

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 107 (1981)
Heft: 8

Artikel: Mesure de la surface spécifique a dans une colonne à bulles
Autor: Wahl, Jacques
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74314>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mesure de la surface spécifique a dans une colonne à bulles

par Jacques Wahl, Lausanne

Ce travail a eu pour but essentiel la mise en œuvre d'un procédé physico-chimique permettant la caractérisation d'un réacteur gaz-liquide.

L'objectif recherché a été la mesure du paramètre a : surface spécifique ou surface de contact entre phases liquide et gazeuse.

1. Prologue

Qui n'a jamais observé la nuée de bulles de gaz carbonique qui montent à la surface lors de l'ouverture d'une bouteille d'eau gazeuse? Seriez-vous capable de les compter ou encore d'évaluer la surface globale de cette multitude?

Non, évidemment, et là où cette connaissance n'intéresse pas le buveur, elle est très recherchée par certains chimistes.

Pour comprendre cet intérêt, il faut considérer dorénavant non pas une bouteille, mais un réacteur où se réalise un échange gaz-liquide. Cet échange consiste en un transfert de matière, généralement du gaz dans le liquide. La grandeur de cet échange à laquelle est liée l'efficacité du réacteur est directement proportionnelle (entre autres variables) à la surface de contact entre les deux phases; voyons pourquoi. Lors de la chloration du benzène, par exemple, les molécules gazeuses de chlore doivent pénétrer dans le benzène liquide pour y réagir (fig. 1).

Le bon réacteur est celui où ces processus (pénétration, réaction) auront lieu rapidement, d'où la nécessité d'un transfert de matière rapide. On comprend aisément que ce dernier sera d'autant favorisé si la surface de contact entre phases est grande. Par conséquent, le bon réacteur sera caractérisé par une haute surface spécifique a .

Un type d'appareil où ont lieu ces échanges est la *colonne à bulles* (figures 2 et 3). Outre ses applications en tant que fermenteur, la colonne à bulles peut se rencontrer dans des installations de lavage de gaz.

2. Mesure de la surface spécifique a

Plusieurs méthodes s'offrent à l'expérimentateur recherchant « a »:

- 1) à l'aide de sondes [1]¹
- 2) chimique [2]
- 3) photographique [3]
- 4) par mesure de l'absorption de lumière [4]

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Définitions

Acide de Lewis: composés avec un atome ayant un octet incomplet — FeCl_3 — AlCl_3 — susceptibles d'accepter une paire d'électrons et couramment employés comme catalyseur de réactions organiques.

Force ionique: elle s'exprime en ion-gramme par unité de volume, se calcule par l'expression suivante

$$\frac{1}{2} \sum C_i z_i^2$$

(C_i concentration du ion i , z_i sa charge), concerne les ions en solution et intervient ici dans le calcul de la solubilité des gaz dans le mélange considéré.

Hold-up: volume opérationnel de liquide ou de gaz dans une dispersion.

Ces deux dernières méthodes mettant en jeu des intensités lumineuses variables, elles ne peuvent être appliquées qu'à des milieux translucides (sauf s'il s'agit de photographies aux rayons X).

La méthode chimique fut appliquée lors de notre mesure. Sa simplicité technique est son plus grand avantage. Par contre, il est nécessaire de résoudre au préalable de nombreux problèmes liés au maintien des conditions physiques (pression, température, débits) et chimiques (concentration des réactifs et réactants). Le maintien de ces conditions en cours d'expérience est primordial, car la forme des relations décrivant le phénomène de l'échange en dépend.

Les moyens à mettre en œuvre sont les suivants:

- 1) une colonne à bulles et son environnement.

La colonne est constituée par cinq éléments identiques de 25 cm chacun (\varnothing 16 cm). Un élément comprend un plateau comportant des orifices par lesquels passera le gaz; une alimentation et une vidange pour le liquide. Une cage en plexi-

L'article de M. Wahl a été choisi par le Groupe des ingénieurs de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA) parmi les travaux de diplôme à l'EPFL pour être publié. Ce texte a été revu et contrôlé par le professeur Urs von Stockar, de l'EPFL, auprès de qui le travail de diplôme correspondant a été effectué.

glas thermostatée, une soufflante assurant la ventilation interne de la colonne, une colonne à garnissage saturant le gaz et une installation hydraulique sont les éléments essentiels de l'environnement (fig. 2);

- 2) un système gaz-liquide (c'est-à-dire un gaz réagissant avec un réactif dans le liquide, l'ensemble nous servant de système modèle afin de caractériser notre colonne à bulles).

Il doit répondre à certaines exigences, à savoir:

- que la réaction chimique ayant lieu soit unique et sa constante de vitesse connue;
- que certaines grandeurs physiques caractéristiques du gaz soient connues;

- 3) du matériel d'analyse nécessaire pour connaître les compositions respectives du gaz et du liquide prélevés en différents points de la colonne.

Par voie chimique, le calcul de a dépend d'abord de l'acquisition de grandeurs qui sont:

- a) la variation de concentration d'un réactif;
- b) la pression du gaz absorbé à chaque étage de la colonne et la pression de travail;
- c) les températures de travail;
- d) les débits des fluides.

Le travail pratique de ce diplôme a consisté à modifier une colonne à bulles, à agencer une installation de telle manière à rendre possible l'acquisition des grandeurs susmentionnées.

3. Aspects théoriques

Un des premiers modèles hydrodynamiques ayant été proposé pour l'investigation des phénomènes de transport est le modèle du film [2] [5].

Il suppose qu'il existe à l'interface des fluides un film liquide stagnant d'épais-

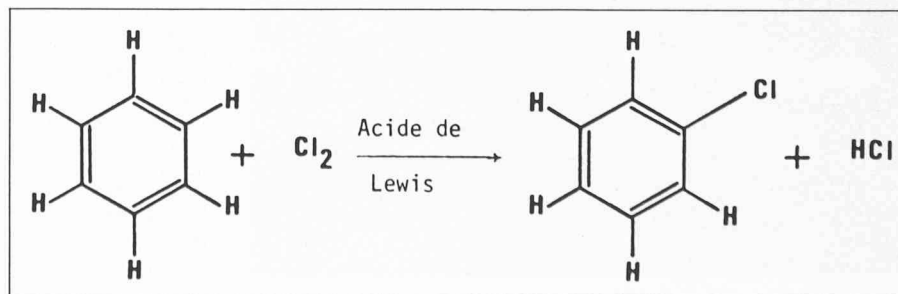


Fig. 1. — Chloration du benzène.

seur δ au travers duquel le transport de matière s'effectue par simple diffusion moléculaire. On considère ce transfert à l'état stationnaire ou

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0$$

ou encore que le gradient de concentration dans le film est constant, lorsqu'il n'y a pas de réaction chimique.

La loi de Fick relie le profil de concentration au flux de matière (fig. 4):

$$N_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad \frac{\text{mole}}{\text{m}^2 \text{ s}} \quad (1)$$

C_A = concentration molaire de A en un point du film

D_{AB} = coefficient de diffusion de A dans B $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$

z = épaisseur dans le film.

En intégrant (1) et en introduisant S_T (surface totale de contact), on peut écrire:

$$N_A^* = \frac{D_{AB}}{\delta} S_T (C_{A_i} - C_{A_o}) \quad (2)$$

avec k_{A_1} = coefficient de transfert de matière A en phase liquide $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

$$N_A^* = k_{A_1} S_T (C_{A_i} - C_{A_o}) \quad (3)$$

Cette équation décrit le flux du soluté du gaz dans le liquide lorsqu'il n'y a pas de réaction. Bien que

$$a = \frac{S_T}{V_L} \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (V_L \text{ est mesurable})$$

a ne peut pas être déduit de (3) car la valeur de δ est inconnue.

Lorsque nous sommes en présence d'une absorption accompagnée d'une réaction chimique, il y a compétition entre cette dernière et la diffusion moléculaire.

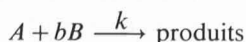
En reprenant notre exemple (la chloration du benzène), les molécules gazeuses de chlore passant à travers l'interface se déplacent par diffusion moléculaire dans la couche limite (le film) mais peuvent également réagir avec le liquide en cours de route. La conséquence en sera une augmentation apparente de la vitesse de transfert. Les profils de concentration deviennent des courbes.

Le bilan différentiel massique exprimant la diffusion moléculaire et la réaction chimique simultanées s'écrit:

$$D_A \frac{d^2 C_A}{dz^2} = R_A \quad (4)$$

$$[R_A] = \frac{\text{mole}}{\text{m}^3 \text{ s}}$$

D'autre part, nous avons la réaction



$$-R_A = k C_A C_B = -\frac{1}{V_L} \frac{dN_A}{dt} \quad (5)$$

(deuxième ordre)

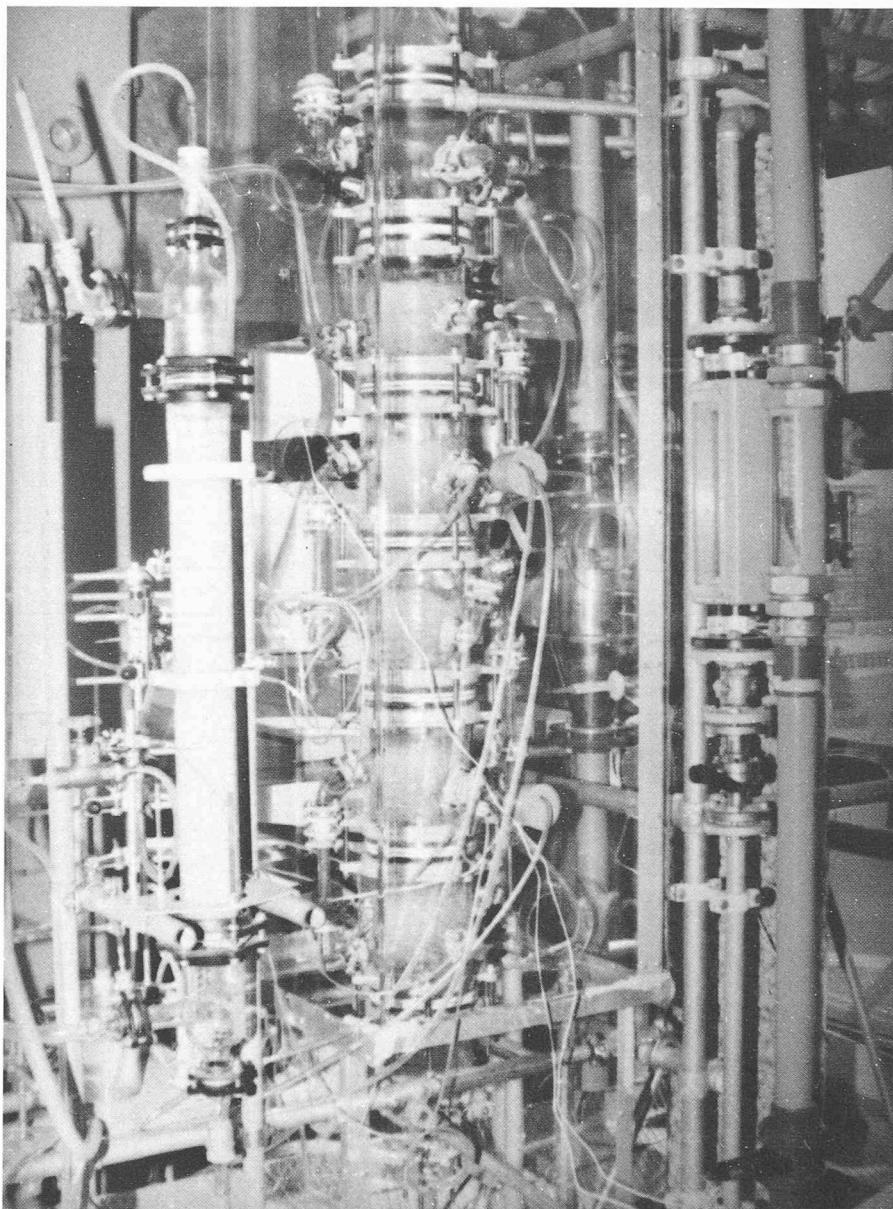


Fig. 2. — Vue générale des colonnes: colonne d'humidification et de thermostatisation; colonne à bulles.

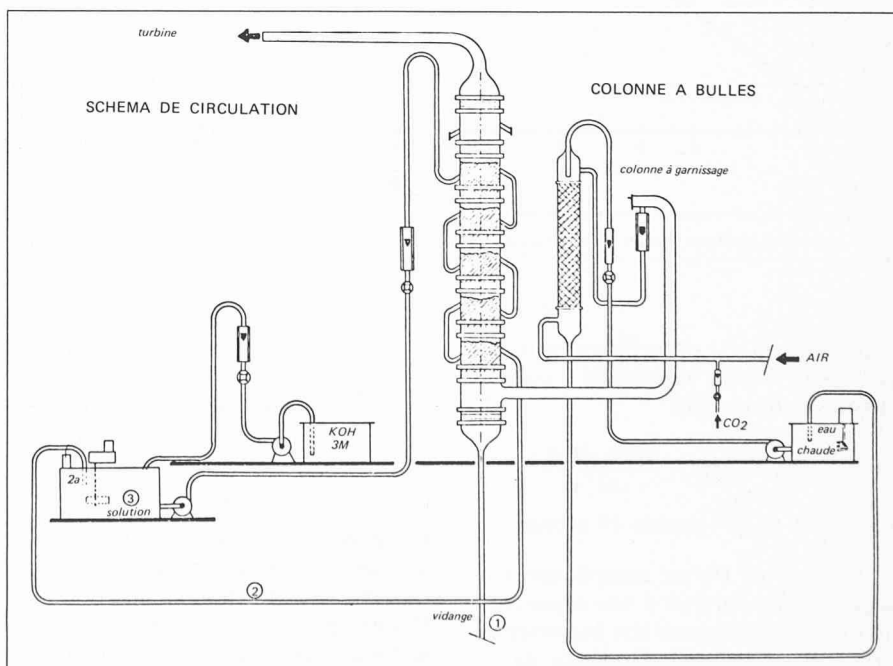


Fig. 3. — Schéma de circulation. Afin d'éviter toute évaporation sur le plateau inférieur de la colonne à bulles par le gaz entrant, on sature et thermostatisé ce dernier par contact avec de l'eau chaude dans une petite colonne à garnissage.

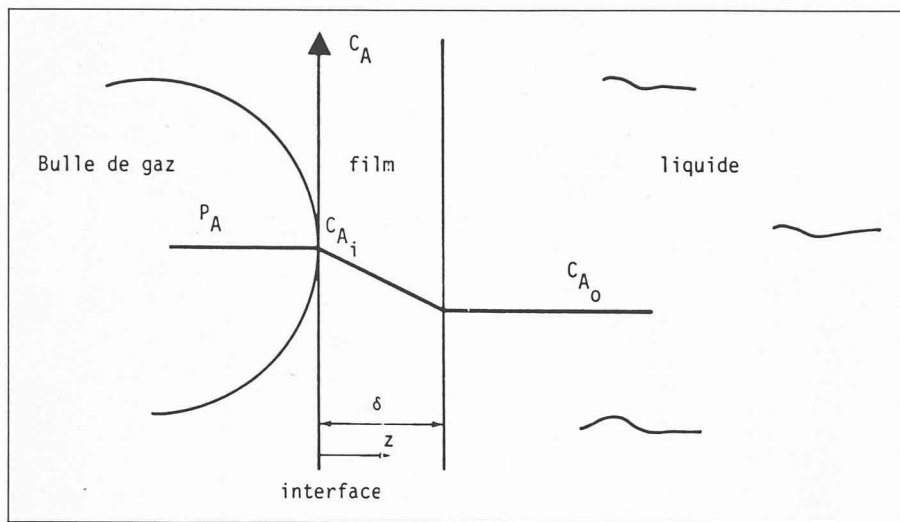


Fig. 4. — Profil de concentration.

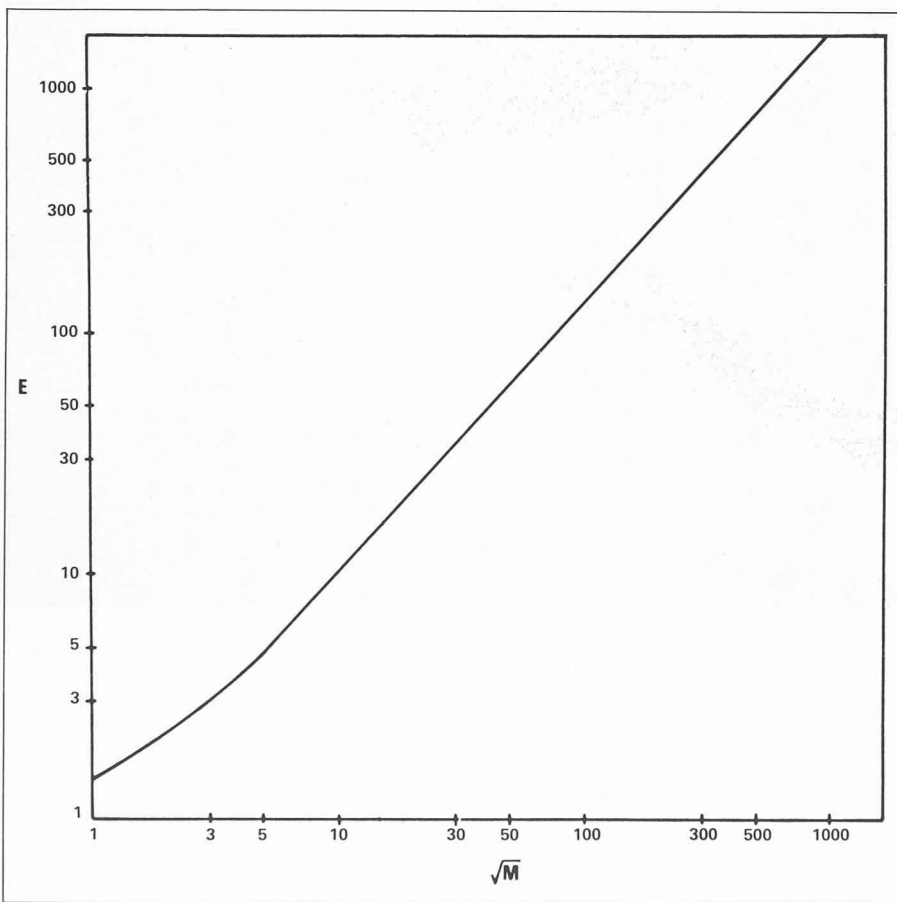


Fig. 5. — «Enhancement factor» en fonction du rapport M .

Cependant, si C_B est suffisamment élevée pour être considérée comme constante, R_A devient

$$-R_A = k_1 C_A \frac{\text{mole de A}}{\text{cm}^3 \text{ s}}$$

avec $k_1 = k C_B$ (pseudo 1^{er} ordre).

La solution de (4) est compliquée. Cependant afin d'arriver à une expression similaire à (2) elle peut être exprimée en termes d'accélération apparente de vitesse de transfert (fig. 5).

Le «Enhancement factor» est défini par le rapport suivant:

$$E = \frac{\text{vitesse de l'absorption avec réaction}}{\text{vitesse de l'absorption physique sans réaction}} = \frac{R''_A}{k_1 C_{A_i}} \quad (6)$$

Il représente donc le facteur par lequel la vitesse d'absorption physique est accélérée par la réaction chimique. D'autre part cette accélération dépend de l'importance relative de deux processus en concurrence, à savoir:

— la vitesse de diffusion moléculaire dans le film,

— la vitesse de réaction dans le film.

Cette importance relative est exprimée par le rapport M .

$$M = \frac{\text{conversion maximale possible dans le film}}{\text{vitesse de diffusion maximale au travers du film}} = \frac{k C_B D_{A_1}}{k_{A_1}^2} \quad (7)$$

La dépendance de E de M est donnée par la fig. 5.

$$E = \sqrt{1 + M}$$

Considérons les deux cas limites de transfert:

- 1) \sqrt{M} est très petit: les molécules ne réagissent pratiquement pas dans la couche limite $E = 1$ pas d'accélération;
- 2) \sqrt{M} est très grand: les molécules réagissent dans la couche limite et ne pénètrent donc pas dans la solution. Ce régime de travail est judicieux pour la mesure chimique de a , car c'est à cette seule condition que N_A est indépendant de δ , ce dernier n'étant jamais connu.

$$\text{Résultat: } E = \sqrt{M} \quad (8)$$

En combinant (6) (7) et (8) on obtient

$$R''_A = C_{A_i} \sqrt{(D_{A_1} k C_B)} \quad (9)$$

où R''_A est le flux de transfert de masse en $\frac{\text{mole}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$

La solution finale de (4) sera

$$R_A = R''_A \cdot a$$

$$a = \frac{R_A}{C_{A_i} \cdot \sqrt{(D_{A_1} \cdot k C_B)}} \quad (10)$$

4. Travail pratique

Avant de présenter quelques mesures qui permettent de calculer a , donc de caractériser cette colonne à bulles, il est encore nécessaire de connaître tous les paramètres intervenant dans (10) tels que la solubilité du gaz dans le liquide, le coefficient de diffusivité, la constante de vitesse k , etc.

Choix des systèmes gaz-liquide:

- A) un mélange gazeux air- CO_2 réagissant avec une solution alcaline $\text{KOH} - \text{K}_2\text{CO}_3$
 $\text{CO}_2 + 2 \text{OH}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
- B) l'air (l'oxygène) avec une solution aqueuse de $\text{Na}_2\text{SO}_3 - \text{NaHCO}_3$ en présence d'un catalyseur
 $2 \text{SO}_3^{2-} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{CO}_2^+} 2 \text{SO}_4^{2-}$

R_A est connue en mesurant par titrage la variation de la concentration de CO_3^{2-} en fonction du temps dans le cas A) et de même pour SO_3^{2-} dans le cas B). Lors de ce diplôme, nous avons concentré nos efforts sur des mesures de a à l'aide du système gaz-liquide A). Nous

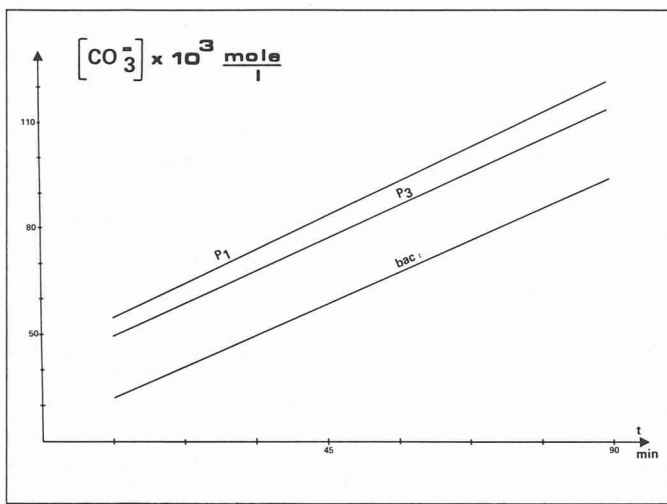


Fig. 6. — Concentration du carbonate en fonction du temps (1^{er} exemple).

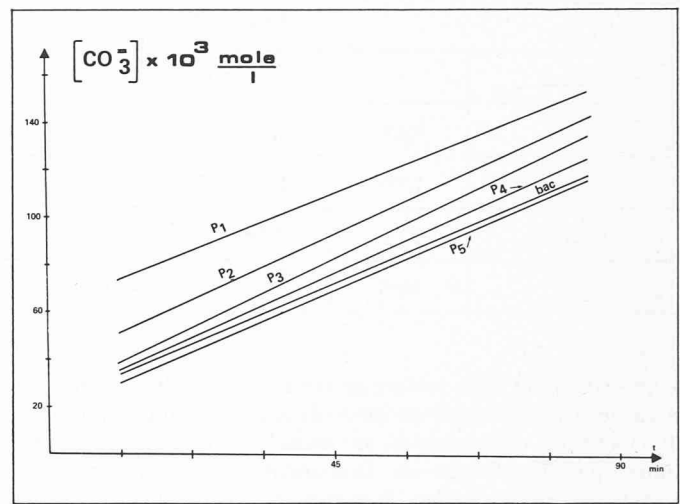


Fig. 7. — Concentration du carbonate en fonction du temps (2^e exemple).

nous limiterons ici à donner les résultats de deux séries de mesures.

La colonne fonctionne en régime pseudo-stationnaire; les flux gazeux et liquide sont maintenus à des valeurs constantes.

Il y a deux manières de calculer a :

— soit en établissant un bilan massique global calculé sur toute la colonne:

$$a_{ov1}$$

— soit en établissant un bilan massique par plateau: a_{ov2}

1^{er} exemple:

$$T = 30^\circ C$$

$$\text{Débits: } \dot{V}_g = 44,9 \text{ l/min;}$$

$$\dot{V}_{CO_2} = 1,350 \text{ l/min;}$$

$$\dot{V}_l = 68,0 \text{ l/h}$$

Calcul de a_{ov1}

$\Delta [CO_3^{2-}] = 2,53 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mole}}{\text{l}}$. Différence de concentration du carbonate entre le bac et le plateau du bas (cf. fig. 3).

$$V_L = 14669 \text{ cm}^3$$

$$R = \frac{\dot{V}_l \cdot \Delta [CO_3^{2-}]}{V_L \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 3,258 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mole}}{\text{cm}^3 \text{ s}}$$

$$\text{Rappel: } a = \frac{R}{C_{CO_2}^* (k_{OH^-} [OH^-] D_{CO_2})^{1/2}}$$

La connaissance de $[CO_3^{2-}]$ est indispensable pour le calcul de la force ionique², elle-même intervenant dans celui de la solubilité $C_{CO_2}^*$ (fig. 6).

$$a_{ov1} = 1,028 \text{ cm}^{-1} \text{ (moy. log.)}$$

Calcul de a_{ov2} à 65 minutes

Les échantillons liquides et gazeux sont prélevés au niveau de chaque plateau le plus rapidement possible. En effet, les concentrations des réactifs variant au sein de la colonne en fonction du temps, les bilans massiques seraient faux s'ils n'étaient pas calculés sur la base de données représentant un état instantané du système (Tableau II).

² Voir Répertoire en fin d'article.

TABLEAU I

Temps minutes	$[CO_3^{2-}]$	$k_{OH^-} \cdot 10^7$	$C_{CO_2}^* \cdot 10^4$	$a_{ov1} (\text{cm}^{-1})$
30	0,0557	1,498	2,76	1,031
60	0,0804	1,513	2,76	1,026
75	0,0928	1,520	2,76	1,024

TABLEAU II

Plateau	1	2	3	4	5
$R \cdot 10^8 (\text{mole/cm}^3 \text{ s})$	4,486	3,985	4,857	2,679	3,115
$a_i (\text{cm}^{-1})$	1,130	1,178	1,714	0,962	1,340
$V_i (\text{cm}^3)$	3105	2844	2929	2844	2887
$a_i V_i (\text{cm}^2)$	3576	3350	5020	2735	3868

TABLEAU III

Temps minutes	$[CO_3^{2-}] 10^2$	$k_{OH^-} \cdot 10^7$	$C_{CO_2}^* \cdot 10^4$	$a_{ov1} (\text{cm}^{-1})$
30	7,271	1,508	2,187	1,378
45	8,98	1,517	2,187	1,403
60	10,67	1,528	2,188	1,469
75	12,36	1,538	2,188	1,759

$$a_{ov2} = \frac{\sum (a_i V_i)}{\sum V_i} = \frac{18549,0}{14668,4} \approx 1,27 \text{ cm}^{-1}$$

2^e exemple:

$$T = 30^\circ C$$

$$\text{Débits: } \dot{V}_g = 52,8 \text{ l/min;}$$

$$\dot{V}_{CO_2} = 1,584 \text{ l/min;}$$

$$\dot{V}_l = 68,8 \text{ l/h}$$

Calcul de a_{ov1}

$\Delta [CO_3^{2-}] = 3,918 \cdot 10^{-2} \text{ mole/l}$: bilan de masse

$$V_L = 13859 \text{ cm}^3$$

$$R = \frac{68,8 \cdot 3,918 \cdot 10^{-2}}{13859 \cdot 3600} = 5,403 \cdot 10^{-8} \text{ mole/cm}^3 \text{ s}$$

(tableau III).

$$a_{ov1} \text{ moy. log.} = 1,560.$$

Calcul de a_{ov2} à 45 minutes

$$\frac{\sum (a_i V_i)}{\sum V_i} = \frac{25175}{14667} = 1,716 \text{ cm}^{-1}$$

= 1,716 cm^{-1} (fig. 7).

5. Commentaires

Afin de mieux réaliser la signification de ces quelques résultats, reconsidérons-les rapidement:

Exemple	I	II
$\dot{V}_g (\text{l/min})$	44,9	52,8
$a_{ov1} (\text{cm}^{-1})$	1,028	1,560
$a_{ov2} (\text{cm}^{-1})$	1,27	1,716

TABLEAU IV

Plateau	1	2	3	4	5
$R \cdot 10^8$	8,430	7,895	9,219	3,902	3,468
a_i	1,593	1,737	1,881	1,613	1,765
V_i (cm ³)	3079	2908	2908	2886	2886
$a_i V_i$	4905	5051	5470	4655	5094

L'augmentation de la surface de contact a va de pair avec celle du débit de gaz \dot{V}_g . La vitesse de passage du gaz étant limitée par les forces de frottements s'exerçant sur les bulles, il y aura accroissement du nombre de ces dernières pour «véhiculer» un volume accru de gaz par unité de temps, par conséquent le volume gazeux dans la colonne sera d'autant plus grand que le débit de gaz sera plus élevé. Cette augmentation de volume gazeux est facilement connue par mesure du «hold-up»³. Notons encore que le diamètre des bulles est admis constant.

La variation entre a_{ov1} et a_{ov2} d'un même exemple donne l'ordre de grandeur de la précision de la méthode. Cette différence est due aux approximations de calcul des paramètres physico-chimiques, tels que solubilité, diffusivité, constante de vitesse, etc., d'une part, et d'autre part à l'incertitude sur les grandeurs mesurées telles que concentration des réactants et réactifs, volumes et débits.

Les valeurs de a sont faibles en comparaison avec celles d'autres types de réacteur:

Type	a [m ⁻¹]
colonne à garnissage	1200
colonne à plateau	1000
cuve agitée	200
colonne à bulles	20

Dans l'exemple I, nous avons une valeur voisine de 100 m⁻¹ témoignant du bon comportement de notre colonne à bulles.

A part la méthode chimique, d'autres techniques ont été appliquées, notamment la photographie et la mesure de la dispersion de lumière.

La méthode chimique est souvent appliquée comme référence, mais sa mise en œuvre est lente. D'autre part, les résultats sont spécifiques au système chimique choisi, et ne donnent aucune information quant à la forme des bulles, leur taille, la distribution de leur taille, contrairement à la photographie [3] [6].

6. Epilogue

L'objet essentiel de ce travail fut d'une part le choix d'un système chimique et

l'établissement de conditions expérimentales qui nous permettent d'acquiescer les grandeurs nécessaires au calcul de a , et d'autre part la mise en œuvre de ce système. La réalisation pratique d'un modèle théorique ne va pas sans poser de nombreux problèmes de construction, de fonctionnement et de contrôle.

Ce dernier poste nous a rapidement montré que le fonctionnement en régime stationnaire (par charge, le gaz seul circulant) n'était pas compatible avec le modèle théorique. En effet, la réaction chimique étant très rapide, la concentration du réactif OH⁻ diminuait trop rapidement à des valeurs ne permettant plus de considérer une cinétique de pseudo-premier ordre. Par conséquent, la circulation des deux fluides s'est imposée ainsi qu'une addition constante de réactif concentré!

La constance de nombreux paramètres physiques et chimiques fut préalablement nécessaire afin de pouvoir tenir compte des mesures effectuées. Ces dernières nous ont montré, par comparaison avec celles obtenues par des procédés différents, que l'application du modèle théorique était une réalité et que la méthode pourrait dorénavant être appliquée lors de la recherche de a .

Bibliographie

- [1] BURGESS, J. M., CALDERBANK, P. H., *Chem. Eng. Sci.* 30, 743-750 (1975).
- [2] DANCKWERTS, P. V., SHARMA, M. M., *Chem. Engr. CE 244 - CE 276*, October 1966.
- [3] LANDAU, J., BOYLE, J., GOMAA, H. G., AL TAWHEEL, A. M., *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55, 13-18 (1977).
- [4] McLAUGHLIN, C. M., RUSHTON, J. H., *AIChE Journal*, 19, 817-822 (1973).
- [5] ASTARITA, G., «*Mass Transfer with Chemical Reaction*», Elsevier Publishing Co., New York (1967).
- [6] CALDERBANK, P. H., *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 443 (1958).

Adresse de l'auteur:

Jacques Wahl
ing. chimiste EPFL
Institut de génie chimique
EPFL-Ecublens
1015 Lausanne

Répertoire des symboles et unités

A	Réactant A .
a	Surface spécifique interfaciale (cm ⁻¹ ou m ⁻¹).
a_{ov1}	Surface spécifique interfaciale calculée à partir des moyennes logarithmiques (cm ⁻¹).
a_{ov2}	Surface spécifique interfaciale calculée à partir des a_i (cm ⁻¹).
a_i	Surface spécifique interfaciale calculée sur le plateau (cm ⁻¹).
B	Réactant B .
b	Nombre stoechiométrique (mole).
C_{A0}	Concentration de A dans la solution (mole/l ou mole/cm ³).
C_{Ai}	Concentration à l'interface de A (mole/l ou mole/cm ³).
C_A	Concentration de A (mole/l ou mole/cm ³).
C_A^*	Solubilité de A dans la solution à l'interface (mole/cm ³).
C_B	Concentration de B (mole/cm ³ ou mole/l).
D_A	Diffusivité de A (cm ² /s).
D_{AB}	Diffusivité de A dans B (cm ² /s).
D_{A1}	Diffusivité de A en phase liquide (cm ² /s).
D_{CO_2}	Diffusivité de CO ₂ en phase liquide (cm ² /s).
E	Enhancement factor (-).
E_i	Enhancement factor pour une réaction instantanée (-).
k	Constante de vitesse de réaction du 2 ^e ordre (cm ³ /s mole).
k_{OH^-}	Constante de vitesse de la réaction d'absorption du CO ₂ (cm ³ /s mole).
k_{A1}	Coefficient de transfert de matière de A en phase liquide (m/s ou cm/s).
k_l	Coefficient de transfert de matière en phase liquide (cm/s).
M	Facteur de conversion dans le film (-).
N_A	Flux de A (mole/m ² s).
N_A^*	Débit de A (mole/s).
P_A	Pression partielle de A (atm ou pascal).
R_A	Vitesse d'absorption (mole/cm ³ s).
R_A^*	Vitesse globale d'absorption (mole/cm ² s) ou flux de transfert de masse.
S_T	Surface totale de contact entre phase liquide et gazeuse (m ²).
T	Température (°C ou K).
u	(Vecteur) vitesse (m/s).
V_L	Volume total de la solution (cm ³ ou m ³).
V_i	Volume de la solution sur le plateau i (cm ³ ou m ³).
\dot{V}_g	Débit de gaz (l/min).
\dot{V}_{CO_2}	Débit de CO ₂ (l/min).
\dot{V}_l	Débit de la solution (l/h).
z	Abscisse dans la solution (origine à l'interface).
δ	Epaisseur du film (cm).
Δ	Variation d'une variable.
Σ	Somme des variables.

³ Voir Définitions.