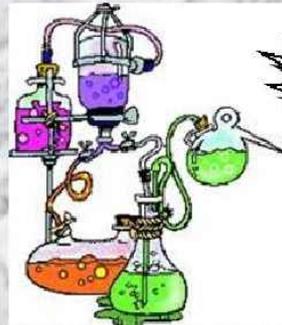


Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne

Réacteurs Chimiques Hétérogènes

*Raffinage et Pétrochimie
Master II*

Sujets



Travaux Dirigés

- Classification et caractéristiques des réacteurs.
- Evolution d'un système chimique fermé.
 - Réacteurs idéaux.
 - Réacteurs hétérogènes.
- Circulation d'un mélange réactionnel dans un réacteur réel.
 - Réacteurs fluide/ solide.
 - Réacteurs catalytiques gaz/ solide.

www.minette88.jimdo.com
www.facebook.com/gpusthb

Travaux
Dirigés



1^{ère} Série d'exercices de Calcul de Réacteurs

Exercice1

La décomposition en phase gazeuse de l'éther dimétylique peut-être sous la forme suivante:



Les résultats suivants ont été obtenus dans un réacteur fermé isotherme ($T=552^\circ\text{C}$) à volume constant:

t (s)	0	57	85	114	145	182	219	261	299
P_T (mmHg)	420	584	662	743	815	891	954	1013	1054

Déterminer l'ordre de la réaction et la constante de vitesse.

Exercice2

On introduit 10^{-2} moles de B dans un litre d'eau. Sachant que l'ordre de la réaction est 2 ,et qu'au bout de 2heures les $\frac{3}{4}$ de B ont réagi.

a-Calculer la constante de vitesse et $t_{1/2}$.

b-La vitesse de réaction est multipliée par 4 quand on passe de 27°C à 127°C ,
 déterminer l'énergie d'activation (réacteur isochore).La réaction est:



Exercice3

Soit la réaction en phase gazeuse: $\text{A}_{\text{pur}} \rightarrow \text{B} + \text{C}$

Calculer le temps nécessaire pour obtenir 50% de conversion dans un réacteur fermé isotherme et isobare si la réaction est de d'ordre2 .

La concentration initiale est $C_{A0} = 0,3$ moles/l ; $k = 2,5$ l/mole.mn.

EXercice 4

La décomposition de A est étudiée dans un réacteur fermé. Les résultats suivants sont obtenus pour la réaction suivante:



C_A (mole/l)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,3	2
r (mole/l.min)	0,10	0,30	0,50	0,60	0,50	0,25	0,10	0,06	0,05	0,045	0,042

Combien de temps faudra-t-il pour que C_A passe de 1,3 à 0,3 moles/l ?

Exercice 5

Une installation d'oxydation d'acide chlorhydrique par la réaction de DEACOM ($4 \text{ HCl} + \text{O}_2 = 2 \text{ H}_2\text{O} + 2 \text{ Cl}_2$) est alimentée par un débit gazeux de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (TPN) contenant de l'air (21% O_2) et 10% d'acide. A la sortie du réacteur on mesure un débit de chlore de 50 mole/h . Quels sont à ce moment les débits molaires de chaque constituant du mélange, l'avancement de la réaction et la conversion du réactif limitant ?

Exercice 6

Un réacteur est alimentée par un gaz contenant 60% d'azote et 40% de phosphine (PH_3) avec un débit volumique de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ (TPN). Dans le réacteur, PH_3 se décompose, à 650°C et sous 5 atm, en phosphore gazeux et hydrogène. Calculer le débit volumique de sortie, les fractions molaires des espèces à la sortie du réacteur si $X_{\text{PH}_3} = 0,70$

Exercice 7

La réaction $\text{A} + \text{B} \longrightarrow \text{C}$ en phase gazeuse est effectuée dans un réacteur fermé parfaitement agité sous une pression de 10 bars et à une température constante de 300°K . A l'instant initial le réacteur contient a moles de A et $2a$ moles de B occupant un volume V_0 .

L'étude cinétique de cette réaction a montré qu'elle était du premier ordre par rapport à A et du premier par rapport à B (ordre global égal à 2). La constante de vitesse sera notée k .

- 1) Exprimer à l'instant t le nombre de moles des différents constituants en fonction de l'avancement généralisé X , du taux de conversion de A X_A , et du taux de conversion de B X_B . Quelle relation existe-t-il entre X_A et X , entre X_B et X ?
- 2) Existe-t-il un constituant limitant ? Si oui lequel ? Quelle est la valeur de l'avancement limite X_L ?
- 3) Calculer le temps nécessaire pour obtenir un avancement final X_f . Dans quel intervalle la valeur de X_f peut-elle être comprise ?
- 4) Application numérique : calculer le temps nécessaire pour convertir le réactif A à 90%.

Donnés : $a = 100$ moles, $k = 0,097$ litre/mole.minutes

1^{ère} Série d'exercices de Calcul de Reacteurs

Exercice N° 1



$$\begin{array}{l} \text{à } t=0 \quad P_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ \text{à } t_q \quad P_0 - P_x \quad P_x \quad P_x \quad P_x \end{array}$$

On suppose que la réaction est d'ordre "1" donc la vitesse de la réaction s'écrit comme suit:

$$r = -\frac{dc}{dt} \quad / \quad c = \frac{P}{RT}$$

$$\text{donc: } -\frac{d(P_0 - P_x)}{dt} = k(P_0 - P_x)$$

$$\Leftrightarrow \frac{dP_x}{dt} = k(P_0 - P_x)$$

$$\Leftrightarrow \int_0^{P_x} \frac{dP_x}{(P_0 - P_x)} = k \int_0^t dt$$

$$\Leftrightarrow -\ln(P_0 - P_x) \Big|_0^{P_x} = kt$$

$$\Leftrightarrow \ln\left(\frac{P_0}{P_0 - P_x}\right) = kt \quad \dots (1)$$

$$\bar{\alpha} \quad t=0 : P_t = P_0 = 420 \text{ mm Hg}$$

$$\bar{\alpha} \quad t_q : P_t = \sum P_i = P_0 + 2P_x$$

$$\Rightarrow P_{\infty} = (P_t - P_0) / 2$$

$$(1) \text{ devient: } \ln\left(\frac{2P_0}{3P_0 - P_t}\right) = kt$$

$\ln\left(\frac{2P_0}{3P_0 - P_t}\right)$	0	0,217	0,339	0,485	0,635	0,825
---	---	-------	-------	-------	-------	-------

			1,004	1,224	1,406	
--	--	--	-------	-------	-------	--

t (s)	0	57	85	114	145	182
-------	---	----	----	-----	-----	-----

			219	261	299	
--	--	--	-----	-----	-----	--

on trace $\ln\left(\frac{2P_0}{3P_0 - P_t}\right) = f(t)$, la droite obtenue et qui passe par l'origine a pour pente $t_{90} = k$.

$$(k = 0,004 \text{ s}^{-1})$$

Exercice N° 2



$$a \quad b \quad 0 \quad t=0$$

$$a-x \quad b-x \quad x \quad t=2 \text{ heures}$$

a) k et $t_{1/2}$:

réaction d'ordre "2" alors.

$$r = -\frac{d[B]}{dt} = k[A][B]$$

$$\Leftrightarrow \frac{dx}{dt} = k(a-x)(b-x)$$

on pose: $a=b$ alors.

$$\int_0^x \frac{dx}{a^2 - x^2} = k \int_0^t dt$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{(a-x)} - \frac{1}{(a+x)} = kt \Leftrightarrow k = \frac{x}{a \cdot t(a-x)}$$

$$\text{A.N.: } k = \frac{3/4}{2(1/4)(1/4)} \Rightarrow k = 30 \text{ l/mol.h}$$

$t_{1/2}$? lorsque $a-x = b/2$

$$t_{1/2} = \frac{1}{ka} \Rightarrow (t_{1/2} = 0,5 \text{ h}) = 30 \text{ mn}$$

b) l'énergie d'activation " E_a "

$$\text{on a: } k = A e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

$$\Leftrightarrow \ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT}$$

$$\begin{cases} \ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1} \dots (1) \\ \ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2} \dots (2) \end{cases}$$

$$(1) - (2) \Rightarrow \ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

$$\Rightarrow E_a = R \ln\left(\frac{k_1/k_2}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}\right)$$

$$\text{A.N.: } E_a = 8,314 \ln\left(\frac{1/4}{\left(\frac{1}{273+127} - \frac{1}{273+27}\right)}\right)$$

$$(E_a = 13,83 \text{ kJ})$$

Exercice N°3

$t = ?$ pour $x = 50\%$



$$t=0 \quad C_{A_0} \quad 0 \quad 0$$

$$t=? \quad C_{A_0} - C_0 x \quad C_0 x \quad C_0 x$$

reaction d'ordre "2" $\int^1 C_{A_0} = C_0$

$$r = \frac{-d(C_{A_0} - C_0 x)}{dt} = \frac{k_2}{2} (C_{A_0} - C_0 x)^2$$

$$\Leftrightarrow C_0 \frac{dx}{dt} = k_2 (C_{A_0} - C_0 x)^2$$

$$\Leftrightarrow C_0 \int_0^x \frac{dx}{(C_{A_0} - C_0 x)^2} = k_2 \int_0^t dt$$

$$\Leftrightarrow \frac{\Delta_0}{(C_{A_0} - C_0 x)} \Big|_0^x = k_2 t = \frac{1}{C_0(1-x)} - \frac{1}{C_{A_0}}$$

$$\Leftrightarrow t = \frac{1}{k_2 C_{A_0}} \left(\frac{x}{1-x} \right)$$

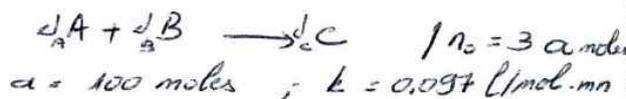
$\frac{A.N.}{s}$

$$t = \frac{1}{2,5 \times 0,3} \left(\frac{0,5}{1-0,5} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{t = 1,33 \text{ mn} = 80 \text{ s}}$$

Exercice N°4

Exercice N° 7



Constituants	$f(x)$	$f(x_A)$	$f(x_B)$
n_A	$n_i = n_{i0} + d_i \cdot n_0 x$ $n_A = n_{A0} + n_0 x$ $n_A = a - 3ax$ $n_A = a(1-3x)$	$n_i = n_{i0}(1-x_i)$ $n_A = n_{A0}(1-x_A)$ $n_A = a(1-x_A)$	$n_i = n_{i0} - \frac{n_0 x_i}{3}$ $n_A = n_{A0} - \frac{n_0 x_A}{3}$ $n_A = a - 2ax_B$ $n_A = a(1-2x_B)$
n_B	$n_B = n_{B0} - n_0 x$ $n_B = 2a - 3ax$ $n_B = a(2-3x)$	$n_B = n_{B0}(1-x_B)$ $n_B = 2a(1-x_B)$	$n_B = n_{B0} - \frac{n_0 x_B}{3}$ $n_B = 2a - \frac{a x_B}{3}$ $n_B = a(2-x_B)$
n_C	$n_C = n_{C0} + n_0 x$ $n_C = 3ax$	$n_C = n_{A0} x_A$ $n_C = a x_A$	$n_C = n_{B0} x_B$ $n_C = 2a x_B$

1) Relation entre x et x_A et x_B

$n_A = a(1-3x) = a(1-x_A) \Rightarrow x = \frac{1}{3} x_A$

$n_B = a(2-3x) = a(1-2x_B) \Rightarrow x = \frac{2}{3} x_B$

2) Oui, il existe un constituant limite c'est le A $\Rightarrow n_A = 0 \Rightarrow x_L = \frac{1}{3}$ le plus petit.

3) $t = ? \rightarrow x_f$

$$t_s = C_0 \int_{x=0}^{x_f} \frac{dx}{\beta(1+\alpha x) r(x, T, P)} \dots "40"$$

$\beta = \frac{P_0 T}{P} = 1$ (\bar{a} P, T = cst)

$\alpha = \frac{\Delta H}{1 + \frac{RT_0}{n_0}} = \frac{2k - 2A - 2B}{n_0} = -1$

$r = k C_A C_B = k(C_{A0} - C_0 x)(C_{B0} - C_0 x)$

$C_{A0} = \frac{n_A}{V_A} = \frac{a(1-3x)}{V_0(1-x)}$

$C_{B0} = \frac{a(2-3x)}{V_0(1-x)}$

donc: $r = \frac{k a^2 (1-3x)(2-3x)}{V_0^2 (1-x)^2}$

$\Rightarrow t = C_0 \int_0^{x_f} \frac{V_0^2 (1-x)^2}{(1-x) k a^2 (1-3x)(2-3x)} dx$

$t_s = \frac{3V_0}{ka} \int_0^{x_f} \frac{(1-x) dx}{(1-3x)(2-3x)}$

$\frac{(1-x)}{(1-3x)(2-3x)} = \frac{A}{(1-3x)} + \frac{B}{(2-3x)}$

$= \frac{2A - 3Ax + B - 3Bx}{(1-3x)(2-3x)}$

$\Rightarrow \begin{cases} 2A + B = 1 \\ -3(A+B) = -1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B = 1 - 2A \\ A = \frac{1}{3} - B \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \frac{2}{3} \\ B = -\frac{1}{3} \end{cases}$

$t_s = \frac{V_0}{ka} \left[\int_0^{x_f} \frac{2 dx}{(1-3x)} - \int_0^{x_f} \frac{dx}{(2-3x)} \right]$
 $= \frac{V_0}{ka} \left[-\frac{2}{3} \ln(1-3x) + \frac{1}{3} \ln(2-3x) \right]_{x=0}^{x_f}$
 $= \frac{V_0}{3ka} \left[\ln\left(\frac{2-3x_f}{2}\right) - 2 \ln(1-3x_f) \right]$

$t_s = \frac{V_0}{3ka} \ln \left[\frac{(2-3x_f)}{2(1-3x_f)^2} \right]$

l'intervalle: $0 < x_f < x_L = \frac{1}{3}$

4) A.N. =

$V_0 = \frac{n_0 R T_0}{P_0} = \frac{3a R T_0}{P_0} = \frac{3 \times 100 \times 9,032 \times 300}{10}$

$V_0 = 738 \text{ l}$

$x_A = 0,9$ donc: $x_f = \frac{0,9}{3} = 0,3$

$t_s = \frac{738}{3 \times 0,097 \times 100} \ln \left[\frac{2-3 \times 0,3}{2(1-3 \times 0,3)^2} \right]$

$= 25,361 \ln 55 \Rightarrow t_s = 105,623 \text{ mn}$

$t_s = 1,694 \text{ h}$

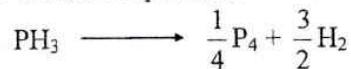
USTHB

FACULTE DE GENIE MECANIQUE ET GENIE DES PROCÉDES
DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE ET CRYOGENIE

2^{ème} série d'exercices de Calcul de réacteurs

Exercice 1

La décomposition en phase gazeuse homogène de l'hydrogène phosphoré a lieu à 650°C suivant l'équation :



Avec un mécanisme du premier ordre de constante $k = 10 \text{ (heure)}^{-1}$. Un réacteur tubulaire fonctionne à 650°C sous 4.6 atmosphères et transforme l'hydrogène phosphoré à 80%. Le débit d'alimentation est constitué :

- par 1820 moles/heure de PH_3 pur
- par un mélange équimoléculaire d'azote et d'hydrogène phosphoré tel que le flux de PH_3 à l'entrée soit également 1820 moles/heure.

Calculer dans les deux cas :

- le volume du réacteur
- le temps de passage
- le temps de séjour

Exercice 2

Une réaction homogène en phase gazeuse $\text{A} \longrightarrow 3\text{R}$ suit une loi du second ordre. Pour un débit d'alimentation de $1 \text{ m}^3/\text{heure}$ de A pur sous 5atm à 350°C, un réacteur expérimental constitué par un tuyau de 2.5 cm de diamètre et 2m de long donne une conversion de 60%. Une installation industrielle doit traiter $30 \text{ m}^3/\text{heure}$ d'un réactif contenant 50% de A et 50% d'inertes sous 25atm à 350°C, et fournir une conversion de 80%

- Combien faut-il de longueur de tuyau de 2.5cm de diamètre et 2m de long pour constituer le réacteur ?
- Faut-il les placer en parallèle ou en série ?

On fait l'hypothèse de l'écoulement piston, on néglige la perte de charge et on suppose les gaz parfaits.

Exercice 3

Un réactif gazeux se détruit suivant l'équation stochiométrique $2\text{A} \longrightarrow \text{R}$ dans un RCPA de volume $V_r = 0,1$ litre à pression et température constantes. Le tableau suivant donne les variations de la concentration de A en fonction du débit d'alimentation Q_0 .

Q_0 (l/h)	30,0	9,0	3,6	1,5
C_{AS} (millimoles)	85,7	66,7	50,0	33,3

Déterminer l'équation de vitesse de la réaction. On donne $C_{A0} = 100$ millimoles/l

exercice 4

On désire réaliser la réaction isotherme en phase liquide $A + B \longrightarrow C + D$ dont on ne connaît pas la cinétique. On décide de faire au laboratoire une expérience préalable dans un RCPA dont le volume est égal à 10 litres. On alimente ce réacteur avec un mélange équimolaire de A et de B (3 mole/l de A et 3 mole/l de B). l'expérience consiste à faire varier le débit volumique et à mesurer la concentration de A à la sortie du réacteur. Les résultats sont les suivants :

Q_0 [l/h]	1,2	2,8	10	24,5	56,5	158
C_{AS} [mole/l]	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5

La vitesse initiale de la réaction est égale à 20 mole/l.h.

- 1) Etablir le tableau donnant la vitesse de réaction r en fonction de l'avancement.
- 2) Au stade pilote, on désire traiter dans un réacteur tubulaire assimilé à un réacteur piston, la même alimentation avec un débit volumique $Q_0 = 2$ m³/h. Calculer le temps de passage pour obtenir $C_{AS} = 0,30$ mole/l. En déduire le volume du réacteur.

Pour réaliser le réacteur tubulaire, on dispose d'un tube de 50 cm de diamètre intérieur. Sachant que le mélange réactionnel a une masse volumique de 1000 Kg/m³ et une viscosité de 10⁻³ Pa.s. Calculer le nombre de Reynolds. L'hypothèse assimilant le réacteur piston est-elle vérifiée ? Si oui, pourquoi ? Si non, comment devrait varier le diamètre du tube ?

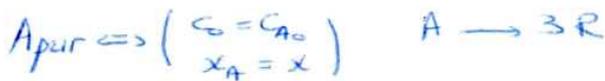
Exercice 5

Une réaction du 1^{er} ordre en phase gazeuse $A \longrightarrow B$ est traitée dans un RCPA à température et pression constantes. On désire produire 100 mole/h de R à un prix minimum à partir d'une alimentation de A pur.

Calculer le débit d'alimentation qu'on doit utiliser et le prix unitaire de R.

$C_{A0} = 0,1$ mole/l ; $k = 0,2$ h⁻¹ ; prix de A = 0,50 DA/ mole de A ; prix du réacteur = 0,01 DA/l.h.

Exo N° 2



al

$$r = -\frac{dC_A}{dt} = k C_A^2$$

$$\Leftrightarrow -\frac{dC_A}{dA} = k dt \Rightarrow \frac{1}{C_A} \Big|_{C_{A0}}^{C_A} = kt$$

$$\left(\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} \right) = kt$$

$$C_A = \frac{C_{A0}(1-x_A)}{\beta(1+\alpha x)}$$

$$\beta = 1 \text{ et } \alpha = \frac{D_A}{1 + \frac{n_A}{n_B}} = \frac{2}{1 + \frac{1}{2}} = \frac{4}{3}$$

1^{er} Reacteur

$$P_A = 5 \text{ atm}$$

$$T_{01} = 350^\circ\text{C}$$

$$V_{R1} = \frac{\pi d^2 L}{4}$$

$$x_{A1} = 0,6$$

$$V_{R1} = Q_{01} C_{01} \int_0^{x_1} \frac{dx}{r} \text{ et } r = k C_A^2$$

$$r = k C_{01}^2 \left[\frac{1-x}{\beta(1+\alpha x)} \right]^2$$

$$\beta = \frac{T_1 P_{01}}{T_{01} P_1} = 1 \text{ et } \alpha = \frac{D_A}{1 + \frac{n_A}{n_B}} = \frac{2}{1+0} = 2$$

$$\Rightarrow V_{R1} = \frac{Q_{01} C_{01}}{k C_{01}^2} \int_0^{0,6} \frac{(1+2x)^2}{(1-x)^2} dx$$

$$V_{R1} = \frac{Q_{01}}{k C_{01}} \cdot I_1$$

2^e Reacteur

$$V_{R2} = Q_{02} C_{02} \int_0^{x_2} \frac{dx}{r}$$

$$\beta = 1 \text{ et } \alpha = 2$$

$$V_{R2} = \frac{Q_{02}}{k C_{01}} \int_0^{x_2} \frac{(1+2x)^2}{(1-x)^2} dx$$

$$V_{R2} = \frac{Q_{02}}{k C_{01}} \cdot I_2$$

$$V_{R2} = N V_{R1}$$

$N = \text{nbre de tuyau.}$

$$\Rightarrow N = \frac{V_{R2}}{V_{R1}}$$

$$C_{01} = \frac{P_{01}}{R T_{01}} \text{ et } C_{02} = \frac{P_{02}}{R T_{02}}$$

$$\Rightarrow \frac{C_{01}}{C_{02}} = \frac{P_{01}}{P_{02}} = \frac{5 \times 2}{25} = 0,4$$

$$I_1 = \int_0^{0,6} \left[\frac{(1+2x)}{(1-x)} \right]^2 dx$$

$$= 4(1-x)^{-1} \Big|_0^{0,6} + 12 \ln(1-x) \Big|_0^{0,6} + 9 \left(\frac{1}{1-x} \right) \Big|_0^{0,6}$$

$$\Rightarrow I_1 = 4,9$$

$$I_2 = \int_0^{0,3} \left(\frac{1+x}{1-x} \right)^2 dx$$

$$= x \Big|_0^{0,3} + 4 \ln(1-x) \Big|_0^{0,3} + 4 \left(\frac{1}{1-x} \right) \Big|_0^{0,3}$$

$$\Rightarrow I_2 = 10,36$$

$$\Rightarrow N = \frac{Q_{02}}{Q_{01}} \cdot \frac{C_{01}}{C_{02}} \cdot \frac{I_2}{I_1} = \frac{30}{1} \times 0,4 \times \frac{10,36}{4,9}$$

$$N = 26 \text{ tubes}$$

b/ On place en parallèle, car en série ça prend du place, et lorsqu'un tombe en panne toute la série tomber en panne.

EXO N° 4



1) la vitesse de réaction

$$\frac{X_s - X_E^0}{V_R} = \frac{r(X_s)}{Q_0 C_0}$$

$$r(X_s) = \frac{Q_0 C_0 X_s}{V_R}$$

avec : $C_0 = \sum C_{i0} = C_{A0} + C_{B0} = 6 \text{ mol/l}$.

$$C_{As} = C_{A0} - C_0 X_s$$

$$\Rightarrow X_s = \frac{C_{A0} - C_{As}}{C_0}$$

$$\Rightarrow r(X_s) = \frac{Q_0 C_0 (C_{A0} - C_{As})}{V_R}$$

donc : $r(X_s) = \frac{Q_0 (C_{A0} - C_{As})}{V_R}$

$C_{As} = 3 \text{ mol/l}$; $V_R = 10 \text{ l}$.

Q_0 (l/h)	1,2	2,8	10	24,5	56,5	158
C_{As} (mol/l)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
X_s	0,45	0,416	0,33	0,25	0,166	0,08
$r(X_s)$ mol/l/h	0,324	0,697	1,98	3,67	5,67	5,58

2) τ ?

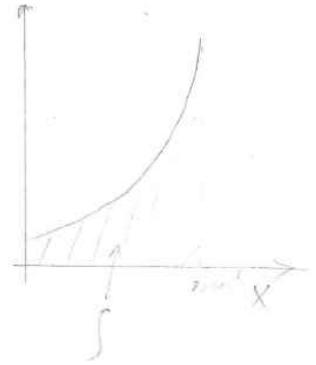
$$\tau = C_0 \int_0^{0,45} \frac{dX}{r}$$

on trace : $\frac{1}{r} = f(X)$

l'aire sous la courbe est l'intégrale.

$\tau = 1,65 \text{ h}$

RLPA : reacteur permet de définir les cinétiques de la réaction.



USTHB
FACULTE DE GENIE MECANIQUE ET GENIE DES PROCÉDES
DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE ET CRYOGENIE

REACTEURS GAZ- LIQUIDE

ExerciceN°1

On désire purifier un gaz en faisant réagir l'impureté qu'il contient avec un réactif en solution aqueuse, on donne :

- la réaction est du 2^{ème} ordre et la constante de vitesse vaut $10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- la diffusivité de l'impureté dans l'eau est de $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- la concentration du réactif est maintenue à $2 \cdot 10^4 \text{ mole} \cdot \text{m}^{-3}$
- le coefficient de transfert de matière k_L est égal à $4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

1°) Quel est le type d'appareil qu'il faut recommander ?

2°) Lequel des paramètres hydrodynamiques (ε_L et a) est primordial dans le choix du réacteur ?

3°) Un second réactif réagissant 20 fois plus vite peut aussi être utilisé. Comment seraient modifiées les conclusions précédentes dans ce dernier cas.

ExerciceN°2

La fraction molaire d'une impureté A dans l'air est de 0,1%. Elle doit être réduite à 0,02% par absorption dans de l'eau pure. Déterminer la hauteur de la tour nécessaire pour cette opération sachant que l'écoulement des deux phases se fait à contre-courant.

$$k_{AG,a} = 32000 \text{ mole} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{atm}$$

$$k_{AL,a} = 0,1 \text{ h}^{-1}$$

La solubilité de A dans l'eau pure est $H = 125 \cdot 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{m}^3 / \text{mole}$.

Les débits de liquide et de gaz sont :

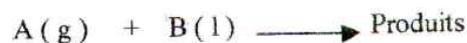
$$L = 7 \cdot 10^5 \text{ mole} / \text{h} \cdot \text{m}^2$$

$$G = 1 \cdot 10^5 \text{ mole} / \text{h} \cdot \text{m}^2$$

$$p = 1 \text{ atm et } C_T = 56000 \text{ mole} / \text{m}^3$$

ExerciceN°3

Remplacer l'absorbant non réactif de l'exercice précédent par un liquide réagissant de grande concentration en B avec $C_{B1} = 800 \text{ mole} / \text{m}^3$



La réaction est très rapide.

Les diffusivités de A et B dans l'eau sont les mêmes.

ExerciceN°4

Même données que pour l'exercice précédent en utilisant une alimentation contenant $C_{B1} = 128 \text{ mole} / \text{m}^3$

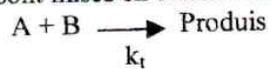
1°) Ecrire le bilan de matière et déterminer C_{B2}

2°) Trouver la forme de l'équation de la vitesse de réaction.

3°) Déterminer la hauteur de la colonne.

Exercice N°5

Soient deux constituants A et B présents dans deux phases immiscibles. Ces phases sont mises en contact dans un réacteur parfaitement agité ouvert. La réaction qui a lieu est



Pour une alimentation équimolaire, le taux de conversion obtenu est de 95%.

Avec la même alimentation, on désire obtenir un taux de conversion de 99% en utilisant 3 réacteurs de même volume que le 1^{er} placé en série (chaque volume est égal à l'unité)

1) Comparer la production obtenue dans les cas suivants :

- 1 réacteur agité / 3 réacteurs à concourant
- 1 réacteur agité / 3 réacteur à contre courant
- 1 réacteur agité / 1 réacteur piston à contre courant

2) Déterminer les concentrations intermédiaires dans le cas de l'écoulement à contre courant.

Série N° 3

Reacteurs - Gaz-Liquide

Exo N° 1

1°) Le type d'appareil

$$Ha = \frac{\sqrt{k C_{BL} D_A}}{k_L} = \frac{\sqrt{10^{-4} \cdot (2 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 \cdot 10^{-3})}}{4 \cdot 10^{-5}}$$

$$Ha = 1,37 \rightarrow 0,02 < Ha < 2$$

Reaction de transfert de type II
l'appareil est la cuve agitée.

2°) Les deux paramètres hydrodynamiques (\bar{z}_L et a) sont primordial.

3°) $k' = 20k$

$$Ha = \frac{\sqrt{20k C_{BL} D_A}}{k_L} = \frac{\sqrt{20 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}}{4 \cdot 10^{-5}}$$

$$Ha = 6,124 > 2 \rightarrow \text{react}^\circ \text{ rapide.}$$

Exo N° 2

La hauteur de la tour "h"

$$h = \frac{G}{\pi K_{GL} a} \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{P_A - H_e C_A}$$

$$\frac{1}{K_{GL} a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{H_e}{k_L a} = \frac{1}{32000} + \frac{125 \cdot 10^{-4}}{0,15}$$

$$= 127 \cdot 10^{-5} \text{ h} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{mole}$$

$$\Rightarrow K_{GL} a = 780,5 \text{ mole} / \text{h} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{atm}$$

Relation entre P_A et C_A :

$$P_A - P_{A1} = \frac{\pi L}{C_A C_T} (C_A - C_{A1})$$

$$C_A = \frac{1 \cdot 7 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5 \cdot 56000} (C_A - C_{A1})$$

$$P_A - 0,0002 = 1,25 \cdot 10^{-4} (C_A - 0)$$

$$C_A = 8000 P_A - 1,6$$

$$\text{donc } h = \frac{G}{\pi K_{GL} a} \int_{0,0002}^{0,001} \frac{dP_A}{P_A - H_e (8000 P_A - 1,6)}$$

$$= \frac{10^5}{1 \cdot 770,5} \int_{0,0002}^{0,001} \frac{dP_A}{P_A - 125 \cdot 10^{-4} (8000 P_A - 1,6)}$$

$$h = 127,123 \int_{0,0002}^{0,001} \frac{dP_A}{0,0002}$$

$$= 610635 (P_{A2} - P_{A1})$$

$$h = 512,5 \text{ m}$$

Exo N° 3



$$\frac{G}{\pi} dP_A = -\frac{L}{b C_T} dC_B \text{ et } b=1$$

$$\Rightarrow \frac{G}{\pi} (P_{A2} - P_{A1}) = -\frac{L}{C_T} (C_{B2} - C_{B1})$$

$$\frac{L}{C_T} C_{B2} = \frac{L}{C_T} C_{B1} - \frac{G}{\pi} (P_{A2} - P_{A1})$$

$$\Rightarrow C_{B2} = C_{B1} - \frac{C_T G}{L \pi} (P_{A2} - P_{A1})$$

A.N.:

$$C_{B2} = 300 - \frac{56000 \cdot 10^5}{7 \cdot 10^5 \cdot 1} (0,001 - 0,0002)$$

$$C_{B2} = 793,6 \text{ mol} / \text{m}^3$$

On a: $\frac{D_{AL}}{D_{BL}} = \frac{k_{Ag}}{k_{Ll}} = 1$ alors $k_{Ag} = k_{Ll}$

Au sommet:

$$k_{Ag} a P_A = 32000 \times 0,0002 = 6,4$$

$$\frac{k_{Ll} a}{b} C_B = 30$$

$$\Rightarrow 6,4 < 30 \Rightarrow R^\circ \text{ à l'interface.}$$

* En bas:

$$k_{Ag} a P_A = 32000 \times 0,001 = 32$$

$$\frac{k_{Ll} a}{b} C_B = 79,36$$

$$\Rightarrow 32 < 79,36 \Rightarrow R^\circ \text{ à l'interface}$$

donc:

$$h = \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{2 a a} = \frac{G}{\pi} \int_{0,0002}^{0,001} \frac{dP_A}{k_{Ag} a P_A}$$

$$= \frac{G}{k_{Ag} a \pi} \int_{0,0002}^{0,001} \frac{dP_A}{P_A} = \frac{G}{k_{Ag} a \pi} \ln P_A \Big|_{0,0002}^{0,001}$$

A.N.: $h = \frac{10^5}{32000 \cdot 1} \ln \left(\frac{0,001}{0,0002} \right) \Rightarrow h = 5,03 \text{ m}$

Exo N: 4

$$C_{B2} = C_{B1} + \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} (P_{A2} - P_{A1})$$

$$\Rightarrow C_{B2} = 123 - \frac{10^5 \times 56000}{1 \times 7 \times 10^4} (0,001 - 0,0002)$$

$$\Rightarrow C_{B2} = 121,6 \text{ mol/m}^3$$

Au sommet:

$$k_{Ag} a P_A = 6,4 ; k_{Bl} a C_B = 123$$

$6,4 < 123 \Rightarrow R^0$ à l'interface.

En bas:

$$k_{Ag} a P_A = 32 ; k_{Bl} a C_B = 1216$$

$32 > 1216 \Rightarrow R^0$ dans le film liquide.

donc: $h = h_1 + h_2$

$$\text{tel que: } h_1 = \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}}^{P_{A1}'} \frac{dP_A}{k_{Ag} a P_A}$$

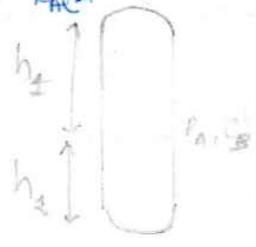
$$\text{et } h_2 = \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}'}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{\left(\frac{C_B + \frac{P_A}{He}}{\frac{1}{He k_{Ag} a} + \frac{1}{k_{Bl} a}} \right) a}$$

P_{A1}' et C_{B1}' ?

$$k_{Ag} a P_{A1}' = k_{Bl} a C_{B1}'$$

$$\Rightarrow C_{B1}' = \frac{k_{Ag} a P_{A1}'}{k_{Bl} a}$$

$$\Rightarrow C_{B1}' = 320000 P_{A1}'$$



$$\frac{G}{\pi} (P_{A1} - P_{A1}') = -\frac{L}{C_T} (C_{B1} - C_{B1}')$$

$$\Rightarrow \frac{G}{\pi} P_{A1}' = \frac{G}{\pi} P_{A1} + \frac{L}{C_T} (C_{B1} - 32 \times 10^4 P_{A1}')$$

$$\Rightarrow \left(\frac{G}{\pi} + \frac{L \times 32 \times 10^4}{C_T} \right) P_{A1}' = \frac{G}{\pi} P_{A1} + \frac{L}{C_T} C_{B1}$$

$$\Rightarrow P_{A1}' = \frac{\left(\frac{G}{\pi} P_{A1} + \frac{L}{C_T} C_{B1} \right)}{\frac{G}{\pi} + \frac{L \times 32 \times 10^4}{C_T}}$$

$$\text{A.N: } P_{A1}' = \frac{10^5 \times 0,0002 + 7 \times 10^5 \times (123/56000)}{(10^5 + 7 \times 10^5 \times 32 \times 10^4 / 10000)}$$

$$P_{A1}' = 3,95 \times 10^{-4} \text{ atm}$$

$$C_{B1}' = 126,44 \text{ mol/m}^3$$

$$h_1 = \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}'}^{P_{A1}} \frac{dP_A}{k_{Ag} a P_A} = \frac{G}{\pi k_{Ag} a} \ln \frac{P_{A1}}{P_{A1}'}$$

$$h_1 = \frac{10^5}{32000} \ln \left(\frac{0,000395}{0,0002} \right)$$

$$h_1 = 2,127 \text{ m}$$

$$h_2 = \frac{G}{\pi} \left(\frac{1}{He k_{Ag} a} + \frac{1}{k_{Bl} a} \right) \int_{P_{A1}'}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{C_B + \frac{P_A}{He}}$$

$$C_B = f(P_A) = ?$$

$$C_B = C_{B2} - \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} (P_A - P_{A1})$$

$$\Rightarrow C_B = C_{B1} + \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} P_{A1} - \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} P_A$$

$$h_2 = K \int_{P_{A1}'}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{C_{B1} + \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} P_{A1} + P_A \left(\frac{1}{He} - \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} \right)}$$

$$h_2 = \frac{K}{C_{B1} + \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} P_{A1}} (P_{A2} - P_{A1}')$$

$$h_2 = \frac{G}{\pi} \left(\frac{1}{He k_{Ag} a} + \frac{1}{k_{Bl} a} \right) \frac{(P_{A2} - P_{A1}')}{C_{B1} + \frac{G \cdot L}{\pi \cdot L} P_{A1}}$$

$$h_2 = \frac{10^5 \left(\frac{10^6}{123 \times 32000} + \frac{1}{0,1} \right)}{123 + \frac{10^5 \times 56000}{7 \times 10^4} \cdot 0,0002} \quad (\text{good - good})$$

$$h_2 = \frac{10,25 \times 10^5 \times 6,05 \times 10^{-4}}{123 + 1,6}$$

$$h_2 = 4,83 \text{ m} \Rightarrow h = 6,96 \text{ m}$$

USTHB

Faculté de génie mécanique et génie des procédés

Réacteurs gaz/ solide réactif

Exercice 1

A 900° C, le sulfure de zinc est oxydé à l'air en ZnO selon la stoechiométrie :



La réaction de surface est du 1^{er} ordre et la constante de vitesse vaut $2 \cdot 10^{-2}$ m/s. La densité du sulfure est de 4130 kg/m^3 et la diffusivité effective de l'oxygène dans la couche de ZnO est $8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Quelle est l'étape limitante pour des grains de 10^{-6} m de rayon ? (On négligera la diffusion externe.)

Quelle est la valeur de t_0 ?

EXERCICE 2

Dans un réacteur cylindrique se produit la réaction suivante :



On suppose que la réaction est du premier ordre et que le processus est bien représenté par le modèle à cœur rétrécissant. La température ($T=482.2^\circ\text{C}$) ainsi que la composition des gaz sont uniformes dans le réacteur.

Dans ce réacteur cylindrique de 0.61 m de diamètre et 9.14 m de hauteur, on utilise un débit de solide de 453.6 Kg/mm . La masse volumique des particules solides est de 2.1 g/cm^3 . La distribution de la taille des particules ainsi que les temps de séjour sont donnés dans le tableau suivant :

Diamètre des particules (μm)	% en poids = $\frac{F_p(R_i)}{F_r}$	$t_s / \bar{t}_s = y$
53-63	0.10	0.60
63-74	0.20	0.85
74-88	0.35	0.99
88-105	0.25	1.15
105-125	0.10	1.30

Les expériences ont montré que dans les mêmes conditions, il a fallu 10s pour convertir à 85% un échantillon de particules ayant un diamètre compris entre 88 et $105 \mu\text{m}$.

Des mesures avec d'autres particules ont montré que le processus est contrôlé par la réaction chimique. Le temps de séjour moyen \bar{t}_s est défini comme suit : $\bar{t}_s = (\text{volumique des solides dans le réacteur}) / (\text{débit volumique des solides})$

La fraction volumique occupée par les solides est de 0.01.

Déterminer la conversion moyenne de NaCl à la sortie de ce réacteur.

EXERCICE 3

Soit un réacteur à lit fluidisé opérant en régime permanent. Un mélange de solide A et B (40Kg de A/heure et 60Kg de B/heure) est introduit d'une manière continue dans le réacteur qui peut contenir 100Kg de solides. A cause de la grande vitesse du gaz utilisé, 20 Kg/h des solides A sont entraînés hors du lit. Le reste des solides sortent du réacteur par une conduite.

- 1) Trouver les temps de temps de séjour moyens dans le lit :
 - a) de tous les solides
 - b) des solides A
 - c) des solides B
- 2) Calculer le taux de conversion moyen de la charge solide. L'étape limitante est la réaction chimique et les valeurs de t_0 sont :
 $t_0(A)=40$ minutes et $t_0(B)=80$ minutes.
- 3) On installe un cyclone dans le réacteur qui permet de récupérer les solides entraînés. Quel serait alors le taux de conversion de la charge solide ?

EXERCICE 4

Une charge solide composée de 400 mg de particules de rayon $25 \mu\text{m}$ et de 600 mg de particules de rayon $50 \mu\text{m}$ est introduite dans un lit fluidisé. A cause de la grande vitesse du gaz de fluidisation, une partie des solides est entraînée hors du lit. Le débit d'entraînement des particules est de 22mg/min et contient 27.3% de particules ($50 \mu\text{m}$).

La constante de la vitesse d'éluatriation peut se mettre sous la forme $K(R_i) = \alpha \cdot R_i^\beta$
 R_i étant le rayon d'une classe de particules).
Déterminer les constantes α et β .

Série N°4

Exercice N°1



Reaction du 1^{er} ordre

$$k = 2 \times 10^2 \text{ m/s} ; \rho = 4130 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} ; L_0 = 10^{-6} \text{ m}$$

l'étape limitante ?

Régime chimique $\Rightarrow t_0 = \frac{J_B}{b \Gamma_B C_A k} \cdot L_0$

Diffusion interne $\Rightarrow t_0 = \frac{J_B}{6b De C_A \Gamma_B} \cdot L_0^2$

$$\frac{t_{0in}}{t_{0ch}} = \frac{L_0 k C_A}{6 De} = \frac{10^{-6} \times 2 \times 10^2}{6 \times 8 \cdot 10^{-6}}$$

$$\Rightarrow \frac{t_{0in}}{t_{0ch}} = \frac{1}{24} \Rightarrow t_{0ch} = 24 t_{0in}$$

$t_{0in} < t_{0ch} \Rightarrow$ l'étape limitante est la réaction chimique.

$t_{0ch} = ?$



$$b = \frac{2}{3} ; \rho_B = 97,4 \text{ g/mol}$$

gaz parfait: $C_A = \frac{P_A}{RT} = \frac{0,21 P_T}{R \cdot T}$

$$C_A = \frac{0,21 \times 1,013 \times 10^5}{8,314 (900 + 273)}$$

$$C_A = 2,179 \text{ mol/l}$$

$$t_0 = \frac{4130 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}{\frac{2}{3} \cdot 97,4 \cdot 2,179 \times 2 \times 10^2} =$$

$$t_0 = 1459,47$$

Exercice N°2



$H \gg D$ (Reacteur tubulaire) \Rightarrow Pâton.

$$\bar{E}_s = \frac{V}{Q} \text{ et } \theta = \frac{V}{V_R} = 0,01$$

$$\bar{E}_s = \frac{0,01 V_R}{\frac{Q(\text{kg/min})}{S(\text{g/cm}^3)}}$$

Volume du reacteur " V_R "

$$V_R = \underset{\uparrow \text{section}}{S} \cdot H = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot H$$

$$V_R = \frac{\pi}{4} \cdot 0,61^2 \times 9,14 = 2,671 \text{ m}^3$$

$$\text{donc: } \bar{E}_s = \frac{0,01 \times 2,671 \times 2,1 \times 10^3 \times 60}{453,6 \cdot 4}$$

$$\bar{E}_s = 7,4109 \text{ D}$$

Régime chimique: $t_0 = A k_{\text{moy}}$
 A est calculée à partir des données de la classe [88-105]

$$1 - \bar{x}_B = \sum (1 - \bar{x}_B^{(R_i)}) \frac{F_{R_i}}{F_0}$$

particules de mêmes taille: $x_B = \bar{x}_B$

$$\frac{t_0}{L_0} = 1 - (1 - x_B)^{1/3}$$

$$t_0 = \frac{L_0}{1 - (1 - x_B)^{1/3}} = \frac{10}{1 - (1 - 0,35)^{1/3}}$$

$$t_0 = 21,337 \text{ s}$$

$$\text{donc: } A = \frac{t_0}{k_{\text{moy}} [88-105]} = \frac{21,337 \times 2}{36,5}$$

$$\Rightarrow A = 0,292$$

$$\bar{x}_B = 1 - \left(1 - \frac{t_0}{L_0}\right)^3$$

chimétrie des particules (µm)	Energy $\frac{dW}{dR}$ (1/m)	W_0 A Remoy	% poids	$\frac{E_i}{E_s}$	E_s	$X_B = \frac{W_B}{W_s}$
53-63 R(245-310)	23	12,824	0,1	0,6	4,452	0,722
63-74 R(315-371)	34,25	15,146	0,2	0,85	6,304	0,802
74-83 R(371-44)	40,5	17,91	0,35	0,99	7,345	0,795
83-105 R(44-530)	48,25	21,337	0,25	1,15	8,532	0,784
105-125 R(53-60)	57,5	25,427	0,1	1,30	9,641	0,761

$$\begin{aligned}
 1 - \bar{X}_B &= \sum \frac{(1 - X_B)}{W_F} \frac{W_F(R_i)}{W_F} \\
 &= (1 - 0,722) 0,1 + (1 - 0,802) 0,2 \\
 &\quad + (1 - 0,795) 0,35 + (1 - 0,784) 0,25 + (1 - 0,761) 0,1 \\
 &= \\
 \Rightarrow \bar{X}_B &= 0,783
 \end{aligned}$$

Exercice N°1

A 900°C, le sulfure de zinc est oxydé à l'air en ZnO selon la stoechiométrie :



La réaction de surface est du 1er ordre et la constante de vitesse vaut $2 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La densité du sulfure est de 4130 Kg/m^3 et la diffusivité effective de l'oxygène dans la couche de ZnO est $8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Quelle est l'étape limitante pour des grains de 10^{-4} m de rayon ? (On négligera la diffusion externe .)

Quelle est la valeur de t_0 ?

Exercice N°2

Deux petits échantillons de solide sont introduits pendant 1 heure dans un four où l'environnement est homogène. Dans ces conditions les particules de 4 mm de rayon sont converties à 58 %, celles de 2 mm à 87,5 %.

- Trouver le mécanisme qui contrôle la vitesse de réaction.
- Trouver le temps au bout duquel les particules de 3 mm sont complètement converties.

Exercice N°3

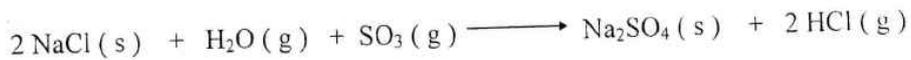
Une charge solide constituée de 20% en poids de particules de $R = 1 \text{ mm}$, 30% de particules de $R = 2 \text{ mm}$ et 50% de particules de $R = 4 \text{ mm}$, doit passer dans un réacteur tubulaire tournant où elle réagit avec un gaz de composition uniforme pour donner un produit non friable solide. Les expériences montrent que le processus de conversion peut-être représenté par le modèle à cœur rétrécissant où l'étape de contrôle est la réaction chimique. Le temps de conversion total d'une particule de 4 mm est de 4 heures.

Trouver le temps nécessaire pour convertir :

- 75% de solides
- 95% de solides
- 100% de solides

Exercice N°4

Dans le réacteur représenté par la figure N°1, se produit la réaction suivante :



On suppose que la réaction est du premier ordre et que le processus est bien représenté par le modèle à cœur rétrécissant. La température ($T = 482,2 \text{ }^\circ\text{C}$) ainsi que la composition des gaz sont uniformes dans tout le réacteur.

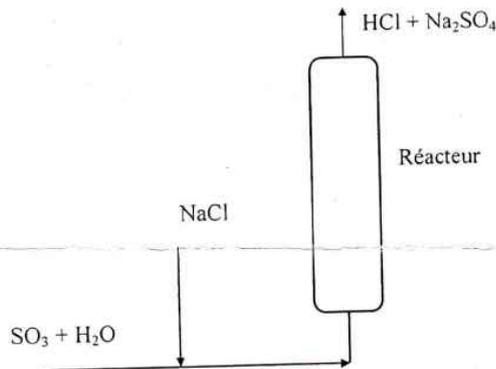
Dans ce réacteur cylindrique de 0,61 m de diamètre et 9,14 m de hauteur, on utilise un débit de solide de $453,6 \text{ Kg / mm}$. La masse volumique des particules solides est de $2,1 \text{ g / cm}^3$. La distribution de la taille des particules ainsi que celle des temps de séjour sont données dans le tableau suivant :

Diamètre des particules (m)	% en poids	t_s / \bar{t}_s
53 - 63	0,10	0,60
63 - 74	0,20	0,85
74 - 88	0,35	0,99
88 - 105	0,25	1,15
105 - 125	0,10	1,30

Les expériences ont montré que dans les mêmes conditions, il a fallu $10s$ pour convertir à 85% un échantillon de particules ayant un diamètre compris entre 88 et 105 m.

Des mesures avec d'autres particules ont montré que le processus est contrôlé par la réaction chimique. Le temps de séjour moyen t_s est défini comme suit :
 $t_s = (\text{volume des solides dans le réacteur}) / (\text{débit volumique des solides})$
 La fraction volumique occupée par les solides est de 0,01.

Déterminer la conversion moyenne de NaCl à la sortie de ce réacteur.



Exercice N°5

Dans un environnement uniforme, des particules solides de rayon égal à 4mm sont converties en 5 minutes à 87,5 %.

Les solides ne changent pas de taille durant la réaction et la vitesse est contrôlée par la diffusion dans les cendres.

Quelle est la conversion moyenne qu'on obtiendrait dans un réacteur à lit fluidisé opérant dans les mêmes conditions mais utilisant des solides constitués de 50% de particules de rayons $R_1 = 1 \text{ mm}$ et 50% de particules de rayon $R_2 = 2 \text{ mm}$.

Le temps de séjour moyen de ces solides dans le réacteur est de 30 minutes.

Exercice N°6

Soit un réacteur à lit fluidisé opérant en régime permanent. Un mélange de solide A et B (40 Kg de A/heure et 60 Kg de B / heure) est introduit d'une manière continue dans le réacteur qui peut contenir 100 Kg de solides. A cause de la grande vitesse de gaz utilisé. 20 Kg / h des solides A sont entraînés hors du lit. Le reste des solides sortent du réacteur par une conduite.

Exercice :

Deux échantillons de solide sont introduites pendant 1 heure dans un four. Dans ces conditions les particules de rayon 4 mm sont converties à (58%) celle de 2 mm à (87,5%).

- 1) Trouver le mécanisme qui contrôle la vitesse de réaction.
- 2) Trouver le temps au bout duquel des particules de 1 mm sont complètement convertis

1) On considère le 1^{er} cas :

Diffusion externe.

$$\frac{t}{t_0} = X_B \Rightarrow t = t_0 X_B$$

$$t_1 = t_0 X_{B1} \text{ avec } t_0 = \frac{\rho_B}{3 \pi k_0 b C_A} R_{01} = A R_{01}$$

$$t_2 = t_0 X_{B2} \text{ avec } t_0 = A R_{02}$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{t_0 X_{B1}}{t_0 X_{B2}} = 1, \quad t_1 = t_2 = 1$$

$$\frac{t_0}{t_0} = \frac{R_{02}}{R_{01}} = \frac{4}{2} = 2, \quad \frac{X_{B1}}{X_{B2}} = \frac{0,58}{0,875} = 0,66$$

$2 \neq 0,66 \rightarrow$ ce n'est pas le régime.

On suppose d'être une réaction chimique.

$$\frac{t}{t_0} = 1 - (1 - X_B)^{1/3} \Rightarrow t = t_0 [1 - (1 - X_B)^{1/3}]$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{R_{01} [1 - (1 - X_{B1})^{1/3}]}{R_{02} [1 - (1 - X_{B2})^{1/3}]}$$

$1 = 0,995 \rightarrow$ c'est le régime chimique.

$$2) \quad t_{01} = A R_{01} \quad \begin{cases} t_{01} = A R_{01} \\ t_{02} = A R_{02} \end{cases} \rightarrow A$$

EXO N° 5

Les molécules ne changent pas de taille \Rightarrow diffusion interne dans les cendres

$$t = 5 \text{ min} ; R_0 = 4 \text{ mm} ; X_B = 0,375$$

$$\frac{t}{t_0} = 1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B)$$

$$\Rightarrow t_0 = \frac{t}{1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B)}$$

$$= \frac{5}{1 - 3(1 - 0,375)^{2/3} + 2(1 - 0,375)}$$

d'où : $t_0 = 10 \text{ min}$

Régime à diffusion interne :

$$t_0 = A R_0^2 \Rightarrow A = \frac{t_0}{R_0^2}$$

$$A = \frac{10}{(4 \cdot 10^{-3})^2} = 625000$$

$$t_{0,1} = A R_{0,1}^2 = 625000 (10^{-3})^2 = 0,625 \text{ min}$$

$$t_{0,2} = A R_{0,2}^2 = 625000 (2 \cdot 10^{-3})^2 = 12,5 \text{ min}$$

Reacteur fluide :

$$\bar{t} = 30 \text{ min RCFA}$$

diffusion interne :

$$1 - \bar{X}_B(R_i) = \frac{1}{5} \frac{t_0(R_i)}{\bar{t}} - \frac{19}{420} \left(\frac{t_0(R_i)}{\bar{t}} \right)^2$$

\bar{X}_B classe :

$$1 - \bar{X}_B(R_i) = \sum (1 - \bar{X}_B(R_i)) \frac{F_i(R_i)}{F_0}$$

$$1 - \bar{X}_B(R_i) = [1 - \bar{X}_B(R_1)]^{0,5} + [1 - \bar{X}_B(R_2)]^{0,5}$$

ona :

$$1 - \bar{X}_B(R_1) = \frac{1}{5} \cdot \frac{0,625}{30} - \frac{19}{420} \left(\frac{0,625}{30} \right)^2$$

$$= 4,164 \times 10^{-3}$$

$$1 - \bar{X}_B(R_2) = \frac{1}{5} \left(\frac{1,250}{30} \right) - \frac{19}{420} \left(\frac{1,250}{30} \right)^2$$

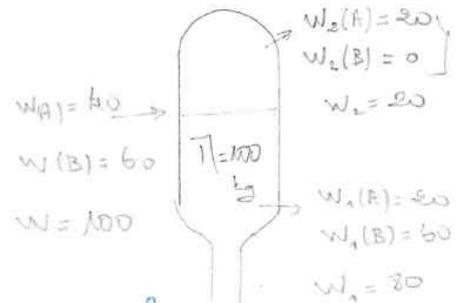
$$= 3,25 \times 10^{-3}$$

d'où : $1 - \bar{X}_B(R_i) = 6,2 \times 10^{-3}$

$\bar{X}_B = 0,993$

EXO N° 6

RCFA



$$\bar{t} = \frac{\bar{V}}{W} = \frac{100}{100} = 1 \text{ h}$$

$$\bar{t}(A) = \frac{\bar{V}(A)}{W(A)} = \frac{1}{\frac{W_1}{\pi} + \frac{W_2(A)}{\pi(A)}}$$

$$\text{RCFA} : \bar{V}(A) = \frac{W_1(A)}{W_1}$$

$$\Rightarrow \bar{V}(A) = \pi \frac{W_1(A)}{W_1} = \frac{100 \times 20}{80}$$

$$\Rightarrow \bar{V}(A) = 25$$

$$\bar{t}(A) = \frac{1}{\frac{20}{100} + \frac{20}{20 \times 20}} = 0,625 \text{ h}$$

$$\bar{t}(B) = \frac{\bar{V}(B)}{W_1(B)} = \frac{1}{\frac{20}{100} + 0} = 1,25 \text{ h}$$

Interrogation N°1

Soit la réaction en phase gazeuse : $2A + 5B \rightarrow C$

On introduit dans un RPPA isotherme 1 mole de A et 1 mole de B et 1 mole d'inerte.

Au bout d'un temps d'une heure en fonctionnement isobare, il reste dans le réacteur 0,6 mole de A.

1- Calculer l'avancement de la réaction (X) et taux de conversion de A (X_A)

2- Déterminer en fonction d'un volume initial le volume de la phase après une heure de fonctionnement.

3- Déterminer la valeur du volume initial en sachant que la vitesse de réaction $r = k C_A^2$ et $k = 1 \text{ l/mol}$.

$$1^{\circ} n_0 = 2 \text{ moles}$$

$$n_A = n_{A_0} + 2_A n_0 X = 1 - 2 \times 2 X$$

$$\Rightarrow n_A = 1 - 4X$$

$$n_A = n_{A_0} (1 - X_A) \Rightarrow n_A = 1 - X_A$$

$$X = \frac{1 - n_A}{4} = \frac{1 - 0,6}{4} \Rightarrow X = 0,1$$

$$X_A = 1 - \frac{n_A}{n_{A_0}} = 1 - 0,6 \Rightarrow X_A = 0,4$$

$$2^{\circ} V_A = \beta V_{A_0} (1 + \alpha X)$$

$\beta = 1$: réaction isotherme isobare.

$$\alpha = \frac{\Delta \nu}{1 + \frac{n_{i_0}}{n_0}} = \frac{1 - 2 - 5}{1 + \frac{1}{2}} = -4$$

$$\text{donc : } V_A = V_{A_0} (1 - 4X)$$

$$3^{\circ} r = k C_A^2 = -\frac{dC_A}{dt}$$

$$C_A = \frac{n_{A_0} + 2_A n_0 X}{V_A (1 + \alpha X)} =$$

$$-\frac{dC_A}{C_A^2} = k dt$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{C_A} \Big|_{C_{A_0}}^{C_A} = kt$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A_0}} = kt$$

$$\text{on a : } C_A = \frac{n_A}{V_A} \text{ et } C_{A_0} = \frac{n_{A_0}}{V_{A_0}}$$

$$\text{alors : } \frac{V_{A_0}}{n_A} - \frac{V_{A_0}}{n_{A_0}} = kt$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_{A_0} (1 - 4X)}{(1 - 4X)} - \frac{V_{A_0} (1 - X)}{1} = kt$$

$$\Leftrightarrow 4 V_{A_0} X = kt$$

$$\Leftrightarrow V_{A_0} = \frac{kt}{4X}$$

$$\text{A.N. : } V_{A_0} = \frac{1 \times 1}{4 \times 0,1}$$

$$V_{A_0} = 2,5 \text{ l}$$

Janvier 2011

INTERROGATION ECRITE DE RH
Master Raffinage et Pétrochimie

L'absorption de l'ammoniac par l'acide sulfurique est effectuée dans une colonne à garnissage. Le gaz entre à 0,06 atm et sort à 0,01 atm. Le débit molaire du gaz est de 45 kmole/m².h. La phase liquide entre dans la colonne par le haut et s'écoule à contre courant avec le gaz tel que $L/C_T = 9$ m/h. La concentration de l'acide à l'entrée de la colonne est de 0,6 kmole/m³.

- 3) Calculer la hauteur de la colonne nécessaire pour réaliser l'objectif ?
- 4) Déterminer la hauteur de la colonne dans le cas où l'acide sulfurique est remplacé par de l'eau pure ? Que peut-on en conclure ?

Données :



La réaction est rapide

$$k_{\text{Ag}} \cdot a = 0,35 \text{ kmole/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}, k_{\text{Al}} \cdot a = 0,005 \text{ h}^{-1}, H_e = 0,0133 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{kmole},$$

$$D_{\text{Al}} = D_{\text{Bl}}, \pi = 1 \text{ atm}$$

$$h_2 = 265,91 \ln \left(\frac{1,25 + 70,2 \times 0,06}{1,25 + 70,2 \times 0,0167} \right)$$

$$h_2 = 216,21 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R = 231,9 \text{ m}$$

eg h ? \rightarrow eau pure

$$h = \frac{G}{\pi K_{eff} a} \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{P_A - H_e c_A}$$

$$c_A = ?$$

$$\frac{G}{\pi} dP_A = \frac{L}{c_T} dc_A$$

$$\frac{G}{\pi} (P_A - P_{A1}) = \frac{L}{c_T} (c_A - c_{A1})$$

$$\Rightarrow c_A = \frac{c_T G}{\pi L} (P_A - P_{A1})$$

$$c_A = 5 P_A - 0,05$$

$$h = 18667,025 \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{0,9335 P_A + 6,65 \times 10^{-4}}$$

$$h = \frac{18667,025}{0,9335} \ln \left(\frac{0,9335 \times 0,06 + 6,65 \times 10^{-4}}{0,9335 \times 0,01 + 6,65 \times 10^{-4}} \right)$$

$$h = 34639,43 \text{ m}$$

conclusion:

Le transport sous réaction chimique nécessite une hauteur très grande.

Interrogation écrite (30 minutes)

L'attaque de l'oxyde d'uranium UO_2 par l'acide fluorhydrique gazeux HF se fait selon la réaction : $UO_2 (s) + 4HF (g) \longrightarrow UF_4 (s) + 2H_2O (g)$

Le tableau ci-dessous donne la variation du taux de conversion des particules de l'oxyde de diamètre 10mm en fonction du temps.

T(min)	4,0	12,0	26,5	35,0	42,;0
X_B	0,21	0,54	0,875	0,96	0,99

On néglige la diffusion interne.

- 3) Quel est le mécanisme qui contrôle la consommation des particules solides.
- 4) On désire transformer une charge contenant 50% de particules de 4mm et 50% de particules de rayon 2mm et obtenir 99% de conversion dans un réacteur à lit fluidisé. Déterminer le temps de séjour moyen de la charge solide dans le réacteur.

t			
X_B			
$t_{0,21}$	0,21	0,54	0,875
$t_{0,96}$	4,0	12,0	26,5

← régime cinétique.

Tableau

$$\frac{t}{\tau_0} = 1 - (1 - X_B)^{1/3}$$

Tableau

$$1 - \bar{X}_B = \sum (1 - X_B(R_i)) \frac{w_i(R_i)}{w_c}$$

$$= [1 - X_B(4)] \rho_f \tau + [1 - X_B(2)] \rho_f \tau$$

← $\sum w_i \tau_0 = A R_0^{10mm}$

$\tau_0 = \frac{R}{R}$

Interrogation écrite



→ 1) Le mécanisme :

• considérons un régime externe.

$$t = t_0 x_B \Rightarrow t_0 = \frac{t}{x_B}$$

$\frac{t_{\text{lim}}}{x_B}$	13,05	22,22	30,28	36,46	42,42
------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Les valeurs ne sont pas constantes alors le régime n'est pas externe.

• Régime chimique.

$$t = t_0 [1 - (1 - x_B)^{1/3}] \Rightarrow t_0 = \frac{t}{1 - (1 - x_B)^{1/3}}$$

t_0 (min)	52,93	52,62	53	53,19	53,53
-------------	-------	-------	----	-------	-------

t_0 est alors le régime chimique.

→ 2) \bar{E}_s ?

$$t_{01} = A R_{01} \quad \text{et} \quad t_{02} = A R_{02}$$

$$A = ? \quad t_0 = A R_0 \Rightarrow A = \frac{t_0}{R_0} = \frac{53}{10}$$

$$A = 5,3$$

$$t_{01} = 5,3 \times 2 = 10,6 \text{ min.}$$

$$t_{02} = 5,3 \times 4 = 21,2 \text{ min}$$

$$t_s = t_0 [1 - (1 - \bar{x}_B)^{1/3}]$$

$$t_{s1} = 10,6 [1 - (1 - 0,99)^{1/3}]$$

$$t_{s1} = 3,32 \text{ min.}$$

$$t_{s2} = 21,2 [1 - (1 - 0,99)^{1/3}]$$

$$t_{s2} = 16,63 \text{ min.}$$

$$\bar{E}_s = \frac{t_{s1} + t_{s2}}{2} = 12,48 \text{ min.}$$

$$1 - \bar{x}_B = \sum (1 - \bar{x}_B(R_i)) \frac{F_e(R_i)}{F_e}$$

$$\bar{x}_B = 0,99$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} 1 - \bar{x}_B(2) = \left(1 - \frac{\bar{E}_s}{t_{01}} + 1\right)^3 \\ 1 - \bar{x}_B(4) = \left(1 - \frac{\bar{E}_s}{t_{02}}\right)^3 \end{cases}$$

$$1 - \bar{x}_B = 1 - \bar{E}_s$$

$$1 - \bar{x}_B = \sum \left[\frac{1}{4} \frac{t_0(2)}{\bar{E}_s} - \frac{1}{20} \left(\frac{t_0(2)}{\bar{E}_s} \right)^2 \right] \times 0,5$$

$$+ \left[\frac{1}{4} \frac{t_0(4)}{\bar{E}_s} - \frac{1}{20} \left(\frac{t_0(4)}{\bar{E}_s} \right)^2 \right] \times 0,5$$

$$\Rightarrow 0,01 = \left[\frac{2,65}{\bar{E}_s} - \frac{5,618}{\bar{E}_s^2} + \frac{5,3}{\bar{E}_s} - \frac{22,472}{\bar{E}_s^2} \right] \times 0,5$$

$$\Rightarrow 0,01 = \frac{3,975}{\bar{E}_s} - \frac{14,045}{\bar{E}_s^2}$$

$$\Rightarrow 0,01 \bar{E}_s^2 - 3,975 \bar{E}_s + 14,045 = 0$$

$$\Delta = 3,975^2 - 4(0,01)(14,045)$$

$$= 15,24 \Rightarrow \sqrt{\Delta} = 3,9$$

$$\bar{E}_{s(1)} = 393,9 \text{ min}$$

$$\bar{E}_{s(2)} = 3,56 \text{ min} \quad \checkmark$$

car $t_0 > \bar{E}_s$

→ finalement elle est très facile.

EXAMEN DE MASTER EN GENIE DES PROCÉDES

$P_c = 1 \text{ atm}$

EXERCICE N°1 (7 points)

Un gaz A contenu dans l'air à 25°C et à $P_A = 0,2 \text{ atm}$ est réduit par une solution contenant un réactif B de concentration 0,2 mole/l dans une colonne garnie à contre courant. Calculer la hauteur de la colonne nécessaire pour que la pression de A dans le gaz passe de 0,2 atm à 0,02 atm.

Données : la réaction est rapide : $A_{\text{gaz}} + 2 B_{\text{liq}} \longrightarrow \text{produits}$
 $k_{A_g \cdot a} = 80 \text{ mole/h.l.atm}$, $k_{A_l \cdot a} = 25 \text{ h}^{-1}$, $H_e = 30 \text{ atm.l/mole}$, $D_{A1} = D_{B1}$, $L/G = 7$,
 $G = 10^5 \text{ mole/h.m}^2$, $C_T = 0,55 \text{ mole/l}$

EXERCICE N°2 (6 points)

La réaction catalytique en phase gazeuse $A \longrightarrow 3R$ est étudiée dans un réacteur à lit fluidisé à $P = 8 \text{ atm}$ et $T = 700^\circ\text{C}$. Le réacteur contient 1 mg de grains de catalyseur de diamètre 3 mm. Le tableau suivant donne les variations du débit d'alimentation en fonction de la pression partielle de A à la sortie du réacteur.

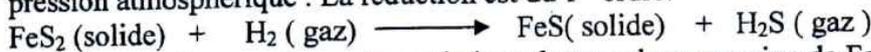
Q_0 (l/h)	100	22	4	1	0.6
P_{AS} / P_{AE}	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05

Trouver l'équation qui représente la vitesse de la réaction catalytique correspondante à cette dimension de particule.

P_{AE} est la pression de A à l'entrée du réacteur
 L'alimentation contient A pur

EXERCICE N°3 (7 points)

La réduction des particules de FeS_2 est étudiée dans un réacteur piston à 450°C et à pression atmosphérique. La réduction est du 1^{er} ordre.



Le tableau ci-dessous donne les variations du taux de conversion de FeS_2 en fonction du temps :

t (min)	0	20	40	60	120
Taux de conversion de FeS_2		0.135	0.26	0.37	0.63

Le rayon des particules de FeS_2 est égal à 0,035 mm

On donne $\rho_{\text{FeS}_2} = 5 \text{ g/cm}^3$, $M_{\text{FeS}_2} = 120 \text{ g}$ et $D_e = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$

- 1) Confirmer que le régime de fonctionnement est bien le régime chimique
- 2) Evaluer la constante de la vitesse de la réaction chimique
- 3) Une charge solide constituée de particules de FeS_2 est introduite dans un réacteur piston à contre - courant avec le gaz. La distribution des tailles des particules ainsi que celle des temps de séjour sont données dans le tableau suivant :

Rayon des particules (mm)	0.05	0.10	0.15	0.20
%en poids	0.10	0.30	0.40	0.20
t_s / \bar{t}_s	1.40	1.10	0.95	0.75

Si la fraction molaire de l'hydrogène dans le gaz est maintenue constante et égale à 1, quel serait le taux de conversion de la charge solide pour un temps de séjour \bar{t}_s égal à 60 min.

- 4) La même charge solide est utilisée dans un réacteur à lit fluidisé, déterminer le temps de séjour moyen de la charge nécessaire pour avoir le même taux de conversion que dans la question 3.

La diffusion externe est négligeable

$12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

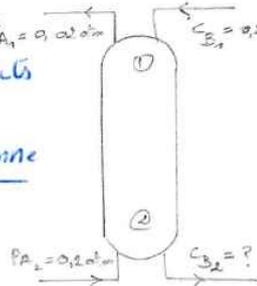
Corrigé de l'aster 1

"Calcul des réacteurs"

Exercice N°1



La hauteur de la colonne garnie



$C_{B2} = ?$

équation du bilan :

$$\frac{G}{\pi} dP_A = \frac{-L}{bG_T} dC_B$$

$$\Rightarrow \frac{G}{\pi} (P_{A1} - P_{A2}) = \frac{-L}{bG_T} (C_{B1} - C_{B2})$$

$$\Rightarrow C_{B2} = C_{B1} + \frac{bG_T}{\pi L} (P_{A1} - P_{A2})$$

$$= 0,2 + \frac{2 \times 0,55}{7} (0,02 - 0,2)$$

$$\Rightarrow C_{B2} = 0,172 \text{ mol/l.}$$

Calcul de $k_{Ag} a P_A$ et $\frac{k_{Bl} a C_B}{b}$

on a : $\frac{D_{AL}}{D_{BL}} = \frac{k_{AL}}{k_{BL}}$ et comme

$D_{AL} = D_{BL}$ alors : $k_{AL} = k_{BL}$

→ Au sommet de la colonne

① $k_{Ag} a P_A = 30 \times 0,02 = 1,6 \text{ mol/h.l}$

② $\frac{k_{Bl} a C_B}{b} = \frac{25 \times 0,2}{2} = 2,5 \text{ mol/h.l}$

① < ② ⇒ Réaction à l'interface.

→ En bas de la colonne

① $k_{Ag} a P_A = 30 \times 0,2 = 16 \text{ mol/h.l}$

② $\frac{k_{Bl} a C_B}{b} = \frac{25 \times 0,172}{2} = 2,146 \text{ mol/h.l}$

① > ② ⇒ Réaction au sein du liquide

donc : $H = h_1 + h_2$

$$= \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{k_{Ag} a P_A} + \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{k_{AL} a}$$

calcul de P_A'

$$\frac{G}{\pi} (P_A' - P_{A1}) = \frac{-L}{bG_T} (C_B' - C_{B1})$$

$$\Rightarrow P_A' = P_{A1} - \frac{\pi L}{bG_T} (C_B' - C_{B1})$$

$$C_B' = f(P_A')$$

à l'interface : $k_{Ag} a P_A' = \frac{k_{Bl} a C_B'}{b}$

$$\Rightarrow C_B' = \frac{b k_{Ag} a P_A'}{k_{Bl} a}$$

donc : $P_A' = P_{A1} - \frac{\pi L}{bG_T} \left(\frac{b k_{Ag} a P_A'}{k_{Bl} a} - C_{B1} \right)$

$$\Rightarrow P_A' = \frac{P_{A1} + \frac{\pi L}{bG_T} C_{B1}}{1 + \frac{\pi L k_{Ag} a}{G_T k_{Bl} a}}$$

A.N : $P_A' = \frac{0,02 + (7/2 \times 0,55) \times 0,2}{1 + (7 \times 30 / (0,55 \times 25))}$

$$P_A' = 0,031 \text{ atm}$$

$h_1 = \frac{G}{\pi} \int_{P_{A1}}^{P_A'} \frac{dP_A}{k_{Ag} a P_A} = \frac{G}{\pi k_{Ag} a} \ln P_A \Big|_{P_{A1}}^{P_A'}$

$$\Rightarrow h_1 = \frac{G}{\pi k_{Ag} a} \ln \frac{P_A'}{P_{A1}}$$

$$h_1 = \frac{10^5}{80} \ln \frac{0,031}{0,02} = 547,32 \text{ m}$$

$h_2 = \frac{G}{\pi k_{AL} a} \int_{P_A'}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{P_A + H_{e2}}$

avec : $\frac{1}{k_{AL} a} = \frac{1}{k_{Ag} a} + \frac{H_e}{k_{AL} a} = \frac{1}{30} + \frac{30}{25}$

$$\frac{1}{k_{AL} a} = 1,2125 \text{ h.l/atm/mole.}$$

$$C_B = C_{B1} + \frac{bG_T}{\pi L} P_{A1} - \frac{bG_T}{\pi L} P_A$$

$$C_B = 571,63 - 28571,6 P_A$$

$$h_2 = 10^5 \times 1,2125 \int_{P_A'}^{P_{A2}} \frac{dP_A}{P_A + 17143,9 - 357141,86 P_A}$$

=

Exercice N°2

on a la formule:

$$\frac{W}{F_{A_0}} = \frac{X_{A_2}}{(-r_{AW})_s} \quad \text{c.s.} \quad (-r_{AW})_s = \frac{X_{A_2} F_{A_0}}{W}$$

dans ce cas le débit d'alimentation

varie: $F_{A_0} = C_{A_0} \cdot Q$

avec: $C_{A_0} = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{3}{0,032 (700+273)}$

$C_{A_0} = 0,15 \text{ mol/l.}$

et $C_A = \frac{C_{A_0}(1-X_A)}{\beta(1+\alpha X_A)}$

$\beta = 1$ et $\alpha = 2$.

$C_A = C_{A_0} \frac{(1-X_A)}{1-2X_A}$ jusqu'à on a les données en pression.

alors: $P_A = P_{A_0} \frac{(1-X_A)}{(1-2X_A)}$

X_{A_2} ?

$P_{A_2}(1-2X_{A_2}) = P_{A_1}(1-X_{A_1})$

$\Rightarrow X_{A_2} = \frac{P_{A_2} - P_{A_1}}{2P_{A_2} - P_{A_1}} \Rightarrow X_{A_2} = \frac{P_{A_2} - 1}{2 \frac{P_{A_2}}{P_{A_1}} - 1}$

donc: $(-r_{AW})_s = \frac{C_{A_0} \cdot Q}{W} \cdot \frac{P_{A_2} - 1}{2 \frac{P_{A_2}}{P_{A_1}} - 1}$

0,15 mol/l.
1mg

Si le raisonnement est just

$d = 3 \text{ mm} \quad ?? \quad \text{à quel se partie}$

Exercice N°3

→ Le régime est bien chimique.

$t_0 = 422 \text{ min.}$

→ Constante de vitesse

$t_0 = \frac{f_B}{\pi_3 C_A k_c} R_0$

$\Rightarrow k_c = \frac{f_B}{\pi_3 C_A t_0} R_0 = \frac{5}{120 C_A \cdot 422} \cdot 0,0055$

$C_A = \frac{P}{RT} = \frac{1}{0,032 (450+273)} = 0,017 \text{ mol/l.}$
 $= 0,017 \times 10^{-3} \text{ mol/l.}$

$k_c = 0,02 \text{ m/s.}$

t_s	84	66	57	45
\bar{X}_B	0,486	0,399	0,353	0,287

$\bar{X}_B = 1 - \left(1 - \frac{t_s}{t_0}\right)^3$

$1 - \bar{X}_B = \frac{1}{F_c} \sum (1 - \bar{X}_B(R_i)) \frac{F_c(R_i)}{F_c}$

$= (1 - 0,486) 0,3 + (1 - 0,399) 0,3$

$+ (1 - 0,353) 0,15 + (1 - 0,287) 0,2$

$= 0,471 \Rightarrow \bar{X}_B = 0,529$

EXAMEN DE MASTER EN RAFINAGE ET PETROCHIMIE

EXERCICE N°1

On désire purifier un gaz contenant une impureté A dans une colonne d'absorption à contre courant avec un liquide contenant un réactif de concentration $C_{B1} = 32 \text{ mole/m}^3$

La réaction est rapide $A + B \longrightarrow \text{produits}$

- Quelle est la hauteur de la colonne nécessaire pour réduire l'impureté A de 100 Pa à 20 Pa
- Que devient cette hauteur si C_{B1} est égale à $3,2 \text{ mole/m}^3$ dans les mêmes conditions ?

Données : $k_{Ag}.a = 0,32 \text{ mole/h.m}^3.Pa$, $k_{Al}.a = k_{Bl}.a = 0,1 \text{ heure}^{-1}$, $L = 7.10^5 \text{ mole/h.m}^2$,
 $G = 10^5 \text{ mole/h.m}^2$, $H_e = 12,5 \text{ Pa.m}^3/\text{mole}$, $\pi = 10^5 \text{ Pa}$, $C_T = 56.10^3 \text{ mole/m}^3$.

EXERCICE N°2

L'attaque de l'oxyde d'uranium UO_2 par l'acide fluorhydrique gazeux HF se fait selon la réaction : $UO_2 (s) + 4HF (g) \longrightarrow UF_4 (s) + 2H_2O (g)$

Le tableau ci-dessous donne la variation du taux de conversion des particules de l'oxyde de diamètre 10mm en fonction du temps.

t(min)	4,0	12,0	26,5	35,0	42,0
X_B	0,21	0,54	0,875	0,96	0,99

On néglige la diffusion interne.

- Quel est le mécanisme qui contrôle la consommation des particules solides.
- On désire transformer une charge contenant 40% de particules de 4mm de rayon et 60% de particules de rayon 2mm et obtenir 90% de conversion .
 Déterminer le débit d'alimentation de la charge solide pour une masse de solide de 1000Kg dans le réacteur dans les cas ci-dessous :
 - un réacteur à écoulement piston
 - un réacteur à lit fluidisé

EXERCICE N°3

La réaction catalytique en phase gazeuse $A \longrightarrow R$ est étudiée dans un réacteur de type piston avec un débit de 2000mole/h. Les résultats des expériences à température $T = 117^\circ C$ et à pression égale à 3,2 atm sont :

$C_{AE} \text{ (mole/h)}$	0.100	0.080	0.060	0.040
$C_{AS} \text{ (mole/h)}$	0.084	0.070	0.055	0.038

- Déterminer l'ordre de la vitesse de réaction
- Calculer la masse de catalyseur nécessaire pour convertir A à 35%

Corrigé de l'ETD de Naster2

Raffinage et Petrochimie

Exo N°1



a) hauteur de la colonne

Bilan de matière:

$$\frac{G_A}{\pi} dP_A = -\frac{L}{bC_T} dC_B \quad \text{avec } b=1$$

$$\Leftrightarrow \frac{G_A}{\pi} (P_{A1} - P_{A2}) = -\frac{L}{C_T} (C_{B1} - C_{B2})$$

$$\Leftrightarrow C_{B2} = C_{B1} - \frac{G_A L_T}{\pi L} (P_{A1} - P_{A2}) \quad P_{A2} = 100 \text{ Pa} \quad C_{B2} = ?$$

$$\Leftrightarrow C_{B2} = 32 - \frac{10^5 \cdot 56 \cdot 10^3}{10^5 \cdot 7 \cdot 10^5} (100 - 20)$$

$$\Leftrightarrow C_{B2} = 2516 \text{ mol/m}^3$$

Au sommet de la colonne

$$\begin{aligned} \rightarrow k_{Ag} a P_A &= 0,32 \times 20 = 6,4 \quad \text{--- } \textcircled{1} \\ \rightarrow k_{Lr} a C_B &= 0,5 \times 32 = 3,2 \quad \text{--- } \textcircled{2} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \textcircled{1} > \textcircled{2} \end{array} \right\}$$

Reaction dans le film liquide.

En bas de la colonne

$$\begin{aligned} \rightarrow k_{Ag} a P_A &= 0,32 \times 100 = 32 \quad \text{--- } \textcircled{1} \\ \rightarrow k_{Lr} a C_B &= 0,5 \times 2516 = 2516 \quad \text{--- } \textcircled{2} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \textcircled{1} > \textcircled{2} \end{array} \right\}$$

Reaction dans le film liquide

→ Pas de changement de régime.

$$h = \frac{G_A}{k_{Lr} \pi} \int_{P_{A2}}^{P_{A1}} \frac{dP_A}{P_A + He_{CA}} \quad \frac{2He = k_{A1} = 1}{D_{AB} k_{Lr}}$$

$$C_A = f(P_A)$$

$$C_A = C_{A1} + \frac{G_A L_T}{\pi L} (P_{A1} - P_A)$$

$$= 32 + 0,03 (20 - P_A)$$

$$C_A = 33,6 - 0,03 P_A$$

$$\frac{1}{k_{Lr} a} = \frac{1}{k_{Ag} a} + \frac{He}{k_{Lr} a} = \frac{1}{0,32} + \frac{1245}{0,5} = 123,125 \text{ h} \cdot \text{m}^3 / \text{mol}$$

$$P_A + He_{CA} = P_A + 1245 (33,6 - 0,03 P_A)$$

$$P_A + He_{CA} = P_A + 420 - P_A$$

$$h = \frac{10^5 \cdot 123,125}{10^5} \int_{P_{A2}}^{P_{A1}} \frac{dP_A}{P_A + 420}$$

$$= \frac{123,125}{420} \ln \frac{P_{A1}}{P_{A2}} = \frac{123,125}{420} \ln \frac{100}{20}$$

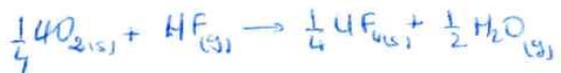
$$h = 24,405 \text{ m}$$

b) $C_{B1} = 3,2 \text{ mol/m}^3 \rightarrow h = ?$

$$C_{B2} = C_{B1} - 0,03 (100 - 20)$$

$$= -3,2 \text{ (impossible de traiter avec cette charge)}$$

Exo N°2



Le mécanisme qui contrôle la consommation des particules solides

Régime externe: $t_0 = \frac{t}{X_B}$

Régime chimique: $t_0 = \frac{t}{1 - (1 - X_B)^{1/3}}$

t (min)	4	12	26,5	35	42
X_B	0,21	0,54	0,875	0,96	0,99
t_0^{min}	19,05	22,22	30,27	36,46	42,42
$t_{\text{ch}}^{\text{min}}$	52,93	52,62	53	53,19	53,13

$t_{\text{ch}} \approx \text{est } t_0$ alors le régime est chimique et débit d'alimentation

a) Reacteur à lit fluidisé RCPA

$$F_0 = \frac{W}{E} \text{ ?}$$

$$1 - \bar{X}_B = \frac{\sqrt{1 - \frac{t_0(R)}{E}}}{2} - \frac{1}{20} \left(\frac{t_0(R)}{E} \right)^2 \quad \int_0^{X_B} \frac{F_0(R)}{F_0} dX_B$$

$$E_0 = AR_0 \Rightarrow A = \frac{E_0}{R_0} = \frac{53}{10} = 5,3$$

$$E_{01} = 5,3 \times 4 = 21,2 \text{ min}$$

$$E_{02} = 5,3 \times 2 = 10,6 \text{ min}$$

$$1 - \bar{X}_B = \left(\frac{1}{4} \left(\frac{21,2}{E_0} \right) - \frac{1}{20} \frac{21,2^2}{E_0^2} \right) 0,4 + \left(\frac{1}{4} \frac{10,6}{E_0} - \frac{1}{20} \frac{10,6^2}{E_0^2} \right) 0,6$$

$$0,5 = \frac{2,11}{E_s} - \frac{3,9888}{E_s^2} + \frac{1,59}{E_s} - \frac{3,5403}{E_s^2}$$

$$0,5 = \frac{3,7}{E_s} - \frac{12,3596}{E_s^2}$$

$$\Leftrightarrow 0,5 E_s^2 - 3,7 E_s + 12,3596 = 0$$

$$\Delta = (3,7)^2 - 4(0,5)(12,3596)$$

$$\Delta = 3,74616 \Rightarrow \Gamma \Delta = 2,9574$$

$$\bar{E}_{s(w)} = 3,713 \text{ min (car } E_0 > \bar{E}_s)$$

$$\bar{E}_{s(t)} = 33,287 \text{ min refusé}$$

$$F_0 = \frac{1000}{3,713} \Rightarrow (F_0 = 269,324 \text{ kg/min})$$

b) Reacteur à écoulement Piston

???

La formule ?

Exo N°3 $A \longrightarrow R$

L'expression de la vitesse de k

$$C_A = \frac{C_{A0}(1-X_A)}{\beta(1+\alpha X_A)} \quad \beta = 1; \alpha = 0$$

$$\Rightarrow C_A = C_{A0}(1-X_A)$$

$$C_{A0} = \frac{P_{A0}}{RT_0} = \frac{3,2}{0,032 \times 390} = 0,5 \text{ mol/l}$$

$$X_{AE} = \frac{C_{A0} - C_{AE}}{C_{A0}} = 1 - \frac{C_{AE}}{C_{A0}}; \quad X_{AS} = 1 - \frac{C_{AS}}{C_{A0}}$$

$$\text{on a : } \frac{W}{F_{AE}} = \frac{X_{AS} - X_{AE}}{(-r_{AE})_{\text{moy}}}$$

$$\Rightarrow (-r_{AE})_{\text{moy}} = \frac{F_{AE}(X_{AS} - X_{AE})}{W}$$

$$\text{avec : } F_{AE} = C_{A0} \cdot Q_0 = 0,5 \times 2 \times 10^3 = 1000 \text{ mol/h}$$

et W donnée.

a) Ordre de la réaction

La vitesse est donnée par :

$$r = k C_A^n \Rightarrow (-r_{AE})_{\text{moy}} = k C_{A0}^n$$

$$\Leftrightarrow \ln(-r_{AE})_{\text{moy}} = \ln k + n \ln C_{A0}$$

$$\text{Etapeons : } \ln(-r_{AE})_{\text{moy}} = f(\ln C_{A0})$$

l'ordonnée à l'origine est : $\ln k$

et la pente est l'ordre "n"

$$\text{et } C_{A0} = (C_{AE} + C_{AS})/2$$

2) W pour $X_{AS} = 0,35$

$$C_{AS} = C_{A0}(1 - 0,35) = 0,065 \text{ mol/l}$$

d'après le tracé on détermine $(-r_{AE})_{\text{moy}}$

pour cette valeur de C_{A0}

$$\text{puis : } W = \frac{F_{AE}(X_{AS} - X_{AE})}{(-r_{AE})_{\text{moy}}}$$

C_{AE} (mol/l)	0,5	0,07	0,06	0,04	
C_{AS} (mol/l)	0,034	0,07	0,055	0,033	
C_{A0} (mol/l)	0,092	0,075	0,0575	0,039	
X_{AE}	0	0,2	0,4	0,6	
X_{AS}	0,16	0,3	0,45	0,62	0,35
$(-r_{AE})_{\text{moy}}$					

INTERROGATION DE REACTEURS CHIMIQUES

On désire réaliser la réaction isotherme en phase liquide



Dont on ne connaît pas la cinétique. On décide de faire au laboratoire une expérience préalable dans un RCPA dont le volume est égal à 10 litres. On alimente ce réacteur avec un mélange équimolaire de A et de B (3 moles/l de A et 3 moles/l de B). L'expérience consiste à faire varier le débit volumique et à mesurer la concentration de A à la sortie du réacteur. Les résultats sont les suivants :

Q_0 (l/h)	1,2	2,8	10	24,5	56,5	158
C_{AS} (mole/l)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5

La vitesse initiale de la réaction est égale à 20 mole/h.

- 1) Etablir le tableau donnant la vitesse de réaction r en fonction de l'avancement.
- 2) Au stade pilote, on désire traiter dans un réacteur tubulaire assimilé à un réacteur piston, la même alimentation avec un débit volumique $Q_0 = 2 \text{ m}^3/\text{h}$. Calculer le temps de passage pour obtenir $C_{AS} = 0,3 \text{ mole/l}$. En déduire le volume du réacteur.
- 3) Pour réaliser le réacteur tubulaire, on dispose d'un tube de 50cm de diamètre intérieur. Sachant que le mélange réactionnel a une masse volumique de 1000 Kg/m^3 et une viscosité de 10^{-3} Pa.s , calculer le nombre de Reynolds. L'hypothèse assimilant le réacteur piston est-elle vérifiée ? Si oui, pourquoi ? Si non, comment devrait varier le diamètre du tube.