

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**INFORMATIONS UTILES**

Date : Le mardi 17 décembre 2019

Heure : 9 h 30 à 12 h 00

Documentation : Une feuille manuscrite recto verso 8.5" x 11"

Calculatrice : Calculatrice autorisée seulement

**RÉPONDEZ DIRECTEMENT SUR LE QUESTIONNAIRE DANS L'ESPACE PRÉVU À CETTE FIN. SI VOUS UTILISEZ LE VERSO DES PAGES, Veuillez l'INDIQUER CLAIREMENT. NE DÉTACHEZ AUCUNE PAGE DE CE QUESTIONNAIRE.**

**CE QUESTIONNAIRE COMPREND 20 PAGES.**

NOM : \_\_\_\_\_

MATRICULE : \_\_\_\_\_

PRÉNOM : \_\_\_\_\_

SIGNATURE : \_\_\_\_\_

**Total :                    /20**

Cet examen est composé de trois questions :

**Question 1 : Questions en rafale**

A)	/0,5
B)	/0,5
C)	/2
D)	/3
<b>Total</b>	<b>/6</b>

**Question 2 : Production de lactate d'éthyl**

A)	/1
B)	/3
C)	/4
<b>Total</b>	<b>/8</b>

**Question 3 : Séparation d'un mélange acétone/éthanol**

A)	/1,5
B)	/1,5
C)	/3
<b>Total</b>	<b>/6</b>

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**1. Questions en rafale** **(6 points)**

*Temps suggéré : 40 minutes*

**A) Questions de compréhension (0,5 point)**

I. Lequel des énoncés ci-dessous est **toujours** vrai concernant un réacteur où une réaction chimique se déroule ?

- a) La masse totale des substances impliquées dans la réaction est la même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- b) Le nombre total de molécules des substances impliquées dans la réaction est le même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- c) Le nombre total d'atomes impliqués dans la réaction est le même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- d) A et C sont vrais.
- e) A, B et C sont vrais.

II. Déterminez si l'énoncé suivant est vrai ou faux. Justifiez votre réponse.

*Dans un courant d'air humide à pression atmosphérique, une augmentation de la température entraîne augmentation de l'humidité absolue.*

---

---

**B) Quelle méthode de bilan d'énergie et quelle référence a-t-on posé pour réaliser le calcul d'enthalpie spécifique suivant ? (0,5 point)**

$$\Delta H_{CH_3COOH(l),55^\circ\text{C},1\text{ atm}} = \Delta H_{f,CH_3COOH(g),25^\circ\text{C},1\text{ atm}}^o + \int_{25^\circ\text{C}}^{118,2^\circ\text{C}} C_{p,CH_3COOH(g)} dT - \Delta H_{vap} + \int_{118,2^\circ\text{C}}^{55^\circ\text{C}} C_{p,CH_3COOH(l)} dT$$

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**C) Le développement durable et vous... (2 points)**

- I. L'ozone ( $O_3$ ) selon son altitude dans l'atmosphère (troposphère ou stratosphère) peut être à la fois positif ou négatif pour l'humain. Expliquez cette affirmation. **(0,5 point)**

---

---

---

- II. Expliquez pourquoi (**à l'aide de deux arguments**) le Québec est bien positionné pour implanter des centres de données ou de cryptomonnaie. **(0,5 point)**

---

---

---

- III. Que signifie le *déplacement du lieu d'impact* dans la pensée cycle de vie ? **(0,5 point)**

---

---

---

---

- IV. Qu'est-ce que l'analyse du cycle de vie ? **(0,5 point)**

---

---

---

---

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

- D) Une pile formée d'une électrode de cuivre (Cu) plongée dans une solution de CuSO<sub>4</sub> (formant du Cu<sup>2+</sup> et du SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et d'une électrode de zinc (Zn) plongée dans une solution de ZnSO<sub>4</sub> (formant du Zn<sup>2+</sup> et du SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) permet de produire une force électromotrice. Les électrolytes CuSO<sub>4</sub> et ZnSO<sub>4</sub> ont une concentration de 15g/L et la pile opère à 30°C. Le courant fournie par la pile est de 1044 A. **(3 points) PAS AU PROGRAMME CE TRIMESTRE**

- i. Écrivez les demi-réactions et la réaction globale d'oxydo-réduction se produisant dans cette pile.
- ii. Quel est le potentiel standard E<sup>o</sup><sub>p</sub> de cette pile ?
- iii. Quel compartiment devrait-on alimenter en électrolyte si l'on désire opérer la pile en régime permanent ? Pourquoi ?
- iv. À l'aide de la loi de Faraday, calculez ce débit d'alimentation (g/s) pour ce compartiment. *Rappel : F = 96 500 C/mol* é

**Tableau des potentiels standards de réduction**

Demi-réaction de réduction	E <sup>o</sup> (V)
Meilleurs oxydants	
$Ag_{(aq)}^+ + e^- \leftrightarrow Ag_{(s)}$	0.80
$Hg_{2(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow 2Hg_{(l)}$	0.80
$Fe_{(aq)}^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe_{(aq)}^{2+}$	0.77
$O_{2(g)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O_{2(aq)}$	0.70
$MnO_{4(aq)}^- + 4H_{(aq)}^+ + 3e^- \leftrightarrow MnO_{2(aq)} + 2H_2O_{(l)}$	0.56
$I_{2(s)} + 2e^- \leftrightarrow 2I_{(aq)}^-$	0.54
$Cu_{(aq)}^+ + e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.52
$O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} + 4e^- \leftrightarrow 4OH_{(aq)}^-$	0.40
$Cu_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.34
$AgCl_{(s)} + e^- \leftrightarrow Ag_{(s)} + Cl_{(aq)}^-$	0.22
$Cu_{(aq)}^{2+} + e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.15
$2H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2(g)$	0.00
$Fe_{(aq)}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Fe_{(s)}$	-0.04
$Pb_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Pb_{(s)}$	-0.13
$Ni_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Ni_{(s)}$	-0.26
$Cd_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cd_{(s)}$	-0.40
Meilleurs réducteurs	

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

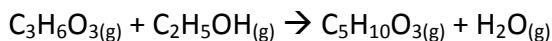
---

## 2. Production de lactate d'éthyl

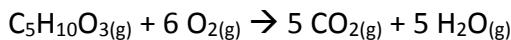
(8 points)

*Temps suggéré : 50 minutes*

Le procédé illustré ci-dessous permet de produire du lactate d'éthyl ( $C_5H_{10}O_3$ ) à partir d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ) et d'acide lactique ( $C_3H_6O_3$ ) selon la réaction suivante :



Malheureusement, l'alimentation du procédé contient de l'oxygène ( $O_2$ ) et la réaction **parasite** suivante se produit :



On alimente au réacteur (courant 3) 100 mol/s de  $C_3H_6O_{3(g)}$ , 120 mol/s de  $O_{2(g)}$  et du  $C_2H_5OH_{(g)}$ . Ce courant est à  $250^\circ C$  et 1 atm. La conversion simple-passe (ou unitaire) du  $C_3H_6O_{3(g)}$  au réacteur est de 80% et l'excès de  $C_2H_5OH_{(g)}$  est de 60%. Finalement, un rendement en  $C_5H_{10}O_{3(g)}$  de 70% est obtenu.

La sortie du réacteur (courant 4), à  $500^\circ C$  et 1 atm, est acheminée à une unité de séparation où tout le  $C_5H_{10}O_3$  est séparé et vendu (courant 6). Le  $CO_2$ , le  $O_2$  et le  $H_2O$  sont aussi séparés et rejetés à l'atmosphère (courant 5). Le  $C_3H_6O_{3(g)}$  et le  $C_2H_5OH_{(g)}$  sont recyclés à l'entrée du réacteur via le courant 8. Ce courant se combine à l'alimentation fraîche du procédé (courant 1) et le courant 2, à  $50^\circ C$  et à pression inconnue, est réchauffé dans un échangeur de chaleur de façon à vaporiser le  $C_3H_6O_3$  et le  $C_2H_5OH$ .

Échangeur 2

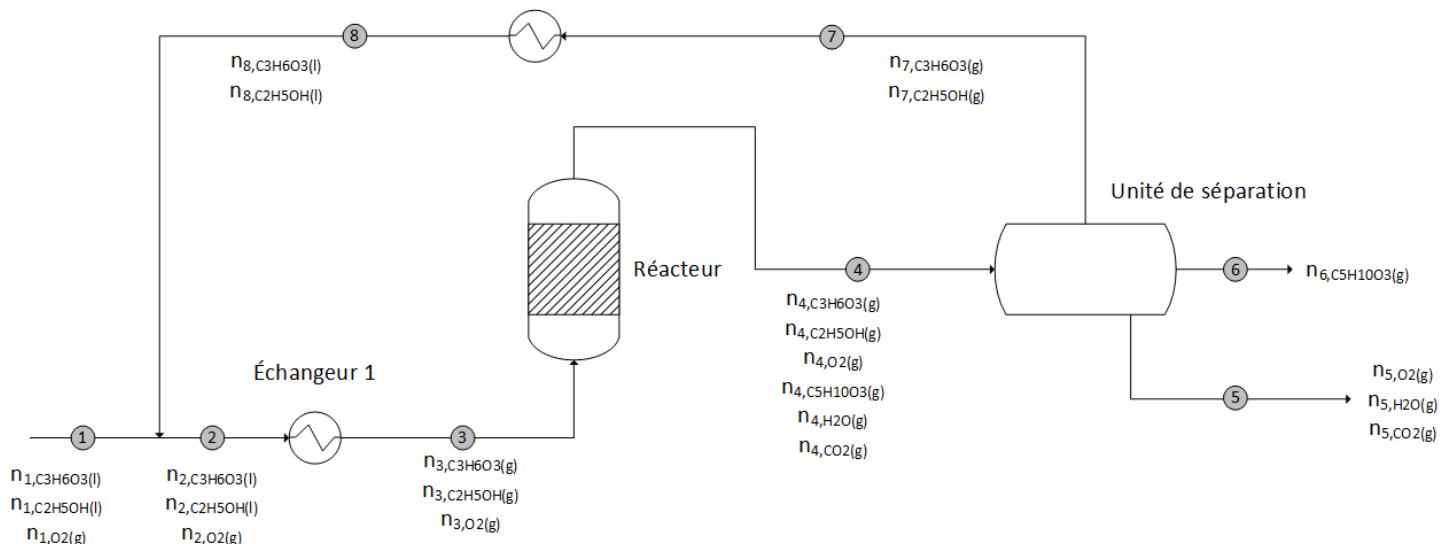


Figure 1 – Diagramme d'écoulement du procédé

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

Tableau 1 – Données utiles

Substance	$\Delta\hat{H}_f^0$ (kJ/mol)	$\widehat{Cp}$ (kJ/mol · °C)	$\Delta\hat{H}_{vap}$ (kJ/mol) à $T_{éb}$ et 1 atm
$C_3H_6O_{3(l)}$	-694,00	0,12	69,00 kJ/mol à 227°C
$C_3H_6O_{3(g)}$	-721,00	0,012	---
$C_2H_5OH_{(l)}$	-277,63	0,16	38,58 kJ/mol à 78,5°C
$C_2H_5OH_{(g)}$	-235,31	0,061 + 0,00016 T	---
$C_5H_{10}O_{3(g)}$	-643,00	0,254	---
$O_{2(g)}$	0	Voir table B8 en annexe	---
$CO_{2(g)}$	-393,5	Voir table B8 en annexe	---
$H_2O_{(g)}$	-241,83	Voir table B8 en annexe	---

Si un bilan d'énergie réactif est requis, la **méthode des chaleurs de réaction** devra être utilisée.

- A) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur le réacteur. **(1 point)**
  - B) Calculez les débits partiels (mol/s) du courant 4. **(3 points)**
  - C) Calculez la chaleur à fournir ou à soutirer au réacteur (kW). **(4 points)**
- A) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur le réacteur. **(1 point)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

B) Calculez les débits partiels (mol/s) du courant 4. **(3 points)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

C) Calculez la chaleur à fournir ou à soutirer au réacteur (kW). **(4 points)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**Problème 3 : Séparation d'un mélange acétone/éthanol**

**(6 points)**

*Temps suggéré : 50 minutes*

Le procédé partiellement annoté de la figure suivante permet de séparer un mélange d'acétone ( $C_3H_6O$ ) et d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ) grâce à une colonne à distiller. L'alimentation de la colonne à distiller (courant 1) contient 200 kmol/h d'un mélange composé à 60% molaire d'acétone ( $C_3H_6O$ ) et 40% molaire d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ). Le distillat (courant 8) contient 90% molaire d'acétone alors que le résidu contient 5% molaire d'acétone (courant 4).

Le liquide qui sort en bas de la colonne à  $65^{\circ}C$  (courant 2) est dirigé vers un rebouilleur partiel. Le liquide qui n'a pas été vaporisé forme le résidu (courant 4) et les vapeurs qui ont été vaporisées retournent à la colonne à distiller à  $76^{\circ}C$  (courant 3). Le rebouilleur opère de sorte à vaporiser 55% du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2). Tout comme la colonne à distiller, le rebouilleur opère à une pression totale de 1 atm. Puisque la vapeur du courant 3 et le liquide du courant 4 proviennent du rebouilleur, ils sont en équilibre.

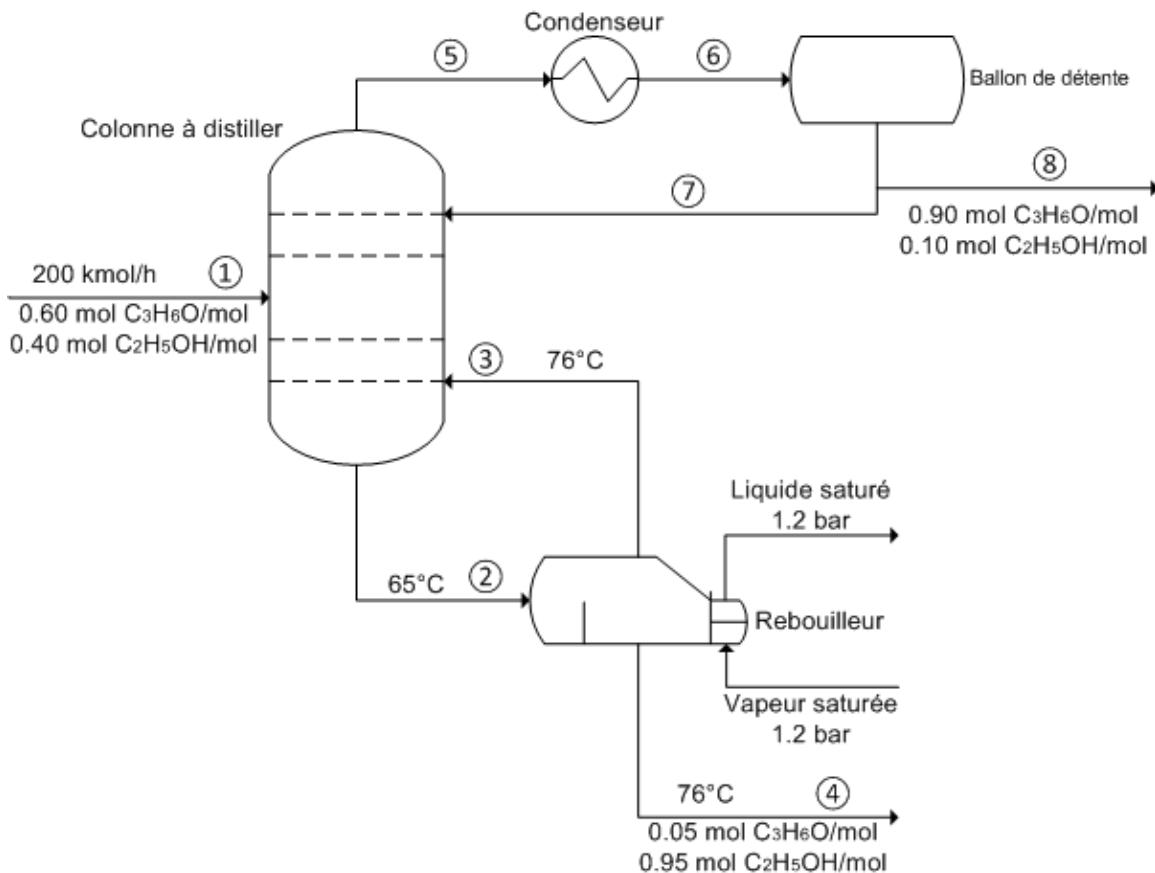


Figure 2 – Diagramme d'écoulement du procédé

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**Note : Vous pouvez annoter directement le diagramme précédent afin de déclarer les différentes variables que vous utiliserez.**

**Tableau 1 – Données utiles**

Substance	$\Delta\hat{H}_{\text{vap}}$ (kJ/kmol)	Cp du liquide (kJ/kmol ·°C)	Cp de la vapeur (kJ/kmol ·°C)
Acétone ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )	30 200 ( $T_{\text{eb}} = 56^\circ\text{C}$ )	123	$71.96 + 0.201 T$
Éthanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	38 580 ( $T_{\text{eb}} = 78.5^\circ\text{C}$ )	158.8	$61.34 + 0.1572 T$

- A. Calculez le débit total du résidu (kmol/h) (courant 4), celui du liquide sortant au bas de la colonne (kmol/h) (courant 2) ainsi que celui de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (kmol/h) (courant 3). **(1.5 points)**
- B. Calculez la composition du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2) ainsi que celle de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (courant 3). **(1.5 points)**
- C. Votre ami a aussi réalisé les mêmes calculs que vous, mais avec d'autres spécifications et il a produit le tableau ci-dessous pour le bilan d'énergie sur le rebouilleur. En utilisant ses valeurs de débits partiels, calculez l'énergie qui doit être fournie par les tubes dans le rebouilleur (kW) en supposant qu'il n'y a aucune perte d'énergie vers l'environnement. **(3 points)**

Substance	$n_{\text{in}}$ (kmol/h) (courant 2)	$\hat{H}_{\text{in}}$ (kJ/kmol)	$n_{\text{out}}$ (kmol/h) (courant 3 ou 4)	$\hat{H}_{\text{out}}$ (kJ/kmol)
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(\text{l})}$	<b>24</b>		<b>7</b>	
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{l})}$	<b>300</b>		<b>140</b>	
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(\text{g})}$	---	---	<b>17</b>	
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{g})}$	---	---	<b>160</b>	

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

- A. Calculez le débit total du résidu (kmol/h) (courant 4), celui du liquide sortant au bas de la colonne (kmol/h) (courant 2) ainsi que celui de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (kmol/h) (courant 3). **(1.5 points)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

- B. Calculez la composition du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2) ainsi que celle de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (courant 3). **(1.5 points)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

C. Votre ami a aussi réalisé les mêmes calculs que vous, mais avec d'autres spécifications et il a produit le tableau ci-dessous pour le bilan d'énergie sur le rebouilleur. En utilisant ses valeurs de débits partiels, calculez l'énergie qui doit être fournie par les tubes dans le rebouilleur (kW) en supposant qu'il n'y a aucune perte d'énergie vers l'environnement. **(3 points)**

Substance	$n_{in}$ (kmol/h) (courant 2)	$\hat{H}_{in}$ (kJ/kmol)	$n_{out}$ (kmol/h) (courant 3 ou 4)	$\hat{H}_{out}$ (kJ/kmol)
$C_3H_6O_{(l)}$	<b>24</b>		<b>7</b>	
$C_2H_5OH_{(l)}$	<b>300</b>		<b>140</b>	
$C_3H_6O_{(g)}$	---	---	<b>17</b>	
$C_2H_5OH_{(g)}$	---	---	<b>160</b>	

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

**Bonne chance !**

**Patrice Farand**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

---

## Annexes

### Tableau de conversion d'unités

Quantité	Équivalences
<b>Masse</b>	$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g} = 0,001 \text{ t} = 2,20462 \text{ lb}_m = 35,27392 \text{ oz}$ $1 \text{ lb}_m = 16 \text{ oz} = 453,593 \text{ g}$
<b>Longueur</b>	$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1000 \text{ mm} = 10^6 \mu\text{m} = 10^{10} \text{ \AA}$ $= 39,37 \text{ po} = 3,2808 \text{ pi} = 1,0936 \text{ vg} = 0,0006214 \text{ mi}$ $1 \text{ pi} = 12 \text{ po} = 1/3 \text{ vg} = 0,3048 \text{ m} = 30,38 \text{ cm}$
<b>Volume</b>	$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^6 \text{ mL}$ $= 35,3145 \text{ pi}^3 = 264,17 \text{ gal}$ $1 \text{ pi}^3 = 1728 \text{ po}^3 = 7,4805 \text{ gal} = 0,028317 \text{ m}^3 = 28,317 \text{ L} = 28\,317 \text{ cm}^3$
<b>Force</b>	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 = 10^5 \text{ dyn} = 10^5 \text{ g}\cdot\text{cm}/\text{s}^2 = 0,22481 \text{ lb}_f$ $1 \text{ lb}_f = 32,174 \text{ lb}_m\cdot\text{ft}/\text{s}^2 = 4,4482 \text{ N} = 4,4482 \times 10^5 \text{ dyn}$
<b>Pression</b>	$1 \text{ atm} = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (\text{Pa}) = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$ $= 1,01325 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 =$ $= 760 \text{ mm Hg à } 0^\circ\text{C} = 10,333 \text{ m H}_2\text{O à } 4^\circ\text{C}$ $= 14,696 \text{ lb}_f/\text{po}^2 (\text{psi}) = 33,9 \text{ pi H}_2\text{O à } 4^\circ\text{C}$ $= 29,921 \text{ po Hg à } 0^\circ\text{C}$
<b>Énergie</b>	$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m} = 10^7 \text{ dyn}\cdot\text{cm}$ $= 2,778 \times 10^{-7} \text{ kW}\cdot\text{h} = 0,23901 \text{ cal}$ $= 9,486 \times 10^{-4} \text{ Btu}$
<b>Puissance</b>	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0,23901 \text{ cal/s} = 9,486 \times 10^{-4} \text{ Btu/s} = 1,341 \times 10^{-3} \text{ hp}$

# ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

## DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

**GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019**

**Tableau périodique des éléments**

1 1 A <b>H</b> hydrogène 1.008	2 11 A <b>Be</b> beryllium 9.012	3 Li lithium 6.941	4 Mg magnésium 24.31	5 Ca calcium 40.08	6 V B scandium 44.96	7 VII B titanium 47.88	8 VII B vanadium 50.94	9 VIII B chromium 54.94	10 VIII B manganèse 55.85	11 VII B cobalt 58.93	12 VII B nickel 58.69	13 III A bore 10.81	14 IV A carbone 12.01	15 V A azote 14.01	16 VI A oxygène 16.00	17 VII A fluor 19.00	18 VIII A chloré 35.45	2 He hélium 4.003	10 Ne néon 20.18
19 K potassium 39.10	20 Ca calcium 40.08	21 Sc scandium 44.96	22 Ti titane 47.88	23 V vanadium 50.94	24 Cr chromium 52.00	25 Mn manganèse 54.94	26 Fe fer 55.85	27 Co cobalt 58.93	28 Ni nickel 58.69	29 Cu cuivre 63.55	30 Zn zinc 65.39	31 Ga galium 69.72	32 Ge germanium 72.59	33 As arsenic 74.92	34 Se séléinium 78.96	35 Br brome 79.90	18 Ar argon 39.95		
37 Rb rubidium 85.47	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.91	40 Zr zirconium 91.22	41 Nb niobium 92.91	42 Mo molybdène 95.94	43 Tc technétium (98)	44 Ru ruthénium 101.1	45 Rh rhodium 102.9	46 Pd palladium 106.4	47 Ag argent 107.9	48 Cd cadmium 112.4	49 In indium 114.8	50 Sn étain 118.7	51 Sb antimoine 121.8	52 Te tellure 127.6	53 I iode 126.9	54 Xe xénon 131.3		
55 Cs césum 137.3	56 Ba baryum 138.9	57 La lanthane 138.9	72 Hf hafnium 178.5	73 Ta tantale 180.9	74 W tungstène 183.9	75 Re rhénium 186.2	76 Os osmium 190.2	77 Ir iridium 192.2	78 Pt platine 195.1	79 Au or 197.0	80 Hg mercure 200.6	81 Tl thallium 204.4	82 Pb plomb 207.2	83 Bi bismuth 209.0	84 Po polonium (210)	85 At astate (210)	86 Rn radon (222)		
87 Fr francium (223)	88 Ra radium (226)	89 Ac actinium (227)	104 Rf rutherfordium (257)	105 Db dubium (260)	106 Sg seaborgium (263)	107 Bh bohrium (262)	108 Hs hassium (265)	109 Mt meitnerium (266)											
58 Ce cérium 140.1	59 Pr praseodyme 140.9	60 Nd néodyme 144.2	61 Pm prométhium (147)	62 Sm samarium 150.4	63 Eu europium 152.0	64 Gd gadolinium 157.3	65 Tb terbium 158.9	66 Dy dysprosium 162.5	67 Ho holium 164.9	68 Er erbium 167.3	69 Tm thulium 168.9	70 Yb ytterbium 173.0	71 Lu lutécium 175.0						
90 Th thorium 232.0	91 Pa protactinium (231)	92 U uranium 238.0	93 Np neptunium (237)	94 Pu plutonium (242)	95 Am américium (243)	96 Cm curium (247)	97 Bk berkelium (247)	98 Cf californium (249)	99 Es einsteiniuum (253)	100 Fm fermiuum (254)	101 Md mendéleïum (256)	102 No nobélium (254)	103 Lr lawrencium (257)						

# ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

## DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

### GCH2730 — ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES

### EXAMEN FINAL — AUTOMNE 2019

**Table B.4** Antoine Equation Constants<sup>a</sup>

Compound	Formula	Range (°C)	A	B	C
Acetaldehyde	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	-0.2 to 34.4	8.00552	1600.017	291.809
Acetic acid	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	29.8 to 126.5	7.38782	1533.313	222.309
Acetic acid*	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	0 to 36	7.18807	1416.7	225
Acetic anhydride	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	62.8 to 139.4	7.14948	1444.718	199.817
Acetone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-12.9 to 55.3	7.11714	1210.595	229.664
Acrylic acid	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	20.0 to 70.0	5.65204	648.629	154.683
Ammonia*	NH <sub>3</sub>	-83 to 60	7.55466	1002.711	247.885
Aniline	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N	102.6 to 185.2	7.32010	1731.515	206.049
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	14.5 to 80.9	6.89272	1203.531	219.888
n-Butane	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-78.0 to -0.3	6.82485	943.453	239.711
i-Butane	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-85.1 to -11.6	6.78866	899.617	241.942
1-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> O	89.2 to 125.7	7.36366	1305.198	173.427
2-Butanol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	72.4 to 107.1	7.20131	1157.000	168.279
1-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-77.5 to -3.7	6.53101	810.261	228.066
Butyric acid	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	20.0 to 150.0	8.71019	2433.014	255.189
Carbon disulfide	CS <sub>2</sub>	3.6 to 79.9	6.94279	1169.110	241.593
Carbon tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	14.1 to 76.0	6.87926	1212.021	226.409
Chlorobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	62.0 to 131.7	6.97808	1431.053	217.550
Chlorobenzene*	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	0 to 42	7.10690	1500.0	224.0
Chlorobenzene*	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	42 to 230	6.94504	1413.12	216.0
Chloroform	CHCl <sub>3</sub>	-10.4 to 60.3	6.95465	1170.966	226.232
Chloroform*	CHCl <sub>3</sub>	-30 to 150	6.90328	1163.03	227.4
Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	19.9 to 81.6	6.84941	1206.001	223.148
Cyclohexanol	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	93.7 to 160.7	6.25530	912.866	109.126
n-Decane	n-C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	94.5 to 175.1	6.95707	1503.566	194.738
1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	86.8 to 171.6	6.95433	1497.527	197.056
1,1-Dichloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	-38.8 to 17.6	6.97702	1174.022	229.060
1,2-Dichloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	-30.8 to 99.4	7.02530	1271.254	222.927
Dichloromethane	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	-40.0 to 40	7.40916	1325.938	252.616
Diethyl ether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	-60.8 to 19.9	6.92032	1064.066	228.799
Diethyl ketone	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	56.5 to 111.3	7.02529	1310.281	214.192
Diethylene glycol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	130.0 to 243.0	7.63666	1939.359	162.714
Dimethyl ether	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	-78.2 to -24.9	6.97603	889.264	241.957
Dimethylamine	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	-71.8 to 6.9	7.08212	960.242	221.667
N,N-Dimethylformamide	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> NO	30.0 to 90.0	6.92796	1400.869	196.434
1,4-Dioxane	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	20.0 to 105.0	7.43155	1554.679	240.337
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	19.6 to 93.4	8.11220	1592.864	226.184
Ethanolamine	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO	65.4 to 170.9	7.45680	1577.670	173.368
Ethyl acetate	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	15.6 to 75.8	7.10179	1244.951	217.881
Ethyl acetate*	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-20 to 150	7.09808	1238.710	217.0
Ethyl chloride	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	-55.9 to 12.5	6.98647	1030.007	238.612
Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	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 <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	50.0 to 200.0	8.09083	2088.936	203.454
Ethylene oxide	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	0.3 to 31.8	8.69016	2005.779	334.765
1,2-Ethylenediamine	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	37.4 to 100.7	7.58178	1699.173	260.714
Glycerol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	183.3 to 260.4	6.16501	1036.056	28.097
n-Heptane	n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	25.9 to 99.3	6.90253	1267.828	216.823
i-Heptane	i-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	18.5 to 90.9	6.87689	1238.122	219.783
1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	21.6 to 94.5	6.91381	1265.120	220.051
n-Hexane	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	13.0 to 69.5	6.88555	1175.817	224.867
i-Hexane	i-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	12.8 to 61.1	6.86839	1151.401	228.477
1-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	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 <sub>3</sub> OH	14.9 to 83.7	8.08097	1582.271	239.726
Methanol*	CH <sub>3</sub> OH	-20 to 140	7.87863	1473.11	230.0
Methyl acetate	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1.8 to 55.8	7.06524	1157.630	219.726
Methyl bromide	CH <sub>3</sub> Br	-70.0 to 3.6	7.09084	1046.066	244.914
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	-75.0 to 5.0	7.09349	948.582	249.336
Methyl ethyl ketone	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	42.8 to 88.4	7.06356	1261.339	221.969
Methyl isobutyl ketone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O	21.7 to 116.2	6.67272	1168.408	191.944
Methyl methacrylate	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	39.2 to 89.2	8.40919	2050.467	274.369
Methylamine	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> N	-83.1 to -6.2	7.33690	1011.532	233.286
Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	25.6 to 101.8	6.82827	1273.673	221.723
Naphthalene	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	80.3 to 179.5	7.03538	1756.328	204.842
Nitrobenzene	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub>	134.1 to 210.6	7.11562	1746.586	201.783
Nitromethane	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	55.7 to 136.4	7.28166	1446.937	227.600
n-Nonane	n-C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	70.3 to 151.8	6.93764	1430.459	201.808
1-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	66.6 to 147.9	6.95777	1437.862	205.814
n-Octane	n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	52.9 to 126.6	6.91874	1351.756	209.100
i-Octane	i-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	41.7 to 118.5	6.88814	1319.529	211.625
1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	44.9 to 122.2	6.93637	1355.779	213.022
n-Pentane	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	13.3 to 36.8	6.84471	1060.793	231.541
i-Pentane	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	16.3 to 28.6	6.73457	992.019	229.564
1-Pentanol	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	74.7 to 156.0	7.18246	1287.625	161.330
1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	12.8 to 30.7	6.84268	1043.206	233.344
Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O	107.2 to 181.8	7.13301	1516.790	174.954
1-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	60.2 to 104.6	7.74416	1437.686	198.463
2-Propanol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	52.3 to 89.3	7.74021	1359.517	197.527
Propionic acid	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	72.4 to 128.3	7.71423	1733.418	217.724
Propylene oxide	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	-24.2 to 34.8	7.01443	1086.369	228.594
Pyridine	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	67.3 to 152.9	7.04115	1373.799	214.979
Styrene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	29.9 to 144.8	7.06623	1507.434	214.985
Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	35.3 to 111.5	6.95805	1346.773	219.693
1,1,1-Trichloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	-5.4 to 16.9	8.64344	2136.621	302.769
1,1,2-Trichloroethane	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub>	50.0 to 113.7	6.95185	1314.410	209.197
Trichloroethylene	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	17.8 to 86.5	6.51827	1018.603	192.731
Vinyl acetate	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	21.8 to 72.0	7.21010	1296.130	226.655
Water*	H <sub>2</sub> O	0 to 60	8.10765	1750.286	235.000
Water*	H <sub>2</sub> O	60 to 150	7.96681	1668.210	228.000
m-Xylene	m-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	59.2 to 140.0	7.00646	1460.183	214.827
o-Xylene	o-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	63.5 to 145.4	7.00154	1476.393	213.872
p-Xylene	p-C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	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 — AUTOMNE 2019**

---

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

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

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

**INFORMATIONS UTILES**

Date : Le mardi 17 décembre 2019

Heure : 9h30 à 12h00

Documentation : Une feuille manuscrite recto-verso 8.5" x 11"

Calculatrice : Calculatrice autorisée seulement

**RÉPONDEZ DIRECTEMENT SUR LE QUESTIONNAIRE DANS L'ESPACE PRÉVU À CETTE FIN. SI VOUS UTILISEZ LE VERSO DES PAGES, Veuillez l'INDIQUEZ CLAIREMENT. NE DÉTACHEZ AUCUNE PAGE DE CE QUESTIONNAIRE.**

**CE QUESTIONNAIRE COMPREND 20 PAGES.**

NOM : \_\_\_\_\_

MATRICULE : \_\_\_\_\_

PRÉNOM : \_\_\_\_\_

SIGNATURE : \_\_\_\_\_

**Total : / 20**

Cet examen est composé de trois questions :

**Question 1 : Questions en rafale**

A)	/0,5
B)	/0,5
C)	/2
D)	/3
<b>Total</b>	<b>/6</b>

**Question 2 : Production de lactate d'éthyl**

A)	/1
B)	/3
C)	/4
<b>Total</b>	<b>/8</b>

**Question 3 : Séparation d'un mélange acétone/éthanol**

A)	/1,5
B)	/1,5
C)	/3
<b>Total</b>	<b>/6</b>

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

**1. Questions en rafale** **(6 points)**

*Temps suggéré : 40 minutes*

**A) Questions de compréhension (0,5 point)**

I. Lequel des énoncés ci-dessous est **toujours** vrai concernant un réacteur où une réaction chimique se déroule ?

- a) La masse totale des substances impliquées dans la réaction est la même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- b) Le nombre total de molécules des substances impliquées dans la réaction est le même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- c) Le nombre total d'atomes impliqués dans la réaction est le même à la sortie et à l'entrée du réacteur.
- d) A et C sont vrais.
- e) A, B et C sont vrais.

II. Déterminez si l'énoncé suivant est vrai ou faux. Justifiez votre réponse.

*Dans un courant d'air humide à pression atmosphérique, une augmentation de la température entraîne augmentation de l'humidité absolue.*

Faux, la masse d'eau ne varie pas tout comme la masse d'air. L'humidité absolue reste

---

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

**B) Quelle méthode de bilan d'énergie et quelle référence a-t-on posé pour réaliser le calcul d'enthalpie spécifique suivant ? (0,5 point)**

$$\Delta H_{CH_3COOH(l), 55^\circ C, 1 \text{ atm}} = \Delta H_{f, CH_3COOH(g), 25^\circ C, 1 \text{ atm}}^o + \int_{25^\circ C}^{118,2^\circ C} C_{p, CH_3COOH(g)} dT - \Delta H_{vap} + \int_{118,2^\circ C}^{55^\circ C} C_{p, CH_3COOH(l)} dT$$

Méthode des chaleurs de formation (0,25 point)

Référence : C<sub>(s)</sub>, H<sub>2(g)</sub>, O<sub>2(g)</sub> @ 25°C et 1 atm (0,25 point)

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

**C) Le développement durable et vous... (2 points)**

- I. L'ozone ( $O_3$ ) selon son altitude dans l'atmosphère (troposphère ou stratosphère) peut être à la fois positif ou négatif pour l'humain. Expliquez cette affirmation. **(0,5 point)**

---

---

---

- II. Expliquez pourquoi (**à l'aide de deux arguments**) le Québec est bien positionné pour implanter des centres de données ou de cryptomonnaie. **(0,5 point)**

---

---

---

- III. Que signifie le *déplacement du lieu d'impact* dans la pensée cycle de vie ? **(0,5 point)**

---

---

---

---

- IV. Qu'est-ce que l'analyse du cycle de vie ? **(0,5 point)**

---

---

---

---

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

- D) Une pile formée d'une électrode de cuivre (Cu) plongée dans une solution de CuSO<sub>4</sub> (formant du Cu<sup>2+</sup> et du SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et d'une électrode de zinc (Zn) plongée dans une solution de ZnSO<sub>4</sub> (formant du Zn<sup>2+</sup> et du SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) permet de produire une force électromotrice. Les électrolytes CuSO<sub>4</sub> et ZnSO<sub>4</sub> ont une concentration de 15g/L et la pile opère à 30°C. Le courant fournie par la pile est de 1044 A. **(3 points) Pas à l'examen ce trimestre**

- i. Écrivez les demi-réactions et la réaction globale d'oxydo-réduction se produisant dans cette pile.
- ii. Quel est le potentiel standard E<sup>o</sup><sub>p</sub> de cette pile ?
- iii. Quel compartiment devrait-on alimenter en électrolyte si l'on désire opérer la pile en régime permanent ? Pourquoi ?
- iv. À l'aide de la loi de Faraday, calculez ce débit d'alimentation (g/s) pour ce compartiment. *Rappel : F = 96 500 C/mol* é

**Tableau des potentiels standards de réduction**

Demi-réaction de réduction	E <sup>o</sup> (V)
Meilleurs oxydants	
$F_{2(g)} + 2e^- \leftrightarrow 2F_{(aq)}^-$	2.87
$Ag_{(aq)}^+ + e^- \leftrightarrow Ag_{(aq)}$	1.99
$Co_{(aq)}^{3+} + e^- \leftrightarrow Co_{(aq)}^{2+}$	1.92
$H_2O_{2(aq)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow 2H_2O_{(l)}$	1.78
$MnO_{4(aq)}^- + 4H_{(aq)}^+ + 3e^- \leftrightarrow MnO_{2(aq)} + 2H_2O_{(l)}$	1.68
$2H_{(aq)}^+ + IO_{4(aq)}^- + 2e^- \leftrightarrow IO_{3(aq)}^- + H_2O_{(l)}$	1.60
$MnO_{4(aq)}^- + 8H_{(aq)}^+ + 5e^- \leftrightarrow MnO_{4(aq)}^{2+} + 4H_2O_{(l)}$	1.51
$Au_{(aq)}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Au_{(s)}$	1.50
$Cl_{2(g)} + 2e^- \leftrightarrow 2Cl_{(aq)}^-$	1.36
$O_{2(g)} + 4H_{(aq)}^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O_{(l)}$	1.23
$MnO_{2(aq)}^- + 4H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow MnO_{4(aq)}^{2+} + 2H_2O_{(l)}$	1.22
$Br_{2(l)} + 2e^- \leftrightarrow 2Br_{(aq)}^-$	1.07
$NO_{3(aq)}^- + 4H_{(aq)}^+ + 3e^- \leftrightarrow NO_{(g)} + 2H_2O_{(l)}$	0.96
$ClO_{2(aq)}^- + e^- \leftrightarrow ClO_{2(aq)}^-$	0.95
$2Hg_{2(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Hg_{2(aq)}^{2+}$	0.92
$Ag_{(aq)}^+ + e^- \leftrightarrow Ag_{(s)}$	0.80
$Hg_{2(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow 2Hg_{(l)}$	0.80
$Fe_{(aq)}^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe_{(aq)}^{2+}$	0.77
$O_{2(g)} + 2H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O_{2(aq)}$	0.70
$MnO_{4(aq)}^- + e^- \leftrightarrow MnO_{4(aq)}^{2-}$	0.56
$I_{2(s)} + 2e^- \leftrightarrow 2I_{(aq)}^-$	0.54
$Cu_{(aq)}^+ + e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.52
$O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} + 4e^- \leftrightarrow 4OH_{(aq)}^-$	0.40
$Cu_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.34
$AgCl_{(s)} + e^- \leftrightarrow Ag_{(s)} + Cl_{(aq)}^-$	0.22
$Cu_{(aq)}^{2+} + e^- \leftrightarrow Cu_{(s)}$	0.15
$2H_{(aq)}^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2(g)$	0.00
$Fe_{(aq)}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Fe_{(s)}$	-0.04
$Pb_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Pb_{(s)}$	-0.13
$Ni_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Ni_{(s)}$	-0.26
$Cd_{(aq)}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cd_{(s)}$	-0.40
Meilleurs réducteurs	

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

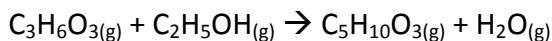
---

**2. Production de lactate d'éthyl**

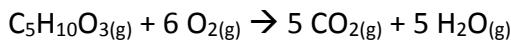
**(8 points)**

*Temps suggéré : 50 minutes*

Le procédé illustré ci-dessous permet de produire du lactate d'éthyl ( $C_5H_{10}O_3$ ) à partir d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ) et d'acide lactique ( $C_3H_6O_3$ ) selon la réaction suivante :



Malheureusement, l'alimentation du procédé contient de l'oxygène ( $O_2$ ) et la réaction **parasite** suivante se produit :



On alimente au réacteur (courant 3) 100 mol/s de  $C_3H_6O_{3(g)}$ , 120 mol/s de  $O_{2(g)}$  et du  $C_2H_5OH_{(g)}$ . Ce courant est à  $250^\circ C$  et 1 atm. La conversion simple-passe (ou unitaire) du  $C_3H_6O_{3(g)}$  au réacteur est de 80% et l'excès de  $C_2H_5OH_{(g)}$  est de 60%. Finalement, un rendement en  $C_5H_{10}O_{3(g)}$  de 70% est obtenu.

La sortie du réacteur (courant 4), à  $500^\circ C$  et 1 atm, est acheminée à une unité de séparation où tout le  $C_5H_{10}O_3$  est séparé et vendu (courant 6). Le  $CO_2$ , le  $O_2$  et le  $H_2O$  sont aussi séparés et rejetés à l'atmosphère (courant 5). Le  $C_3H_6O_{3(g)}$  et le  $C_2H_5OH_{(g)}$  sont recyclés à l'entrée du réacteur via le courant 8. Ce courant se combine à l'alimentation fraîche du procédé (courant 1) et le courant 2, à  $50^\circ C$  et à pression inconnue, est réchauffé dans un échangeur de chaleur de façon à vaporiser le  $C_3H_6O_3$  et le  $C_2H_5OH$ .

Échangeur 2

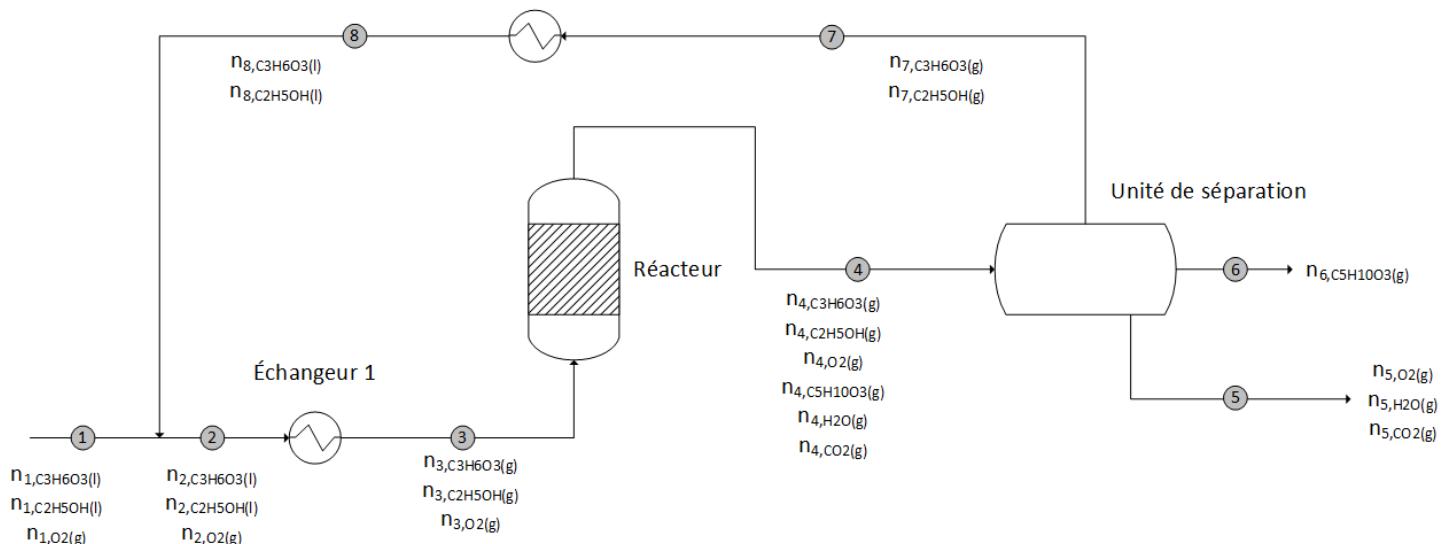


Figure 1 – Diagramme d'écoulement du procédé

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

Tableau 1 – Données utiles

Substance	$\widehat{\Delta H}_f^0 \text{ (kJ/mol)}$	$\widehat{C_p} \text{ (kJ/mol} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\widehat{\Delta H}_{vap} \text{ (kJ/mol) à } T_{\text{éb}} \text{ et } 1 \text{ atm}$
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{3(\text{l})}$	-694,00	0,12	69,00 kJ/mol à 227°C
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{3(\text{g})}$	-721,00	0,012	---
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{l})}$	-277,63	0,16	38,58 kJ/mol à 78,5°C
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{g})}$	-235,31	$0,061 + 0,00016 T$	---
$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_{3(\text{g})}$	-643,00	0,254	---
$\text{O}_{2(\text{g})}$	0	Voir table B8 en annexe	---
$\text{CO}_{2(\text{g})}$	-393,5	Voir table B8 en annexe	---
$\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$	-241,83	Voir table B8 en annexe	---

Si un bilan d'énergie réactif est requis, la **méthode des chaleurs de réaction** devra être utilisée.

- A) Effectuez une analyse des degrés de liberté (DDL) sur le réacteur. **(1 point)**
  - B) Calculez les débits partiels (mol/s) du courant 4. **(3 points)**
  - C) Calculez la chaleur à fournir ou à soutirer au réacteur (kW). **(4 points)**
- B) Calculez les débits partiels (mol/s) du courant 4. **(3 points)**

$$\begin{aligned} n_{4,\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3} &= 20 \text{ mol/s} \\ n_{4,\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} &= 80 \text{ mol/s} \\ n_{4,\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3} &= 70 \text{ mol/s} \\ n_{4,\text{H}_2\text{O}} &= 130 \text{ mol/s} \\ n_{4,\text{CO}_2} &= 50 \text{ mol/s} \\ n_{4,\text{O}_2} &= 60 \text{ mol/s} \end{aligned}$$

- C) Calculez la chaleur à fournir ou à soutirer au réacteur (kW). **(4 points)**

$$Q = -7049 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

**Problème 3 : Séparation d'un mélange acétone/éthanol**

**(6 points)**

*Temps suggéré : 50 minutes*

Le procédé partiellement annoté de la figure suivante permet de séparer un mélange d'acétone ( $C_3H_6O$ ) et d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ) grâce à une colonne à distiller. L'alimentation de la colonne à distiller (courant 1) contient 200 kmol/h d'un mélange composé à 60% molaire d'acétone ( $C_3H_6O$ ) et 40% molaire d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ). Le distillat (courant 8) contient 90% molaire d'acétone alors que le résidu contient 5% molaire d'acétone (courant 4).

Le liquide qui sort en bas de la colonne à  $65^{\circ}C$  (courant 2) est dirigé vers un rebouilleur partiel. Le liquide qui n'a pas été vaporisé forme le résidu (courant 4) et les vapeurs qui ont été vaporisées retournent à la colonne à distiller à  $76^{\circ}C$  (courant 3). Le rebouilleur opère de sorte à vaporiser 55% du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2). Tout comme la colonne à distiller, le rebouilleur opère à une pression totale de 1 atm. Puisque la vapeur du courant 3 et le liquide du courant 4 proviennent du rebouilleur, ils sont en équilibre.

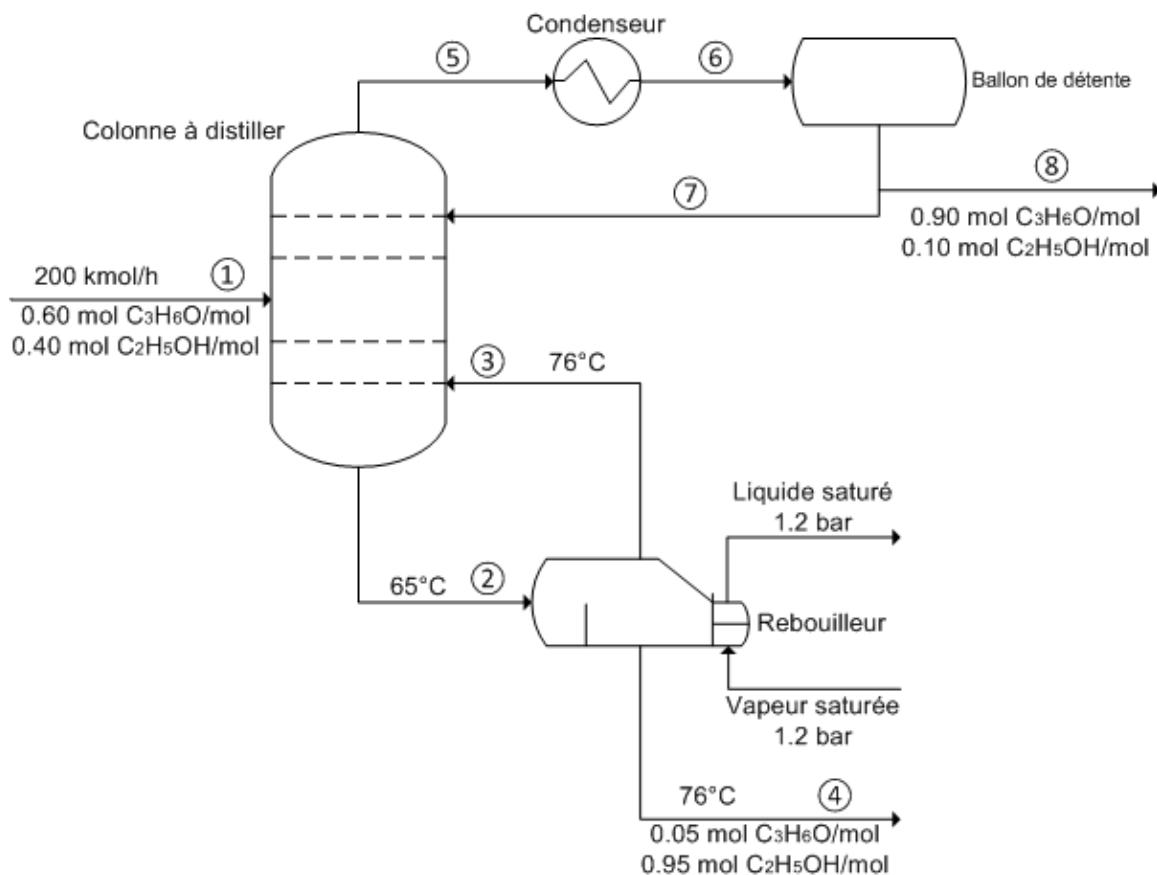


Figure 2 – Diagramme d'écoulement du procédé

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

**Note : Vous pouvez annoter directement le diagramme précédent afin de déclarer les différentes variables que vous utiliserez.**

**Tableau 1 – Données utiles**

Substance	$\Delta\hat{H}_{\text{vap}}$ (kJ/kmol)	Cp du liquide (kJ/kmol ·°C)	Cp de la vapeur (kJ/kmol ·°C)
Acétone ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )	30 200 ( $T_{\text{eb}} = 56^\circ\text{C}$ )	123	$71.96 + 0.201 T$
Éthanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	38 580 ( $T_{\text{eb}} = 78.5^\circ\text{C}$ )	158.8	$61.34 + 0.1572 T$

- A. Calculez le débit total du résidu (kmol/h) (courant 4), celui du liquide sortant au bas de la colonne (kmol/h) (courant 2) ainsi que celui de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (kmol/h) (courant 3). **(1.5 points)**
- B. Calculez la composition du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2) ainsi que celle de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (courant 3). **(1.5 points)**
- C. Votre ami a aussi réalisé les mêmes calculs que vous, mais avec d'autres spécifications et il a produit le tableau ci-dessous pour le bilan d'énergie sur le rebouilleur. En utilisant ses valeurs de débits partiels, calculez l'énergie qui doit être fournie par les tubes dans le rebouilleur (kW) en supposant qu'il n'y a aucune perte d'énergie vers l'environnement. **(3 points)**

Substance	$n_{\text{in}}$ (kmol/h) (courant 2)	$\hat{H}_{\text{in}}$ (kJ/kmol)	$n_{\text{out}}$ (kmol/h) (courant 3 ou 4)	$\hat{H}_{\text{out}}$ (kJ/kmol)
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(\text{l})}$	<b>24</b>		<b>7</b>	
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{l})}$	<b>300</b>		<b>140</b>	
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(\text{g})}$	---	---	<b>17</b>	
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{g})}$	---	---	<b>160</b>	

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

- A. Calculez le débit total du résidu (kmol/h) (courant 4), celui du liquide sortant au bas de la colonne (kmol/h) (courant 2) ainsi que celui de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (kmol/h) (courant 3). **(1.5 points)**

Bilan global sur la colonne à distiller :  $200 = n_8 + n_4$  **(0.25 pt)**

Bilan sur l'acétone sur la colonne à distiller :  $0.60 (200) = 0.90 n_8 + 0.05 n_4$  **(0.25 pt)**

$$n_4 = 70.6 \text{ kmol/h} \quad \textbf{(0.25 pt)}$$

Bilan global sur le rebouilleur :  $n_2 = n_3 + n_4$

Spécification:  $0.55 n_2 = n_3$  **(0.25 pt)**

On obtient  $n_2 = 0.55 n_2 + 70.6$   $n_2 = 156.9 \text{ kmol/h}$  **(0.25 pt)**  
 $n_3 = 86.3 \text{ kmol/h}$  **(0.25 pt)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

- B. Calculez la composition du liquide sortant au bas de la colonne (courant 2) ainsi que celle de la vapeur sortant du rebouilleur et retournant à la colonne à distiller (courant 3). **(1.5 points)**

Équilibre liquide/vapeur :  $0.05 P_{Ac}^0 = y_{Ac} P_{TOT}$  **(0.25 pt)**  $P_{tot} = 760 \text{ mm Hg}$

Avec la loi d'Antoine  $P_{Ac}^0 = 1434.2 \text{ mmHg}$  **(0.25 pt)**

Hypothèse : on peut utiliser les A, B et C de l'acétone même si nous sommes hors de l'intervalle de validité.  
**(0.25 pt) Pour l'éthanol, l'hypothèse n'est pas nécessaire.**

$$y_{Ac} = 0.09 \text{ mol A/mol}$$

$$y_{Eth} = 0.91 \text{ mol E/mol}$$
 **(0.25 pt)**

Bilan sur l'acétone sur le rebouilleur :  $156.9x_A = 0.05 (70.6) + 0.09 (86.3)$  **(0.25 pt)**

$$x_A = 0.07 \text{ mol A/mol}$$

$$x_E = 0.93 \text{ mol E/mol}$$
 **(0.25 pt)**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

C. Votre ami a aussi réalisé les mêmes calculs que vous, mais avec d'autres spécifications et il a produit le tableau ci-dessous pour le bilan d'énergie sur le rebouilleur. En utilisant ses valeurs de débits partiels, calculez l'énergie qui doit être fournie par les tubes dans le rebouilleur (kW) en supposant qu'il n'y a aucune perte d'énergie vers l'environnement. **(3 points)**

Substance	n <sub>in</sub> (kmol/h) (courant 2)	̂H <sub>in</sub> (kJ/kmol)	n <sub>out</sub> (kmol/h) (courant 3 ou 4)	̂H <sub>out</sub> (kJ/kmol)
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>(l)</sub>	<b>24</b>		<b>7</b>	
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH <sub>(l)</sub>	<b>300</b>		<b>140</b>	
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>(g)</sub>	---	---	<b>17</b>	
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH <sub>(g)</sub>	---	---	<b>160</b>	

Bilan d'énergie : Q – W<sub>s</sub> = ΔE<sub>K</sub> + ΔE<sub>P</sub> + ΔH

W<sub>s</sub> = 0 (pas de pièces mobiles)

ΔE<sub>K</sub> = 0 (diamètres des conduites inconnus)

**(0.25 pt)**

ΔE<sub>P</sub> = 0 (Δz considéré négligeable)

Q = ΔH

Référence : Acétone (L), Éthanol (L), à 65°C, 1 atm

**(0.5 pt, -0.25 pt/erreur)**

Tableau des enthalpies :

Substance	n <sub>in</sub> (kmol/h) (courant 2)	̂H <sub>in</sub> (kJ/kmol)	n <sub>out</sub> (kmol/h) (courant 3 ou 4)	̂H <sub>out</sub> (kJ/kmol)
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>(l)</sub>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>H<sub>1</sub></b>
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH <sub>(l)</sub>	<b>300</b>	<b>0</b>	<b>140</b>	<b>H<sub>2</sub></b>
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>(g)</sub>	---	---	<b>17</b>	<b>H<sub>3</sub></b>
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH <sub>(g)</sub>	---	---	<b>160</b>	<b>H<sub>4</sub></b>

̂H<sub>1</sub> = ∫<sub>65</sub><sup>76</sup> (123) dT = 123 (76 – 65) **(0.25 pt)**

̂H<sub>1</sub> = 1353 kJ/kmol

̂H<sub>2</sub> = ∫<sub>65</sub><sup>76</sup> 158.8 dT = 158.8 (76 – 65) **(0.25 pt)**

̂H<sub>2</sub> = 1747 kJ/kmol

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE**  
**GCH2730 – ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS LES SYSTÈMES INFORMATIQUES**  
**EXAMEN FINAL – AUTOMNE 2019**

---

$$\hat{H}_3 = \int_{65}^{56} (123) dT + \Delta\hat{H}_{vap} + \int_{56}^{76} (71.96 + 0.201T) dT \quad \text{(0.5 pt)}$$

$$\hat{H}_3 = 123(56 - 65) + 30200 + 71.96(76 - 56) + \frac{0.201}{2}(76^2 - 56^2)$$

$$\hat{H}_3 = 30798 \text{ kJ/kmol}$$

$$\hat{H}_4 = \int_{65}^{78.5} 158.8 dT + \Delta\hat{H}_{vap} + \int_{78.5}^{76} (61.34 + 0.1572T) dT \quad \text{(0.5 pt)}$$

$$\hat{H}_4 = 158.8(78.5 - 65) + 38580 + 61.34(76 - 78.5) + \frac{0.1572}{2}(76^2 - 78.5^2)$$

$$\hat{H}_4 = 40540 \text{ kJ/kmol}$$

$$Q = \Delta\dot{H} = 7(1353) + 140(1747) + 17(30798) + 160(40540) \quad \text{(0.25 pt)}$$

$$Q = 7264017 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 2018 \text{ kW} \quad \text{(0.5 pt)}$$

**Bonne chance !**

**Patrice Farand**