

**Épreuve de GÉNIE CHIMIQUE**  
**Partie écrite**

*Durée : 3 heures*

*Coefficient : 3*

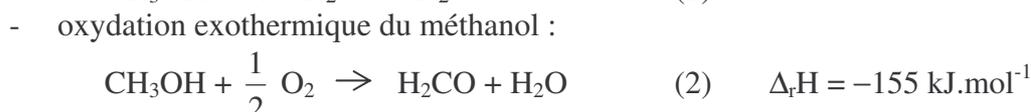
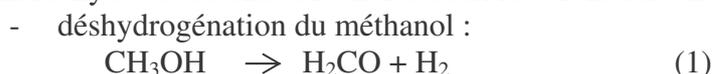
*Le sujet comporte 4 pages dont une annexe (page 4/4) à rendre avec la copie.  
 Calculatrice autorisée.*

**TECHNOLOGIE ET SCHÉMA : FABRICATION DU FORMALDÉHYDE**

Le formaldéhyde (ou méthanal)  $\text{H}_2\text{CO}$  est un intermédiaire de synthèse important de l'industrie chimique dans la fabrication des colles et des résines. Il est principalement obtenu à partir du méthanol. À l'état pur à  $20^\circ\text{C}$ , c'est un gaz incolore et à l'odeur irritante. Commercialement, on ne le trouve que dissous en solution aqueuse (entre 30 % et 55 % massique).

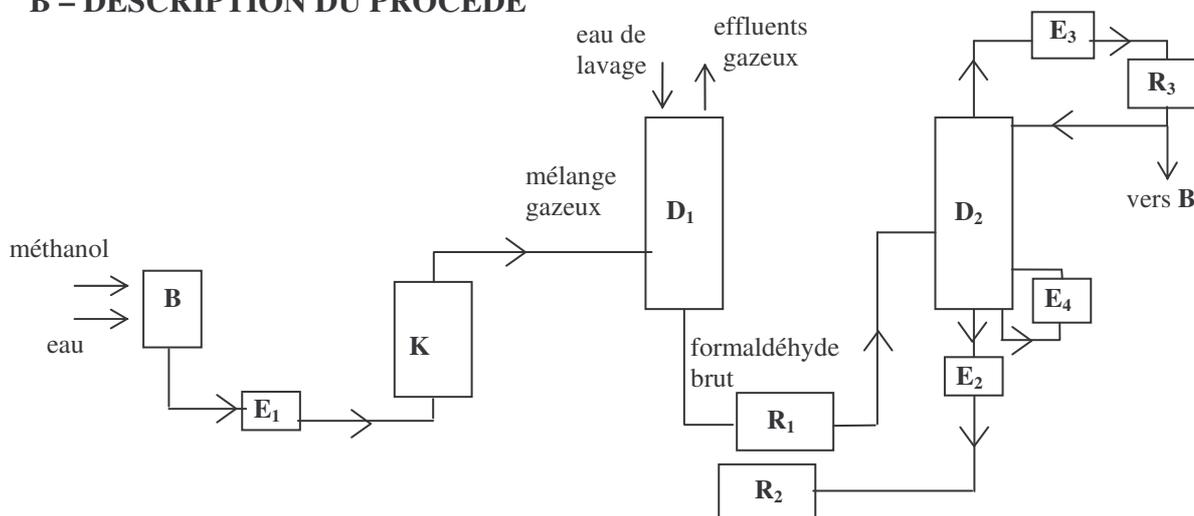
**A – PRINCIPE**

Le formaldéhyde est obtenu suivant les deux réactions suivantes :



Ces deux réactions sont mises en œuvre simultanément dans un réacteur adiabatique (pas de pertes thermiques). La chaleur dégagée par la réaction (2) est utilisée pour produire de la vapeur.

**B – DESCRIPTION DU PROCÉDÉ**



**1. Préparation du mélange gazeux**

Le mélange air – méthanol est réalisé dans un appareil de type carburateur **B** qui permet de vaporiser le méthanol liquide au sein du débit d'air à une température voisine de  $50^\circ\text{C}$ . L'air y est introduit après passage dans un compresseur, le méthanol (liquide volatil, toxique et inflammable) y étant acheminé grâce à une pompe. En sortie du carburateur **B**, le mélange obtenu (qui circule grâce à l'action de la pompe et du compresseur) est surchauffé dans un échangeur multitubulaire **E1** grâce à de la vapeur sous 2 bar absolu circulant à contre courant côté calandre. Le débit de vapeur est asservi à la température de sortie du mélange air – méthanol. La surchauffe permet d'éviter les condensations en ligne.

## 2. Réaction

Le mélange réactionnel est introduit dans le réacteur **K** en présence de cristaux d'argent jouant le rôle de catalyseur. Ces cristaux sont déposés sur un support inerte situé en partie basse du réacteur **K**. La température de fonctionnement du catalyseur est régulée en jouant sur le débit d'entrée du mélange dans **K**. Le mélange gazeux quittant le catalyseur doit alors être immédiatement refroidi. Pour cela, un serpentin d'eau de refroidissement est placé en partie haute du réacteur **K**. A la sortie, l'eau de refroidissement est à l'état vapeur. Cette vapeur est utilisée dans une autre partie de l'installation. La température du mélange gazeux en sortie de **K** est maintenue constante en agissant sur le débit d'eau de refroidissement.

## 3. Absorption

Le mélange gazeux sortant du réacteur contient du formaldéhyde, de l'eau et du méthanol n'ayant pas réagi, mais aussi du dihydrogène et du diazote. Il est traité dans une colonne de lavage à deux tronçons de garnissage **D**<sub>1</sub>, par circulation d'eau de lavage à contre courant (le formaldéhyde se dissout totalement dans l'eau). Les effluents gazeux sortant en tête de colonne **D**<sub>1</sub> seront traités. En pied de colonne **D**<sub>1</sub>, on recueille un *formaldéhyde brut* ne contenant plus que du formaldéhyde, de l'eau et du méthanol dans un réservoir **R**<sub>1</sub>, maintenu à pression atmosphérique et à niveau constant. Sa composition est contrôlée en jouant sur le débit d'eau de lavage. Ce *formaldéhyde brut* est ensuite envoyé vers une colonne de rectification **D**<sub>2</sub> grâce à une pompe centrifuge **P**<sub>1</sub> montée en charge.

## 4. Rectification

Le *formaldéhyde brut* est injecté par pompe centrifuge entre les deux tronçons de garnissage de la colonne **D**<sub>2</sub> avec un débit asservi au niveau de liquide dans la colonne d'absorption. La chauffe de la colonne **D**<sub>2</sub> est assurée par un rebouillage par thermosiphon (échangeur multitubulaire **E**<sub>4</sub>) avec utilisation de vapeur de chauffe sous 2 bar ; elle est régulée par la perte de charge dans la colonne. La solution aqueuse de formaldéhyde est ensuite soutirée par une pompe centrifuge **P**<sub>2</sub> montée en charge, avec une régulation du niveau dans la colonne **D**<sub>2</sub>, puis stockée dans le réservoir fermé **R**<sub>2</sub>. La pompe **P**<sub>2</sub> est précédée d'un échangeur **E**<sub>2</sub> permettant de refroidir la solution aqueuse. En tête de colonne, les vapeurs riches en méthanol passent dans un condenseur total **E**<sub>3</sub> à faisceau tubulaire. Le reflux est assuré à partir d'un pot de recette **R**<sub>3</sub> à pression atmosphérique dont le niveau est maintenu constant. Le débit de reflux est asservi à la température de tête de colonne. Le méthanol obtenu est alors recyclé vers le carburateur **B**.

**Le formaldéhyde et le méthanol sont des produits toxiques et inflammables.**

## C – TRAVAIL DEMANDÉ

### 1. Schéma

Sur le support joint (**annexe à rendre avec la copie, page 5/5**), réaliser le schéma détaillé de l'installation à partir de l'échangeur **E**<sub>1</sub> inclus (**E**<sub>1</sub>, **K**, **R**<sub>1</sub>, **D**<sub>1</sub>, **D**<sub>2</sub>, **E**<sub>2</sub>, **E**<sub>3</sub>, **E**<sub>4</sub>, **P**<sub>1</sub>, **P**<sub>2</sub>, **R**<sub>2</sub> et **R**<sub>3</sub>) en respectant les règles de sécurité et en assurant le bon fonctionnement de l'installation.

### 2. Question de cours

**2.1.** La colonne de rectification est une colonne à deux tronçons de garnissage.

**2.1.1.** Citer deux types de garnissage et expliquer l'intérêt du garnissage.

**2.1.2.** Expliquer pourquoi il y a deux tronçons de garnissage (et non un seul).

**2.2.** Les pompes utilisées dans cette fabrication sont des pompes centrifuges.

**2.2.1.** Indiquer quel est l'autre grand type de pompe. Expliquer leur fonctionnement en prenant comme exemple une pompe à piston.

**2.2.2.** À l'aide de schéma, expliquer le principe de fonctionnement de ce type de pompe.

### 3. Exercices

#### 3.1. Étude du réacteur

Les débits d'alimentation du réacteur sont de  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  d'air et  $560 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  de méthanol. On obtient alors  $9,60 \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$  de formaldéhyde, dont les deux tiers proviennent de la réaction (2), l'autre tiers provenant de la réaction (1).

**3.1.1.** Déterminer le débit molaire  $q_{O_2}$  de dioxygène consommé.

**3.1.2.** Calculer la puissance thermique (ou flux thermique horaire) dégagé par la réaction (2).

**3.1.3.** L'eau de refroidissement qui circule dans le serpentin arrive à la température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  et ressort à l'état de vapeur saturante sous pression atmosphérique. Le réacteur est adiabatique et fonctionne sous pression atmosphérique. Déterminer le débit massique d'eau de refroidissement.

#### Données

- capacité thermique massique de l'eau :  $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous pression atmosphérique (en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) :

$$L_{ve} = 2235 - 2,9 \times \theta, \text{ avec } \theta \text{ en } ^\circ\text{C}$$

#### 3.2. Transport du formaldéhyde brut

Le formaldéhyde brut est injecté (avec un débit de  $800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) entre les deux tronçons de garnissage de la colonne  $D_2$ , c'est-à-dire à une hauteur de  $6,0 \text{ m}$  entre le niveau du liquide dans le réservoir  $R_1$  et l'arrivée dans  $D_2$ . Entre la colonne  $D_2$  et le réservoir  $R_1$  (qui fonctionnent à la pression atmosphérique), la canalisation, dont le diamètre  $D$  est de  $25 \text{ mm}$ , correspond à une perte de charge de  $1,1 \text{ m}$  de liquide.

**3.2.1.** Calculer la vitesse de circulation du formaldéhyde brut.

**3.2.2.** Calculer la hauteur manométrique totale de la pompe centrifuge.

**3.2.3.** Le rendement de la pompe étant de  $25 \%$  à ce débit, calculer la puissance électrique à fournir au moteur de la pompe.

#### Données :

- relation de Bernoulli généralisée entre deux points A et B :

$$\frac{P_A}{\rho g} + z_A + \frac{u_A^2}{2g} + H_{MT} = \frac{P_B}{\rho g} + z_B + \frac{u_B^2}{2g} + J_{AB}$$

- masse volumique du formaldéhyde brut :  $\rho = 8,8 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

- accélération de la pesanteur :  $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

#### 3.3. Étude de la colonne de rectification

Le distillat obtenu après rectification a une composition massique de  $98 \%$  en méthanol et de  $2 \%$  en eau. Pour un taux de reflux égal à  $3$ , le débit de distillat est de  $60 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , sa température en sortie du condenseur étant de  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**3.3.1.** Calculer le débit massique des vapeurs entrant dans le condenseur.

**3.3.2.** Sachant que ces vapeurs entrent dans le condenseur à l'état de vapeur saturante à une température de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , calculer la puissance thermique (flux thermique horaire) reçue par l'eau de refroidissement dans le condenseur (supposé adiabatique).

#### Données

- capacité thermique massique de l'eau :  $c_e = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous pression atmosphérique (en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) :

$$L_{ve} = 2235 - 2,9 \times \theta, \text{ avec } \theta \text{ en } ^\circ\text{C}$$

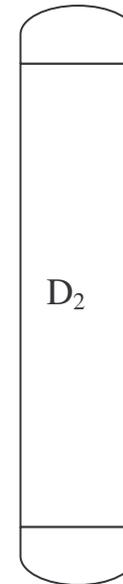
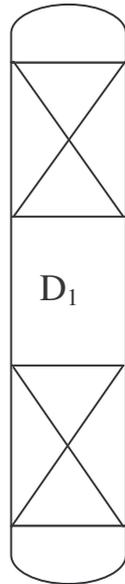
- capacité thermique massique du méthanol :  $c_m = 3,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- enthalpie massique de vaporisation du méthanol à  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  :  $L_{vm} = 1165 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE

E<sub>3</sub>

R<sub>3</sub>



K

R<sub>1</sub>

E<sub>4</sub>

E<sub>1</sub>

E<sub>2</sub>

R<sub>2</sub>