

---

# Introduction

---

En raison des conséquences du réchauffement climatique et des émissions importantes de gaz à effet de serre, une réflexion et des actions internationales sont actuellement menées dans le but de proposer des solutions pour le développement durable et la sauvegarde des ressources terrestres. Un des axes majeurs d'action concerne la stabilisation, voire la réduction, des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre le plus important, du fait de l'augmentation de la production mondiale, la déforestation et l'utilisation intensive de l'énergie fossile [PAC 07]. Aussi, un axe de recherche en pleine expansion concerne la proposition de stratégie de réduction de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Plusieurs approches sont proposées, telles que la réduction des émissions de ce gaz, son stockage (géologique, dans les océans ou par minéralisation), son adsorption ou son absorption par voie chimique, géologique ou biologique [PIR 11].

Cet ouvrage s'intéresse plus particulièrement à la fixation de CO<sub>2</sub> par voie biologique, par utilisation des microalgues afin de réduire au maximum l'impact environnemental de cette séquestration. La biofixation de CO<sub>2</sub> par les microalgues est la voie la plus prometteuse puisque ces micro-organismes sont les plus efficaces à séquestrer le CO<sub>2</sub> en comparaison avec les plantes terrestres. En présence de lumière, les microalgues sont capables d'assimiler le CO<sub>2</sub> pour croître tout en produisant de l'oxygène et les métabolites secondaires, *via* la photosynthèse. L'application des microalgues à des fins environnementales représente ainsi une solution très prometteuse compte tenu de leurs potentiels, des différents avantages relatifs à leur vitesse de croissance et de leur forte tolérance vis-à-vis de concentrations élevées en CO<sub>2</sub>. En outre, elles possèdent un grand nombre d'applications à l'échelle scientifique et industrielle dans différents domaines : la production de molécules à haute valeur ajoutée exploitées dans le domaine pharmaceutique et cosmétique, l'alimentation humaine et animale et la production d'énergie renouvelable à travers la synthèse biologique d'hydrogène, de méthane et de carburant. Ainsi,

l'axe majeur de biofixation de CO<sub>2</sub> par les microalgues consiste à combiner cette séquestration avec la production de molécules à valeur ajoutée.

La stratégie de fixation optimale de CO<sub>2</sub> par les microalgues repose sur une démarche spécifique qui s'appuie dans un premier temps sur une phase de sélection de l'espèce algale ayant les propriétés métaboliques et biochimiques adéquates pour la consommation du CO<sub>2</sub> ; et dans un deuxième temps, sur l'optimisation des conditions opératoires du procédé de culture et le maintien du bioprocédé à ces conditions optimales.

À l'heure actuelle, l'exploitation industrielle de la culture de microalgues pour la séquestration du CO<sub>2</sub> est peu présente, du fait essentiellement des difficultés d'instrumentation, de mesure et de modélisation pour ce type d'application. Aussi, une étape importante et incontournable réside dans la culture de microalgues à petite échelle (échelle de laboratoire), afin de mettre au point des outils performants et robustes, capables de commander le système de culture de microalgues, pour séquestrer efficacement le CO<sub>2</sub> d'une part, et pouvant être transposés et appliqués sur des systèmes de culture à grande échelle d'autre part.

Dans ce contexte, cet ouvrage a pour finalité non seulement de faire un état des lieux, non exhaustif, des travaux de recherche récents concernant la culture de microalgues pour la séquestration de CO<sub>2</sub>, mais également de proposer des stratégies d'estimation et de commande avancées, illustrées aux travers d'essais expérimentaux de la culture de *Chlorella vulgaris* dans un photobioréacteur instrumenté.

La conception d'un bioprocédé efficace pour la culture de microalgues pour la biofixation de CO<sub>2</sub> suit la démarche de mise en œuvre suivante :

– modélisation : une étape cruciale, et qui conditionne l'efficacité des étapes ultérieures, est la mise au point d'un modèle pertinent de la croissance des microalgues dans le réacteur. Cette étape est d'autant plus délicate que le système à modéliser est très complexe, pouvant varier dans le temps. Aussi, le défi ici consiste à mettre au point un modèle simple mais suffisamment précis pour reproduire fidèlement le comportement du système en vue de le commander. Globalement deux types de modélisation sont proposés : une modélisation macroscopique fondée sur un bilan de matière [BAS 90] et une modélisation métabolique [BAR 13]. L'approche macroscopique est à privilégier dans le cadre de la mise au point de loi de commande car elle aboutit à un modèle plus simple et dont les paramètres sont en nombre réduit, de sorte que leur identification est moins complexe que pour le modèle métabolique [HEI 13]. Le modèle macroscopique pour la croissance de microalgues est fortement non linéaire et fait intervenir des éléments biologiques classiquement utilisés pour les bioprocédés de culture de bactéries, mais également l'éclairage dont l'intensité/qualité/durée conditionne la consommation de CO<sub>2</sub>. La phase d'identification des paramètres de ce modèle est une phase délicate du fait notamment de la

non-linéarité du modèle et que le système étudié est vivant, et donc peut évoluer dans le temps. A l'issue de cette étape, on dispose d'un modèle non linéaire capable de reproduire efficacement le comportement macroscopique du bioprocédé ;

– estimation : la mesure de la concentration en microalgues dans un réacteur, donnée importante pour la conduite du bioprocédé, est généralement disponible uniquement hors-ligne, par analyse de prélèvement. Il existe en effet un manque de capteurs physiques, soit de prix raisonnable, soit assez précis pour la mesure en ligne de ce paramètre. Il faut donc mettre au point des observateurs qui combinent le modèle du bioprocédé, précédemment identifié, à des mesures physiques simples et disponibles en ligne (par exemple pH, intensité lumineuse, pression partielle en CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, concentrations de variables biologiques, etc.), afin d'estimer les variables du système non accessibles en temps réel. La qualité et la précision de l'estimation dépend fortement de la qualité du modèle considéré et conditionne l'efficacité de la loi de commande ;

– commande : cette dernière étape a pour but la mise en place de stratégies de commande robustes vis-à-vis des incertitudes des paramètres du modèle et des perturbations extérieures afin de maintenir le bioprocédé à des conditions de fonctionnement optimal. En effet, en vue de maximiser la biofixation de CO<sub>2</sub>, il est nécessaire de considérer des stratégies de commande avancées, seules capables de garantir un bon rendement du bioprocédé. Les bioprocédés instrumentés à échelle industrielle utilisent habituellement des lois de commande simples, notamment pour la culture de microalgues [BER 11, ZHA 14], d'où une limitation de la performance de la bioséquestration de CO<sub>2</sub>. Le modèle macroscopique du bioprocédé étant non linéaire, les derniers travaux de recherche dans la littérature s'orientent vers l'utilisation de stratégies de commande dédiées aux systèmes non linéaires (les commandes linéaires ont été testées, mettant en évidence leurs limitations devant la forte non-linéarité et la nature incertaine du modèle du procédé).

Cet ouvrage propose une procédure de mise en œuvre de stratégie de commande optimale de biofixation de CO<sub>2</sub> par des microalgues mises en culture dans un photobioréacteur. La microalgue *Chlorella vulgaris* y est plus spécifiquement étudiée, afin d'évaluer la performance des stratégies proposées sur sa croissance. L'ouvrage est organisé comme suit :

– le chapitre 1 présente les microalgues et leurs domaines d'exploitation et d'application. Il décrit ensuite les différents types de systèmes de culture de microalgues et liste les facteurs les plus influents sur leur croissance ;

– le chapitre 2 s'intéresse plus particulièrement à la biofixation de CO<sub>2</sub> par les microalgues, en mettant l'accent sur les paramètres les plus influents pour l'optimisation du bioprocédé ;

– au chapitre 3, la modélisation de la culture de microalgues dans un photobioréacteur est présentée dans le cas général à partir d'un état de l'art, puis est plus spécifiquement présentée dans le cas de la culture de *C. vulgaris* ;

– au chapitre 4, l'estimation de la concentration cellulaire à partir des mesures disponibles en ligne est considérée, en proposant trois types de stratégie d'estimation : filtre de Kalman étendu, observateur asymptotique et observateur par intervalles. Ces estimateurs sont appliqués à des données expérimentales issues de cultures de *C. vulgaris*, et leurs performances sont ensuite comparées ;

– le chapitre 5 traite de la conduite optimale de la culture de microalgues. Les conditions optimales de fonctionnement sont tout d'abord déterminées. Le maintien du bioprocédé autour de ce point de fonctionnement optimal est ensuite étudié. Trois types de lois de commande sont enfin présentés et mis en œuvre : la commande par modèle générique, la commande linéarisante entrée/sortie et la commande prédictive non linéaire ;

– enfin, une conclusion permet de mettre en avant les résultats obtenus et de dresser un bilan de la procédure proposée. En particulier y est abordé la transposition des stratégies élaborées à des cultures de microalgues à échelle industrielle.

Ces travaux de recherche pluridisciplinaires se situent à la jonction de deux grands domaines : le génie des procédés et l'automatique. Les développements théoriques présentés dans la suite de cet ouvrage font donc appel à des compétences et connaissances de ces deux domaines, pour aboutir au final à une solution fiable et robuste permettant d'optimiser le mécanisme de consommation du CO<sub>2</sub>. Aussi, des concepts de base relatifs aux deux domaines ont été rappelés afin de faciliter la lecture de l'ouvrage.