

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

RÉPONDEZ AUX 11 QUESTIONS SUIVANTES DANS LA PLATEFORME TEST DE MOODLE.

DATE DE L'EXAMEN : LUNDI 4 MAI 2020
DURÉE DE L'EXAMEN : 3 h (de 9 h 30 à 12 h 30)

Total : / 20

Cet examen est composé de trois sections :

SECTION 1 : INFORMATIONS ET DÉCLARATION SUR L'HONNEUR (1 QUESTION)

Temps suggéré : 2 minutes

SECTION 2 : CHOIX DE RÉPONSES ET RÉPONSES COURTES (7 QUESTIONS)
--

Temps suggéré : 45 minutes

Total : / 6,5

SECTION 3 : QUESTIONS À DÉVELOPPEMENT (3 QUESTIONS)
--

Temps suggéré : 105 minutes

Total : / 13,5

1. DÉCLARATION SUR L'HONNEUR :

Je déclare sur mon honneur que :

- ce travail est un travail original de ma part.
- j'ai répondu aux différentes questions par moi-même, sans l'aide d'une autre personne par tout moyen de communication que ce soit.
- j'ai respecté toutes les conditions énoncées dans les consignes.
- personne n'a effectué ni rédigé ce travail ou une partie de ce travail à ma place, gratuitement ou contre rémunération.
- je n'ai ni copié ni sauvegardé aucune partie du questionnaire ou du matériel transmis pour cet examen.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

SECTION 2 : CHOIX DE RÉPONSES ET RÉPONSES COURTES (7 QUESTIONS)

Temps suggéré : 45 minutes

Total : / 6,5

2. Développement durable - 1 (0,5 point)

Expliquez pourquoi (à l'aide de deux arguments) le recyclage des composantes électroniques est difficile à mettre en place.

3. Développement durable - 2 (0,5 point)

Afin de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, le GIEC stipule qu'il faut, d'ici 2030, réduire de 45 % les émissions de CO₂ par rapport à 2010. Nommez deux éléments concrets sur lesquels les ingénieurs informatique et logiciel peuvent agir afin d'atteindre cet objectif.

4. Développement durable - 3 (0,5 point)

Expliquez le sens de l'expression « Du berceau au tombeau », souvent utilisée afin de représenter l'analyse du cycle de vie.

5. Développement durable - 4 (0,5 point)

Qu'est-ce qui explique les impacts environnementaux potentiels plus élevés associés à la fabrication d'un véhicule électrique comparativement à un véhicule conventionnel ?
Donnez deux éléments de réponse.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

6. Références optimales (1,5 point)

Le tableau ci-dessous illustre différentes situations pour lesquelles vous devez calculer l'enthalpie. En fonction des différents outils disponibles (tables B1, B2, B5, B6, B7 et B8) et des informations données, déterminez la **meilleure** référence à poser et justifiez votre choix. *Aucun calcul n'est requis pour cet exercice.*

Situation	Référence optimale à poser	Justification (Pourquoi est-ce la meilleure référence ?)
A) L'entrée du condenseur contient du phénol gazeux (C ₆ H ₆ O) et de l'azote gazeux (N ₂) à 50 °C. On désire condenser le phénol à 30 °C. L'azote reste à l'état gazeux à 30 °C. Vous désirez faire le bilan d'énergie sur le condenseur.		
B) Un échangeur de chaleur permet de produire de la vapeur d'eau surchauffée à 500 °C et 20 bar à partir d'eau liquide saturée à 50 °C. Vous désirez calculer la quantité de chaleur à fournir à cette eau.		
C) Un réacteur est le siège de la réaction suivante à 100 °C. $\text{C}_2\text{H}_{4(g)} + \text{HCl}_{(g)} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}_{(g)}$ Malheureusement, des réactions parasites inconnues se déroulent également. On désire évaluer la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer au réacteur.		

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

7. Chauffage d'un gaz (2 points)

Un gaz inconnu est chauffé dans un échangeur de chaleur à pression constante. Complétez le tableau suivant en indiquant si la valeur du paramètre **augmente, diminue ou reste constante** entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur. Dans chacun des cas, justifiez votre réponse.

Paramètre	Variation de la valeur du paramètre (augmente, diminue ou reste constante)	Justification de la variation de la valeur du paramètre
Masse volumique		
Débit molaire		
Débit volumique		
Enthalpie		

8. Le Vrai du Faux (1 point)

Indiquez si chacun des énoncés suivants est Vrai ou Faux. Dans le cas d'un énoncé Faux, expliquez votre réponse.

- A) Vrai ou Faux. Parfois, on peut retrouver la présence de l'avancement de réaction dans le calcul du pourcentage d'excès.
- B) Vrai ou Faux. Si le débit d'alimentation molaire d'un réacteur est triplé, la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer à ce réacteur sera aussi triplée.
- C) Vrai ou Faux. La conversion, l'excès, le rendement et la sélectivité sont tous des paramètres adimensionnels.
- D) Vrai ou Faux. Le nombre de molécules du côté des réactifs d'une réaction chimique est nécessairement le même du côté des produits.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

SECTION 3 : QUESTIONS À DÉVELOPPEMENT (3 QUESTIONS)

Temps suggéré : 105 minutes

Total : / 13,5

9. Séparation d'un mélange n-pentane/n-hexane (6,25 points)

Un évaporateur est utilisé afin de séparer un mélange liquide formé de 34 % molaire de n-pentane (C_5H_{12}) et le reste de n-hexane (C_6H_{14}). Le débit total de l'alimentation est de 2500 mol/s et ce courant se trouve à une température de 30 °C. L'évaporateur fonctionne à 55 °C et 0,854 atm. Le courant liquide sortant de cet évaporateur contient 81,7 % molaire de C_6H_{14} et est en équilibre avec le courant vapeur sortant du même évaporateur. Afin de chauffer cet évaporateur, on utilise de la vapeur d'eau à 280 °C et 1 bar. Cette vapeur se condense dans la chemise de l'évaporateur et en ressort sous forme de liquide saturé à la même pression.

Tableau 1 – Données utiles

Substance	$\Delta \hat{H}_{\text{vap}}$ (kJ/mol)	Cp du liquide (kJ/mol · °C)	Cp de la vapeur (kJ/mol · °C)
n-pentane (C_5H_{12})	25,77 ($T_{\text{eb}} = 36^\circ\text{C}$)	0,16	$0,11 + 0,0003 T$
n-hexane (C_6H_{14})	28,85 ($T_{\text{eb}} = 69^\circ\text{C}$)	0,22	$0,14 + 0,0004 T$

- A) Tracez le schéma de l'évaporateur et annotez chacun des courants. **(0,5 point)**
- B) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur l'évaporateur de façon à calculer la chaleur à fournir. **(0,5 point)**
- C) Calculer la chaleur (kJ/s) à fournir à l'évaporateur. **(4 points)**
- D) Calculez le débit de vapeur d'eau (kg/s) à alimenter dans la chemise de l'évaporateur. **(1,25 point)**

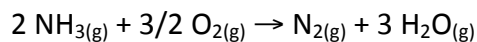
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

10. Production de monoxyde d'azote (4,25 points)

Afin de produire du monoxyde d'azote (NO), de l'ammoniac (NH₃) est oxydé avec de l'oxygène provenant de l'air. La réaction suivante se produit dans le réacteur :



Malheureusement, la réaction parasite suivante se produit aussi dans le réacteur :



On alimente 100 mol/s de NH₃ via le courant 1. De l'air humide à 150 °C et 1 atm est alimenté au réacteur via le courant 2. Une conversion de 90 % est obtenue pour l'ammoniac. L'excès d'oxygène alimenté est de 50 % et l'humidité relative de l'air alimenté est de 10 %. Le rendement en NO est de 80 %.

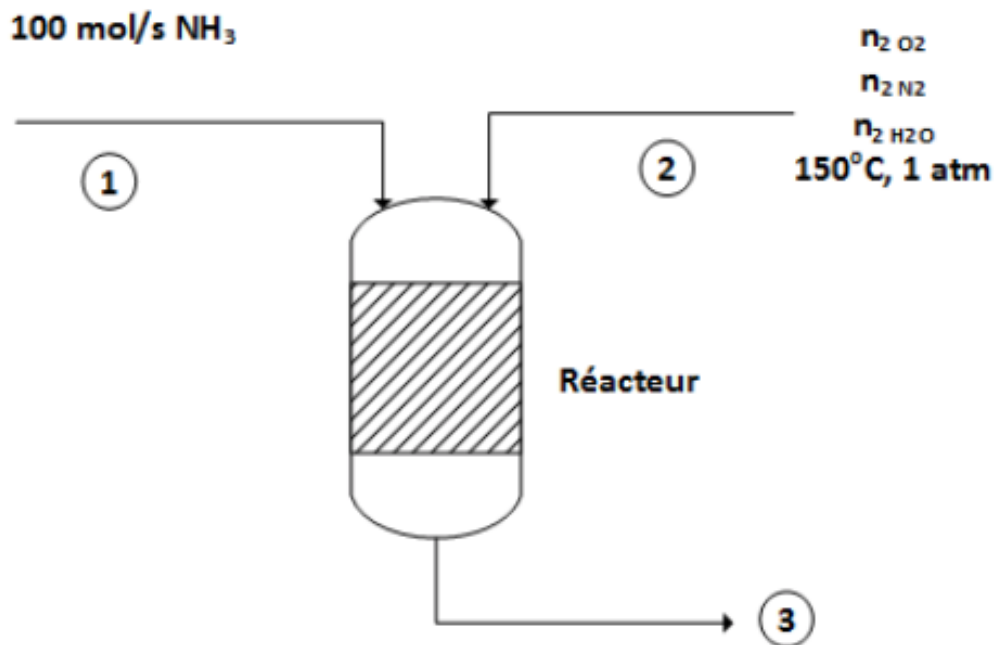


Figure 1 – Diagramme d'écoulement partiellement annoté du procédé

Note : Reproduisez le schéma de la figure 1 et annotez-le de sorte à déclarer les différentes variables que vous utiliserez.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

- A) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur le réacteur. **(0,5 point)**
- B) Déterminez les débits partiels (mol/s) sortant du réacteur en utilisant la méthode des **avancements de réactions**. **(3,75 points)**

11. Énergie échangée dans une fournaise (3 points)

Considérez la fournaise dans la figure 2 servant à produire de la vapeur d'eau qui sera par la suite acheminée à une turbine afin de produire de l'énergie électrique. Un mélange à 25 °C contenant du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6) est alimenté à la fournaise avec un excès d'air sec, qui est préalablement chauffé à 100 °C dans un échangeur de chaleur. Les gaz de combustion sortent de la fournaise à 800 °C et une conversion de 100 % est obtenue pour chacun des hydrocarbures (C_3H_8 et $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$). Votre collègue, qui aime beaucoup les bilans de matière, les a résolus entièrement. Ses résultats sont présentés sur le schéma ci-dessous. Déterminez la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer de la fournaise (kW) en utilisant la **méthode des chaleurs de formation**.

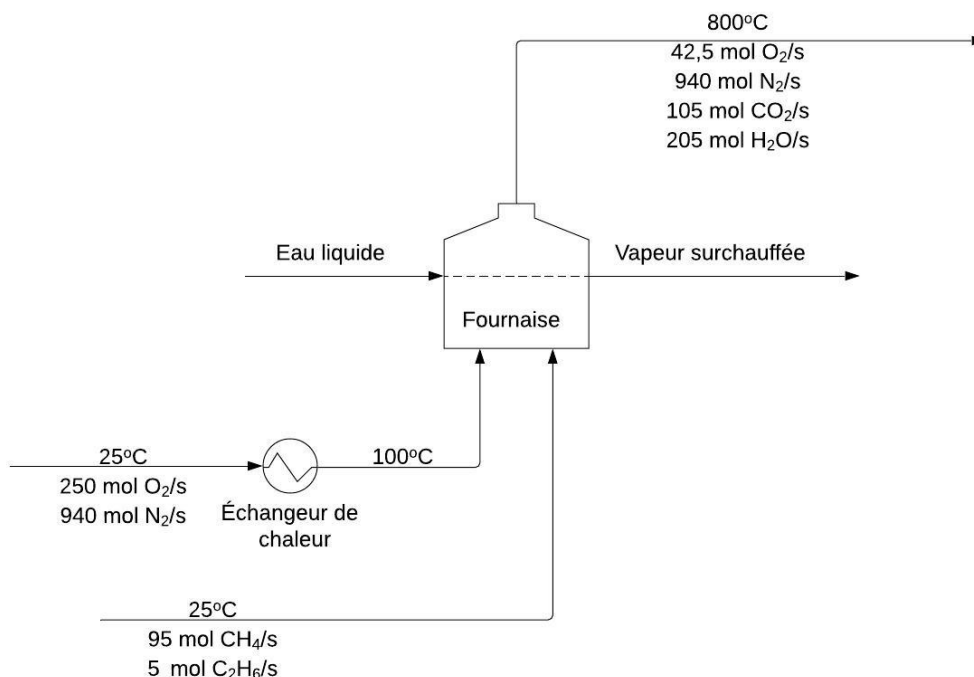


Figure 2 – Diagramme d'écoulement partiellement annoté de la fournaise

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Tableau 2 – Données utiles

Substances	$\Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ/mol)	C_p (kJ/mol • °C)
CH _{4(g)}	-74,85	0,03
C ₂ H _{6(g)}	-84,67	0,05
O _{2(g)}	0	non disponible
N _{2(g)}	0	non disponible
CO _{2(g)}	-393,15	non disponible
H ₂ O _(g)	-241,83	non disponible

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

RÉPONDEZ AUX 11 QUESTIONS SUIVANTES DANS LA PLATEFORME TEST DE MOODLE.

DATE DE L'EXAMEN : LUNDI 4 MAI 2020
DURÉE DE L'EXAMEN : 3h (de 9 h 30 à 12 h 30)

Total : / 20

Cet examen est composé de trois sections :

SECTION 1 : INFORMATIONS ET DÉCLARATION SUR L'HONNEUR (1 QUESTION)

Temps suggéré : 2 minutes

SECTION 2 : CHOIX DE RÉPONSES ET RÉPONSES COURTES (7 QUESTIONS)
--

Temps suggéré : 45 minutes

Total : / 6,5

SECTION 3 : QUESTIONS À DÉVELOPPEMENT (3 QUESTIONS)
--

Temps suggéré : 105 minutes

Total : / 13,5

1. DÉCLARATION SUR L'HONNEUR :

Je déclare sur mon honneur que :

- ce travail est un travail original de ma part.
- j'ai répondu aux différentes questions par moi-même, sans l'aide d'une autre personne par tout moyen de communication que ce soit.
- j'ai respecté toutes les conditions énoncées dans les consignes.
- personne n'a effectué ni rédigé ce travail ou une partie de ce travail à ma place, gratuitement ou contre rémunération.
- je n'ai ni copié ni sauvegardé aucune partie du questionnaire ou du matériel transmis pour cet examen.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

SECTION 2 : CHOIX DE RÉPONSES ET RÉPONSES COURTES (7 QUESTIONS)

Temps suggéré : 45 minutes

Total : / 6,5

2. Développement durable - 1 (0,5 point)

Expliquez pourquoi (à l'aide de deux arguments) le recyclage des composantes électroniques est difficile à mettre en place.

3. Développement durable - 2 (0,5 point)

Afin de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C, le GIEC stipule qu'il faut, d'ici 2030, réduire de 45% les émissions de CO₂ par rapport à 2010. Nommez deux éléments concrets sur lesquels les ingénieurs informatique et logiciel peuvent agir afin d'atteindre cet objectif.

4. Développement durable - 3 (0,5 point)

Expliquez le sens de l'expression « Du berceau au tombeau », souvent utilisée afin de représenter l'analyse du cycle de vie.

5. Développement durable - 4 (0,5 point)

Qu'est-ce qui explique les impacts environnementaux potentiels plus élevés associés à la fabrication d'un véhicule électrique comparativement à un véhicule conventionnel ? Donnez deux éléments de réponse.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

6. Références optimales (1,5 points)

Le tableau ci-dessous illustre différentes situations pour lesquelles vous devez calculer l'enthalpie. En fonction des différents outils disponibles (tables B1, B2, B5, B6, B7 et B8) et des informations données, déterminez la **meilleure** référence à poser et justifiez votre choix. *Aucun calcul n'est requis pour cet exercice.* **(0,5 point/ligne : Référence ET Justification doivent être exactes)**

Situation	Référence optimale à poser	Justification (Pourquoi est-ce la meilleure référence ?)
L'entrée du condenseur contient du phénol gazeux (C_6H_6O) et de l'azote gazeux (N_2) à 50°C. On désire condenser le phénol à 30°C. L'azote reste à l'état gazeux à 30°C. Vous désirez faire le bilan d'énergie sur le condenseur.	$C_6H_6O_{(g)}$ à 50°C et 1 atm $N_{2(g)}$ à 25°C et 1 atm	Pour le phénol : la référence peut correspondre soit au courant d'entrée soit au courant de sortie, ce qui permet de simplifier le calcul d'une enthalpie. Pour l'azote : cette référence permet d'utiliser B8 et d'éviter de calculer des intégrales.
Un échangeur de chaleur permet de produire de la vapeur d'eau surchauffée à 500°C et 20 bar à partir d'eau liquide saturée à 50°C. Vous désirez calculer la quantité de chaleur à fournir à cette eau.	$H_2O_{(l)}$ au point triple	Cette référence permet d'utiliser les tables B5, B6 et B7 dans lesquelles on lit directement l'enthalpie de l'eau vapeur ou liquide à différentes températures et pressions.
Un réacteur est le siège de la réaction suivante à 100°C. $C_2H_{4(g)} + HCl_{(g)} \rightarrow C_2H_5Cl_{(g)}$ Malheureusement, des réactions parasites inconnues se déroulent également. On désire évaluer la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer au réacteur.	$C_{(s)}$, $H_{2(g)}$, $Cl_{2(g)}$ à 25°C et 1 atm	Puisque des réactions sont inconnues, il faut utiliser la méthode des chaleurs de formation et donc, poser comme référence les éléments dans leur phase stable à 25°C et 1 atm.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

7. Chauffage d'un gaz (2 points)

Un gaz inconnu est chauffé dans un échangeur de chaleur à pression constante. Complétez le tableau suivant en indiquant si la valeur du paramètre **augmente, diminue ou reste constante** entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur. Dans chacun des cas, justifiez votre réponse. **(0,5 point/ligne : Paramètre ET Justification doivent être exacts)**

Paramètre	Variation de la valeur du paramètre (augmente, diminue ou reste constante)	Justification de la variation de la valeur du paramètre
Masse volumique	Diminue	Formule de la masse volumique d'un gaz : $\rho = \frac{PM}{RT}$ Lorsque T augmente à pression constante, ρ diminue.
Débit molaire	Constante	Il n'y a pas de réaction chimique et la variation de température n'a pas d'impact sur le débit molaire.
Débit volumique	Augmente	Pour un gaz : $PV = nRT$ Entre l'entrée et la sortie de l'échangeur, P et n sont constants. Ainsi, lorsque T augmente, V augmente également.
Enthalpie	Augmente	La variation d'enthalpie au cours d'une évolution est donnée par : $\Delta H = \Delta U + \Delta(PV)$ L'augmentation de la température entraîne une augmentation du débit volumique et une plus grande agitation des molécules, ce qui se traduit par une augmentation de l'énergie interne.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

8. Le Vrai du Faux (1 point)

Indiquez si chacun des énoncés suivants est Vrai ou Faux. Dans le cas d'un énoncé Faux, expliquez votre réponse.

- A. Vrai ou Faux. Parfois, on peut retrouver la présence de l'avancement de réaction dans le calcul du pourcentage d'excès.

Faux, l'avancement de la réaction n'intervient jamais dans le calcul du pourcentage d'excès **OU** Vrai, l'avancement pourrait être utilisé pour le calcul de l'excès si la conversion est de 100%. Dans ce cas, le $n_{\text{stœchiométrique}}$ serait égal à l'avancement. **(0,25 point)**

- B. Vrai ou Faux. Si le débit d'alimentation molaire d'un réacteur est triplé, la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer à ce réacteur sera aussi triplée.

Vrai. **(0,25 point)**

- C. Vrai ou Faux. La conversion, l'excès, le rendement et la sélectivité sont tous des paramètres adimensionnels.

Faux, la sélectivité possède des unités de moles de produits désiré/moles de produits non-désiré. **(0,25 point)**

- D. Vrai ou Faux. Le nombre de molécules du côté des réactifs d'une réaction chimique est nécessairement le même du côté des produits.

Faux, dans une réaction chimique, ce sont les atomes qui sont conservés et non les molécules. **(0,25 point)**

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

SECTION 3 : QUESTIONS À DÉVELOPPEMENT (3 QUESTIONS)

Temps suggéré : 105 minutes

Total : / 13,5

9. Séparation d'un mélange n-pentane/n-hexane (6,25 points)

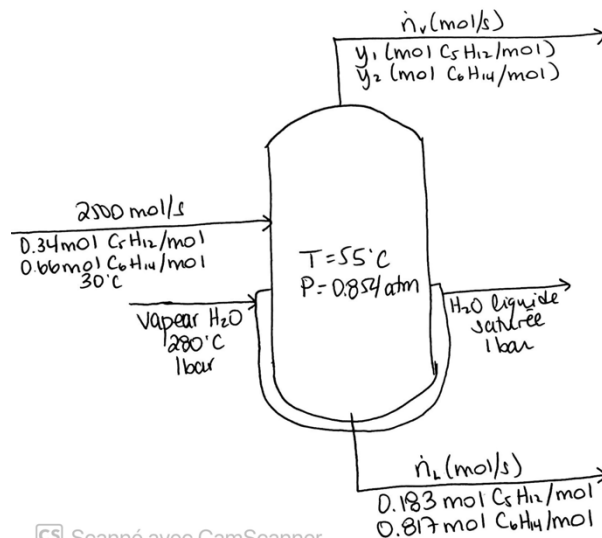
Un évaporateur est utilisé afin de séparer un mélange liquide formé de 34% molaire de n-pentane (C_5H_{12}) et le reste de n-hexane (C_6H_{14}). Le débit total de l'alimentation est de 2500 mol/s et ce courant se trouve à une température de 30°C. L'évaporateur fonctionne à 55°C et 0,854 atm. Le courant liquide sortant de cet évaporateur contient 81,7 % molaire de C_6H_{14} et est en équilibre avec le courant vapeur sortant du même évaporateur. Afin de chauffer cet évaporateur, on utilise de la vapeur d'eau à 280°C et 1 bar. Cette vapeur se condense dans la chemise de l'évaporateur et en ressort sous forme de liquide saturé à la même pression.

Tableau 1 – Données utiles

Substance	$\Delta \hat{H}_{\text{vap}}$ (kJ/mol)	Cp du liquide (kJ/mol · °C)	Cp de la vapeur (kJ/mol · °C)
n-pentane (C_5H_{12})	25,77 ($T_{\text{eb}} = 36^\circ\text{C}$)	0,16	$0,11 + 0,0003 T$
n-hexane (C_6H_{14})	28,85 ($T_{\text{eb}} = 69^\circ\text{C}$)	0,22	$0,14 + 0,0004 T$

A) Tracez le schéma de l'évaporateur et annotez chacun des courants. (0,5 point)

**-0,25 point/élément
manquant**



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

B) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur l'évaporateur de façon à calculer la chaleur à fournir. **(0,5 point)**

- 5 inconnues (n_V , $y_{C_5H_{12}}$, $y_{C_6H_{14}}$, n_L , Q)
- 2 BMs (C_5H_{12} , C_6H_{14})
 - 1 contrainte physique ($y_{C_5H_{12}} + y_{C_6H_{14}} = 1$)
 - 1 éq. L/V (C_6H_{14})
 - 1 BE
- 0

(0,5 point ou 0)

C) Calculer la chaleur (kJ/s) à fournir à l'évaporateur. **(4 points)**

Éq. L/V sur C_6H_{14} :

$$P_{C_6H_{14}}^0 = 10^{6,88555 - \frac{1175,817}{55 + 224,867}} = 483,29 \text{ mmHg} = 0,636 \text{ atm} \quad \text{(0,25 point)}$$

$$0,817(0,636) = y_2 (0,854) \rightarrow y_2 = 0,608 \text{ mol } C_6H_{14}/\text{mol} \quad \text{(0,5 point)}$$

$$\text{Contrainte physique : } y_1 = 0,392 \text{ mol } C_5H_{12}/\text{mol} \quad \text{(0,25 point)}$$

BMs

$$\text{sur } C_6H_{14} : 0,66(2500) = 0,608(n_V) + 0,817(n_L) \quad \text{(0,25 point)}$$

$$\text{global : } 2500 = n_V + n_L \quad \text{(0,25 point)}$$

$$n_L = 622 \text{ mol/s et } n_V = 1878 \text{ mol/s} \quad \text{(0,25 point)}$$

$$\text{BE : } Q - W_s = \Delta E_K + \Delta E_P + \Delta H ; \Delta E_K \approx 0 (\Delta v \approx 0), \Delta E_P \approx 0 (\Delta z \approx 0), W_s = 0 \text{ (pas de pièces mobiles)}$$

$$Q = \Delta H \quad \text{(0,25 point)}$$

$$\text{Références : } C_5H_{12} \text{ (l)}, C_6H_{14} \text{ (l)}, 30^\circ\text{C et 1 atm} \quad \text{(0,5 point)}$$

$$\text{Tableau des enthalpies} \quad \text{(0,25 point)}$$

Substances	n_{in} (mol/s)	H_{in} (kJ/mol)	n_{out} (mol/s)	H_{out} (kJ/mol)
C_5H_{12} (l)	850	0	114	H_1
C_6H_{14} (l)	1650	0	508	H_2
C_5H_{12} (g)	---	---	736	H_3
C_6H_{14} (g)	---	---	1142	H_4

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Calcul des enthalpies : **(1 point avec -0,25 point/erreur)**

$$\begin{aligned}H_1 &= \int_{30}^{55} 0,16 \, dT = 4 \, \text{kJ/mol} \\H_2 &= \int_{30}^{55} 0,22 \, dT = 5,5 \, \text{kJ/mol} \\H_3 &= \int_{30}^{36} 0,16 \, dT + 25,77 + \int_{36}^{55} (0,11 + 0,0003 \, T) \, dT = 0,96 + 25,77 + 2,35 \\&= 29,08 \, \text{kJ/mol} \\H_4 &= \int_{30}^{69} 0,22 \, dT + 28,85 + \int_{69}^{55} (0,14 + 0,0004 \, T) \, dT = 8,58 + 28,85 - 2,31 \\&= 35,12 \, \text{kJ/mol}\end{aligned}$$

Calcul de Q : **(0,25 point)**

$$Q = \Delta H = \sum_{out} n \cdot H - \sum_{in} n \cdot H = 64760 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

D) Calculez le débit de vapeur d'eau (kg/s) à alimenter dans la chemise de l'évaporateur. **(1,25 points)**

BE : $Q - W_s = \Delta E_K + \Delta E_P + \Delta H$; $\Delta E_K \approx 0$ ($\Delta v \approx 0$), $\Delta E_P \approx 0$ ($\Delta z \approx 0$), $W_s = 0$ (pas de pièces mobiles)
 $Q = \Delta H$ **(0,25 point)**

Référence : H_2O (l) au point triple **(0,25 point)**

$H_{in} = 3034,4 \, \text{kJ/kg}$ (interpolation dans B7) **(0,25 point)**

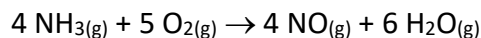
$H_{out} = 417,5 \, \text{kJ/kg}$ (B6) **(0,25 point)**

$Q = \Delta H = m (H_{out} - H_{in})$
 $-62088 \, \text{kJ/s} = m (417,5 - 3034,4) \, \text{kJ/kg} \rightarrow m = 23,7 \, \text{kg/s}$ **(0,25 point)**

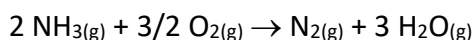
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

10. Production de monoxyde d'azote (4,25 points)

Afin de produire du monoxyde d'azote (NO), de l'ammoniac (NH₃) est oxydé avec de l'oxygène provenant de l'air. La réaction suivante se produit dans le réacteur :



Malheureusement, la réaction parasite suivante se produit aussi dans le réacteur :



On alimente 100 mol/s de NH₃ via le courant 1. De l'air humide à 150°C et 1 atm est alimenté au réacteur via le courant 2. Une conversion de 90% est obtenue pour l'ammoniac. L'excès d'oxygène alimenté est de 50% et l'humidité relative de l'air alimenté est de 10%. Le rendement en NO est de 80%.

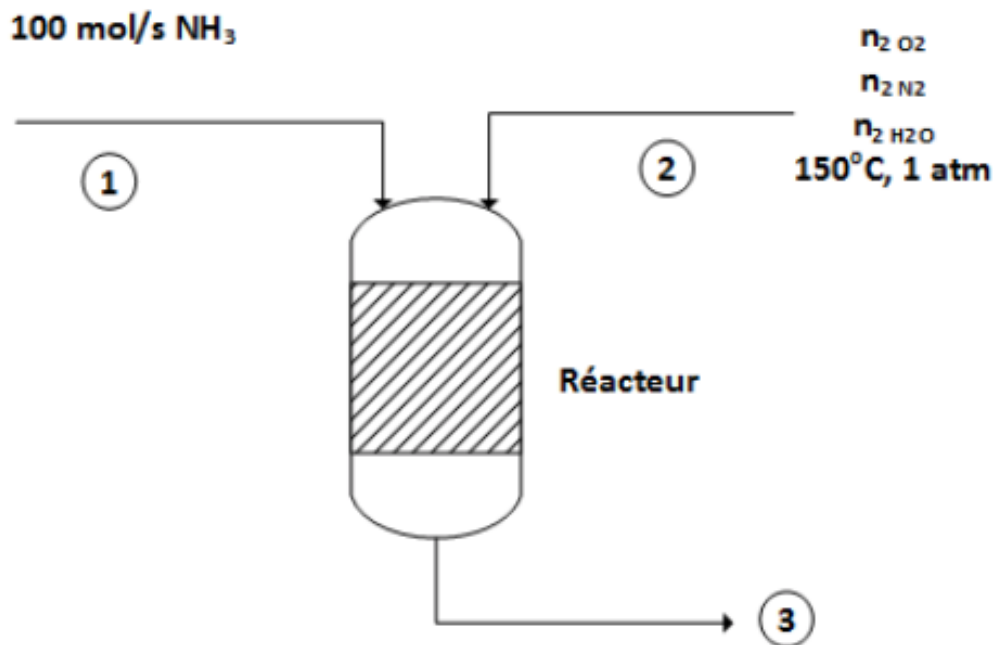


Figure 1 – Diagramme d'écoulement partiellement annoté du procédé

Note : Reproduisez le schéma de la figure 1 et annotez-le de sorte à déclarer les différentes variables que vous utiliserez.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

A) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur le réacteur. **(0,5 point)**

- 10 inconnues ($n_{2_O_2}$, $n_{2_N_2}$, $n_{2_H_2O}$, $n_{3_NH_3}$, $n_{3_O_2}$, $n_{3_N_2}$, $n_{3_H_2O}$, n_{3_NO} , ξ_1 , ξ_2)
- 5 BMs réactifs (O_2 , N_2 , H_2O , NO , NH_3)
 - 5 spécifications (conversion, excès, rendement, HR, ratio O_2/N_2)
- 0

(0,5 point ou 0)

B) Déterminez les débits partiels (mol/s) sortant du réacteur en utilisant la méthode des **avancements de réactions**. **(3,75 points)**

Bilans :

$$\begin{aligned} NH_3 : n_{3_NH_3} &= 100 - 4\xi_1 - 2\xi_2 \\ O_2 : n_{3_O_2} &= n_{2_O_2} - 5\xi_1 - 3/2\xi_2 \\ NO : n_{3_NO} &= 0 + 4\xi_1 \\ N_2 : n_{3_N_2} &= n_{2_N_2} + \xi_2 \\ H_2O : n_{3_H_2O} &= n_{2_H_2O} + 6\xi_1 + 3\xi_2 \end{aligned} \quad (0.5 \text{ point avec } -0.25 \text{ point par erreur})$$

Conversion : $0,9 = (100 - n_{3_NH_3}) / 100 \quad n_{3_NH_3} = 10 \text{ mol/s} \quad (0.25 \text{ point})$

Excès : $0,5 = (n_{2_O_2} - n_{O_2_stoe}) / n_{O_2_stoe}$

$$n_{O_2_stoe} = 125 \text{ moles/s} \quad (0.25 \text{ point}) \quad n_{2_O_2} = 187,5 \text{ mol/s} \quad (0.25 \text{ point})$$

Ratio : $n_{2_N_2} / n_{2_O_2} = 0,79 / 0,21 \quad n_{2_N_2} = 705 \text{ mol/s} \quad (0.25 \text{ point})$

Rendement : $0,8 = n_{3_NO} / 100 \quad n_{3_NO} = 80 \text{ mol/s} \quad (0.25 \text{ point})$

On obtient $\xi_1 = 20 \text{ mol/s}$ grâce au bilan sur le NO (0.25 point)

On obtient $\xi_2 = 5 \text{ mol/s}$ grâce au bilan sur le NH_3 (0.25 point)

$$\begin{aligned} n_{3_O_2} &= n_{2_O_2} - 5\xi_1 - 3/2\xi_2 = 187,5 - 100 - 7,5 = 80 \text{ mol/s} & n_{3_O_2} &= 80 \text{ mol/s} & (0.25 \text{ point}) \\ n_{3_N_2} &= n_{2_N_2} + \xi_2 = 705 + 5 = 710 \text{ mol/s} & n_{3_N_2} &= 710 \text{ mol/s} & (0.25 \text{ point}) \end{aligned}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Humidité relative : $0,1 = P_{\text{H}_2\text{O}} / P^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}}$ $P^{\circ}_{\text{H}_2\text{O}} (150^{\circ}\text{C}) = 3577 \text{ mm Hg}$ **(0.25 point)**

$P_{\text{H}_2\text{O}} = 357.7 \text{ mm Hg}$ $y_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{tot}} = 0,47$ **(0.25 point)**

$y_{\text{H}_2\text{O}} = n_{2,\text{H}_2\text{O}} / (n_{2,\text{H}_2\text{O}} + n_{2,\text{O}_2} + n_{2,\text{N}_2})$ $0,47 = n_{2,\text{H}_2\text{O}} / (n_{2,\text{H}_2\text{O}} + 892,5)$

$n_{2,\text{H}_2\text{O}} = 791.5 \text{ mol/s}$ **(0.25 point)**

$n_{3,\text{H}_2\text{O}} = n_{2,\text{H}_2\text{O}} + 6\xi_1 + 3\xi_2 = 791,5 + 120 + 15$ $n_{3,\text{H}_2\text{O}} = 926,5 \text{ mol/s}$ **(0.25 point)**

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

11. Énergie échangée dans une fournaise (3 points)

Considérez la fournaise dans la figure 2 servant à produire de la vapeur d'eau qui sera par la suite acheminée à une turbine afin de produire de l'énergie électrique. Un mélange à 25°C contenant du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6) est alimenté à la fournaise avec un excès d'air sec, qui est préalablement chauffé à 100°C dans un échangeur de chaleur. Les gaz de combustion sortent de la fournaise à 800°C et une conversion de 100% est obtenue pour chacun des hydrocarbures (C_3H_8 et $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$). Votre collègue, qui aime beaucoup les bilans de matière, les a résolus entièrement. Ses résultats sont présentés sur le schéma ci-dessous. Déterminez la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer de la fournaise (kW) en utilisant la **méthode des chaleurs de formation**.

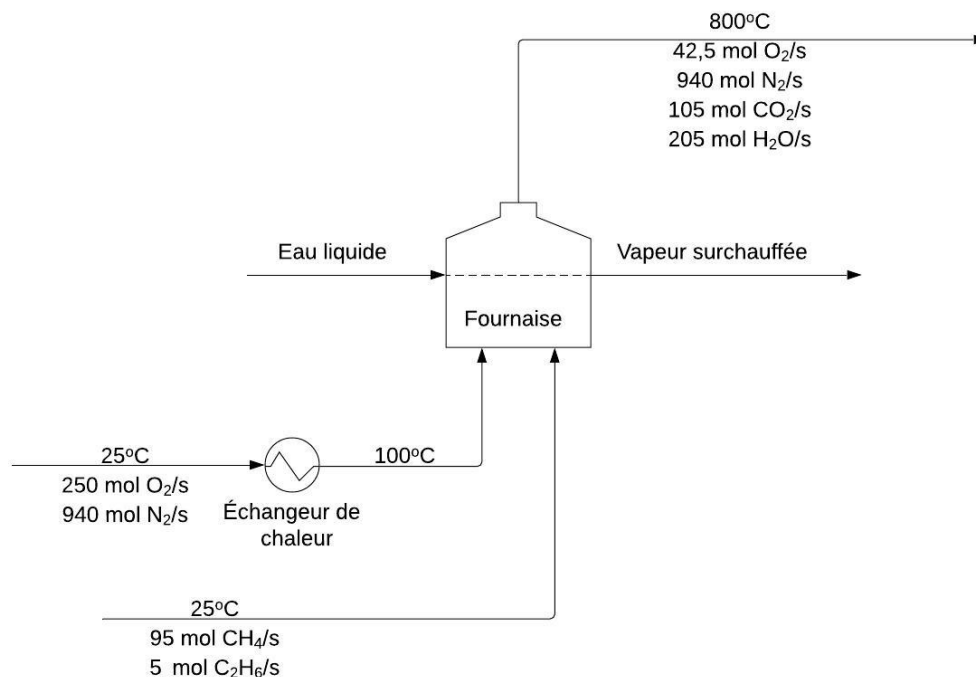


Figure 2 – Diagramme d'écoulement partiellement annoté de la fournaise

Tableau 2 – Données utiles

Substances	$\Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ/mol)	C_p (kJ/mol • °C)
$\text{CH}_4(\text{g})$	-74,85	0,03
$\text{C}_2\text{H}_6(\text{g})$	-84,67	0,05
$\text{O}_2(\text{g})$	0	non disponible
$\text{N}_2(\text{g})$	0	non disponible
$\text{CO}_2(\text{g})$	-393,15	non disponible
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,83	non disponible

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

$$BE : Q - W_s = \Delta E_K + \Delta E_P + \Delta H$$

$$\Delta E_K \approx 0 \ (\Delta v \approx 0)$$

$$\Delta E_P \approx 0 \ (\Delta z \approx 0)$$

$$W_s = 0 \ (\text{pas de pièces mobiles})$$

$$Q = \Delta H$$

(0.25 point)

Références : C (s), H₂ (g), O₂ (g), N₂ (g) à 25°C et 1 atm

(0.5 point)

Tableau des enthalpies

Substances	n _{in} (mol/s)	H _{in} (kJ/mol)	n _{out} (mol/s)	H _{out} (kJ/mol)
CH ₄ (g)	95	H ₁	---	---
C ₂ H ₆ (g)	5	H ₂	---	---
O ₂ (g)	250	H ₃	42,5	H ₅
N ₂ (g)	940	H ₄	940	H ₆
CO ₂ (g)	---	---	105	H ₇
H ₂ O (g)	---	---	205	H ₈

Calcul des enthalpies : (2 points avec -0.25 point/erreur)

$$H_1 = \Delta H_{f,CH_4}^0 = -74,85 \text{ kJ/mol}$$

$$H_2 = \Delta H_{f,C_2H_6}^0 = -84,67 \text{ kJ/mol}$$

$$H_3 = 2,24 \text{ kJ/mol}$$

$$H_4 = 2,19 \text{ kJ/mol}$$

$$H_5 = 25,35 \text{ kJ/mol}$$

$$H_6 = 23,86 \text{ kJ/mol}$$

$$H_7 = \Delta H_{f,CO_2}^0 + \int_{25}^{800} C_{p,CO_2} dT = -393,15 + 37,36 = -355,79 \text{ kJ/mol}$$

$$H_8 = \Delta H_{f,H_2O}^0 + \int_{25}^{800} C_{p,H_2O} dT = -241,83 + 29,05 = -212,78 \text{ kJ/mol}$$

Calcul de Q : (0.25 point)

$$Q = \Delta H = \sum_{out} n \cdot H - \sum_{in} n \cdot H = -52557 \text{ kW}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Annexes

Tableau de conversion d'unités

Quantité	Équivalences
Masse	$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g} = 0,001 \text{ t} = 2,20462 \text{ lb}_m = 35,27392 \text{ oz}$ $1 \text{ lb}_m = 16 \text{ oz} = 453,593 \text{ g}$
Longueur	$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm} = 10^6 \mu\text{m} = 10^{10} \text{ Å}$ $= 39,37 \text{ po} = 3,2808 \text{ pi} = 1,0936 \text{ vg} = 0,0006214 \text{ mi}$ $1 \text{ pi} = 12 \text{ po} = 1/3 \text{ vg} = 0,3048 \text{ m} = 30,48 \text{ cm}$
Volume	$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^6 \text{ mL}$ $= 35,3145 \text{ pi}^3 = 264,17 \text{ gal}$ $1 \text{ pi}^3 = 1728 \text{ po}^3 = 7,4805 \text{ gal} = 0,028317 \text{ m}^3 = 28,317 \text{ L} = 28 \text{ 317 cm}^3$
Force	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 10^5 \text{ dyn} = 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2 = 0,22481 \text{ lb}_f$ $1 \text{ lb}_f = 32,174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^2 = 4,4482 \text{ N} = 4,4482 \times 10^5 \text{ dyn}$
Pression	$1 \text{ atm} = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (\text{Pa}) = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$ $= 1,01325 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 =$ $= 760 \text{ mm Hg à } 0^\circ\text{C} = 10,333 \text{ m H}_2\text{O à } 4^\circ\text{C}$ $= 14,696 \text{ lb}_f/\text{po}^2 (\text{psi}) = 33,9 \text{ pi H}_2\text{O à } 4^\circ\text{C}$ $= 29,921 \text{ po Hg à } 0^\circ\text{C}$
Énergie	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 10^7 \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ $= 2,778 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h} = 0,23901 \text{ cal}$ $= 9,486 \times 10^4 \text{ Btu}$
Puissance	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0,23901 \text{ cal/s} = 0,9486 \text{ Btu/s} = 1,341 \times 10^3 \text{ hp}$

Tableau périodique des éléments

**POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Table B.4 Antoine Equation Constants*

Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	-0.2 to 34.4	8.00552	1600.017	291.809
Acetic acid	C ₂ H ₄ O ₂	29.8 to 126.5	7.38782	1533.313	222.309
Acetic acid*	C ₂ H ₄ O ₂	0 to 36	7.18807	1416.7	225
Acetic anhydride	C ₄ H ₆ O ₃	62.8 to 139.4	7.14948	1444.718	199.817
Acetone	C ₃ H ₆ O	-12.9 to 55.3	7.11714	1210.595	229.664
Acrylic acid	C ₃ H ₄ O ₂	20.0 to 70.0	5.65204	648.629	154.683
Ammonia*	NH ₃	-83 to 60	7.55466	1002.711	247.885
Aniline	C ₆ H ₇ N	102.6 to 185.2	7.32010	1731.515	206.049
Benzene	C ₆ H ₆	14.5 to 80.9	6.89272	1203.531	219.888
<i>n</i> -Butane	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	-78.0 to -0.3	6.82485	943.453	239.711
<i>i</i> -Butane	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	-85.1 to -11.6	6.78866	899.617	241.942
1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	89.2 to 125.7	7.36366	1305.198	173.427
2-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	72.4 to 107.1	7.20131	1157.000	168.279
1-Butene	C ₄ H ₈	-77.5 to -3.7	6.53101	810.261	228.066
Butyric acid	C ₄ H ₈ O ₂	20.0 to 150.0	8.71019	2433.014	255.189
Carbon disulfide	CS ₂	3.6 to 79.9	6.94279	1169.110	241.593
Carbon tetrachloride	CCl ₄	14.1 to 76.0	6.87926	1212.021	226.409
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	62.0 to 131.7	6.97808	1431.053	217.550
Chlorobenzene*	C ₆ H ₅ Cl	0 to 42	7.10690	1500.0	224.0
Chlorobenzene*	C ₆ H ₅ Cl	42 to 230	6.94504	1413.12	216.0
Chloroform	CHCl ₃	-10.4 to 60.3	6.95465	1170.966	226.232
Chloroform*	CHCl ₃	-30 to 150	6.90328	1163.03	227.4
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	19.9 to 81.6	6.84941	1206.001	223.148
Cyclohexanol	C ₆ H ₁₂ O	93.7 to 160.7	6.25530	912.866	109.126
<i>n</i> -Decane	<i>n</i> -C ₁₀ H ₂₂	94.5 to 175.1	6.95707	1503.568	194.738
1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	86.8 to 171.6	6.95433	1497.527	197.056
1,1-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	-38.8 to 17.6	6.97702	1174.022	229.060
1,2-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	-30.8 to 99.4	7.02530	1271.254	222.927
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	-40.0 to 40	7.40916	1325.938	252.616
Diethyl ether	C ₄ H ₁₀ O	-60.8 to 19.9	6.92032	1064.066	228.799
Diethyl ketone	C ₅ H ₁₀ O	56.5 to 111.3	7.02529	1310.281	214.192
Diethylene glycol	C ₄ H ₁₀ O ₂	130.0 to 243.0	7.63666	1939.359	162.714
Dimethyl ether	C ₂ H ₆ O	-78.2 to -24.9	6.97603	889.264	241.957
Dimethylamine	C ₂ H ₇ N	-71.8 to 6.9	7.08212	960.242	221.667
<i>N,N</i> -Dimethylformamide	C ₃ H ₇ NO	30.0 to 90.0	6.92796	1400.869	196.434
1,4-Dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	20.0 to 105.0	7.43155	1554.679	240.337
Ethanol	C ₂ H ₆ O	19.6 to 93.4	8.11220	1592.864	226.184
Ethanolamine	C ₂ H ₇ NO	65.4 to 170.9	7.45680	1577.670	173.368
Ethyl acetate	C ₄ H ₈ O ₂	15.6 to 75.8	7.10179	1244.951	217.881
Ethyl acetate*	C ₄ H ₈ O ₂	-20 to 150	7.09808	1238.710	217.0
Ethyl chloride	C ₂ H ₅ Cl	-55.9 to 12.5	6.98647	1030.007	238.612
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	56.5 to 137.1	6.95650	1423.543	213.091

Table B.4 (Continued)

Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Ethylene glycol	C ₂ H ₆ O ₂	50.0 to 200.0	8.09083	2088.936	203.454
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	0.3 to 31.8	8.69016	2005.779	334.765
1,2-Ethylenediamine	C ₂ H ₆ N ₂	26.5 to 117.4	7.16871	1336.235	194.366
Formaldehyde	HCHO	-109.4 to -22.3	7.19578	970.595	244.124
Formic acid	CH ₂ O ₂	37.4 to 100.7	7.58178	1699.173	260.714
Glycerol	C ₃ H ₈ O ₃	183.3 to 260.4	6.16501	1036.056	28.097
<i>n</i> -Heptane	<i>n</i> -C ₇ H ₁₆	25.9 to 99.3	6.90253	1267.828	216.823
<i>i</i> -Heptane	<i>i</i> -C ₇ H ₁₆	18.5 to 90.9	6.87689	1238.122	219.783
1-Heptene	C ₇ H ₁₄	21.6 to 94.5	6.91381	1265.120	220.051
<i>n</i> -Hexane	<i>n</i> -C ₆ H ₁₄	13.0 to 69.5	6.88555	1175.817	224.867
<i>i</i> -Hexane	<i>i</i> -C ₆ H ₁₄	12.8 to 61.1	6.86839	1151.401	228.477
1-Hexene	C ₆ H ₁₂	15.9 to 64.3	6.86880	1154.646	226.046
Hydrogen Cyanide	HCN	-16.4 to 46.2	7.52823	1329.49	260.418
Methanol	CH ₃ OH	14.9 to 83.7	8.08097	1582.271	239.726
Methanol*	CH ₃ OH	-20 to 140	7.87863	1473.11	230.0
Methyl acetate	C ₃ H ₆ O ₂	1.8 to 55.8	7.06524	1157.630	219.726
Methyl bromide	CH ₃ Br	-70.0 to 3.6	7.09084	1046.066	244.914
Methyl chloride	CH ₃ Cl	-75.0 to 5.0	7.09349	948.582	249.336
Methyl ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	42.8 to 88.4	7.06356	1261.339	221.969
Methyl isobutyl ketone	C ₆ H ₁₂ O	21.7 to 116.2	6.67272	1168.408	191.944
Methyl methacrylate	C ₅ H ₈ O ₂	39.2 to 89.2	8.40919	2050.467	274.369
Methylamine	CH ₃ N	-83.1 to -6.2	7.33690	1011.532	233.286
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	25.6 to 101.8	6.82827	1273.673	221.723
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	80.3 to 179.5	7.03358	1756.328	204.842
Nitrobenzene	C ₆ H ₅ NO ₂	134.1 to 210.6	7.11562	1746.586	201.783
Nitromethane	CH ₃ NO ₂	55.7 to 136.4	7.28166	1446.937	227.600
<i>n</i> -Nonane	<i>n</i> -C ₉ H ₂₀	70.3 to 151.8	6.93764	1430.459	201.808
1-Nonene	C ₉ H ₁₈	66.6 to 147.9	6.95777	1437.862	205.814
<i>n</i> -Octane	<i>n</i> -C ₈ H ₁₈	52.9 to 126.6	6.91874	1351.756	209.100
<i>i</i> -Octane	<i>i</i> -C ₈ H ₁₈	41.7 to 118.5	6.88814	1319.529	211.625
1-Octene	C ₈ H ₁₆	44.9 to 122.2	6.93637	1355.779	213.022
<i>n</i> -Pentane	<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	13.3 to 36.8	6.84471	1060.793	231.541
<i>i</i> -Pentane	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	16.3 to 28.6	6.73457	992.019	229.564
1-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	74.7 to 156.0	7.18246	1287.625	161.330
1-Pentene	C ₅ H ₁₀	12.8 to 30.7	6.84268	1043.206	233.344
Phenol	C ₆ H ₆ O	107.2 to 181.8	7.13301	1516.790	174.954
1-Propanol	C ₃ H ₈ O	60.2 to 104.6	7.74416	1437.686	198.463
2-Propanol	C ₃ H ₈ O	52.3 to 89.3	7.74021	1359.517	197.527
Propionic acid	C ₃ H ₆ O ₂	72.4 to 128.3	7.71423	1733.418	217.724
Propylene oxide	C ₃ H ₆ O	-24.2 to 34.8	7.01443	1086.369	228.594
Pyridine	C ₅ H ₅ N	67.3 to 152.9	7.04115	1373.799	214.979
Styrene	C ₈ H ₈	29.9 to 144.8	7.06623	1507.434	214.985
Toluene	C ₇ H ₈	35.3 to 111.5	6.95805	1346.773	219.693
1,1,1-Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃	-5.4 to 16.9	8.64344	2136.621	302.769
1,1,2-Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃	50.0 to 113.7	6.95185	1314.410	209.197
Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	17.8 to 86.5	6.51827	1018.603	192.731
Vinyl acetate	C ₄ H ₆ O ₂	21.8 to 72.0	7.21010	1296.130	226.655
Water*	H ₂ O	0 to 60	8.10765	1750.286	235.000
Water*	H ₂ O	60 to 150	7.96681	1668.210	228.000
<i>m</i> -Xylene	<i>m</i> -C ₈ H ₁₀	59.2 to 140.0	7.00646	1460.183	214.827
<i>o</i> -Xylene	<i>o</i> -C ₈ H ₁₀	63.5 to 145.4	7.00154	1476.393	213.872
<i>p</i> -Xylene	<i>p</i> -C ₈ H ₁₀	58.3 to 139.3	6.98820	1451.792	215.111

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Table B.6 Properties of Saturated Steam: Pressure Table^a

<i>P</i> (bar)	<i>T</i> (°C)	\hat{V} (m ³ /kg)		\hat{U} (kJ/kg)		\hat{H} (kJ/kg)		
		Water	Steam	Water	Steam	Water	Evaporation	Steam
0.00611	0.01	0.001000	206.2	zero	2375.6	+0.0	2501.6	2501.6
0.008	3.8	0.001000	159.7	15.8	2380.7	15.8	2492.6	2508.5
0.010	7.0	0.001000	129.2	29.3	2385.2	29.3	2485.0	2514.4
0.012	9.7	0.001000	108.7	40.6	2388.9	40.6	2478.7	2519.3
0.014	12.0	0.001000	93.9	50.3	2392.0	50.3	2473.2	2523.5
0.016	14.0	0.001001	82.8	58.9	2394.8	58.9	2468.4	2527.3
0.018	15.9	0.001001	74.0	66.5	2397.4	66.5	2464.1	2530.6
0.020	17.5	0.001001	67.0	73.5	2399.6	73.5	2460.2	2533.6
0.022	19.0	0.001002	61.2	79.8	2401.7	79.8	2456.6	2536.4
0.024	20.4	0.001002	56.4	85.7	2403.6	85.7	2453.3	2539.0
0.026	21.7	0.001002	52.3	91.1	2405.4	91.1	2450.2	2541.3
0.028	23.0	0.001002	48.7	96.2	2407.1	96.2	2447.3	2543.6
0.030	24.1	0.001003	45.7	101.0	2408.6	101.0	2444.6	2545.6
0.035	26.7	0.001003	39.5	111.8	2412.2	111.8	2438.5	2550.4
0.040	29.0	0.001004	34.8	121.4	2415.3	121.4	2433.1	2554.5
0.045	31.0	0.001005	31.1	130.0	2418.1	130.0	2428.2	2558.2
0.050	32.9	0.001005	28.2	137.8	2420.6	137.8	2423.8	2561.6
0.060	36.2	0.001006	23.74	151.5	2425.1	151.5	2416.0	2567.5
0.070	39.0	0.001007	20.53	163.4	2428.9	163.4	2409.2	2572.6
0.080	41.5	0.001008	18.10	173.9	2432.3	173.9	2403.2	2577.1
0.090	43.8	0.001009	16.20	183.3	2435.3	183.3	2397.9	2581.1
0.10	45.8	0.001010	14.67	191.8	2438.0	191.8	2392.9	2584.8
0.11	47.7	0.001011	13.42	199.7	2440.5	199.7	2388.4	2588.1
0.12	49.4	0.001012	12.36	206.9	2442.8	206.9	2384.3	2591.2
0.13	51.1	0.001013	11.47	213.7	2445.0	213.7	2380.4	2594.0
0.14	52.6	0.001013	10.69	220.0	2447.0	220.0	2376.7	2596.7
0.15	54.0	0.001014	10.02	226.0	2448.9	226.0	2373.2	2599.2
0.16	55.3	0.001015	9.43	231.6	2450.6	231.6	2370.0	2601.6
0.17	56.6	0.001015	8.91	236.9	2452.3	236.9	2366.9	2603.8
0.18	57.8	0.001016	8.45	242.0	2453.9	242.0	2363.9	2605.9
0.19	59.0	0.001017	8.03	246.8	2455.4	246.8	2361.1	2607.9
0.20	60.1	0.001017	7.65	251.5	2456.9	251.5	2358.4	2609.9
0.22	62.2	0.001018	7.00	260.1	2459.6	260.1	2353.3	2613.5
0.24	64.1	0.001019	6.45	268.2	2462.1	268.2	2348.6	2616.8
0.26	65.9	0.001020	5.98	275.6	2464.4	275.7	2344.2	2619.9
0.28	67.5	0.001021	5.58	282.7	2466.5	282.7	2340.0	2622.7
0.30	69.1	0.001022	5.23	289.3	2468.6	289.3	2336.1	2625.4
0.35	72.7	0.001025	4.53	304.3	2473.1	304.3	2327.2	2631.5
0.40	75.9	0.001027	3.99	317.6	2477.1	317.7	2319.2	2636.9
0.45	78.7	0.001028	3.58	329.6	2480.7	329.6	2312.0	2641.7
0.50	81.3	0.001030	3.24	340.5	2484.0	340.6	2305.4	2646.0
0.55	83.7	0.001032	2.96	350.6	2486.9	350.6	2299.3	2649.9
0.60	86.0	0.001033	2.73	359.9	2489.7	359.9	2293.6	2653.6
0.65	88.0	0.001035	2.53	368.5	2492.2	368.6	2288.3	2656.9
0.70	90.0	0.001036	2.36	376.7	2494.5	376.8	2283.3	2660.1
0.75	91.8	0.001037	2.22	384.4	2496.7	384.5	2278.6	2663.0
0.80	93.5	0.001039	2.087	391.6	2498.8	391.7	2274.1	2665.8
0.85	95.2	0.001040	1.972	398.5	2500.8	398.6	2269.8	2668.4
0.90	96.7	0.001041	1.869	405.1	2502.6	405.2	2265.6	2670.9
0.95	98.2	0.001042	1.777	411.4	2504.4	411.5	2261.7	2673.2
1.00	99.6	0.001043	1.694	417.4	2506.1	417.5	2257.9	2675.4
1.01325	100.0	0.001044	1.673	419.0	2506.5	419.1	2256.9	2676.0

(1 atm)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Table B.7 Properties of Superheated Steam^a

$P(\text{bar})$ ($T_{\text{sat}}, ^\circ\text{C}$)	Sat'd Water	Sat'd Steam	Temperature ($^\circ\text{C}$) →							
			50	75	100	150	200	250	300	350
0.0 (—)	\hat{H} — \hat{U} — \hat{V} —	— — —	2595 2446 —	2642 2481 —	2689 2517 —	2784 2589 —	2880 2662 —	2978 2736 —	3077 2812 —	3177 2890 —
0.1 (45.8)	\hat{H} 191.8 \hat{U} 191.8 \hat{V} 0.00101	2584.8 2438.0 14.7	2593 2444 14.8	2640 2480 16.0	2688 2516 17.2	2783 2588 19.5	2880 2661 21.8	2977 2736 24.2	3077 2812 26.5	3177 2890 28.7
0.5 (81.3)	\hat{H} 340.6 \hat{U} 340.6 \hat{V} 0.00103	2646.0 2484.0 3.24	209.3 209.2 0.00101	313.9 313.9 0.00103	2683 2512 3.41	2780 2586 3.89	2878 2660 4.35	2979 2735 4.83	3076 2811 5.29	3177 2889 5.75
1.0 (99.6)	\hat{H} 417.5 \hat{U} 417.5 \hat{V} 0.00104	2675.4 2506.1 1.69	209.3 209.2 0.00101	314.0 313.9 0.00103	2676 2507 1.69	2776 2583 1.94	2875 2658 2.17	2975 2734 2.40	3074 2811 2.64	3176 2889 2.87
5.0 (151.8)	\hat{H} 640.1 \hat{U} 639.6 \hat{V} 0.00109	2747.5 2560.2 0.375	209.7 209.2 0.00101	314.3 313.8 0.00103	419.4 418.8 0.00104	632.2 631.6 0.00109	2855 2643 0.425	2961 2724 0.474	3065 2803 0.522	3168 2883 0.571
10 (179.9)	\hat{H} 762.6 \hat{U} 761.5 \hat{V} 0.00113	2776.2 2582 0.194	210.1 209.1 0.00101	314.7 313.7 0.00103	419.7 418.7 0.00104	632.5 631.4 0.00109	2827 2621 0.206	2943 2710 0.233	3052 2794 0.258	3159 2876 0.282
20 (212.4)	\hat{H} 908.6 \hat{U} 906.2 \hat{V} 0.00118	2797.2 2598.2 0.09950	211.0 209.0 0.00101	315.5 313.5 0.00102	420.5 418.4 0.00104	633.1 603.9 0.00109	852.6 850.2 0.00116	2902 2679 0.111	3025 2774 0.125	3139 2862 0.139
40 (250.3)	\hat{H} 1087.4 \hat{U} 1082.4 \hat{V} 0.00125	2800.3 2601.3 0.04975	212.7 208.6 0.00101	317.1 313.0 0.00102	422.0 417.8 0.00104	634.3 630.0 0.00109	853.4 848.8 0.00115	1085.8 1080.8 0.00125	1343.4 1329.4 0.0588	1625.0 1585.0 0.0665
60 (275.6)	\hat{H} 1213.7 \hat{U} 1205.8 \hat{V} 0.00132	2785.0 2590.4 0.0325	214.4 208.3 0.00101	318.7 312.6 0.00103	423.5 417.3 0.00104	635.6 629.1 0.00109	854.2 847.3 0.00115	1085.8 1078.3 0.00125	1343.4 1329.4 0.0361	1625.0 1585.0 0.0422
80 (295.0)	\hat{H} 1317.1 \hat{U} 1306.0 \hat{V} 0.00139	2759.9 2571.7 0.0235	216.1 208.1 0.00101	320.3 312.3 0.00102	425.0 416.7 0.00104	636.8 628.2 0.00109	855.1 845.9 0.00115	1085.8 1075.8 0.00124	1343.4 1329.4 0.0243	1625.0 1585.0 0.0299
100 (311.0)	\hat{H} 1408.0 \hat{U} 1393.5 \hat{V} 0.00145	2727.7 2547.3 0.0181	217.8 207.8 0.00101	322.9 311.7 0.00102	426.5 416.1 0.00104	638.1 627.3 0.00109	855.9 844.4 0.00115	1085.8 1073.4 0.00124	1343.4 1329.4 0.00140	1625.0 1585.0 0.0224
150 (342.1)	\hat{H} 1611.0 \hat{U} 1586.1 \hat{V} 0.00166	2615.0 2459.9 0.0103	222.1 207.0 0.00101	326.0 310.7 0.00102	430.3 414.7 0.00104	641.3 625.0 0.00108	858.1 841.0 0.00114	1086.2 1067.7 0.00123	1338.2 1317.6 0.00138	1635.5 1523 0.0115
200 (365.7)	\hat{H} 1826.5 \hat{U} 1785.7 \hat{V} 0.00204	2418.4 2300.8 0.005875	226.4 206.3 0.00100	330.0 309.7 0.00102	434.0 413.2 0.00103	644.5 622.9 0.00108	860.4 837.7 0.00114	1086.7 1062.2 0.00122	1334.3 1307.1 0.00136	1647.1 1613.7 0.00167
221.2(P_c) (374.15)(T_c)	\hat{H} 2108 \hat{U} 2037.8 \hat{V} 0.00317	2108 2037.8 0.00317	228.2 206.0 0.00100	331.7 309.2 0.00102	435.7 412.8 0.00103	645.8 622.0 0.00108	861.4 836.3 0.00114	1087.0 1060.0 0.00122	1332.8 1302.9 0.00135	1635.5 1600.3 0.00163
250 (—)	\hat{H} — \hat{U} — \hat{V} —	— — —	230.7 205.7 0.00100	334.0 308.7 0.00101	437.8 412.1 0.00103	647.7 620.8 0.00108	862.8 834.4 0.00113	1087.5 1057.0 0.00122	1331.1 1297.5 0.00135	1625.0 1585.0 0.00160
300 (—)	\hat{H} — \hat{U} — \hat{V} —	— — —	235.0 205.0 0.0009990	338.1 307.7 0.00101	441.6 410.8 0.00103	650.9 618.7 0.00107	865.2 831.3 0.00113	1088.4 1052.1 0.00121	1328.7 1288.7 0.00133	1609.9 1563.3 0.00155
500 (—)	\hat{H} — \hat{U} — \hat{V} —	— — —	251.9 202.4 0.0009911	354.2 304.0 0.00100	456.8 405.8 0.00102	664.1 611.0 0.00106	875.4 819.7 0.00111	1093.6 1034.3 0.00119	1323.7 1259.3 0.00129	1576.3 1504.1 0.00144
1000 (—)	\hat{H} — \hat{U} — \hat{V} —	— — —	293.9 196.5 0.0009737	394.3 295.7 0.0009852	495.1 395.1 0.00100	698.0 594.4 0.00104	903.5 795.3 0.00108	1113.0 999.0 0.00114	1328.7 1207.1 0.00122	1550.5 1419.0 0.00131

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE
GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES
INFORMATIQUES
EXAMEN FINAL – HIVER 2020

Table B.8 Specific Enthalpies of Selected Gases: SI Units

\hat{H} (kJ/mol)							
Reference state: Gas, $P_{\text{ref}} = 1 \text{ atm}$, $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$							
T	Air	O ₂	N ₂	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	-0.72	-0.73	-0.73	-0.72	-0.73	-0.92	-0.84
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	2.19	2.24	2.19	2.16	2.19	2.90	2.54
200	5.15	5.31	5.13	5.06	5.16	7.08	6.01
300	8.17	8.47	8.12	7.96	8.17	11.58	9.57
400	11.24	11.72	11.15	10.89	11.25	16.35	13.23
500	14.37	15.03	14.24	13.83	14.38	21.34	17.01
600	17.55	18.41	17.39	16.81	17.57	26.53	20.91
700	20.80	21.86	20.59	19.81	20.82	31.88	24.92
800	24.10	25.35	23.86	22.85	24.13	37.36	29.05
900	27.46	28.89	27.19	25.93	27.49	42.94	33.32
1000	30.86	32.47	30.56	29.04	30.91	48.60	37.69
1100	34.31	36.07	33.99	32.19	34.37	54.33	42.18
1200	37.81	39.70	37.46	35.39	37.87	60.14	46.78
1300	41.34	43.38	40.97	38.62	41.40	65.98	51.47
1400	44.89	47.07	44.51	41.90	44.95	71.89	56.25
1500	48.45	50.77	48.06	45.22	48.51	77.84	61.09