

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

INFORMATIONS UTILES

Date : Le mercredi 26 août 2020

Heure : 9 h 30 à 12 h 00. **Par la suite, vous aurez 10 minutes pour numériser vos copies. Elles doivent donc être remises avant 12 h 10.**

Documentation : Toute documentation personnelle permise (incluant le site Moodle du cours, mais aucun autre site Web)

Calculatrice : Calculatrice autorisée seulement

Vous devez répondre aux questions ci-dessous de façon manuscrite et remettre votre travail en un seul fichier PDF dans la boîte de remise des travaux disponible sur Moodle. La qualité visuelle du fichier remis doit être bonne. Le non-respect de cette consigne entraînera automatiquement la note de 0 pour votre examen final.

Sur la première page de votre solution, indiquez votre nom, votre prénom et votre matricule. De plus, veuillez copier-coller la déclaration ci-dessous et la signer.

En remettant ce travail à l'enseignant, 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.*

- ☐ Oui
- ☐ Non

**Bonne chance !
Patrice**

Cet examen est composé de trois questions :

Question 1 : Étude d'un procédé : 4 points

Question 2 : Un peu de développement durable... : 4 points

Question 3 : Procédé de fabrication d'alcool : 12 points

Si vous jugez qu'une erreur est présente dans l'examen, posez une hypothèse plausible et poursuivez votre travail.

1. Étude d'un procédé

(4 points)

Temps suggéré : 25 minutes

Dans ce procédé opéré en régime permanent, du $A_{(g)}$ provenant du réservoir R1 est refroidi dans l'échangeur de chaleur HX1 puis acheminé au réacteur D1. Un courant de $B_{(g)}$ provenant du compresseur C1 est aussi ajouté. La réaction suivante se produit dans le réacteur D1 :

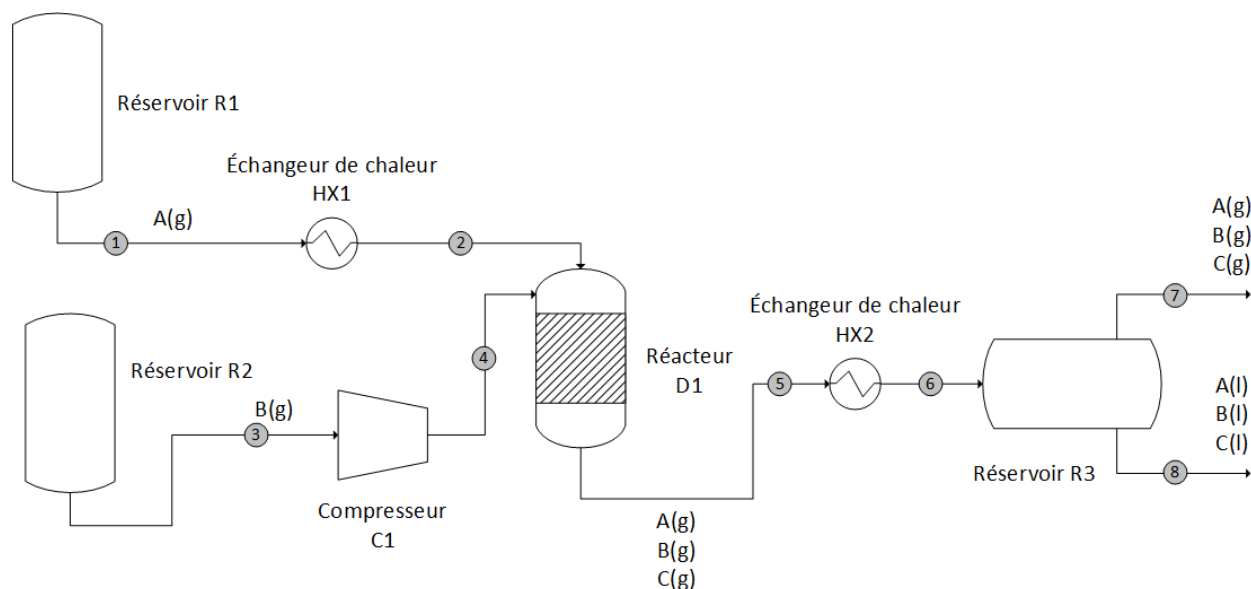
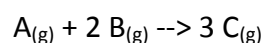


Figure 1 – Diagramme d'écoulement du procédé

Malheureusement, des réactions indésirables **inconnues** se produisent aussi dans ce réacteur.

À la sortie du réacteur D1, le courant est refroidi dans l'échangeur de chaleur HX2, entraînant la condensation d'une partie du mélange de A, B, C, puis est acheminé au réservoir R3 opérant à 8 atm et 75°C. **Répondez brièvement aux questions suivantes liées à ce procédé.**

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

- A) Sachant que la pression est de 1 atm aux points 1 et 2, comment varie (augmente, diminue, reste constante) la masse volumique du gaz A entre ces deux points ? **Justifiez votre réponse. (0,25 point)**
- B) Vrai ou Faux ? Le débit massique total entrant dans le procédé (points 1 et 3) est égal au débit massique total sortant du procédé (points 7 et 8). **Justifiez votre réponse. (0,5 point)**
- C) Vrai ou Faux ? Le nombre de moles totales qui sortent du réacteur est égal au nombre de moles totales qui entrent dans ce réacteur. **Justifiez votre réponse. (0,5 point)**
- D) Si l'on alimente au réacteur 50 mol/s de A et 140 mol/s de B, quel est le pourcentage d'excès du réactif en excès si l'avancement de la réaction principale est de 35 mol/s ? **(0,5 point)**
- E) Vrai ou Faux ? Le débit volumique (m^3/s) sortant de l'échangeur HX2 est égal au débit volumique (m^3/s) entrant dans cet échangeur. **Justifiez votre réponse. (0,25 point)**
- F) Vrai ou Faux ? La méthode des chaleurs de réaction peut être utilisée pour calculer la chaleur à fournir ou à soutirer au réacteur D1. **Justifiez votre réponse. (0,5 point)**
- G) La différence de température entre les points 1 et 2 est de 35°C . Quelle est la différence de température en $^\circ\text{F}$? **(0,5 point)**
- H) Écrivez le chemin thermodynamique à suivre pour calculer l'enthalpie spécifique de la substance A dans le courant 7 si la référence posée est $A_{(l)}$ à 75°C et 1 atm. Note : la température d'ébullition du $A_{(l)}$ est de 20°C à 1 atm. **(0,5 point)**
- I) Comment est-il possible de calculer les compositions du courant 7 à partir du courant 8 ? Énoncez les équations appropriées. **(0,5 point)**

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

2. Un peu de développement durable

(4 points)

Temps suggéré : 25 minutes

Les notions relatives au développement durable ont été réparties dans plusieurs capsules tout au long de la session. Cette question vise à faire une synthèse de l'information présentée. Nous vous demandons de **produire un réseau de concepts ou une carte conceptuelle** identifiant les principaux concepts du développement durable vus ce trimestre et montrant les liens qui existent entre ces concepts. Voici un exemple de réseau de concepts :

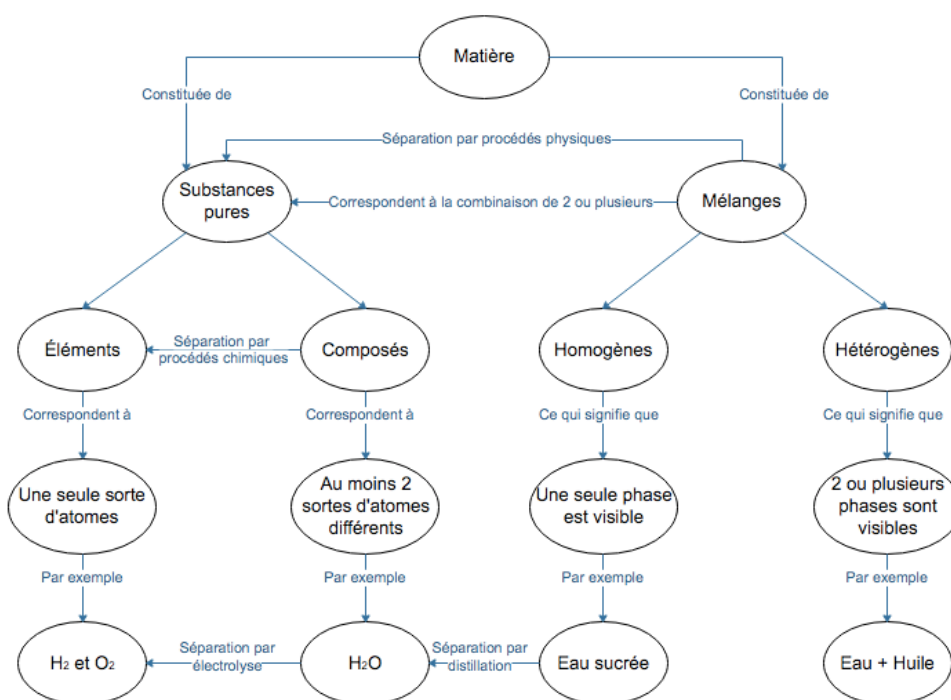


Figure 1 – Exemple de réseau de concepts illustrant la classification de la matière

Votre réseau de concepts doit contenir un maximum de 30 boîtes et identifier les éléments les plus importants de notre cours relativement au développement durable. Il peut être produit de façon manuscrite ou à l'ordinateur.

Note importante : Il est important de ne pas dépasser le temps suggéré pour cette question. La conception d'un réseau de concepts peut toujours être améliorée, mais sachez vous limiter. Vous pouvez utiliser des couleurs si vous le désirez, mais ce n'est pas obligatoire.

Critères de correction de cette question :

- Présence des concepts importants reliés au développement durable
- Liens pertinents faits entre les concepts
- Qualité de la présentation

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

3. Procédé de fabrication d'alcool

(12 points)

Temps suggéré : 90 minutes

Le diagramme d'écoulement présenté à la figure 2 montre une unité servant à produire de l'éthanol (C_2H_5OH) à partir d'une réaction d'hydratation entre l'éthylène (C_2H_4) et l'eau (H_2O) selon la réaction suivante :

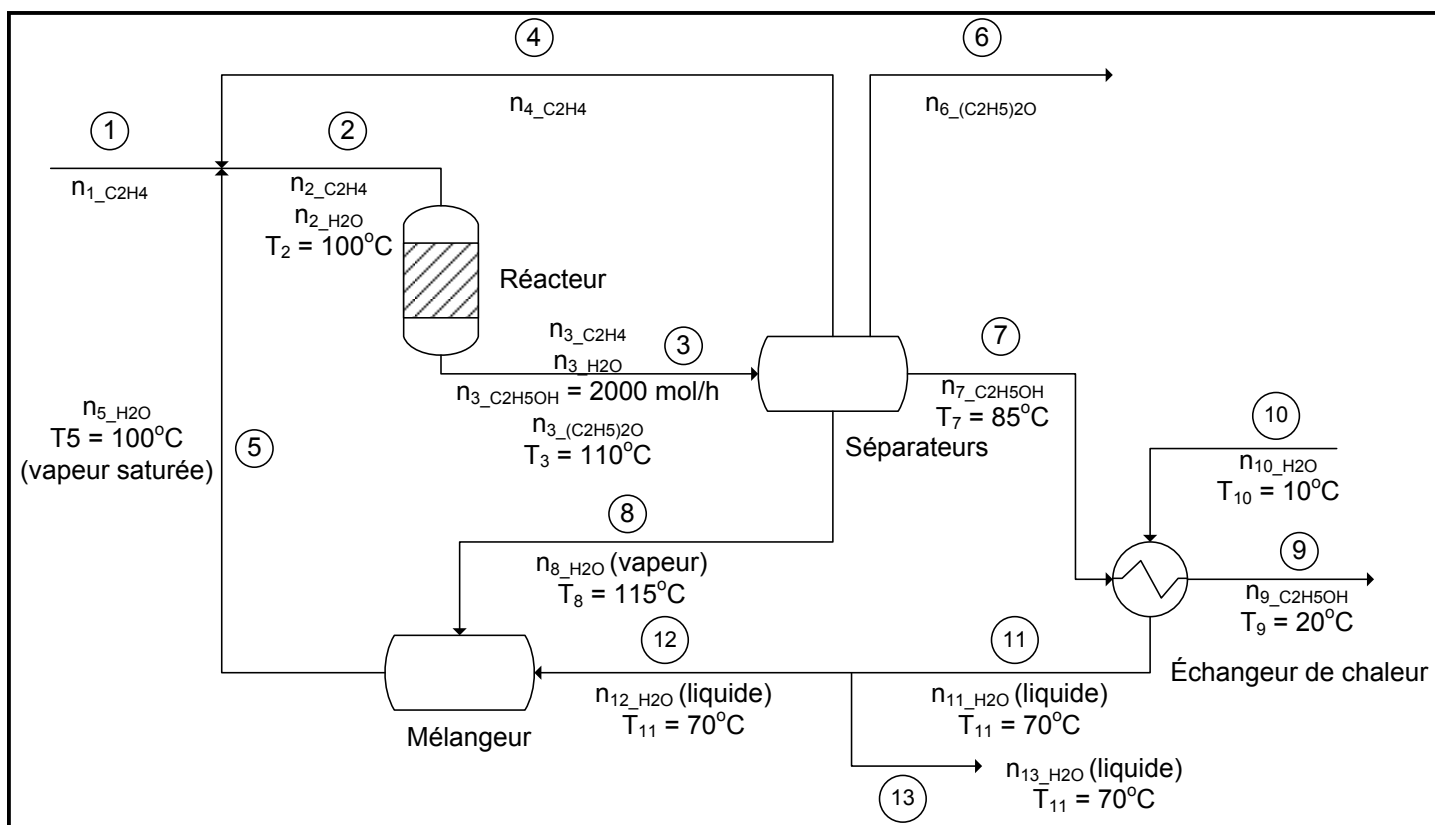
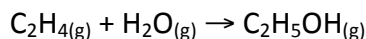
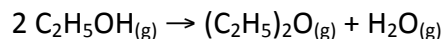


Figure 3 – Unité de production de méthanol

Malheureusement, une réaction secondaire indésirable a lieu et une partie de l'éthanol est transformée en diéthyl-éther ($(C_2H_5)_2O$) selon la réaction suivante :



Une alimentation fraîche en éthylène gazeux (courant 1) est combinée avec deux boucles de recirculation. La première (courant 4) contient tout l'éthylène gazeux qui n'a pas réagi tandis que la seconde (courant 5) contient de la vapeur d'eau saturée à $100^\circ C$.

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

L'alimentation du réacteur (courant 2) contient de l'éthylène gazeux et de la vapeur d'eau à 100°C. On alimente le réacteur avec un excès d'eau de 50%. La conversion simple-passe par rapport à l'éthylène est de 90% et la sélectivité de l'éthanol par rapport au diéthyl-éther est 10 mol C₂H₅OH/ mol (C₂H₅)₂O. On désire produire 2000 mol/h d'éthanol.

Le courant sortant du réacteur (courant 3) est à une température de 110°C et est acheminé à une unité formée de plusieurs séparateurs. Dans cette unité, on sépare parfaitement les 4 composés issus du réacteur. L'éthylène vapeur est retourné en tête du procédé (courant 4), le diéthyl-éther vapeur est retiré du procédé (courant 6), l'éthanol vapeur à 85°C est alimenté à un échangeur de chaleur (courant 7) et la vapeur d'eau à 115°C est acheminée à un mélangeur (courant 8).

L'éthanol est par la suite liquéfié dans un échangeur de chaleur et refroidi à 20°C afin d'être envoyé à l'entreposage (courant 9). Le refroidissement et la condensation sont réalisés grâce à un courant d'eau froide à 10°C (courant 10). Une partie de l'eau liquide sortant de l'échangeur de chaleur à 70°C (courant 12) est mélangée à l'eau sortant de l'unité de séparation (courant 8). Le courant résultant (courant 5) est retourné en tête du procédé. Le reste de l'eau sortant de l'échangeur de chaleur est purgé (courant 13).

Note 1 : *Tout le système fonctionne à pression atmosphérique.*

Note 2 : *Advenant le cas où des bilans d'énergie réactifs seraient nécessaires afin de répondre à une question, **la méthode des chaleurs de réaction devra être utilisée.***

Note 3 : *Utilisez les données fournies dans le tableau de la page suivante.*

- A) Calculez le débit molaire d'eau alimenté à l'échangeur de chaleur (mol/h) (courant 10). **(3,25 points)**
- B) Faites l'analyse des degrés de liberté sur le réacteur. **(0,5 point)**
- C) Calculez les débits partiels à la sortie du réacteur. **(2,5 points)**
- D) Calculez le débit de C₂H₄ frais alimenté au procédé (mol/h) (courant 1). **(1 point)**
- E) Calculez le débit d'eau du courant de purge (mol/h) (courant 13). **(1 point)**
- F) Calculez la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer au réacteur (kJ/h). **(3,75 points)**

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

Données supplémentaires :

Tableau 1 – Enthalpies de formation et C_p de quelques substances

Substance	$\Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta \hat{H}_v$ (kJ/mol) @ $T_{\text{ébul}}$ (1 atm)	C_p (kJ/mol $\cdot^\circ\text{C}$)
$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	52.28	13.54 @ -103.7°C	0.041
$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-285.84	40.656 @ 100°C	0.075
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241.83	40.656 @ 100°C	0.033
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{l})$	-277.63	38.58 @ 78.5°C	0.115
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{g})$	-235.31	38.58 @ 78.5°C	0.061
$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}(\text{g})$	-247.80	26.05 @ 34.6°C	0.010

Bonne chance !

Patrice

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

3. Procédé de fabrication d'alcool

(12 points)

Temps suggéré : 90 minutes

Le diagramme d'écoulement présenté à la figure 2 montre une unité servant à produire de l'éthanol (C_2H_5OH) à partir d'une réaction d'hydratation entre l'éthylène (C_2H_4) et l'eau (H_2O) selon la réaction suivante :

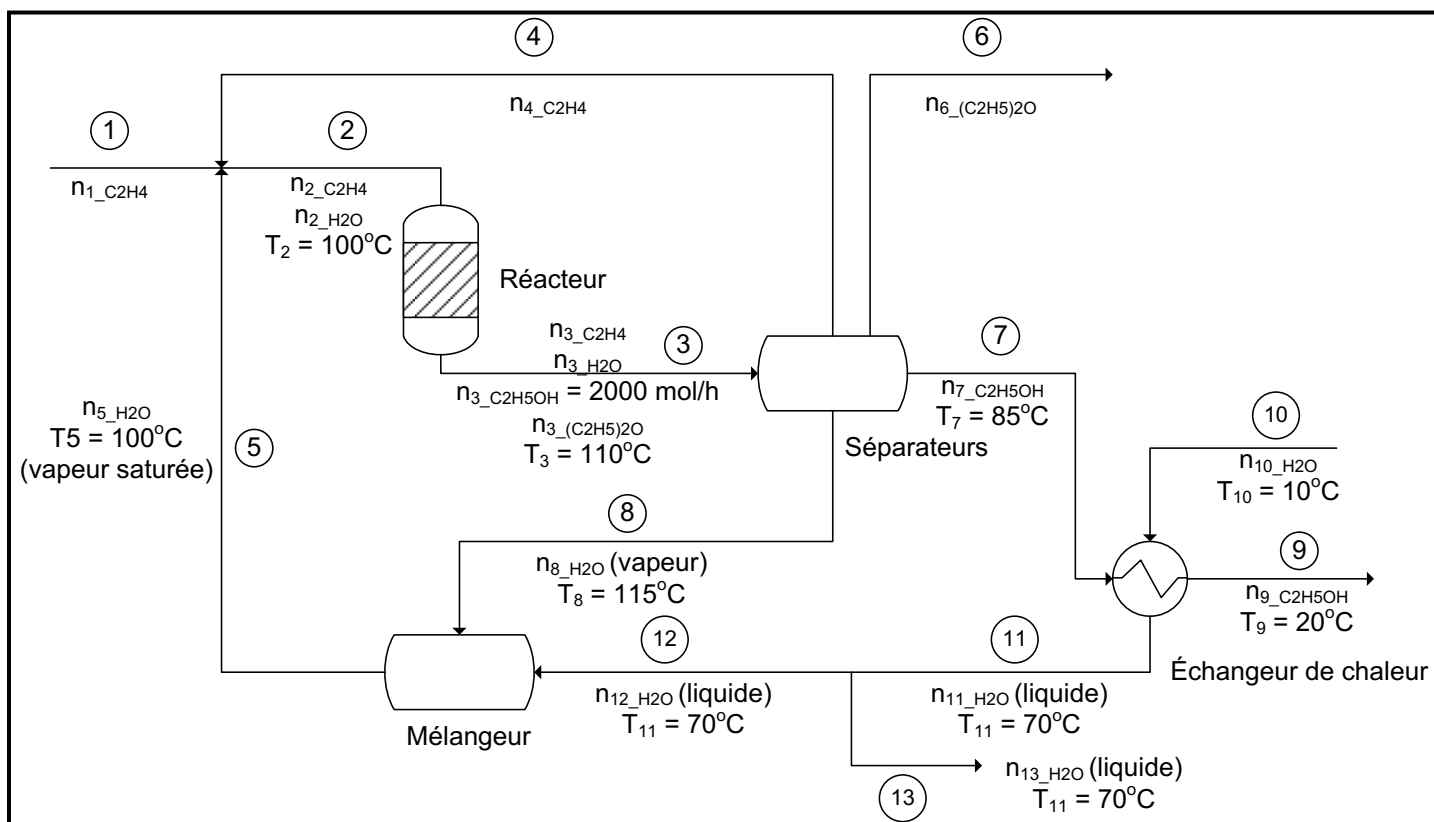
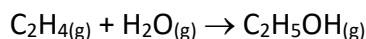
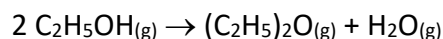


Figure 2 – Unité de production de méthanol

Malheureusement, une réaction secondaire indésirable a lieu et une partie de l'éthanol est transformée en diéthyl-éther ($(C_2H_5)_2O$) selon la réaction suivante :



Une alimentation fraîche en éthylène gazeux (courant 1) est combinée avec deux boucles de recirculation. La première (courant 4) contient tout l'éthylène gazeux qui n'a pas réagi tandis que la seconde (courant 5) contient de la vapeur d'eau saturée à 100°C.

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

L'alimentation du réacteur (courant 2) contient de l'éthylène gazeux et de la vapeur d'eau à 100°C. On alimente le réacteur avec un excès d'eau de 50%. La conversion simple-passe par rapport à l'éthylène est de 90% et la sélectivité de l'éthanol par rapport au diéthyl-éther est 10 mol C₂H₅OH/ mol (C₂H₅)₂O. On désire produire 2000 mol/h d'éthanol.

Le courant sortant du réacteur (courant 3) est à une température de 110°C et est acheminé à une unité formée de plusieurs séparateurs. Dans cette unité, on sépare parfaitement les 4 composés issus du réacteur. L'éthylène vapeur est retourné en tête du procédé (courant 4), le diéthyl-éther vapeur est retiré du procédé (courant 6), l'éthanol vapeur à 85°C est alimenté à un échangeur de chaleur (courant 7) et la vapeur d'eau à 115°C est acheminée à un mélangeur (courant 8).

L'éthanol est par la suite liquéfié dans un échangeur de chaleur et refroidi à 20°C afin d'être envoyé à l'entreposage (courant 9). Le refroidissement et la condensation sont réalisés grâce à un courant d'eau froide à 10°C (courant 10). Une partie de l'eau liquide sortant de l'échangeur de chaleur à 70°C (courant 12) est mélangée à l'eau sortant de l'unité de séparation (courant 8). Le courant résultant (courant 5) est retourné en tête du procédé. Le reste de l'eau sortant de l'échangeur de chaleur est purgé (courant 13).

Note 1 : *Tout le système fonctionne à pression atmosphérique.*

Note 2 : *Advenant le cas où des bilans d'énergie réactifs seraient nécessaires afin de répondre à une question, **la méthode des chaleurs de réaction devra être utilisée.***

Note 3 : *Utilisez les données fournies dans le tableau de la page suivante.*

- A) Calculez le débit molaire d'eau alimenté à l'échangeur de chaleur (mol/h) (courant 10). **(3,25 points)**
- B) Faites l'analyse des degrés de liberté sur le réacteur. **(0,5 point)**
- C) Calculez les débits partiels à la sortie du réacteur. **(2,5 points)**
- D) Calculez le débit de C₂H₄ frais alimenté au procédé (mol/h) (courant 1). **(1 point)**
- E) Calculez le débit d'eau du courant de purge (mol/h) (courant 13). **(1 point)**
- F) Calculez la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer au réacteur (kJ/h). **(3,75 points)**

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

Données supplémentaires :

Tableau 1 – Enthalpies de formation et C_p de quelques substances

<i>Substance</i>	$\Delta \hat{H}_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta \hat{H}_v$ (kJ/mol) @ $T_{\text{ébul}}$ (1 atm)	C_p (kJ/mol $^\circ$ C)
C ₂ H _{4(g)}	52.28	13.54 @ -103.7°C	0.041
H ₂ O _(l)	-285.84	40.656 @ 100°C	0.075
H ₂ O _(g)	-241.83	40.656 @ 100°C	0.033
C ₂ H ₅ OH _(l)	-277.63	38.58 @ 78.5°C	0.115
C ₂ H ₅ OH _(g)	-235.31	38.58 @ 78.5°C	0.061
(C ₂ H ₅) ₂ O _(g)	-247.80	26.05 @ 34.6°C	0.010

A) Calculez le débit molaire d'eau alimenté à l'échangeur de chaleur (mol/h) (courant 10). **(3,25 points)**

On obtient $Q = \Delta H = -91410$ kJ/h

$$n_{10_H2O} = Q_{10_11} / 4.5 = 20313 \text{ mol/h}$$

B) Faites l'analyse des degrés de liberté sur le réacteur. **(0,5 point)**

DDL : inconnues : $n_{2,C2H4}$, $n_{2,H2O}$, $n_{3,C2H4}$, $n_{3,H2O}$, $n_{3,(C2H5)2O}$, ξ_1 , ξ_2 (7)

Équations : 4 bilans moléculaires (C₂H₄, C₂H₅OH, H₂O, (C₂H₅)₂O)
3 spécifications (excès d'eau, sélectivité, rendement)
0

C) Calculez les débits partiels à la sortie du réacteur. **(2,5 points)**

$$n_{3_ (C2H5)2O} = 200 \text{ mol/h}$$

$$n_{3_ C2H4} = 267 \text{ mol/h}$$

$$n_{3_ H2O} = 1800 \text{ moles/h}$$

D) Calculez le débit de C₂H₄ frais alimenté au procédé (mol/h) (courant 1). **(1 point)**

$$n_{1_ C2H4} = 2400 \text{ mol/h}$$

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

E) Calculez le débit d'eau du courant de purge (mol/h) (courant 13). **(1 point)**

$$n_{13_H2O} = 18\,113 \text{ mol/h}$$

F) Calculez la quantité d'énergie à fournir ou à soutirer au réacteur (kJ/h). **(3,75 points)**

$$\text{On obtient } Q = \Delta H = -115\,317 \text{ kJ/h}$$