

Aération et transfert de matière

- ☞ aération est une étape importante des procédés biologiques de traitement:
- ☞ elle apporte l'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour oxyder l'effluent
- ☞ elle entraîne le brassage des bassins
- ☞ dans un procédé par boues activées, les coûts de l'aération représentent la part la plus importante (souvent de 60 à 80%) de la dépense énergétique (qui constitue le 1/3 du coût de fonctionnement)*

* <http://www.fndae.fr/documentation/PDF/Fndae26.pdf>

Les dispositifs d'aération

- ☞ les diffuseurs noyés ou systèmes à injection d'air (plaques poreuses, tuyaux perforés, ou autre dispositif statique noyé générant des bulles)
- ☞ les aérateurs mécaniques de surface (turbine lente ou rapide, brosse).
- ☞ les agitateurs immergés avec injection d'air

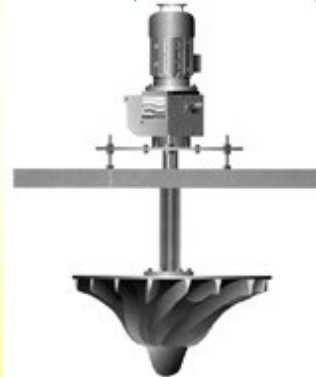
Aérateurs de surface :

<http://www.europelec.com/ltf.htm>

The high speed aerator :
AQUAFEN

LTF,
the low speed aerator

Turbine rapide (700-1800 tr/min) Turbine lente (50-100 tr/min)



Aérateur à fines bulles

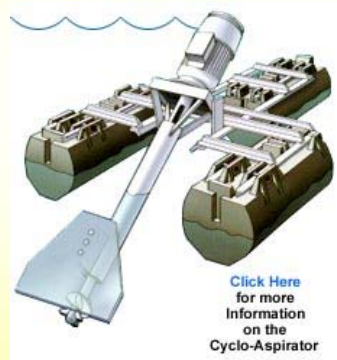
Fine bubbles air diffusers :
AQUADISC

<http://www.europelec.com/aquadisc.htm>



Diameter: 248 mm, height 57 mm
Inlet flow from 1 to 6 m³/h per diffuser.

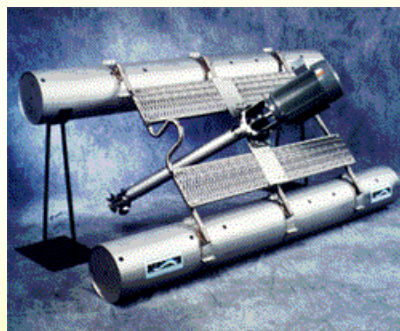
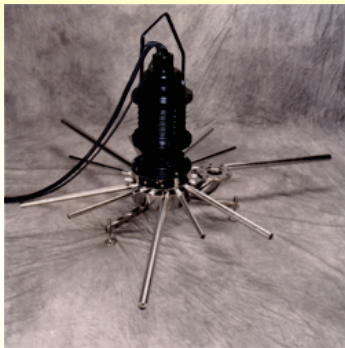
<http://www.waterlink.com/aeromod/diffuser.html>



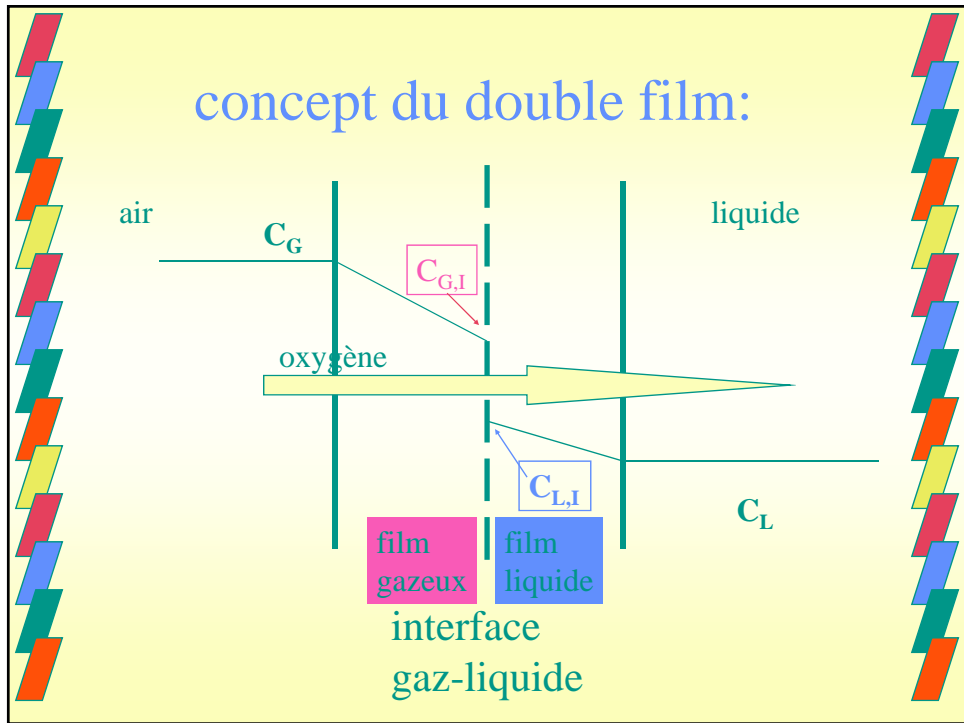
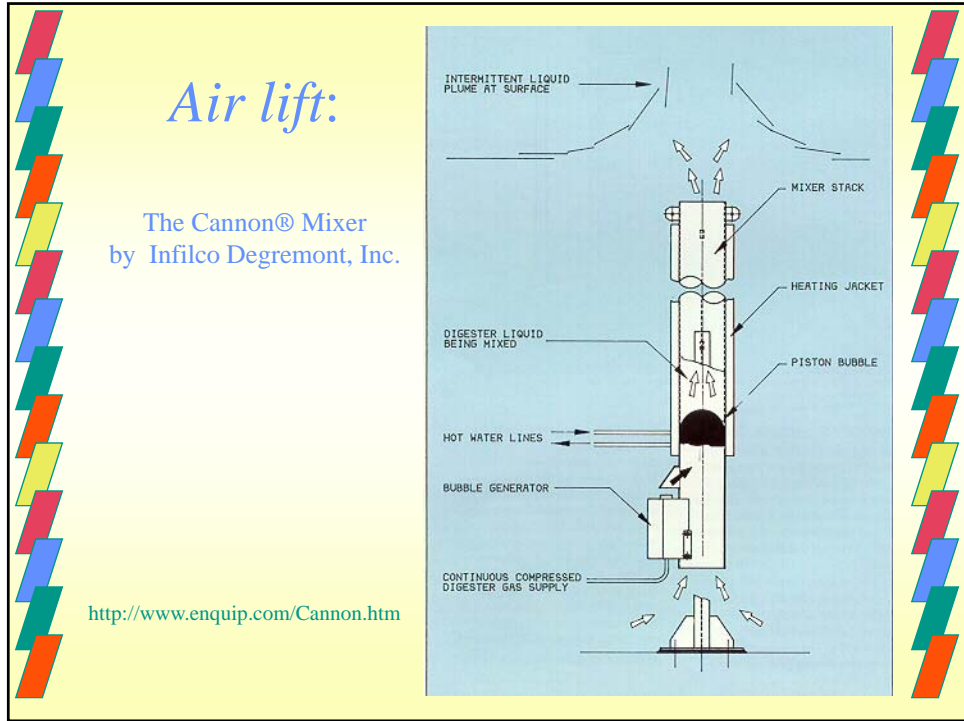
Click Here
for more
Information
on the
Cyclo-Aspirator

<http://www.waterlink.com/mts/aspirating.html>

http://www.aeromix.com/a_hurr.htm
aérateur immergé



Surface Aspirating Aerator
http://www.aeromix.com/a_torn.htm



Loi de diffusion de Fick:

$$N_{O_2} = -D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x}$$

en introduisant les épaisseurs des films

$$N_{O_2} = D_{O_2} \frac{C_{L,I} - C_L}{\delta_L} = k_L (C_{L,I} - C_L)$$

$$k_L = \frac{D_{O_2,L}}{\delta_L}$$

$$N_{O_2} = D_{O_2} \frac{C_G - C_{G,I}}{\delta_L} = k_G (C_G - C_{G,I})$$

$$k_G = \frac{D_{O_2,G}}{\delta_G}$$

Loi de Henry $C_{G,i} = mC_{L,i}$

Coefficient global de transfert de matière:

$$\frac{N_{O_2}}{k_L} = (C_{L,I} - C_L) \quad [a]$$

$$N_{O_2} = k_G (C_G - C_{G,I}) \text{ et } C_{G,I} = mC_{L,I}$$

$$\frac{N_{O_2}}{mk_G} = (C_G - C_{L,I}) \quad [b]$$

$$a + b = N_{O_2} \left(\frac{1}{k_L} + \frac{1}{mk_G} \right) = \left(\frac{C_G}{m} - C_L + C_{L,I} - C_{L,I} \right) = (C_S - C_L)$$

$$N_{O_2} = K_L (C_S - C_L)$$

$$\frac{1}{K_L} = \left(\frac{1}{k_L} + \frac{1}{mk_G} \right)$$

coefficient global de transfert de matière:
 K_L ou K_G

$$N_{O_2} = K_L(C_S - C_L) = K_L(C_L^* - C_L)$$

$$N_{O_2} = \quad \quad \quad = K_G(C_G - C_G^*)$$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{m k_G} \quad \text{et} \quad \frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L}$$

Loi de Henry $C_G^* = m C_L$
 $C_G = m C_L^*$

coefficient global

$$N_{O_2} = K_L (C_S - C_L)$$

☞ C_S : concentration (hypothétique) de saturation en oxygène dans le liquide lorsque l'air est sous une pression p ou concentration C_G :
 $C_S = C_G / m (= C_L^* = p/H)$

☞ C_L : concentration réelle en oxygène dans le liquide.

coefficient volumétrique de transfert de matière: $K_L a$

☞ quantité totale d'oxygène échangé par unité de volume de bassin:

$$r_{O_2} = K_L a (C_S - C_L)$$

☞ $K_L a$: coefficient volumétrique global (s^{-1})

☞ a : aire interfaciale = aire d'échange Gaz-Liquide (m^2/m^3)

☞ K_L coefficient global (par rapport à la phase liquide) de transfert de matière ($m.s^{-1}$)

☞ r_{O_2} : mg d'oxygène/ L.s si C_{L-S} en mg/L

La solubilité en oxygène varie avec la température et la pression

$$C_{S,m} = \frac{1}{2} C_S \left(\frac{P_b}{P_a} + \frac{O_t}{20.9} \right)$$

☞ cette équation donne la valeur moyenne de la saturation entre le bas et le haut du bassin

☞ C_S est la saturation sous pression atmosphérique, Pa, à la température donnée

☞ P_b , pression à laquelle l'air est délivré en pied de bassin (si bassin profond)

☞ O_t , % d'oxygène de l'air en sortie de bassin (une partie de l'oxygène de l'air est consommé avant sa sortie du bassin)

La charge en solide peut réduire
la solubilité et le $K_L a$



$$C_{SW} = \beta C_S$$

$$(K_L a)_{\text{effluent}} = \alpha (K_L a)_{\text{eau}}$$

Effet de la température:



$$(K_L a)_T = (K_L a)_{T_{ref}} \cdot \theta^{(T-T_{ref})}$$



varie de 1.01 à 1.05 et la valeur de 1.024 est la plus souvent utilisée.

Détermination du $K_L a$

- empirique si corrélations pertinentes disponibles (exemple: diffuseurs de fines bulles: S. Gillot A. Héduit 2004 http://www.fnadae.fr/documentation/numero_31.htm)
- expérimentale: avec de l'eau claire, avant de mettre en service l'installation:
 - ajout de sulfite de sodium (+ catalyseur Co^{2+}) pour enlever l'oxygène dissous:
 $\text{SO}_3^{2-} + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-}$
- enregistrement de la vitesse de re-saturation en oxygène sous aération

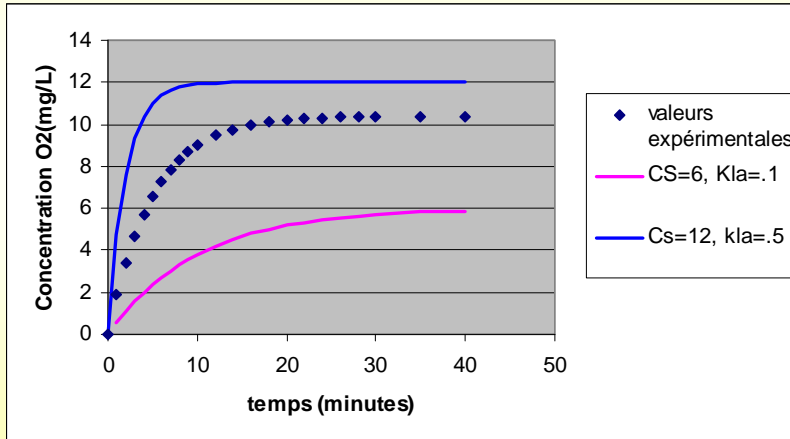
Bilan pour l'expérience:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C)$$

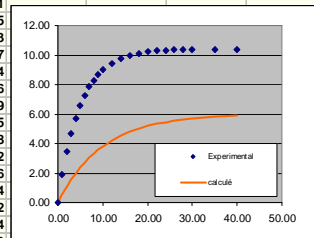
$$\frac{C_S - C}{C_S - C_{t=0}} = e^{-K_L a t}$$

$$\ln(C_S - C) = \ln(C_S - C_{t=0}) - (K_L a)t$$

Détermination du K_{la} : voir exercice 5.3

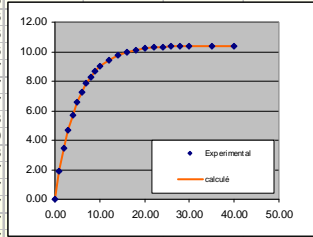


	cs	k _{la}	
	6	0.1	
concentration expérimentale	concentration calculée (equ. 1)	carré des erreurs	
0.00	0.00	0	0
1.00	1.89	0.570975492	1.7271865
2.00	3.43	1.087615482	5.48054338
3.00	4.69	1.555090676	9.84245244
4.00	5.73	1.978079724	14.0542441
5.00	6.57	2.360816042	17.7513725
6.00	7.27	2.707130183	20.7977043
7.00	7.84	3.020488177	23.1832947
8.00	8.30	3.304026215	24.962514
9.00	8.68	3.560582042	26.2175696
10.00	8.99	3.792723353	27.0378129
12.00	9.46	4.192834729	27.7065225
14.00	9.77	4.520418216	27.532658
16.00	9.98	4.788620892	26.9096602
18.00	10.12	5.008206671	26.0878496
20.00	10.21	5.187988301	25.215754
22.00	10.27	5.33518105	24.3752982
24.00	10.31	5.45569228	23.607144
26.00	10.34	5.554358531	22.9275219
28.00	10.36	5.635139624	22.3388815
30.00	10.37	5.70127759	21.8363999
35.00	10.39	5.818815699	20.9004475
40.00	10.40	5.890106167	20.3076862
		460.800518	somme des carrés des erreurs

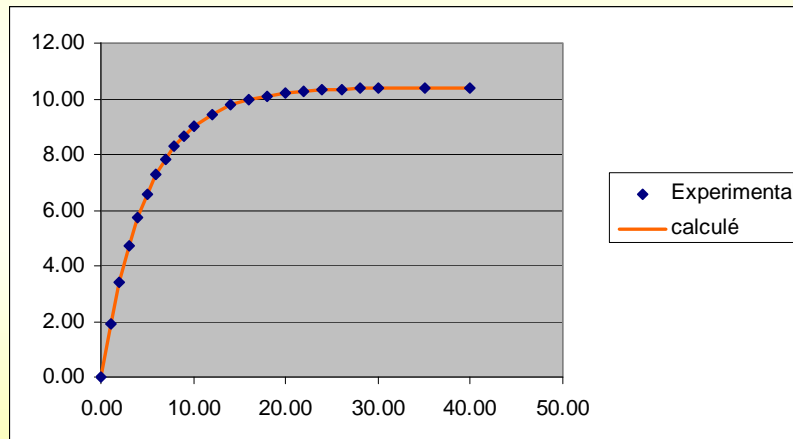


Après optimisation(Solveur) Kla=0.2 Cs=10.4

	cs	kla	
	10.399	0.2001	
concentration expérimentale	concentration calculée (equ. 1)	carré des erreurs	
0.00	0.00	0	0
1.00	1.89	1.885870254	4.4902E-07
2.00	3.43	3.429735834	1.1328E-06
3.00	4.69	4.693619667	1.5893E-06
4.00	5.73	5.728296757	1.7371E-06
5.00	6.57	6.575334002	1.6389E-06
6.00	7.27	7.268760098	1.3922E-06
7.00	7.84	7.836432597	1.0837E-06
8.00	8.30	8.301157055	7.7588E-07
9.00	8.68	8.681603214	5.0645E-07
10.00	8.99	8.993055038	2.9375E-07
12.00	9.46	9.456755376	4.9324E-08
14.00	9.77	9.767520849	2.9702E-09
16.00	9.98	9.975791516	7.9277E-08
18.00	10.12	10.1153716	2.1315E-07
20.00	10.21	10.20891622	3.6136E-07
22.00	10.27	10.27160851	5.0007E-07
24.00	10.31	10.31362401	6.1877E-07
26.00	10.34	10.34178221	7.1491E-07
28.00	10.36	10.36065344	7.8993E-07
30.00	10.37	10.37330067	8.4697E-07
35.00	10.39	10.38955047	9.3307E-07
40.00	10.40	10.39552545	9.7168E-07
			1.6681E-05 somme des carrés des erreurs



Après ajustement de Cs et Kla:



Caractéristique des équipements d'aération

☞ Capacité d'oxygénation [C.O]:

quantité d'oxygène dissous **kg d'O₂/h. m³**

$$[C.O.] = 10^{-3} K_L a C_s$$

$K_L a$: h⁻¹ C_s en mg/L

☞ Apport horaire [A.H]

kg d'O₂/h

$$[A.H.] = [C.O.] \times \text{Volume}$$

Caractéristiques d'aération (suite)

☞ Apport spécifique brut [A.S.B.]

O₂ dissous par h par kW de puissance brute [P.B.] consommée par le système

$$[ASB] = [AH]/[PB] \quad \text{kg d'O}_2/\text{kW.h}$$

☞ Apport spécifique net [A.S.N]

O₂ dissous par h par kW de puissance nette [P.N.] mesurée sur l'arbre de l'aérateur

$$[ASN] = [AH]/[PN] \quad \text{kg d'O}_2/\text{kW.h}$$

Caractéristiques d'aération (suite)

☞ Rendement d'oxygénation: (%)

% de la masse d'oxygène qui a été dissous par rapport à la masse d'oxygène insufflé dans le bassin

Caractéristiques d'aération (suite)

☞ CO, AH, ASB, ASN donnés par les fournisseurs pour des conditions standards:

- eau claire, concentration nulle en oxygène, temp. de réf (20 °C ou 10 °C) pression atmosphérique

☞ Conditions réelles:

$$[C.O.] = 10^{-3} \times K_L a_{Tref} \left(C_S - C_L \right) \left(\frac{T - T_{ref}}{10} \right)^{-1}$$

Caractéristiques d'aération

Si $T_{ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$[C.O.]_{réelle} = [C.O.]_{standard} \alpha \theta^{(T-T_{ref})} \frac{(\beta C_S - C_L)}{9.2} \quad \text{Equ. 16}$$

$$[ASB]_{réel} = [ASB]_{standard} \alpha \theta^{(T-T_{ref})} \frac{(\beta C_S - C_L)}{9.2} \quad \text{Equ. 17}$$

- ☞ Capacité de mélange: parfaitement mélangé si
- diffusion d'air:
20 à 30 m³d'air/min/1000m³ de bassin
 - aération mécanique: **15 à 30 W/m³**

Caractéristique des systèmes d'aération

	Système d'aération	ASB en kgO ₂ /kWh absorbés			Hauteur d'eau(m)
		Valeurs extrêmes	Fourchettes	Moyenne	
Aérateur de Surface	Turbines lentes	0.8-2.2	1.2-1.9	1.5	
	Turbines rapides	0.6-1.4	0.8-1.2	1	
	Brosses	0.8-2.3	1.3-1.9	1.55	1.4-1.7
Système à injection d'air	Grosses bulles	0.5-1		0.75	2-3
	Moyennes bulles	0.7-1.5	0.8-1.3	1.05	2-3
	Moyennes bulles + turbines de fond	0.7-1.2		1	2-3.5
	Fines bulles+ agitation mécanique	1.8-3.3	2-3	2.5	2.5-3.5
Système à base de pompes	Jets	0.8-1.15		0.95	
	Éjecteurs (pompe immergé Atmosphérique)	0.4-0.9	0.55-0.65	0.6	2-3
	Éjecteurs (pompe immergé Surpressé)	0.8-2.3			3.5-7
	Turbines déprimogènes	0.1-0.8	0.5-0.7	0.6	

(Source: Les performances des systèmes d'aération des stations d'épuration CTGREF-France 1980)

Caractéristique des systèmes d'aération

	Moyenne générale des résultats	Fourchette extrême	Fourchette usuelle	Valeur couramment atteinte avec les bons dispositifs	Soit en ASB' (conditions réelles)
Turbines lentes	1,50	0,80 - 2,20	1,35 - 1,75	1,65	1,15
Turbines rapides	1,05	0,60 - 1,45	1,05 - 1,35	1,20	0,84
Brosses	1,55	0,80 - 2,30	1,50 - 1,80	1,70	1,2
Insufflations d'air (IA)					
Moyennes bulles	1,00	0,70 - 1,50	0,90 - 1,10	1,10	0,77
Fines bulles	2,50	1,80 - 3,40	2,20 - 3,20	2,50	1,25 - 1,55
Fines bulles en chenal avec agitation	2,80	1,20 - 4,25	2,50 - 3,80	3,00	1,50 - 1,85
IA + «static mixers»	1,50	0,60 - 2,10	0,80 - 2,00	1,40	0,95
Système déprimogène (pompe + prise d'air)	0,60	0,02 - 1,10	0,60 - 0,80	0,70	0,50

Tableau 2 – ASB des principaux systèmes d'aération (kg O₂/kWh) d'après DUCHÈNE et HÉDUIT 1996]

$$ASB_{réel} = ASB_{standard} \times \text{coefficient de correction (de 0.5 à .7)}$$

<http://www.fndae.fr/documentation/PDF/Fndae26.pdf>

Apport horaire standard **AH_{Standard}** (kg d'O₂/h)

Standard Oxygen Transfer Rate **SOTR** (kg d'O₂/h)

Apport spécifique standard **AS_{Standard}** (kg d'O₂/kW.h)

Standard Aeration Efficiency **SAE** (kg d'O₂/kW.h)

Rendement d'oxygénation standard %

Standard Oxygen Transfer Efficiency **SOTE** %

Dégazage des composés organiques volatils (COV)

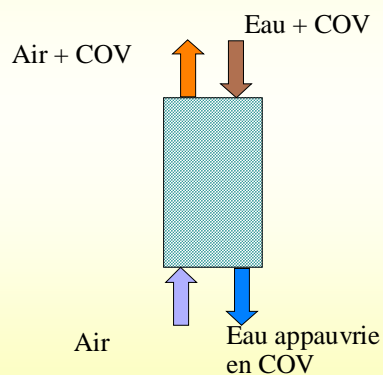
☞ les COV présents dans l'effluent peuvent être relargués dans l'air

☞ ce transfert s'opère dans:

- le bassin d'aération, chute d'eau etc..
- des équipement prévus à cet effet (colonne garnie)

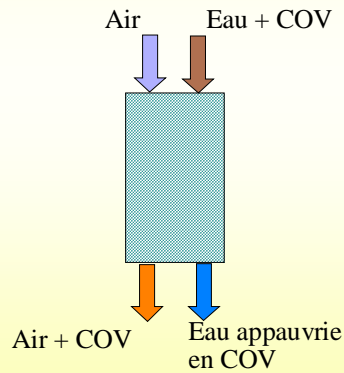
Dégazage des COV

Dégazage contre-courant



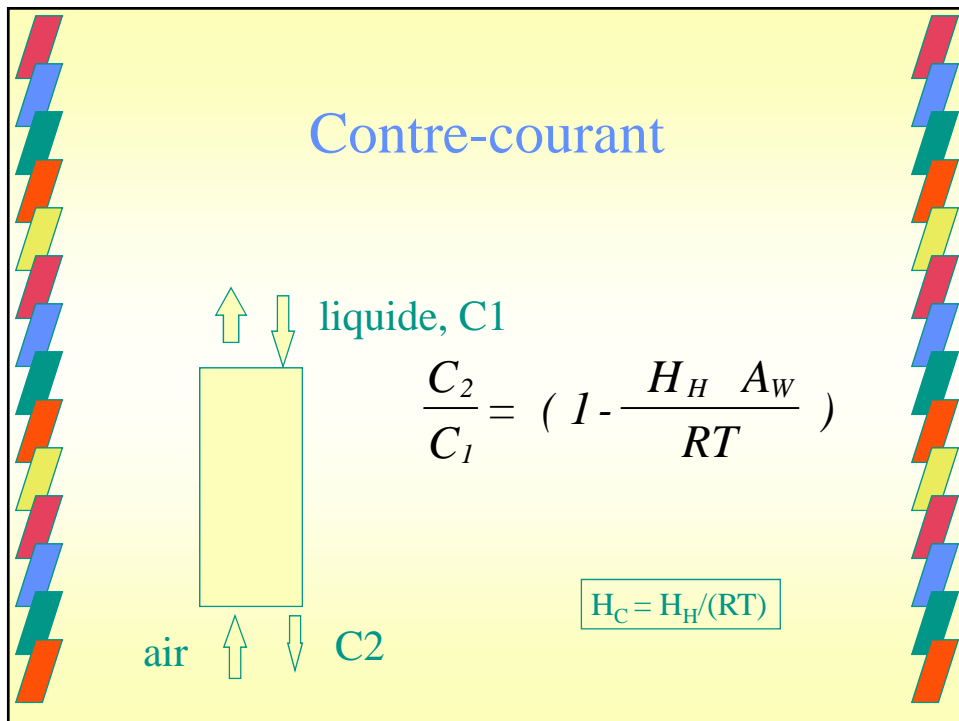
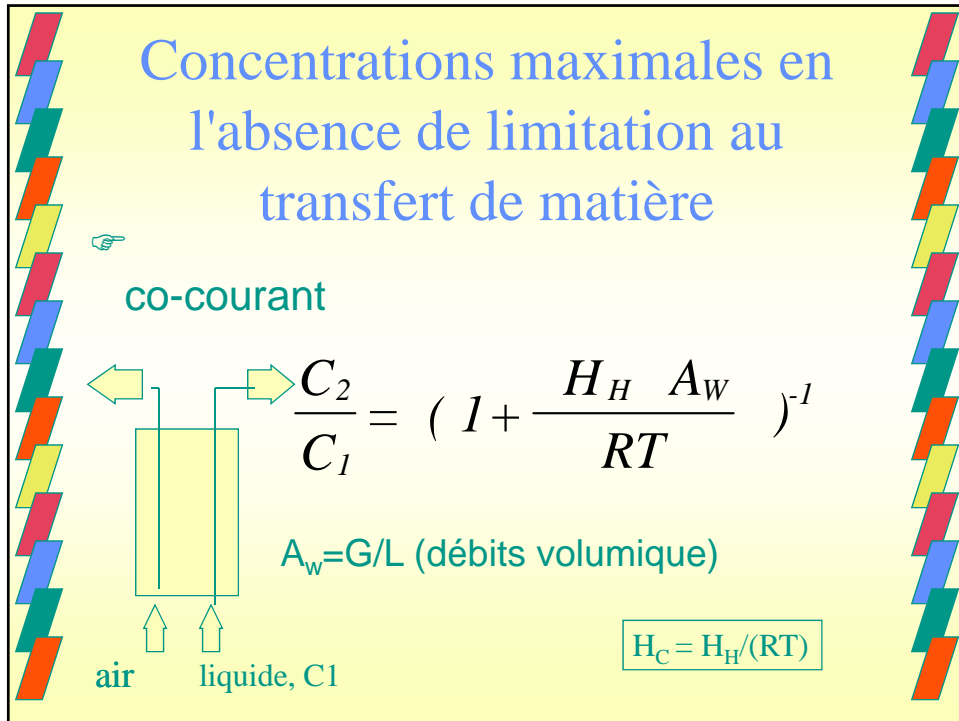
Dégazage des COV

Dégazage en co-courant



Le dégazage ou Stripping des COV dépend:

- ☞ de l'équilibre thermodynamique gaz-liquide du composé, caractérisé par la loi de Henry (solubilité vs pression) (jusqu'où on peut aller)
- ☞ des performances de transfert de matière de l'équipement ($K_L a$) (vitesse avec laquelle on atteint l'équilibre)



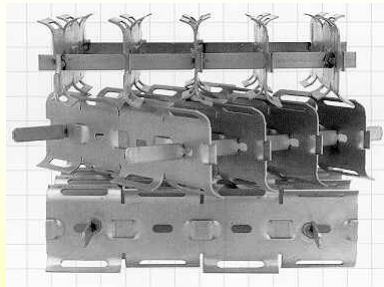
Dégazage en colonne garnie

- ☞ contre-courant (plus efficace que co-courant)
- ☞ le garnissage augmente la surface d'échange gaz-liquide
- ☞ anneau rachig, selles ...
(voir <http://users.lia.net/katmar/pcol.htm#download> et récupérer le logiciel)
- ☞ volume de colonne nécessaire fonction du COV, $k_L a$, débit

Colonne avec garnissage vrac



Colonne avec garnissage structuré



Volume de garnissage pour contre-courant:

$$V = H_P A_C = \frac{L}{K_L a} \frac{\text{Ln} \left[\frac{C_1}{C_2} - \frac{RT}{A_W H_H} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \right]}{1 - \frac{RT}{A_W H_H}}$$

☞ H_P : hauteur de garnissage

☞ A_C : section de la colonne

☞ $K_L a$ pour le COV donné dans le garnissage choisi

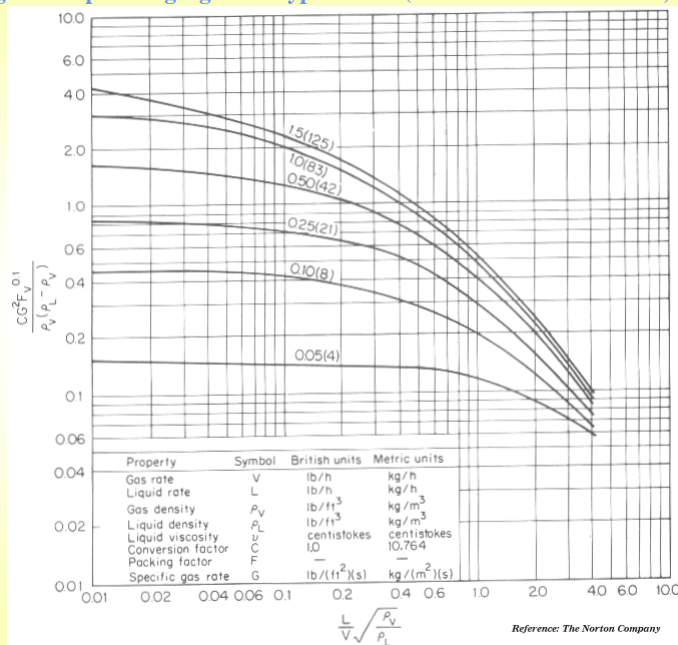
☞ $A_W = G/L$

☞ relation si pas de COV dans l'air d'entrée

Choix du diamètre de la colonne: éviter l'engorgement

- à l'engorgement, le liquide ne peut plus descendre, à cause d'une vitesse de gaz trop élevée.
- Corrélations GPDC (generalized pressure drop correlation; Sherwood, Eckert) utilisation du graphique p 5-9.2

Diagramme pour engorgement type GPDC (corrélation de Sherwood)



Variables X et Y du graphique:

$$X = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{0.5} = \frac{1}{A_w} \left(\frac{\rho_L}{\rho_g} \right)^{0.5}$$

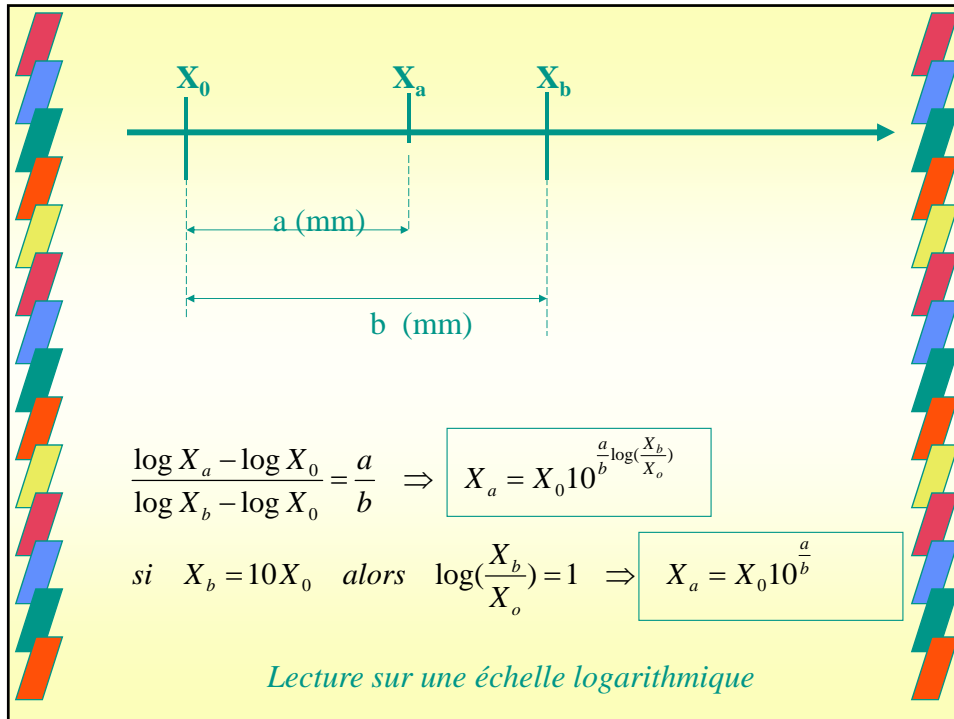
$$Y = \frac{G'^2 F \mu^{0.2}}{\rho_g \rho_L g} \quad \Rightarrow \quad G' = \left(\frac{Y \rho_g \rho_L g}{F \mu^{0.2}} \right)^{0.5}$$

« Packing Factor » F

Packing Factors for Column Packings

Packing Type	Material	Nominal Packing Size, in												
		1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3	3 1/2		
Hy-Pak	Metal						43					18		15
Super Intalox Saddles	Ceramic						60					30		
Super Intalox Saddles	Plastic						33					21		16
Pall Rings	Plastic				97		52		40	24	22	16		
Pall Rings	Metal				70		48		33	20	37	16		
Intalox Saddles	Ceramic	725	330	200		145	92		52	40				
Raschig Rings	Ceramic	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	32			
Raschig Rings	Metal, 1/32 in	700	390	300	170	155	115							
Raschig Rings	Metal, 1/16 in			410	290	220	137	110	83	57				
Berl Saddles	Ceramic	900		240		170	110		65	45				
Tellerettes	Plastic						38			19				
Mas Pac	Plastic									32				20
Quartz Rock										160				
Cross Partition	Ceramic											80		
Flexipac	Metal						33			22				16
Interlox	Metal						41			27				18
Chempak	Metal						29							

<http://www.cheresources.com/packcolzz.shtml>



Méthode de résolution:

- ☞ on calcule X
- ☞ on choisit une perte de charge dans la colonne (ou conditions d'engorgement)
- ☞ on lit Y sur le graphique
- ☞ on en déduit G' (flux de gaz) (et on travaille à 70% des conditions d'engorgement)
- ☞ on trouve la section (connaissant le débit volumique de gaz G):

$$A_C = \frac{\rho_G G}{G'} \quad \text{et} \quad A_C = \frac{\pi D_C^2}{4}$$

Comparaison des $K_L a$ des COV avec celui de l'oxygène

☞ avec $K_L a$

$$\Psi_M = \frac{(K_L a)_{COV}}{(K_L a)_{O_2}}$$

☞ avec $k_L a$

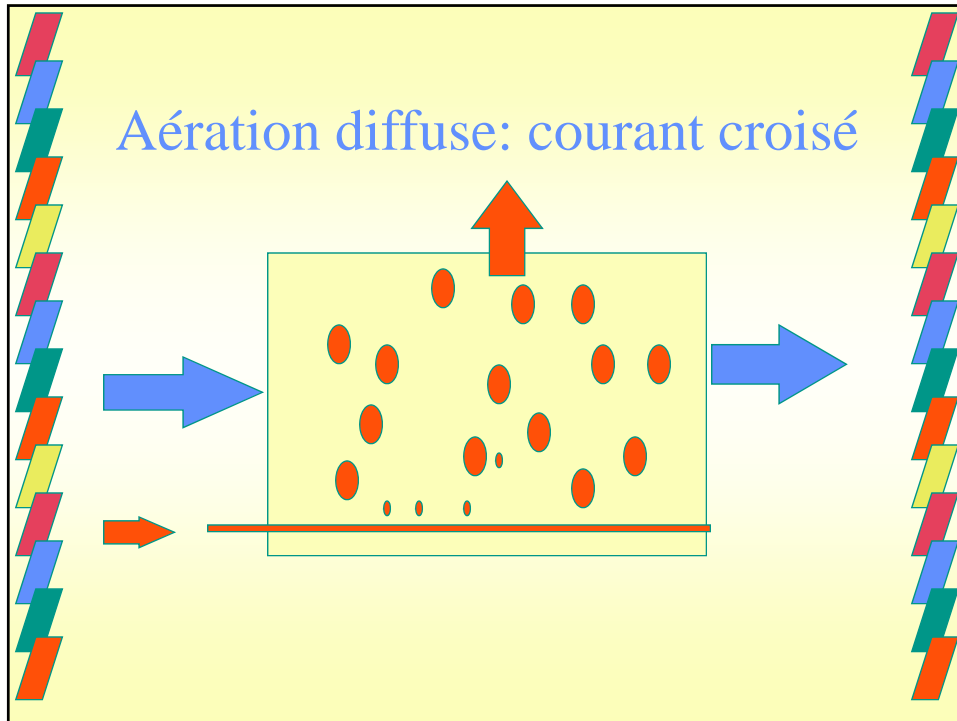
$$\Psi = \frac{(k_L a)_{COV}}{(k_L a)_{O_2}}$$

Dégazage en bassin d'aération:

☞ Aération de surface:

$$Q(C_{L,in} - C_{L,out}) = (K_L a)_{COV} V C_{L,out}$$

$$\frac{C_{L,out}}{C_{L,in}} = [1 + \psi_M (K_L a) \left(\frac{V}{Q}\right)] = [1 + \psi_M (K_L a)_{O_2} t_{ret}]$$



☞ aération diffuse:

$$\frac{C_{Lout}}{C_{Lin}} = \left[1 + \frac{Q_g}{Q_L} (Hc)_{COV} (1 - e^{-\phi}) \right]^1$$

$$\phi = \frac{(K_L a)_{COV} V}{Hc Q_G} = \frac{\psi_M (K_L a)_{O_2} V}{Hc Q_G}$$

Q_G : débit volumique de gaz