

Amélioration du rendement de la culture des microalgues par la désaturation du dioxyde de carbone

D. BONGO^{1*}, M. SOULTAN², D. ALLASSEM², M. Y. KHAYAL², S. GAYE³ et J. Y. CHAMPAGNE⁴

¹ Institut Nationale des Sciences et Techniques d'Abéché, Tchad

² Facultés des Sciences Exactes et Appliquées Université de N'Djamena, Tchad

³ Laboratoire des Matériaux et Energétique LME, Institut Universitaire de Technologie Thiès, Sénégal

⁴ Laboratoire des Mécaniques des Fluides et Acoustique INSA-Lyon, France

* Correspondance, courriel : djimako.b5@gmail.com

Résumé

Le travail consiste à appréhender le mécanisme de transfert de masse gaz-liquide, en utilisant une colonne air-lift pour la désaturation du dioxyde de carbone. Pour cela, nous avons suivi l'évolution au cours du temps de la dissolution et caractérisé son comportement dans la cuve et dans la colonne en fonctionnement. La procédure consiste à effectuer les mesures de la saturation, de la température et de la concentration au cours du temps et ce tout au long de l'expérience. Les résultats obtenus montrent que le phénomène de dissolution s'accompagne d'une réaction chimique conduisant à la formation des espèces (préciser de quelles espèces). Par ailleurs, grâce à leur capacité de fixation du CO₂, les microalgues contribuent à réduire l'émission des gaz à effet de serre.

Mot-clés : *colonne air-lift, transfert de masse, désaturation, microalgues.*

Abstract

Improvement of the efficiency on the culture of micro seaweeds by the desaturation of the carbon dioxide

This work consists in investigating the mechanism of transfer of mass gas-liquid, by using a column air-topspin for the carbon dioxide. For that purpose, we follow the evolution of the dissolution in order to characterize its behavior in the tank and in the column during the process progression. The procedure consists in measuring experimentally saturation, temperature and concentration as functions of time. The obtained results show that the phenomenon of dissolution is achieved through a chemical reaction leading to the formation of the chemical species. Besides, micro seaweeds thanks to their ability to fix CO₂ contribute to the reduction of greenhouse gases.

Keywords : *air-lift, transfer of mass, desaturation, numerical prediction, seaweeds.*

Nomenclature

H_2CO_3	Acide carbonique
HCO_3^-	Bicarbonate
CO_3^{2-}	Carbonate
CO_2	Carbone inorganique dissout
HCO_2	Constante de Henry (L.atm / mol)
$[CO_2]$	Concentration de CO_2 (mg / L)
$[CO_2]d$	Concentration de CO_2 dissout dans le liquide (mol / L)
K	Constante de dissociation
pK	Constante d'acidité
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_{2aq}	Dioxyde de carbone aqueux
H^+	Ion hydrogène
P_{CO_2}	Pression partielle de CO_2 dans le gaz (atm)
P	Pression (mbar)
pH	Potentiel hydrogène
T	Température ($^{\circ}C$)

1. Introduction

La Lutte contre le réchauffement climatique est l'un des défis majeurs du 21^{ème} siècle. Le gaz carbonique (CO_2) est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique, provenant des émissions issues des activités industrielles à hauteur de 55 %. En 1997, plusieurs pays ont signé le protocole de Kyoto afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ces mesures ont été renforcées par les conclusions de la conférence sur le climat qui s'est tenue à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 [1]. Dans le cadre de ce travail, nous avons appliqué la technique d'air-lift pour la culture de la spiruline. Nous avons ainsi optimisé le taux de dissolution du CO_2 . Ce qui a permis de favoriser la photosynthèse et par conséquent l'accroissement de la consommation du CO_2 par la spiruline [2]. Conduisant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'un des principaux moyens pouvant limiter à grande échelle les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est le captage du CO_2 . Plusieurs techniques sont utilisées pour extraire le CO_2 dissout dans l'eau [3, 4]. Parmi ces solutions, nous avons envisagé de mettre en place les procédés de traitement au niveau des sources fixes concentrées en CO_2 comme les raffineries, les cimenteries ou encore les centrales thermiques [5]. Parmi celles-ci, nous avons choisi la technique de colonne air-lift qui consiste à injecter des bulles de gaz dans un fluide. La colonne à dépression air-lift est utilisée dans plusieurs domaines dont l'aquaculture d'une part et dans les traitements des eaux usées issues des bassins d'élevage chargées en matières organiques et azotées. Par ailleurs, l'air-lift est utilisé dans la récolte des microalgues (spiruline), qui, entraînées par de fines bulles de CO_2 , forment une écumage-moussage dans sa bi-cône sous l'effet de la dépression créée par une pompe à vide.

2. Méthodologie

Le dispositif expérimental utilisé est la colonne air-lift (**Figure 1**), qui permet de mettre en jeu un écoulement diphasique accompagné d'un phénomène de transport et d'échange entre la phase liquide et la phase gazeuse. Il est constitué d'une colonne 1 dans laquelle une cloison a été introduite pour canaliser l'écoulement des

phases liquides et gazeuses. L'injection de gaz se fait dans l'un des compartiments permettant ainsi de modifier la densité apparente et l'expansion du fluide diphasique. Ce qui provoque la circulation de la phase liquide initialement immobile. L'air-lift comprend quatre compartiments :

- Compartiment 1 : partie aérée où le fluide se déplace dans un mouvement ascendant ;
- Compartiment 2 : partie où la direction de circulation au-dessus du premier compartiment est modifiée. Le liquide redescend ainsi vers le 3^{ème} compartiment alors que la majeure partie du gaz s'échappe par le sommet de la colonne ;
- Compartiment 3 : partie non aérée où la phase liquide se déplace dans un mouvement descendant ;
- Compartiment 4 : partie où la direction du liquide qui revient vers le premier compartiment est modifiée. Il est ainsi évacué vers un système externe.

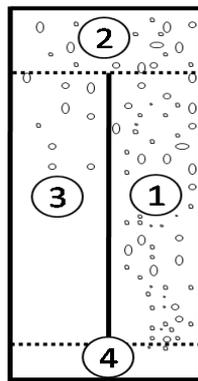


Figure 1 : *Colonne air lift liné (2003)*

Afin de mieux comprendre le phénomène de transfert de masse entre les deux phases, et de le quantifier, deux expériences ont été réalisées au niveau de la cuve 1 et de la colonne à dépression 2 en fonctionnement pour étudier la désaturation du dioxyde de carbone avec de l'air en eau douce (**Figure 2**). L'injection d'un CO₂ pur à 99.7 % provenant d'une bouteille industrielle (**Figure 3, Photo 6**) par un diffuseur de fines bulles se fait de la même façon pour les deux expériences. La sonde pH (**Photo 4**) et la sonde CO₂ (**Photo 5**) sont plongées dans la cuve pour permettre de relever les différents paramètres (temps, PH, concentration du milieu).

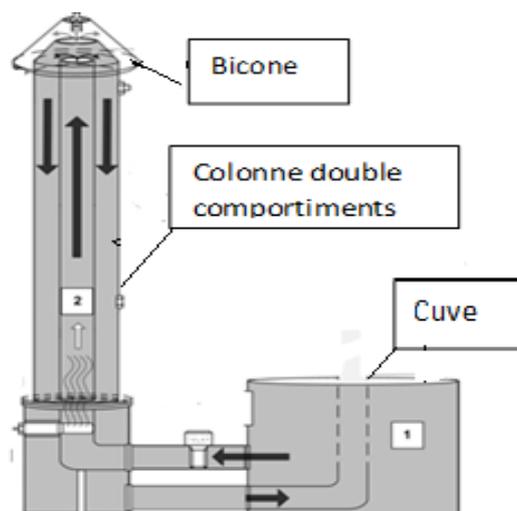


Figure 2 : *Colonne expérimentale air-lift*

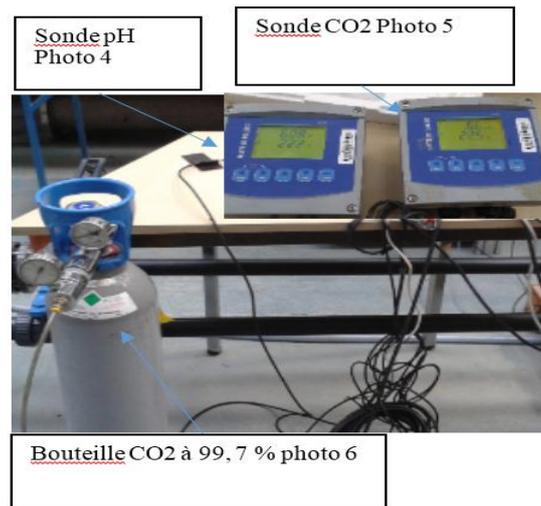


Figure 3 : *Dispositif sonde-bouteille de gaz*

2-1. Procédé expérimental et dispositif de mesure

2-1-1. Dispositif de mesure : Au niveau de la cuve

Une sonde CO₂ (InPro 5000 / 12 / 120 de METTLER-TOLEDO Analyse Industriel) a été utilisée pour le relevé des mesures. Cette sonde permet de mesurer la concentration de CO₂ [CO₂], la saturation du milieu en pourcentage de CO₂, la température (T) et la pression (P). Elle sera plongée dans la cuve par l'intermédiaire d'un câble qui sera fixé au bord de cette dernière.

2-1-2. Protocole expérimental

- Stripage de la colonne à pression atmosphérique

Le stripage consiste à injecter le CO₂ dans l'eau. Les conditions initiales sont représentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : *Conditions initiales dans la cuve*

[CO ₂] mg/L	% saturation	Température (°C)	Pression (mbar)
2.4	0.2	24	150

- Injection des bulles de CO₂ dans la cuve (le gaz provenant de la bouteille est chargé en CO₂ pur à 99,7 %) ;
- Vérification de la saturation du CO₂ affichée par la sonde ;
- L'injection du CO₂ est stoppée à saturation maximale (90 % environ) ;

Les valeurs de la concentration (mg / L), de la saturation (%), de la température (°C) et de la pression (mbar) sont relevées au cours du temps jusqu'à stagnation ;

2-1-3. Matériel de mesure au niveau de la colonne en fonctionnement

On associe à cette sonde un débitmètre à bulles (rotamètre) mesurant dans l'intervalle 0 à 30 L / min et un manomètre mesurant des pressions variant de 0 à 20 bars.

2-1-4. Protocole

- Stripage dans la colonne : conditions initiales ;

Tableau 2 : Conditions initiales de la colonne en fonctionnement

[CO ₂] Mol / L	% Saturation	Température (°C)	Pression (mbar)
6.2	0.4	23.8	155

- Injection des bulles dans la cuve ;
- Vérification de la saturation par la sonde ;
- L'injection du CO₂ est stoppée à une saturation maximale de 80 % environ ;
- Mise en route de la colonne (amorçage de la pompe à vide et établissement du vide) ;
- Injection d'air à 20 L / min à travers le diffuseur à fines bulles, pression contrôlée à 2 bars ;
- Ajustement du niveau d'eau ;
- Prise des valeurs de concentration (mg / L), de saturation (%), de température (°C) et de pression (mbar) au cours du temps jusqu'à ce que le CO₂ soit dissout ;

2-2. Equation de la dissolution

Pour mieux appréhender le phénomène de transfert de masse et le comportement du CO₂ lors de sa dissolution dans le liquide, on tient compte de la réaction chimique conduisant à la formation des espèces carbonées et la dissolution physique dans le liquide. Cette dissolution est fonction de la température et de la pression partielle de CO₂ dans le gaz. Selon la loi de Henry (**Equation 1**) la dissolution a lieu lorsque les deux phases liquide-gaz sont en équilibre :

$$[CO_2]d = \frac{PCO_2}{HCO_2} \tag{1}$$

HCO_2 , est la constante de Henry et est fonction décroissante de la température (**Tableau 3**). En effet une baisse de température entrainera l'augmentation de la quantité de CO₂ dissoute ($[CO_2]d$) d'après **l'Equation 1**. Le CO₂ dissout va réagir avec de l'eau pour donner l'acide carbonique H₂CO₃ en faible concentration dans le milieu. En s'associant, ces derniers vont former le CO₂ aqueux (CO₂aq) :

$$[CO_2\ aq] = [H_2CO_3^-] + [CO_2\ d] \tag{2}$$

Le CO₂aq peut se dissocier :



Tableau 3 : Variation de la constante de Henry pour différentes températures, calculée à partir d'Edwards. 1978

Temperature (°C)	H (L.atm / mol)
0	12.55
25	28.55
40	41.44

De ces équations découlent les constantes de dissociation K_1 et K_2 des couples CO_2aq / HCO_3^- et HCO_3^- / CO_3^{2-} . Mais la répartition des espèces carbonées respectives est calculée à partir des constantes d'acidité dépendant légèrement de la température (Edwards. 1978).

$$K_1 = [HCO_3^-] \cdot [H^+] / [CO_2aq] \quad (6)$$

$$K_2 = [CO_3^{2-}] \cdot [H^+] / [HCO_3^-] \quad (7)$$

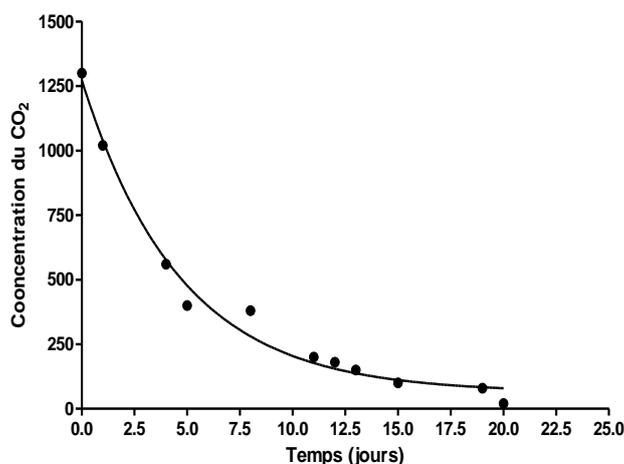
$$pK_1 = -\log K_1 \quad (8)$$

$$pK_2 = -\log K_2 \quad (9)$$

La répartition de ces espèces dans l'eau est affectée par la température et le pH, les constantes pK_1 et pK_2 dépendent de la température. L'augmentation du pH peut modifier la répartition du carbone inorganique en solution en donnant trois espèces carbonées en proportions variables en fonction du pH et dont la somme forme le carbone inorganique dissout (CID).

$$[CO_2aq] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = CID \quad (10)$$

3. Résultats

**Figure 4 :** Evolution de $[CO_2]$ (Cuve) au cours du temps sans fonctionnement de la colonne

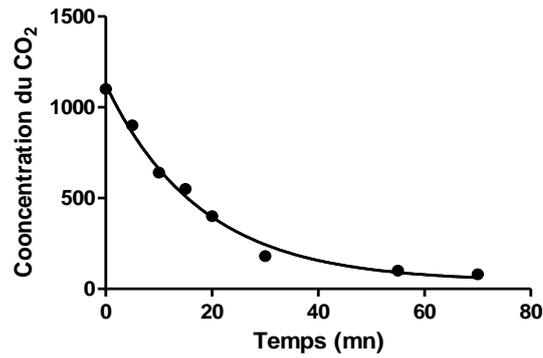


Figure 5 : Evolution de $[CO_2]$ au cours du temps avec fonctionnement de la colonne

Remarque

La différence de concentrations entre les deux *Figures 4 et 5* est due à un arrêt pour stabiliser le mélange eau- CO_2 avant de lancer la pompe. Toutes les courbes ne décroissent pas jusqu'à zéro car le CO_2 est déjà présent dans l'atmosphère à un taux estimé à environ 0.04 %. Ce taux est principalement dû aux rejets des différentes activités humaines.

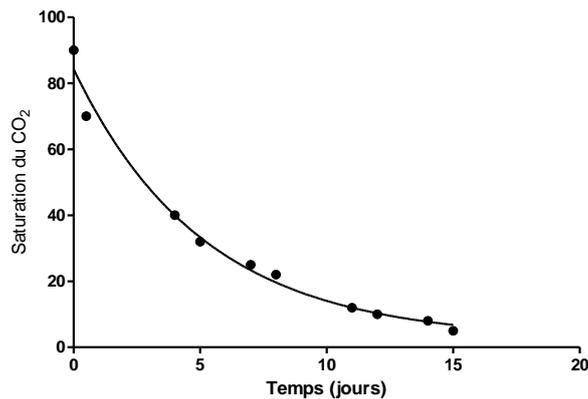


Figure 6 : Saturation du CO_2 au cours du temps dans la cuve

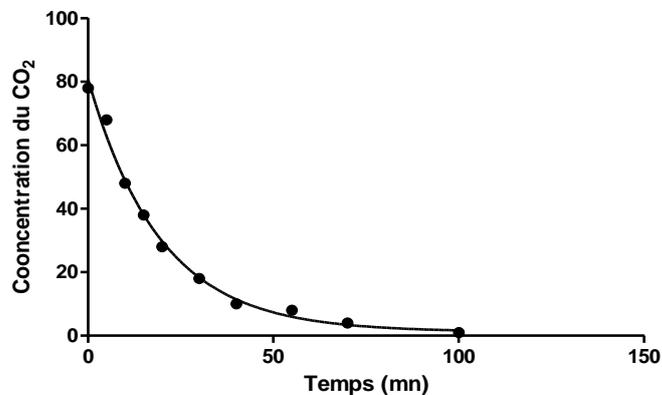


Figure 7 : Saturation de CO_2 au cours du temps, avec colonne en fonctionnement

Nous constatons que globalement le phénomène de désaturation est plutôt lent. Sans mouvement, ni autre échange que celui de la cuve, le CO₂ s'évapore lentement à l'air libre. Sur la **Figure 4**, nous remarquons que la concentration décroît exponentiellement sur une vingtaine de jours avant de stagner et qu'il faut une dizaine de jours de plus pour passer de 1300 mg / L à 250 mg / L, et dix jours supplémentaires pour se rapprocher des 30 mg / L. Par ailleurs, la **Figure 5** montre que dans la colonne en fonctionnement, l'échange est bien plus rapide. En effet, on constate qu'au bout de 30 min que la concentration de CO₂ descend en-dessous de 200 mg / L et qu'au-delà de 2 h 40 min il ne reste plus que 6 mg / L.

4. Conclusion

Dans la colonne, le transfert de masse gaz-liquide est beaucoup plus rapide étant donné que la surface d'échange est plus importante grâce à l'injection des fines bulles. Par ailleurs, l'échange se fait 500 fois plus vite en présence des bulles (**Figures 6 et 7**). Permettant ainsi d'optimiser la concentration du dioxyde de carbone dans l'eau et de faciliter la photosynthèse afin de lutter contre les gaz à effet de serre. Par ailleurs, la surface libre de la cuve n'étant pas assez grande pour permettre un échange plus rapide, nous envisageons de reprendre l'expérience avec la colonne en fonctionnement.

Remerciements

Nous remercions le Pr. Slim Kaddeche de l'INSAT, Université de Carthage, Laboratoire Matériaux, Mesures et Applications LR-11-ES-25, pour ses conseils et ses recommandations.

Références

- [1] - "Convention-cadre sur les changements climatiques cop 21, Du 30 novembre au 11 décembre 2014 à Paris". (www.cop21.gouv.fr)
- [2] - B. CLEMENT-LAROSIERE, "Etude de la croissance de *Chlorella vulgaris* en photobioréacteur batch et continu, en présence de concentration élevée de CO₂".s Thèse, (2012) 7 - 8.
- [3] - B. BARRUT, "Etude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression Application à l'aquaculture". Thèse, (2011) 137.
- [4] - L. AURAY, "Etude de la colonne à dépression Laboratoire de Mécanique des fluide et acoustique INSA-LYON, mémoire, (2010) 50.
- [5] - E. LEMAIRE, P. A. BOUILLON, A. GOMEZ, J. KITTEL, S. GONZALEZ, P. L. CARRETTE P, B. DELFORT, P. MOUGIN, P. ALIX, L. NORMAND, "New IFP optimized first generation process for post-combustion carbon capture" : (Energy Procedia doi:10.1016 / j.egypro.2011.01.195), (2011) 1361 - 1368.
- [6] - H. FUJIMOTO, T. NAGATANI, H. TAKUDA, "Performance characteristics of a gaz-liquide-solid airlift pump", (2005) 18.
- [7] - E. OLIVO, "Conception et étude d'un photobioreacteur pour la production en continu des microalgues en écloséries aquacoles". Thèse, (2007) 94 - 97.
- [8] - M. OLIVIER, Etude de la colonne à dépression. LMFA, mémoire INSA-LYON, (2009) 75.
- [9] - A. LUCCHETTI, "Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues". Thèse, (2014) 107 - 114.