rajouter de l'acide sulfurique concentré dans le mélange pour réaliser la 3^{ème} étape. Comment peut-on s'assurer que la réaction d'oxydation de l'éthanol par les ions permanganate est bien possible grâce à ce diagramme ?

Moins toxique que le méthanol, le bioéthanol peut être utilisé dans des piles à combustible selon le schéma suivant:



18- Sachant que l'équation bilan est la même que celle de la combustion de l'éthanol dans l'air, reproduire et compléter le schéma de la pile en renseignant les espèces chimiques manquantes et en précisant le sens des ions dans l'électrolyte et des électrons dans le circuit extérieur.

19- Commenter succinctement les avantages et inconvénients pratiques de cette pile.

20- Ecrire les demi-équations à chaque électrode.

~~21- Calculer la tension à vide standard de la pile.~~

Le bioéthanol peut aussi être utilisé pour produire du dihydrogène par reformage. En général, c'est le Rhodium à l'état métallique qui est utilisé comme catalyseur.

22- Situer le Rhodium dans la classification périodique (ligne et colonne).

23- Le Rhodium métallique cristallise selon la structure cubique à face centrée. Sachant que sa masse volumique est d'environ $12,4 \text{ g/cm}^3$, en déduire le rayon atomique de l'élément Rh.

Données :

Numéros atomiques : $Z(\text{Mn})=25$, $Z(\text{Rh})=45$

Masses molaires :

$M(\text{Rh})= 103 \text{ g.mol}^{-1}$, $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$; $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$; $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$

Constante d'Avogadro : $N_A= 6,0.10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

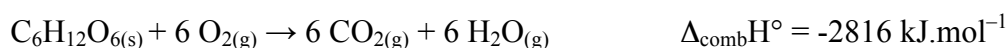
Constante des gaz parfaits : $R= 8,3 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Constante de Faraday : $F= 96500 \text{ C.mol}^{-1}$

Constante de Nernst à 298 K : $\frac{RT}{F} \ln 10 = 0,06V$

Enthalpies standard de formation, entropies standard et capacités calorifiques molaires standard (à 298 K):

	$\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol ⁻¹)	S_m° (J.K ⁻¹ .mol ⁻¹)	C_{pm}^0 (J.K ⁻¹ .mol ⁻¹)
C ₂ H ₅ OH(g)	-235	283	-
C ₂ H ₅ OH(l)	-277	161	112
O ₂ (g)	0	205	29
N ₂ (g)	-	-	29
CO ₂ (g)	-394	214	37
H ₂ O(g)	-242	189	34
H ₂ O(l)	-286	70	75

Enthalpie standard de combustion du glucose :

$\text{p}K_s(\text{Mn}(\text{OH})_2) = 12,7$ à 25°C

Constante d'équilibre de la réaction d'autoprotolyse de l'eau à 25°C : $K_e = 10^{-14}$

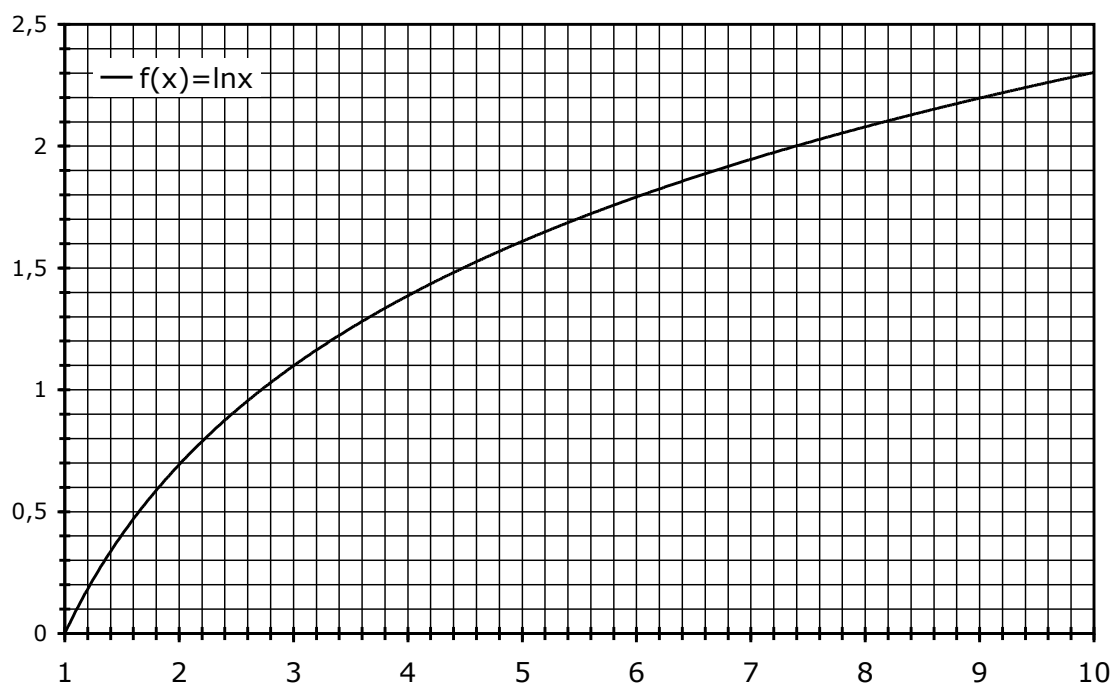
$\text{p}K_a(\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-) = 4,8$ à 25°C

Potentiels redox standards à pH = 0 et à 25°C :

$$E^\circ(\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}) = 0,037 \text{ V}$$

$$E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$$

Approximations numériques : $\sqrt{2} \approx \frac{10}{7}$ $\sqrt{3} \approx \frac{7}{4}$



FIN DE L'ENONCE

PARTIE PHYSIQUE

I. Équilibre d'une barre

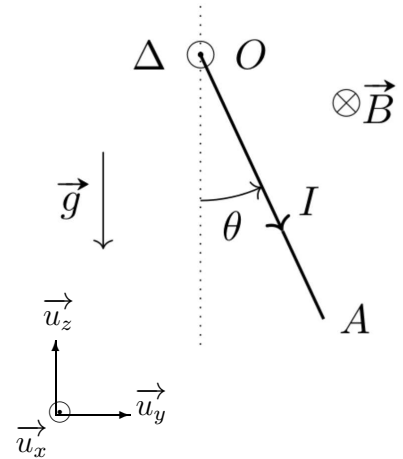
Une tige conductrice OA, homogène de masse m , de centre de gravité G et de longueur ℓ , est mobile en rotation sans frottements autour d'un axe horizontal Δ passant par son extrémité O.

On note J le moment d'inertie de la barre par rapport à Δ .

Un dispositif, non représenté sur la figure, permet de faire circuler un courant stationnaire d'intensité I dans la tige qui est de plus soumise à l'action d'un champ magnétique uniforme $\vec{B} = B \vec{u}_x$ parallèle à Δ .

On note $\theta(t)$ l'angle entre la verticale descendante et la direction de la tige.

Le dispositif plonge dans le champ de pesanteur $\vec{g} = -g \vec{u}_z$.



I.1 Questions préliminaires

1. Quel est le système de coordonnées le mieux adapté à l'étude de ce problème ? Représenter la base correspondante sur le schéma reproduit sur votre copie.
2. Déterminer la dimension de \vec{B} puis son unité en fonction des unités de base du système international.

I.2 Mouvement sans frottement fluide

Dans un premier temps, on néglige les frottements fluides.

3. Dans ce repère, faire le bilan des actions extérieures subies par la barre.
4. Déterminer la(les) position(s) d'équilibre θ_{eq} en fonction de m , g , B , I et ℓ . La condition que ces paramètres doivent respecter pour que cette(s) position(s) existe(nt) effectivement sera précisée.
5. Montrer que l'angle θ est solution de l'équation différentielle

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + C_1^{\text{te}} \sin(\theta) = C_2^{\text{te}}$$

On précisera les expressions de C_1^{te} et C_2^{te} en fonction de m , g , ℓ , J , I et B .

On suppose désormais et pour toute la suite de l'exercice que le mouvement est de faible amplitude.

- a) À quel type de système a-t-on affaire ?
- b) Déterminer la période T des oscillations.
- c) La tige est écartée d'un angle θ_0 et lancée dans le sens horaire avec une vitesse de norme v_0 . Déterminer l'expression de $\theta(t)$.

I.3 Mouvement avec frottement fluide

On suppose désormais que les frottements fluides ne sont plus négligeables. On propose ainsi de considérer des forces de frottement fluide dont la résultante, qui s'applique en G, sera notée $\vec{f} = -\alpha \vec{v}_G^\beta$ avec $\alpha > 0$.

7. Quelle valeur donner à β pour obtenir une équation différentielle du mouvement en θ linéaire? Déterminer alors la dimension de α puis son unité en fonction des unités de base du système international.
8. En prenant en compte cette nouvelle force, établir la nouvelle équation différentielle du mouvement.
9. Montrer que le régime pseudo-périodique existe pour $\alpha < \alpha_c$.
 α_c sera exprimé en fonction de m, g, ℓ et J.
10. Cette condition étant remplie, en déduire l'expression de la pseudo-période T'.

II. Étude d'une installation nucléaire REP (Centrale MP 2016)

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

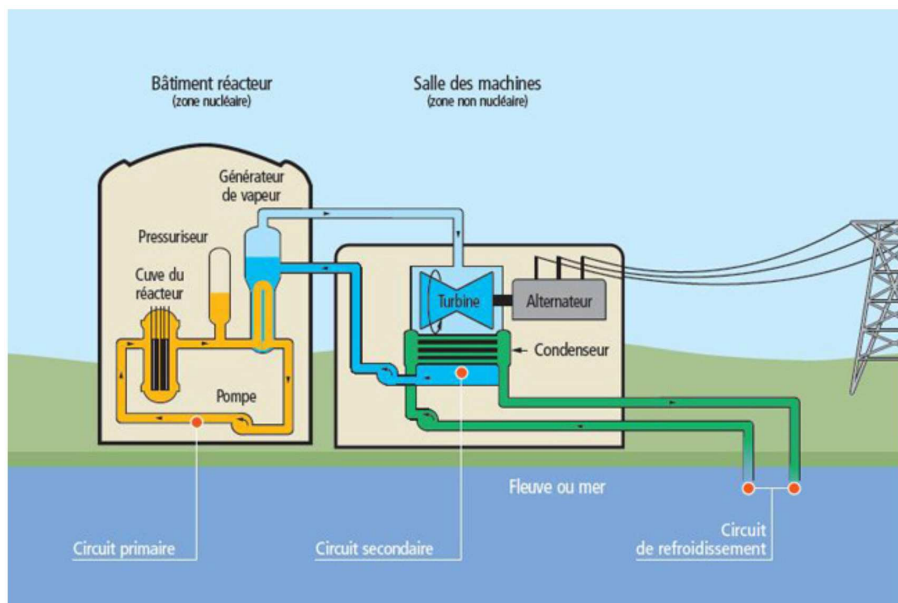


FIGURE 1 – Schéma global d'une centrale nucléaire

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 1) :

- 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 m² (réseau de tubulures).

Description du circuit secondaire de la centrale

Considérons une centrale nucléaire REP produisant une puissance électrique $P_e = 900$ 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.

II.1 Cycle de Carnot

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

1. Redémontrer le théorème de Carnot associé à ce cycle.
2. Donner la valeur numérique de ce rendement en prenant $T_{ch} = 543$ K et $T_{fr} = 303$ K, les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.
3. Sachant qu'un réacteur REP fournit à l'eau du circuit secondaire, via le générateur de vapeur, une puissance thermique $P_t = 2785$ 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.

II.2 Cycle de Rankine

L'eau du circuit secondaire subit les transformations suivantes (représentés dans la figure 2) :

- 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 (état B) ;
- de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression P_2 à la pression $P_1 = 43$ 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.

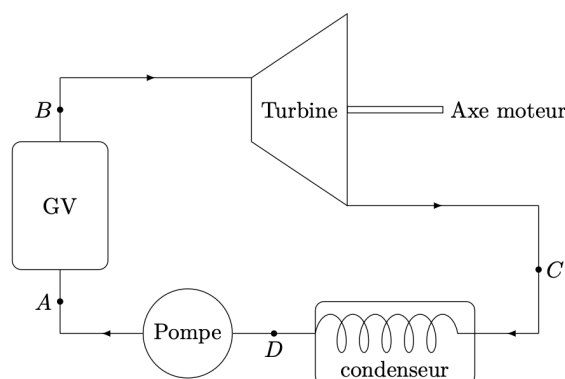


FIGURE 2 – Cycle de Rankine

4. 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 du parcours du cycle et placer les points A, A', B, C et D.

5. D'après l'extrait de la 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.
6. En annexe (à rendre avec la copie) figure le diagramme enthalpique (P, h) de l'eau, h étant l'enthalpie massique de l'eau. On peut y visualiser notamment la courbe de saturation en forme de cloche, constituée à gauche par la courbe d'ébullition et à droite la courbe de rosée. Les isentropiques massiques sont identifiées par l'étiquette s (en $\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$). Les isothermes (en $^{\circ}\text{C}$) sont quasiment verticales à droite de la courbe de rosée et horizontales sous la courbe de saturation (elles n'y sont à cet endroit identifiées que par leurs extrémités). Quant aux x indiqués sous l'axe des abscisses, ils font référence aux iso-titre massiques en vapeur.
Placer, avec soin et à l'échelle, les points A, A', B, C et D du cycle.

Dans toute la suite, on négligera les variations d'énergie cinétique et potentielle dans les bilans énergétiques. Le premier principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement stationnaire recevant de manière algébrique le travail massique utile w_u (travail fourni par le compresseur et qui ne comprend donc pas le travail des forces de pression nécessaires pour faire entrer et sortir le fluide du volume de contrôle) et le transfert thermique massique q s'écrit :

$$h_s - h_e = w_u + q \text{ où } e \text{ et } s \text{ désigne l'entrée et la sortie de la partie active}$$

7. Exprimer le travail massique w_{BC} reçu par l'eau dans la turbine. Donner sa valeur numérique, en s'aidant du diagramme enthalpique.
8. 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 $T_A \simeq T_D$.
9. 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.
10. Calculer alors le rendement de Rankine de l'installation. Comparer au rendement de Carnot et commenter. Comparer au rendement réel et commenter.
11. 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 ?

II.3 Cycle de Rankine avec détente étagée

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment (voir figure 3). 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 $P_2 = 55 \text{ bar}$, 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 $P_3 = 10 \text{ bar}$;
- de C' à B' : échauffement isobare à la pression P_3 , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturant sèche (point B') ;
- de B' à C'' : détente adiabatique réversible dans la turbine « basse pression », de la pression P_3 à la pression $P_1 = 43 \text{ mbar}$;
- 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.

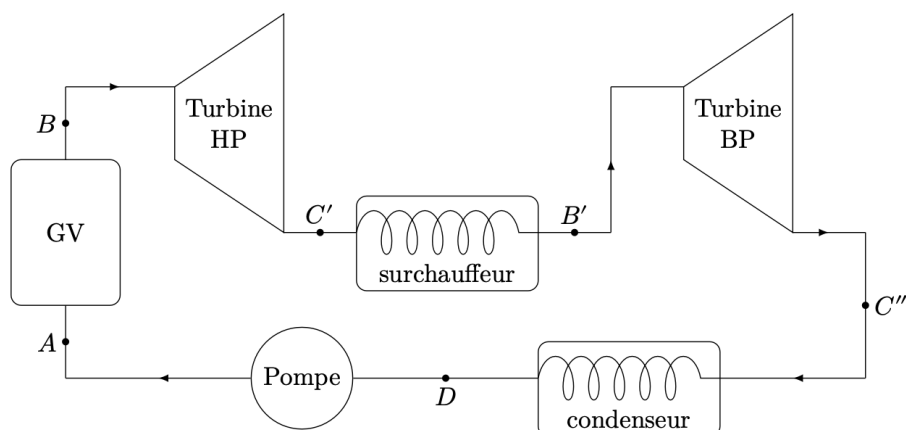


FIGURE 3 – Cycle de Rankine avec détente étagée

12. Placer les nouveaux points C' , B' et C'' sur le diagramme enthalpique.
13. 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 ?
14. À l'aide du diagramme enthalpique, déterminer le nouveau rendement du cycle. Commenter.

DONNÉES :

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

θ (°C)	P_{sat} (bar)	Liquide saturant			Vapeur saturante sèche		
		v_l (m ³ ·kg ⁻¹)	h_l (kJ·kg ⁻¹)	s_l (J·K ⁻¹ ·kg ⁻¹)	v_v (m ³ ·kg ⁻¹)	h_v (kJ·kg ⁻¹)	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

s_l entropie massique du liquide saturant

P_{sat} pression de vapeur saturante

v_v volume massique de la vapeur saturante sèche

v_l volume massique du liquide saturant

h_v enthalpie massique de la vapeur saturante sèche

h_l enthalpie massique du liquide saturant

s_v entropie massique de la vapeur saturante sèche

Capacité thermique massique isobare de l'eau

$$c = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$$

Annexe - à rendre avec votre copie

NOM :

Prénom :

