



1. L'alimentation en ricinoléate de méthyle est préchauffée à 50 °C dans un réchauffeur **E1** alimenté en vapeur d'eau (prévoir une régulation de cette température en fonction du débit de vapeur de chauffe). Le ricinoléate de méthyle est mélangé à de la vapeur d'eau saturante à une température de 195 °C et à une pression absolue de 14 bar avant d'être introduit dans un four à faisceau tubulaire **F1** (on ne représentera pas le système de chauffage du four).

La réaction dans **F1** est une pyrolyse qui a lieu à une température moyenne de 450 °C, pour un temps de séjour de quelques secondes et sous une pression absolue de 9 bar. Les produits attendus à l'issue de cette pyrolyse sont l'undécénoate de méthyle et l'heptanal, mais il se forme aussi des hydrocarbures gazeux. Ces effluents gazeux sont condensés puis en partie refroidis à l'intérieur des tubes de l'échangeur tubulaire **E2**. Cet échangeur est alimenté à l'extérieur des tubes par l'eau sortant de l'échangeur **E3**.

La suite de la condensation se produira dans l'échangeur de chaleur **E3** alimenté par de l'eau de refroidissement dont le débit sera régulé en fonction de la température de sortie des effluents de **E3**.

La chaleur cédée par la condensation des effluents dans les échangeurs **E2** et **E3** transforme une partie de l'eau de refroidissement en vapeur d'eau. Les effluents traverseront ensuite un condenseur à mélange à eau **E4**, alimenté au niveau de sa partie supérieure par de l'eau (pulvérisée par une rampe) dont le débit est asservi à la température de sortie des effluents de **E4**.

Les hydrocarbures gazeux sont ensuite séparés de la phase liquide dans un cyclone **S1** et stockés temporairement dans un gazomètre (à ne pas représenter); ils alimenteront les brûleurs du four. La phase liquide est envoyée (prévoir une régulation de niveau sur **S1**) dans un décanteur **S2** (régulation de niveau à prévoir) où seront séparées la phase organique et l'eau (eau : phase la plus dense ; cette eau avait été injectée à l'entrée du four sous forme de vapeur). Cette phase aqueuse sera amenée à l'aide d'une pompe **P** dans un échangeur de chaleur à serpentin **E5** où elle sera à nouveau transformée en vapeur d'eau, qui est renvoyée à l'entrée du four **F1**.

**E5** est alimenté en vapeur d'eau surchauffée.

2. Les produits organiques seront ensuite séparés dans différentes colonnes à distiller successives. Le ricinoléate de méthyle non transformé sera recyclé dans un atelier de transestérification (à ne pas représenter).

Les appareils **F1**, **E2**, **E3**, **E4**, **S1** et **S2** fonctionnent sous une pression absolue de 9 bar. Cette pression est réglée au niveau du décanteur **S2**.

## **C- TRAVAIL DEMANDÉ**

### **I- Schéma**

Sur le support joint (page 4/4, à rendre avec la copie), représenter la partie de l'installation comprenant les appareils **E1**, **F1**, **E2**, **E3**, **E4**, **E5**, **S1** et **S2** en tenant compte des indications données en **B-** et en assurant le bon fonctionnement de l'installation.

### **II- Questions de cours**

1. Définir les trois modes de transfert de chaleur. Préciser l'appareil du procédé qui les utilise simultanément.

2. Indiquer ce qu'est un fluide caloporteur. Donner ses caractéristiques principales. Citer deux exemples de fluides caloporteurs.

3. Définir le pouvoir calorifique inférieur d'un combustible. Indiquer comment on le distingue du pouvoir calorifique supérieur.

### III-Exercices

#### 1. Bilan thermique du four F1

La réaction de pyrolyse s'effectue dans le four à une température de 450 °C et sous une pression absolue de 9 bar.

**1.1.** Indiquer les différentes étapes suivies par les produits organiques de leur entrée dans le four à 50 °C jusqu'à leur sortie à 450 °C (états physiques et températures).

**1.2.** Déterminer la puissance thermique nécessaire pour amener ces produits de leur température d'entrée à la température de la réaction de pyrolyse.

**1.3.** La vapeur d'eau injectée dans le four sert à accélérer la vaporisation du mélange réactionnel et à diminuer sa pression partielle. Cette vapeur apporte à la réaction une quantité de chaleur  $\Phi_{\text{vapeur}} = 1,0 \times 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$ .

En déduire la puissance totale que doit fournir le four au mélange réactionnel.

**1.4.** Le four est alimenté en gaz naturel et son rendement thermique est de 80 %. En déduire le débit masse de gaz naturel nécessaire.

#### 2. Étude de l'échangeur E2

Les effluents du four, circulant à l'intérieur des tubes, sont refroidis de 450 °C à 350 °C; or, seuls 60 % de ces produits sont condensés.

La chaleur ainsi cédée à l'eau, provenant de l'échangeur **E3** à 145 °C, circulant dans la calandre permet à celle-ci de se transformer en vapeur d'eau à 145 °C.

**2.1.** Montrer que la chaleur cédée par les produits organiques contenus dans les effluents du four vaut  $\Phi_c = 8,4 \times 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$ .

**2.2.** Vérifier que l'écart de température moyen à l'intérieur de cet échangeur est égal à 255 °C (on effectuera une moyenne arithmétique).

**2.3.** Calculer la surface d'échange  $S$  nécessaire approximative (on supposera qu'il n'y a pas de pertes thermiques).

**2.4.** En déduire le nombre approximatif de tubes du faisceau (si la surface d'échange  $S$  n'a pas été trouvée en **2.3.**, prendre  $S = 30 \text{ m}^2$ ).

#### **Données**

- débit d'entrée des produits organiques constituant l'alimentation du four de pyrolyse :  
 $q_R = 1,0 \times 10^4 \text{ kg.h}^{-1}$
- température d'ébullition ( produits organiques ) :  
 $\theta_{\text{eb}} = 350 \text{ °C}$
- capacité thermique massique (produits organiques) que l'on considérera identique dans la phase liquide et dans la phase vapeur :  
 $c_R = 3,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- chaleur latente de vaporisation (produits organiques) :  
 $L_{\text{VR}} = 9,0 \times 10^2 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel :  
 $\text{PCI} = 5,0 \times 10^4 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- coefficient global d'échange dans l'échangeur E2 :  
 $K_{\text{GE}} = 1,1 \times 10^3 \text{ kJ.h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- diamètre intérieur des tubes :  
 $D = 20 \text{ mm}$
- longueur d'un tube :  
 $L = 1,5 \text{ m}$

**ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE**

