

## Sommaire

Table des figures.....	4
Table des tableaux.....	5
Index des abréviations.....	6
Introduction.....	7
<b>1. Etat de l'art .....</b>	<b>8</b>
1.1 Le digestat comme substrat pour les microalgues.....	8
1.2 Les espèces de microalgues .....	8
1.3 Valeurs optimales des paramètres physico-chimiques.....	8
1.4 Modes de croissance .....	10
1.5 Utilisation des nutriments par les algues .....	10
1.6 Interactions entre les algues et les bactéries.....	11
1.7 Comparaison des productivités algales en raceway et photobioréacteur.....	11
<b>2. Matériel et méthode .....</b>	<b>13</b>
2.1 Description des expérimentations .....	13
2.1.1 Entretien d'un inoculum.....	13
2.1.2 Description des systèmes raceways et des expérimentations.....	13
2.1.2.1 Expérimentation n°1 avec du $\text{NO}_3^-$ .....	14
2.1.2.2 Expérimentation n°2 avec du $\text{NH}_4^+$ .....	15
2.1.2.3 Expérimentations n°3 avec du digestat.....	15
2.2 Suivi analytique des expérimentations .....	15
2.2.1 Description des méthodes analytiques .....	15
2.2.1.1 Biomasse.....	15
2.2.1.2 Physico-chimie.....	17
2.3 Description du modèle .....	17
2.3.1 Fonctionnement et processus pris en compte par le modèle.....	17
2.3.2 Améliorations du modèle .....	18
2.3.2.1 De la version 1 à la version 2 .....	18
2.3.2.2 De la version 2 à la version 3a, 3b et 3c .....	18
<b>3. Résultats des simulations numériques du procédé de culture de microalgues en réacteur ouvert .....</b>	<b>19</b>
3.1 Comparaisons des résultats des simulations numériques avec les résultats expérimentaux .....	20
3.2 Etude des interactions entre les algues et les bactéries en fonction des conditions .....	22
3.3 Etude de la dynamique du carbone .....	25

3.3.1	Tests d'efficacité du $\text{CO}_2$ injecté en fonction de la concentration en CI initial.....	25
3.3.2	Tests avec variation du pH .....	25
3.3.3	Tests avec variation des concentrations de saturation du $\text{CO}_2$ surface et injection .	28
3.3.4	Tests avec variations du $\text{KCO}_2$ <sub>algues</sub> .....	28
3.3.5	Tests de l'impact des AOB et NOB sur le cycle du carbone.....	29
3.4	Etude de la dynamique de l'azote .....	29
3.5	Conclusion sur les améliorations apportées au modèle .....	30
<b>4.</b>	<b>Résultats des expérimentations de répétabilité.....</b>	<b>30</b>
4.1	Répétabilité en conditions abiotiques.....	30
4.2	Répétabilité en conditions biotiques.....	31
4.2.1	Résultats de l'expérimentation n°1 .....	31
4.2.2	Résultats de l'expérimentation n°2 .....	33
4.2.3	Résultats de l'expérimentation n°3 .....	34
	Conclusion .....	35
	Bibliographie.....	36
	Annexe 1 : Composition des milieux BBM et du digestat nanofiltré (analysé le 09/07/2020) .....	40
	Annexe 2 : Cinétique des différents processus .....	41
	Annexe 3 : Schémas des processus pris en compte par le modèle selon le mode de croissance .....	42
	Annexe 4 : Stœchiométrie du modèle version 1 : matrice de Petersen .....	43
	Annexe 5 : Paramètres stœchiométriques et physico-chimiques.....	45
	Annexe 6 : Paramètres cinétiques.....	46
	Annexe 7 : Données initiales de la simulation témoin pour les tests sur les interactions algues/bactéries .....	48
	Annexe 8 : Schémas des transferts d'ions $\text{H}^+$ pendant la croissance .....	49
	Annexe 9 : Résultats des simulations de test de la sensibilité du modèle aux concentrations bactériennes.....	50
	Annexe 10 : Graphiques correspondant aux simulations de tests sur les concentrations en bactéries .....	51
	Annexe 11 : Graphiques représentant les données mesurées par les sondes physico-chimiques en conditions abiotiques .....	53
	Annexe 12 : Résultats bruts de l'expérimentation n°1 à base de $\text{NO}_3^-$ .....	54
	Annexe 13 : Résultats bruts de l'expérimentation n°2 à base de $\text{NH}_4^+$ .....	57
	Annexe 14 : Résultats bruts de l'expérimentation n°3 à base de digestat .....	60

## Table des figures

Figure 1 : Principe de la méthanisation.....	8
Figure 2 : Disposition des raceways dans la serre .....	13
Figure 3 : Equipement des raceways.....	13
Figure 4 : Méthode de mesure des MES et MVS.....	16
Figure 5 : Méthode de de mesure de la DCO .....	17
Figure 6 : Schéma des processus de croissance bactérienne et algale autotrophe .....	17
Figure 7 : Concentration algale mesurée sur Iris en 2019 et modélisée (avec calage des paramètres I0, CI et P.....	21
Figure 8 : Graphique des résultats des simulations selon les AOB et le N/P .....	24
Figure 9 : Graphique des résultats des simulations AOB et N/P .....	24
Figure 10 : Graphique des résultats des simulations selon le CI .....	25
Figure 11 : Courbes correspondant aux résultats de modélisation PpH1.....	26
Figure 12 : Courbes correspondant à la simulation ClpH1.....	27
Figure 13 : Graphique des simulations selon le pH avec % CO2 capté .....	27
Figure 14 : Graphique des simulations en fonction du NO3 .....	30
Figure 15 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 1 .....	32
Figure 16 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 2 .....	34
Figure 17 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 3 .....	34

## Table des tableaux

Tableau 1 : Quelques valeurs optimales pour les cultures de microalgues .....	9
Tableau 2 : Comparaison des processus de croissance autotrophes et hétérotrophes .....	10
Tableau 3 : Quelques valeurs de productivité algale en raceways .....	12
Tableau 4 : Quelques valeurs de productivité algale en PBR .....	12
Tableau 5 : Concentrations théoriques et mesurées du milieu de culture pour l'expérimentation n°1 .....	14
Tableau 6 : Concentrations théoriques et mesurées du milieu de culture pour l'expérimentation n°2 .....	15
Tableau 7 : Concentrations mesurées sur le digestat seul dilué 20 fois et sur le milieu de culture inoculé .....	15
Tableau 8 : Synthèse des résultats obtenus par modélisation avec les données d'Iris .....	20
Tableau 9 : Synthèse des résultats des simulations en fonction du pH .....	25
Tableau 10 : Synthèse des résultats des simulations en fonction des concentrations de saturation CO <sub>2</sub> .....	28
Tableau 11 : Synthèse des résultats des simulations en fonction du KCO <sub>2</sub> .....	29
Tableau 12 : Synthèse des résultats des simulations en fonction des AOB et NOB .....	29
Tableau 13 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°1 .....	32
Tableau 14 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°2 .....	33
Tableau 15 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°3 .....	34

## Index des abréviations

**AOB** : Ammonium Oxidizing Bacteria

**NOB** : Nitrite Oxidizing Bacteria

**C** : carbone

**CI** : carbone inorganique

**COD** : Chemical Oxygen Demand

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**MES** : Matières En Suspension

**MVS** : Matières Volatiles en Suspension

**N** : azote

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : ammonium

**NO<sub>2</sub><sup>-</sup>** : nitrites

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : nitrates

**P** : phosphore

**PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** : phosphates

## Introduction

La problématique de traitement des digestats issus de la méthanisation et la recherche de nouvelles sources d'énergie, d'alimentation et de molécules pharmaceutiques sont les moteurs actuels de nombreuses études sur les cultures de microalgues. Dans ce contexte, ce stage ayant pour but l'étude et la modélisation de la dynamique de l'azote et du carbone au cours de cultures de microalgues à partir de digestat a été réalisé du 17 février au 31 juillet 2020 au sein de l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement de Rennes. Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet BIOMSA ayant pour but le développement d'une filière de bioraffinerie environnementale Méthane-Struvite-Algues.

Le milieu de culture étudié au cours de ce stage est donc le digestat, résidu solide et liquide de la méthanisation. La méthanisation est un procédé anaérobie permettant, grâce à l'action de micro-organismes anaérobies, de produire du biogaz (le méthane) à partir de biodéchets. Très riche en azote (N), phosphore (P) et carbone (C) et contenant également les traces de métaux nécessaires au développement algal, le digestat est un substrat très intéressant pour optimiser les cultures phytoplanctoniques. L'azote, en permettant aux microalgues de synthétiser les protéines constituant les complexes photosynthétiques chlorophylliens [BOUGARAN, 2014], constitue un élément chimique essentiel pour les microalgues. La compréhension de la dynamique de l'azote dans le milieu de culture est donc essentielle afin de faire passer efficacement l'azote sous forme soluble à de l'azote sous forme solide (soit sous forme de biomasse algale). La biomasse algale est en effet plus facile à extraire que l'azote soluble, et cette extraction doit idéalement être réalisée avec le moins de surface et le plus rapidement possible. L'efficacité de la culture dépend de plusieurs facteurs, soit les conditions extérieures (lumière, température, pH...), la présence dans le milieu des nutriments nécessaires au développement des algues, la maximisation du flux d'azote vers les algues, la qualité de l'assimilation de l'azote par les algues et la minimisation du « self-shading », processus par lequel une biomasse algale trop importante limite l'absorption de la lumière par les algues et stoppe ainsi leur croissance.

Dans le cadre de ce stage, les algues ont été cultivées en raceways, soit des bassins circulaires de 400L ouverts sous serre et agités en continu. L'objectif du stage est alors d'étudier la dynamique de l'azote et du carbone au cours de la culture de microalgues à partir de digestat en croisant et en comparant les données obtenues par modélisation numérique et au moyen d'analyses en laboratoire. Les premières simulations ont été réalisées à partir de situations observées sur les raceways l'année précédente et ont aidé au calage du modèle. Les suivantes étaient inspirées de cas théoriques et ont permis d'une part de tester la sensibilité du modèle et d'autre part de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la dynamique du carbone et de l'azote au cours des cultures de microalgues. Enfin, trois expérimentations de répétabilité sur les raceways ont été menées afin de vérifier que les trois réacteurs réagissaient de la même façon lorsqu'ils étaient placés dans les mêmes conditions. Ces expérimentations ont en outre permis de récolter des données initiales et météorologiques permettant d'alimenter le modèle. Nous avons ainsi pu comparer les résultats obtenus par modélisation et expérimentalement afin de mieux identifier les différences de dynamique observées entre les raceways.

### **Quels mécanismes liés à l'azote et au carbone influencent la croissance algale dans les cultures de microalgues en raceways ? Dans quelle mesure les simulations numériques permettent-elles de prédire les dynamiques observées dans ces cultures ?**

La première partie de ce rapport sera consacrée à un état de l'art sur les travaux réalisés précédemment sur les cultures de microalgues, particulièrement à partir de digestat. Les réacteurs utilisés pour la culture ainsi que le fonctionnement du modèle numérique seront présentés en second lieu. La troisième partie permettra de présenter les résultats de modélisation, puis les résultats expérimentaux avant de comparer ces résultats à ceux obtenus via de nouvelles simulations numériques.

## 1. Etat de l'art

Dans un premier temps, un état de l'art portant sur les études dernièrement menées sur les cultures de microalgues a été réalisé. L'objectif de cet état de l'art est de cerner les connaissances actuelles en termes de cultures de microalgues à partir de digestat, tant dans un objectif de synthèse des données de conditions optimales de culture que de compréhension des mécanismes en jeu dans les milieux colonisés par les algues.

### 1.1 Le digestat comme substrat pour les microalgues

La méthanisation est un procédé anaérobie permettant de produire du méthane et du digestat à partir de biodéchets (figure 1) [PERDRIER, 2019].

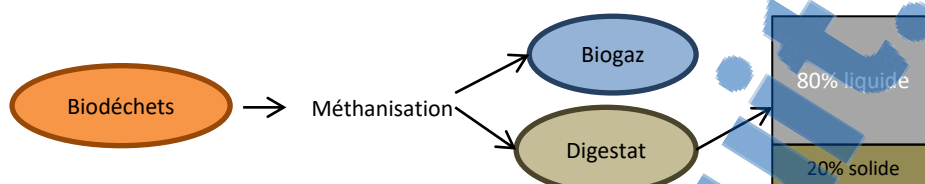


Figure 1 : Principe de la méthanisation

La composition chimique du digestat varie en fonction de l'origine des déchets valorisés : ainsi, le digestat issu de résidus de nourriture semble présenter la plus grande concentration en azote total et en nitrates, et une des plus hautes concentrations en phosphates comparé aux lisiers, ensilage, excréments ou boues de stations d'épuration [CHUKA-OGWUDE et al, 2019]. Si le digestat peut théoriquement être valorisé directement en épandage dans les exploitations agricoles, ce mode de valorisation reste très contrôlé en raison du risque de lessivage des nutriments et polluants présents dans le digestat vers le milieu naturel. Il est donc nécessaire de s'intéresser à d'autres manières de valoriser ce résidu, dont les cultures de microalgues. La croissance algale nécessite un apport nutritif non limitant en N, P et C, les trois éléments principaux du métabolisme des algues, et les cultures classiques de microalgues utilisent généralement des milieux de culture synthétiques tels que le milieu BBM (Bold's Basal Medium). Or, une étude de Fen Tan et al, 2016 a démontré que les boues issues de la méthanisation étaient plus efficaces que le milieu BBM pour la production de glucides par les algues.

### 1.2 Les espèces de microalgues

Les algues vertes feront l'objet des expérimentations de ce stage en raison de leur capacité à utiliser la lumière pour croître. Différentes espèces de microalgues ont été étudiées dernièrement, mais d'après l'étude de Fen Tan et al, 2016, l'espèce *Chlorella vulgaris* présente une croissance plus rapide que les autres algues : sa productivité est plus élevée et la phase stationnaire arrive par conséquent plus rapidement. Elle est en outre très commune et naturellement présente dans les milieux naturels, tout comme *Scenedesmus*. Il convient néanmoins d'être attentif aux modifications de la composition de la population de microalgues au sein de la culture : les espèces ont tendance à changer en fonction des ratios de nutriments [BOUGARAN, 2014].

### 1.3 Valeurs optimales des paramètres physico-chimiques

Les cultures de microalgues ont déjà fait l'objet de nombreuses études et expérimentations, notamment en ce qui concerne les optimums de croissance. Le tableau 1 ci-dessous synthétise quelques estimations des valeurs optimales des paramètres physico-chimiques du milieu de culture. Ces valeurs peuvent varier en fonction des espèces de microalgues, du type de réacteur utilisé ou encore des injections potentielles de CO<sub>2</sub> dans le milieu de culture, cependant les études réalisées utilisaient souvent les souches d'algues *Scenedesmus* et *Chlorella*, qui sont également les principales espèces présentes dans le consortium naturel prévu pour les expérimentations au cours de ce stage.

Tableau 1 : Quelques valeurs optimales pour les cultures de microalgues

Référence	Paramètre	Valeurs optimales
LIN LUO et al, 2019	N	0,8 g/L
PRAVEEN et al, 2018 ; UGGETTI et al, 2014	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<100 mg/L
DEBOWSKI et al, 2017	NH <sub>3</sub>	<100 mg/L
BARBERA et al, 2018		<2mmol/L
WARD et al, 2014	Rapport C/N	4-8
REDFIELD, 1934	Rapport N/P	14-16
PERDRIER, 2019		3-35
PERDRIER, 2019	P	2-50 mg/L
PERDRIER, 2019	DCO	<2 g <sub>O2</sub> /L
TRAVIESO et al, 2006		<1,1 g <sub>O2</sub> /L
PERDRIER, 2019	Longueur d'onde	400-700 nm
GONZALES-CAMEJO et al, 2019	Température	<30°C

Les métaux sont également nécessaires à la croissance algale, mais seulement à l'état de traces. Généralement, le digestat apporte ces éléments en quantité suffisante. Les valeurs optimales pour certains éléments comme le P peuvent être très disparates. En effet, le phosphore présent dans le milieu de culture peut être stocké par les algues, qui peuvent alors continuer de croître même lorsque le milieu est épuisé en phosphore [PERDRIER, 2019]. En ce qui concerne la DCO, Demande Chimique en Oxygène, ce paramètre est lié à la turbidité du milieu de culture. Elle peut donc freiner la croissance des algues lorsque sa valeur est trop élevée. Il en est de même pour la température : les hautes températures sont plus néfastes que les basses températures pour la croissance des algues. En effet, une température trop importante désactive certaines protéines nécessaires à la photosynthèse. Par ailleurs, à une température optimale, les algues tolèrent une irradiation plus importante. En outre, les hautes températures favorisent le développement des bactéries AOB, une catégorie de microorganismes oxydant l'ammoniac [GONZALES-CAMEJO et al, 2019].

Le pH est également un paramètre déterminant pour la croissance algale. Le pKa du couple NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub> est de 9,2, ce qui signifie que lorsque le pH du milieu est inférieur à 9,2 la majorité des ions sont sous la forme NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. A l'inverse, lorsque le pH du milieu est supérieur à 9,2, les ions sont majoritairement sous la forme NH<sub>3</sub>. Or, le NH<sub>3</sub> est un gaz et tendra à se volatiliser, provoquant une perte d'azote au niveau de l'atmosphère. Un pH trop élevé aura donc tendance à occasionner une perte de matière, ce qui sera à éviter : en effet, la perspective du projet est la valorisation de l'azote via sa concentration de l'azote sous forme solide au sein des microalgues.

Enfin, une concentration d'algues trop importante peut nuire au développement de ces dernières. La concentration à ne pas dépasser dépend de l'épaisseur d'eau dans le milieu de culture : plus l'épaisseur d'eau augmente, moins la concentration d'algues dans le bassin devra être importante afin de limiter le self-shading. Par exemple, dans le cas d'un photobioréacteur, l'épaisseur est très faible et la lumière pénètre dans le milieu de culture par plusieurs côtés : la concentration d'algues pourra donc être plus importante que dans un bassin raceway dont la hauteur d'eau est généralement entre 20 et 35cm. Dans un système raceway, la concentration en microalgues sera comprise entre 0,2 et 1 g/L, dans un système PBR entre 1 et 5 g/L et dans un système de plaque (avec une épaisseur d'eau de quelques millimètres) elle pourra s'élever à 20 g/L. L'alternance des phases obscures et lumineuses causée par le remous augmente par ailleurs l'efficacité de l'utilisation de la lumière par les algues [LAWS et al, 1983].



## 1.4 Modes de croissance

Les algues peuvent, en fonction des conditions du milieu, utiliser le C organique ou inorganique pour leur croissance et adopter par conséquent une croissance autotrophe ou hétérotrophe (tableau 2).

Tableau 2 : Comparaison des processus de croissance autotrophes et hétérotrophes

	Croissance autotrophe	Croissance hétérotrophe
Fonctionnement	Les algues utilisent le C inorganique, soit le $\text{CO}_2$ , comme source de C, et parviennent ainsi à convertir l'énergie lumineuse en biomasse.	Les algues utilisent le C organique, soit les molécules issues de la dégradation des êtres vivants par exemple, comme source de C pour produire leur biomasse.
Caractéristiques	La lumière n'est pas dispersée de façon homogène dans un réacteur, ce qui limite la croissance algale dans les zones plus sombres. La croissance est en outre limitée par la turbidité et le self-shading.	La production de lipides est 20 fois plus importante qu'en fonctionnement autotrophe. Elle dépend néanmoins de la quantité de C disponible dans le milieu. Le C organique est dispersé de façon homogène dans un réacteur, ce qui optimise son absorption.

Au cours de la croissance autotrophe, le pH a tendance à augmenter alors qu'il diminue au cours de la croissance hétérotrophe [EZE et al, 2018]. Les algues étudiées au cours de ce stage présentent un fonctionnement mixotrophe, c'est-à-dire qu'elles sont capables d'utiliser à la fois le C organique et inorganique pour leur croissance. L'efficacité de conversion est représentée par le rapport entre l'énergie retrouvée dans la biomasse et l'énergie apportée au système, soit la lumière et le C organique. Cette efficacité est plus importante en mixotrophie qu'en autotrophie. En effet, les microalgues mixotrophes peuvent allier les avantages des deux modes de fonctionnement en compensant le manque de lumière par le C organique dans les zones hors de l'optimum lumineux [VERONESI, 2019]. Cependant, dans le digestat, le C organique a déjà été dégradé lors de la phase de digestion anaérobie et est donc présent en très petites quantités. Nous étudierons donc principalement le fonctionnement de croissance autotrophe dans le cadre de ce stage.

## 1.5 Utilisation des nutriments par les algues

Le N est stocké dans les algues sous forme de  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{NO}_3^-$ . Le  $\text{NO}_3^-$  doit être réduit en  $\text{NO}_2^-$  puis en  $\text{NH}_4^+$  avant l'amination qui conduit à la transformation en acides aminés ou en acides nucléiques, son utilisation par les microalgues demande donc davantage d'énergie que l'utilisation directe du  $\text{NH}_4^+$ . L'absorption de  $\text{NH}_4^+$  est donc bien supérieure à celle de  $\text{NO}_3^-$  [EZE et al, 2018]. L'utilisation des différentes formes d'azote par les microalgues a également un effet sur le pH du milieu de culture : en utilisant le  $\text{NH}_4^+$ , elles consomment simultanément des ions  $\text{OH}^-$  dans le milieu et font ainsi diminuer le pH. Au contraire, elles produisent des ions  $\text{OH}^-$  lorsqu'elles réduisent le  $\text{NO}_3^-$  et ont alors tendance à basifier le milieu.

Le N peut être absorbé par les microalgues par transport passif ou actif. Le transport passif repose sur le gradient de concentration en nutriments entre le milieu de culture et le milieu interne de l'algue : pour cela, la concentration en N intracellulaire doit être inférieure à sa concentration dans le milieu. Ce processus est cependant peu fréquent dans le milieu naturel, où les concentrations en N intracellulaire sont souvent bien plus élevées que les concentrations dans le milieu extérieur. Un milieu à base de digestat est cependant plus concentré en N que le milieu naturel, mais il n'est pas possible d'utiliser un digestat trop concentré qui pourrait être trop turbide pour laisser passer la lumière nécessaire à la croissance algale. Le transport actif est, lui, basé sur l'action d'une protéine transmembranaire  $\text{Na}^+$ -ATPase. Une à deux moles d'ATP sont ainsi nécessaires pour transporter une mole de  $\text{NO}_3^-$ . L'ATP sert à la fois au transport du N et du C, et le nombre de molécules d'ATP disponibles pour le transport déclenche une « compétition » entre ces deux éléments.

Si les algues ont besoin à la fois de N, P et C pour survivre, les apports de N et de P doivent être simultanés pour permettre la croissance algale. Une carence en P occasionne un découplage entre la phase d'absorption et celle d'assimilation du N par les microalgues. La croissance algale cesse, et le N organique est alors excrété par les microalgues sous la forme d'acides aminés, qui peuvent potentiellement être réutilisés par les algues, soit directement soit après reminéralisation [BOUGARAN, 2014]. Les cellules mortes de microalgues peuvent également rejeter des nutriments dans le milieu [SERRA-MAIA et al, 2016].

La limitation de la croissance algale dépend également des interactions entre différents facteurs et paramètres : on parle alors de co-limitation. Lorsque les concentrations en nutriments sont trop faibles pour pouvoir être absorbées, il s'agit d'une co-limitation multi-nutriments. La co-limitation biochimique a lieu lorsqu'une ressource limitante qui facilite l'absorption d'une autre ressource limitante est ajoutée au milieu. Par exemple, l'ajout du fer nécessaire à l'activité de la nitrite réductase facilite l'absorption du  $\text{NO}_3^-$ . Enfin, on parle de co-limitation communautaire lorsque la diversité des populations phytoplanctoniques permet de limiter la compétition entre les espèces, qui n'ont pas les mêmes besoins [BOUGARAN, 2014].

La limitation de certains nutriments permet également de produire certaines molécules. En effet, c'est en absence de N que les microalgues produisent le plus de lipides en utilisant la chlorophylle comme source de N. La culture prend alors une couleur jaune [LIN LUO et al, 2019].

### **1.6 Interactions entre les algues et les bactéries**

Les bactéries présentes dans les milieux de culture algaux sont généralement de trois types : les bactéries hétérotrophes, qui utilisent le carbone organique pour leur croissance, les AOB (Ammonium Oxidizing Bacteria) et les NOB (Nitrite Oxidizing Bacteria) qui utilisent le carbone inorganique. L'ensemble des bactéries présentes dans le milieu consomment, tout comme les algues, du  $\text{NH}_4^+$  : bactéries et algues sont donc en compétition lorsque le  $\text{NH}_4^+$  représente la seule source de N disponible. L'étude de WU et al, 2020 a en effet démontré que les bactéries nitrifiantes étaient moins efficaces en présence de croissance algale à cause de la compétition pour l'azote inorganique. Aucun impact des bactéries sur la croissance algale n'a pu être démontré au cours de cette étude cependant.

Les AOB et les NOB, en tant que bactéries nitrifiantes, ont également un effet non négligeable sur le pH et par conséquent sur la croissance algale. Au sein de la culture de microalgues, l'influence de la température sur le pH est même négligeable face à l'influence de la nitrification. En effet, le  $\text{NH}_4^+$ , en s'oxydant en  $\text{NO}_3^-$ , produit des ions  $\text{H}^+$  dans le milieu, qui ont pour effet de diminuer le pH. Inversement, l'augmentation du pH limite la nitrification [STRAUSS et al, 2002].

Si un phénomène de symbiose peut-être observé dans la mesure où les algues produisent l' $\text{O}_2$  dont les bactéries AOB et NOB ont besoin pour leur croissance, microalgues et bactéries sont également en compétition pour le carbone inorganique.

### **1.7 Comparaison des productivités algales en raceway et photobioréacteur**

Comme mentionné plus tôt, une concentration d'algues trop importante peut nuire au développement de ces dernières en limitant l'accès à la lumière. Par exemple, dans le cas d'un photobioréacteur, l'épaisseur du milieu de culture est faible (inférieure à 10cm) et la lumière pénètre dans le milieu de culture par plusieurs côtés : la concentration d'algues pourra donc être plus importante que dans un bassin raceway dont la hauteur d'eau est de 20 à 30cm. Afin de confirmer ces hypothèses et d'évaluer l'étendue des valeurs que peuvent prendre la productivité et la concentration algale, un état de l'art sur ces valeurs en photobioréacteur et en raceway a été réalisé et synthétisé dans les tableaux 3 et 4 ci-dessous.

Selon ces sources, la productivité algale mesurée en photobioréacteur (250mg/L.j) est globalement presque dix fois supérieure à celle mesurée en raceway (33mg/L.j). Cela explique le fait que les cultures de microalgues soient généralement réalisées en photobioréacteur et non en raceways, et donc le faible nombre de données en raceways par rapport aux photobioréacteurs. Les écart-types des deux jeux de données sont très élevés par rapport aux valeurs moyennes. Cela est dû à la variabilité due aux différentes conditions de culture (disponibilité des nutriments, température, pH, disponibilité de la lumière...). La concentration algale finale présente moins de différences entre les deux systèmes : la biomasse algale finale est deux fois supérieure en photobioréacteur (1,7g/L).

Tableau 4 : Quelques valeurs de productivité algale en PBR

Cultures de microalgues en photobioréacteurs		
Référence	Productivité algale (g/L/j)	Concentration algale (g/L)
YANG L. et al, 2015	0,58	3,01
TAN X. et al, 2014	0,37	2,05
YAN C. et al, 2014	0,601	4,81
CHENG J. et al, 2016	0,456	4,3
WANG L. et al, 2010 (A)		1,71
YAN C. et al, 2014		0,494
AKERSTROM A.M. et al, 2014	0,45	2,11
WANG L. et al, 2010 (B)		1,3
SINGH M. et al, 2011	0,076	0,612
FRANCHINO M. et al, 2013	0,26	
PRAJAPATI S.K. et al, 2014		1,42
JI F. et al, 2015		0,385
JI F. et al, 2015		1,039
JI F. et al, 2014	0,029	0,412
CAI T. et al, 2013 (A)	0,092	0,92
CAI T. et al, 2013 (A)	0,155	
CAI T. et al, 2013 (B)	0,151	
CAI T. et al, 2013 (B)	0,212	
LEVINE R.B. et al, 2011	0,088	
PARK J. et al, 2010	0,118	1,5
DICKINSON K.E. et al, 2015	0,67	
XU J. et al, 2015	0,311	
UGGETTI E. et al, 2015		2,6
SHIN D.Y et al, 2015	0,0508	1,49
YU Z. et al, 2017		0,53
ABU AJAR H.A. et al, 2017	0,042	
NWOBA E.G. et al, 2016	0,047	
<b>Moyenne</b>	<b>0,250</b>	<b>1,705</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>0,211</b>	<b>1,284</b>

Tableau 3 : Quelques valeurs de productivité algale en raceways

Cultures de microalgues en raceways		
Référence	Productivité algale (g/L/j)	Concentration algale (g/L)
SEREJO M.L. et al, 2015		0,6
SEREJO M.L. et al, 2015	0,0185	
NWOBA E.G. et al, 2016	0,024	
RAEISOSSADATI M. et al, 2019	0,06	0,84
RAEISOSSADATI M. et al, 2019	0,03	0,84
<b>Moyenne</b>	<b>0,033</b>	<b>0,760</b>
<b>Ecart-type</b>	<b>0,019</b>	<b>0,139</b>

Si les productivités algales sont plus élevées en PBR, les coûts de production sont également beaucoup plus élevés. Ainsi, ces systèmes plus onéreux sont principalement réservés à la production de biomasse destinée à des produits de haute valeur ajoutée (cosmétique, pharmaceutique, alimentation humaine...), tandis que les systèmes type raceways sont plus adaptés à la production de biomasse destinée à l'alimentation animale, les bioénergies ou les engrais.

En conclusion, la disparité des résultats concernant les cultures de microalgues souligne la complexité des facteurs mis en jeu et de leurs interactions et par conséquent la nécessité d'approfondir la compréhension des processus au sein des cultures de microalgues. L'étude et l'approfondissement de ces processus a été réalisé au cours de ce travail avec deux approches distinctes et complémentaires : la simulation numérique et la simulation expérimentale. Les résultats de ces deux approches seront présentés par la suite.

## 2. Matériel et méthode

### 2.1 Description des expérimentations

Comme expliqué précédemment, les expérimentations permettant d'étudier les processus au sein des cultures de microalgues sont réalisées dans des pilotes de type raceways, présentés ci-après. Pour démarrer les expérimentations, un inoculum de microalgues est utilisé. Des prélèvements et des analyses sont réalisés régulièrement afin de connaître les évolutions du milieu de culture.

#### 2.1.1 Entretien d'un inoculum

Afin de disposer d'une quantité suffisante de microalgues pour démarrer les expérimentations en raceways, une culture de microalgues appelée inoculum est entretenue en continu. L'inoculum est constitué d'un bassin de 120L où croissent les algues avant d'être intégrées dans les raceways pour les expérimentations. Il est agité en continu par une pompe, ce qui permet aux algues présentes au fond de l'inoculum de remonter à la surface régulièrement pour capter l'énergie lumineuse nécessaire à leur activité photosynthétique. Un suivi hebdomadaire des paramètres physico-chimiques de l'inoculum (détaillé plus loin) est réalisé afin de s'assurer que les algues qu'il contenait continuaient de se maintenir, assurant ainsi une réserve de biomasse algale pour les expérimentations au sein des raceways. Suite aux résultats obtenus, un ajout dans le milieu de culture de  $\text{HCO}_3^-$  (entraîne un pH de 6 à 7), de  $\text{CO}_3^{2-}$  (entraîne un pH de 8 à 9) ou d'engrais peut être décidé. Lorsque la concentration en algues dans ce bassin est élevée (densité optique supérieure à 1), environ 80% du milieu de culture et des algues sont vidangés et remplacés par de l'eau.

#### 2.1.2 Description des systèmes raceways et des expérimentations

La culture de microalgues est installée sous serre, dans trois bassins de 400L de type raceways nommés Ginko, Lotus et Iris (figure 2). Il s'agit d'un système de type canal circulaire avec agitation à roues. La mesure du pH, de la température et de l'oxygène dissous en continu est réalisée par 2 sondes IQ Sensor Net DIQ/S 282 placées dans chaque raceway. Le pH est régulé entre 2 valeurs seuils grâce à un système d'injections automatiques de  $\text{CO}_2$  qui permettent d'abaisser le pH et ainsi de compenser l'augmentation du pH due à la croissance algale (figure 3). Les paramètres météorologiques auxquels sont soumis les raceways sont également mesurés à l'aide d'une station récoltant les valeurs de température et d'intensité lumineuse à l'intérieur de la serre.

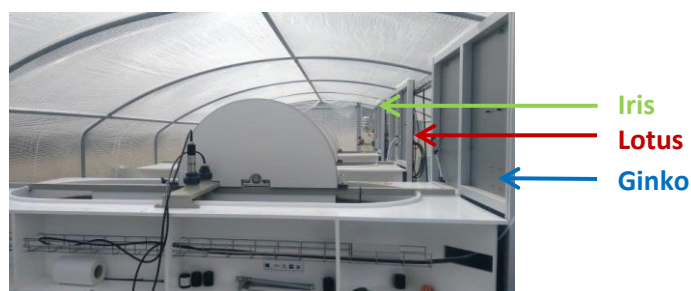


Figure 2 : Disposition des raceways dans la serre

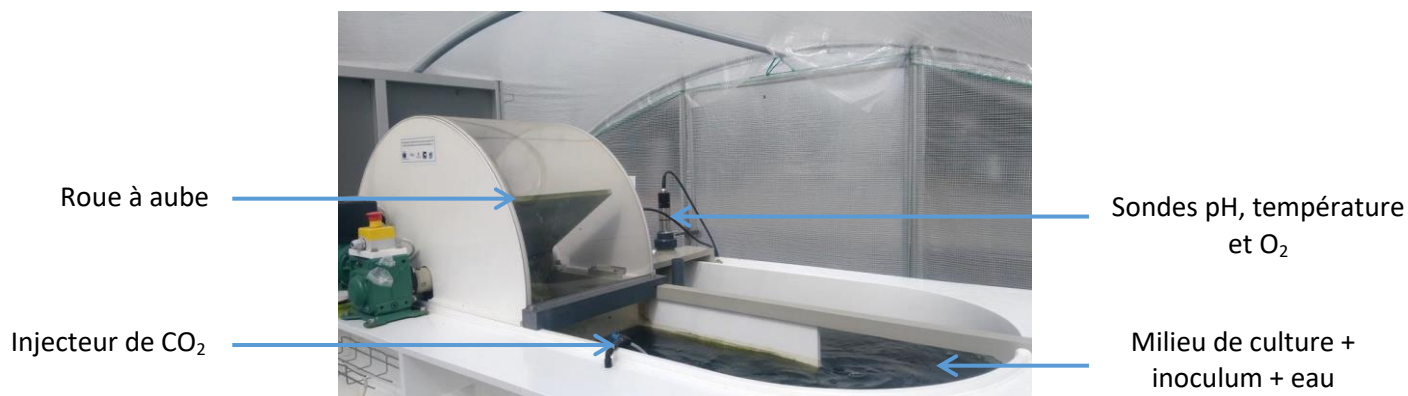


Figure 3 : Equipement des raceways

Au cours de ce travail, les expérimentations sur les raceways sont menées en batch, c'est-à-dire que toutes les algues et tous les éléments nutritifs sont apportés en début d'expérimentation et qu'aucun soutirage n'est effectué durant toute la durée de l'expérimentation. Par opposition, un système continu est alimenté régulièrement en solution nutritive et les algues produites sont soutirées régulièrement également. La notion de temps de séjour ne sera donc pas intégrée aux expérimentations. Le système ouvert constitué par les raceways sous serre et la présence de digestat est propice à l'utilisation d'un consortium de microalgues naturel, composé des genres *Scenedesmus* et *Chlorella*. Ces taxons au fonctionnement mixotrophe sont présents dans 90% des milieux et sont donc naturellement utilisés dans les cultures de microalgues. En outre, ces microalgues présentent une capacité à se développer en milieu eutrophisé, que constituera le milieu ajouté de digestat [MARCILHAC, 2014].

L'objectif des expérimentations sur les raceways est d'établir des liens entre les concentrations en composés azotés, carbonés, la production de biomasse et les conditions météorologiques et physico-chimiques du milieu de culture. La partie expérimentale de ce stage fera donc l'objet de mesures analytiques en laboratoire à partir de prélèvements réalisés sur l'inoculum et sur chacun des trois raceways. Ces trois raceways sont identiques, les expériences effectuées simultanément dans ces trois bassins permettraient donc de comparer les résultats en fonction des différentes conditions de culture imposées au début de l'expérience. Il convient cependant de s'assurer que les différences constatées entre les raceways sont dues aux paramètres des expériences et non pas à des différences de fonctionnement inhérentes aux raceways eux-mêmes. Trois expérimentations de répétabilité ont donc été réalisées sur les trois raceways, soumis pendant trois semaines aux mêmes conditions et au sein desquels étaient mesurés les mêmes paramètres : densité optique, MES, MVS, TA, TAC, pH, DCO et concentrations en ions. Avant chaque expérimentation, les trois raceways étaient vidés puis nettoyés et les sondes recalibrées. Les bassins étaient ensuite remplis partiellement d'eau potable du robinet, puis le milieu nutritif (différent pour chaque expérimentation et détaillé ci-après) était versé dans chacun. Puis, chaque raceway était inoculé avec 20L d'inoculum et complété à 400L avec de l'eau du robinet. La régulation du pH par injection de CO<sub>2</sub> était ensuite activée. Avant chaque prélèvement quotidien, l'évaporation est compensée par un ajout d'eau afin de maintenir le volume des raceways constant.

#### 2.1.2.1 Expérimentation n°1 avec du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Un milieu BBM (Bold's Basal Medium) utilisant le NO<sub>3</sub><sup>-</sup> comme source d'azote a fait office de milieu nutritif pour la première expérimentation de répétabilité du 2 au 19 juin 2020. Les quantités utilisées pour la préparation du BBM sont présentées en annexe 1. Comme démontré dans le tableau 5 ci-dessous, les concentrations de chacun des éléments calculées à partir des quantités utilisées pour préparer le BBM ne correspondent pas exactement aux concentrations mesurées juste après le lancement des raceways. Les concentrations mesurées sont plus importantes car l'inoculum a amené une quantité supplémentaire en éléments, notamment en Na, Ca, Cl et Mg. Cependant, les concentrations dans les trois réacteurs sont identiques initialement.

Tableau 5 : Concentrations théoriques et mesurées du milieu de culture pour l'expérimentation n°1

Element	Concentrations calculées du BBM (mg/L)	Concentrations mesurées le 02/06/2020		
		Ginko	Lotus	Iris
N	41,2	51,1	49,3	49,5
P	53,2	50,0	47,7	50,9
Na	84,3	125,7	126,2	128,5
K	105,5	125,6	123,2	127,8
Ca	6,8	77,2	77,5	77,2
Cl	27,8	118,9	117,6	117,1
Mg	7,4	15,8	16,0	15,9

Le 4<sup>ème</sup> jour de la manipulation, soit le 5 juin, 100g de NaNO<sub>3</sub> ont été ajoutés dans chaque bassin afin de ne pas être limitant au cours de l'expérimentation, la quantité initiale de N dans le BBM étant apparue trop faible au vu de la consommation.

#### 2.1.2.2 Expérimentation n°2 avec du NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Un milieu BBM utilisant le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> comme source d'azote a fait office de milieu nutritif pour la deuxième expérimentation de répétabilité du 23 juin au 10 juillet (tableau 6). Du NaHCO<sub>3</sub> a également été ajouté par rapport à l'expérimentation précédente afin de disposer d'une quantité initiale de Cl, élément indispensable à la croissance des algues. Les quantités utilisées pour la préparation du BBM sont présentées en annexe 1.

Tableau 6 : Concentrations théoriques et mesurées du milieu de culture pour l'expérimentation n°2

Element	Concentrations calculées du BBM (mg/L)	Concentrations mesurées le 22/06/2020		
		Ginko	Lotus	Iris
N	98,2	106,3	104,7	105,6
P	53,2	48,9	47,9	49,6
Na	75,3	112,4	103,6	108,1
K	105,5	124,9	122,4	126,4
Ca	6,8	60,8	61,0	59,1
Cl	261,4	341,9	326,7	333,7
Mg	7,4	13,4	11,7	12,5

Les 5<sup>ème</sup> et 12<sup>ème</sup> jours de la manipulation, soit le 26 juin et le 3 juillet, 55,9g de NaHCO<sub>3</sub> ont été ajoutés dans chaque bassin afin d'enrichir le milieu en Cl et favoriser la croissance des algues. Enfin, il a été constaté au moment du lancement des réacteurs une différence de calibration de la sonde de Ginko, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la régulation du pH et donc sur la quantité de Cl disponible pour les algues. A partir du 10<sup>ème</sup> jour, le régulateur de pH sur Lotus a donc été programmé pour réguler le pH entre 7 et 7,6 au lieu de 7,2 et 7,8 afin d'essayer de compenser cette différence.

#### 2.1.2.3 Expérimentations n°3 avec du digestat

Lors de la troisième expérimentation de répétabilité (du 16 au 31 juillet), du digestat nanofiltré fourni par la société Nereus a été utilisé comme milieu de culture (tableau 7). L'annexe 1 présente la composition du digestat utilisé.

Tableau 7 : Concentrations mesurées sur le digestat seul dilué 20 fois et sur le milieu de culture inoculé

Element	Concentrations mesurées du digestat dilué 20 fois (mg/L)	Concentrations mesurées dans les raceways le 16/07/2020		
		Ginko	Lotus	Iris
N	104,9	109,4	105,9	108,4
P	2,0	2,0	1,8	1,9
Na	57,4	91,1	85,3	86,1
K	198,2	206,0	199,7	204,7
Ca	6,6	61,1	62,4	63,1
Cl	103,0	172,0	165,5	167,7
Mg	2,2	8,1	7,7	7,7

## 2.2 Suivi analytique des expérimentations

### 2.2.1 Description des méthodes analytiques

#### 2.2.1.1 Biomasse

- Mesure de la densité optique

La densité optique est un des indicateurs de la croissance algale et est utilisée pour le suivi de l'inoculum comme pour celui des raceways. Elle est mesurée en termes d'absorbance à 680nm (longueur d'onde d'absorption maximum de la chlorophylle) à l'aide d'un spectrophotomètre HACH



Lange DR 3900. L'échantillon blanc composé d'eau ultra pure était d'abord passé dans l'appareil avant de passer l'échantillon et d'obtenir une valeur d'absorbance. Plus cette valeur est élevée, plus la biomasse algale est importante. Lors de la dernière expérimentation avec du digestat, les échantillons nanofiltrés étaient également passés au spectrophotomètre afin de connaître la DO du digestat et la prendre en compte dans le calcul de la biomasse réelle.

#### - Mesure des MES et MVS

Pour le suivi des raceways, la mesure de biomasse par densité optique est complétée par une mesure de MES et de MVS par semaine, dont la méthode est détaillée dans le schéma ci-dessous (figure 4). En raison des très faibles masses mesurées, la mesure des MES et des MVS s'est avérée peu précise et porteuse de nombreuses sources d'erreurs. La biomasse a donc été finalement interprétée au regard des valeurs de DO et de DCO.

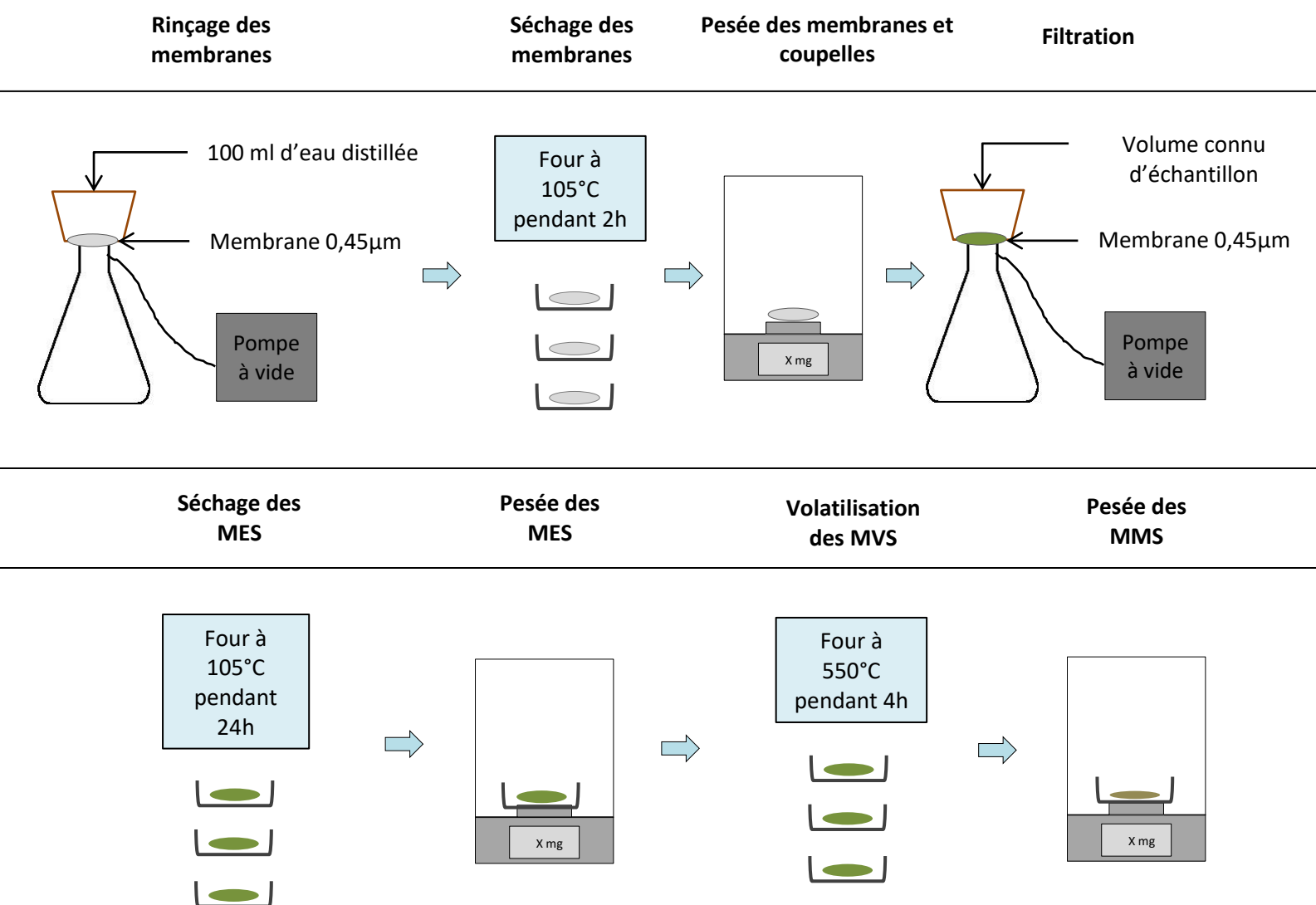


Figure 4 : Méthode de mesure des MES et MVS

#### - Mesure de la Demande Chimique en Oxygène

La DCO est mesurée une fois par semaine sur les trois raceways, en utilisant un kit HACH LCI 400 pour échantillons situés dans la gamme 0-1000 mg/L O<sub>2</sub> comme détaillé dans le schéma ci-dessous (figure 5).

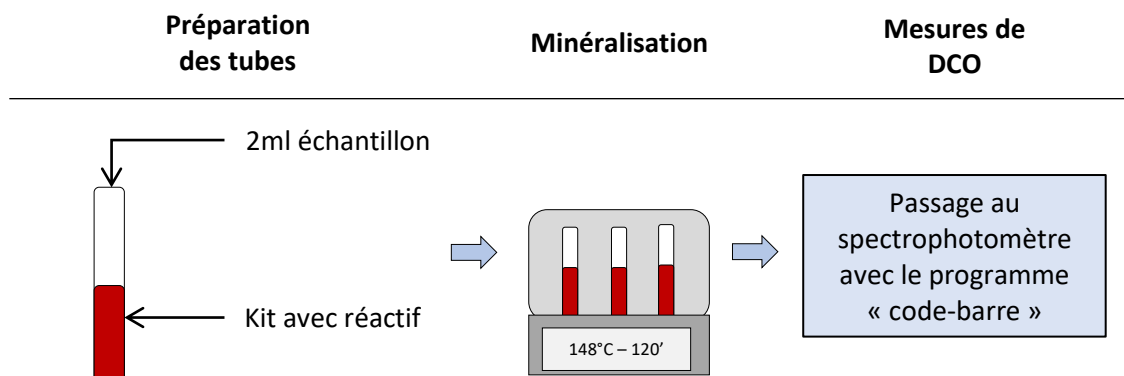


Figure 5 : Méthode de de mesure de la DCO

### 2.2.1.2 Physico-chimie

Sur l'inoculum comme sur les raceways, la mesure de la température, du pH, du TAC et du TA s'effectue à l'aide de l'appareil de titrage HACH Titralab AT 1000 Series sur 100ml d'échantillon. Pour le suivi des raceways, les concentrations en cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) et en anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) sont mesurées par chromatographie ionique Metrohm 850 Professional IC. Pour le suivi de l'inoculum, les concentrations approximatives en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$  sont mesurées à l'aide de bandelettes Quantofix que l'utilisateur plonge dans l'échantillon avant de comparer la couleur de la bandelette à une gamme de couleurs. Cette mesure simple et rapide n'a pas vocation à être précise mais vise surtout à donner un ordre d'idée de l'état général de l'inoculum.

## 2.3 Description du modèle

L'outil utilisé pour les simulations numériques est un modèle dynamique biocinétique simulant la culture de microalgues en présence de bactéries hétérotrophes et autotrophes. Ce modèle inspiré des travaux de Wagner et al (2016) a été développé au laboratoire par Béline et al (2017) sur la base de résultats expérimentaux obtenus en photobioréacteur. Ce modèle a été implémenté en utilisant le logiciel de calcul numérique SciLab et permet de simuler les croissances algales et bactériennes en fonction des conditions dans le milieu de culture.

### 2.3.1 Fonctionnement et processus pris en compte par le modèle

Les différents processus (croissance, stockage de nutriments, inactivation, etc.) pris en compte dans le modèle sont présentés en annexe 2. Ces processus concernent les microalgues, les bactéries hétérotrophes et autotrophes mais également les équilibres acido-basiques et les transferts gazeux. Les deux schémas en annexe 3 synthétisent les liens entre les processus mis en jeu dans la modélisation, le premier pour la croissance autotrophe des algues et le second pour la croissance hétérotrophe. Comme expliqué plus tôt dans la revue de littérature, ces deux modes de croissance diffèrent par la source de carbone utilisée. En autotrophie, les microalgues utilisent le  $\text{CO}_2$  comme source de carbone et produisent de l' $\text{O}_2$ . Dans les deux cas, les algues ont besoin d'une source de N ( $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{NO}_3^-$ ) et de P ( $\text{PO}_4^{2-}$ ). Contrairement aux bactéries, les algues ont la capacité de stocker ces nutriments pour une utilisation ultérieure (cela correspond aux « réserves » indiquées sur les schémas). Enfin, lorsque les algues et les bactéries sont inactivées, elles rejettent de la matière organique. Cette matière organique est alors utilisée, en conditions aérobies, par les bactéries hétérotrophes. En revanche, en anaérobiose, les bactéries hétérotrophes utilisent le  $\text{NO}_3^-$  et le  $\text{NO}_2^-$ . Les bactéries autotrophes, soit les AOB et les NOB, nitrifient respectivement le  $\text{NH}_4^+$  et le  $\text{NO}_2^-$ , ce qui occasionne une baisse de pH. Si elles utilisent l' $\text{O}_2$  produit par les algues, elles sont également en compétition avec ces dernières pour le N, le P et le carbone inorganique (CI).

Les cinétiques des différents processus pris en compte sont présentées en annexe 2. De même la stœchiométrie du modèle est présentée en annexe 4 sous forme d'une matrice de Petersen. L'ensemble des paramètres cinétiques, stœchiométriques et physico-chimiques utilisés initialement



lors de ce travail sont présentés en annexe 5 et 6. Ils sont issus de la bibliographie et des travaux antérieurs du laboratoire.

Le logiciel de calcul numérique est interfacé avec des fichiers Excel et les paramètres et données d'entrée du modèle sont ainsi facilement modifiables sur des fichiers Excel. Une fois lancé, le logiciel de calcul numérique génère, à partir du modèle, un tableau de données où des valeurs sont modélisées entre chaque pas de temps, à la fois celles caractérisant le milieu de culture des algues (concentrations en  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{O}_2$ , matière organique, bactéries...) et les réserves de N et de P internes des algues en fonction du temps. Ce tableau est ensuite copié dans un fichier « Template » réalisé au cours de ce travail où ont été préalablement tracés et mis en forme les graphiques rassemblant les données d'intérêt pour l'étude. Au-delà des paramètres présentés précédemment, pour chaque modélisation, il est également nécessaire de fournir au logiciel de calcul les paramètres du procédé modélisé (volume, coefficient de transfert liquide gaz, lumière, temps d'expérimentation, etc...) et les données initiales en début d'expérimentation/simulation. Un exemple des données nécessaires est fourni en annexe 7.

Pour notre étude, nous avons utilisé des données opératoires et initiales proches des conditions expérimentales étudiées lors des précédents travaux réalisés sur les pilotes expérimentaux que nous devons utiliser. L'intrant utilisé pour la modélisation était un digestat nanofiltré dilué vingt fois aux caractéristiques identiques à celui prévu au niveau expérimental. Les valeurs de  $K_{LA}$  (coefficient mesurant la capacité d'un gaz à passer de la phase gazeuse à la phase dissoute) utilisées dans le modèle sont celles déterminées expérimentalement sur les raceways en amont du stage.

Pour toutes les simulations, le paramètre choisi pour caractériser la croissance algale est la productivité algale finale, calculée avec la concentration en biomasse obtenue à la fin de la simulation, et la productivité maximale, calculée avec la concentration en biomasse maximale obtenue au cours de la simulation. Cette valeur est plus précise que la biomasse finale puisqu'elle prend en compte la dimension temporelle de la croissance algale.

$$\text{Productivité} = \frac{\text{Concentration en biomasse maximale ou finale} - \text{Concentration en biomasse initiale}}{\text{Nombre de jours pour atteindre la biomasse maximale ou finale}}$$

### 2.3.2 Améliorations du modèle

Les travaux de modélisation ont permis de mettre en évidence différents défauts du modèle. Il a ainsi été amélioré tout au long des expérimentations.

#### 2.3.2.1 De la version 1 à la version 2

Dans un premier lieu, les résultats de simulations ayant pour objectif de tester l'influence du rapport N/P sur la productivité algale ont montré une croissance plus importante des AOB lorsque la concentration en P diminuait, alors que les AOB sont aussi supposées avoir besoin de P pour leur croissance. Cette série de modélisations a ainsi permis de mettre en évidence un biais du modèle qui ne limitait pas le P pour les bactéries : dans les équations de croissance bactérienne, le  $K_{SIP}$  pour les bactéries (soit la constante de demi-saturation en P, correspondant à l'absorption du P par les bactéries), n'apparaissait pas. La source de P pour les bactéries était donc considérée comme infinie, ce qui explique que le modèle calculait des valeurs de concentration en P négatives avec un rapport N/P élevé. Le modèle a donc été modifié en ajoutant le terme correspondant à la limitation par le P dans les processus RB1 à RB5 correspondant aux processus de croissance bactériens. Deux séries de simulations, identiques et testées chacune sur une version du modèle, ont permis de vérifier le bon fonctionnement de cette version 2.

#### 2.3.2.2 De la version 2 à la version 3a, 3b et 3c

Une version « 3a » du modèle a ensuite été réalisée afin de pouvoir tester des modélisations sur des expériences en continu et non plus forcément en batch. Le nouveau modèle permet également de

modifier plus facilement les limites hautes et basses de régulation du pH : ces valeurs ont été sorties du code du programme et placées dans le fichier Excel permettant de changer directement les paramètres opératoires. Le contrôle pH peut également être activé ou désactivé en modifiant ce fichier, ainsi que les concentrations de saturation des gaz en surface et en injection (calculées à partir de la loi de Henry, qui permet de prendre en compte la température et le pourcentage de l'élément considéré dans l'atmosphère ou dans le gaz injecté). En outre, les concentrations en CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et NH<sub>3</sub> apportées par injection ou transférées par la surface ont été ajoutées aux calculs dans une version intermédiaire appelée « 3b »; dans la version précédente, seule la quantité totale de gaz était calculée. Différencier les flux par infiltration et par transferts de surface permet d'accéder à un détail d'information nécessaire à l'établissement d'un bilan carbone pour chaque simulation à partir du CI initial, de la quantité de C présente dans la biomasse algale et bactérienne ainsi que dans la matière organique, de la quantité de CO<sub>2</sub> injectée que la version modifiée du modèle permet à présent de calculer, de la quantité de CO<sub>2</sub> partant par la surface. En ce qui concerne la modification des équations différentielles qui ont permis d'ajouter le calcul de la quantité de gaz infiltrée et transférée par surface, il s'est avéré que le logiciel opérait une modification légère des pas de temps par rapport à la version précédente. Or, les injections de CO<sub>2</sub> s'effectuent sur des temps très courts, ce qui apporte une légère instabilité au modèle. Cette approximation a induit une légère différence avec la version précédente au niveau de la courbe de pH, à paramètres et données d'entrée égales. Ces différences sont néanmoins très légères et ne semblent pas compromettre la validité des résultats des simulations.

Enfin, à l'aide des informations données par la matrice, des calculs ont été réalisés afin de mieux comprendre dans quelle mesure chaque mécanisme (croissance et stockage notamment) influe sur le pH, en fonction du substrat utilisé pour l'azote (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ces calculs sont présentés dans les deux schémas en annexe 8.

Ces calculs ont permis de chiffrer l'augmentation du pH lors de la croissance des microalgues, différente selon le substrat azoté disponible. Lorsque le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (substrat préférentiellement utilisé par les algues) est disponible, son stockage et son utilisation pour la croissance des microalgues a tendance à acidifier le milieu. Cette acidification est néanmoins légèrement neutralisée par l'utilisation du CO<sub>2</sub> et du PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, amenant à une acidification générale du milieu. En revanche, lorsque le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> n'est pas disponible, les microalgues utilisent le NO<sub>3</sub><sup>-</sup> comme substrat pour l'azote. Son stockage et son utilisation ont alors tendance à basifier le milieu en plus de la basification liée à l'utilisation du CO<sub>2</sub> et du PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Dans ce cas, le pH aura tendance à augmenter, ce qui engendrera des injections de CO<sub>2</sub> plus importantes, contrairement au cas où le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> est utilisé pour lequel les injections auront tendance à diminuer. Ces injections favoriseront alors la croissance algale en fournissant une source de CI. Ces hypothèses seront vérifiées lors de simulations numériques. Enfin, le modèle ne prend en compte qu'une valeur d'intensité lumineuse théorique et constante pendant 12h, ce qui est très éloigné de la réalité. Il a donc été modifié (version 3c) afin de pouvoir prendre en compte des valeurs expérimentales mesurées dans le temps et d'adapter l'atténuation de la lumière spécifiquement aux réacteurs utilisés. Cette prise en compte a permis d'imiter de manière beaucoup plus précise les dynamiques de croissance réellement observées dans les bassins.

### **3. Résultats des simulations numériques du procédé de culture de microalgues en réacteur ouvert**

A partir du modèle présenté ci-dessus, les résultats de simulation ont dans un premier temps été comparés à des résultats expérimentaux obtenus précédemment sur les pilotes en juillet 2019. Les interactions algues-bactéries et la dynamique du carbone et de l'azote ont par la suite été étudiés grâce aux simulations.

### 3.1 Comparaisons des résultats des simulations numériques avec les résultats expérimentaux

Au cours de l'été 2019, des valeurs de biomasse algale,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ , carbone inorganique, pH,  $\text{O}_2$ , température et intensité lumineuses ont été mesurées sur chacun des trois raceways sur une période de 11 jours. En basant les données initiales du modèle sur ces données mesurées au premier jour pour le raceway Iris (où la croissance observée était la meilleure), les séries de modélisations suivantes visent à vérifier la bonne représentation de la dynamique des processus. Il convient de rappeler qu'à ce stade, pour la modélisation de la lumière, nous utilisons des données théoriques éloignées de la réalité aussi bien au niveau de la forme que de l'intensité, comme illustré sur le

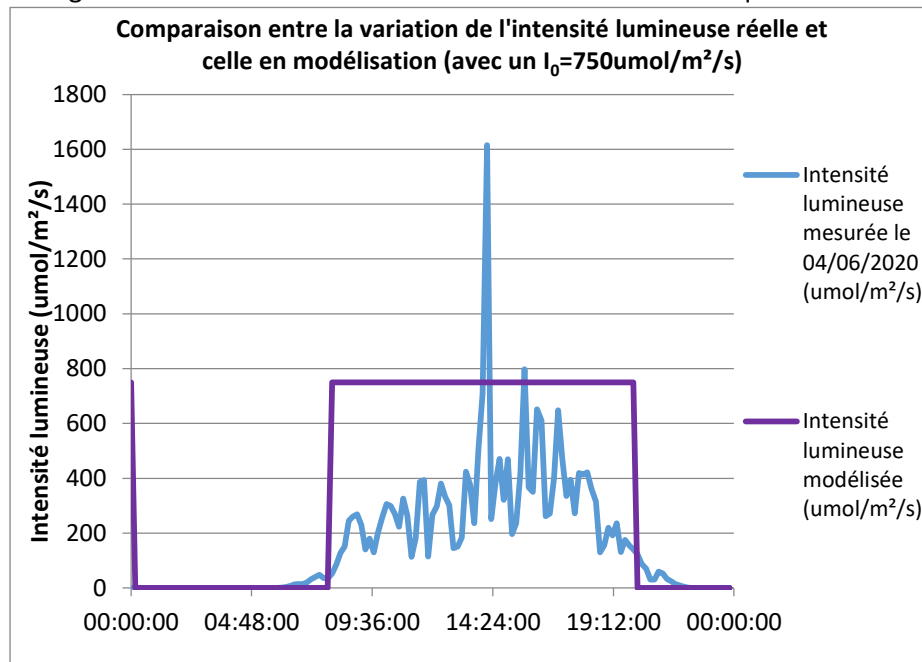


Figure 6 : Graphique comparant le IO modélisé et réel

graphique ci-dessous (figure 6). De plus, la modélisation de l'atténuation de la lumière dans le bassin au cours de cette partie du travail n'a pas été adaptée spécifiquement à ces réacteurs. Nous ne recherchons donc pas à simuler exactement les résultats obtenus mais les principales tendances et la lumière incidente est un paramètre de calage.

Le réacteur Iris est composé d'un milieu de culture limité en P et en Cl. Un ajout de N, P et C a été réalisé au 8<sup>ème</sup> jour, modification qui n'a pas été modélisée. Ainsi, seuls les résultats des huit premiers jours ont donc été considérés. La composition en éléments principaux est indiquée dans le tableau ci-dessous, ainsi que les conditions de modélisation.

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration expérimentale initiale en $\text{PO}_4^{2-}$	Concentration expérimentale initiale en $\text{NH}_4^+$	Concentration expérimentale initiale en Cl	Régulation pH
2	11 jours	1,3 gP/m <sup>3</sup>	88,4 gN/m <sup>3</sup>	21,9 gC/m <sup>3</sup>	Entre 7,3 et 7,8

Expérimentalement, la concentration algale après 8 jours est de 337gDCO/m<sup>3</sup>. Les résultats de quatre des modélisations réalisées sont synthétisés dans le tableau 8 ci-dessous. Il s'agit des plus importantes pour l'étude des différences entre les résultats expérimentaux et modélisés et pour le calage des paramètres non limitants tels que la lumière incidente. Les modélisations I2, I12 et I10

Tableau 8 : Synthèse des résultats obtenus par modélisation avec les données d'Iris

Référence de la modélisation	Lumière incidente (μmol/m²/s)	Phosphates (gP/m3)	Cl (gC/m3)	Concentration algale finale après 8 jours (gCOD/m3)
I2	250	1,3	21,9	144,7
I12	750	1,3	21,9	208,3
I10	1000	1,3	21,9	210,5
I18	750	3	35	332,1

correspondent aux données initiales mesurées dans la réalité sur Iris, en ce qui concerne les éléments chimiques et avec des intensités lumineuses incidentes allant de 250 à 1000μmol/m²/s. Or, il s'avère que la concentration

algale après 8 jours n'est, au mieux, que de 210gCOD/m<sup>3</sup> dans le modèle alors qu'elle était de 337 dans la réalité dans le bassin, et ce dans les mêmes conditions théoriques. Dans le modèle, la valeur

de biomasse algale commençant à stagner à partir d'une valeur de lumière incidente de  $750\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , cette valeur a été retenue comme valeur non limitante à rentrer dans le modèle (au vu des conditions excellentes de luminosité lors des expérimentations). Cependant, même avec une lumière incidente non limitante comme condition initiale, la concentration algale n'était que de  $208,3\text{gCOD}/\text{m}^3$  après 8 jours dans le modèle. Les concentrations en P et CI du modèle ont donc été augmentées progressivement jusqu'à obtenir une valeur approchant la biomasse réelle (figure 7), tout en restant globalement dans le même ordre de grandeur que les données réelles initiales ( $[\text{P}]=1,3\text{g}/\text{m}^3$  et  $[\text{CI}]=21,9\text{ g}/\text{m}^3$ ). En effet, la différence de biomasse réelle et mesurée amène à remettre en question la méthode de mesure expérimentale de P et CI : le P peut par exemple précipiter et ainsi fausser la mesure effectuée sur la partie soluble du milieu de culture. Par ailleurs, en comparant les valeurs expérimentales et modélisées, la limitation en P semble avoir un comportement similaire dans les deux cas : le P est toujours épuisé en trois jours. En revanche, le CI est constant dans l'expérimental alors qu'il est épuisé au bout de 5 jours dans le modèle, ce qui stoppe la croissance algale. Il est donc possible que le modèle sous-estime le CI disponible, peut-être en surestimant le stripping (passage du CI sous forme de  $\text{CO}_2$  dans la phase gazeuse de l'atmosphère)

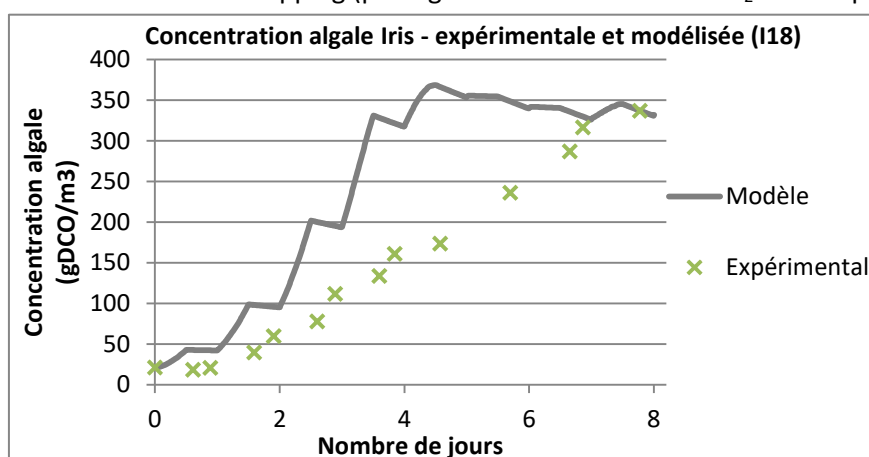


Figure 7 : Concentration algale mesurée sur Iris en 2019 et modélisée (avec calage des paramètres IO, CI et P)

ou la consommation par les algues (les concentrations en bactéries étant faibles).

Ces modélisations ont permis de caler des valeurs de P et de CI minimales à appliquer : les vraies valeurs expérimentales ne conviennent en effet pas avec la limitation en P et en CI du modèle pour atteindre la biomasse algale expérimentale.

En définitive, les simulations réalisées à partir des données initiales mesurées sur Iris ont permis de caler une valeur d'intensité lumineuse non limitante, une valeur de CI limitant et/ou une valeur de P limitant afin que les résultats modélisés puissent être comparés aux résultats expérimentaux.

Les différences de comportement des paramètres observées dans les trois raceways par rapport au modèle soulèvent ainsi plusieurs questions :

- Premièrement, les irrégularités observées dans les mesures de P et de CI révèlent en outre certaines difficultés analytiques sur ces composants. Ces points sont également à approfondir.
- Enfin, la calibration du modèle concernant la lumière mais aussi les interactions avec les bactéries et l'impact des conditions (CI, pH, etc) reste à faire ou à affiner dans les conditions expérimentales spécifiques.

Dans un premiers temps et du fait du confinement, nous avons cependant utilisé ce modèle pour mieux comprendre l'impact des conditions et les interactions entre les microorganismes afin d'améliorer nos connaissances sur les processus, mieux appréhender les expérimentations à mettre en œuvre et mieux comprendre les résultats expérimentaux.

### 3.2 Etude des interactions entre les algues et les bactéries en fonction des conditions

Les données initiales de la simulation témoin pour l'étude des interactions entre les algues et les bactéries sont présentées en annexe 7. Ces conditions correspondent à un digestat nanofiltré non carencé en P.

⇒ *Test de la sensibilité de la productivité algale aux variations croisées des concentrations en bactéries*

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en $\text{PO}_4^{2-}$	Concentration initiale en $\text{NH}_4^+$	Concentration initiale en Cl	Régulation pH
1	14 jours	10 gP/m <sup>3</sup>	106 gN/m <sup>3</sup>	142 gC/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

Pour l'étude des interactions algues/bactéries, nous avons fait varier les concentrations des différents microorganismes (AOB, NOB et bactéries hétérotrophes) de façon simultanée et nous en avons étudié l'effet sur le comportement global des algues. Les autres paramètres (concentrations en nutriments et en  $\text{O}_2$ , pH, etc.) (annexe 7) sont restés strictement les mêmes au cours de ces modélisations afin de permettre une comparaison entre les modélisations réalisées. Cette série de modélisations consistait ainsi en l'évaluation de la sensibilité de la productivité algale aux variations croisées des concentrations en bactéries hétérotrophes, en bactéries AOB et en bactéries NOB. L'annexe 9 récapitule les conditions de chaque modélisation, les résultats sur la productivité algale et le pourcentage de variation avec l'expérience témoin (très peu d'AOB, de NOB et d'hétérotrophes). Au-delà de 10% de variation avec l'expérience témoin, l'impact sur la productivité algale est considéré comme significatif. L'étude du tableau de résultats ainsi obtenu en annexe 9 amène aux observations suivantes :

- Effet des AOB :

Les courbes représentant l'évolution de la biomasse algale pour les modélisations C25 et C24 (où les concentrations en AOB ont été augmentées) témoignent de l'impact significatif négatif des AOB sur la productivité algale. Cette baisse de productivité est due à l'acidification du milieu (figure a de l'annexe 10) qui accompagne le processus de nitrification, caractérisé par la production d'ions  $\text{H}^+$ , et cela avec ou sans NOB. Cette diminution du pH due à la production de  $\text{H}^+$  est très importante et n'est donc pas contrebalancée par le fait que les AOB consomment du  $\text{CO}_2$ , ce qui aurait normalement pour effet d'augmenter le pH. L'effet global final des AOB est donc de faire baisser le pH au point que les injections de  $\text{CO}_2$  ne soient plus provoquées : une des sources principales de Cl pour les algues est alors supprimée. La comparaison de la productivité algale de la modélisation C33 (concentration en AOB légèrement augmentée de 0,001 à 0,005 gDCO/m<sup>3</sup>) par rapport à la modélisation témoin a permis de mettre en évidence le fait que les AOB commençaient à inhiber significativement la croissance algale à partir de 0,005 gDCO/m<sup>3</sup>, en l'absence d'hétérotrophes et de NOB dans les conditions testées.

- Effet des bactéries hétérotrophes :

Les résultats des simulations où seules les bactéries hétérotrophes sont nombreuses (notamment C29, C30 et C31) permettent de mettre en évidence que ces dernières n'ont pas d'effet sur la productivité algale. En particulier, les hétérotrophes ne sont pas en compétition avec les algues puisque dans le milieu sursaturé en oxygène elles consomment la matière organique et peu le N inorganique qu'utilisent les algues. De plus elles rejettent du  $\text{CO}_2$ , forme de carbone inorganique utilisable par les algues et donc favorable à leur développement. Seules, les hétérotrophes ont un faible rôle mais avec une tendance positive. Elles consomment de la matière organique mais en produisent également en faible quantité. Or, les algues consomment la matière organique ainsi hydrolysée par les hétérotrophes et profitent donc de leur action.

- Effet combiné des AOB et des bactéries hétérotrophes :

Au regard des résultats de productivité algale obtenues sur ces modélisations, l'effet des AOB est toujours négatif même en présence de bactéries hétérotrophes. Cependant, cet effet est parfois moindre en présence de bactéries hétérotrophes en raison de la compétition avec ces dernières pour le N et le P.

- Effet des NOB seules et en présence de AOB:

Les courbes de croissance algale des modélisations C16, C14, C11 et C9, où les NOB sont très nombreuses, ne montrent pas de différence significative avec celle de l'expérience témoin. Les NOB seules n'ont donc pas d'impact sur la croissance algale. Cela s'explique comme dit précédemment par le fait que les NOB ne puissent pas croître correctement sans le  $\text{NO}_2^-$  produit par les AOB.

En présence de AOB, les résultats de la modélisation C26 (beaucoup de NOB et d'AOB) montrent une réduction de l'effet négatif des AOB sur la croissance algale par les NOB. Cependant, les NOB utilisent le  $\text{NO}_2^-$  pour produire du  $\text{NO}_3^-$ , utilisable par les algues (figure c de l'annexe 10). Elles ne sont donc utiles pour les algues qu'en présence d'AOB, qui produisent le  $\text{NO}_2^-$ . Les quotas en N sont beaucoup plus élevés que pour C28, où les NOB sont absentes, ce qui induit une meilleure croissance algale. Au bout des 14 jours de modélisation, la concentration en carbone inorganique est plus haute en C26 qu'en C28 (figure d de l'annexe 10), ce qui favorise aussi les algues. Néanmoins, au regard des résultats de la modélisation C21 où les AOB sont plus nombreuses, la production de  $\text{NO}_3^-$  par les NOB ne suffit pas à favoriser les algues au point de contrebalancer la carence en carbone inorganique et la baisse de pH due aux AOB. Enfin, au regard des graphiques représentant l'évolution des concentrations en N, le  $\text{NH}_4^+$  est consommé plus rapidement que pour l'expérience témoin. En outre, la concentration en carbone inorganique diminue plus rapidement : les AOB sont donc en compétition avec les algues. En revanche, les NOB ont un effet positif sur la croissance algale car ils n'ont pas d'effet sur le pH et rendent le N disponible pour les algues.

- Conclusion sur l'effet des bactéries sur la productivité algale :

Le principal effet des bactéries sur les microalgues est lié aux AOB. En effet, l'augmentation des concentrations en AOB a pour conséquences l'augmentation de la nitrification et donc une augmentation de la concentration en  $\text{NO}_2^-$ , la diminution du carbone inorganique et une chute du pH. Le pH trop bas ainsi que la carence en CI dans le milieu induisent une forte limitation de la croissance algale. Une présence plus importante d'hétérotrophes et de NOB tend à diminuer cet effet (mais de manière relativement modérée dans les conditions testées). Pour réguler cette inhibition, ajouter au milieu une solution alcaline pourrait permettre de contrebalancer la baisse de pH induite par les AOB. Théoriquement, le N pourrait être introduit dans le milieu sous forme de  $\text{NO}_3^-$  et non de  $\text{NH}_4^+$  pour éviter le développement des AOB. Cependant, le substrat nutritif utilisé dans les expérimentations est un digestat, qui contient surtout de l'azote sous forme de  $\text{NH}_4^+$ . Une plus faible concentration en P pourrait également limiter la croissance des AOB. Cette hypothèse sera testée dans la série de simulations suivantes. Suite à ces résultats, l'impact de la constante d'hydrolyse de la matière organique a également été testé à l'aide de simulations. Les résultats montrent que l'augmentation de la constante augmente sensiblement la productivité grâce à une croissance hétérotrophe des algues plus importante. Cette constante n'impacte cependant pas les interactions AOB/algues.

⇒ **Tests sur l'influence du rapport N/P sur la productivité algale**

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en $\text{NH}_4^+$	Concentration initiale en CI	Régulation pH
2	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	142 gC/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

Les modélisations visant à déterminer l'influence du rapport N/P sur la productivité algale ont été recalculées à partir de la version 2 permettant de bien prendre en compte la limitation de la croissance des bactéries nitrifiantes par le P, validée par la série de modélisations précédente. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous (figure 8). La productivité algale diminue avec

la concentration en P, qui devient limitante pour leur croissance.

La concentration en AOB diminue aussi avec l'augmentation du rapport N/P. Le P est donc limitant pour la croissance algale et les AOB. En outre, en-dessous de 0,3 gP/m<sup>3</sup> (soit N/P=353), la concentration en AOB se stabilise voire augmente. En effet, pour cette valeur, la quantité d'algues est tellement

basse que les AOB n'ont presque plus de compétition et croissent

légèrement mieux. Dans une gamme de N/P allant de 10 à 1, la baisse des AOB est plus importante que la baisse de productivité algale, probablement du fait du stockage du P par les algues. Cette voie pourrait être utilisée pour limiter la nitrification mais entraîne également une baisse de productivité algale et nécessite une étude plus approfondie présentée dans la section suivante.

#### ⇒ Tests en fonction des AOB et du rapport N/P

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Concentration initiale en Cl	Régulation pH
2	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	142 gC/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

Afin de déterminer si une concentration en P inhiberait suffisamment la croissance des AOB pour favoriser les algues, plusieurs séries de modélisations à différents N/P faisant varier les concentrations en AOB ont été réalisées. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous (figure 9).

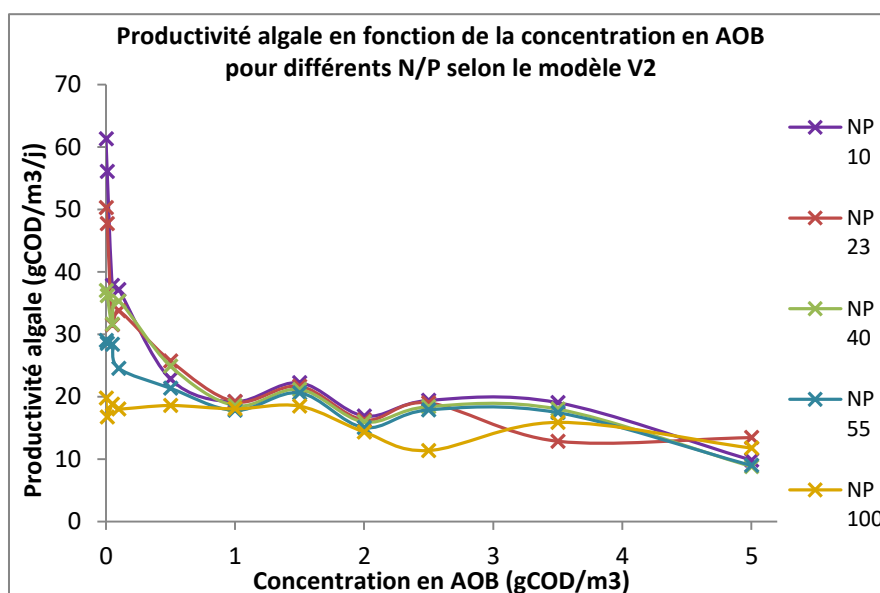


Figure 9 : Graphique des résultats des simulations AOB et N/P

La productivité algale semble être moins sensible aux variations des concentrations en AOB lorsque le rapport N/P augmente (donc que le P diminue). En effet, les AOB semblent limités par une moindre concentration en P. Lorsque la concentration initiale en AOB est faible, la productivité algale dépend surtout de l'apport en P : un N/P



plus faible est alors plus intéressant pour la croissance algale du fait de leur capacité à stocker le P, contrairement aux bactéries. En revanche, pour de hautes concentrations initiales en AOB, une concentration en P plus élevée n'est pas forcément bénéfique à la croissance algale.

### 3.3 Etude de la dynamique du carbone

Les simulations suivantes ont permis d'étudier la sensibilité du modèle aux paramètres liés au CO<sub>2</sub> en portant attention d'une part à la productivité algale et d'autre part au pourcentage de CO<sub>2</sub> injecté capté par la biomasse (le reste passant dans la phase atmosphérique). En effet, injecter une grande quantité de CO<sub>2</sub>, même si elle permet d'augmenter la productivité algale, risque de représenter un coût non proportionnel à l'efficacité observée en raison de la quantité perdue par les transferts de surface. Un compromis doit donc être trouvé pour une meilleure efficacité du CO<sub>2</sub> injecté.

#### 3.3.1 Tests d'efficacité du CO<sub>2</sub> injecté en fonction de la concentration en CI initial

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Régulation pH
3b	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

La série de simulations suivantes a permis de tester la sensibilité du pourcentage de CO<sub>2</sub> injecté réellement utilisé par les microalgues et de la productivité algale à la quantité initiale de CI. Les résultats sont synthétisés dans le graphique ci-dessous (figure 10). Plus le CI initial est important, moins la part de CO<sub>2</sub> captée est grande. Au contraire, la productivité augmente avec la concentration

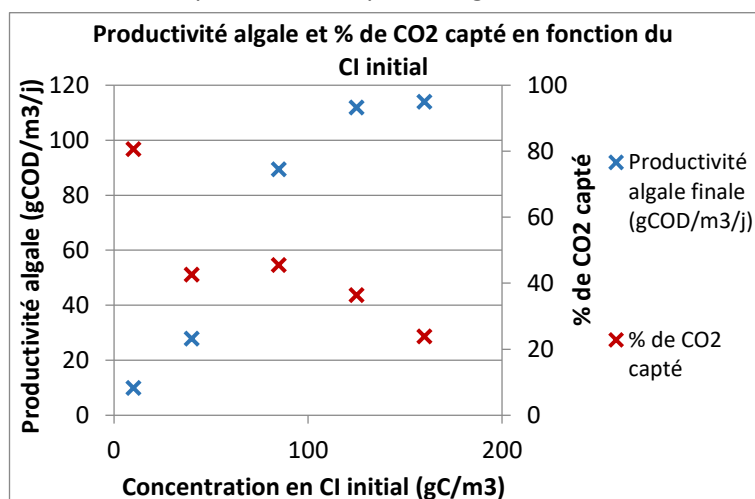


Figure 10 : Graphique des résultats des simulations selon le CI

initiale en CI. En effet, lorsque le CI est important, il est en excès par rapport à la consommation algale et une plus grande partie est susceptible de partir par stripping. Lorsque la quantité de CI initial est plus faible la croissance algale est moins importante, le pH augmente donc moins vite et les injections de CO<sub>2</sub> sont moins nombreuses. Or moins il y a d'injections, moins les réserves de CI disponibles pour les algues sont importantes et moins elles croissent. Une certaine quantité de CI initial est donc nécessaire afin de maintenir les injections tout au long de l'expérimentation.

#### 3.3.2 Tests avec variation du pH

⇒ Tests sur la productivité algale

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
3	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>

La série de simulations suivante a permis de tester la sensibilité de la productivité algale aux seuils de pH régulés au moyen d'injections de CO<sub>2</sub>. Les résultats des simulations, réalisées d'une part avec une concentration de CI limitante et d'autre part avec une concentration non limitante, sont synthétisés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Synthèse des résultats des simulations en fonction du pH

Conditions de simulation			Résultats avec CI limitant (35gC/m3)			Résultats avec CI non limitant (142gC/m3)			
Valeur basse pH	Valeur haute pH	Référence modélisation	Temps pour atteindre biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)	Référence modélisation	Temps pour atteindre biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)
6	6,5	PpH1	3,5	193,97	34,28	ClpH1	13,5	161,47	149,40
6,3	6,8	PpH2	3,5	186,97	31,59	ClpH2	13,5	159,95	147,67
5,8	6,3	PpH3	4,5	147,22	34,71	ClpH3	13,5	161,47	149,40
7	7,5	PpH4	4,1	120,20	27,17	ClpH4	13,5	157,21	145,02
7,7	8,2	PpH5	6,5	51,03	22,21	ClpH5	13,5	145,64	134,34



L'effet du pH sur la croissance algale n'est pour le moment pas pris en compte dans le modèle. Cependant, il s'avère au regard des résultats ci-dessus que le pH agit sur d'autres paramètres qui, eux, influencent la croissance algale. En effet, pour un pH entre 6 et 6,5, pour lequel la croissance algale est la plus forte, la quantité de CI augmente beaucoup au début des simulations, que le CI initial soit limitant ou non : cela est dû à une importante injection de CO<sub>2</sub> permettant d'atteindre le pH de 6. Afin de réguler le pH entre 6 et 6,5, des injections de CO<sub>2</sub> plus importantes sont nécessaires tout au long de la simulation, ce qui représente une source supplémentaire de CI et favorise ainsi la croissance algale. De plus, lorsque le pH est faible, l'équilibre entre les différentes formes de CI (CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) est favorable au CO<sub>2</sub>, forme utilisée par les algues.

Dans le cas des simulations réalisées à CI limitant, la productivité algale calculée sur la phase exponentielle est plus haute lorsque le pH est régulé entre 6 et 6,5, mais elle est très vite limitée par le CI, entièrement consommé au bout de quatre jours (figure 11). La croissance algale s'arrête, le pH cesse donc d'augmenter et les injections de CO<sub>2</sub> s'arrêtent également. La productivité calculée avec la biomasse finale varie au final assez peu en fonction des valeurs de régulation de pH. La productivité algale basée sur la phase de croissance exponentielle est plus élevée pour les modélisations avec CI limitant qu'avec un CI non limitant, car la productivité n'est alors calculée que sur les 4 premiers jours de croissance, après lesquels la carence en CI empêche la croissance algale. Cependant au regard de la biomasse finale la productivité est bien supérieure dans le cas d'un CI non limitant. Ainsi, quelque soient les valeurs de régulation du pH, l'augmentation de pH lié à la croissance algale n'est pas suffisante pour que les injections de CO<sub>2</sub> compensent la consommation de CO<sub>2</sub> par les microalgues et les pertes par la surface. On notera par ailleurs une chute brutale de pH pour la simulation à CI limitant régulée entre 6 et 6,5 de pH (figure 11). Cette chute est due à l'arrêt de la croissance algale (carence en CI). L'effet modélisé n'est pas aussi progressif qu'il devrait l'être en situation expérimentale car, dans le modèle, seuls les couples acide-base du PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et des carbonates sont pris en compte dans le calcul de pH. En réalité, d'autres espèces influencent cette valeur, en particulier lorsque le pH est inférieur à 6, et tamponne la valeur de pH qui chute ainsi moins rapidement.

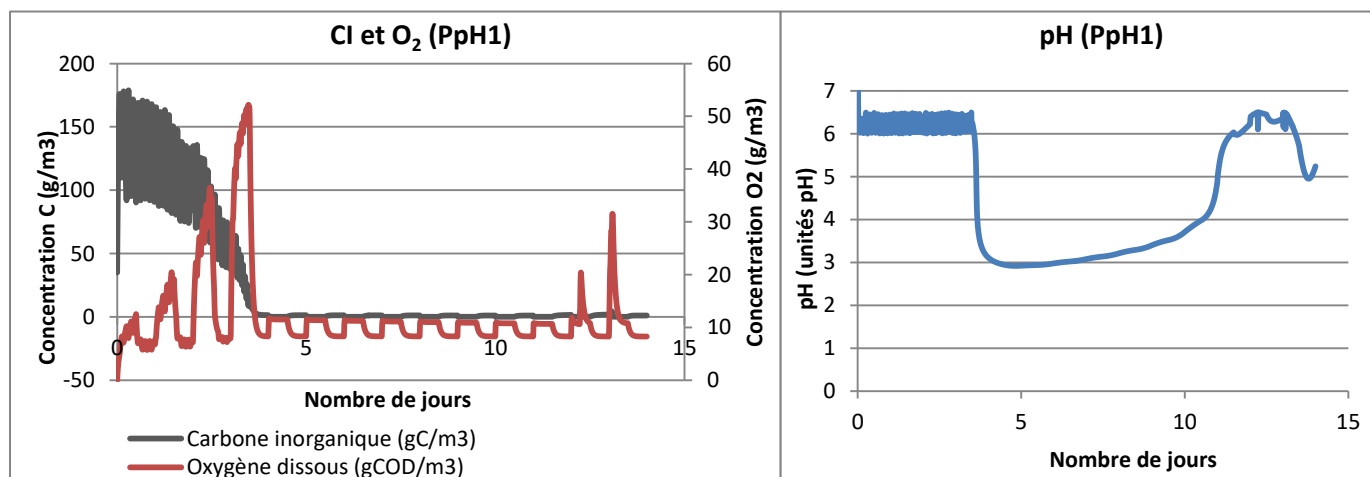


Figure 11 : Courbes correspondant aux résultats de modélisation PpH1

Dans le cas des simulations réalisées à CI non limitant, l'effet des variations de pH est plus modéré. En effet, le pH n'est pas pris en compte dans la croissance algale et le CI initial ne limite de toute façon pas la croissance algale, quelle que soit la quantité de CO<sub>2</sub> injectée. Le CI est consommé puis stagne lorsque les algues cessent leur croissance exponentielle, limitées par le N. Il est en grande partie sous forme de CO<sub>2</sub> dissous en raison du pH bas (figure 12). En revanche, pour un pH entre 7,7 et 8,2, la quantité de CO<sub>2</sub> dissous est presque nulle et correspond au CO<sub>2</sub> qui vient juste d'être injecté, mais qui rapidement prend la forme de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en raison du pH élevé.

On notera que la courbe de CI de la simulation ClpH1 présente très peu d'injections de CO<sub>2</sub> : la courbe de pH ne présente d'ailleurs aucune inflexion et reste sans régulation apparente entre 6 et 6,5, alors qu'elle devrait varier légèrement au vu des faibles injections de CO<sub>2</sub> visibles sur la figure. La

première injection de CO<sub>2</sub> a permis de faire chuter le pH de 8,2 à 6,5, puis malgré la croissance algale le pH reste constant à 6 sans régulation, ce qui constitue un phénomène inhabituel et amène à

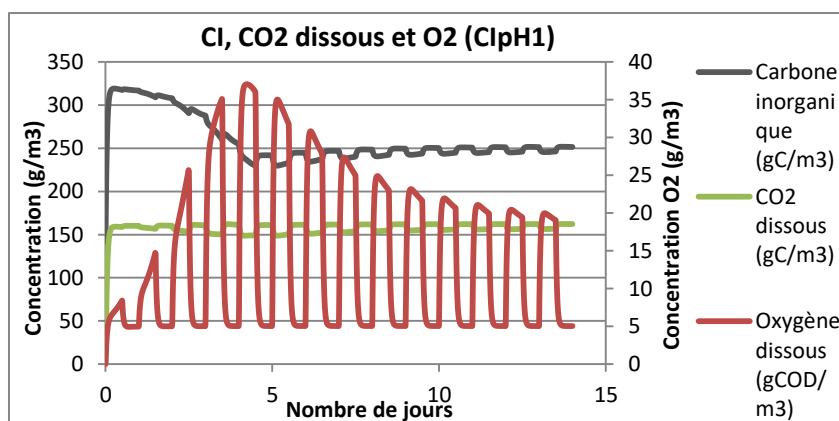


Figure 12 : Courbes correspondant à la simulation ClpH1

remettre en question la corrélation entre la production algale et le pH.

Ces observations ont permis de mettre en évidence une décorrélation entre la production algale et le pH. En effet, lors du processus de stockage des nutriments (RA1 dans le modèle), la consommation du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> entraîne une acidification et donc une baisse du pH : la baisse du pH dans le modèle

est donc liée uniquement au phénomène de stockage de l'azote par les microalgues et non à leur croissance. Le phénomène de croissance (RA4 dans le modèle) induit en effet une consommation de CI qui ne produit aucune alcalinité (excepté une légère augmentation de pH due à la consommation du CO<sub>2</sub> dissous).

En outre, injecter du CO<sub>2</sub> augmente les pertes de ce gaz par la surface. Ces pertes sont d'autant plus importantes lorsque le pH est faible et que le CI est sous forme de CO<sub>2</sub>. La quantité de CI initiale pourrait également jouer un rôle pour amorcer une croissance algale suffisante pour augmenter le pH et déclencher la pompe à CO<sub>2</sub>. Une série de simulations (dont les résultats sont décrits plus tard) permettant de mettre en évidence le rôle des nitrifiantes dans ce processus permettra de savoir si la baisse de pH due au développement des AOB induirait une diminution des injections de CO<sub>2</sub>.

#### ⇒ Tests d'efficacité du CO<sub>2</sub> injecté

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Concentration initiale en CI
3b	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	142 gC/m <sup>3</sup>

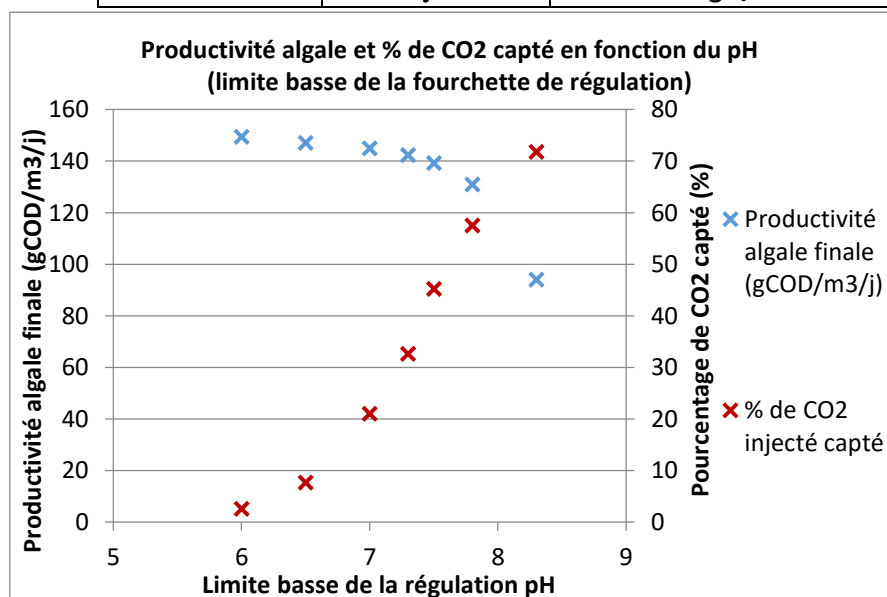


Figure 13 : Graphique des simulations selon le pH avec % CO<sub>2</sub> capté

Cette série de simulations a permis d'étudier l'impact du pH sur l'efficacité du CO<sub>2</sub> injecté et d'estimer un compromis entre productivité algale et pourcentage de CO<sub>2</sub> utilisé. Les résultats sont synthétisés dans la figure 13. Pour les besoins de la représentation graphique, seule la limite basse a été utilisée pour représenter cette corrélation. La limite haute est toujours égale à la limite basse ajoutée de 0,5 unités pH.

Plus le pH est bas, plus la productivité est élevée mais moins la part de CO<sub>2</sub> captée est importante. En effet, lorsque le pH est plus élevé, le carbone injecté passe sous forme de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, formes qui

ne se volatilisent pas. Cependant, si la part de CO<sub>2</sub> captée par rapport à la quantité injectée est plus faible lorsque le pH est faible, la quantité réelle est plus importante car la quantité de CI injectée est également plus importante. Au regard de ces résultats, la valeur de pH permettant un compromis entre productivité algale et pourcentage de CO<sub>2</sub> capté se situerait entre 7,5 et 8,3.

### 3.3.3 Tests avec variation des concentrations de saturation du CO<sub>2</sub> surface et injection

⇒ Tests sur la productivité algale

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Régulation pH
3	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

La série de simulations suivante a permis de tester la sensibilité de la productivité algale aux valeurs de concentrations de saturation du CO<sub>2</sub> liées aux transferts de surface. Cette valeur dépend de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui est d'environ 415 ppm, ce qui correspond à environ 0,2gC/m<sup>3</sup>. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Synthèse des résultats des simulations en fonction des concentrations de saturation CO<sub>2</sub>

Conditions de simulation	Résultats avec CI limitant (35gC/m3)				Résultats avec CI non limitant (142gC/m3)			
Concentration de saturation en CO <sub>2</sub> de surface	Référence modélisation	Temps pour atteindre la biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)	Référence modélisation	Temps pour atteindre la biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)
1	CSB1	13,5	36,89	34,00	CS1	13,5	154,31	142,34
4	CSB2	13,5	75,84	34,23	CS2	13,5	154,16	142,20
2,5	CSB3	13,5	55,44	51,13	CS3	13,5	154,24	142,27

Lorsque le CI est non limitant, l'impact de la concentration de saturation est nul. En revanche, lorsque le CI est limitant, la productivité algale est plus importante avec une concentration de saturation plus élevée. Lorsqu'elle est égale à 4, le CI diminue moins vite car la quantité de CO<sub>2</sub> provenant de l'atmosphère est plus importante. Le CI devient néanmoins limitant au même moment que pour les simulations où la concentration de saturation est faible : la régulation par le CO<sub>2</sub> compense dans ce dernier cas la quantité de CO<sub>2</sub> qui ne provient pas de l'atmosphère. Cependant, lorsqu'à la fin de la simulation, la croissance algale est trop faible pour déclencher les injections de CO<sub>2</sub>, les algues continuent de croître grâce au CI venant de l'atmosphère dans le cas des concentrations de saturation élevées, ce qui explique la croissance plus régulière et plus importante que pour les concentrations de saturation faibles.

Dans le cas d'une concentration en CI non limitante, la productivité algale n'est pas sensible aux concentrations de saturation du CO<sub>2</sub> de surface. En effet, devant un CI non limitant déjà présent dans le milieu, la quantité de CO<sub>2</sub> venant de l'atmosphère est négligeable et n'a aucune influence sur la productivité algale.

### 3.3.4 Tests avec variations du KCO<sub>2</sub><sub>algues</sub>

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Régulation pH
3	14 jours	106 gN/m <sup>3</sup>	Entre 7,1 et 7,8

La série de simulations suivante a permis de tester la sensibilité de la productivité algale aux valeurs de demi-saturation du CO<sub>2</sub> pour les algues ( $K_{CO_2-Alg}$ ). Les résultats sont synthétisés dans le tableau 11.

Tableau 11 : Synthèse des résultats des simulations en fonction du KCO<sub>2</sub>

Conditions de simulation	Résultats avec CI limitant (35gC/m3)				Résultats avec CI non limitant (142gC/m3)			
KCO <sub>2</sub> algues	Référence modélisation	Temps pour atteindre biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)	Référence modélisation	Temps pour atteindre biomasse max (j)	Productivité algale max (gCOD/m3/j)	Productivité avec biomasse finale (gCOD/m3/j)
0,2	KB1	3,5	144,49	26,21	K1	13,5	157,76	145,52
0,8	KB2	4,5	90,87	24,94	K2	13,5	151,13	139,40
0,5	KB3	4,5	90,44	25,87	K3	13,5	154,38	142,39

Dans le cas d'une concentration en CI limitante, la productivité algale maximale est plus faible lorsque le  $K_{CO_2-Alg}$  augmente. Dans nos simulations, la biomasse finale est cependant peu sensible à ce paramètre. Le  $K_{CO_2-Alg}$  est intégré au processus RA4 (croissance autotrophe) dans le ratio suivant :

$$\frac{S_{CO_2}}{S_{CO_2} + K_{CO_2-Alg}}$$

Lorsque  $S_{CO_2}$  est très élevé, la valeur de  $K_{CO_2-Alg}$  devient négligeable comme c'est le cas lorsque le CI n'est pas limitant. Pour un CI limitant en revanche, la productivité algale est sensible à cette valeur. Cependant, la biomasse pour KB1 augmente plus rapidement mais diminue également plus vite pendant la phase de décroissance, la ramenant à une biomasse finale équivalente à KB2. En effet, l'inactivation est proportionnelle à la biomasse présente et ne dépend pas du  $K_{CO_2-Alg}$ , ce qui explique que l'inactivation soit plus importante pour KB1.

### 3.3.5 Tests de l'impact des AOB et NOB sur le cycle du carbone

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Régulation pH
<b>3</b>	<b>14 jours</b>	<b>106 gN/m<sup>3</sup></b>	<b>Entre 7,1 et 7,8</b>

La série de simulations suivante a permis de tester, à CI limitant, le rôle des bactéries nitrifiantes sur le pH et donc sur la fréquence des injections de CO<sub>2</sub> (tableau 12). En comparant les résultats des simulations ANOB 2 et 4, il s'avère que les nitrifiantes font légèrement baisser le pH, il n'y a donc plus besoin de faire autant d'injections de CO<sub>2</sub> pour réguler le pH. La quantité de CI est donc légèrement moins importante à la fin, ce qui n'est pas dû aux algues car elles sont alors en phase d'inactivation et ne consomment plus de CI. La différence au niveau de la croissance algale est cependant très faible. En définitive, l'augmentation du pH due à la croissance des algues ne suffit pas à faire injecter assez

Tableau 12 : Synthèse des résultats des simulations en fonction des AOB et NOB

Conditions de simulation				Résultats avec CI non limitant (142gC/m3)			
Concentrations en AOB et NOB (gCOD/m3)	Limite basse pH	Limite haute pH	Kla surface CO <sub>2</sub>	Référence modélisation	Temps pour atteindre biomasse max (j)	Productivité max (gCOD/m3/j)	Productivité finale (gCOD/m3/j)
0	6	6,5	15,5	ANOB1	3,5	193,91	34,35
0	7,3	7,8	15,5	ANOB2	4,5	90,58	25,11
0	7,8	8,3	15,5	ANOB3	9,5	32,25	20,64
0,05	7,3	7,8	15,5	ANOB4	4,3	87,07	20,45
0	7,3	7,8	13	ANOB5	4,5	90,91	25,63
0,05	6	6,5	15,5	ANOB6	3,5	184,46	28,76

de CO<sub>2</sub> par régulation : la consommation reste supérieure à la fourniture de CO<sub>2</sub>. Il faudrait basifier le milieu de culture pour pouvoir injecter plus de CO<sub>2</sub> sans faire baisser le pH à un niveau inhibiteur pour les algues.

## 3.4 Etude de la dynamique de l'azote

Version du modèle	Temps de modélisation	Concentration initiale en CI	Régulation pH
<b>3b</b>	<b>14 jours</b>	<b>142 gC/m<sup>3</sup></b>	<b>Entre 7,1 et 7,8</b>

Comme expliqué dans le schéma précédent, l'utilisation du  $\text{NH}_4^+$  par les algues contrebalance partiellement la basification du milieu liée à la consommation de  $\text{CO}_2$  et induit donc une baisse de la concentration en CI du milieu. Au contraire, lorsque les algues utilisent du  $\text{NO}_3^-$ , la basification du milieu est plus importante et donc plus intéressante pour favoriser les injections de  $\text{CO}_2$ . La série de simulations suivante, dont les résultats sont synthétisés dans la figure 14, a donc permis de tester cette hypothèse. La concentration en N total étant toujours égale à  $106\text{gN/m}^3$ , la quantité de N

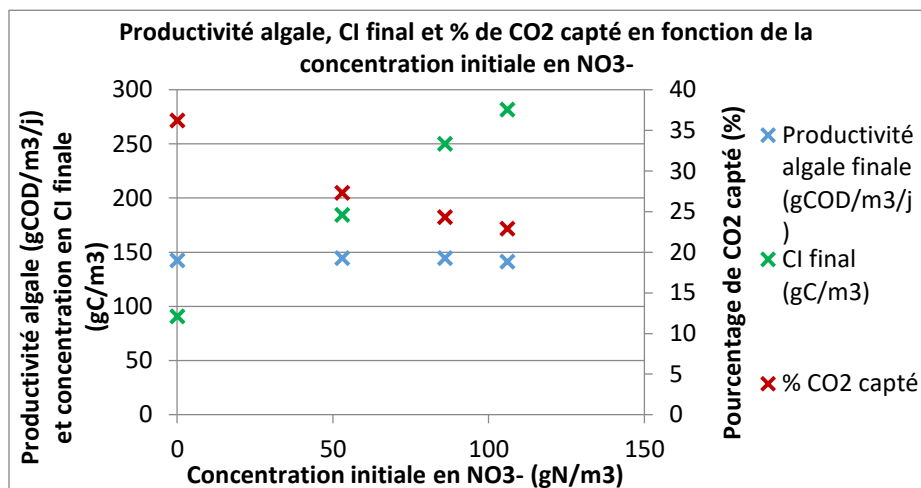


Figure 14 : Graphique des simulations en fonction du  $\text{NO}_3^-$

lorsque le  $\text{NO}_3^-$  initial était inférieur à cette valeur était complétée par du  $\text{NH}_4^+$ . Au regard des résultats, lorsque seul le  $\text{NO}_3^-$  est disponible (concentration en  $\text{NO}_3^-$  de  $106\text{gN/m}^3$ ), le CI obtenu à la fin de l'expérimentation augmente. Malgré cela, la productivité algale n'augmente pas car le CI initial n'est pas limitant.

Comme expliqué précédemment grâce aux

informations fournies par la matrice, la consommation de  $\text{NO}_3^-$  induit également une consommation d'ions  $\text{H}^+$ , et donc une augmentation du pH. Les injections de  $\text{CO}_2$  sont donc plus importantes et la concentration en CI augmente.

### 3.5 Conclusion sur les améliorations apportées au modèle

L'étude du modèle nous permet à la fois de mieux comprendre les phénomènes réels et de repérer ses biais à partir des observations expérimentales. Les résultats des simulations numériques permettent d'établir des corrélations et d'identifier les causes et les conséquences des dynamiques observées. Les résultats des simulations sur les données obtenues sur les raceways confirment en outre la nécessité de réaliser des expérimentations de répétabilité sur les trois réacteurs, avec et sans algues. A l'avenir, il sera également nécessaire d'intégrer les effets du pH et de la température sur les microalgues au modèle. En effet, le pH influe sur la forme de l'azote et donc sur sa disponibilité pour les algues. De plus, l'intérieur de la cellule algale présente un pH alcalin. Or, le transport transmembranaire des ions nécessaires au métabolisme algal est plus difficile s'il existe un gradient de pH entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule.

## 4. Résultats des expérimentations de répétabilité

A la suite des travaux de modélisation et au vu des résultats obtenus, nous avons décidé de tester en priorité la répétabilité des réacteurs. Pour cela 3 expérimentations ont été conduites avec des intrants différents : milieu BBM à base de  $\text{NH}_4^+$ , de  $\text{NO}_3^-$  et un milieu à base de digestat. Ces expérimentations ont permis de qualifier la répétabilité des réacteurs mais aussi de fournir des données expérimentales pour l'évaluation et la calibration du modèle. Dans l'idéal, et considérant que les trois raceways sont identiques, les paramètres mesurés devraient suivre la même évolution dans chacun des trois bassins. Une différence significative constatée devra être intégrée dans l'interprétation des résultats des expérimentations sur les microalgues qui suivront.

### 4.1 Répétabilité en conditions abiotiques

En amont des tests de répétabilité en conditions biotiques, des tests en conditions abiotiques simples, c'est-à-dire sans ajout de microalgues ni de nutriments, ont été réalisés afin de vérifier que les valeurs mesurées correspondant aux paramètres physico-chimiques étaient similaires dans les

trois bassins. Ces tests ont été réalisés entre le 14 et le 29 mai et ont porté sur l'évolution du pH, de l'O<sub>2</sub> dissous et de la température avec ou sans régulation de pH par injection de CO<sub>2</sub>.

Les bassins ont été remplis d'eau, les moteurs permettant de les agiter remis en marche et les sondes recalibrées. Les données de température et de pH ont été mesurées sur les trois raceways et celles d'O<sub>2</sub> dissous sur Iris et Lotus uniquement (absence de sonde O<sub>2</sub> sur Ginko).

- **Température :**

En raison de l'absence de sonde O<sub>2</sub> dans le raceway Ginko, les valeurs de température retenues sont celles mesurées par les sondes pH. Au regard des courbes obtenues présentées en annexe 11, les valeurs de température sont les mêmes dans les trois raceways. Les raceways sont donc dans les mêmes conditions de température réelles.

- **pH :**

Entre le 14 et le 16 mai et entre le 26 et le 29 mai, la régulation du pH entre 7,2 et 7,8 par injection de CO<sub>2</sub> était activée. Comme le montrent les courbes en annexe 12, le pH mesuré est similaire dans les trois raceways, il semble donc que les systèmes d'injection dans les trois bassins le soient aussi. En dehors des périodes de régulation, le pH, sensible aux variations de température, fluctue légèrement à cause des alternances jour/nuit. Les valeurs de pH mesurées pour Iris sont légèrement plus faibles que pour Ginko et Lotus. La comparaison des trois raceways n'a pu être faite que sur la période précédant la calibration des sondes, la sonde de Ginko ayant cessé temporairement de fonctionner après la calibration (annexe 11). Ce décalage n'est a priori pas dû à une différence au niveau de la mesure de la sonde d'Iris puisque, dans le cas de la régulation, les valeurs mesurées sont les mêmes dans les trois raceways. Ces valeurs, en dehors des périodes où le pH est régulé, dépendent notamment de la concentration de saturation du CO<sub>2</sub> au niveau de la surface et du K<sub>LA</sub> de surface du CO<sub>2</sub>. En effet, au regard des simulations réalisées sur Scilab, il s'avère qu'une valeur de K<sub>LA</sub> surface du CO<sub>2</sub> plus élevée favorise le stripping, soit le départ du CO<sub>2</sub> vers un milieu moins concentré (l'atmosphère). Ce départ de CO<sub>2</sub> induit un pH plus élevé. Les K<sub>LA</sub> surface du CO<sub>2</sub> de Ginko et Lotus sont peut-être plus importants que celui d'Iris, ce qui pourrait être dû à une profondeur, une surface ou une agitation légèrement différente. A priori, la concentration de saturation du CO<sub>2</sub> surface est la même pour les trois raceways et n'est donc pas impliquée dans la différence de pH mesuré constaté pour Iris. Les mesures de pH plus basses le 19 mai sur Ginko et Lotus sont dues aux calibrations de sondes réalisées ce jour-là.

- **O<sub>2</sub> dissous :**

Les valeurs d'O<sub>2</sub> dissous semblent être exactement les mêmes entre Lotus et Iris (annexe 11). L'O<sub>2</sub> dissous dépend notamment de la concentration de saturation de surface de l'O<sub>2</sub> et du K<sub>LA</sub> de surface de l'O<sub>2</sub>. Ces deux paramètres seraient donc similaires entre les deux bassins. Or, le K<sub>LA</sub> dépend notamment du rapport surface/profondeur, qui, au vu des résultats sur l'O<sub>2</sub> dissous, seraient similaires sur les deux bassins. La différence constatée au niveau du pH ne serait donc pas forcément due à une différence au niveau des dimensions ou de l'agitation, puisque une différence à ce niveau se serait répercutée également sur l'O<sub>2</sub> dissous.

**Conclusion :** En conditions abiotiques, les paramètres physico-chimiques mesurés dans les trois bassins semblent similaires et les conditions auxquelles sont soumises les expérimentations seraient donc répétables. Une légère différence au niveau du pH a été constatée sur le raceway Iris, probablement de l'effet de la sonde. Cependant, le travail préalable de modélisation a permis de démontrer que les légères modifications du pH n'influaient que légèrement sur la productivité algale. Les expérimentations de répétabilité avec culture d'algues sur milieu BBM permettront de déterminer si cette différence influe significativement sur la croissance algale.

## **4.2 Répétabilité en conditions biotiques**

### **4.2.1 Résultats de l'expérimentation n°1**

Les données brutes de la première expérimentation avec un milieu BBM à base de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont présentées en annexe 12. Aucune différence significative n'a été constatée au niveau de l'évolution des concentrations ioniques entre Ginko, Lotus et Iris. Le pH est régulé de la même manière dans les trois bassins. Les résultats des analyses menées lors de cette première manipulation de répétabilité



avec des nitrates démontrent une bonne répétabilité entre les réacteurs Lotus et Iris, qui présentent une évolution de la biomasse et des paramètres physico-chimiques similaires. En revanche, la productivité était presque deux fois moindre sur Ginko (figure 15). Les valeurs de TAC y sont également légèrement plus faibles. En outre, des analyses finales de la concentration en C total dans les trois raceways ont mis en évidence un très léger déficit de 3mgC/L chez Ginko par rapport aux deux autres bassins. La consommation de N est également légèrement moins importante chez Ginko (tableau 13). Les microalgues ont la capacité de faire des réserves de nutriments afin de les consommer plus tard pour leur

Tableau 13 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°1

Réacteurs	Production de biomasse en 17 jours (mgDCO/L)	Productivité (mgDCO/L/j)	Consommation d'azote (mgN/L)	Consommation de phosphore (mgP/L)	CI final (mgC/L)
Ginko	145,1	8,5	27,9	37,3	26,5
Lotus	309,2	18,2	31,4	35,5	29,7
Iris	311,4	18,3	32,5	39,0	29,7

croissance. Ce phénomène pourrait expliquer la faible corrélation entre le delta de N et de P et la productivité journalière, les nutriments étant probablement stockés avant d'avoir pu servir à la croissance. La diminution de la concentration en P dissous est principalement due aux phénomènes de précipitation (certainement avec le calcium), les différences de consommation de P par la biomasse ne peuvent donc pas être mises en évidence. Les valeurs de TAC sont relativement constantes dans le temps tout au long de l'expérimentation. De même, le N et le P ne sont pas limitants au vu des concentrations restantes à la fin des 17 jours. On notera cependant que la croissance algale ainsi que la productivité ne sont pas linéaires : au vu du caractère non limitant des nutriments, les variations de croissance au cours du temps et entre les réacteurs semblent principalement dues aux variations des paramètres d'intensité lumineuse et de température. Le carbone inorganique pourrait également jouer sur les différences observées chez Ginko. La corrélation positive entre ces valeurs météorologiques et la croissance algale est cependant limitée par le phénomène de self-shading : au-delà d'une certaine concentration de biomasse algale, cette dernière atténue la lumière incidente dans le bassin.

Les différences de comportement observées sur Ginko ne sont pas totalement comprises ni expliquées. Cependant, le CI semble être un facteur potentiellement explicatif en raison de son caractère limitant observé notamment au travers des travaux de modélisation. Dans ce cas, les simulations numériques ont montré que le pH était un facteur d'influence important : les différences au niveau des sondes installées dans chaque réacteur pourraient induire ces différences au niveau de la régulation du pH, et donc du CI. Cette hypothèse doit être confirmée par les manipulations suivantes. De même, des travaux de modélisations pourraient permettre de comparer ces résultats et d'aider à expliquer les différences observées sur les bassins.

Ainsi, afin de mieux appréhender les causes de ces différences, l'expérimentation a été modélisée grâce à la version « 3c » du modèle permettant de prendre en compte les valeurs expérimentales d'intensité lumineuse (mesurées avec la station météo). Les résultats (présentés en figure 15), montrent que le modèle suit la dynamique de Lotus et Iris et s'éloigne de celle de Ginko, ce qui confirme l'hypothèse d'une anomalie dans ce dernier réacteur.

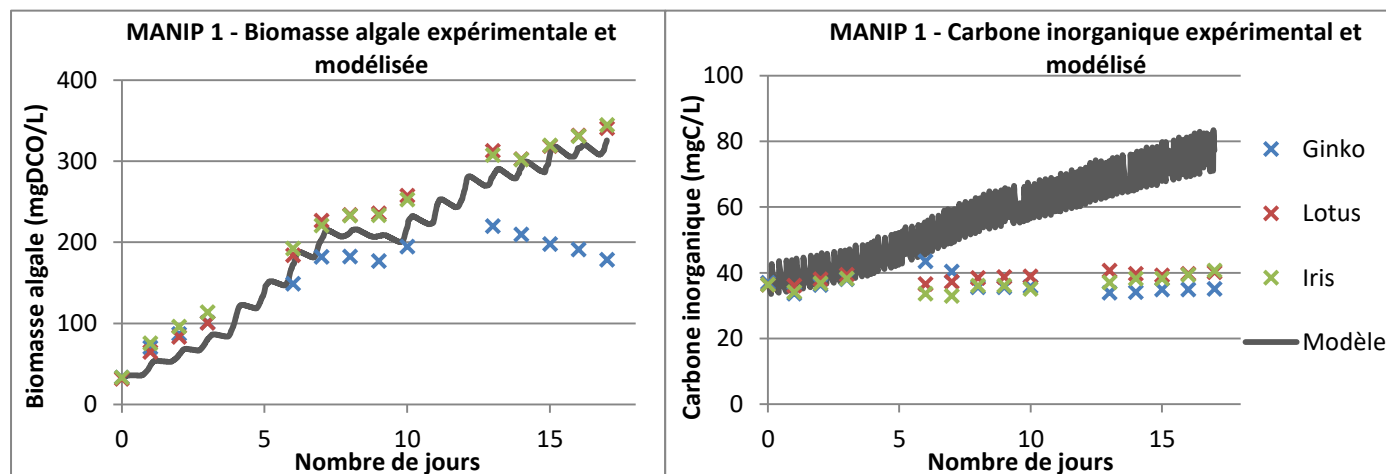


Figure 15 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 1

En outre, la prise en compte de l'intensité lumineuse expérimentale dans la modélisation a permis de reproduire assez fidèlement les dynamiques de croissance algale, de consommation des nutriments et de production d'O<sub>2</sub>. La modélisation du P est difficilement interprétable en raison des phénomènes de précipitation du P avec le Ca qui ont certainement lieu dans les bassins, mais qui ne sont pas modélisés. En revanche, le logiciel de modélisation géochimique PHREEQC a permis de confirmer l'hypothèse d'une précipitation du P et du Ca en hydroxyapatite qui pourrait expliquer la différence entre le P modélisé et expérimental. De même, comme constaté en figure 15, la concentration en carbone inorganique modélisé s'éloigne fortement du CI expérimental. En effet, contrairement à la théorie et au modèle pour lequel une augmentation du CI est prévue afin de compenser la basification du milieu liée à la consommation du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, aucune augmentation significative n'est observée expérimentalement. Ces différences pourraient provenir des phénomènes de précipitation.

En conclusion, cette expérience a permis de démontrer la répétabilité entre les réacteurs Lotus et Iris. La productivité moindre chez Ginko, outre le fait qu'il pourrait éventuellement recevoir moins de lumière, pourrait être due à une légère carence en C ou à une contamination.

#### 4.2.2 Résultats de l'expérimentation n°2

Les données brutes de la deuxième expérimentation avec un milieu BBM à base de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sont présentées en annexe 13. Il a de nouveau été constaté une différence de dynamique chez Ginko par rapport aux deux autres raceways dans cette deuxième expérimentation (figure 16). La croissance chez Ginko s'est avérée plus importante que chez Lotus et Iris au départ, puis a connu une phase stationnaire alors que la croissance des deux autres était linéaire. Comme pour l'expérimentation n°1, les ions étaient contre toute attente retrouvés dans les mêmes concentrations dans les trois bassins malgré les différences de productivité. On notera cependant une consommation globale

Tableau 14 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°2

Réacteur	Production de biomasse en 18 jours (mgDCO/L)	Productivité (mgDCO/L/j)	Consommation d'azote (mgN/L)	Consommation de phosphore (mgP/L)
Ginko	277,29	15,41	60,94	34,99
Lotus	329,51	18,31	66,91	36,52
Iris	302,02	16,78	67,32	38,52

légèrement moins importante de N et de P (tableau 14) chez Ginko ainsi qu'un TAC légèrement plus élevés, ce qui s'avère cohérent avec la baisse de productivité algale (le CI, le N et le P étant moins consommés).

Comme pour l'expérimentation n°1, le P, le N et le CI ne sont pas limitants. Les baisses de productivité sont donc également principalement dues aux variations d'intensité lumineuse. Les productivités observées sur Lotus et Iris semblent cohérentes avec l'augmentation de l'intensité lumineuse observée la dernière semaine. Au contraire, la productivité algale chez Ginko semble ne plus être influencée par la lumière à ce stade, ce qui pourrait être dû au phénomène de self-shading, étant donné que les algues dans Ginko ont poussé plus rapidement au départ. L'expérimentation n°2 a également été modélisée. Les résultats sont présentés en figure 16. En prêtant attention aux courbes expérimentales et modélisées de la biomasse algale, il s'avère que le modèle reproduit la dynamique de Ginko jusqu'à ce qu'il atteigne sa phase stationnaire. A ce stade, le modèle semble suivre la même dynamique que Lotus et Iris. Le même phénomène de précipitation du P que pour l'expérimentation précédente est mis en évidence ici. En revanche, le CI a pu être modélisé correctement pour cette expérimentation et semble suivre la consommation par les algues mesurée expérimentalement. En conclusion, cette deuxième expérimentation a permis de confirmer la répétabilité de Lotus et Iris et amène à s'interroger sur les raisons des différences constatées répétées sur Ginko.



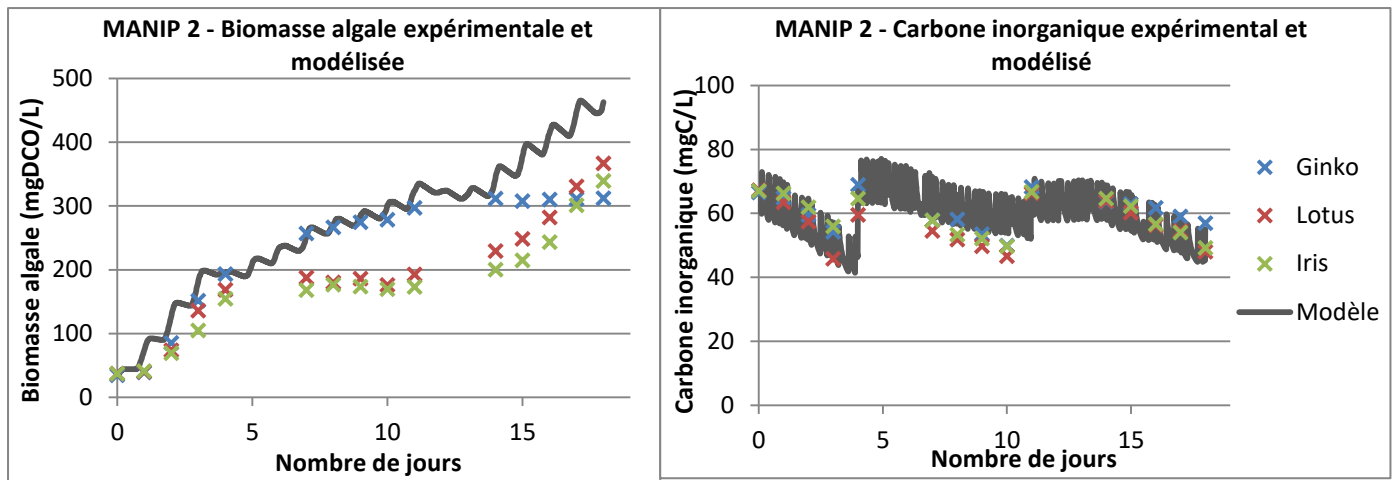


Figure 16 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 2

#### 4.2.3 Résultats de l'expérimentation n°3

Les données brutes de la troisième expérimentation avec un milieu de culture à base de digestat nanofiltré sont présentées en annexe 14. Globalement, les productivités algales sont moins élevées que dans les cas précédents à cause d'une faible concentration en P dans le digestat (tableau 15). Le phosphore était donc très limitant dans cette expérimentation, et la croissance algale dans les trois réacteurs a été ralentie rapidement malgré une bonne luminosité. Cette phase stationnaire a été atteinte plus rapidement dans le réacteur Ginko que dans les deux autres. Les dynamiques de croissance (figure 17) montrent en outre encore une fois une bonne répétabilité des réacteurs Lotus et Iris. Au 13<sup>ème</sup> jour, la

Tableau 15 : Récapitulatif des résultats de l'expérimentation n°3

Réacteur	Production de biomasse en 15 jours (mgDCO/L)	Productivité (mgDCO/L/j)	Consommation d'azote (mgN/L)	Consommation de phosphore (mgP/L)
Ginko	121,10	8,07	70,69	1,42
Lotus	113,49	7,57	65,71	1,28
Iris	180,92	12,06	64,65	1,45

bouteille de CO<sub>2</sub> était vide et la régulation du pH a cessé. On notera enfin que les résultats de la simulation de la croissance algale sont plus éloignés des résultats expérimentaux dans cette expérimentation à base de digestat que dans le cas des milieux synthétiques, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la composition exacte du digestat soit moins bien connue que celle des composants des BBM précédemment utilisés et que la turbidité du digestat n'est pas pris en compte par le modèle. Les différences peuvent également provenir d'une mauvaise prise en compte de la limitation du P.

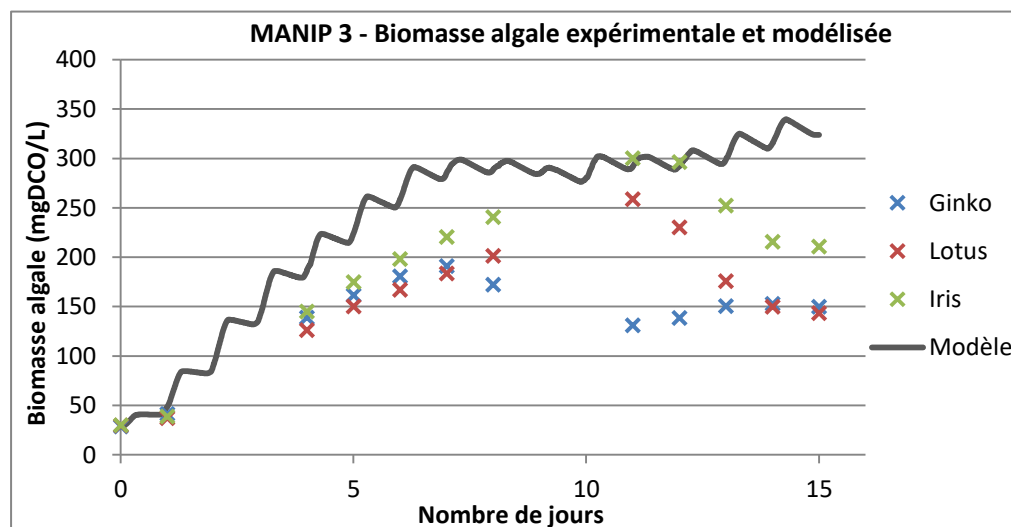


Figure 17 : Graphiques représentant la biomasse et le CI expérimentaux et modélisés sur la manip 3

## Conclusion

En conclusion, les tests de sensibilité du modèle et les simulations de comparaison entre les dynamiques modélisées et expérimentales ont permis d'éclaircir le rôle de la dynamique du pH dans la croissance algale : elle permet de fournir de plus en plus de carbone inorganique lorsque la croissance algale augmente à partir d'une source d'azote  $\text{NO}_3^-$ , mais en induisant des pertes importantes au niveau de la surface du  $\text{CO}_2$  injecté. De nouvelles expérimentations visant à améliorer le rendement quant à la quantité de  $\text{CO}_2$  injecté et utilisé par les microalgues pourront par la suite être mises en place expérimentalement. Le lien entre l'utilisation de différentes sources d'azote et la régulation du pH (et donc la croissance algale, comme expliqué précédemment) a également pu être approfondi grâce à l'étude de la matrice du modèle. Il a ainsi pu être noté que l'utilisation du  $\text{NH}_4^+$  par les algues produisait des ions  $\text{H}^+$  donc acidifiaient le milieu et induisaient moins d'injections de  $\text{CO}_2$  (donc moins de CI et moins de croissance algale) que dans le cas où les algues utilisent du  $\text{NO}_3^-$  comme source de N. Les cycles du carbone et de l'azote sont donc très liés par le facteur pH : ils influent donc sur la croissance algale indirectement par ce biais, en plus de l'influencer directement lors de l'utilisation du N et du C pour la formation de la biomasse algale. En ce qui concerne les améliorations apportées au modèle, introduire la prise en compte des données de luminosité expérimentales dans le modèle a permis d'augmenter significativement la correspondance entre les courbes de croissance modélisées et observées. Néanmoins, l'effet du pH et de la température sur les taux de croissance des microalgues n'est pas encore pris en compte dans le modèle, qui pourrait ainsi gagner encore en précision.

Concernant la partie expérimentale des travaux menés pendant ce stage, les trois expérimentations de répétabilité montrent une bonne répétabilité sur les raceways Lotus et Iris, avec une différence de dynamique systématiquement observée sur Ginko. Néanmoins, les différences observées sur Ginko divergent également entre chaque expérimentation : tandis que ce réacteur présentait une croissance moindre dans la première et la troisième, l'inverse s'est produit dans la deuxième. Cependant, il s'avère à chaque fois que Ginko atteint une phase stationnaire avant les deux autres.

Ces différences restent inexplicables étant donné que seule la biomasse diverge significativement entre les réacteurs, les concentrations en nutriments (C, P, N) et les paramètres physico-chimiques restant sensiblement identiques dans les trois réacteurs. Nous pouvons donc seulement émettre des hypothèses quant à ces différences. Par exemple, la proximité de Ginko avec l'entrée de la serre et l'inoculum pourrait le rendre plus exposé aux contaminations (présence d'insectes et passage d'oiseaux sous la serre). Cependant, une contamination inhiberait la croissance algale et ne pourrait donc pas expliquer la croissance plus importante dans l'expérimentation n°2. L'autre piste est la différence d'exposition à la lumière : il a été observé que Ginko pouvait être plus ombragé que les autres à certaines périodes de la journée. La station météo actuelle est située au niveau du raceway Iris, et la mise en place d'un détecteur d'intensité lumineuse par bassin pourrait permettre de lever ce doute. De toute manière, la différence constatée sur Ginko lors des expérimentations de répétabilité devront être prises en compte dans l'interprétation des résultats obtenus lors des expérimentations futures réalisées sur les raceways.

Enfin, l'interdépendance des facteurs et des paramètres induit quelques difficultés dans la compréhension des dynamiques, notamment pour différencier les causes des conséquences au sein des différents cycles. Dans le cadre de ce stage, l'intérêt du modèle réside dans le fait qu'il permet de s'affranchir des erreurs expérimentales et de générer un grand nombre de données en peu de temps. Cependant, un modèle demeure une simplification des processus réels et les résultats obtenus au cours de ce stage à l'aide de cet outil doivent par conséquent être observés avec un certain recul, au même titre que les résultats expérimentaux. La diversité des activités réalisées au cours de ce stage m'a permis d'approfondir mes compétences en termes de méthodologie de la recherche et de méthodes analytiques, ainsi que mes connaissances théoriques et pratiques sur les cultures de microalgues. L'approche de la modélisation a également permis d'appuyer ma candidature pour une thèse sur la modélisation et l'optimisation des procédés de traitement des eaux usées à partir de microalgues que je débiterai la rentrée 2020.

## Bibliographie

ABU HAJAR H.A., RIEFLER R.G., STUART B.J., 2017. - Cultivation of *Scenedesmus dimorphus* using anaerobic digestate as a nutrient medium. - *Bioprocess Biosyst. Eng.* 40 (8) (2017) 1197–1207.

ÅKERSTRÖM A.M., MORTENSEN L.M., RUSTEN B., GISLERØD H.R., 2014. - *Biomass production and nutrient removal by Chlorella sp. as affected by sludge liquor concentration.* - *J. Environ. Manag.* 144 (2014) 118–124.

BARBERA E., BERTUCCO A., KUMAR S., 2018. - *Nutrients recovery and recycling in algae processing for biofuels production.* - *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (2018) 28–42.

BOUGARAN G., 2014. - *La co-limitation par l'azote et le phosphore : étude des mécanismes chez la microalgue Tisochrysis lutea.* – Thèse de l'université de Nantes.

CAI T., PARK S.Y., RACHARAKS R., LI Y., 2013. - *Cultivation of Nannochloropsis salina using anaerobic digestion effluent as a nutrient source for biofuel production.* - *Appl. Energy* 108 (2013) 486–492.

CAI T., GE X., PARK S.Y., LI Y., 2013. - *Comparison of Synechocystis sp. PCC6803 and Nannochloropsis salina for lipid production using artificial seawater and nutrients from anaerobic digestion effluent.* - *Bioresour. Technol.* 144 (2013) 255–260.

CHENG J., YE Q., XU J., YANG Z., ZHOU J., CEN K., 2016. - *Improving pollutants removal by microalgae Chlorella PY-ZU1 with 15% CO<sub>2</sub> from undiluted anaerobic digestion effluent of food wastes with ozonation pretreatment.* - *Bioresour. Technol.* 216 (2016) 273–279

CHUKA-OGWUDE D., OGBONNA J., MOHEIMANI N. R., 2019. - *A review on Microalgal culture to treat anaerobic digestate food waste effluent.* –

DEBOWSKI M., ZIELINSKI M., SZWAJA S., KISIELEWASKA M., 2017. - *The Influence of Anaerobic Digestion Effluents (ADEs) Used as the Nutrient Sources for Chlorella sp. Cultivation on Fermentative Biogas Production.* – *Waste and Biomass Valorization.*

DICKINSON K.E. et al., 2015. - *Simultaneous remediation of nutrients from liquid anaerobic digestate and municipal wastewater by the microalga Scenedesmus sp. AMDD grown in continuous chemostats.* - *J. Appl. Microbiol.* 118 (1) (2015) 75–83.

EZE V.C., VELASQUEZ-ORTAA S.B., HERNANDEZ-GARCIAB A., MONJE-RAMIREZB I., ORTA-LEDESMAB M.T., 2018. - *Kinetic modelling of microalgae cultivation for wastewater treatment and carbon dioxide sequestration.* – *Algal Research* 32 (2018) 131-141.

FEN TAN, ZHI WANG, SIYU ZHOUYANG, HENG LI, YOUPIG XIE, YUANPENG WANG, YANMEI ZHENG, QINGBIAO LI, 2016. - *Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry.* - *Bioresource Technology* 221 (2016) 385–393.

FRANCHINO M., COMINO E., BONA F., RIGGIO V.A., 2013. - *Chemosphere growth of three microalgae strains and nutrient removal from an agro-zootechnical digestate.* - *Chemosphere* 92 (6) (2013) 738-744.

GONZALEZ-CAMEJOA J., APARICIOB S., RUANO M. V., BORRASB L., BARATA R., FERRERA J., 2019. - *Effect of ambient temperature variations on an indigenous microalgaenitrifying bacteria culture dominated by Chlorella.* – *Bioresource technology.*

JI F., LIU Y., HAO R., LI G., ZHOU Y., DONG R., 2014. - *Biomass production and nutrients removal by a new microalgae strain Desmodesmus sp. in anaerobic digestion wastewater*. - Bioresour. Technol. 161 (2014) 200–207.

JI F. et al., 2015. - *Fed-batch cultivation of Desmodesmus sp. in anaerobic digestion wastewater for improved nutrient removal and biodiesel production*. - Bioresour. Technol. 184 (2015) 116–122.

LAWS E.A., REDALJE D.G., KARL D.M., CHALUP M.S., 1983. - *A theoretical and experimental examination of two recent models of phytoplankton growth*. - J. theor Biol. 105: 469–491.

LEVINE R.B., COSTANZA-ROBINSON M.S., SPATAFORA G.A., 2011. - *Neochloris oleoabundans grown on anaerobically digested dairy manure for concomitant nutrient removal and biodiesel feedstock production*. - Biomass Bioenergy 35 (1) (2011) 40–49.

LIN LUO, HONGYU REN, XUANYUAN PEI, GUOJUN XIE, DEFENG XING, YINGQI DAI, NANQI REN ET BINGFENG LIU, 2019. - *Simultaneous nutrition removal and high-efficiency biomass and lipid accumulation by microalgae using anaerobic digested effluent from cattle manure combined with municipal wastewater*. - Biotechnology for Biofuels.

MARCILHAC C., 2014. - *Etude des conditions de culture d'un écosystème complexe microalgues/bactéries : Application au développement d'un procédé d'extraction-valorisation des nutriments issus des digestats*. – Thèse de l'université de Rennes 1.

NWOBA E.G., AYRE J.M., MOHEIMANI N.R., UBI B.E., OGBONNA J.C., 2016. - *Growth comparison of microalgae in tubular photobioreactor and open pond for treating anaerobic digestion piggery effluent*. - Algal Res. 17 (2016) 268–276.

PARK J., JIN H.F., LIM B.R., PARK K.Y., LEE K., 2010. - *Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green alga Scenedesmus sp.* - Bioresour. Technol. 101 (22) (2010) 8649–8657.

PERDRIER C., 2019. – *Procédés de culture de microalgues pour la valorisation des digestats*. – Rapport de stage pour l'ENSCM.

PRAJAPATI S.K., KUMAR P., MALIK A., VIJAY V.K., 2014. - *Bioconversion of algae to methane and subsequent utilization of digestate for algae cultivation: a closed loop bioenergy generation process*. - Bioresour. Technol. 158 (2014) 174–180.

PRAVEEN P., GUO Y., KANG H., LEFEBVRE C., LOH K.-C., 2018. – *Enhancing microalgae cultivation in anaerobic digestate through nitrification*. – Chemical Engineering Journal, vol. 354, p. 905–912

RAEISOSSADATI M., VADIVELLOO A., BAHRI P.A., PARLEVLIET D., MOHEIMANI N.R., 2019. – *Treating anaerobically digested piggery effluent (ADPE) using microalgae in thin layer reactor and raceway pond*. - J. Appl. Phycol. 31 (2019) 2311–2319.

REDFIELD A., 1934. - *On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton*. - University Press of Liverpool, 177–192.

SEREJO M. L., POSADAS E., BONCZ M. A., 2015. - *Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgalbacterial processes*. -

SERRA-MAIA R., BERNARD O., GONÇALVES A., BENSALÉMA S., LOPES F., 2016. - *Influence of temperature on Chlorella vulgaris growth and mortality rates in a photobioreactor*. - Algal Research 18 (2016) 352–359.

SHIN D.Y., CHO H.U., UTOMO J.C., CHOI Y.N., XU X., PARK J.M., 2015. - *Biodiesel production from Scenedesmus bijuga grown in anaerobically digested food wastewater effluent*. - Bioresour. Technol. 184 (2015) 215–221.

SINGH M., REYNOLDS D.L., DAS K.C., 2011. - *Microalgal system for treatment of effluent from poultry litter anaerobic digestion*. - Bioresour. Technol. 102 (23) (2011) 10841–10848.

STRAUSS S.Y., RUDGERS J.A., LAU J.A., IRWIN R.E., 2002. - *Direct and ecological costs of resistance to herbivory*. - Trends Ecol Evol 17: 278–285

TAN X., CHU H., ZHANG Y., YANG L., ZHAO F., ZHOU X., 2014. - *Chlorella pyrenoidosa cultivation using anaerobic digested starch processing wastewater in an airlift circulation photobioreactor*. - Bioresour. Technol. 170 (2014) 538–548.

TRAVIESO L., BENITEZ F., SANCHEZ E., BORJA R., MARTIN A. ET COLMENAREJO M. F., 2006. - *Batch mixed culture of Chlorella vulgaris using settled and diluted piggery waste*. - Ecological Engineering 28(2): 158-165.

UGGETTI E., SIALVE B., LATRILLE E., STEYER J.-P., 2014. – *Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: the role of ammonium concentration on the microalgae productivity*. – Bioresource Technology, vol. 152, p. 437-443.

VERONESI D., 2019. - *Microalgae production recovering carbon and nutrients from agro-industrial wastes*. – Thèse de l'Università degli studi di Milano.

WANG L. et al., 2010. - *Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae chlorella sp.* - Bioresour. Technol. 101 (8) (2010) 2623–2628.

WANG L., WANG Y., CHEN P., RUAN R., 2010. - *Semi-continuous cultivation of chlorella vulgaris for treating undigested and digested dairy manures*. - Appl. Biochem. Biotechnol. 162 (8) (2010) 2324–2332.

WARD A.J., LEWIS D.M., GREEN F.B., 2014. - *Anaerobic digestion of algae biomass: a review*. - Algal Res 5:204–214.

WU D., CHENG M., ZHAO S., PENG N., HU R., HU J., LIANG Y., 2020. - *Algal Growth Enhances Light-Mediated Limitation of Bacterial Nitrification in an Aquaculture System- Water Air Soil Pollut* (2020) 231:73.

XU J., ZHAO Y., ZHAO G., ZHANG H., 2015. - *Nutrient removal and biogas upgrading by integrating freshwater algae cultivation with piggery anaerobic digestate liquid treatment*. - Appl. Microbiol. Biotechnol. 99 (15) (2015) 6493–6501.

YAN C., ZHENG Z., 2014. - *Performance of mixed LED light wavelengths on biogas upgrade and biogas fluid removal by microalga Chlorella sp.* - Appl. Energy 113 (2014) 1008–1014.

YANG L. et al., 2015. - *Nutrients removal and lipids production by Chlorella pyrenoidosa cultivation using anaerobic digested starch wastewater and alcohol wastewater.* - Bioresour. Technol. 181 (2015) 54-61.

YU Z., SONG M., PEI H., HAN F., JIANG L., HOU Q., 2017. - *The growth characteristics and biodiesel production of ten algae strains cultivated in anaerobically digested effluent from kitchen waste.* - Algal Res. 24 (27) (2017) 265–275.

**Annexe 1 : Composition des milieux BBM et du digestat nanofiltré (analysé le 09/07/2020)**

BBM à base de NO <sub>3</sub> -		BBM à base de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
Eléments BBM à ajouter directement dans les bassins	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)	Eléments BBM à ajouter directement dans les bassins	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)
NaNO <sub>3</sub>	100	NaHCO <sub>3</sub>	100
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	10	NH <sub>4</sub> Cl	150
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	30	CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	10
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	30	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	30
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	70	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	30
NaCl	10	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	70
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	45,68	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	45,68
Solution EDTA à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)	Solution EDTA à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)
Na <sub>2</sub> EDTA	20	Na <sub>2</sub> EDTA	20
KOH	12,4	KOH	12,4
Solution fer acidifié à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)	Solution fer acidifié à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,01992	FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,01992
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%) (ml)	0,004	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%) (ml)	0,004
Solution traces de métaux à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)	Solution traces de métaux à préparer	Masse à peser pour 1 bassin de 400L (g)
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3,528	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	3,528
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0,576	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	0,576
MoO <sub>3</sub>	0,284	MoO <sub>3</sub>	0,284
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,628	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,628
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,196	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,196

*Composition du digestat nanofiltré :*

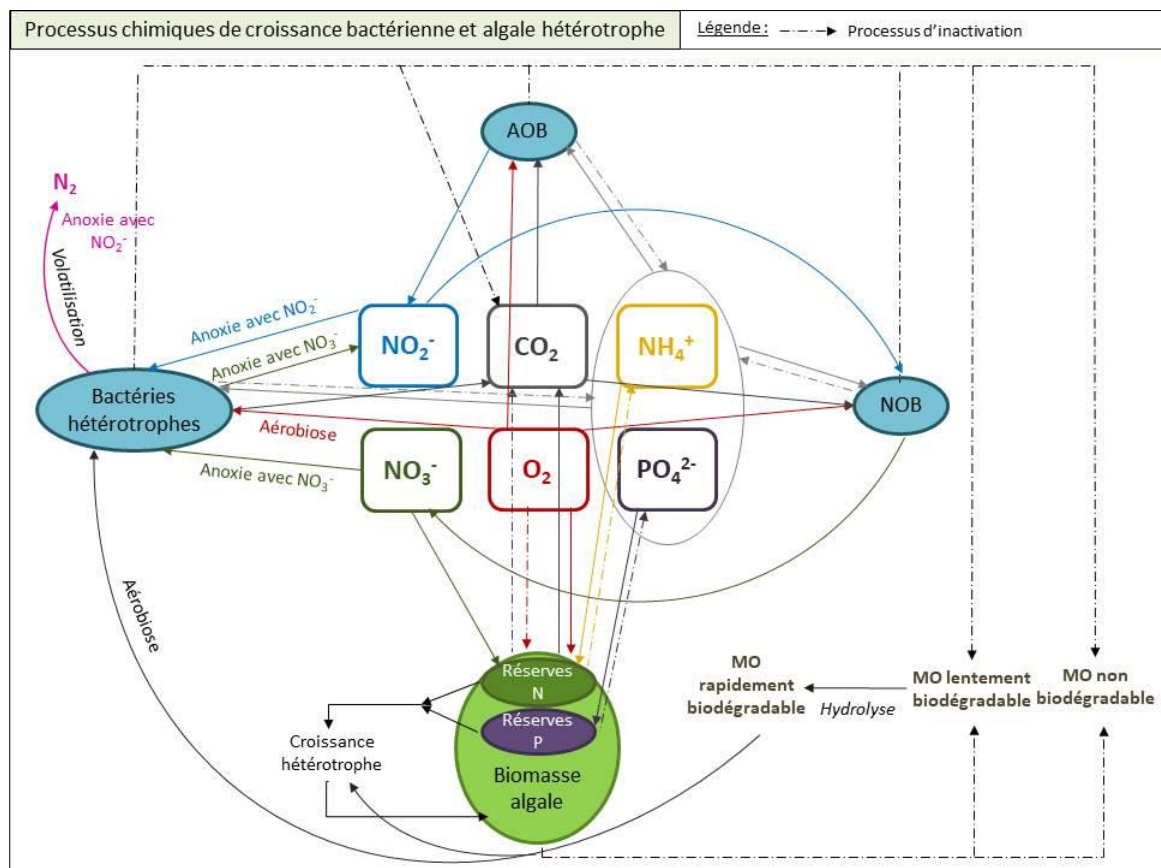
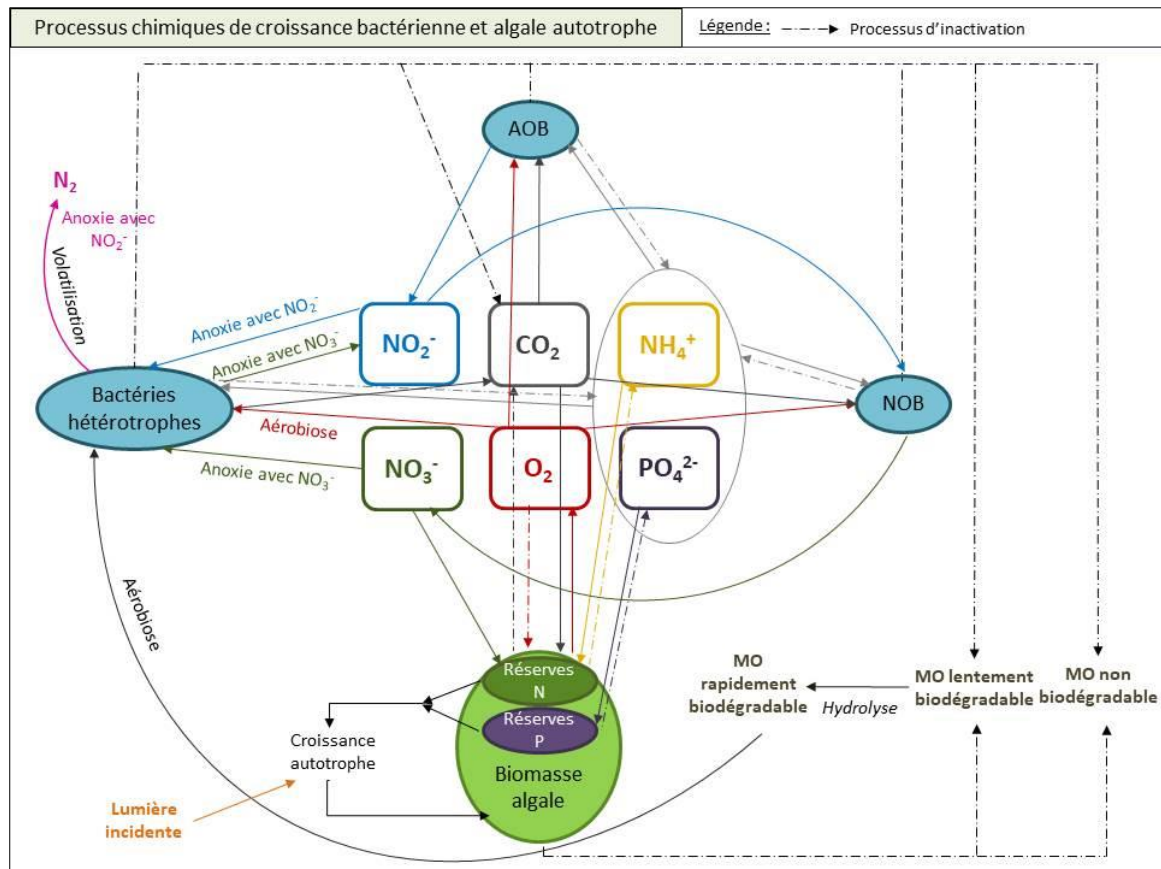
DO	pH	TA (°f)	TAC (°f)	Cl (mgC/L)
0,32	8,10	0,00	58,70	2714,20
Cl (mgCl/L)	NO <sub>3</sub> (mgN/L)	PO <sub>4</sub> (mgP/L)	SO <sub>4</sub> (mgS/L)	NO <sub>2</sub> (mgN/L)
2059,59	0,12	40,33	2,54	0,00
Na (mgNa/L)	NH <sub>4</sub> (mgN/L)	K (mgK/L)	Ca (mgCa/L)	Mg (mgMg/L)
1147,07	2098,37	3963,55	131,31	43,29

## Annexe 2 : Cinétique des différents processus

	Processes		
	N°	Name	Rate (gCOD.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> )
Biochemical - Algae	RA1	Uptake and storage of N from NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$k_{NH_4,Alg} \cdot S_{NH}/(S_{NH} + K_{NH_4,Alg}) \cdot (X_{Alg,Nmax} \cdot X_{Alg} - X_{Alg,N})/(X_{Alg,Nmax} \cdot X_{Alg}) \cdot X_{Alg}$
	RA2	Uptake and storage of N from NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$k_{NO_3,Alg} \cdot S_{NO_3}/(S_{NO_3} + K_{NO_3,Alg}) \cdot K_{NH_4,Alg}/(K_{NH_4,Alg} + S_{NH}) \cdot (X_{Alg,Nmax} \cdot X_{Alg} - X_{Alg,N})/(X_{Alg,Nmax} \cdot X_{Alg}) \cdot X_{Alg}$
	RA3	Uptake and storage of N from PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	$k_{PO_4,Alg} \cdot S_{PO_4}/(S_{PO_4} + K_{PO_4,Alg}) \cdot (X_{Alg,Pmax} \cdot X_{Alg} - X_{Alg,P})/(X_{Alg,Pmax} \cdot X_{Alg}) \cdot X_{Alg}$
	RA4	Autotrophic growth	$\mu_{A,Alg,max} \cdot (1 - X_{Alg,Nmin} \cdot X_{Alg}/X_{Alg,N}) \cdot (1 - X_{Alg,Pmin} \cdot X_{Alg}/X_{Alg,P}) \cdot S_{CO_2}/(S_{CO_2} + K_{CO_2,Alg}) \cdot I_{av}/I_s \cdot e^{(1-I_{av}/I_s)} \cdot X_{Alg}$
	RA5	Heterotrophic growth	$\mu_{H,Alg,max} \cdot (1 - X_{Alg,Nmin} \cdot X_{Alg}/X_{Alg,N}) \cdot (1 - X_{Alg,Pmin} \cdot X_{Alg}/X_{Alg,P}) \cdot S_s/(S_s + K_{SS,Alg}) \cdot S_{O_2}/(S_{O_2} + K_{O_2,Alg}) \cdot X_{Alg}$
	RA6	Inactivation	$b_{inac} \cdot X_{Alg} \cdot K_{I,O_2,Alg}/(S_{O_2} + K_{I,O_2,Alg}) \cdot X_{Alg}$
	RA7	Endogenous respiration	$b_{resp} \cdot X_{Alg} \cdot S_{O_2}/(S_{O_2} + K_{O_2,Alg}) \cdot X_{Alg}$
Biochemical - Bacteria	RB1	Aerobic Heterotrophs bacteria growth	$\mu_{B,H} \cdot S_s/(S_s + K_{SS,BH}) \cdot S_{O_2}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) \cdot S_{NH}/(S_{NH} + K_{NH,BH}) \cdot X_{B,H}$
	RB2	Anoxic Heterotrophs bacteria growth on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\mu_{B,H} \cdot S_s/(S_s + K_{SS,BH}) \cdot K_{O_2,BH}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) \cdot S_{NO_3}/(S_{NO_3} + K_{NO_3,BH}) \cdot S_{NH}/(S_{NH} + K_{NH,BH}) \cdot \eta_{g1} \cdot X_{B,H}$
	RB3	Anoxic Heterotrophs bacteria growth on NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	$\mu_{B,H} \cdot S_s/(S_s + K_{SS,BH}) \cdot K_{O_2,BH}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) \cdot S_{NO_2}/(S_{NO_2} + K_{NO_2,BH}) \cdot S_{NH}/(S_{NH} + K_{NH,BH}) \cdot \eta_{g2} \cdot X_{B,H}$
	RB4	Autotrophs ammonium oxydizing bacteria (AOB) growth	$\mu_{AOB,max} \cdot S_{O_2}/(K_{O_2,AOB} + S_{O_2}) \cdot S_{NH}/(K_{NH,AOB} + S_{NH}) \cdot S_{CO_2}/(S_{CO_2} + K_{CO_2,AOB}) \cdot X_{B,AOB}$
	RB5	Autotrophs nitrite oxydizing bacteria (NOB) growth	$\mu_{NOB,max} \cdot S_{O_2}/(K_{O_2,NOB} + S_{O_2}) \cdot S_{NO_2}/(S_{NO_2} + K_{NO_2,NOB}) \cdot S_{NH}/(K_{NH,NOB} + S_{NH}) \cdot S_{CO_2}/(S_{CO_2} + K_{CO_2,NOB}) \cdot X_{B,NOB}$
	RB6	Heterotrophs bacteria decay	$b_H \cdot X_{B,H}$
	RB7	AOB decay	$b_{AOB} \cdot X_{B,AOB}$
	RB8	NOB decay	$b_{NOB} \cdot X_{B,NOB}$
	RB9	Hydrolysis of slowly biodegradable organic matter	$k_H \cdot (X_B/X_{B,H})/(K_X + X_B/X_{B,H}) \cdot [S_{O_2}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) + \eta_{h1} \cdot K_{O_2,BH}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) \cdot S_{NO_3}/(S_{NO_3} + K_{NO_3,BH}) + \eta_{h2} \cdot K_{O_2,BH}/(S_{O_2} + K_{O_2,BH}) \cdot S_{NO_2}/(S_{NO_2} + K_{NO_2,BH})] \cdot X_{B,H}$
Gas transfer	RT1	NH <sub>3</sub> transfer	$K_{LaNH_3,inj} \cdot (S_{NH_3,inj}^* - S_{NH_3}) + K_{LaNH_3,surf} \cdot (S_{NH_3,surf}^* - S_{NH_3})$
	RT2	CO <sub>2</sub> transfer	$K_{LaCO_2,inj} \cdot (S_{CO_2,inj}^* - S_{CO_2}) + K_{LaCO_2,surf} \cdot (S_{CO_2,surf}^* - S_{CO_2})$
	RT3	O <sub>2</sub> transfer	$K_{LaO_2,inj} \cdot (S_{O_2,inj}^* - S_{O_2}) + K_{LaO_2,surf} \cdot (S_{O_2,surf}^* - S_{O_2})$
Acid-base equilibrium	RE1	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /NH <sub>3</sub> equilibrium	$k_{A/B,IN} \cdot (S_{NH_3} \cdot (K_{a,IN} + S_{H^+}) - K_{a,IN} \cdot S_{NH_4})$
	RE2	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> equilibrium	$k_{A/B,H_2PO_4} \cdot (S_{HPO_4^{2-}} \cdot (K_{a,H_2PO_4} + S_{H^+}) - K_{a,H_2PO_4} \cdot S_{IP})$
	RE3	CO <sub>2</sub> /HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> equilibrium	$k_{A/B,CO_2} \cdot (S_{H^+} \cdot S_{HCO_3^-} - K_{a,CO_2} \cdot (S_{IC} - S_{HCO_3^-} - S_{CO_3^{2-}}))$
	RE4	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> equilibrium	$k_{A/B,HCO_3} \cdot (S_{CO_3^{2-}} \cdot S_{H^+} - K_{a,HCO_3} \cdot S_{HCO_3^-})$



### Annexe 3 : Schémas des processus pris en compte par le modèle selon le mode de croissance



# Annexe 4 : Stœchiométrie du modèle version 1 : matrice de Petersen

Matrix																			
		Component																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		$S_{IN}$	$S_{NO3}$	$S_{NO2}$	$S_{N2}$	$X_{Alg, N}$	$S_{PO4}$	$X_{Alg, P}$	$S_{IC}$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$S_{O2}$	$X_{Alg}$	$X_{B, H}$	$X_{B, AO, B}$	$X_{B, NO, B}$	$S_{cat}$	$S_a$
Processes	RA 1	-1				1													
	RA 2		-1			1							$i_{COD\_NO3}$						
	RA 3						-1	1											
	RA 4					$iN_{Xalg}$		$iP_{Xalg}$	$-iC_{XAlg}$				$2,67 \cdot iC_{XAlg}$	1					
	RA 5					$iN_{Xalg}$		$iP_{Xalg}$	$1/Y_{SS} \cdot iC_{SS} - iC_{XAlg}$	$1/Y_S$			$-(1/Y_{SS} - 1)$	1					
	RA 6	$iN_{Xalg} - f_{XI, Alg} \cdot iN_{XI} - (1 - f_{XI, Alg}) \cdot iN_X$					$iP_{Xalg} - f_{XI, Alg} \cdot iP_{XI} - (1 - f_{XI, Alg}) \cdot iP_X$		$iC_{XAlg} - f_{XI, Alg} \cdot iC_{XI} - (1 - f_{XI, Alg}) \cdot iC_{XS}$		$f_{XI, Alg}$	$1 - f_{XI, Alg}$	-1	-1					
	RA 7	$iN_{Xalg}$					$iP_{Xalg}$		$iC_{XAlg}$					-1					
	RB 1	$-iN_{XB}$					$-iP_{XB}$		$1/Y_H \cdot iC_{SS} - iC_{XB}$	$-1/Y_H$			$-(1 - Y_H)Y_H$		1				
	RB 2	$-iN_{XB}$	$-(1 - Y_H) / ((i_{COD\_NO3} - i_{COD\_NO2}) \cdot Y_H)$	$(1 - Y_H) / ((i_{COD\_NO3} - i_{COD\_NO2}) \cdot Y_H)$			$-iP_{XB}$		$1/Y_H \cdot iC_{SS} - iC_{XB}$	$-1/Y_H$					1				

<b>RB 3</b>	$-iN_{XB}$		$-(1-Y_H)/((i_{COD\_NO2}-i_{COD\_N2}).Y_H)$	$(1-Y_H)/((i_{COD\_NO2}-i_{COD\_N2}).Y_H)$		$-iP_{XB}$		$1/Y_H.iC_{SS}-iC_{XB}$	$-1/Y_H$					1				
<b>RB 4</b>	$-1/Y_{AOB}-iN_{XB}$		$1/Y_{AOB}$			$-iP_{XB}$		$-iC_{XB}$				$-(i_{COD\_NO2}-Y_{AOB})/Y_A$			1			
<b>RB 5</b>	$-iN_{XB}$	$1/Y_{NOB}$	$-1/Y_{NOB}$			$-iP_{XB}$		$-iC_{XB}$				$-(i_{COD\_NO3}-i_{COD\_NO2})-Y_{NOB}/Y_N$				1		
<b>RB 6</b>	$iN_{XB}-f_{XI,BAC}.iN_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iN_{XS}$					$iP_{XB}-f_{XI,BAC}.iP_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iP_{XS}$		$iC_{XB}-f_{XI,BAC}.iC_{XI}- (1-F_{XI,BAC}).iC_{XS}$		$f_{XI,BAC}$	$1-f_{XI,BAC}$			-1				
<b>RB 7</b>	$iN_{XB}-f_{XI,BAC}.iN_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iN_{XS}$					$iP_{XB}-f_{XI,BAC}.iP_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iP_{XS}$		$iC_{XB}-f_{XI,BAC}.iC_{XI}- (1-F_{XI,BAC}).iC_{XS}$		$f_{XI,BAC}$	$1-f_{XI,BAC}$			-1				
<b>RB 8</b>	$iN_{XB}-f_{XI,BAC}.iN_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iN_{XS}$					$iP_{XB}-f_{XI,BAC}.iP_{XI}- (1-f_{XI,BAC}).iP_{XS}$		$iC_{XB}-f_{XI,BAC}.iC_{XI}- (1-F_{XI,BAC}).iC_{XS}$		$f_{XI,BAC}$	$1-f_{XI,BAC}$					-1		
<b>RB 9</b>	$iN_{XS}$					$iP_{XS}$		$iC_{XS}-iC_{SS}$	1		-1							

## Annexe 5 : Paramètres stœchiométriques et physico-chimiques

	Name	Symbol	Unit	Value (20°C)
State Variables	Total ammoniacal nitrogen ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ )	$S_{\text{NH}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	
	Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )	$S_{\text{NO}_3}$	$\text{gN.m}^{-3}$	
	Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )	$S_{\text{NO}_2}$	$\text{gN.m}^{-3}$	
	Dinitrogen gas ( $\text{N}_2$ )	$S_{\text{N}_2}$	$\text{gN.m}^{-3}$	
	Internal algae cell quota of N	$X_{\text{Alg},\text{N}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	
	Inorganic soluble phosphorus as $\text{PO}_4^{3-}$	$S_{\text{IP}}$	$\text{gP.m}^{-3}$	
	Internal algae cell quota of P	$X_{\text{Alg},\text{P}}$	$\text{gP.m}^{-3}$	
	Inorganic carbon	$S_{\text{IC}}$	$\text{gC.m}^{-3}$	
	Rapidly biodegradable (soluble?) organic matter	$S_{\text{S}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Undegradable (particulate?) organic matter	$X_{\text{I}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Slowly biodegradable (particulate?) organic matter	$X_{\text{S}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Dissolved oxygen	$S_{\text{O}_2}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Algal biomass	$X_{\text{Alg}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Heterotrophic organisms	$X_{\text{B},\text{H}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Autotrophic ammonium oxydizing bacteria ( $\text{NH}_4^+$ to $\text{NO}_2^-$ )	$X_{\text{B},\text{AOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Autotrophic nitrite oxydizing bacteria ( $\text{NO}_2^-$ to $\text{NO}_3^-$ )	$X_{\text{B},\text{NOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	
	Cations	$S_{\text{cat}}$	$\text{mol.m}^{-3}$	
	Anions	$S_{\text{an}}$	$\text{mol.m}^{-3}$	
Stoichiometry	N content in algae	$i\text{N}_{\text{XAlg}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,00936
	P content in algae	$i\text{P}_{\text{XAlg}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,0021
	C content in algae	$i\text{C}_{\text{XAlg}}$	$\text{gC.gCOD}^{-1}$	0,371747212
	Yield of algae on organic matter ( $S_{\text{S}}$ )	$Y_{\text{SS}}$	$\text{gCOD.gCOD}^{-1}$	0,42
	Fraction of inert algae	$f_{\text{XI},\text{Alg}}$	$\text{gCOD.gCOD}^{-1}$	0,1
	N content of undegradable organic matter ( $X_{\text{I}}$ )	$i\text{N}_{\text{XI}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,00431
	N content of slowly biodegradable organic matter ( $X_{\text{S}}$ )	$i\text{N}_{\text{XS}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,00495
	P content of undegradable organic matter ( $X_{\text{I}}$ )	$i\text{P}_{\text{XI}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,00101
	P content of slowly biodegradable organic matter ( $X_{\text{S}}$ )	$i\text{P}_{\text{XS}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,00109
	C content of undegradable organic matter ( $X_{\text{I}}$ )	$i\text{C}_{\text{XI}}$	$\text{gC.gCOD}^{-1}$	0,36
	C content of slowly biodegradable organic matter ( $X_{\text{S}}$ )	$i\text{C}_{\text{XS}}$	$\text{gC.gCOD}^{-1}$	0,333
	C content of rapidly biodegradable organic matter ( $S_{\text{S}}$ )	$i\text{C}_{\text{SS}}$	$\text{gC.gCOD}^{-1}$	0,3258
	C content of bacteria	$i\text{C}_{\text{XB}}$	$\text{gC.gCOD}^{-1}$	0,375
	N content of bacteria	$i\text{N}_{\text{XB}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,07
	P content of bacteria	$i\text{P}_{\text{XB}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,02
	Conversion factor for $\text{NO}_3^-$ in COD	$i_{\text{COD},\text{NO}_3}$	$\text{gCOD.gN}^{-1}$	4,571
	Conversion factor for $\text{NO}_2^-$ in COD	$i_{\text{COD},\text{NO}_2}$	$\text{gCOD.gN}^{-1}$	3,431
	Conversion factor for $\text{N}_2$ in COD	$i_{\text{COD},\text{N}_2}$	$\text{gCOD.gN}^{-1}$	1,7143
	Yield for heterotrophic bacteria growth	$Y_{\text{H}}$	$\text{gCOD.gCOD}^{-1}$	0,625
	Yield of AOB	$Y_{\text{AOB}}$	$\text{gCOD.gN}^{-1}$	0,19
	Yield of NOB	$Y_{\text{NOB}}$	$\text{gCOD.gN}^{-1}$	0,08
	Fraction of inert bacteria	$f_{\text{XI},\text{BAC}}$	$\text{gCOD.gCOD}^{-1}$	0,08

## Annexe 6 : Paramètres cinétiques

Maximum specific uptake rate of $\text{NH}_4^+$ for algae	$k_{\text{NH,Alg}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}.\text{d}^{-1}$	0,36
Half-saturation coefficient of $\text{NH}_4^+$ for algae	$K_{\text{NH,Alg}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	7,87
Maximum N algae cell quota	$X_{\text{Alg,Nmax}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,13
Maximum specific uptake rate of $\text{NO}_3^-$ for algae	$k_{\text{NO3,Alg}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}.\text{d}^{-1}$	0,043
Half-saturation coefficient of $\text{NO}_3^-$ for algae	$K_{\text{NO3,Alg}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	12,61
Maximum specific uptake rate of $\text{PO}_4^{3-}$ for algae	$k_{\text{PO4,Alg}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}.\text{d}^{-1}$	0,16
Half-saturation coefficient of $\text{PO}_4^{3-}$ for algae	$K_{\text{PO4,Alg}}$	$\text{gP.m}^{-3}$	4,49
Maximum P algae cell quota	$X_{\text{Alg,Pmax}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,019
Maximum specific photoautotrophic growth rate of algae	$\mu_{\text{A,Alg\_max}}$	$\text{d}^{-1}$	4,12
Minimum N algae cell quota	$X_{\text{Alg,Nmin}}$	$\text{gN.gCOD}^{-1}$	0,00936
Minimum P algae cell quota	$X_{\text{Alg,Pmin}}$	$\text{gP.gCOD}^{-1}$	0,0021
Half-saturation coefficient of $\text{CO}_2$ for algae	$K_{\text{CO2,Alg}}$	$\text{gC.m}^{-3}$	0,5
Light saturation intensity	$I_s$	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	758
Maximum specific heterotrophic growth rate of algae	$\mu_{\text{H,Alg\_max}}$	$\text{d}^{-1}$	4,5
Half-saturation coefficient of $S_s$ for algae	$K_{\text{SS,Alg}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	89
Half-saturation coefficient of $\text{O}_2$ for algae	$K_{\text{O2,Alg}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	2
Algae inactivation rate	$b_{\text{inac,XAlg}}$	$\text{d}^{-1}$	0,21
Algae endogenous respiration rate	$b_{\text{resp,XAlg}}$	$\text{d}^{-1}$	0,21
Inhibiting $\text{O}_2$ constant for algae decay	$K_{\text{I\_O2,Alg}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0,5
Maximum specific AOB growth rate	$\mu_{\text{AOB\_max}}$	$\text{d}^{-1}$	0,9
Half-saturation coefficient of $\text{O}_2$ for AOB	$K_{\text{O2,AOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0,05
Half-saturation coefficient of $\text{NH}_4^+$ for AOB	$K_{\text{NH,AOB}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,05
Half-saturation coefficient of $\text{CO}_2$ for AOB	$K_{\text{CO2,AOB}}$	$\text{gC.m}^{-3}$	0,5
Maximum specific NOB growth rate	$\mu_{\text{NOB\_max}}$	$\text{d}^{-1}$	1
Half-saturation coefficient of $\text{O}_2$ for NOB	$K_{\text{O2,NOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0,3
Half-saturation coefficient of $\text{NO}_2^-$ for NOB	$K_{\text{NO2,NOB}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,05
Half-saturation coefficient of $\text{NH}_4^+$ for NOB	$K_{\text{NH,NOB}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,05
Half-saturation coefficient of $\text{CO}_2$ for NOB	$K_{\text{CO2,NOB}}$	$\text{gC.m}^{-3}$	0,5
AOB decay rate	$b_{\text{AOB}}$	$\text{d}^{-1}$	0,15
NOB decay rate	$b_{\text{NOB}}$	$\text{d}^{-1}$	0,15

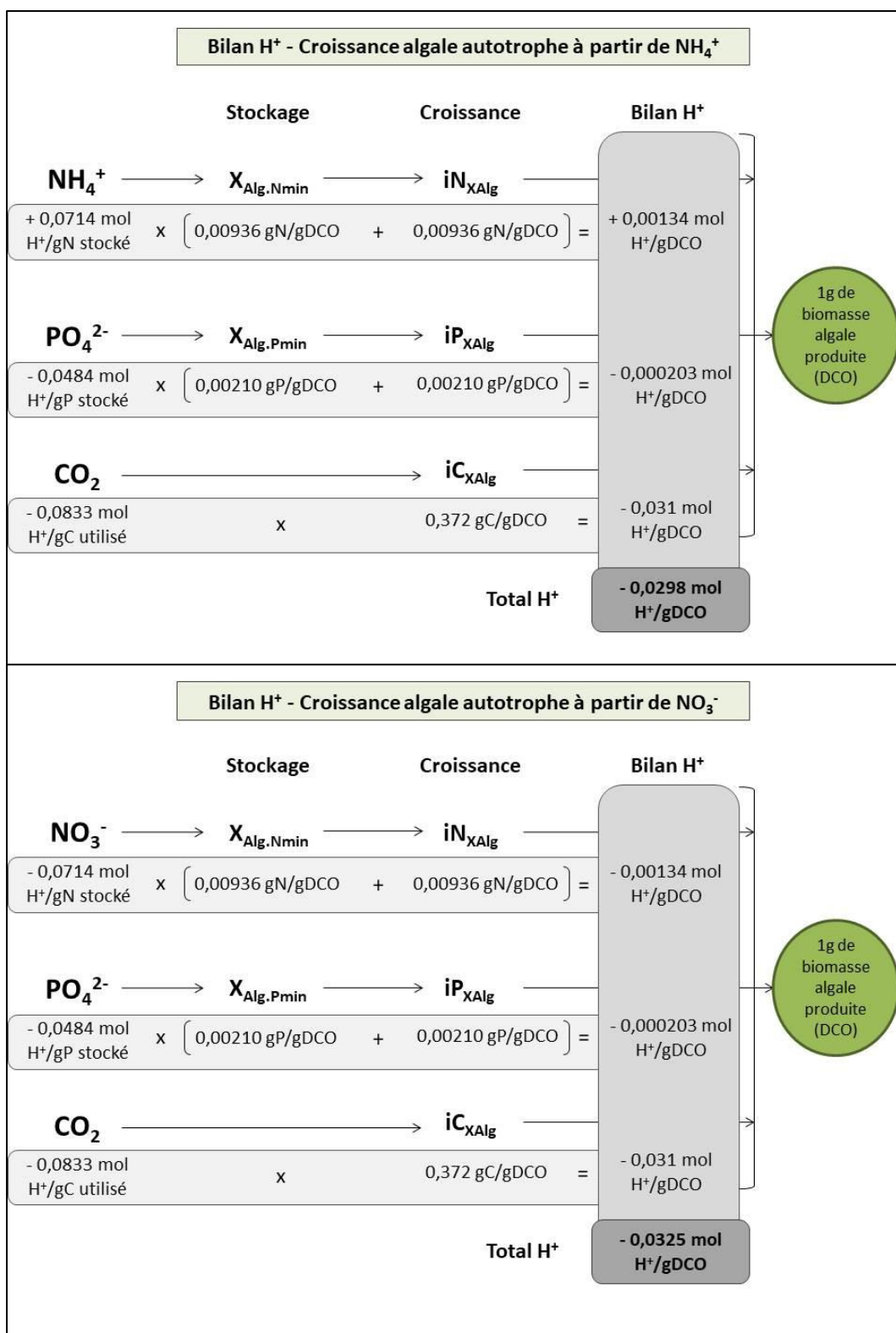
Maximum specific heterotrophic bacteria growth rate	$\mu_{BH\_max}$	$d^{-1}$	6
Half-saturation coefficient of $S_s$ for heterotrophic bacteria	$K_{SS,BH}$	$gCOD.m^{-3}$	20
Half-saturation coefficient of $O_2$ for heterotrophic bacteria	$K_{O_2,BH}$	$gCOD.m^{-3}$	0,02
Half-saturation coefficient of $NH_4^+$ for heterotrophic bacteria	$K_{NH,BH}$	$gN.m^{-3}$	0,05
Half-saturation coefficient of $NO_3^-$ for heterotrophic bacteria	$K_{NO_3,BH}$	$gN.m^{-3}$	0,5
Reduction factor for anoxic growth of $X_{B,H}$ with $NO_3^-$	$\eta_{g1}$	-	0,6
Reduction factor for anoxic growth of $X_{B,H}$ with $NO_2^-$	$\eta_{g2}$	-	0,4
Half-saturation coefficient of $NO_2^-$ for heterotrophic bacteria	$K_{NO_2,BH}$	$gN.m^{-3}$	0,5
Heterotrophs decay rate	$b_H$	$d^{-1}$	0,62
Maximum specific hydrolysis rate	$k_H$	$gCOD.gCOD^{-1}.d^{-1}$	3
Saturation coefficient for hydrolysis	$K_X$	$gCOD.gCOD^{-1}$	0,03
Correction factor for hydrolysis under anoxic conditions with $NO_3^-$	$\eta_{h1}$	-	0,6
Correction factor for hydrolysis under anoxic conditions with $NO_2^-$	$\eta_{h2}$	-	0,6
Rate coefficient for $CO_2/HCO_3^-$ reaction rate	$k_{A/B,CO_2}$	$mol^{-1}.m^3.d^{-1}$	1E+11
$CO_2/HCO_3^-$ dissociation constant	$pK_{a,CO_2}$	-	6,35
Rate coefficient for $HCO_3^-/CO_3^{2-}$ reaction rate	$k_{A/B,HCO_3^-}$	$mol^{-1}.m^3.d^{-1}$	1E+11
$HCO_3^-/CO_3^{2-}$ dissociation constant	$pK_{a,HCO_3^-}$	-	10,25
Rate coefficient for $NH_4^+/NH_3$ reaction rate	$k_{A/B,IN}$	$mol^{-1}.m^3.d^{-1}$	1E+11
$NH_4^+/NH_3$ dissociation constant	$pK_{a,IN}$	-	9,25
Rate coefficient for $H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$ reaction rate	$k_{A/B,H_2PO_4^-}$	$mol^{-1}.m^3.d^{-1}$	1E+11
$H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$ dissociation constant	$pK_{a,H_2PO_4^-}$	-	7,2
Dynamic gas transfer coefficient from surface for $O_2$	$K_{LaO_2,surf}$	$d^{-1}$	
Dynamic gas transfer coefficient from surface for $CO_2$	$K_{LaCO_2,surf}$	$d^{-1}$	
Dynamic gas transfer coefficient from surface for $NH_3$	$K_{LaNH_3,surf}$	$d^{-1}$	
Dynamic gas transfer coefficient from injection for $O_2$	$K_{LaO_2,inj}$	$d^{-1}$	
Dynamic gas transfer coefficient from injection for $CO_2$	$K_{LaCO_2,inj}$	$d^{-1}$	
Dynamic gas transfer coefficient from injection for $NH_3$	$K_{LaNH_3,inj}$	$d^{-1}$	

## Annexe 7 : Données initiales de la simulation témoin pour les tests sur les interactions algues/bactéries

Name	Symbol	Unit	Value
pH	pH	-	8,1
Total ammoniacal nitrogen ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ )	$S_{\text{NH}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	106
Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )	$S_{\text{NO}_3}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,00
Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )	$S_{\text{NO}_2}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,00
Dinitrogen gas ( $\text{N}_2$ )	$S_{\text{N}_2}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0
Internal algae cell quota of N	$X_{\text{Alg,N}}$	$\text{gN.m}^{-3}$	0,21
Inorganic soluble phosphorus as $\text{PO}_4^{3-}$	$S_{\text{IP}}$	$\text{gP.m}^{-3}$	10
Internal algae cell quota of P	$X_{\text{Alg,P}}$	$\text{gP.m}^{-3}$	0,05
Inorganic carbon	$S_{\text{IC}}$	$\text{gC.m}^{-3}$	142
Rapidly biodegradable (soluble?) organic matter	$S_{\text{S}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	5
Undegradable (particulate?) organic matter	$X_{\text{I}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	25
Slowly biodegradable (particulate?) organic matter	$X_{\text{S}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	120
Dissolved oxygen	$S_{\text{O}_2}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0
Algal biomass	$X_{\text{Alg}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	20
Heterotrophic organisms	$X_{\text{B,H}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	1
Autotrophic ammonium oxydizing bacteria ( $\text{NH}_4^+$ to $\text{NO}_2^-$ )	$X_{\text{B,AOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0,001
Autotrophic nitrite oxydizing bacteria ( $\text{NO}_2^-$ to $\text{NO}_3^-$ )	$X_{\text{B,NOB}}$	$\text{gCOD.m}^{-3}$	0,001
Cations	$S_{\text{cat}}$	$\text{mol.m}^{-3}$	10,25
Anions	$S_{\text{an}}$	$\text{mol.m}^{-3}$	5
Turbidité/Coloration	$\text{OD}_i$	?	0,005

Name	Symbol	Unit	Value
Température	T	°C	25
Lumière incidente	$I_0$	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	240
Dynamic gas tranfer coefficient from surface for $\text{O}_2$	$K_{\text{LaO}_2,\text{surf}}$	$\text{d}^{-1}$	17,5
Dynamic gas tranfer coefficient from surface for $\text{CO}_2$	$K_{\text{LaCO}_2,\text{surf}}$	$\text{d}^{-1}$	15,5
Dynamic gas tranfer coefficient from surface for $\text{NH}_3$	$K_{\text{LaNH}_3,\text{surf}}$	$\text{d}^{-1}$	0
Dynamic gas tranfer coefficient from injection for $\text{O}_2$	$K_{\text{LaO}_2,\text{inj}}$	$\text{d}^{-1}$	11,3
Dynamic gas tranfer coefficient from injection for $\text{CO}_2$	$K_{\text{LaCO}_2,\text{inj}}$	$\text{d}^{-1}$	10,0
Dynamic gas tranfer coefficient from injection for $\text{NH}_3$	$K_{\text{LaNH}_3,\text{inj}}$	$\text{d}^{-1}$	0
Temps de modélisation	Tps	d	14
Pas de temps des résultats	Pas	$\text{d}^{-1}$	0,01

## Annexe 8 : Schémas des transferts d'ions $H^+$ pendant la croissance





## Annexe 9 : Résultats des simulations de test de la sensibilité du modèle aux concentrations bactériennes

Nom modélisation	Concentration hétérotrophes (gCOD/m3)	Concentration AOB (gCOD/m3)	Concentration NOB (gCOD/m3)	Temps pour atteindre la biomasse maximale (j)	Productivité algale maximale (gCOD/m3/j)	Productivité algale finale (gCOD/m3/j)	Pourcentage de variation avec le témoin (productivité finale)
Témoin	1	0,001	0,001	13,5	66,27	61,14	
C16	0,1	0,001	1	13,5	61,39	56,58	-7%
C14	0,1	0,001	5	13,5	61,35	56,57	-7%
C25	0,1	0,01	0,001	13,5	56,59	52,17	-15%
C24	0,1	0,01	5	13,5	57,98	53,42	-13%
C27	0,1	0,05	5	13,5	47,36	43,62	-29%
C15	0,1	1	0,001	4,1	18,07	2,59	-96%
C13	0,1	5	0,001	2,3	14,09	0,49	-99%
C17	0,1	5	1	2,4	22,58	0,57	-99%
C12	0,1	5	5	2,5	15,48	0,79	-99%
C11	1	0,001	1	13,5	62,16	57,29	-6%
C9	1	0,001	5	13,5	62,24	57,36	-6%
C10	1	1	0,001	4,1	19,41	2,90	-95%
C1	1	1	1	4,2	19,76	3,06	-95%
C8	1	5	0,001	3,5	9,80	0,82	-99%
C19	1	5	1	3,5	10,63	1,01	-98%
C7	1	5	5	3,5	12,11	1,36	-98%
C29	5	0,001	0,001	13,5	66,74	61,59	1%
C31	5	0,01	0,001	13,5	63,50	58,56	-4%
C30	10	0,001	0,001	13,5	66,14	60,99	0%
C5	10	0,001	1	13,5	66,27	61,07	0%
C4	10	0,001	5	13,5	66,41	61,21	0%
C23	10	0,01	0,001	13,5	62,69	57,81	-5%
C22	10	0,01	5	13,5	64,03	59,01	-3%
C28	10	0,05	0,001	13,5	52,67	48,56	-21%
C26	10	0,05	5	13,5	59,36	54,69	-11%
C6	10	1	0,001	5,5	19,76	5,41	-91%
C20	10	1	1	6,5	17,48	5,79	-91%
C21	10	1	5	6,5	17,72	5,92	-90%
C3	10	5	0,001	6,5	10,42	3,25	-95%
C18	10	5	1	6,5	10,51	3,33	-95%
C2	10	5	5	6,5	10,51	3,43	-94%
C32	5	0,01	5	13,5	64,80	59,71	-2%
C33	0,1	<b>0,005</b>	0,001	13,5	58,78	54,19	-11%

## Annexe 10 : Graphiques correspondant aux simulations de tests sur les concentrations en bactéries

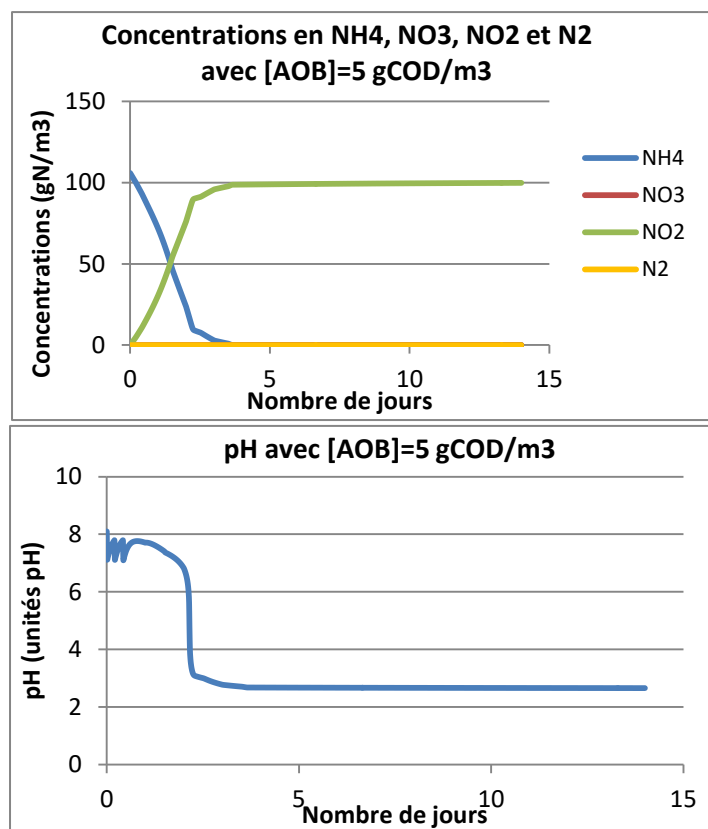
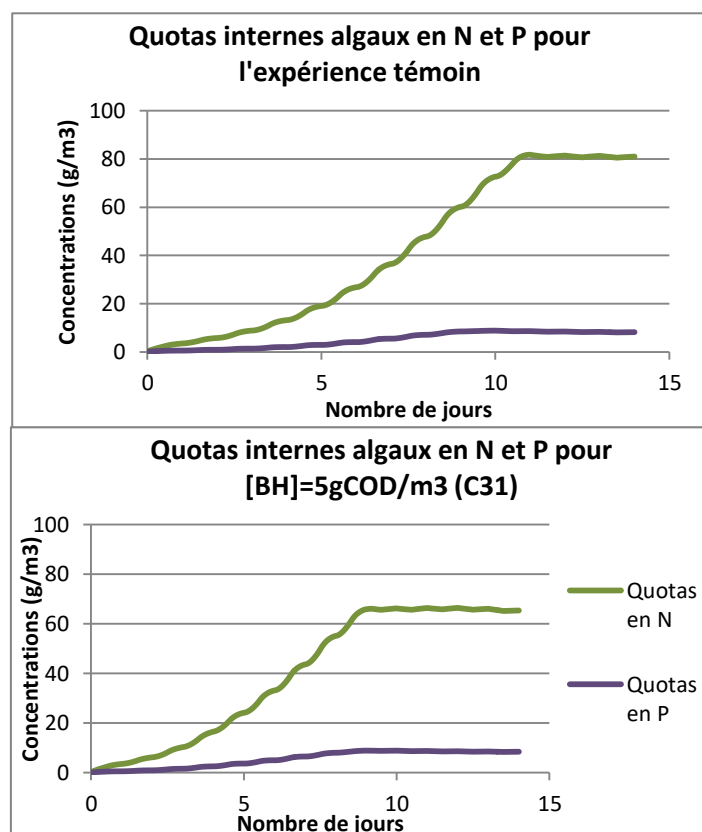


Figure a

Figure b



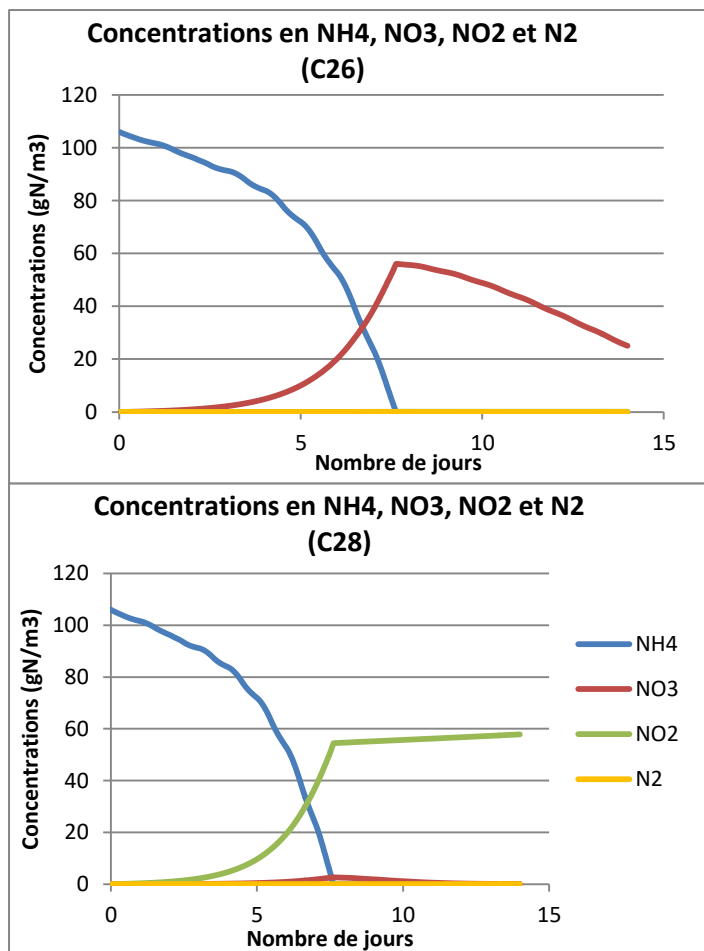
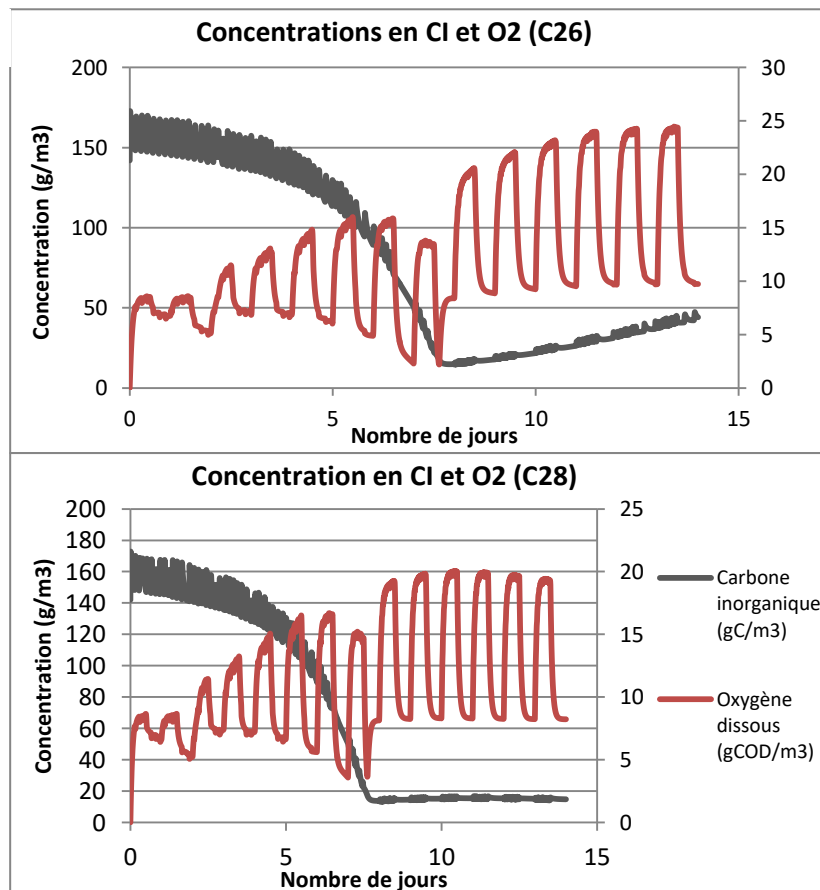
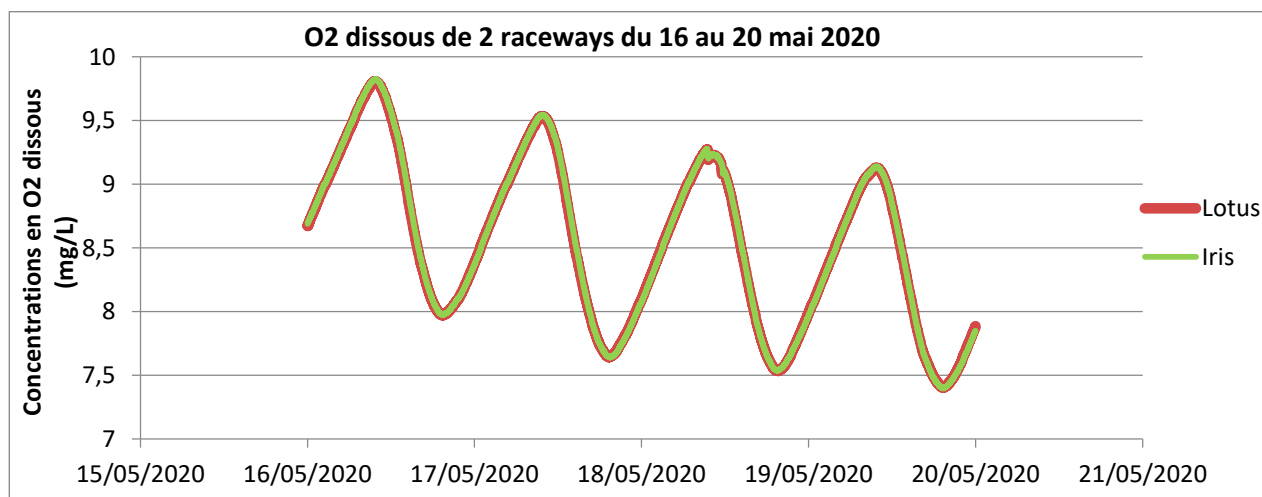
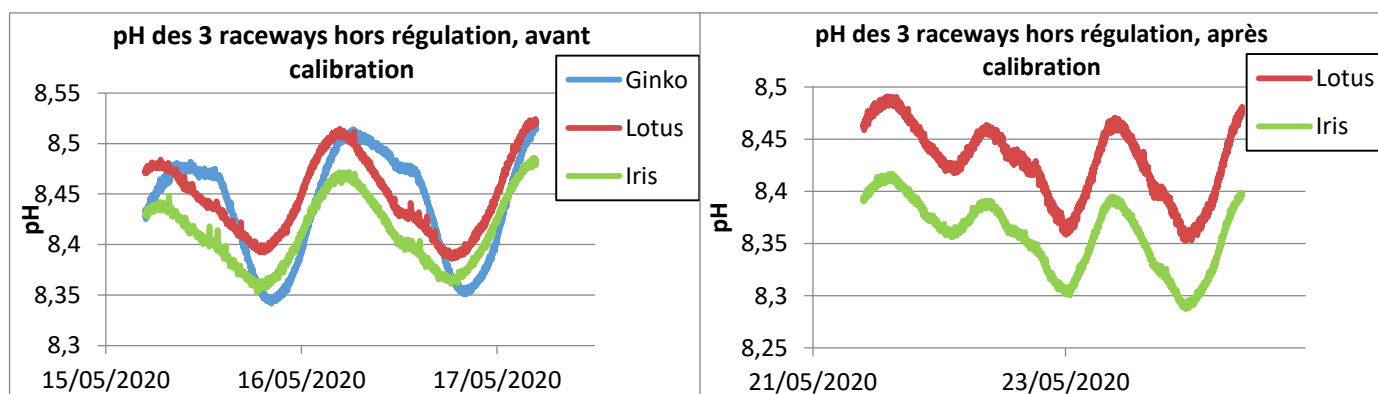
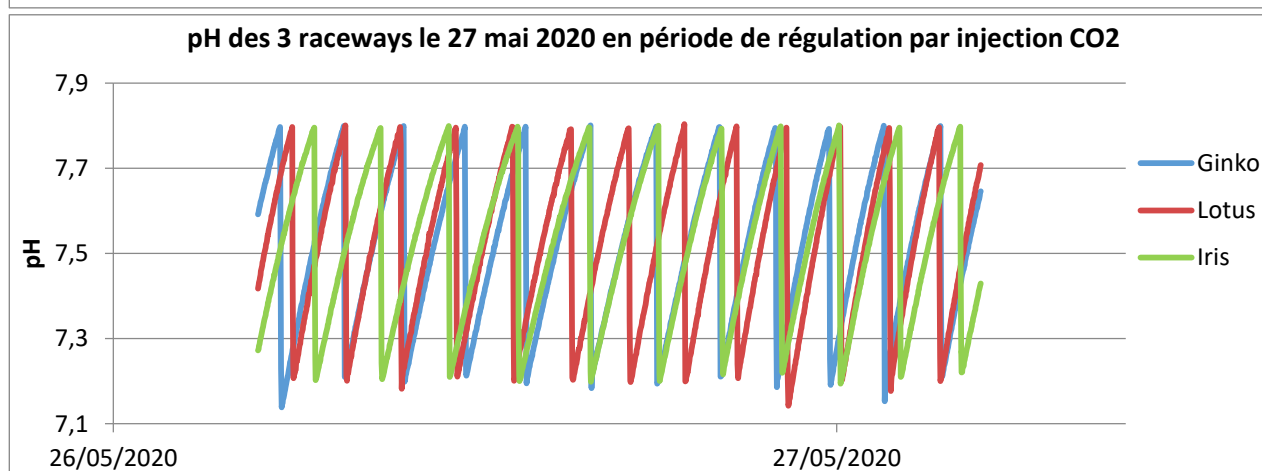
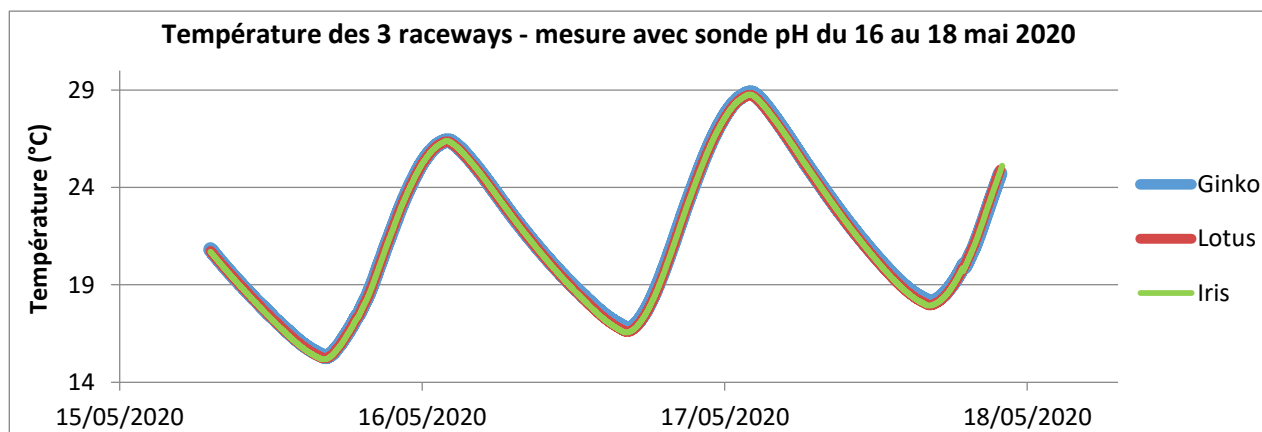


Figure c

Figure d



## Annexe 11 : Graphiques représentant les données mesurées par les sondes physico-chimiques en conditions abiotiques



## Annexe 12 : Résultats bruts de l'expérimentation n°1 à base de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

pH-TAC - MANIP 1					
Date	Raceway	pH	TA (°f)	TAC (°f)	Température (°C)
02/06/2020	Ginko	7	0	15,3	21,9
02/06/2020	Lotus	7,02	0	15,1	21,6
02/06/2020	Iris	7,08	0	15	21,8
03/06/2020	Ginko	7,62	0	14	20,8
03/06/2020	Lotus	7,44	0	15	20,2
03/06/2020	Iris	7,54	0	14,2	20,4
04/06/2020	Ginko	7,66	0	15,1	18,4
04/06/2020	Lotus	7,36	0	15,8	17,8
04/06/2020	Iris	7,45	0	15,3	18,1
05/06/2020	Ginko	7,61	0	15,8	16,3
05/06/2020	Lotus	7,55	0	16,4	15,7
05/06/2020	Iris	7,65	0	15,9	16,1
08/06/2020	Ginko	7,51	0	18,1	18,7
08/06/2020	Lotus	7,33	0	15,2	18,2
08/06/2020	Iris	7,47	0	14	18,1
09/06/2020	Ginko	7,79	0	16,8	20,9
09/06/2020	Lotus	7,88	0	15,5	20,5
09/06/2020	Iris	7,69	0	13,7	20,4
10/06/2020	Ginko	7,9	0	14,8	17,7
10/06/2020	Lotus	7,8	0	16	17,5
10/06/2020	Iris	7,8	0	15	17,5
11/06/2020	Ginko	7,57	0	14,8	16,4
11/06/2020	Lotus	7,37	0	16,1	16,2
11/06/2020	Iris	7,68	0	15	16,3
12/06/2020	Ginko	7,75	0	14,9	20,1
12/06/2020	Lotus	7,83	0	16,2	20
12/06/2020	Iris	8,08	0	14,6	19,9
15/06/2020	Ginko	7,93	0	14,1	20,3
15/06/2020	Lotus	7,98	0	16,9	20,2
15/06/2020	Iris	7,88	0	15,4	20,2
16/06/2020	Ginko	7,71	0	14,2	18,4
16/06/2020	Lotus	7,78	0	16,5	18,3
16/06/2020	Iris	7,81	0	15,9	18,3
17/06/2020	Ginko	7,6	0	14,5	18,3
17/06/2020	Lotus	7,67	0	16,3	17,9
17/06/2020	Iris	7,71	0	15,9	18
18/06/2020	Ginko	7,83	0	14,5	17,9
18/06/2020	Lotus	7,88	0	16,5	17,4
18/06/2020	Iris	7,69	0	16,4	17,4
19/06/2020	Ginko	7,65	0	14,6	18,7
19/06/2020	Lotus	7,89	0	16,7	18,5
19/06/2020	Iris	7,68	0	16,9	18,5

DCO			
Date prélèvement	Raceway	Réplikat	DCO (mgO <sub>2</sub> /L)
02/06/2020	Ginko	1	35,5
02/06/2020	Ginko	2	33,8
02/06/2020	Ginko	3	38,4
02/06/2020	Ginko	Moy	35,90
02/06/2020	Ginko	ET	2,33
02/06/2020	Lotus	1	27,2
02/06/2020	Lotus	2	33,7
02/06/2020	Lotus	3	27,5
02/06/2020	Lotus	Moy	29,47
02/06/2020	Lotus	ET	3,67
02/06/2020	Iris	1	31,6
02/06/2020	Iris	2	27
02/06/2020	Iris	3	29,2
02/06/2020	Iris	Moy	29,27
02/06/2020	Iris	ET	2,30
08/06/2020	Ginko	1	246
08/06/2020	Ginko	2	187
08/06/2020	Ginko	Moy	216,5
08/06/2020	Ginko	ET	41,7193001
08/06/2020	Lotus	1	174
08/06/2020	Lotus	2	177
08/06/2020	Lotus	Moy	175,5
08/06/2020	Lotus	ET	2,12132034
08/06/2020	Iris	1	173
08/06/2020	Iris	2	177
08/06/2020	Iris	Moy	175
08/06/2020	Iris	ET	2,82842712
16/06/2020	Ginko	1	245
16/06/2020	Ginko	Moy	245
16/06/2020	Ginko	ET	#DIV/0!
16/06/2020	Lotus	1	294
16/06/2020	Lotus	Moy	294
16/06/2020	Lotus	ET	#DIV/0!
16/06/2020	Iris	1	297
16/06/2020	Iris	Moy	297
16/06/2020	Iris	ET	#DIV/0!
19/06/2020	Ginko	1	221
19/06/2020	Ginko	Moy	221
19/06/2020	Ginko	ET	#DIV/0!
19/06/2020	Lotus	1	316
19/06/2020	Lotus	Moy	316
19/06/2020	Lotus	ET	#DIV/0!
19/06/2020	Iris	1	329
19/06/2020	Iris	Moy	329
19/06/2020	Iris	ET	#DIV/0!

DO - Semaine 1			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
02/06/2020	Ginko	1	0,076
02/06/2020	Ginko	2	0,075
02/06/2020	Ginko	3	0,075
02/06/2020	Ginko	Moy	0,075
02/06/2020	Ginko	ET	0,001
02/06/2020	Lotus	1	0,072
02/06/2020	Lotus	2	0,072
02/06/2020	Lotus	3	0,071
02/06/2020	Lotus	Moy	0,072
02/06/2020	Lotus	ET	0,001
02/06/2020	Iris	1	0,074
02/06/2020	Iris	2	0,078
02/06/2020	Iris	3	0,074
02/06/2020	Iris	Moy	0,075
02/06/2020	Iris	ET	0,002
03/06/2020	Ginko	1	0,158
03/06/2020	Ginko	2	0,161
03/06/2020	Ginko	3	
03/06/2020	Ginko	Moy	0,160
03/06/2020	Ginko	ET	0,002
03/06/2020	Lotus	1	0,145
03/06/2020	Lotus	2	0,149
03/06/2020	Lotus	3	
03/06/2020	Lotus	Moy	0,147
03/06/2020	Lotus	ET	0,003
03/06/2020	Iris	1	0,168
03/06/2020	Iris	2	0,175
03/06/2020	Iris	3	
03/06/2020	Iris	Moy	0,172
03/06/2020	Iris	ET	0,005
04/06/2020	Ginko	1	0,194
04/06/2020	Ginko	2	0,201
04/06/2020	Ginko	3	
04/06/2020	Ginko	Moy	0,198
04/06/2020	Ginko	ET	0,005
04/06/2020	Lotus	1	0,189
04/06/2020	Lotus	2	0,190
04/06/2020	Lotus	3	
04/06/2020	Lotus	Moy	0,190
04/06/2020	Lotus	ET	0,001
04/06/2020	Iris	1	0,216
04/06/2020	Iris	2	0,220
04/06/2020	Iris	3	
04/06/2020	Iris	Moy	0,218
04/06/2020	Iris	ET	0,003
05/06/2020	Ginko	1	0,230
05/06/2020	Ginko	2	
05/06/2020	Ginko	3	
05/06/2020	Ginko	Moy	0,230
05/06/2020	Ginko	ET	#DIV/0!
05/06/2020	Lotus	1	0,229
05/06/2020	Lotus	2	
05/06/2020	Lotus	3	
05/06/2020	Lotus	Moy	0,229
05/06/2020	Lotus	ET	#DIV/0!
05/06/2020	Iris	1	0,259
05/06/2020	Iris	2	
05/06/2020	Iris	3	
05/06/2020	Iris	Moy	0,259
05/06/2020	Iris	ET	#DIV/0!

DO - Semaine 2			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
08/06/2020	Ginko	1	0,339
08/06/2020	Ginko	2	
08/06/2020	Ginko	3	
08/06/2020	Ginko	Moy	0,339
08/06/2020	Ginko	ET	#DIV/0!
08/06/2020	Lotus	1	0,419
08/06/2020	Lotus	2	
08/06/2020	Lotus	3	
08/06/2020	Lotus	Moy	0,419
08/06/2020	Lotus	ET	#DIV/0!
08/06/2020	Iris	1	0,438
08/06/2020	Iris	2	
08/06/2020	Iris	3	
08/06/2020	Iris	Moy	0,438
08/06/2020	Iris	ET	#DIV/0!
09/06/2020	Ginko	1	0,403
09/06/2020	Ginko	2	0,423
09/06/2020	Ginko	3	0,418
09/06/2020	Ginko	Moy	0,415
09/06/2020	Ginko	ET	0,010
09/06/2020	Lotus	1	0,511
09/06/2020	Lotus	2	0,516
09/06/2020	Lotus	3	0,521
09/06/2020	Lotus	Moy	0,516
09/06/2020	Lotus	ET	0,005
09/06/2020	Iris	1	0,506
09/06/2020	Iris	2	0,503
09/06/2020	Iris	3	0,499
09/06/2020	Iris	Moy	0,503
09/06/2020	Iris	ET	0,004
10/06/2020	Ginko	1	0,415
10/06/2020	Ginko	2	0,416
10/06/2020	Ginko	3	
10/06/2020	Ginko	Moy	0,416
10/06/2020	Ginko	ET	0,001
10/06/2020	Lotus	1	0,531
10/06/2020	Lotus	2	0,533
10/06/2020	Lotus	3	
10/06/2020	Lotus	Moy	0,532
10/06/2020	Lotus	ET	0,001
10/06/2020	Iris	1	0,531
10/06/2020	Iris	2	0,529
10/06/2020	Iris	3	
10/06/2020	Iris	Moy	0,530
10/06/2020	Iris	ET	0,001
11/06/2020	Ginko	1	0,403
11/06/2020	Ginko	2	
11/06/2020	Ginko	3	
11/06/2020	Ginko	Moy	0,403
11/06/2020	Ginko	ET	#DIV/0!
11/06/2020	Lotus	1	0,537
11/06/2020	Lotus	2	
11/06/2020	Lotus	3	
11/06/2020	Lotus	Moy	0,537
11/06/2020	Lotus	ET	#DIV/0!
11/06/2020	Iris	1	0,531
11/06/2020	Iris	2	
11/06/2020	Iris	3	
11/06/2020	Iris	Moy	0,531
11/06/2020	Iris	ET	#DIV/0!
12/06/2020	Ginko	1	0,439
12/06/2020	Ginko	2	0,447
12/06/2020	Ginko	3	
12/06/2020	Ginko	Moy	0,443
12/06/2020	Ginko	ET	0,006
12/06/2020	Lotus	1	0,591
12/06/2020	Lotus	2	0,581
12/06/2020	Lotus	3	
12/06/2020	Lotus	Moy	0,586
12/06/2020	Lotus	ET	0,007
12/06/2020	Iris	1	0,575
12/06/2020	Iris	2	0,575
12/06/2020	Iris	3	
12/06/2020	Iris	Moy	0,575
12/06/2020	Iris	ET	0,000

DO - Semaine 3			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
15/06/2020	Ginko	1	0,489
15/06/2020	Ginko	2	0,504
15/06/2020	Ginko	3	0,508
15/06/2020	Ginko	Moy	0,500
15/06/2020	Ginko	ET	0,010
15/06/2020	Lotus	1	0,722
15/06/2020	Lotus	2	0,704
15/06/2020	Lotus	3	0,712
15/06/2020	Lotus	Moy	0,713
15/06/2020	Lotus	ET	0,009
15/06/2020	Iris	1	0,696
15/06/2020	Iris	2	0,705
15/06/2020	Iris	3	0,701
15/06/2020	Iris	Moy	0,701
15/06/2020	Iris	ET	0,005
16/06/2020	Ginko	1	0,479
16/06/2020	Ginko	2	0,472
16/06/2020	Ginko	3	0,480
16/06/2020	Ginko	Moy	0,477
16/06/2020	Ginko	ET	0,004
16/06/2020	Lotus	1	0,692
16/06/2020	Lotus	2	0,692
16/06/2020	Lotus	3	0,683
16/06/2020	Lotus	Moy	0,689
16/06/2020	Lotus	ET	0,005
16/06/2020	Iris	1	0,692
16/06/2020	Iris	2	0,690
16/06/2020	Iris	3	0,682
16/06/2020	Iris	Moy	0,688
16/06/2020	Iris	ET	0,005
17/06/2020	Ginko	1	0,448
17/06/2020	Ginko	2	0,471
17/06/2020	Ginko	3	0,432
17/06/2020	Ginko	Moy	0,450
17/06/2020	Ginko	ET	0,020
17/06/2020	Lotus	1	0,721
17/06/2020	Lotus	2	0,722
17/06/2020	Lotus	3	0,734
17/06/2020	Lotus	Moy	0,726
17/06/2020	Lotus	ET	0,007
17/06/2020	Iris	1	0,721
17/06/2020	Iris	2	0,741
17/06/2020	Iris	3	0,721
17/06/2020	Iris	Moy	0,728
17/06/2020	Iris	ET	0,012
18/06/2020	Ginko	1	0,420
18/06/2020	Ginko	2	0,440
18/06/2020	Ginko	3	0,446
18/06/2020	Ginko	Moy	0,435
18/06/2020	Ginko	ET	0,014
18/06/2020	Lotus	1	0,758
18/06/2020	Lotus	2	0,748
18/06/2020	Lotus	3	0,759
18/06/2020	Lotus	Moy	0,755
18/06/2020	Lotus	ET	0,006
18/06/2020	Iris	1	0,749
18/06/2020	Iris	2	0,754
18/06/2020	Iris	3	0,757
18/06/2020	Iris	Moy	0,753
18/06/2020	Iris	ET	0,004
19/06/2020	Ginko	1	0,407
19/06/2020	Ginko	2	0,410
19/06/2020	Ginko	3	0,401
19/06/2020	Ginko	Moy	0,406
19/06/2020	Ginko	ET	0,005
19/06/2020	Lotus	1	0,777
19/06/2020	Lotus	2	0,780
19/06/2020	Lotus	3	0,772
19/06/2020	Lotus	Moy	0,776
19/06/2020	Lotus	ET	0,004
19/06/2020	Iris	1	0,790
19/06/2020	Iris	2	0,784
19/06/2020	Iris	3	0,781
19/06/2020	Iris	Moy	0,785
19/06/2020	Iris	ET	0,005

Chromato ionique (mg élément/L) - MANIP 1											
Date	Raceway	Cl	NO3	PO4	SO4	NO2	Na	NH4	K	Ca	Mg
02/06/2020	Ginko	118,885	47,368	49,959	34,121	2,454	125,726	1,313	125,645	77,191	15,849
02/06/2020	Lotus	117,581	46,874	47,691	32,194	2,421	126,201	0	123,155	77,491	15,998
02/06/2020	Iris	117,102	46,917	50,87	33,557	2,41	128,488	0,182	127,824	77,237	15,919
03/06/2020	Ginko	122,484	46,255	41,084	32,674	2,373	133,824	0	127,651	62,902	15,637
03/06/2020	Lotus	122,716	46,401	43,08	33,082	2,355	133,563	0	127,238	67,541	15,972
03/06/2020	Iris	121,807	46,039	41,92	34,103	2,341	134,981	0	128,933	62,863	15,612
04/06/2020	Ginko	121,11	43,831	39,075	32,414	2,37	129,377	0	124,694	63,56	15,401
04/06/2020	Lotus	120,923	43,648	41,39	32,724	2,386	130,285	0	125,466	68,34	15,868
04/06/2020	Iris	121,234	44,004	40,51	34,026	2,416	132,376	0	128,103	62,626	15,537
05/06/2020	Ginko	122,878	82,155	39,364	32,249	2,179	190,444	0	126,718	67,27	15,517
05/06/2020	Lotus	123,392	82,4	42,605	32,788	2,254	195,954	0	126,626	69,44	15,949
05/06/2020	Iris	122,829	82,568	40,677	33,87	2,275	197,76	0	129,003	63,268	15,589
08/06/2020	Ginko	123,514	75,318	32,501	31,902	2,131	189,168	0	120,648	63,747	15,153
08/06/2020	Lotus	124,074	74,221	25,997	32,266	2,534	192,625	0	122,67	46,856	15,299
08/06/2020	Iris	123,895	75,044	24,855	33,418	2,537	193,126	0	124,009	41,506	14,845
09/06/2020	Ginko	112,468	66,22	24,534	28,611	1,875	149,255	0	95,953	40,911	11,906
09/06/2020	Lotus	121,292	69,504	19,14	31,341	2,568	188,669	0	120,8	38,706	14,833
09/06/2020	Iris	121,395	70,556	19,19	32,162	2,538	192,534	0	124,293	35,704	14,74
10/06/2020	Ginko	121,19	69,434	21,44	30,598	1,996	187,666	0	118,647	44,204	14,769
10/06/2020	Lotus	123,09	68,066	18,617	31,387	2,577					
10/06/2020	Iris	122,316	68,801	17,83	32,088	2,527	191,987	0	121,742	34,9	14,597
11/06/2020	Ginko	122,756	68,772	20,024	30,812	1,924	184,442	0	115,923	43,458	14,542
11/06/2020	Lotus	123,821	67,19	19,095	31,131	2,509	187,18	0	116,563	41,447	14,862
11/06/2020	Iris	124,258	68,356	17,626	32,353	2,5	189,749	0	119,949	35,422	14,506
12/06/2020	Ginko	117,758	65,102	17,888	29,719	1,756	177,895	0	112,911	41,246	14,288
12/06/2020	Lotus	120,642	64,408	16,044	30,473	2,33	183,239	0	115,751	39,021	14,652
12/06/2020	Iris	120,321	65,186	15,734	31,502	2,338	184,625	0	117,779	33,19	14,128
15/06/2020	Ginko	120,836	63,772	14,599	30,028	1,734	178,886	0	112,592	35,443	14,078
15/06/2020	Lotus	124,192	61,891	14,273	30,822	2,361	185,479	0	115,005	36,477	14,516
15/06/2020	Iris	124,473	62,24	14,325	31,989	2,478	188,078	0	116,727	32,686	14,136
16/06/2020	Ginko	121,459	62,666	14,821	30,049	1,702	176,852	0	109,892	37,382	14,133
16/06/2020	Lotus	122,38	59,798	14,648	30,356	2,308	181,434	0	112,258	38,224	14,422
16/06/2020	Iris	121,555	59,291	13,827	31,133	2,429	181,228	0	112,8	34,118	13,944
17/06/2020	Ginko	119,151	60,366	13,985	29,757	1,653	172,57	0	107,578	37,51	13,92
17/06/2020	Lotus	120,872	57,306	13,764	29,837	2,3	176,91	0	109,028	38,103	14,076
17/06/2020	Iris	120,817	56,975	13,089	30,881	2,511	177,567	0	110,2	34,226	13,654
18/06/2020	Ginko	117,2	58,596	12,426	28,813	1,625	168,589	0	105,542	35,53	13,587
18/06/2020	Lotus	120,589	55,565	12,455	29,492	2,342	175,725	0	108,016	36,589	13,877
18/06/2020	Iris	119,66	54,499	11,952	30,241	2,633	175,687	0	109,001	33,766	13,606
19/06/2020	Ginko	117,834	57,791	12,649	28,823	1,648	169,336	0	105,116	37,299	13,81
19/06/2020	Lotus	121,001	54,273	12,213	29,46	2,396	174,152	0	106,717	37,448	13,831
19/06/2020	Iris	120,013	52,956	11,905	30,195	2,78	176,74	0	108,271	34,77	13,658

MES-MVS					
Date prélèvement	Raceway	Réplikat	MES (mg/L)	MMS (mg/L)	MVS (mg/L)
02/06/2020	Ginko	1	36,9	212,4	-175,5
02/06/2020	Ginko	2	37,6	215,6	-178,0
02/06/2020	Ginko	3	37,2	188,2	-151,0
02/06/2020	Ginko	Moy	37,2	205,4	-168,2
02/06/2020	Ginko	ET	0,3	15,0	14,9
02/06/2020	Lotus	1	34,4	169,1	-134,8
02/06/2020	Lotus	2	34,2	180,3	-146,1
02/06/2020	Lotus	3	33,8	95,6	-61,8
02/06/2020	Lotus	Moy	34,1	148,3	-114,2
02/06/2020	Lotus	ET	0,3	46,0	45,7
02/06/2020	Iris	1	37,4	128,8	-91,4
02/06/2020	Iris	2	36,0	127,5	-91,5
02/06/2020	Iris	3	37,3	106,4	-69,1
02/06/2020	Iris	Moy	36,9	120,9	-84,0
02/06/2020	Iris	ET	0,8	12,6	12,9
08/06/2020	Ginko	1	182,8	53,2	129,6
08/06/2020	Lotus	1	221,2	84,8	136,4
08/06/2020	Iris	1	234,8	94,4	140,4
16/06/2020	Ginko	1	269,7	99,5	170,2
16/06/2020	Lotus	1	283,9	91,3	192,6
16/06/2020	Iris	1	220,6	70,4	150,1
19/06/2020	Ginko	1	187,6	55,6	131,9
19/06/2020	Lotus	1	289,3	68,9	220,4
19/06/2020	Iris	1	267,8	59,1	208,7

### Annexe 13 : Résultats bruts de l'expérimentation n°2 à base de $\text{NH}_4^+$

pH-TAC - MANIP 2					
Date	Raceway	pH	TA (°f)	TAC (°f)	Température(°C)
22/06/2020	Ginko	7,44	0	27,7	19,8
22/06/2020	Lotus	7,51	0	28	19
22/06/2020	Iris	7,52	0	27,9	18,6
23/06/2020	Ginko	7,58	0	27	21,7
23/06/2020	Lotus	7,57	0	26,4	21
23/06/2020	Iris	7,76	0	27,6	21,1
24/06/2020	Ginko	7,59	0	24,8	22,6
24/06/2020	Lotus	7,62	0	23,9	21,9
24/06/2020	Iris	7,81	0	25,8	22
25/06/2020	Ginko	7,67	0	22,6	24,3
25/06/2020	Lotus	7,88	0	19,1	24,1
25/06/2020	Iris	7,35	0	23,3	24,2
26/06/2020	Ginko	7,56	0	28,7	23,3
26/06/2020	Lotus	7,64	0	24,8	22,7
26/06/2020	Iris	7,54	0	26,9	22,9
29/06/2020	Ginko	7,82	0	24,1	19,3
29/06/2020	Lotus	7,82	0	22,7	18,7
29/06/2020	Iris	7,9	0	24,1	18,9
30/06/2020	Ginko	7,37	0	24,2	19,4
30/06/2020	Lotus	7,73	0	21,6	19,4
30/06/2020	Iris	7,92	0	22,2	19,1
01/07/2020	Ginko	7,74	0	22,3	20,8
01/07/2020	Lotus	7,91	0	20,7	20,6
01/07/2020	Iris	7,52	0	21,7	20,8
02/07/2020	Ginko	7,83	0	20,8	20,3
02/07/2020	Lotus	7,58	0	19,4	19,5
02/07/2020	Iris	7,53	0	20,7	19,5
03/07/2020	Ginko	7,85	0	28,4	22,3
03/07/2020	Lotus	7,31	0	27,6	22
03/07/2020	Iris	7,45	0	27,8	21,9
06/07/2020	Ginko	7,83	0	26,5	20,6
06/07/2020	Lotus	7,82	0	26,6	20,3
06/07/2020	Iris	7,97	0	26,9	20,2
07/07/2020	Ginko	7,49	0	26,2	18,7
07/07/2020	Lotus	7,67	0	25,1	17,6
07/07/2020	Iris	7,86	0	25,9	17,8
08/07/2020	Ginko	7,8	0	25,7	19,1
08/07/2020	Lotus	7,47	0	23,4	18,8
08/07/2020	Iris	7,81	0	23,6	18,9
09/07/2020	Ginko	7,39	0	24,6	22,9
09/07/2020	Lotus	7,43	0	22,7	22,1
09/07/2020	Iris	7,92	0	22,5	21,9
10/07/2020	Ginko	7,89	0	23,7	21,8
10/07/2020	Lotus	7,58	0	20	21,3
10/07/2020	Iris	7,86	0	20,5	21,3

DCO		
Date prélèvement	Raceway	DCO (mg/L)
22/06/2020	Ginko	17,8
22/06/2020	Lotus	18,9
22/06/2020	Iris	16,1
29/06/2020	Ginko	257
29/06/2020	Lotus	185
29/06/2020	Iris	163
06/07/2020	Ginko	321
06/07/2020	Lotus	226
06/07/2020	Iris	203
10/07/2020	Ginko	332
10/07/2020	Lotus	351
10/07/2020	Iris	331



DO - Semaine 1			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
22/06/2020	Ginko	1	0,079
22/06/2020	Ginko	2	0,078
22/06/2020	Ginko	3	0,079
22/06/2020	Ginko	Moy	0,079
22/06/2020	Ginko	ET	0,001
22/06/2020	Lotus	1	0,084
22/06/2020	Lotus	2	0,084
22/06/2020	Lotus	3	0,085
22/06/2020	Lotus	Moy	0,084
22/06/2020	Lotus	ET	0,001
22/06/2020	Iris	1	0,085
22/06/2020	Iris	2	0,084
22/06/2020	Iris	3	0,084
22/06/2020	Iris	Moy	0,084
22/06/2020	Iris	ET	0,001
23/06/2020	Ginko	1	0,087
23/06/2020	Ginko	2	0,089
23/06/2020	Ginko	3	0,090
23/06/2020	Ginko	Moy	0,089
23/06/2020	Ginko	ET	0,002
23/06/2020	Lotus	1	0,092
23/06/2020	Lotus	2	0,091
23/06/2020	Lotus	3	0,092
23/06/2020	Lotus	Moy	0,092
23/06/2020	Lotus	ET	0,001
23/06/2020	Iris	1	0,095
23/06/2020	Iris	2	0,093
23/06/2020	Iris	3	0,092
23/06/2020	Iris	Moy	0,093
23/06/2020	Iris	ET	0,002
24/06/2020	Ginko	1	0,192
24/06/2020	Ginko	2	0,195
24/06/2020	Ginko	3	0,196
24/06/2020	Ginko	Moy	0,194
24/06/2020	Ginko	ET	0,002
24/06/2020	Lotus	1	0,167
24/06/2020	Lotus	2	0,170
24/06/2020	Lotus	3	0,167
24/06/2020	Lotus	Moy	0,168
24/06/2020	Lotus	ET	0,002
24/06/2020	Iris	1	0,155
24/06/2020	Iris	2	0,161
24/06/2020	Iris	3	0,157
24/06/2020	Iris	Moy	0,158
24/06/2020	Iris	ET	0,003
25/06/2020	Ginko	1	0,344
25/06/2020	Ginko	2	0,344
25/06/2020	Ginko	3	0,347
25/06/2020	Ginko	Moy	0,345
25/06/2020	Ginko	ET	0,002
25/06/2020	Lotus	1	0,304
25/06/2020	Lotus	2	0,310
25/06/2020	Lotus	3	0,315
25/06/2020	Lotus	Moy	0,310
25/06/2020	Lotus	ET	0,006
25/06/2020	Iris	1	0,238
25/06/2020	Iris	2	0,240
25/06/2020	Iris	3	0,238
25/06/2020	Iris	Moy	0,239
25/06/2020	Iris	ET	0,001
26/06/2020	Ginko	1	0,439
26/06/2020	Ginko	2	0,437
26/06/2020	Ginko	3	0,446
26/06/2020	Ginko	Moy	0,441
26/06/2020	Ginko	ET	0,005
26/06/2020	Lotus	1	0,381
26/06/2020	Lotus	2	0,383
26/06/2020	Lotus	3	0,388
26/06/2020	Lotus	Moy	0,384
26/06/2020	Lotus	ET	0,004
26/06/2020	Iris	1	0,329
26/06/2020	Iris	2	0,340
26/06/2020	Iris	3	0,387
26/06/2020	Iris	Moy	0,352
26/06/2020	Iris	ET	0,031

DO - Semaine 2			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
29/06/2020	Ginko	1	0,586
29/06/2020	Ginko	2	0,585
29/06/2020	Ginko	3	0,586
29/06/2020	Ginko	Moy	0,586
29/06/2020	Ginko	ET	0,001
29/06/2020	Lotus	1	0,428
29/06/2020	Lotus	2	0,429
29/06/2020	Lotus	3	0,425
29/06/2020	Lotus	Moy	0,427
29/06/2020	Lotus	ET	0,002
29/06/2020	Iris	1	0,385
29/06/2020	Iris	2	0,383
29/06/2020	Iris	3	0,380
29/06/2020	Iris	Moy	0,383
29/06/2020	Iris	ET	0,003
30/06/2020	Ginko	1	0,601
30/06/2020	Ginko	2	0,609
30/06/2020	Ginko	3	0,611
30/06/2020	Ginko	Moy	0,607
30/06/2020	Ginko	ET	0,005
30/06/2020	Lotus	1	0,428
30/06/2020	Lotus	2	0,365
30/06/2020	Lotus	3	0,438
30/06/2020	Lotus	Moy	0,410
30/06/2020	Lotus	ET	0,040
30/06/2020	Iris	1	0,392
30/06/2020	Iris	2	0,409
30/06/2020	Iris	3	0,406
30/06/2020	Iris	Moy	0,402
30/06/2020	Iris	ET	0,009
01/07/2020	Ginko	1	0,615
01/07/2020	Ginko	2	0,624
01/07/2020	Ginko	3	0,637
01/07/2020	Ginko	Moy	0,625
01/07/2020	Ginko	ET	0,011
01/07/2020	Lotus	1	0,419
01/07/2020	Lotus	2	0,433
01/07/2020	Lotus	3	0,420
01/07/2020	Lotus	Moy	0,424
01/07/2020	Lotus	ET	0,008
01/07/2020	Iris	1	0,386
01/07/2020	Iris	2	0,396
01/07/2020	Iris	3	0,405
01/07/2020	Iris	Moy	0,396
01/07/2020	Iris	ET	0,010
02/07/2020	Ginko	1	0,630
02/07/2020	Ginko	2	0,632
02/07/2020	Ginko	3	0,641
02/07/2020	Ginko	Moy	0,634
02/07/2020	Ginko	ET	0,006
02/07/2020	Lotus	1	0,403
02/07/2020	Lotus	2	0,403
02/07/2020	Lotus	3	0,397
02/07/2020	Lotus	Moy	0,401
02/07/2020	Lotus	ET	0,003
02/07/2020	Iris	1	0,376
02/07/2020	Iris	2	0,378
02/07/2020	Iris	3	0,404
02/07/2020	Iris	Moy	0,386
02/07/2020	Iris	ET	0,016
03/07/2020	Ginko	1	0,661
03/07/2020	Ginko	2	0,691
03/07/2020	Ginko	3	0,680
03/07/2020	Ginko	Moy	0,677
03/07/2020	Ginko	ET	0,015
03/07/2020	Lotus	1	0,433
03/07/2020	Lotus	2	0,451
03/07/2020	Lotus	3	0,432
03/07/2020	Lotus	Moy	0,439
03/07/2020	Lotus	ET	0,011
03/07/2020	Iris	1	0,389
03/07/2020	Iris	2	0,401
03/07/2020	Iris	3	0,392
03/07/2020	Iris	Moy	0,394
03/07/2020	Iris	ET	0,006

DO - Semaine 3			
Date	Raceway	Réplicat	Densité optique
06/07/2020	Ginko	1	0,713
06/07/2020	Ginko	2	0,706
06/07/2020	Ginko	3	0,712
06/07/2020	Ginko	Moy	0,710
06/07/2020	Ginko	ET	0,004
06/07/2020	Lotus	1	0,524
06/07/2020	Lotus	2	0,523
06/07/2020	Lotus	3	0,519
06/07/2020	Lotus	Moy	0,522
06/07/2020	Lotus	ET	0,003
06/07/2020	Iris	1	0,459
06/07/2020	Iris	2	0,455
06/07/2020	Iris	3	0,453
06/07/2020	Iris	Moy	0,456
06/07/2020	Iris	ET	0,003
07/07/2020	Ginko	1	0,694
07/07/2020	Ginko	2	0,704
07/07/2020	Ginko	3	0,705
07/07/2020	Ginko	Moy	0,701
07/07/2020	Ginko	ET	0,006
07/07/2020	Lotus	1	0,570
07/07/2020	Lotus	2	0,564
07/07/2020	Lotus	3	0,564
07/07/2020	Lotus	Moy	0,566
07/07/2020	Lotus	ET	0,003
07/07/2020	Iris	1	0,488
07/07/2020	Iris	2	0,489
07/07/2020	Iris	3	0,490
07/07/2020	Iris	Moy	0,489
07/07/2020	Iris	ET	0,001
08/07/2020	Ginko	1	0,707
08/07/2020	Ginko	2	0,712
08/07/2020	Ginko	3	0,701
08/07/2020	Ginko	Moy	0,707
08/07/2020	Ginko	ET	0,006
08/07/2020	Lotus	1	0,643
08/07/2020	Lotus	2	0,644
08/07/2020	Lotus	3	0,639
08/07/2020	Lotus	Moy	0,642
08/07/2020	Lotus	ET	0,003
08/07/2020	Iris	1	0,556
08/07/2020	Iris	2	0,560
08/07/2020	Iris	3	0,547
08/07/2020	Iris	Moy	0,554
08/07/2020	Iris	ET	0,007
09/07/2020	Ginko	1	0,709
09/07/2020	Ginko	2	0,707
09/07/2020	Ginko	3	0,711
09/07/2020	Ginko	Moy	0,709
09/07/2020	Ginko	ET	0,002
09/07/2020	Lotus	1	0,749
09/07/2020	Lotus	2	0,755
09/07/2020	Lotus	3	0,757
09/07/2020	Lotus	Moy	0,754
09/07/2020	Lotus	ET	0,004
09/07/2020	Iris	1	0,686
09/07/2020	Iris	2	0,688
09/07/2020	Iris	3	0,684
09/07/2020	Iris	Moy	0,686
09/07/2020	Iris	ET	0,002
10/07/2020	Ginko	1	0,714
10/07/2020	Ginko	2	0,710
10/07/2020	Ginko	3	0,708
10/07/2020	Ginko	Moy	0,711
10/07/2020	Ginko	ET	0,003
10/07/2020	Lotus	1	0,832
10/07/2020	Lotus	2	0,836
10/07/2020	Lotus	3	0,838
10/07/2020	Lotus	Moy	0,835
10/07/2020	Lotus	ET	0,003
10/07/2020	Iris	1	0,777
10/07/2020	Iris	2	0,766
10/07/2020	Iris	3	0,775
10/07/2020	Iris	Moy	0,773
10/07/2020	Iris	ET	0,006

Chromato ionique (mg élément/L) - MANIP 2											
Date	Raceway	Cl	NO3	PO4	SO4	NO2	Na	NH4	K	Ca	Mg
22/06/2020	Ginko	341,865	4,825	48,903	27,617	2,735	112,363	98,778	124,913	60,817	13,357
22/06/2020	Lotus	326,687	4,008	47,932	26,475	2,728	103,551	97,995	122,399	60,958	11,652
22/06/2020	Iris	333,685	4,312	49,574	26,993	2,765	108,097	98,482	126,393	59,149	12,5
23/06/2020	Ginko	336,437	4,599	49,485	27,319	2,63	114,242	95,24	122,41	59,119	13,649
23/06/2020	Lotus	327,474	3,823	47,413	27,019	2,658	107,074	94,919	120,408	59,566	12,757
23/06/2020	Iris	333,94	4,461	48,243	27,413	2,671	111,637	95,503	124,583	57,464	13,288
24/06/2020	Ginko	332,472	4,309	46,929	26,97	2,525	113,668	88,918	120,359	59,264	13,502
24/06/2020	Lotus	319,552	3,888	43,257	26,612	2,488	105,56	87,876	117,117	57,071	12,473
24/06/2020	Iris	324,94	4,142	44,673	26,827	2,511	109,908	88,637	121,163	55,877	13,013
25/06/2020	Ginko	326,16	4,443	43,386	26,837	2,422	111,927	80,043	116,903	57,783	13,168
25/06/2020	Lotus	318,529	4,055	27,219	26,503	2,471	104,391	79,57	114,396	31,918	11,4
25/06/2020	Iris	321,664	4,298	40,76	26,622	2,445	109,556	81,686	118,846	53,815	12,875
26/06/2020	Ginko	329,553	4,764	39,893	26,793	2,427	147,731	72,193	113,829	55,269	12,779
26/06/2020	Lotus	321,591	4,345	21,793	26,715	2,472	143,16	72,651	112,645	27,284	11,206
26/06/2020	Iris	328,148	4,624	26,252	27,14	2,477	147,183	75,311	117,225	31,929	12,162
29/06/2020	Ginko	308,375	4,608	25,771	25,139	2,185	138,412	63,047	108,911	38,311	12,172
29/06/2020	Lotus	304,353	4,252	18,833	25,692	2,237	131,826	63,401	107,42	27,982	11,108
29/06/2020	Iris	307,136	4,47	19,492	25,847	2,233	136,031	65,408	111,07	27,551	11,559
30/06/2020	Ginko	316,517	4,838	23,701	26,119	2,224	145,121	62,563	109,462	38,625	12,129
30/06/2020	Lotus	305,804	4,364	17,922	26,133	2,222	136,32	62,124	107,346	30,088	11,257
30/06/2020	Iris	314,203	4,655	19,208	26,65	2,26	142,66	64,798	112,774	28,43	11,792
01/07/2020	Ginko	304,506	4,719	21,27	25,203	2,119	140,976	58,658	106,227	35,578	12,087
01/07/2020	Lotus	296,168	4,328	15,145	25,48	2,119	133,065	58,778	104,043	27,833	11,085
01/07/2020	Iris	309,998	4,703	18,634	26,437	2,205	140,225	61,958	109,826	29,218	11,886
02/07/2020	Ginko	303,033	4,959	20,021	25,293	2,122	140,061	55,956	104,44	35,176	12,11
02/07/2020	Lotus	294,234	4,406	16,811	25,61	2,104	131,254	56,612	102,061	31,942	11,29
02/07/2020	Iris	304,306	4,693	17,428	26,125	2,133	137,561	58,925	107,249	29,595	11,772
03/07/2020	Ginko	352,562	5,784	22,901	30,151	2,447	157,336	47,707	91,389	31,654	10,695
03/07/2020	Lotus	320,978	4,968	19,505	28,384	2,293	147,636	48,022	88,059	30,772	9,974
03/07/2020	Iris	321,914	5,099	19,019	28,147	2,244	145,356	47,485	87,942	26,455	9,826
06/07/2020	Ginko	297,785	5,011	17,987	25,644	2,009	171,488	49,48	101,784	36,44	11,915
06/07/2020	Lotus	280,92	4,506	15,36	25,209	1,922	159,009	48,316	96,987	34,068	11,019
06/07/2020	Iris	289,036	4,734	15,399	25,549	1,961	164,829	50,185	101,95	30,558	11,312
07/07/2020	Ginko	303,37	5,155	18,41	26,376	2,023	176,29	49,045	102,036	38,451	12,258
07/07/2020	Lotus	289,697	4,674	15,294	26,009	1,979	166,822	47,263	98,376	36,497	11,395
07/07/2020	Iris	296,035	4,894	15,378	26,151	1,978	172,357	49,081	103,575	32,713	11,781
08/07/2020	Ginko	298,546	5,106	16,971	26,093	1,958	174,485	46,736	100,641	38,203	12,142
08/07/2020	Lotus	284,185	4,666	14,836	25,446	1,876	164,514	43,653	96,295	38,202	11,351
08/07/2020	Iris	294,379	4,966	14,16	26,233	1,943	170,148	45,204	101,542	33,41	11,683
09/07/2020	Ginko	294,088	5,132	15,973	25,76	1,906	171,963	43,88	98,008	38,661	12,028
09/07/2020	Lotus	278,796	4,69	13,391	24,931	1,813	162,472	38,67	93,617	38,095	11,149
09/07/2020	Iris	289,175	4,983	12,893	25,691	1,901	168,096	39,533	98,733	33,03	11,441
10/07/2020	Ginko	279,9	5,058	13,914	24,908	1,812	155,006	38,531	91,385	35,974	11,201
10/07/2020	Lotus	265,752	4,619	11,416	23,786	1,702	144,951	31,497	86,327	35,737	10,302
10/07/2020	Iris	273,032	4,835	11,05	24,271	1,756	150,42	31,65	90,998	31,105	10,554

MES-MVS				
Date prélèvement	Raceway	MES (mg/L)	MMS (mg/L)	MVS (mg/L)
22/06/2020	Ginko	37,5	11,9	25,6
22/06/2020	Lotus	43,4	16,5	26,9
22/06/2020	Iris	42,7	16,0	26,8
29/06/2020	Ginko	239,2	61,7	177,6
29/06/2020	Lotus	252,4	97,8	154,7
29/06/2020	Iris	242,1	101,2	140,9
06/07/2020	Ginko	310,1	74,3	235,9
06/07/2020	Lotus	273,9	82,0	191,9
06/07/2020	Iris	281,3	95,4	185,9
10/07/2020	Ginko	280,0	54,1	225,9
10/07/2020	Lotus	198,3	-25,4	223,7
10/07/2020	Iris	227,0	19,1	207,9

## Annexe 14 : Résultats bruts de l'expérimentation n°3 à base de digestat

pH-TAC - MANIP 3						DCO			
Date	Echantillon	pH	TA (°f)	TAC (°f)	Température (°C)	Date prélèvement	Raceway	DCO totale (mg/L)	DCO filtrat (mg/L)
16/07/2020	Ginko	7,94	0	65,2	15,5	16/07/2020	Ginko	32,2	
16/07/2020	Lotus	8,06	0	66,4	14,3	16/07/2020	Lotus	24,9	
16/07/2020	Iris	7,98	0	66,8	14,6	16/07/2020	Iris	23,3	
17/07/2020	Ginko	7,64	0	65,2	21,8	20/07/2020	Ginko	131	
17/07/2020	Lotus	7,87	0	64,8	21	20/07/2020	Lotus	113	
17/07/2020	Iris	7,45	0	69,1	21	20/07/2020	Iris	135	
20/07/2020	Ginko	8,04	0	58	21,6	27/07/2020	Ginko	303	124
20/07/2020	Lotus	7,75	0	57,1	21,3	27/07/2020	Lotus	368	114
20/07/2020	Iris	7,95	0	61	21,2	27/07/2020	Iris	413	120
21/07/2020	Ginko	7,98	0	58,8	21	31/07/2020	Ginko	307	111
21/07/2020	Lotus	7,5	0	54,2	20,2	31/07/2020	Lotus	303	112
21/07/2020	Iris	7,62	0	55,6	20,3	31/07/2020	Iris	358	113
22/07/2020	Ginko	7,87	0	54,2	21,3				
22/07/2020	Lotus	7,92	0	52,7	20,4				
22/07/2020	Iris	7,73	0	55,1	20,7				
23/07/2020	Ginko	8,04	0	52,6	22,6				
23/07/2020	Lotus	7,87	0	53,5	22				
23/07/2020	Iris	7,83	0	54,1	21,8				
24/07/2020	Ginko	7,9	0	51,4	21,4				
24/07/2020	Lotus	7,55	0	48,9	20,7				
24/07/2020	Iris	7,41	0	50	20,8				
27/07/2020	Ginko	7,86	0	51,9	21,1				
27/07/2020	Lotus	7,76	0	47,4	20,6				
27/07/2020	Iris	7,79	0	50,2	20,6				
28/07/2020	Ginko	7,82	0	48,4	21,9				
28/07/2020	Lotus	7,88	0	45,9	21,2				
28/07/2020	Iris	7,71	0	46,9	21,2				
29/07/2020	Ginko	8,36	0,8	46,3	20				
29/07/2020	Lotus	8,34	0,4	45,7	19,7				
29/07/2020	Iris	8,11	0	47,3	19,9				
30/07/2020	Ginko	8,56	3,2	43,5	22,2				
30/07/2020	Lotus	8,53	2,7	41,4	21,3				
30/07/2020	Iris	8,4	1,2	44,6	21,2				
31/07/2020	Ginko	8,74	5,1	42,2	15,8				
31/07/2020	Lotus	8,68	4,5	41,5	15,4				
31/07/2020	Iris	8,6	3,7	45,1	16				



Ginko - Chromato ionique (mg/L)										
Date	Cl	NO3	PO4	SO4	NO2	Na	NH4	K	Ca	Mg
16/07/2020	172,025	4,686	1,945	14,723	1,265	91,138	103,479	205,956	61,061	8,068
17/07/2020	172,533	4,933	2,475	15,201	1,218	95,285	98,253	200,657	63,162	8,305
20/07/2020	171,245	5,043	1,458	16,005	1,237	93,625	80,252	192,551	65,197	8,154
21/07/2020	170,692	5,129	1,212	16,229	1,214	93,019	74,204	188,138	66,662	8,21
22/07/2020	172,515	5,292	1,025	16,778	1,216	92,336	69,11	183,578	67,38	8,25
23/07/2020	169,675	5,148	0,868	16,798	1,1	91,429	64,426	179,036	68,331	8,315
24/07/2020	164,499	5,018	0,942	16,43	1,031	90,536	61,769	175,818	69,357	8,415
27/07/2020	225,954	4,913	0,93	15,99	0,844	82,375	54,73	167,59	68,285	8,33
28/07/2020	162,942	5,149	0,984	16,973	0,972	88,57	52,91	166,42	70,751	8,536
29/07/2020	158,442	5,05	0,809	16,486	1,389	88,709	49,31	164,736	70,487	8,643
30/07/2020	155,326	5,075	0,616	16,506	0,855	87,932	42,423	160,504	70,068	8,67
31/07/2020	146,157	4,897	0,53	15,897	0,833	78,892	33,011	150,979	68,278	8,342
Lotus - Chromato ionique (mg/L)										
Date	Cl	NO3	PO4	SO4	NO2	Na	NH4	K	Ca	Mg
16/07/2020	165,523	4,35	1,821	14,209	1,248	85,298	100,348	199,714	62,409	7,669
17/07/2020	166,361	4,622	2,517	14,979	1,198	89,999	95,175	194,452	64,14	7,952
20/07/2020	164,306	4,716	1,362	15,906	1,202	89,371	78,118	187,106	66,632	7,93
21/07/2020	164,235	4,889	1,202	16,407	1,191	87,913	72,009	182,425	68,344	8,018
22/07/2020	166,068	5,002	0,996	16,674	1,149	89,04	66,648	177,49	68,662	8,106
23/07/2020	162,121	4,814	0,727	16,41	1,035	87,468	61,69	172,609	70,135	8,054
24/07/2020	158,235	4,721	0,554	15,925	0,983	85,477	57,289	167,049	70,231	7,956
27/07/2020	148,613	4,583	0,427	15,345	0,904	76,426	47,16	157,08	68,1	7,654
28/07/2020	157,327	4,866	0,61	16,221	0,935	84,881	47,295	160,857	71,504	8,225
29/07/2020	152,505	4,782	0,534	16,132	1,35	84,116	45,343	157,026	71,085	8,339
30/07/2020	150,776	4,839	0,589	16,378	0,791	83,506	40,969	152,976	70,684	8,404
31/07/2020	144,768	4,732	0,546	17,163	0,748	75,708	34,756	147,061	69,448	8,215
Iris - Chromato ionique (mg/L)										
Date	Cl	NO3	PO4	SO4	NO2	Na	NH4	K	Ca	Mg
16/07/2020	167,717	4,328	1,922	14,235	1,165	86,146	102,9	204,677	63,064	7,661
17/07/2020	168,375	4,605	2,448	14,819	1,214	90,583	97,757	199,12	64,988	7,878
20/07/2020	168,792	4,802	1,579	15,848	1,245	90,571	81,269	193,539	67,49	7,909
21/07/2020	169,744	4,927	1,222	16,164	1,24	90,385	75,412	189,162	68,845	7,901
22/07/2020	168,436	5,042	0,95	16,348	1,194	89,94	69,935	184,025	69,401	7,962
23/07/2020	166,322	4,857	0,695	16,143	1,1	88,685	65,063	179,986	70,834	7,913
24/07/2020	162,951	4,822	0,56	15,938	1,045	87,004	60,414	173,3	70,829	7,828
27/07/2020	153,482	4,712	0,324	15,601	0,968	78,907	50,842	165,059	69,615	7,627
28/07/2020	160,837	4,932	0,471	16,059	0,988	86,458	50,469	167,301	72,519	8,093
29/07/2020	150,918	4,851	0,468	16,082	0,865	86,107	48,251	163,48	72,421	8,278
30/07/2020	153,08	4,874	0,496	16,31	0,827	84,724	45,069	158,501	71,755	8,317
31/07/2020	146,154	4,789	0,469	15,901	0,777	76,977	38,176	151,179	70,816	8,206

MES-MVS				
Date prélèvement	Raceway	MES (mg/L)	MMS (mg/L)	MVS (mg/L)
16/07/2020	Ginko	22,2	1,9	20,3
16/07/2020	Lotus	22,1	1,8	20,2
16/07/2020	Iris	22,1	1,8	20,3
20/07/2020	Ginko	84,7	-0,4	85,1
20/07/2020	Lotus	79,4	-0,8	80,2
20/07/2020	Iris	90,4	0,1	90,3
27/07/2020	Ginko	100,4	-16,2	116,6
27/07/2020	Lotus	161,3	-16,0	177,3
27/07/2020	Iris	186,6	-13,1	199,7



**POLYTECH<sup>®</sup>**  
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS  
37200 TOURS

Solène Jahan

2019-2020

## **Etude et modélisation de la dynamique de l'azote et du carbone au cours de la culture de microalgues à partir de digestat**

### **Résumé :**

La croissance des microalgues nécessite les mêmes nutriments que ceux présents dans le digestat issu de la méthanisation : les cultures algales permettraient ainsi de valoriser ce type de déchets. Cependant, les paramètres en jeu lors de ces cultures (en particulier les cultures ouvertes) ne sont pas toujours contrôlés et agissent de manière interdépendante. Les travaux réalisés au cours de ce stage ont permis de confronter les données obtenues par simulation numérique et les données expérimentales afin d'étudier et d'approfondir les liens entre les valeurs de biomasse, de nutriments, d'O<sub>2</sub>, de pH et de température au sein des cultures de microalgues à partir de digestat, en particulier autour des dynamiques de l'azote et du carbone. Au niveau expérimental, des différences inexpliquées de dynamique de croissance ont été constatées dans les différents réacteurs utilisés pour les cultures de microalgues. Au niveau modélisation, les travaux réalisés ont permis de détecter certains facteurs d'imprécision du modèle, de l'améliorer et de le caler grâce à la comparaison des données modélisées et expérimentales.

Mots Clés : microalgues, modélisation, raceway, répétabilité, digestat, azote, carbone, phosphore

**INRAE Rennes**

17 avenue de Cucillé

35000 Rennes

**Tuteur entreprise :**

Fabrice Béline

Directeur de recherche

**Tuteur académique :**

Sabine Greulich