

PC* 2023/2024

*Bellevue***TD 7 : Procédés industriels continus****Exercice 1 :**

Le butanol est considéré comme une possible alternative aux combustibles fossiles. Il peut être produit à partir de composés issus de la biomasse par fermentation acéto-butylique. Cette fermentation utilise des bactéries du type *Clostridium acetobutylicum* ou *C.beijerinckii* en absence d'oxygène (fermentation anaérobie) et conduit à la formation d'acétone, de butanol et d'éthanol (**mélange ABE**).

Parmi les divers procédés actuellement testés, on se propose d'étudier une filière possible pour la récupération du mélange ABE. Le bouillon de culture sortant du fermenteur en continu subit une ultrafiltration : on obtient ainsi un « jus » qui contient de l'eau, de l'acétone, du butanol, de l'éthanol et d'autres constituants qui peuvent être négligés. La filière de récupération comporte une première étape d'extraction liquide-liquide à contre courant dans une colonne D1 qui fonctionne à 80°C. Le butanol contenu dans la phase aqueuse d'alimentation est extrait par un solvant : le mésitylène (1-3-5 triméthylbenzène). L'acétone et l'éthanol sont également extraits en partie, contrairement à l'eau, qui n'est pas du tout miscible avec le mésitylène. On récupère en sortie de la colonne d'extraction un extrait (phase organique) et un raffinat (phase aqueuse appauvrie) qui est recyclé après divers traitements dans le fermenteur. L'extrait est dirigé ensuite vers une première colonne de rectification en continu D2 afin de récupérer complètement le solvant qui est recyclé dans la colonne d'extraction.

Le distillat constitué du mélange ABE alimente, en partie, une deuxième colonne de rectification en continu D3 : on obtient en pied de colonne du butanol quasiment pur et en tête de colonne un distillat constitué d'un mélange d'acétone et d'éthanol. Ce distillat alimente la colonne D4 qui permet ainsi de séparer l'acétone et l'éthanol.

L'ensemble de l'installation correspond au schéma de l'annexe 1.

La colonne D3 est alimentée avec une partie du débit de distillat de la colonne D2 : le débit d'alimentation en mélange ABE est égal à $150 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ et la composition de ce mélange est de 22 % d'acétone, 61 % de butanol, 17 % d'éthanol (% en masse).

1. En utilisant les bilans de matières, calculer les débits de distillat et de résidu de la colonne D3. Meme question pour les débits de distillat et de résidu de la colonne D4.

Etude du mélange binaire acétone-éthanol

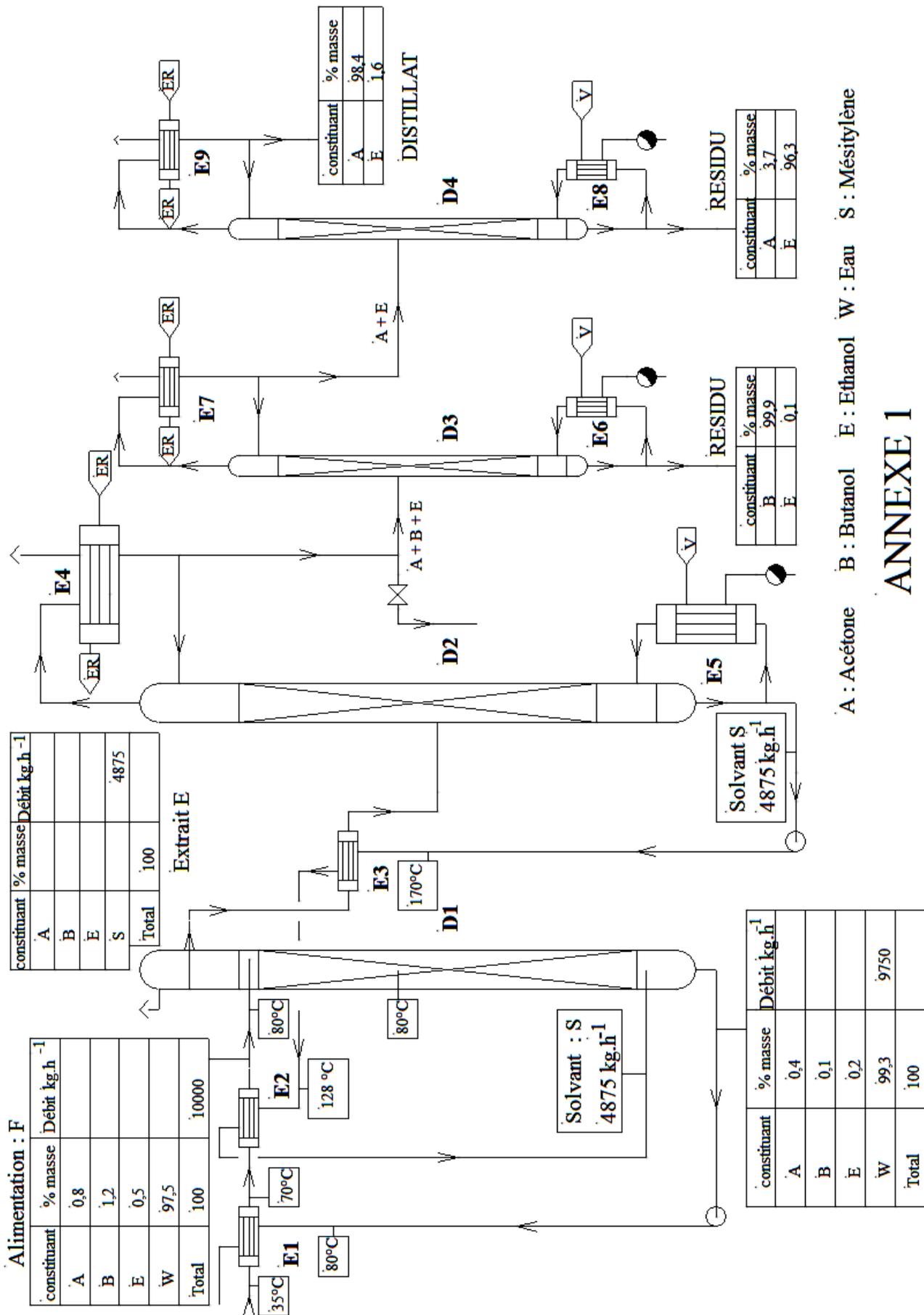
Le diagramme isobare est fourni en **annexe 3 (à rendre avec la copie)**

2. Calculer les titres molaires en acétone du distillat et du résidu.

Masses molaires en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$: éthanol : 46 – acétone : 58.

3. A l'aide du diagramme, trouver la température en tête de colonne et la température dans le bouilleur (on supposera que la pression est très proche de la pression atmosphérique).

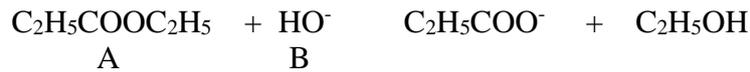
4. En prenant les valeurs précédentes des titres molaires en acétone, déterminer, en utilisant le diagramme isobare, le nombre de plateaux théoriques que devrait comporter la colonne D4 à reflux total.



A : Acétone B : Butanol E : Ethanol W : Eau S : Méthylène

ANNEXE 1

Exercice 2 : On envisage la saponification de l'acétate d'éthyle A selon la réaction d'équation bilan



La réaction a lieu en phase liquide .

L'alimentation d'un réacteur ouvert est constituée d'une solution aqueuse d'acétate d'éthyle (A) de concentration $C_{A0} = 0,3 \text{ molL}^{-1}$ et de débit $0,5 \text{ Ls}^{-1}$ et d'une solution de soude (B) de concentration $C_{B0} = 0,45 \text{ molL}^{-1}$ et de débit $1,0 \text{ Ls}^{-1}$ pour réaliser la réaction de saponification à 16°C .

La cinétique est d'ordre 1 par rapport à chacun des réactifs et la constante de vitesse est $k = 0,0574 \text{ Lmol}^{-1}\text{s}^{-1}$ à cette température .

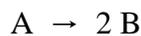
Calculer le volume et le temps de passage du RPAC (ou RAC) permettant d'atteindre une conversion en A de 80 % .

Exercice 3 :

Un réacteur tubulaire (de type piston) est alimenté avec un composé gazeux A pur ($F_{A0} = 1 \text{ kmolh}^{-1}$) .

La température du réacteur est fixée à 1219K et la pression à 1 atm .

A se décompose selon la réaction



On donne la constante de vitesse de cette réaction $k = 200 \text{ h}^{-1}$

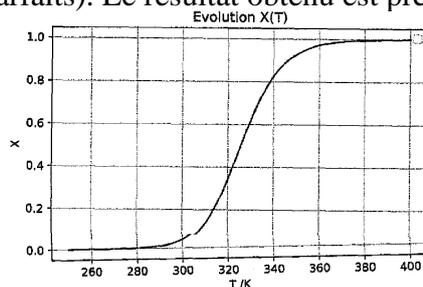
- 1) Calculer le volume du réacteur V_T pour obtenir un taux de conversion de A de 80 % .
- 2) Meme question en introduisant dans l'alimentation un gaz inerte (I) : $F_{A0} = F_I = 1 \text{ kmolh}^{-1}$

Exercice 4 :

On étudie la réaction $A \rightarrow B$ d'ordre 1 par rapport à A en milieu liquide, La réaction est mise en oeuvre dans un réacteur continu parfaitement agité de volume $V_0 = 10,0 \text{ m}^3$ alimenté par un débit volumique $Q_e = 1,0 \cdot 10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La concentration de l'espèce A en entrée de réacteur est C_{Ae} et la masse volumique du fluide est notée r . L'enthalpie standard de la réaction est notée $\Delta_r H^\circ$. Le débit volumique de sortie est égal au débit volumique d'entrée.

1. Indiquer comment varie le taux de conversion de A noté X en fonction de la température T . On précise que la constante de vitesse k_1 associée au processus $A \rightarrow B$ suit la loi d'ARRHENIUS avec $A_1 = 1,0 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ (facteur préexponentiel) et $E_{a1} = 99,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (énergie d'activation).

2. Proposer un programme en langage Python permettant d'effectuer le tracé de $X = f(T)$, On rappelle que $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ (constante des gaz parfaits). Le résultat obtenu est présenté à la figure suivante.



3. Réaliser le bilan thermique relatif à ce réacteur et proposer les trajectoires de température suivies dans le cas d'un fonctionnement en marche adiabatique. Tracer les trajectoires pour des températures d'alimentation

$TE = 290 \text{ K}$, 300 K et 310 K sur le graphe précédent et en déduire dans chaque cas les températures de sortie du réacteur.

4. La température d'entrée évolue de façon croissante. On appelle température d'allumage du réacteur (*ignition*) la température d'entrée permettant d'accrocher pour la première fois un point de fonctionnement sur la branche chaude de l'évolution $X = f(T)$. Déterminer graphiquement cette température dans le cas du réacteur en marche adiabatique .

5. On constate qu'une réaction parasite apparaît si $T > 340 \text{ K}$ et on souhaite éviter cette réaction. On alimente alors le réacteur à la température $TE = 310 \text{ K}$ et on refroidit le réacteur à l'aide d'un serpentin immergé dans le mélange. On désire obtenir un taux de conversion égal à 80% . Quelle est la température de sortie du mélange réactionnel ? Quelle puissance thermique (flux thermique) doit-on évacuer du réacteur?

6. On fonctionne de nouveau en marche adiabatique avec une température d'entrée $TE = 300 \text{ K}$. Un incident dans le circuit d'alimentation provoque un doublement soudain du débit volumique. Que se passe-t-il? Il sera utile d'utiliser les évolutions $X(T)$ fournies en données.

7. On fonctionne toujours en marche adiabatique. La réaction devient explosive au-dessus de 330 K . Par sécurité, on travaille en point froid (taux de conversion égal à 6% pour une température d'entrée égale à $TE = 303 \text{ K}$).

La canalisation d'entrée s'encrasse lentement et le débit volumique d'alimentation passe de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ à $0,50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Que se passe-t-il? Il sera utile d'utiliser les évolutions $X(T)$ fournies en données.

Données :

$\Delta_r H^\circ = -20,0 \text{ kJmol}^{-1}$; $C_{Ae} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ molm}^{-3}$; $\rho = 850 \text{ kg.m}^{-3}$;

capacité thermique massique du fluide étudié : $C_{p,m} = 2200 \text{ J.K}^{-1}\text{kg}^{-1}$

Courbes fournissant l'évolution du taux de conversion X en fonction de la température pour différents temps de passage :

