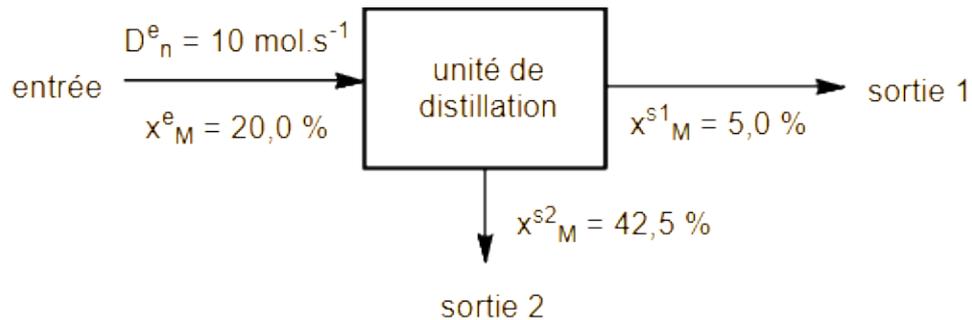


**TD n°17**  
**TC6 – PROCÉDÉS INDUSTRIELS CONTINUS**

**Exercice TC6-1 : Bilans de matière d'une opération unitaire (\*)**

Soit une opération unitaire mettant en jeu un mélange binaire de méthanol (M) et d'eau (E) (miscibles en toutes proportions) et fonctionnant en régime stationnaire et sans aucune réaction chimique. Le schéma de l'unité associée est représenté ci-dessous ( $D_n$  représente un débit molaire total et  $x_M$  la fraction molaire en méthanol).



1. Pourquoi est-il possible d'écrire la conservation du débit molaire total et du débit molaire relatif au méthanol ?
2. Écrire l'équation traduisant la conservation du débit molaire total.
3. Écrire l'équation traduisant la conservation du débit molaire relatif au méthanol.
4. En déduire la valeur du débit molaire total à la sortie 1 et à la sortie 2.
5. Compléter le tableau suivant :

	$x_i^e$	$D_{n,i}^e$	$x_i^{s1}$	$D_{n,i}^{s1}$	$x_i^{s2}$	$D_{n,i}^{s2}$
méthanol						
eau						

Résultats :

4.  $D_n^{s1} = 6,0 \text{ mol.s}^{-1}$  et  $D_n^{s2} = 4,0 \text{ mol.s}^{-1}$

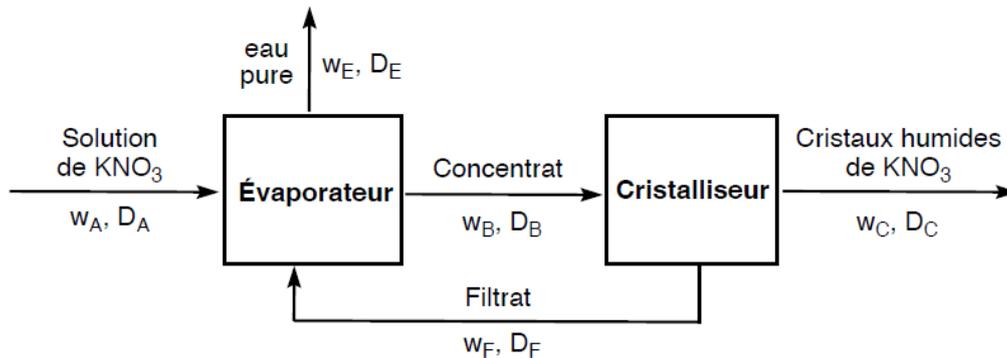
### Exercice TC6-2 : Suite d'opérations unitaires (\*)

On étudie un procédé industriel de préparation du nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$  dont le dispositif est décrit dans le document suivant issu de *Éléments de génie des procédés* par D. Toueix.

Tous les pourcentages sont des grandeurs massiques.

Un évaporateur est alimenté par  $600 \text{ kg.h}^{-1}$  d'une solution de nitrate de potassium à 20 % dans l'eau de façon à concentrer cette solution à 50 % de  $\text{KNO}_3$ . La solution, récupérée en sortie d'évaporateur, est introduite dans un cristalliseur où elle est refroidie à  $10^\circ\text{C}$ . Une filtration en sortie de cristalliseur permet de séparer le nitrate de potassium solide contenant 4 % d'eau et le filtrat qui est recyclé vers l'évaporateur. La solution de recyclage contient 17 % de nitrate de potassium.

Le schéma du procédé est reproduit ci-dessous.



$D_A, D_B, D_C, D_E$  et  $D_F$  représentent les débits massiques en  $\text{kg.h}^{-1}$ .

$w_A, w_B, w_C, w_E$  et  $w_F$  représentent les titres massiques en  $\text{KNO}_3$  dans chaque débit.

1. Après lecture du document, déterminer les valeurs de  $D_A, w_A, w_B, w_C, w_E$  et  $w_F$ .
2. Écrire, pour chaque opération unitaire, l'équation de conservation du débit massique total et l'équation de conservation du débit massique en  $\text{KNO}_3$ .
3. En déduire  $D_B, D_C, D_E$  et  $D_F$ .

Résultats :

$$3. D_B = 299 \text{ kg.h}^{-1} ; D_C = 125 \text{ kg.h}^{-1} ; D_E = 475 \text{ kg.h}^{-1} ; D_F = 174 \text{ kg.h}^{-1}$$

### Exercice TC6-3 : Tableau d'avancement – Calculs de débits molaires (\*)

La combustion du méthane est menée dans un réacteur ouvert fonctionnant en régime stationnaire. Ce réacteur est alimenté en continu par  $15 \text{ mol.h}^{-1}$  de méthane,  $35 \text{ mol.h}^{-1}$  de dioxygène pur et  $5 \text{ mol.h}^{-1}$  de vapeur d'eau.

1. Écrire l'équation bilan de la réaction d'oxydation complète du méthane.
2. Quel est le réactif limitant dans ces conditions ?
3. Pour un taux de conversion de 80 % de ce réactif limitant, calculer les débits molaires sortants du réacteur.

Résultats :

$$3. D_{\text{CH}_4}^s = 3 \text{ mol.h}^{-1} ; D_{\text{O}_2}^s = 11 \text{ mol.h}^{-1} ; D_{\text{CO}_2}^s = 12 \text{ mol.h}^{-1} ; D_{\text{H}_2\text{O}}^s = 29 \text{ mol.h}^{-1}$$

### Exercice TC6-4 : Comparaison du RCPA et du RP pour une réactions d'ordre 2 (\*\*)

On étudie la réaction de  $SN_2$  entre l'iodure d'éthyle  $C_2H_5I$  et les ions hydroxyde  $HO^-$  dans l'eau. À la température de l'expérience, la constante de vitesse  $k$  de la réaction vaut  $2,21 \cdot 10^{-2} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La réaction est menée en régime stationnaire dans un RCPA de volume  $V$  égal à  $0,75 \text{ m}^3$  alimenté avec un débit volumique  $D_v$  de  $5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  par une solution contenant les deux réactifs à la concentration de  $1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  chacun.

1. Calculer le temps de passage dans le réacteur.

On considère un réacteur continu parfaitement agité en régime stationnaire.

2. Réaliser un bilan de matière sur l'un des réactifs (noté A) afin d'établir une relation entre  $[A]^s$ ,  $[A]^e$ ,  $k$ ,  $V$  et  $D_v$ .

3. Déterminer numériquement la concentration des produits à la sortie du réacteur  $[A]^s$  et en déduire le taux de conversion.

On considère un réacteur piston de même volume  $V$  alimenté de la même manière que le réacteur précédent en régime stationnaire.

4. Réaliser un bilan de matière sur l'un des réactifs (noté A) afin d'établir une relation entre  $[A]^s$ ,  $[A]^e$ ,  $k$ ,  $V$  et  $D_v$ .

5. Déterminer numériquement la concentration des produits à la sortie du réacteur  $[A]^s$  et en déduire le taux de conversion.

6. Comparer les deux réacteurs.

*Résultats :*

1.  $150 \text{ s}$

3.  $[A]^s = 0,42 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

5.  $[A]^s = 0,23 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

### Exercice TC6-5 : Comparaison des volumes des réacteurs (\*\*)

On étudie l'association en série de  $n$  RCPA isothermes de volumes  $V$  identiques valant 50 L chacun. Le premier est alimenté par un flux liquide de débit volumique  $D_v = 10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  contenant un réactif R à la concentration  $[R]^e$ . La concentration en réactif en sortie du dernier réacteur est notée  $[R]^s$ .

On suppose que le réactif R est converti en produits avec une cinétique d'ordre 1 par rapport à R avec une constante de vitesse  $k = 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

Il a été établi :

$$\tau = \frac{V}{D_v} = \frac{1}{k} \times \left( \frac{1}{(1-\alpha)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right) \text{ pour } n \text{ RCPA en série ;}$$

$$\tau = \frac{V}{D_v} = -\frac{1}{k} \ln(1-\alpha) \text{ pour le réacteur piston.}$$

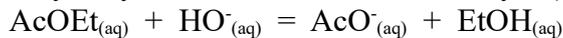
1. Quelle doit être le nombre de RCPA à mettre en série pour obtenir un taux de conversion d'au moins 80 % ?
2. Quel serait le volume  $V_1$  d'un RCPA unique réalisant le même taux de conversion ? Commenter.
3. Quel serait le volume  $V_2$  d'un réacteur piston unique réalisant le même taux de conversion ? Commenter.
4. Montrer que quand  $n$  tend vers  $+\infty$ , la somme des volumes de tous les RCPA ( $V_{\text{tot}} = n \times V$ ) tend vers  $-\frac{D_v}{k} \ln(1-\alpha)$  utilisant le fait que  $a^b = \exp(b \cdot \ln(a))$  et en faisant un développement limité. Commenter.

Résultats :

1. 7
2.  $V_1 = 755 \text{ L}$
3.  $V_2 = 304 \text{ L}$

### Exercice TC6-6 : Hydrolyse alcaline de l'acétate d'éthyle (\*\*)

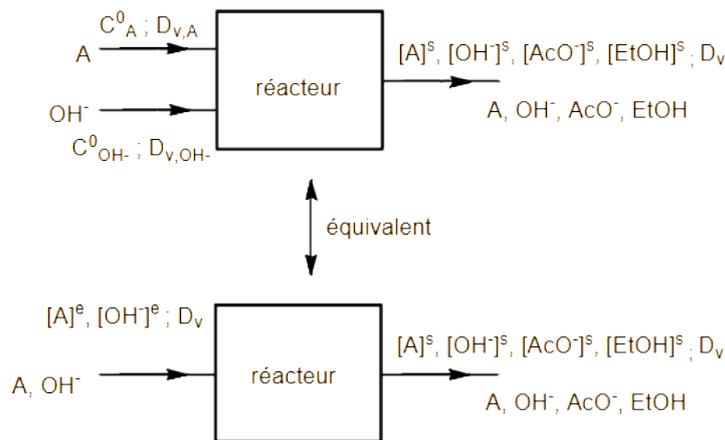
L'hydrolyse alcaline de l'acétate d'éthyle (noté A) est menée dans un réacteur isotherme continu :



Toutes les espèces sont en solution dans l'eau.

La réaction est d'ordre 1 par rapport à chaque réactif et la constante de vitesse vaut  $k = 7,0 \cdot 10^{-2} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Les réactifs sont introduits à des concentrations  $C^0_{\text{A}} = 0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  et  $C^0_{\text{OH}^-} = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  et avec des débits  $D_{\text{v,A}} = 1,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  et  $D_{\text{v,OH}^-} = 9,0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ .



1. Calculer  $D_{\text{v}}$ .
2. Calculer les concentrations entrantes équivalentes en A et HO<sup>-</sup> notées  $[\text{A}]^{\text{e}}$  et  $[\text{OH}^-]^{\text{e}}$ .
3. En déduire une simplification de la loi de vitesse.
4. Déterminer le volume  $V_1$  d'un RCPA pour que le taux de conversion soit de 95 % en réactif limitant.
5. Même question pour un réacteur piston de volume  $V_2$ .

Résultats :

2.  $[\text{A}]^{\text{e}} = 0,020 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  ;  $[\text{OH}^-]^{\text{e}} = 0,90 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

4.  $V_1 = 3015 \text{ L}$

3.  $V_2 = 476 \text{ L}$

**Exercice TC6-7 : RPAC avec ou sans refroidissement (\*\*\*)**

On étudie la décomposition thermique du peroxyde de ditertiobutyle (tBu-O-O-tBu) dans un réacteur de volume  $V = 0,50 \text{ L}$  alimenté en réactif liquide pur avec un débit volumique constant  $D_v = 3 \text{ L.h}^{-1}$  à  $T^e = 200 \text{ °C}$ .

La réaction est la suivante :  $\text{tBu-O-O-tBu} = 2 \text{ tBu-O}$  et peut-être notée  $A = 2 B$ .  
 L'enthalpie standard de réaction vaut  $\Delta_r H^\circ = -150 \text{ kJ.mol}^{-1}$ .

Le réacteur est refroidi par une double enveloppe maintenue à  $T_0 = 40 \text{ °C}$ . Le coefficient de transfert conducto-convectif vaut  $h = 60 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . La surface d'échange entre le réacteur et la double enveloppe vaut  $S = 500 \text{ cm}^2$ .

Dans ces conditions le taux d'avancement est quasiment égal à 1.

Caractéristiques du peroxyde de ditertiobutyle :

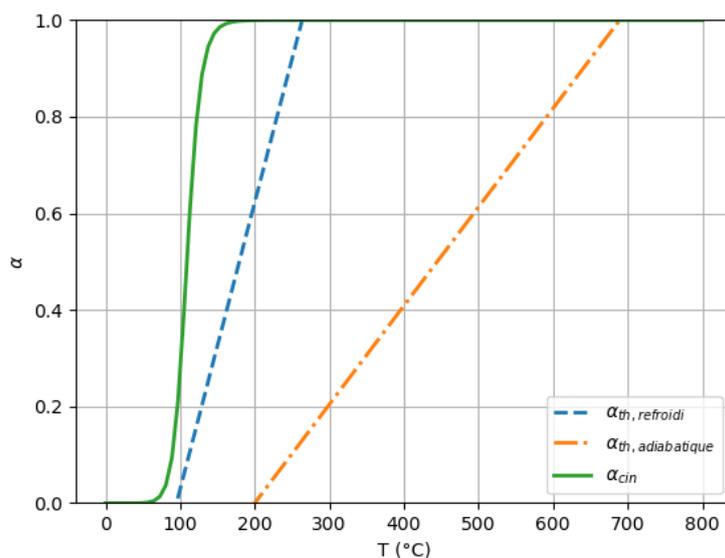
masse molaire :  $M = 146 \text{ g.mol}^{-1}$

masse volumique :  $\rho = 900 \text{ g.L}^{-1}$

capacité thermique massique :  $c = 2,1 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$

Dans ces conditions le taux d'avancement est quasiment égal à 1.

1. À l'aide d'un bilan énergétique, exprimer puis calculer la température en sortie du réacteur en fonction des paramètres du système. La retrouver graphiquement sur la figure ci-dessous.
2. Calculer le pourcentage de la puissance dégagée par la réaction qui est évacuée par le système de refroidissement.
3. Exprimer puis calculer la température en sortie du réacteur en l'absence de ce système de refroidissement. La retrouver graphiquement sur la figure ci-dessous. Commenter.



Résultats :

1.  $T^s = (c.\rho.D_v.T^e + h.S.T_0 - \Delta_r H^\circ.D_v.\rho/M) / (c.\rho.D_v + h.S)$  ;  $T^s = 264 \text{ °C}$

2. 87 %

3.  $T^s = T^e - (\Delta_r H^\circ.D_v.\rho/M) / (c.\rho.D_v)$  ;  $T^s = 689 \text{ °C}$