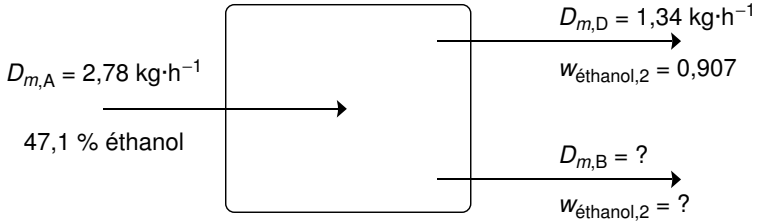
TD T5

PROCÉDÉS INDUSTRIELS CONTINUS

Tester les bases

Exercice *T5*.1 : bilan de matière sur une opération unitaire continue ★☆☆

La rectification est l'opération industrielle de distillation qui consiste à séparer plusieurs constituants d'un mélange liquide. L'opération est menée dans une colonne à distiller. Le schéma de procédé simplifié est présenté ci-dessous. Il indique l'introduction d'éthanol aqueux (47,1 % massique en éthanol) dans la colonne (débit massique $D_{m,\mathrm{A}}$, le débit massique $D_{m,\mathrm{D}}$ en distillat (en haut de colonne, fraction massique en éthanol de 0,907) et le débit massique $D_{m,\mathrm{B}}$ en fraction moins volatile (en bas de colonne).



1. Calculer la valeur numérique du débit massique $D_{m,\mathrm{B}}$.
2. Calculer la fraction massique $w_{\text{éthanol},1}$ en éthanol dans la fraction moins volatile (bas de colonne).

Exercice *T5*.2 : dimensionnement d'un RCPA ★☆☆

Soit un réacteur de type réacteur parfaitement agité continu siège d'une seule réaction chimique A $\longrightarrow$ B d'ordre 0 par rapport à B et d'ordre 2 par rapport à A. La constante de vitesse est égale à $k = 0,28\ \mathrm{L\cdot mol^{-1}\cdot min^{-1}}$ à la température de fonctionnement du réacteur. Le débit volumique en entrée et en sortie est égal à $D_V^{\mathrm{e}} = D_V^{\mathrm{s}} = D_V = 0,25\ \mathrm{L\cdot min^{-1}}$. Le débit molaire d'entrée du réactif A est $D_{\mathrm{A}}^{\mathrm{e}} = 0,50\ \mathrm{mol\cdot min^{-1}}$. Seuls les régimes permanents et les fonctionnements isothermes sont supposés.

Calculer le volume du réacteur pour permettre un taux de conversion de 75 % en sortie de réacteur.

S'entraîner

Exercice *T5*.3 : craquage thermique de l'éthane ★☆☆

À des températures voisines de 1 000 K, l'éthane en phase gazeuse se transforme en éthène et en dihydrogène selon :

$$\mathrm{CH_3CH_{3\,(g)} = H_2C{=}CH_{2\,(g)} + H_{2\,(g)}}$$

À l'entrée du réacteur, la température est de 20 °C et la pression de 1 bar. La réaction a lieu à 1 000 K et 75 % du réactif initial a réagi. Le débit volumique en entrée D_V^{e} vaut 1,0 L·s^{-1}. Le réacteur fonctionne en régime permanent et en régime isobare. Les gaz sont supposés se comporter comme des gaz parfaits.

1. Calculer le débit molaire et le débit massique de l'éthane en entrée.
2. En effectuant un tableau d'avancement en système ouvert, exprimer les débits molaires en sortie des différents participants. En déduire les différents débits massiques.
3. Calculer les pressions partielles des différents gaz dans le mélange de sortie.
4. Calculer le débit volumique total en sortie. Commenter le résultat obtenu.

Données : $M_{\text{éthane}} = 30\ \mathrm{g\cdot mol^{-1}}$

Exercice *T5*.4 : saponification dans un RCPA ★★☆

La réaction de saponification de l'acétate de butyle est réalisée à 20 °C dans un réacteur continu parfaitement agité. Le bilan de la réaction s'écrit :

$$\mathrm{CH_3COOC_4H_9 + HO^- = CH_3COO^- + C_4H_9{-}OH}$$

L'ester $\mathrm{CH_3COOC_4H_9}$ est noté A. Les ions hydroxydes sont notés B. La constante de vitesse à 20 °C vaut $k = 92,4\ \mathrm{L\cdot mol^{-1}\cdot s^{-1}}$. La réaction est d'ordre 1 par rapport à l'ester et d'ordre 1 par rapport aux ions hydroxyde. La réaction est menée dans un RCPA de volume $V_0 = 5,00$ L avec un débit global d'alimentation volumique en A et B égal à $D_V = 0,500\ \mathrm{L\cdot s^{-1}}$. Le mélange introduit en entrée correspond à un mélange équimolaire d'ester et d'ions hydroxyde, le débit molaire est égal à $D_{\mathrm{A}}^{\mathrm{e}} = D_{\mathrm{B}}^{\mathrm{e}} = 5,00\cdot10^{-2}\ \mathrm{mol\cdot s^{-1}}$. Le fonctionnement isotherme et le régime permanent sont supposés. Le débit volumique en entrée et le débit volumique en sortie de réacteur sont égaux.

1. Déterminer le taux de conversion $\alpha_{\mathrm{A}}^{\mathrm{s}}$ de l'ester en sortie de réacteur.

2. Déterminer le débit molaire en butanol C_4H_9-OH noté C en sortie de réacteur.

3. En maintenant le débit volumique à la valeur fixée déterminer le volume de réacteur nécessaire pour observer un taux de conversion de l'ester égal à 95 %.

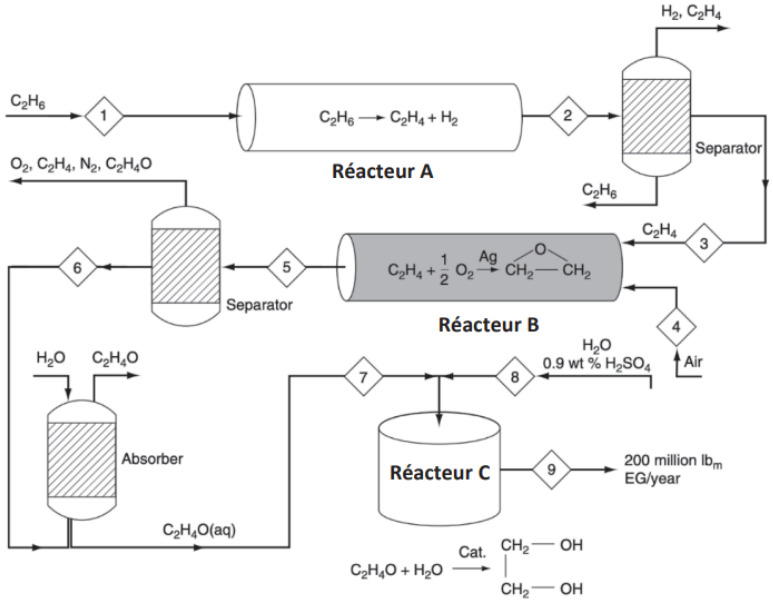
Approfondir

Exercice *T5*.5 : du laboratoire au réacteur industriel (Agrégation chimie) ★★☆

Si la première synthèse de l'éthylèneglycol est attribuée au chimiste français Charles-Adolphe WURTZ en 1856, il faut attendre la première guerre mondiale pour que l'industrie ne commence à l'utiliser.

Cet exercice aborde quelques aspects d'un procédé industriel moderne de synthèse d'éthylèneglycol.

Un schéma général de l'unité de production est représenté ci-après. Cette unité est conçue pour produire 300 tonnes d'éthylèneglycol par jour.



La transformation chimique mise en œuvre consiste à transformer l'oxyde d'éthylène en éthylèneglycol dans un réacteur alimenté par une solution d'acide sulfurique et par une solution aqueuse d'oxyde d'éthylène.

• *Modèle du réacteur parfaitement agité continu* (RCPA) *isotherme*

Le réacteur industriel C est ici modélisé par un réacteur parfaitement agité continu (RCPA). Ce réacteur modèle est considéré fonctionner en régime stationnaire et à température constante. Le mélange réactionnel est idéalement agité de sorte que la composition et la température du mélange réactionnel sont uniformes dans l'ensemble du réacteur. Le mélange prélevé en sortie du réacteur a la même composition que le mélange réactionnel au sein du réacteur.

Les notations suivantes sont adoptées :

- F_{ie} et F_{is} : flux molaire respectivement entrant et sortant du réacteur, relatif à l'espèce chimique d'indice i, exprimé en $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$;
- X : taux de conversion de l'oxyde d'éthylène ;
- v_r : vitesse volumique de la réaction ;
- τ : temps de passage défini comme le rapport $\tau = V/D_V$ où D_V représente le débit volumique de fluide traversant le réacteur, supposé constant entre l'entrée et la sortie et V le volume utile du réacteur.

Comme le montre le schéma de l'unité de production (figure??), le réacteur C est alimenté par deux solutions aqueuses entrant chacune au débit volumique $D_V/2$ (repères ń 7 ż et ń 8 ż). La solution aqueuse d'oxyde d'éthylène EO a pour concentration $C_0 = 16\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, alors que celle de la solution aqueuse d'acide sulfurique est $0,10\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

L'eau est considérée en large excès. Dans les conditions de réalisation de la transformation, la température dans le réacteur est maintenue constante (55 °C). La loi de vitesse s'écrit : $v_r = k_{app}\,[\text{EO}]$ avec $k_{app} = 5\cdot10^{-3}\ \text{s}^{-1}$.

1. Montrer que le taux de conversion X d'oxyde d'éthylène et le temps de passage sont reliés par la relation suivante :
$$X = 1 - \frac{1}{1+\tau k_{app}}$$
Proposer une analyse physique de cette relation en identifiant les paramètres d'influence et leur effet sur le taux de conversion.

2. Déterminer le débit volumique total D_V à régler pour produire 300 tonnes d'éthylène glycol par jour avec un taux de conversion de 80 %. En déduire le volume V du réacteur à utiliser.

• *Réalisation dans un* RCPA *calorifugé*

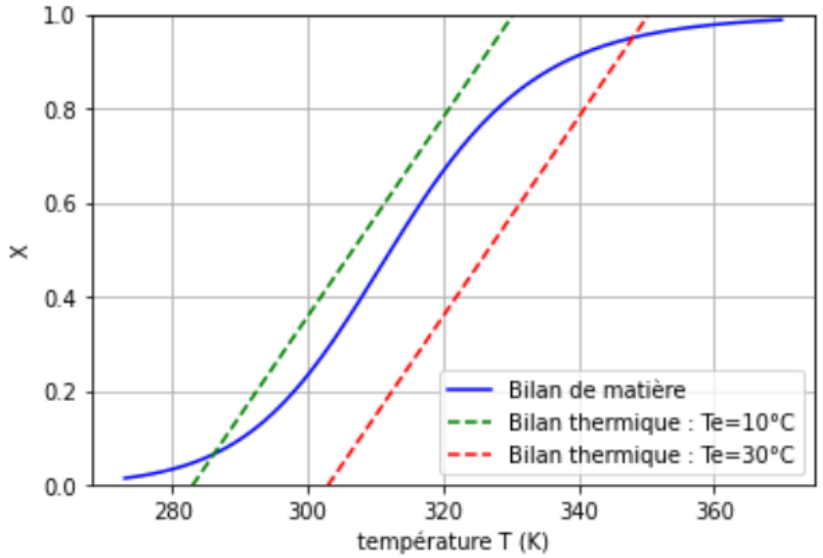
Le réacteur est désormais considéré comme parfaitement calorifugé. Le volume du réacteur est $V = 6,7\ \text{m}^{-3}$. Il est alimenté avec un débit volumique $D_V = 8,8\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ pour un flux molaire d'oxyde d'éthylène en entrée $F_{EO,e} = 70\ \text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$.

L'objectif de cette partie est de déterminer l'effet de la température du mélange à l'entrée du réacteur sur le taux de conversion en sortie. La capacité thermique du mélange réactionnel est assimilée à celle de l'eau contenue dans le réacteur. Elle est supposée suffisamment grande devant celle du réacteur pour négliger cette dernière.

3. Adapter l'expression établie à la question 28 pour qu'elle fournisse la valeur du taux de conversion X en fonction de la température T dans le réacteur.

4. Par analogie avec l'étude menée en réacteur fermé, montrer que la température dans le réacteur est reliée au taux de conversion par une expression de la forme $T = T_e + J\cdot X$ où T_e est la température du mélange à l'entrée du réacteur et J une constante à exprimer en fonction des données du problème. Calculer la valeur de J et préciser la signification physique de cette grandeur.

La recherche du point de fonctionnement du système, c'est-à-dire le couple taux de conversion - température du réacteur, nécessite une résolution numérique. Le graphique suivant superpose deux lois d'évolution du taux de conversion X en fonction de la température : l'une a été obtenue par un bilan de matière, l'autre par un bilan d'énergie. Deux températures d'entrée du mélange réactionnel sont envisagées ici : 10 °C et 30 °C.



5. Déterminer le point de fonctionnement (T, X) pour chaque température d'entrée. Commenter en interprétant l'effet de la température sur le taux de conversion final de l'oxyde d'éthylène.

Exercice *T5*.6 : hydrolyse de l'anhydride acétique (Python)

L'hydrolyse de l'anhydride acétique (réaction d'ordre 1 par rapport au réactif) est menée dans une cascade de quatre réacteurs continus parfaitement agités de même volume. La température augmente dans chaque réacteur (10 °C, 15 °C, 25 °C, 40 °C). La réaction présente une énergie d'activation de 46,3 kJ·mol^{-1} et un facteur pré-exponentiel valant $2,27\cdot10^7\ \text{min}^{-1}$. Le débit volumique est constant et vaut $0,1\ \text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

1. Montrer que le taux de conversion en anhydride acétique α peut se mettre sous la forme suivante :

$$\alpha = 1 - \left(\prod_{i=1}^{4}(1+k_i\tau)\right)^{-1}$$

où k_i est la constante de vitesse dans le $i^{\text{ème}}$ réacteur et τ le temps de passage dont on donnera l'expression.

2. Écrire une fonction Python permettant de calculer la constante de vitesse dans chaque réacteur.

3. À l'aide de la méthode de la dichotomie, déterminer le volume des réacteurs permettant d'obtenir un taux de conversion de 91 %.