



**HAL**  
open science

# Performances techniques et environnementales d'un photobioréacteur solaire pour la production de la Spiruline

Ryma Laifa

► **To cite this version:**

Ryma Laifa. Performances techniques et environnementales d'un photobioréacteur solaire pour la production de la Spiruline. Génie des procédés. INSA de Toulouse, 2022. Français. NNT : 2022ISAT0042 . tel-04213576

**HAL Id: tel-04213576**

**<https://theses.hal.science/tel-04213576>**

Submitted on 21 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# THÈSE

## En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de  
Toulouse

---

Présentée et soutenue par

**Ryma LAIFA**

Le 29 Juin 2022

**Performances techniques et environnementales d'un  
photobioréacteur pour la production solaire de la  
Spiruline**

---

École doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie des Procédés et de l'Environnement**

Unité de recherche :

**TBI - Toulouse Biotechnology Institute, Bio & Chemical Engineering**

Thèse dirigée par

**Ligia BARNA et Pascal GUIRAUD**

Jury

**M. Eric CLIMENT**, Président de jury

**M. Jean-Philippe STEYER**, Rapporteur

**M. Jérémie PRUVOST**, Rapporteur

**M. Régis OLIVES**, Examineur

**Mme Ligia BARNA**, Directrice de thèse

**M. Pascal GUIRAUD**, Directeur de thèse

**M. Aras AHMADI**, Invité

**M. Jérôme MORCHAIN**, invité



## *Dédicaces*

*À mes parents et mon frère.*

*Et que ce travail soit une prière pour ton âme ma très chère S.*



## **Remerciements**

*Il s'agit incontestablement d'un destin qui s'est dessiné progressivement, le 29 Juin 2022 à 14h était un des moments les plus joyeux que j'ai eu à vivre en marquant dans la mémoire la participation de tous ceux qui ont rendu possible mon aventure de thésarde.*

*Tout d'abord, je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements aux jurys d'avoir accepté d'évaluer mes travaux de recherche et de contribuer à une discussion scientifique très pertinente et enrichissante lors de la soutenance. Je remercie Mr Éric CLIMENT, Directeur de l'IMFT, Professeur INP-ENSEEIH, qui m'a fait l'honneur d'en être président. Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à Mr Jérémy PRUVOST, Directeur du laboratoire GEPEA, Professeur Université de Nantes, et à Mr Jean-Philippe STYER, Directeur de recherche au LBE de Narbonne, d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail malgré leurs nombreuses occupations. Je remercie également Mr Régis OLIVES, Maître de conférences au laboratoire PROMES, d'avoir accepté d'être l'un des examinateurs de cette thèse.*

*Mes remerciements vont aussi aux deux équipes TIM et SOPHYE du laboratoire TBI de l'INSA Toulouse, qui m'ont accueillie avec sourire et bienveillance pendant presque 4 ans. Leurs qualités humaine et professionnelle m'ont énormément aidé à tenir le cap pour honorer cette ambition. Je tiens à remercier très particulièrement Professeur Jérôme MORCHAIN (mon encadrant non officiel) qui a toujours trouvé des réponses à mes questions, et avec qui les quelques minutes de discussion se transformaient à des heures sans s'en rendre compte et en atterrissant toujours sur les bilans de population ! Je remercie chaleureusement aussi Dr Aras AHMADI qui m'a aidé, soutenu et encouragé avec ses conseils très utiles dont je me souviendrai toujours. Je ne peux pas oublier dans ces remerciements Pr Alain LINE, Pr Gilles HEBRARD et Pr Arnaud COCKX qui ont contribué aussi de près ou de loin à l'avancement de cette thèse et qui m'ont entouré d'une grande gentillesse durant ces années.*

*Professeur Ligia BARNA et Professeur Pascal GUIRAUD, mes SUPER encadrants, sans vous je ne serais jamais arrivée au bout. C'est vous qui m'avez donné le goût de la recherche. Vous m'avez offert l'opportunité de profiter de vos expériences et vos idées admirables pour transformer les difficultés rencontrées en un quotidien très enrichissant. Ce sont vos qualités humaines et vos personnalités exceptionnelles qui ont fait de cette thèse une très belle expérience professionnelle. Au terme de cette expérience, j'ai le sentiment de vous devoir ma plus profonde gratitude et mes plus vives émotions : Ceci est aussi votre succès. Au-delà de cela, vous m'avez entouré d'un considérable soutien et*

*d'un support continu et indéfectible pendant ces 4 années. Vos véritables gentillesse et bienveillance m'ont aidé à surmonter les dures épreuves que j'ai traversés. Je n'oublierai jamais cela et je ne vous REMERCIERAI jamais assez maman-bis et papa-bis !*

*Je ne peux clôturer mes remerciements sans m'adresser à toutes les personnes qui ont participé à cette expérience. En premier lieu mes parents, à qui je dois cette réussite, qui n'ont cessé de m'encourager avec affection et confiance le long de mon parcours scolaire. Quand dieu a créé la famille, il m'a donné le plus tendre et le plus affectueux des PAPA qui ne manque de me dire « ma fille je t'aime je suis fière de toi ! », une maman sensible et attentive qui s'inquiète toujours pour moi, un frère et une sœur adorables et complices, des cousins, cousines, tantes et oncles qui me sont très chers, c'est grâce à vous que je suis là ! il n'y a pas de moyens suffisants pour vous dire MERCI !*

*Je ne peux pas oublier mes ami(e)s de France et d'Algérie, merci pour votre soutien amical et votre écoute quand j'avais besoin en particulier : Fatima-Doria, Sara, Dalila, Nabila, Sarah, Rabia, Hamza, Assia et Natalia et mes collègues : Dylan, Flavie, Dominique, Vincent(s), Irem, Maïke, Hugo, Marco et bon courage à ceux du bureau 228 « good LUCK ! ».*

*Je vous remercie tous d'être là...*



# Table des matières

Remerciements.....	i
Table des illustrations .....	vi
Table des tableaux.....	xii
Résumé.....	xiv
Introduction Générale.....	1
<b>I. Étude bibliographique.....</b>	<b>5</b>
1. État de l'art de la filière des microalgues et cyanobactéries.....	6
1.1. Une brève histoire de la culture d'algue à grande échelle .....	6
1.2. État des lieux de la production commerciale mondiale et Européenne.....	8
1.3. La Spiruline, un produit nutritionnel .....	12
1.4. Les procédés et sentiers technologiques de la filière .....	22
1.5. Évaluations des performances des PBRs solaires existants.....	37
2. État de l'art sur les méthodes de prédiction des performances des photobioréacteurs au regard de la lumière .....	37
2.1. Formules générales pour l'évaluation de la productivité dans un PBR .....	41
2.2. Approches de simulation par couplage de sous-modèles .....	44
3. Conclusion et positionnement du contexte scientifique.....	52
<b>II. Méthodologie générale sur la base de modèles de connaissance.....</b>	<b>57</b>
1. Introduction.....	57
2. Démarche générale .....	59
3. Impact de la lumière .....	62
3.1. Nature de la lumière.....	63
3.2. Réponse Photosynthèse-Irradiance .....	64
4. Impact de la température.....	68
4.1. Effet de la température sur la photosynthèse.....	69
4.2. Effet de la température sur la respiration .....	72
5. Impact de la concentration d'oxygène.....	75
5.1. Influence de la longueur du tube.....	76
5.2. Caractérisation de la longueur optimale dans notre cas d'étude.....	78
6. Impact de la nutrition.....	79
6.1. Effet du substrat carboné.....	79
6.2. Effet du substrat azoté.....	82
7. Caractérisation du milieu de culture.....	85
7.1. Équilibres des espèces chimiques .....	85
7.2. Transfert de CO <sub>2</sub> .....	86
7.3. Substrats et produits des processus biologiques.....	87
8. Outils et méthodes numériques mis en œuvre .....	90
<b>III. Évaluation numérique des performances d'un PBR tubulaire solaire.....</b>	<b>95</b>
1. Méthode de calcul des cinétiques au regard de la lumière.....	96
1.1. Cinétiques de la réponse de la population à la lumière reçue $\mu IVa$ .....	96
1.2. Disponibilité de lumière dans un tube de PBR solaire .....	101
1.3. Transport des cellules : Étude Lagrangienne .....	112
2. Résultats et discussion .....	117
2.1. Transfert radiatif.....	117
2.2. Distribution spatiale des cellules.....	124
2.3. Analyse des résultats du taux de croissance.....	131
2.4. Simulation du fonctionnement de PBR solaire thermostaté.....	145
3. Conclusion .....	155
<b>IV. Étude de la dynamique thermique du PBR solaire .....</b>	<b>159</b>
1. Principes et hypothèses de la modélisation thermique mise en œuvre.....	161

2.	Formulation mathématique des bilans thermiques .....	165
2.1.	La conduction dans les parois du PBR et de la serre .....	165
2.2.	Transfert thermique par convection de l'air à une paroi .....	167
2.3.	Modélisation de la température du sol.....	174
2.4.	Expressions des bilans d'énergie du Photobioréacteur extérieur.....	180
2.5.	Expressions des bilans d'énergie de la serre.....	187
2.6.	Facteurs de forme .....	196
2.7.	Propriétés du système étudié .....	199
3.	Résultats et discussions .....	201
3.1.	Comportement thermique d'un PBR extérieur.....	201
3.2.	Comportement thermique d'un PBR sous une serre .....	211
3.3.	Introduction de la régulation de la température .....	217
4.	Conclusion .....	222
<b>V.</b>	<b>Analyse des coûts énergétiques et environnementaux liés à la production solaire de la Spiruline</b> .....	<b>225</b>
1.	Analyse des besoins énergétiques bruts et de coûts électriques liés à la régulation thermique .....	226
1.1.	Quantification des dépenses électriques .....	226
1.2.	Comparaisons des besoins énergétiques (chaleur) et des dépenses énergétiques (électriques) pour le fonctionnement d'un PBR élémentaire avec et sans serre.....	227
1.3.	Étude des voies d'amélioration des consommations énergétiques : scénarii comparatifs (réalistes).....	231
2.	Analyse de cycle de vie d'un système solaire semi-industriel de production de Spiruline fraîche.....	243
2.1.	Introduction .....	243
2.2.	Objectif et portée de l'étude.....	244
2.3.	Descriptif du système de premier plan.....	245
2.4.	Réalisation des inventaires du cycle de vie .....	250
2.5.	Calcul des impacts environnementaux.....	254
2.6.	Résultats.....	255
3.	Conclusion .....	268
	<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	<b>269</b>
	<b>Valorisation</b> .....	<b>275</b>
	<b>Bibliographie</b> .....	<b>277</b>
	<b>Glossaire</b> .....	<b>301</b>
	Étude de cinétiques et évolution du milieu de culture.....	301
	Étude de transfert radiatif.....	302
	Étude de l'écoulement et les trajectoires des cellules .....	304
	Étude de la dynamique thermique du PBR solaire.....	305
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>309</b>
	Annexe 1 .....	309
	Annexe 2 .....	311
	Annexe 3 .....	312
	Annexe 4 .....	313
	Annexe 5 .....	317
	Annexe 6 .....	319

# Table des illustrations

<b>Figure 1</b> : Photographie de la première usine pilote de production de <i>Chlorella</i> à grande échelle à Cambridge, Massachusetts, aux États-Unis en 1951 <sup>2</sup> .....	6
<b>Figure 2</b> : Un des premiers bassins commerciaux de production de la <i>Spiruline</i> près de Bangkok, en Thaïlande <sup>8</sup> .....	7
<b>Figure 3</b> : Évolution de la production mondiale de microalgues entre 1975 et 2019. Marques carrées : données de production mondiale extraites de la littérature <sup>11,24</sup> . Ligne discontinue : courbe de tendance exponentielle.....	8
<b>Figure 4</b> : Images de la <i>Spiruline</i> en croissance cultivée sous microscopes en laboratoire (a), (b) et (c) de 4, 6 et 10 jours de culture respectivement <sup>39</sup> . (d) Image de la <i>Spiruline</i> cultivée en extérieur avec une morphologie différente <sup>35</sup> .....	14
<b>Figure 5</b> : Analyse nutritionnelle moyenne de 100g de <i>Spiruline</i> <sup>46</sup> .....	16
<b>Figure 6</b> : Principaux produits des réactions de photosynthèse <sup>48</sup> .....	17
<b>Figure 7</b> : Photographies des systèmes ouverts dans le monde : (a) bassin pour <i>Chlorella</i> à Taiwan. (b) Raceways à <i>Spiruline</i> en California, USA. (c) bassins naturels de 200 ha de <i>Dunaliella Salina</i> en Australie <sup>29</sup> . (d) & (e) Système de cascade en couche mince de 60L et 500-1500L respectivement à Trebon, République Tchèque <sup>72,73</sup> .....	25
<b>Figure 8</b> : Images de bassins couverts (à l'intérieur). (a) Raceway commercial sous serre pour la culture de <i>Spiruline</i> à Torreilles, sud de la France (Source site de Alg'ethic). (b) Bassin couvert pilote à Saint Nazaire, France (installation de recherche Algosolis) <sup>77</sup> . (c) Prototype d'un Raceway pilote sous serre photovoltaïque utilisant la lumière colorée au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer <sup>78</sup> .....	26
<b>Figure 9</b> : (a) Photographie d'une ferme de <i>Spiruline</i> en PBRs plats en Italie (Société AlgaVenice) <sup>94</sup> . (b) Schéma conceptuel des panneaux plats en verre placés en parallèle modifié <sup>81</sup> . (c) Image d'un photobioréacteur plat pilot installé dans les locaux du Département de génie chimique de l'Université d'Almeria (Espagne) <sup>95</sup> .....	28
<b>Figure 10</b> : Quelques types de photobioréacteurs tubulaires à l'échelle pilote et semi-industrielle. (a) PBRT horizontal de AlgaeParc au Pays-bas <sup>86</sup> . (b) PBRT vertical de 30 m <sup>3</sup> à l'unité de recherche d'Almeria en Espagne <sup>30,104</sup> . (c) Schéma conceptuel d'un PBRT de type Fibonacci en cours de développement <sup>82</sup> . (d) PBRT serpentin basé sur un concentrateur solaire <sup>48</sup> . (e) PBRT sous l'eau <sup>105</sup> .....	29
<b>Figure 11</b> : Schéma représentatif d'un système hybride : un photobioréacteur horizontal tubulaire couplé à deux réservoirs à l'air libre contrôlé <sup>130</sup> (modifié).....	36
<b>Figure 12</b> : Les plus grands photobioréacteurs tubulaires en Europe et dans le monde. (a) Roquette Klötze GmbH & Co. KG en Allemagne <sup>131</sup> . (b) Algatechnologies Ltd en Israël <sup>133</sup> . (c) AlgaFuel à Pataias au Portugal <sup>134</sup> . (d) Microphyt <sup>135</sup> .....	37
<b>Figure 13</b> : Influence de l'éclairement et du ratio Séclairée/V du réacteur sur les productivités surfacique et volumique <sup>140</sup> .....	39
<b>Figure 14</b> : Schématisation de l'approche d'Eilers et Peters <sup>156,214</sup> .....	50
<b>Figure 15</b> : Courbe de réponse photosynthétique de la <i>Spiruline</i> aux variations d'intensité d'éclairement en régime d'éclairage continue. Croix rouge : données expérimentales extraites de l'étude de Xue <sup>62</sup> . Ligne continue : modèle de la cinétique relative à l'irradiance Eq(20).....	67
<b>Figure 16</b> : Réponse spécifique de la <i>Spiruline</i> aux variations de température : comparaison des données expérimentales et modèle de Gernigon <sup>39</sup> avec le modèle Bernard et Rémond <sup>243</sup> .....	71
<b>Figure 17</b> : Évolution du taux de consommation d'oxygène par la <i>Spiruline</i> en fonction de la température de la nuit : confrontation des résultats expérimentaux de Torzillo et Vonshak <sup>57</sup> aux modèles.....	73
<b>Figure 18</b> : Influence de la concentration d'oxygène dissous sur le taux de photosynthèse de <i>S. almeriensis</i> <sup>256</sup> .....	76

<b>Figure 19</b> : Effet de la vitesse de la culture dans un PBR tubulaire sur : (a) les longueurs minimales des micro-tourbillons produits par la turbulence ; (b) l'évolution de la concentration d'O <sub>2</sub> dissous et les longueurs admissibles du circuit solaire, pour un tube de diamètre de 5 cm et une productivité maximale de 1,19 g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> .....	78
<b>Figure 20</b> : Distribution des formes du carbone dissous dans l'eau en fonction du pH <sup>39</sup> .....	80
<b>Figure 21</b> : Données expérimentales normalisées de l'influence de la quantité de nitrate en solution de Zarrouk <sup>12</sup> vs le modèle de Andrews ajusté <sup>39</sup> .....	83
<b>Figure 22</b> : Schéma de la démarche de modélisation du taux de cinétique réel spécifique à de la lumière $\mu IV_a$ . Case verte : paramètre d'entrée ; Boîte grise : méthode de modélisation. Boîte rose : base de données des résultats <sup>184</sup> .....	100
<b>Figure 23</b> : Représentation schématique des angles de la position du soleil et de l'orientation du PBR tubulaire <sup>184</sup> .....	102
<b>Figure 24</b> : Schéma des conditions aux limites et initiales ; deux types d'incidence : A) schéma de l'incidence de la lumière sur un tuyau horizontal, B) incidence collimatée du rayonnement direct dans un marqueur OXYZ mobile, C) incidence lambertienne isotrope.....	104
<b>Figure 25</b> : Schéma de la procédure du lancement des photons et leur propagation dans le volume du réacteur. a) cas d'une source collimatée : tous les photons sont émis selon la même direction (représentant la composante directe du rayonnement solaire). b) Cas d'une source ponctuelle diffuse où chaque point de la surface est une source ponctuelle : les photons reçus à une position quelconque de la surface proviennent de plusieurs directions (représentant la composante diffuse du rayonnement solaire). ...	106
<b>Figure 26</b> : Représentation de l'interaction entre les photons et une cellule de microorganisme.....	109
<b>Figure 27</b> : Illustration des différents phénomènes physiques inclus dans le modèle pour une incidence collimatée : a) Réfraction et réflexion spéculaire à la paroi, b) Réfraction et absorption du milieu, c) Tous les phénomènes (réflexion, réfraction, absorption, diffusion). .....	110
<b>Figure 28</b> : Profils des composantes RMS radiale et tangentielle normalisés par la vitesse de frottement pour plusieurs Re résultant de données expérimentales <sup>277</sup> et de travaux numériques <sup>278</sup> .....	113
<b>Figure 29</b> : Comparaison avec les résultats de Monte Carlo et les solutions analytiques pour : (a) considérer l'absorption seulement pour X= 0.5 g.L <sup>-1</sup> . (b) considérer à la fois l'absorption et la diffusion pour X= 1 g.L <sup>-1</sup> .....	118
<b>Figure 30</b> : Parcours du soleil à Toulouse.....	119
<b>Figure 31</b> : Champs d'éclairement énergétique local normalisés à la concentration de biomasse X = 1(g.L <sup>-1</sup> ) : (a) pour la lumière solaire directe avec $\vartheta = 20^\circ$ $\alpha Z = 0^\circ$ , (b) la lumière solaire diffuse, (c) la somme de la contribution des deux champs direct et diffus pour midi solaire d'un jour d'été à Toulouse coefficient diffus $\alpha = 0,38$ .....	120
<b>Figure 32</b> : Effet de la variation de l'intensité de la lumière solaire incidente sur le champ d'irradiation sur un jour d'été typique à Toulouse avec une concentration cellulaire constante X= 0,9 g.L <sup>-1</sup> .....	121
<b>Figure 33</b> : Effet de la concentration de la biomasse sur le champ volumique d'éclairement avec des conditions d'irradiance constantes : $I_0 = 1402 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , le coefficient de diffusion $\alpha = 0.38$ et $\alpha Z = 0^\circ$ (à midi) $\varphi = 20$ .....	122
<b>Figure 34</b> : Effet de l'angle $\Psi$ sur les champs d'irradiance normalisés I/I <sub>0</sub> pour 5 concentrations de biomasse.....	123
<b>Figure 35</b> : Trajectoire suivie d'une cellule arbitraire pour un Re = 20 000 et pendant t= 5 s : (a) projection sur un champ d'irradiation (coupe 2D), avec une concentration cellulaire de X = 0,9 g.L <sup>-1</sup> , I <sub>0</sub> = 1241 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , coefficient diffus $\alpha = 0,4$ , (b) trajectoire suivie le long de l'axe longitudinal en 3D et (c) Intensités lumineuses temporelles enregistrées lors de son mouvement .....	126
<b>Figure 36</b> : (a) La distribution radiale de la densité de population cellulaire dans le tube, (b) Comparaison de la distribution d'éclairement enregistrée par les cellules (en utilisant. Ub= 0,4 m.s <sup>-1</sup> correspondant à un nombre de Reynold de 20 000) avec la distribution lumineuse donné par le champ	

<i>spatial pour la concentration cellulaire de <math>X = 0,9 \text{ g.L}^{-1}</math>, <math>I_0 = 1241 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}</math>, coefficient diffus <math>\alpha = 0,4</math>.</i>	128
<b>Figure 37 :</b> <i>Distribution de la durée normalisée d'exposition des cellules à la couche proche de la paroi pour la valeur de vitesse d'écoulement la plus faible testée dans cette étude (c'est-à-dire <math>U_b = 0,3 \text{ m.s}^{-1}</math> correspondant à <math>Re = 15\ 000</math>).</i>	129
<b>Figure 38 :</b> <i>(a) Lumière déposée avec <math>I_0 = 1402 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}</math> et <math>\alpha = 0,33</math>, <math>X = 0,3 \text{ g.L}^{-1}</math>, (b) Distribution du temps d'exposition cellulaire aux zones inhibitrices (vitesse d'écoulement <math>U_b = 0,3 \text{ m.s}^{-1}</math> correspondant à <math>Re = 15\ 000</math>).</i>	130
<b>Figure 39 :</b> <i>Réponse de la croissance relative à la lumière <math>\mu V_a</math> en fonction de la fréquence du signal et du flux lumineux maximal, modélisée par notre modèle en utilisant <math>\tau = 0,3 \text{ s}</math> (ligne noire pleine), et comparée aux conditions de fonctionnement de l'expérience de Xue et al. <sup>62</sup> (resp. (b),(c) et (d) dans la Figure 6) (ligne rose pointillée avec marqueurs). Les cas limites de la cinétique (ligne noire pointillée) : <math>\mu V, \tau \rightarrow 0a</math> et <math>\mu V, \tau \rightarrow \infty a</math>.</i>	131
<b>Figure 40 :</b> <i>Comparaison du modèle d'Eilers et Peeters <sup>156</sup> (utilisant les valeurs des différents paramètres estimés par Wu et Merchuk <sup>61</sup>) avec les résultats expérimentaux de (Xue et al., <sup>62</sup>) pour un flux lumineux maximal de <math>I_0 = 8,16 \text{ mW.cm}^{-2}</math> et une fraction de lumière de 20%.</i>	132
<b>Figure 41 :</b> <i>Réponse dynamique (ligne pointillée rouge) d'une cellule arbitraire à la lumière captée (ligne pointillée bleue) avec un temps caractéristique <math>\tau = 0,3 \text{ s}</math> en utilisant le modèle dynamique existant <sup>172</sup>.</i>	133
<b>Figure 42 :</b> <i>Influence de la concentration en biomasse pour différentes conditions d'écoulement turbulent sur le taux de croissance biologique des algues avec des conditions d'éclairage constantes à <math>I_0 = 1241 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}</math>, coefficient diffus <math>\alpha = 0,4</math> ; réponse avec intégration complète de la lumière (ligne rouge unie) ; réponse instantanée (ligne bleue unie) ; réponse dynamique avec adaptation biologique (lignes pointillées).</i>	135
<b>Figure 43 :</b> <i>Valeurs de <math>\Gamma</math> (a) en fonction de la concentration de biomasse <math>X</math> (<math>\text{g.L}^{-1}</math>), (b) en fonction de l'intensité lumineuse incidente <math>I_0</math> avec constante <math>Re = 20\ 000</math>.</i>	137
<b>Figure 44 :</b> <i><math>\Gamma</math> vs <math>Re</math> pour différents coefficients de radiation diffuse <math>\alpha</math>. Les marques rondes représentent les résultats de la simulation. Les lignes pointillées représentent la corrélation <math>\Gamma = f(Re)</math>.</i>	138
<b>Figure 45 :</b> <i>Effet du coefficient de rayonnement diffus <math>\alpha</math> sur <math>\Gamma/Re</math>.</i>	139
<b>Figure 46 :</b> <i>Comparaison entre <math>\mu IV_a</math> basée sur l'Eq(87) et <math>\mu IV_a</math> issue d'expériences numériques (de l'approche de simulation).</i>	140
<b>Figure 47 :</b> <i>Effet de l'angle d'incidence <math>\Psi</math> sur les deux cinétiques asymptotiques pour 5 concentrations de biomasse, intensité incidente constante <math>I_0 = 1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}</math> et <math>\alpha = 0,38</math>. (a) Comportement instantané <math>\mu V, \tau \rightarrow 0a</math> ; (b) Comportement à intégration complète <math>\mu V, \tau \rightarrow \infty a</math>.</i>	142
<b>Figure 48 :</b> <i>Représentation des données calculées et des surfaces interpolées des deux cinétiques <math>\mu V, \tau \rightarrow 0a</math> et <math>\mu V, \tau \rightarrow \infty a</math> en fonction de la concentration de biomasse et de l'irradiance incidente.</i>	144
<b>Figure 49 :</b> <i>Croissance de la Spiruline sur une culture de 4 jours du mois d'avril à Toulouse. Courbe bleue : Concentration de biomasse ; Courbe orange : Irradiance solaire globale dans le PAR.</i>	146
<b>Figure 50 :</b> <i>a) Croissance de la Spiruline avec les concentrations des composants du milieu de culture : Bicarbonate, carbonate et nitrate en concentration molaire. b) Évolution de la concentration du carbone total dans le milieu et du pH.</i>	147
<b>Figure 51 :</b> <i>Profil de la concentration d'oxygène dissous avec et sans stripping, pendant la croissance.</i>	149
<b>Figure 52 :</b> <i>Productivités annuelles simulées : (a) en fonction des concentrations en biomasse pour le déclenchement de la récolte ; (b) pour les différents scénarii de récolte pour une culture discontinue de Spiruline.</i>	152

<b>Figure 53</b> : Évolution de la production de la Spiruline simulée au cours du temps. (a) Courbe de croissance de la biomasse (courbe bleue continue) et de consommation des nutriments (courbes oranges) en fonction du temps pour une année. (b) Histogramme de la productivité sur chaque mois.....	153
<b>Figure 54</b> : Simulation de l'effet de la variation de la température sur la croissance de la Spiruline.....	156
<b>Figure 55</b> : Régression polynomiale multiple des données du Ratio (Nusselt à une orientation donnée ( $\theta$ ) au Nusselt transverse $\theta=0^\circ$ ) pour une gamme de ReD allant de 9000 à 70 000 sur la base des données de <sup>327</sup> et des valeurs pour une plaque plane pour $\theta =90^\circ$ .....	173
<b>Figure 56</b> : Exemple des différents modes d'échanges énergétiques avec et dans le sol.....	175
<b>Figure 56</b> : Discrétisation de la profondeur du sol considéré pour le modèle de multicouches.....	176
<b>Figure 57</b> : Profils temporels de la température d'un sol naturel à différentes profondeurs et de la température de l'air à 2 m à (Toulouse, France du 1 Janvier 2020 au 31 décembre 2020).....	178
<b>Figure 58</b> : Comparaison de la variation temporelle de la température moyenne (en K) du sol calculée par notre modèle thermique pour Juillet 2020 et les données du model LST (Figure 3) de Sassi et al., <sup>332</sup> à Toulouse.....	179
<b>Figure 59</b> : Illustration de la partie tubulaire du photobioréacteur et les flux de chaleur considérés dans ce scénario.....	180
<b>Figure 60</b> : Exemple de l'évolution journalière du GHI, du DHI et de l'angle du zénith calculé par Eq(56) ainsi que le DNI respectif Eq (113). .....	182
<b>Figure 61</b> : Évolution de la température de l'eau et celle de la paroi en régime permanent (avec une température d'air ambiant, une vitesse de vent et une vitesse de liquide interne constantes). .....	186
<b>Figure 62</b> : Représentation schématique du système PBR dans une serre et les différents flux de chaleur considérés.....	188
<b>Figure 63</b> : Représentation graphique des différents angles impliqués dans le calcul de l'angle d'incidence solaire sur les parois de la serre. (a) aperçu de la configuration de la serre. (b) illustration des paramètres solaires sur une paroi plate verticale <sup>89</sup> .....	190
<b>Figure 64</b> : L'énergie solaire disponible en fonction du temps pour les parois verticales et le toit de la serre dans un jour d'été caractéristique à Toulouse. ....	191
<b>Figure 65</b> : représentation schématique de : (a) la configuration du PBR extérieur et (b) une géométrie élémentaire (c) une rangée de tubes <sup>315</sup> pour le calcul des facteurs de forme.....	196
<b>Figure 66</b> : Facteur de forme du PBR $F_p/s$ , en fonction de la largeur du sol $ls$ et la hauteur du tube $H_p$ ; et un point de calcul pour $H_p=0,05$ m et $ls=0,25$ m.....	197
<b>Figure 67</b> : représentation schématique de la configuration du système PBR + serre avec les facteurs des formes respectifs. ....	198
<b>Figure 68</b> : Profils temporels des températures : ambiante (ligne noire pleine), du sol (ligne noire discontinue), du PBR (marques vertes) et des températures optimales minimale et maximale (ligne rouges pointillés) ainsi que l'irradiance solaire globale GHI (ligne bleue), pour un jour typiques d'été (a) et d'hiver (b), à Toulouse 2020. ....	202
<b>Figure 69</b> : Profil journalier des températures de l'air ambiant, du sol, du réacteur et de la plage limite de fonctionnement, en jour d'hiver très nuageux ( $GHI_{max}=280$ $W.m^{-2}$ ). ....	203
<b>Figure 70</b> : Profils temporels des températures : ambiante (ligne noire pleine), du sol (ligne noire discontinue), du PBR (marques vertes) et des températures optimales minimale et maximale (ligne rouges pointillés) ainsi que l'irradiance solaire globale GHI (ligne bleue), pour une semaine (7 jours) de printemps et d'automne respectivement (a-b), à Toulouse, 2020. ....	204
<b>Figure 71</b> : (a) et (b) les profils journaliers des flux de chaleur impliqués dans le calcul de la température de la culture. (c) et (d) l'évolution temporelle quotidienne des conditions météorologiques en été et en hiver respectivement.....	206
<b>Figure 72</b> : Histogramme en nombres d'heures pour les plages de températures de la culture.....	208
<b>Figure 73</b> : Profils temporels annuels des flux thermiques les plus importants impactant le photobioréacteur.....	209

<b>Figure 74</b> : Répartition de la contribution moyenne annuelle des flux impactant le comportement thermique du PBR.....	210
<b>Figure 75</b> : Distribution horaires de la température de la paroi, de l'air intérieur et du sol de la serre vide sur toute l'année (temps en UTC).....	212
<b>Figure 76</b> . Distribution horaires de la température de la paroi, de l'air intérieur, du sol de la serre vide et la nébulosité (a) Pendant un jour d'hiver et (b) Pendant un jour d'automne.....	213
<b>Figure 77</b> : Comparaison de l'évolution temporelle de la température du photobioréacteur sous et sans serre pour un fonctionnement annuel.....	214
<b>Figure 78</b> : Confrontation de l'évolution temporelle de la température du photobioréacteur avec et sans serre (a) & (b) lors d'un jour de faible et de forte irradiance solaire respectivement (temps en UTC).....	215
<b>Figure 79</b> : Les flux moyens de chaleur échangée entre les différents éléments de la serre et du PBR.....	216
<b>Figure 80</b> : Évolution de la température du PBR sans régulation (marques vertes) et avec régulation (ligne avec marques bleues). Demandes thermiques de refroidissement pour réguler la température du PBR issus de la simulation d'une journée de canicule à Toulouse, 2020 (histogramme bleu).....	218
<b>Figure 81</b> : Comparaison des profils de la température interne du PBR sans régulation et avec unité de régulation de puissance thermique constante à 5 kW.....	219
<b>Figure 82</b> : (a) Les demandes thermiques journalières pour la régulation et le maintien de la température optimale d'une culture de 0,235 m <sup>3</sup> tout au long de l'année 2020 à Toulouse entre 23 °C et 37 °C. (b) Profil annuel de la température de la culture régulée en fonction des conditions ambiantes. (c) Répartition des besoins totaux annuels sur les périodes nocturnes et diurnes.....	221
<b>Figure 83</b> : Consommations énergétiques du PBR dans une configuration sans et avec serre. (a) Besoins thermiques ; (b) Dépenses électriques dus à l'utilisation de la PAC.....	228
<b>Figure 84</b> : Répartitions mensuelles des besoins de chauffage et de refroidissement.....	229
<b>Figure 85</b> : Répartitions mensuelles des coûts énergétiques totaux associés à la production de biomasse. (a) en kWh d'énergie brute ; (b) en kWh d'électricité consommée par la PAC.....	230
<b>Figure 86</b> : Consommations énergétiques pour les différentes dimensions de serres évaluées comparées au cas de référence : (a) Besoins thermiques et (b) Coûts électriques.....	233
<b>Figure 87</b> : Distributions des flux de chaleurs impliqués dans le comportement thermique pour différentes tailles de serre. QCsun, Qesun, Qdsun : flux de radiation solaire absorbé par la couverture, la culture et le sol respectivement. QCIR, QeIR, QsIR : flux de radiation émis par la couverture, la culture et le sol. QsAi, QCAi, QeAi : flux de perte par convection entre l'air interne et le sol, la couverture et la culture respectivement. QCAe : flux convection entre la couverture et l'air extérieur.....	235
<b>Figure 88</b> : Évolution de la température de la culture en absence de la régulation nocturne.....	236
<b>Figures 89</b> : comparaison des dépenses énergétiques annuelles des deux modes de régulation thermique pour un PBR mis à l'extérieur (a) En énergie brute, (b) En consommation électrique.....	238
<b>Figure 90</b> : Consommations d'énergie des différentes structures de serre avec régulation diurne uniquement : (a) en kWh d'énergie thermique brute, (b) en kWh d'électricité consommée.....	240
<b>Figure 91</b> : Comparaison des performances énergétiques du PBR pour tous les scénarios évalués. En termes de : (a) Besoins énergétiques bruts (b) Consommations électriques liées à la PAC utilisée....	241
<b>Figure 92</b> : Schéma des frontières du cycle de vie pour la production de Spiruline fraîche (Scénario de base).....	245
<b>Figure 93</b> : Schéma conceptuel de huit PBR tubulaires élémentaires constituant notre système semi-industriel hypothétique pour la production de Spiruline fraîche.....	247
<b>Figure 94</b> : Répartition des différents contributeurs du PBR aux impacts environnementaux finaux, classés par catégories d'impact sur : (a) la qualité des écosystèmes, (b) la santé humaine et (c) l'épuisement des ressources.....	259
<b>Figure 95</b> : Répartition des impacts finaux sur les différentes catégories de la méthode ReCiPe Endpoint, pour les huit scénarii.....	261

<b>Figure 96 :</b> Répartition des différents contributeurs du PBR au potentiel de réchauffement climatique (impact intermédiaires) calculé par la méthode ReCiPe Midpoint pour tous les scénarii. ....	263
<b>Figure 97 :</b> Contributions des différents processus unitaires du système de production à la consommation électrique dans tous les scénarii.....	265
<b>Figure 98 :</b> Répartition des contributions relatives des processus de production des nutriments et produits du nettoyage dans l'impact au changement climatique lié aux produits chimiques.....	266
<b>Figure 99 :</b> Contributions de tous les flux entrants et sortants aux impacts environnementaux (catégorie changement climatique) pour les huit scénarii simulés pour un fonctionnement annuel PBR tubulaire semi-industriel à Toulouse.....	267

# Table des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Panorama mondial et européen de la production actuelle de microalgues : Unités de de production et quantités, Localisations, Applications et Valeur du marché.....	10
<b>Tableau 2 :</b> Caractéristiques morphologiques des souches <i>Spirulina</i> et <i>Arthrospira</i> <sup>13</sup> .....	13
<b>Tableau 3 :</b> Effet de la température sur la productivité journalière d' <i>Arthrospira Platensis</i> <sup>56</sup> .....	20
<b>Tableau 4 :</b> La filière de microalgues et ses différents itinéraires technologiques.....	23
<b>Tableau 5 :</b> Les productivités de la Spiruline dans différentes conceptions tubulaires extérieures. ..	31
<b>Tableau 6 :</b> Comparaison des performances de différents concepts de PBR existants <sup>97,142</sup> .....	40
<b>Tableau 7 :</b> Caractérisation du milieu de culture utilisé <sup>39</sup> .....	86
<b>Tableau 8 :</b> Entrées du modèle pour le cas d'application (culture de spiruline dans un tube en polyméthacrylate de méthyle fin PMMA).....	117
<b>Tableau 9 :</b> Détails sur les conditions d'écoulement turbulent dans la conduite étudiée. ....	124
<b>Tableau 10 :</b> Les consignes imposées pour chaque scénario de récolte envisagé.....	150
<b>Tableau 11 :</b> Productivités, Nombre de cycles de récolte et de renouvellement du milieu sur une année de culture pour les différents scénarii. ....	152
<b>Tableau 12 :</b> Données de la littérature sur les performances des PBRs solaires (tubulaires et plat) issue des études expérimentales et de modélisation. ....	155
<b>Tableau 13 :</b> Résistances thermiques pour la surface du PBR et la couverture de la serre.....	166
<b>Tableau 14 :</b> Nombres adimensionnels utilisés pour le transfert de chaleur.....	168
<b>Tableau 15 :</b> Sélection des corrélations empiriques de NuL pour des configurations et géométries de surface immergées dans un flux externe correspondantes à notre études <sup>315</sup> .....	169
<b>Tableau 16 :</b> Corrélations du coefficient de transfert de chaleur convective obtenues pour une vitesse du vent de 1 à 15 (m.s <sup>-1</sup> ) et une différence de température surface-air de 10 °C pour les murs verticaux au vent et verticaux sous vent <sup>324</sup> .....	171
<b>Tableau 17 :</b> Caractéristiques des éléments considérés dans l'étude thermique à une température de 27°C <sup>315</sup> .....	199
<b>Tableau 18 :</b> Dimensions des différents cas de serres testés.....	232
<b>Tableau 19 :</b> Présentation des différents scénarii évalués par la suite.....	242
<b>Tableau 20 :</b> Les dimensions du système tubulaire simulé pour l'ACV (Scénario de référence).....	246
<b>Tableau 21 :</b> Teneur des produits chimiques pour le nettoyage.....	251
<b>Tableau 22 :</b> Caractéristiques des différents matériaux et équipements du PBR.....	251
<b>Tableau 23 :</b> Les caractéristiques des serres.....	252
<b>Tableau 24 :</b> Paramètres pour le calcul de la consommation d'énergie liée au pompage d'eau.....	253
<b>Tableau 25 :</b> Détails sur la colonne à bulle et la consommation énergétique associée à l'aération.....	254
<b>Tableau 26 :</b> Liste des flux intermédiaires entrants et sortants du procédé (système de premier plan), pour tous les scénarii étudiés.....	256



# Résumé

Les cultures de microalgues et cyanobactéries sont des processus de production prometteurs pour une large gamme de produits biosourcés d'intérêt, impliqués dans les domaines de l'énergie, pharmaceutique, cosmétique, et de la nutrition humaine et animale. Les processus de production de microalgues nécessitent de l'eau, des nutriments, de la lumière pour la croissance des cellules, et de l'énergie pour le contrôle thermique et le mélange. Quel que soit le domaine d'application, la prédiction des performances de l'ensemble de la filière de production reste un défi en raison du manque de modèles appropriés pour chaque opération unitaire impliquée. En effet, le nombre de paramètres à prendre en compte pour l'évaluation la plus réaliste de ce processus est important. Pour les mêmes raisons, l'optimisation de ces paramètres dans l'idée d'atteindre les meilleures performances est loin d'être réalisée.

L'objectif de ce travail de thèse est de développer un outil capable de simuler la production de la Spiruline fraîche dans un photobioréacteur tubulaire fonctionnant le long d'une année, en tenant compte des paramètres de conception et des facteurs environnementaux dynamiques comme la température et la lumière solaire qui fluctuent dans le temps et selon la position géographique du système. Le but final est d'évaluer les performances techniques et environnementales de l'ensemble du processus de production.

Les performances d'un tel système dépendent fortement, d'un point de vue macroscopique, d'un principal facteur qui est l'énergie solaire, par conséquent, il est nécessaire d'estimer correctement les bilans énergétiques de ce système. Dans ce contexte multiphysique, une approche locale basée sur la méthode de Monte-Carlo a été utilisée permettant de capturer l'hétérogénéité du photobioréacteur en matière de distribution spatiale de la lumière. À l'échelle de la cellule, des informations sur la quantité réelle de lumière perçue individuellement et par l'ensemble de la population ont été générées utilisant un modèle de suivi de particules tenant compte de l'hydrodynamique locale. La réponse des cellules a été décrite par un modèle dynamique de croissance biologique permettant l'estimation du taux de croissance réel relatif à l'énergie lumineuse collectée par le photobioréacteur.

L'interaction entre la biomasse et son milieu de culture a été également considérée à travers l'utilisation de modèles cinétiques, permettant de rendre compte de l'influence des substrats nutritifs sur la cinétique de croissance et donc sur les performances du système. En effet, l'évolution du milieu de culture, au regard de la consommation des nutriments et la réaction entre les composés chimiques, a été mise en évidence en se basant sur les équations stœchiométriques et chimiques des espèces présentes. Quant à la température, le deuxième facteur fondamental de la croissance, un modèle thermique a été développé pour estimer son évolution dans le PBR avec et sans l'ajout d'une serre et en fonction des paramètres statiques tels que la localisation et la géométrie, et les conditions météorologiques. À l'appui des différents bilans d'énergie et les principaux transferts de chaleur ayant lieu entre le système et son environnement, ce modèle évalue les besoins énergétiques à fournir et les éventuelles pistes de gestion thermique pour maintenir la température dans la plage de fonctionnement.

Pour une ambition finale d'évaluer la faisabilité technique, les coûts énergétiques et environnementaux, un couplage entre les résultats de ces modèles et la méthode d'analyse du cycle de vie a été réalisé. Ceci permet d'ouvrir la voie à une optimisation du procédé de production par une approche d'éco-conception.

**Mots clés** : Spiruline, Photobioréacteur Solaire, Simulations, Modèle thermique, Performances, ACV.

# Abstract

Microalgae and cyanobacteria cultures are promising production processes for a wide range of bio-based products of interest, involved in the fields of energy, pharmaceutical, cosmetic, and human and animal nutrition. Microalgae production processes require water, nutrients, light for cell growth, and energy for thermal control and mixing. Whatever the field of application, the prediction of the performance of the whole production chain remains a challenge due to the lack of appropriate models for each unit operation involved. Indeed, the number of parameters to be considered for the most realistic evaluation of this process is important. For the same reasons, the optimization of these parameters in order to reach the best performances is far from being achieved.

The objective of this thesis is to develop a tool able to simulate the production of fresh *Spirulina* in a tubular photobioreactor operating along one year, taking into account the design parameters and dynamic environmental factors such as temperature and sunlight that fluctuate in time and according to the geographical position of the system. The final goal is to evaluate the technical and environmental performance of the entire production process.

The performance of such a system depends strongly, from a macroscopic point of view, on a main factor which is the solar energy, therefore, it is necessary to estimate correctly the energy balances of this system. In this multiphysics context, a local approach based on the Monte Carlo method was used to capture the heterogeneity of the photobioreactor in terms of spatial light distribution. At the cell level, information on the actual amount of light perceived individually and by the whole population was generated using a particle tracking model considering the local hydrodynamics. The response of the cells was described by a dynamic biological growth model allowing the estimation of the real growth rate relative to the light energy collected by the photobioreactor.

The interaction between the biomass and its culture medium was also considered through the use of kinetic models, allowing to account for the influence of the nutritive substrates on the growth kinetics and thus on the performances of the system. Indeed, the evolution of the culture medium, with regard to the consumption of nutrients and the reaction between chemical compounds, was highlighted based on the stoichiometric and chemical equations of the species present. As for temperature, the second fundamental factor of growth, a thermal model was developed to estimate its evolution in the PBR with and without the addition of a greenhouse and as a function of static parameters such as location and geometry, and weather conditions. Based on the different energy balances and the main heat transfers taking place between the system and its environment, this model evaluates the energy needs to be provided and the possible thermal management paths to maintain the temperature within the operating range.

For a final ambition to evaluate the technical feasibility, the energy and environmental costs, a coupling between the results of these models and the life cycle analysis method has been realized. This opens the way to an optimization of the production process by an eco-design approach.

**keywords:** Spirulina, Solar photobioreactor, Simulations, Thermal model, Performances, LCA.



# Introduction Générale

Les microalgues et les cyanobactéries ont été utilisées pendant des siècles pour les alimentations humaines et animales dans les civilisations non occidentales. Ces microorganismes sont actuellement commercialisés sous différentes formes, notamment en tant qu'aliment ou comme complément alimentaire produits dans le cadre d'une culture contrôlée, ou récoltés directement dans l'environnement naturel <sup>1</sup>.

Compte tenu des techniques actuelles et des avancées scientifiques en matière de contrôle des cultures de microalgues et de cyanobactéries, le développement d'un procédé utilisant un photobioréacteur fermé permettrait sans aucun doute d'améliorer les productions. Bien qu'à l'échelle du laboratoire cette technique soit bien maîtrisée, le développement d'outils de simulation capables de fournir des prédictions quantitatives des performances des photobioréacteurs pourrait contribuer à améliorer leur conception et favoriser leur mise à l'échelle (i.e. semi-industrielle), tout en conservant leur caractère simple et adaptable. Ce sont ces éléments qui ont suscité un engouement croissant pour le lancement de projets de recherche sur l'étude et le développement de conceptions simplifiées de photobioréacteurs dédiés au secteur des microalgues.

Parmi les projets soutenant l'innovation dans ce secteur figure le projet INSPIRO (INnovation dans des systèmes de production modulaires clés en main pour le développement de filières de SPIRuline fraîche en Occitanie) dans lequel s'inscrit ce travail doctoral. Le dispositif visé est destiné à des petits producteurs ou à des producteurs de tailles intermédiaires. Cette thèse a débuté en collaboration avec les entreprises *Alg and You* et *Origine bleue* qui commercialisaient respectivement des dispositifs de production de microalgues alimentaires fraîches, et de la Spiruline (alias *Arthrospira platensis*). Ces dispositifs doivent être simples dans leur conception, modulables afin d'être facilement adaptables aux besoins de chaque producteur, et utiliser la lumière naturelle. Les attendus de respect de l'environnement pour la catégorie de producteurs visée, mais aussi le profil sociologique des consommateurs, imposent que les dispositifs et leur fonctionnement impactent le moins possible l'environnement.

Ce travail apporte une contribution à l'amélioration des modèles de connaissance existants qui permettent de déterminer, par le calcul, et de manière totalement prédictive, la durabilité de l'exploitation industrielle des systèmes de production solaire de microalgues. L'objectif du travail a donc été de développer une plateforme de simulation permettant d'évaluer les performances techniques et environnementales d'un système tubulaire rustique utilisant la lumière du soleil imposé, tout en tenant compte du lieu d'implantation, donc de son climat réel. Cette plateforme permet de considérer les aspects multiphysiques d'un procédé de production de biomasse exposé à des conditions solaires dynamiques, d'en calculer la production, d'en évaluer les besoins énergétiques et de nutriments, et d'en calculer les impacts environnementaux. In fine, cet outil peut être utilisé pour proposer des solutions de production adaptées aux utilisateurs.

Le [Chapitre I](#) de ce mémoire présente une analyse bibliographique globale en abordant dans un premier temps des généralités sur la filière des microalgues et des cyanobactéries, en

## Introduction Générale

particulier en production solaire. Dans un second temps, un accent particulier est posé sur les démarches de modélisation des performances des photobioréacteurs vis-à-vis de la lumière, afin de cerner le contexte scientifique et les principales orientations de ce travail. Afin d'être en mesure de rendre compte du comportement du réacteur à l'échelle macroscopique et en conditions réelles, le [Chapitre II](#) expose la méthodologie adoptée pour la prédiction de la cinétique de croissance liée aux différentes interactions entre la phase biologique et les paramètres physicochimiques de son microenvironnement (nutriments, lumière, température, oxygène, composition du milieu). Il est suivi du [Chapitre III](#) qui détaille les démarches théoriques et numériques mises en œuvre pour considérer l'effet des hétérogénéités au sein du volume induisant des fluctuations spatiales et temporelles dans les conditions réactionnelles subies par la biomasse à l'échelle cellulaire (i.e. niveaux d'irradiance). À la fin de ce chapitre, l'évaluation de la productivité en biomasse d'un cas de PBR tubulaire fonctionnant en conditions réelles solaires est exposée. Le [Chapitre IV](#) a pour objectif la présentation d'un modèle décrivant le comportement thermique de ce système en réponse aux variations des conditions météorologiques. Le photobioréacteur est soit à l'extérieur, soit installé dans une serre. Le but est d'identifier les besoins énergétiques pour un fonctionnement optimal au cours d'une année. Finalement, dans une approche intégrale d'écoconception et de développement de filières durables de microalgues, un dernier [Chapitre V](#) vient clôturer ce manuscrit. La méthodologie d'analyse de cycle de vie utilisée y est présentée, puis des scénarii sont testés pour la proposition de pistes de gestion et d'amélioration de coûts énergétiques et environnementaux. Les résultats obtenus par le modèle de croissance et le modèle thermique servent d'entrées à l'outil d'ACV, dont l'objectif est l'évaluation des performances environnementales du photobioréacteur intégré dans un procédé de production de Spiruline fraîche.

# CHAPITRE I

## *Étude bibliographique*

*“Nous sommes comme des nains assis sur des épaules de géants. Si nous voyons plus de choses et plus lointaines qu’eux, ce n’est pas à cause de la perspicacité de notre vue, ni de notre grandeur, c’est parce que nous sommes élevés par eux.”*

**Jean de Salisbury - Au livre III du ‘*Metalogicon*’ (1159)**



# I. Étude bibliographique

Ce premier chapitre fournit une analyse bibliographique qui positionne le contexte scientifique de l'étude. Ce travail se décline en deux grandes sections, dont les objectifs sont les suivants :

La première section présente un bref aperçu sur la situation des filières de microalgues et cyanobactéries existantes. Ce passage est introduit par un court historique du secteur suivi d'un préambule sur son état actuel aux échelles mondiale et européenne. Elle décrira ensuite des généralités sur la Spiruline, la microalgue d'intérêt dans ce projet doctoral, afin d'appréhender les principaux mécanismes biologiques impliqués qui gouvernent le fonctionnement du système dans sa globalité. Enfin, elle brosse un court panorama des technologies de production en conditions solaires, avec une rapide comparaison des règles d'ingénierie des différentes conceptions de photobioréacteurs, qui vient conclure cette partie.

La deuxième section se focalise essentiellement sur les aspects de modélisation et simulation multi-échelles permettant de fournir des prédictions qualitatives et quantitatives des performances des photobioréacteurs. L'accent est mis particulièrement sur le couplage entre les sous-modèles décrivant l'hydrodynamique, le transfert radiatif, ainsi que la réponse biologique des microalgues. Cette dernière partie permet de dégager les principaux éléments de compréhension sur lesquels repose la démarche scientifique de cette étude. La liste des études présentées dans cette section n'est pas exhaustive, cependant, elle sert à apporter au lecteur une vision globale de l'avancement de la recherche concernant les moyens de prédiction mis en œuvre pour étudier la robustesse d'un système de production microalgues, plus ou moins rustique, dont l'utilisation industrielle augmente dans de nombreuses applications.

## 1. État de l'art de la filière des microalgues et cyanobactéries

### 1.1. Une brève histoire de la culture d'algue à grande échelle

Depuis de siècles, L'Homme a appris à utiliser les procédés microbiologiques pour la préparation des certains aliments et boissons, ainsi que pour la prévention de la propagation des maladies, mais ce n'est qu'au cours du dernier siècle qu'il a développé un intérêt technique croissant à se servir des micro-organismes à son profit et à grande échelle.

Par rapport aux milliers d'années de culture des plantes, la culture des microalgues en tant que source alimentaire possible, n'a fait l'objet de nombreuses recherches en laboratoire qu'il y a environ 150 ans. Au cours des 70 dernières années, des progrès notables ont également été réalisés pour tenter d'améliorer la vie humaine en passant à la culture à grande échelle.

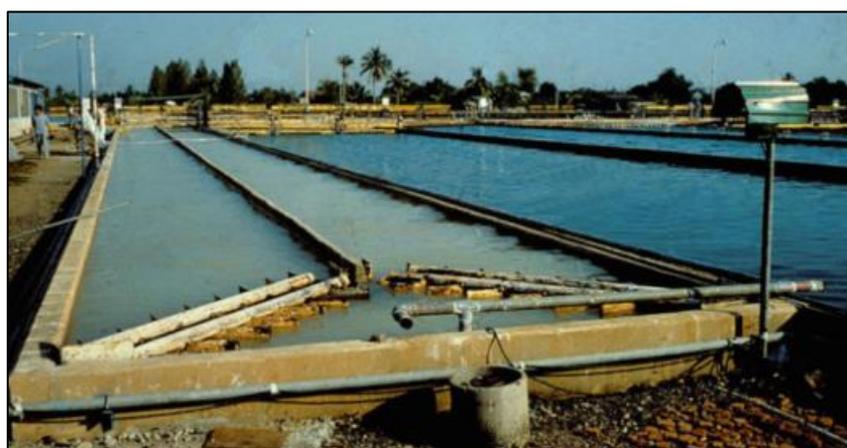
L'intérêt suscité par l'application commerciale des microalgues remonte aux années 1940 et la première monographie rendant compte d'une grande partie des travaux de développement de la production de microalgues à grande échelle est réalisée par *Burlew*<sup>2</sup> à travers son livre intitulé "*Algae Culture. From Laboratory to Pilot Plant*". Cet ouvrage clé retrace la quasi-totalité des premières tentatives de culture en plein air effectuées jusqu'à 1953. En 1948, la Carnegie Institution of Washington a financé des chercheurs de Stanford, en Californie pour lancer les premiers travaux sur la culture à plus grande échelle et sur les exigences techniques pour les systèmes de production d'algues. Ces recherches ont été réalisées sur la souche de *Chlorella* et ont été poursuivies par la construction de la première usine pilote de production extérieure d'algue **Figure 1** à Cambridge, Massachusetts, aux États-Unis<sup>2,3</sup>.



**Figure 1** : Photographie de la première usine pilote de production de *Chlorella* à grande échelle à Cambridge, Massachusetts, aux États-Unis en 1951<sup>2</sup>.

Depuis lors, l'intérêt a pour le développement des cultures des microalgues à l'échelle commerciale s'est rapidement accru dans le monde. Des recherches ont été donc menées pour comprendre les facteurs limitants de la production extérieure et pour étudier la possibilité d'appliquer les algues dans des domaines autres que l'alimentation ; tels que l'énergie, le traitement d'eau, la pharmaceutique ou la nutraceutique <sup>4,5</sup>.

L'industrie de production de microalgues n'a pas cessé de démontrer son grand succès. La production à l'échelle commerciale de microalgues pour les bioproduits a commencé au Japon et à Taiwan dans les années 1960 avec la production de l'algue unicellulaire verte d'eau douce, *Chlorella*, en tant qu'additif alimentaire. Cela a été suivi directement par la production de la cyanobactérie filamenteuse *Spirulina* **Figure 2** <sup>6,7</sup>. Dans les années 1970s, la culture commerciale de l'algue *Dunaliella salina*, en tant que source de caroténoïde de haute valeur, le  $\beta$ -carotène, a commencé en Australie, en Israël et aux États-Unis <sup>8</sup>. La microalgue suivante commercialisée fut *Haematococcus pluvialis*, dans les années 1980, à Hawaï, aux États-Unis, en tant que source d'astaxanthine utilisé comme antioxydant puissant, classé comme colorant alimentaire, et de caroténoïde <sup>9,10</sup>, suivie de plusieurs espèces pour l'aquaculture <sup>11</sup>. Le choc de la crise énergétique et financière de 2007-2008 a relancé l'intérêt pour des carburants issus de la biomasse et donc pour les microalgues. Des centaines de start-up ont été alors créées dans le monde pour explorer ce marché.



**Figure 2 :** Un des premiers bassins commerciaux de production de la *Spiruline* près de Bangkok, en Thaïlande <sup>8</sup>.

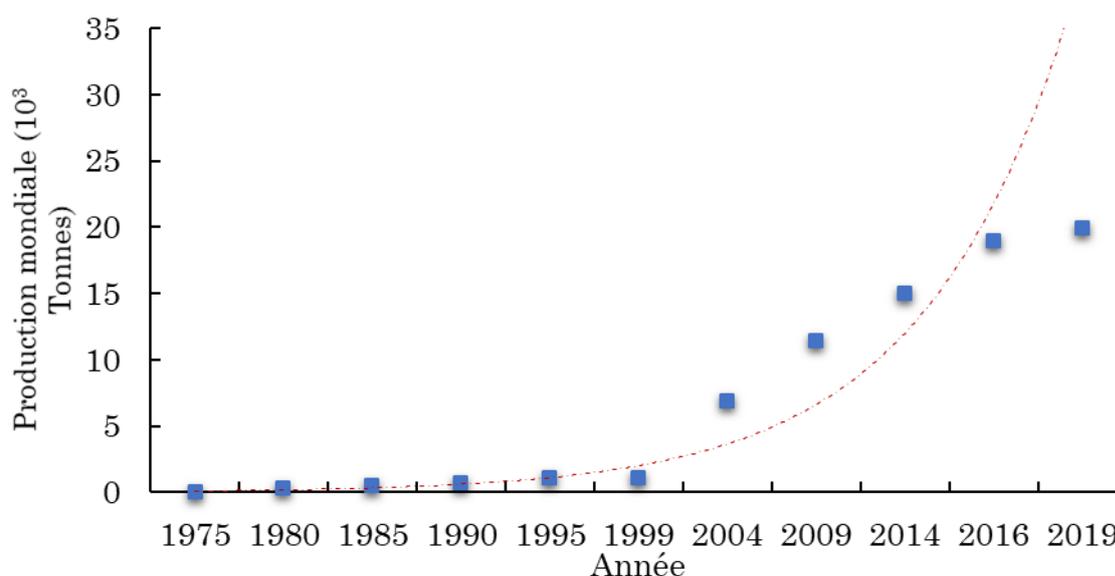
En ce qui concerne la *Spiruline* (répertoriée sous le nom d'*Arthrospira platensis*), les Aztèques la connaissaient et l'utilisaient vers l'an 1300. Les Kanembus du Tchad en consomment pour la nourriture quotidienne depuis la nuit des temps, elle est connue dans la langue locale sous le nom de *dihé*, mais la première étude systématique et détaillée des exigences de croissance et de la physiologie de la *Spiruline* a été réalisée par Zarrouk <sup>12</sup>, dans son projet de doctorat, à peu près au même moment où *Jean Leonard* l'a découverte en Afrique au milieu des années 1960. C'est cette étude qui a servi de base pour la création de la première filière commerciale. Cette dernière a été établie en 1973 au Mexique par le Sosa Texcoco, producteur mexicain de carbonate et bicarbonate de soude. Les aspects techniques mis au point pour la construction de la filière ont été copiés et développés ailleurs, notamment aux USA, en Thaïlande et en Chine à partir des années 90 <sup>6,13-15</sup>. *Soeder* <sup>16</sup> et *Borowitzka* <sup>17</sup> ont détaillé l'histoire de la

biotechnologie des microalgues et cyanobactéries et le développement de leur production à l'échelle commerciale. Le lecteur peut également se référer à un certain nombre de résumés exhaustifs des divers aspects de leur utilisation <sup>18–20</sup>.

## 1.2. État des lieux de la production commerciale mondiale et Européenne

Encore peu exploitées, les microalgues, constituent un réel potentiel pour la recherche et l'industrie. En effet, elles peuvent être utilisées et valorisées à part entière comme une biomasse pour l'alimentation animale et humaine, ou comme source de biomolécules d'intérêt pour la chimie, la cosmétique et l'énergie (biocarburants de troisième génération) via des chaînes de procédés d'extraction et de transformation <sup>21</sup>.

Bien que les activités de recherche sur les nutriments à base de microalgues soient très prometteuses, seule une faible fraction des espèces naturelles est exploitée commercialement. Pour répondre à la question « quelle est la situation de la production commerciale mondiale des microalgues ? », la **Figure 3** Montre une courbe présentant la croissance de cette production depuis l'apparition de la première usine commerciale. Nous constatons que, entre les années 1975 et 2000, cette croissance est d'allure exponentielle passant de 35 à environ 2 000 tonnes/an. À partir de 2004, la production s'est encore accélérée pour atteindre 15 000 tonnes en fin 2014. Bien qu'elle ait connu, entre 2016 et 2019, un ralentissement dû aux coûts de production élevés, au faible niveau de maturité industrielle de certaines espèces, en plus de l'introduction de nouvelles réglementations sur la commercialisation de nouvelles denrées alimentaires en Europe (dont celles issues des microalgues) <sup>22</sup>, la production mondiale franchirait aujourd'hui la barre de 20 000 tonne/an. Cependant, cette valeur reste très faible en comparaison avec la production d'autres plantes terrestres, ou des macroalgues qui dépasse 20 Millions tonne/an dans le monde <sup>23</sup>.



**Figure 3 :** Évolution de la production mondiale de microalgues entre 1975 et 2019. Marques carrées : données de production mondiale extraites de la littérature <sup>11,24</sup>. Ligne discontinue : courbe de tendance exponentielle.

Les microalgues sont divisées en 4 groupes : cyanobactéries (algues bleue-vertes), rhodophytes (algues rouges), chlorophytes (algues vertes) et chromophytes (pour le reste). Chaque groupe contient des centaines d'espèces <sup>25</sup>, cependant, seulement quelques-unes ont été utilisées extensivement. Selon *Person* <sup>26</sup>, l'ordre décroissant des espèces les plus cultivées dans le monde est le suivant : la cyanobactérie *Arthrospira* et la microalgue verte *Chlorella* constituent les catégories les plus importantes (à savoir que la *Spiruline* représentait 50% de la production mondiale), suivie par *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis* et la diatomée *Odontella*. Environ 50% de la production mondiale se concentre en Asie et au États-Unis. Toutefois, d'autres pays producteurs contribuent également à ces chiffres comme le Chili, l'Argentine, Israël et l'Australie. Depuis lors, des études plus récentes ont signalé que ces espèces restent essentiellement dominantes dans le marché mondial avec un classement plus ou moins varié <sup>27,28</sup>.

De nos jours, rien qu'en Europe, ce secteur compterait plus de 300 entreprises avec 23 pays abritant des producteurs des microalgues et de cyanobactérie, où on trouve l'Allemagne, la France et l'Espagne qui couvrent le plus grand nombre de ces entreprises. En ce qui concerne la Spiruline, sa production se situe principalement sur les sites intérieurs, la France domine les statistiques avec 65% d'unités de production en Europe <sup>23</sup>. Le **Tableau 1** résume la situation actuelle des microalgues les plus prometteuses à l'échelle mondiale et européenne et leurs principales applications.

En général, la production des microalgues est axée sur les produits à haute valeur ajoutée. Selon les spécialistes, les marchés porteurs sont ceux de la santé, des compléments alimentaires, des cosmétiques et de l'alimentation animale au moins à court et moyen termes. Par contre, elles ne sont pas bon marché à produire. Leurs valeurs marchandes sont très variables et dépendent du système de production, de la géolocalisation de l'usine, des procédés de transformation et d'extraction de produits d'intérêt et des coûts de production (énergie, infrastructure et main d'œuvre). Les coûts les plus faibles pour les producteurs commerciaux sont aux environs de 5 US\$. kg<sup>-1</sup> de biomasse algale sèche, pour *D.Salina* en Australie et 5 €.kg<sup>-1</sup> pour la Spiruline basique <sup>29</sup>. Par contre, pour certaines espèces, ils peuvent être largement plus élevés comme pour *H.pluvialis* > 30 US\$.kg<sup>-1</sup> et pour *Scenedesmus almeriensis* 69 €.kg<sup>-1</sup> <sup>30</sup> en photobioréacteurs tubulaires.

Bien que la production industrielle mondiale des microalgues soit actuellement en croissance à grande vitesse en raison de leur haute efficacité photosynthétique, les problématiques de coûts de production, liées principalement à leurs besoins énergétiques importants, limitent la valorisation et l'accès des microalgues en tant que matière première compétitive dans les grands marchés mondiaux. Il est donc primordial d'améliorer les procédés actuels de production pour doper l'activité économique de ce secteur. L'un des points clés est l'évaluation énergétique et environnementale. Pour ce faire, il faut tout d'abord commencer par une bonne appréhension des verrous technologiques et pratiques qui entravent la production à grande échelle, ensuite envisager des solutions pour la réduction des coûts de production et de transformation éventuellement, et enfin élargir le spectre de leur application.

**Tableau 1:** Panorama mondial et européen de la production actuelle de microalgues : Unités de de production et quantités, Localisations, Applications et Valeur du marché

Espèces	Nombre d'entreprises/ quantités	Localisation	Applications	Valeur marchande	Références
<i>Spirulina sp.</i>	222 usines (en Europe) 142 tonnes/an de poids sec (en Europe)  18 000 tonnes/ an (dans le monde)	<u>Europe</u> : France, Italie, Allemagne, Espagne, Grèce <u>Monde</u> : Chine, Inde, États-Unis, Myanmar, Japon	Nutrition humaine (aliments et compléments alimentaires), Nutrition animale Cosmétiques, Marqueurs fluorescents, Production d'antioxydants et de Phycocyanine Phycobiliproteins	280 (€.kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup> 30 - 70 (€.kg <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>  11000 (€.kg <sup>-1</sup> )	<a href="#">23</a> <a href="#">27</a>  <a href="#">31</a> <a href="#">32</a>
<i>Chlorella sp.</i>	30 usines (en Europe) 82 tonnes/an de poids sec (en Europe)  9500 tonnes/an (dans le monde)	<u>Europe</u> : Allemagne, Italie, Pays-Bas, France et dans 8 autres pays. <u>Monde</u> : Japon, Taiwan	Alimentation humaine et animale  Nutraceutiques Cosmétiques Aquaculture	150(€.kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup> 25 - 50 (€.kg <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>  50 (€.L <sup>-1</sup> )	<a href="#">23</a>  <a href="#">31</a> <a href="#">33</a>
<i>Dunaliella sp.</i>	8 usines (en Europe) 4 tonnes/an de poids sec (en Europe)  1700 tonnes/ an (dans le monde)	<u>Europe</u> : Pays-Bas, France, Italie, Espagne, Allemagne	Nutrition humaine Cosmétiques   Production d'antioxydant B-carotène		<a href="#">23</a> <a href="#">27</a>  <a href="#">34</a>

Chapitre I.

		<u>Monde</u> : Australie, Israël, États-Unis, Japon			
<i>Nannochloropsis</i> sp.	25 usines (en Europe) 21 tonnes/an de poids sec (en Europe)	<u>Europe</u> : Espagne, France, Italie, Pays-Bas	Alimentation animale Production de Phycocyanine marin Additifs alimentaires Aquaculture Production d'astaxanthine	30 - 110 (€ kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup> 1000 (€ kg <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	23
<i>Haematococcus pluvialis</i>	17 usines (en Europe) 66 tonnes/an de poids sec (en Europe)  280-350 tonnes/an de poids sec (dans le monde)	<u>Europe</u> : Espagne, Portugal, Italie, France, Tchéquie  <u>Monde</u> : Israël, USA, Inde	Aquaculture Production d'astaxanthine	150 et 300 (€ le kg <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup> 6 000 et 8 000 (€ le kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	23  31

<sup>a</sup> Prix B2B (*business to business*)

<sup>b</sup> Prix B2C (*business to consumer*)

### 1.3. La Spiruline, un produit nutritionnel

Outre le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse consistant à valoriser l'intérêt nutritionnel et environnemental de la microalgue cultivée, la Spiruline a été choisie dans ces travaux comme le microorganisme modèle, du fait de la disponibilité de nombreuses données expérimentales et de modélisations à son égard dans la littérature.

Cette section est donc consacrée à la présentation succincte de ses caractéristiques biologiques sans détailler ses mécanismes métaboliques internes.

#### 1.3.1. Taxonomie (confuse)

En 1829, *J. Turpin* a isolé la Spiruline d'un échantillon d'eau douce et l'a nommée *Spirulina jenneri f. platensis*. Mais en 1852, le premier rapport taxonomique rédigé par *Stizenberger* est paru. Il a donné à ce nouveau genre le nom d'*Arthrospira* basé sur la présence de « speta » : la forme hélicoïdale et la structure multicellulaire. *Gomont* a confirmé les études de *Stizenberger* en 1892. Cet auteur a attribué la forme aseptate (septa invisible) au genre *Spirulina* *Turpin* et la forme septale au genre *Arthrospira* <sup>15,35</sup>.

*Geitler* en 1932, a unifié sous la désignation de *Spirulina* les organismes oscillateurs ayant la propriété de trichomes hélicoïdaux sur toute la longueur des filaments multicellulaires, sans tenir compte de la présence de septum <sup>15</sup>. Ce qui a fait l'objet d'une confusion dans les publications scientifiques, où les microalgues en discussion appartiennent au genre *Arthrospira*, mais elles porteront probablement le nom de Spiruline dans quelque temps. Cependant, la vraie Spiruline n'est pas affiliée au genre *Arthrospira*, et n'est probablement pas consommable (et parfois toxique) <sup>36</sup> (voir **Tableau 2**).

En 1989, ces microorganismes ont été classés séparément en deux genres, *Spirulina* et *Arthrospira* ; cette classification est actuellement acceptée <sup>15</sup>.

Suite à la distinction entre procaryotes et eucaryotes par la présence ou l'absence d'un noyau, les procaryotes en étant dépourvues, les algues bleues-vertes ont été incorporées au royaume des procaryotes, et font partie des Cyanobactéries. La Spiruline a été classée dans le sous-groupe 3 (Oscillatoriales). Cette désignation a été acceptée et publiée dans le *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* <sup>15</sup>.

Des revues présentant exhaustivement la taxonomie de la Spiruline peuvent être trouvées dans la littérature notamment celle réalisée par *Tomaselli* <sup>37</sup>.

**Tableau 2** : Caractéristiques morphologiques des souches *Spirulina* et *Arthrospira* <sup>13</sup>.

	<i>Arthrospira</i>	<i>Spirulina</i>
<b>Trichomes</b>	En hélice ouverte	En hélice presque fermée
<b>Paroi cellulaire</b>	Visible si les vacuoles à gaz ne sont pas trop nombreuses	Difficilement visible
<b>Taille de cellule</b>	Cellules de 6 à 12 µm de large, Constrictions entre les cellules adjacentes.	Cellules de 2 à 4 µm de large, de forme non fixe et avec peu ou pas de constrictions entre les cellules adjacentes.
<b>Mobilité</b>	Par rotation	Par rotation permanente
<b>Reproduction</b>	Par scission simple ou multiple, par bourgeonnement ou encore par fragmentation au hasard	Par rupture transcellulaire du trichome.
<b>Image au microscope</b>	<i>Platensis</i> 	<i>subsala</i> 

Il convient de rappeler que le nom commercial couramment utilisé pour les deux souches les plus cultivées d'*Arthrospira*, *A. platensis* et *A. maxima*, est "*Spirulina*". Désormais, il est incertain que les sociétés commerciales changent cette appellation puisqu'elles ont consacré beaucoup de temps à commercialiser leurs produits sous le nom de "Spiruline". Cependant, dans le monde de la bactériologie la désignation actuelle d'*Arthrospira* est reconnue par les taxonomistes, producteurs et les organismes de réglementation.

### 1.3.2. Morphologie

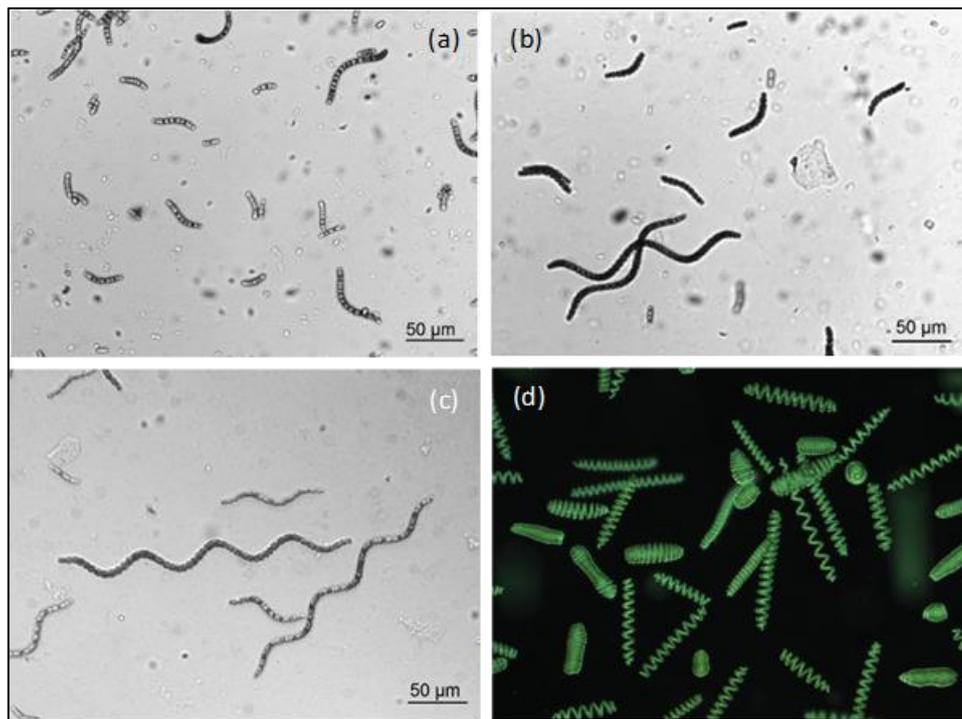
La Spiruline se développe et grandit dans l'eau et peut être récoltée et traitée facilement. Elle a acquis une popularité considérable dans le secteur de la santé, l'industrie alimentaire et les aquacultures. C'est une cyanobactérie, ou algue bleue verte procaryote<sup>1</sup>, planctonique multicellulaire et filamenteuse qui forme des populations massives dans les masses d'eaux tropicales et subtropicales caractérisées par des niveaux élevés de salinité et un pH élevé <sup>6,14</sup>. On en dénombre plus d'une quinzaine d'espèces différentes (ou morphologies), mais elle est généralement connue sous deux espèces traditionnelles *Spirulina maxima* et *Spirulina platensis* qui sont actuellement incluses dans le genre *Arthrospira* regroupant (*A.*

<sup>1</sup> Procaryotes : cellules fondamentales, sans noyau formant un taxon paraphylétique chez les bactéries dans lequel on trouve les algues bleu vertes.

*platensis* et *A. maxima*)<sup>38</sup>, la dernière est caractérisée par sa forme plus ou moins allongée comparé à celle de *A. platensis* qui est plus ondulée<sup>15</sup>.

La Spiruline est une algue photosynthétique microscopique avec un cycle de vie simple. Elle est reconnue par une caractéristique morphologique principale : ses trichomes (ou brins) hélicoïdaux non ramifiés lui donnent la tendance d'un mini-ressort, d'où son appellation. Ses filaments mobiles ont une longueur moyenne d'environ 250  $\mu\text{m}$  et un diamètre de 6 à 12  $\mu\text{m}$  (jusqu'à 16  $\mu\text{m}$ ). Ils sont généralement enroulés en spirale, généralement en 6 ou 7 spires. Les cellules cylindriques sont plus larges que longues et contiennent une quantité abondante de vésicules de gaz ce qui leur permet d'adapter leur flottabilité pour faciliter leur accès aux nutriments et à la lumière<sup>15</sup>.

Elle est composée de cellules végétatives mixotrophes<sup>2</sup>, qui se reproduisent de façon asexuée, par la fragmentation d'un trichome mature en un certain nombre de segments plus courts. Ces derniers, qui sont composés de quelques cellules, s'empilent bout à bout ensuite par fission binaire dans un plan unique perpendiculaire au grand axe du filament<sup>14</sup>. La **Figure 4** présente des images typiques de la Spiruline en pleine reproduction, et une image d'un échantillon provenant d'un étang extérieur.



**Figure 4** : Images de la Spiruline en croissance cultivée sous microscopes en laboratoire (a), (b) et (c) de 4, 6 et 10 jours de culture respectivement<sup>39</sup>. (d) Image de la Spiruline cultivée en extérieur avec une morphologie différente<sup>35</sup>.

Les facteurs environnementaux, principalement la température et l'intensité lumineuse, ainsi que les conditions d'agitation et les cisaillements hydrodynamiques peuvent affecter

<sup>2</sup> Mixotrophe : cellule qui se développe en présence de lumière et de carbone organique, les métabolismes autotrophe et hétérotrophe peuvent donc être sollicités simultanément.

directement la géométrie et la taille de l'hélice ce qui lui permet de se présenter sous des formes variantes spiralées, classiques ondulées comme le type *lonar* et parfois plus allongées comme la souche *paracas*. On trouve également une autre structure plutôt droite se différenciant selon l'espèce <sup>39</sup>.

### 1.3.3. Composition interne et potentialité nutritionnelle

Les aspects les plus importants de la qualité des produits alimentaires sont le niveau nutritionnel de leurs composants et phyto-nutriments.

Consommée depuis des décennies, la Spiruline est reconnue comme un super aliment puissant et secret en raison de sa valeur nutritive élevée et de ses bienfaits pour la santé. Sa richesse considérable en nutriments, démontrée par l'étude de sa composition, lui a apporté cette qualité unique. En effet, la Spiruline contient en poids sec, en moyenne, de 55 à 70% de protéines, 15 à 25% de glucides, jusqu'à 11% de lipides ainsi que des vitamines, des minéraux (principalement des oligoéléments), de la chlorophylle et des phycobiliprotéines <sup>40</sup>. Cependant, cette composition biochimique peut être facilement affectée par la variation des conditions de culture.

Sa composition basique peut être résumée dans les points suivants :

- **Protéine** : qualitativement, elle fournit des protéines complètes, contenant tous les acides aminés essentiels, mais avec des quantités réduites de méthionine, de cystine et de lysine, par rapport aux protéines standard telles que celles de viande, d'œufs ou de lait ; elle est toutefois supérieure à toutes les protéines végétales classiques, telles que celles des légumineuses <sup>41</sup>.
- **Vitamines** : les vitamines B<sub>1</sub> (thiamine), B<sub>2</sub> (riboflavine), B<sub>3</sub> (nicotinamide), B<sub>6</sub> (pyridoxine), B<sub>9</sub> (acide folique), B<sub>12</sub> (cyanocobalamine), la vitamine C, la vitamine D et une excellente source de la vitamine E, comparables à celles trouvées dans un gramme de blé. Le  $\beta$ -carotène est présent avec une teneur exceptionnellement élevée ; environ 30 fois plus élevée que celle trouvée dans une carotte. Les principales vitamines antioxydantes contenues dans la spiruline sont le  $\beta$ -carotène, les caroténoïdes et la vitamine E <sup>42,43</sup>.
- **Minéraux** : Les oligoéléments ou éléments traces présents dans la spiruline sont le fer, le zinc, le cuivre, le sélénium, l'iode, le fluor, le chrome, le calcium et le magnésium <sup>44</sup>. La spiruline est une excellente source de fer qui contient 20 fois plus de fer qu'un gramme de blé <sup>45</sup>.
- **Pigments photosynthétiques** : de nombreux pigments sont présents, notamment la chlorophylle A, la xanthophylle, le  $\beta$ -carotène, l'échinène, le myxoxanthophylle, la zéaxanthine, la canthaxanthine, la diatoxanthine, la 3-hydroxyéchinénone, la  $\beta$ -cryptoxanthine, plus les phycobiliprotéines et la phycocyanine <sup>45</sup>.

La **Figure 5** présente la composition moyenne et les valeurs nutritionnelles de 100 g de Spiruline fournies par le centre d'étude et de valorisation des algues. D'après les données de cette fiche, la Spiruline semble un complément alimentaire complet pour lutter contre les carences nutritionnelles. Elle est facile à consommer et sans danger pour l'humain et l'animal.

De nos jours, elle attire une énorme attention de la part des instituts de recherche ainsi que des industries en tant que source nutraceutiques et de produits pharmaceutiques, comme en témoigne sa longue histoire.



## *Arthrospira sp. (spiruline)*

### Fiche Nutritionnelle

Teneurs pour 100 g d'algue déshydratée (produit brut) Version 2021

Paramètres	Unité	Teneur Moyenne	Min	Max	Nb données
Energie	kJ	1 542			
Energie	kcal	369			
Eau	g	5,4	0,0	11,0	30
Minéraux	g	10,2	4,4	47,1	28
Protéines (Nx6.25)	g	60,4	38,4	79,7	60
Glucides (par différence)	g	17,7			
Sucres	g	1,2	1,2	1,2	1
Fibres Alimentaires	g	2,7	0,1	7,4	8
Lipides	g	6,3	1,9	13,5	49
AG saturés	g	3,47	1,84	5,10	2
AG monoinsaturés	g	0,79	0,25	1,32	2
AG polyinsaturés	g	2,38	1,83	2,93	2
Phycocyanine	g	15,9	7,6	27,4	11
Chlorures	mg	291	19	416	5
Sodium	mg	755	28	2 081	13
Magnésium	mg	615	246	2 081	16
Phosphore	mg	1 103	634	3 690	17
Potassium	mg	1 561	937	2 460	13
Calcium	mg	469	61	1 859	19
Manganèse	mg	3,9	1,1	10,9	14
Fer	mg	80,6	17,0	170,3	19
Cuivre	mg	0,9	0,1	2,7	10
Zinc	mg	4,3	0,2	31,2	15
Iode	mg	0,0	0,0	0,1	6
Sélénium	µg	34,8	24,1	52,0	3
Chrome	µg	283,8	60,0	580,0	7
Molybdène	µg	28,4	30,0	30,0	2
Vitamine A (eq rétinol)	mg	34,7	2,8	79,5	3
Beta-carotène	mg	155,1	21,8	264,9	8
Vitamine D	µg	nd			
Vitamine E (eq tocophérols)	mg	11,2	3,8	18,0	4
Vitamine K ou phytoménadione	µg	1 268	1 031	1 504	2
Vitamine C	mg	57,2	7,6	184,8	7
Vitamine B1 ou Thiamine	mg	4,2	0,4	14,6	12
Vitamine B2 ou Riboflavine	mg	2,6	0,2	4,4	11
Vitamine B3 ou PP ou Niacine	mg	9,1	0,4	22,2	11
Vitamine B5 ou acide panthothénique	mg	0,90	0,44	1,23	3
Vitamine B6 ou Pyridoxine	mg	0,7	0,1	3,8	13
Vitamine B8 ou H ou Biotine	µg	19,1	4,4	37,8	4
Vitamine B9 ou Folates	µg	279,2	37,8	832,5	10
Vitamine B12 ou Cobalamines	µg	48,7	5,9	179,8	5

Elaboré par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues), Fleubian, France - [www.ceva.fr](http://www.ceva.fr)

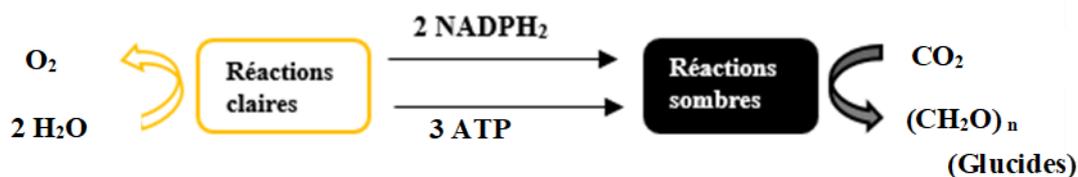
**Figure 5 :** Analyse nutritionnelle moyenne de 100g de Spiruline <sup>46</sup>.

### 1.3.4. Ses voies métaboliques

Dans ce paragraphe, nous présentons brièvement les mécanismes métaboliques importants, sans articuler les réactions biochimiques impliquées qui ne sont pas l'objet de notre étude.

#### A) La photosynthèse

La réaction de photosynthèse peut être considérée comme une réaction autocatalytique, car les microorganismes eux-mêmes produisent de la biomasse. En effet, en présence de la lumière, la Spiruline, en tant que microorganisme photosynthétique, croît via un processus métabolique par lequel tous les organismes photoautotrophes, à savoir les microalgues, les cyanobactéries (*Synechococcus sp.*, *Anabaena sp.*, etc..) et les plantes convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique sous forme de glucides. Ce mécanisme peut être exprimé sous forme d'une suite de réactions d'oxydoréduction (photophosphorylation) <sup>47</sup> entraînées par l'énergie de la lumière (i.e. les photons). Selon Masojidek *et al.*, <sup>48</sup> ce processus est traditionnellement divisé en deux étapes, les réactions dites **claires** et les réactions **sombres** *Figure 6* qui sont indépendantes chimiquement et physiquement, mais liées par le biais des enzymes.



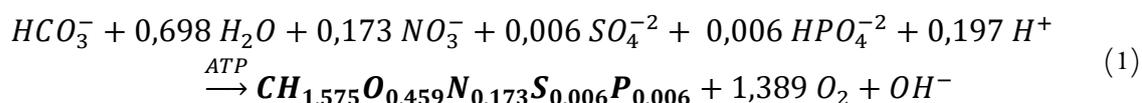
*Figure 6 : Principaux produits des réactions de photosynthèse* <sup>48</sup>.

- **Les réactions claires ou photochimiques** comprennent l'absorption des photons et le transport des électrons et des protons entraînant la production de NADPH<sub>2</sub>, de l'ATP et de l'O<sub>2</sub>. Elles se déroulent au niveau des membranes thylakoïdes. Dans ces membranes se trouvent deux photosystèmes : PS I et PS II<sup>3</sup> qui utilisent l'énergie lumineuse pour transporter les électrons de l'eau au NADP<sup>+</sup> avec un dégagement concomitant d'oxygène. Le fonctionnement des deux photosystèmes est en série car ils sont reliés par une chaîne de porteurs d'électrons habituellement représenté dans un schéma dit « Z » <sup>48</sup>.
- **Les réactions sombres « cycle de Calvin-Benson »** : l'ATP et le NADPH<sub>2</sub> générés au cours de processus précédent dirigé par la lumière sont ensuite utilisés pour la conversion enzymatique du CO<sub>2</sub> atmosphérique en glucide. Le mécanisme de la réaction de fixation du carbone a été élaboré par Calvin et Benson dans les années 1940 <sup>15</sup>.

Dès lors, la formule moléculaire de la Spiruline issue de la réaction globale réalisée lors de la photosynthèse a été rapportée par Cornet <sup>49</sup> comme étant une équation stœchiométrique

<sup>3</sup> PS (photosystème) : un complexe enzymatique impliqué dans les réactions photosynthétiques

unique pour sa croissance avec des rendements de conversion fixes pour les substrats et les produits :



Dans cette équation, ce sont uniquement les formes ioniques des sels consommés qui sont pris en compte en plus des équilibres acidobasiques. Bien que l'on ait vu que le cycle de Calvin utilise la molécule de dioxyde de carbone pour les réactions biochimiques, la Spiruline est capable d'utiliser également le carbone inorganique sous forme de bicarbonate (la forme de carbone inorganique prépondérante dans les solutions à des pH élevé) suite à la présence d'un organite nommé carboxysome<sup>4</sup>.

Le même auteur <sup>49</sup> a signalé que cette formule est valable même à de faibles énergies lumineuses (voire en absence de la lumière pour des périodes relativement courtes), car les mécanismes respiratoires sont inhibés par la lumière pour ce type de cyanobactérie. Les coefficients stœchiométriques de l'Eq (1) sont calculés à partir des bilans de conservation des éléments nutritifs à savoir C, H, N, S, O et P. Or, ces proportions stœchiométriques peuvent varier selon les conditions de culture utilisées.

## B) La respiration

En absence totale de la lumière, la Spiruline opte pour un deuxième métabolisme ; il s'agit de la respiration, dans lequel le glycogène sulfaté et le polyhydroxybutyrate <sup>49</sup> (i.e. réserves essentielles de carbone intracellulaire de cette espèce) sont consommés pour la maintenance et le maintien des cellules. En général, ce processus est considéré comme l'inverse de la carboxylation, indépendant de la lumière durant lequel la cellule consomme l'oxygène pour produire de l'eau et le CO<sub>2</sub>. Chez les cellules photosynthétiques, cette activité se produit essentiellement au niveau de la mitochondrie, constituant la source principale de l'ATP pour le fonctionnement de la photosynthèse dans les chloroplastes <sup>50</sup>. Cependant, pour cette cyanobactérie, ce processus s'effectue au sein des thylakoïdes et de la membrane plasmique, utilisant la même chaîne de transport d'électrons que la photosynthèse. Ainsi, les deux mécanismes métaboliques (i.e. photosynthèse et respiration) ne peuvent pas fonctionner simultanément donnant lieu à ce qu'on appelle « respiration à la lumière<sup>5</sup> » comme c'est le cas de plusieurs microalgues eucaryote <sup>50</sup>. En effet, lorsque l'irradiation augmente la respiration est totalement inhibée et la photosynthèse prend le pas sur elle.

Il en est de même pour la photorespiration, qui est une activité concurrentielle à la photophosphorylation en lumière. Bien qu'elle existe chez les cyanobactéries et soit importante pour la croissance dans l'atmosphère riche en O<sub>2</sub>, elle est inhibée en raison de la

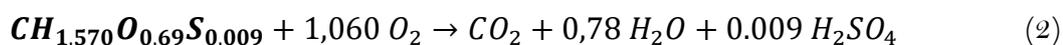
---

<sup>4</sup> Carboxysome : organite cellulaire qui permet de transporter et stocker le carbone sous forme de bicarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

<sup>5</sup> Respiration à la lumière : une voie métabolique chez certaines cellules photosynthétiques ayant le même principe que la respiration en obscurité et qui se produit dans la mitochondrie en parallèle de la photosynthèse en consommant 25% de l'énergie chimique issue de cette dernière (chez les plantes supérieures) <sup>51</sup>.

capacité interne de la Spiruline à concentrer le CO<sub>2</sub>. Ce mécanisme intracellulaire de concentration du carbone (particulièrement en cas de limitation de carbone inorganique) a été démontré chez *Arthrospira* par *Giordano* <sup>52</sup>. Cette voie métabolique utilise la même enzyme que celle impliquée dans la carboxylase et la fixation de CO<sub>2</sub> dans le cycle de Calvin, pour déclencher une activité d'oxygénase compétitive. L'implication de cette enzyme dans ces deux voies métaboliques est régie par le ratio O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> au sein de la cellule. Ainsi, en raison de la présence des carboxysomes chez la Spiruline, qui permettent de garder ce ratio faible (i.e. forte concentration de carbone) et donc favorisent la carboxylation, la photorespiration n'a pas lieu. Cela a été considéré comme la justification de l'absence ou l'inactivité de ce processus chez les cyanobactéries dans la littérature <sup>53,54</sup> malgré son impact sur le rendement de la photosynthèse. Il est néanmoins intéressant d'étudier l'existence et l'étendue de la photorespiration chez la Spiruline, en particulier pour la production de biomasse en extérieur où les conditions de limitation peuvent être propices pour enclencher une modification éventuelle de son métabolisme.

Dans le cadre cette étude, nous nous intéressons uniquement à l'aspect stœchiométrique de la respiration obscure comme métabolisme principal qui a lieu la nuit, et son implication dans la consommation de la biomasse (ou des ressources de carbone internes plus précisément). En effet, tout comme la photosynthèse, *Cornet* <sup>49</sup> a proposé une équation stœchiométrique pour la respiration dans l'obscurité, basée sur l'oxydation de ses réserves et qui n'est pas couplée à la synthèse de la biomasse :



Il est possible de calculer les quatre coefficients stœchiométriques à partir des quatre bilans de masse sur C, H, O et S.

Les coefficients stœchiométriques des équations (1) et (2) sont utilisés dans notre étude pour la détermination des rendements théoriques de conversion des substrats nécessaires à la synthèse, et, aux oxydations de la biomasse et de ses réserves carbonées, respectivement.

### C) Effet du couplage de la température et de la lumière

La combinaison de stress environnementaux la plus courante est celle de la température et de la lumière. En l'occurrence, une forte luminosité associée à une faible température affecte la photosynthèse et la croissance des microalgues dans les systèmes en plein air, entraînant une condition de stress unique dans laquelle la photo-inhibition peut effectivement être induite. Ce phénomène a même été remarqué à de faibles intensités lumineuses, notamment pendant les périodes matinales, quand la température est sous-optimale <sup>55</sup>.

Dans les cultures solaires en PBR tubulaires, *Torzillo* <sup>56</sup>, ont rapporté qu'au cours de 5 mois d'expérience de culture d'*A. Platensis* thermostatée en été, la production de biomasse sèche en périodes diurnes cultivée à 35°C était supérieure de 14% à celle à 25°C. Dans la même étude,

ils ont observé que la perte moyenne de la biomasse la nuit était significativement élevée pour les cultures à 25°C. Ils ont expliqué ce taux de perte élevé enregistré à faible température pendant le mois de juin et juillet par la forte irradiance reçue par les cellules en cette période. En effet, ils ont conclu que la perte de biomasse nocturne est influencée à la fois par la température de la culture et par l'intensité lumineuse totale perçue par les cellules dans la journée (Cf. **Tableau 3**). Des résultats plus récents du même auteur <sup>57</sup> soutiennent fortement l'hypothèse que la photoinhibition peut avoir lieu même dans des cultures extérieures relativement denses d'*Arthrospira* lorsqu'elles sont exposées à la combinaison d'une lumière élevée et d'une température sous-optimale .

Cette interaction entre l'énergie lumineuse et la température a été également examinée dans des travaux récents <sup>39</sup>, afin de proposer un modèle cinétique tenant compte de l'effet couplé de ces deux paramètres majeurs sur la vitesse de croissance de cette souche. En effet, les résultats de ses expériences affirment l'existence de l'inter-corrélation relevée dans la littérature. Néanmoins, il a été rapporté que l'impact de ce couplage n'est pas significatif sur la cinétique de croissance. Donc, en conséquence, cette interaction sera négligée dans notre étude.

**Tableau 3** : Effet de la température sur la productivité journalière d'*Athrospira Platensis* <sup>56</sup>.

Mois	Productivité nette (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> )	
	35°C	25°C
Mai	0,36	0,28
Juin	0,40	0,27
Juillet	0,45	0,33
Août	0,42	0,32
Septembre	0,32	0,22

## D) Interaction des chaînes de transport des électrons de la photosynthèse et de la respiration

Chez plusieurs espèces de cyanobactéries, une inhibition de la consommation d'oxygène par la voie respiratoire a été signalée par la présence de lumière. Pour expliquer un tel phénomène, *Hirano*<sup>58</sup> a suggéré l'existence d'un segment commun entre les chaînes de transport d'électrons respiratoires et photosynthétiques. Cependant, il a également été proposé que la chaîne respiratoire soit située dans la membrane plasmique, ce qui rend l'existence de ce segment commun très peu probable. *Gonzalez de la Vara* et *Gomez-Lojero*<sup>59</sup> ont étudié la possibilité de tels oxydo-réducteurs communs chez *Spirulina maxima*, car elle présente un taux de respiration élevé par rapport aux autres cyanobactéries. Ces études ont indiqué un chevauchement étendu entre la chaîne de transport d'électrons photosynthétique et respiratoire. Le NADPH peut être oxydé à la fois dans l'obscurité et à la lumière par la même enzyme. Sur la base de leurs observations, ils ont affirmé l'existence d'un morceau commun de la chaîne de transport d'électrons dans les thylakoïdes de *Spirulina maxima* démontrant ainsi une interaction possible des chaînes respiratoire et photosynthétique. Ceci explique l'inhibition ou l'arrêt du métabolisme respiratoire lorsque l'irradiance dépasse un certain point à partir duquel la photosynthèse domine.

Enfin, ces deux voies métaboliques sont impactées par les conditions environnementales telles que la quantité de lumière, la température, ainsi que par les concentrations des espèces nutritives et de l'oxygène.

## E) Photo-inhibition & Photo-acclimatation

Le phénomène de photo-inhibition, se produit fréquemment dans les cultures solaires quand les intensités de radiation incidente dépassent ce qui est nécessaire pour saturer l'activité photosynthétique. Cela a été étudié en profondeur pour les plantes, ainsi que pour les microalgues<sup>60,61</sup>. Pour la Spiruline, *Vonshak et al*<sup>47</sup> ont démontré, d'une part, que la sensibilité de *A. platensis* au stress de lumière diffère d'une souche à une autre, selon les conditions de culture préalables : les cellules pré-cultivées sous forte lumière ( $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) présentent une résistance plus élevée au stress lumineux. D'autre part, ils ont observé que les destructions des antennes de collecte de photons (protéines à l'intérieur des cellules) causées par les fortes irradiances, peuvent être réparées rapidement par la cellule si elles sont placées dans le noir. En effet, ces processus photo-inhibiteurs dépendent fortement du temps d'exposition.

Une destruction irréversible de la Spiruline a été signalée après environ 10 secondes d'exposition à une irradiance permanente supérieure à  $3000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ <sup>62</sup> dans des PBRs homogènes. Le même mécanisme est supposé se produire après quelques minutes de stress lumineux léger, avec jusqu'à 50% de dégâts au bout de 10 à 20 minutes<sup>47,63,64</sup> dans les PBRs à culture dense en extérieur. En outre, la photo-inhibition peut facilement être renforcée par plusieurs facteurs de stress tels que la température, la forte concentration d'oxygène<sup>65</sup> et même sous des conditions appauvries en  $\text{CO}_2$ <sup>52</sup>.

Inversement à la photo-inhibition qui provoque une perte de rendement photosynthétique en raison de l'endommagement de certaines des protéines clés de l'appareil photosynthétique, la photo-acclimatation est le processus par lequel les microalgues ajustent leur teneur en

pigments selon l'intensité et la qualité lumineuse. Elles modifient ainsi le taux de production photosynthétique. Ces deux processus agissent à des échelles de temps différentes : la photo-inhibition se produit sur une échelle de temps de l'ordre de quelques minutes, tandis que la photo-acclimatation agit sur une échelle qui varie de quelques heures à plusieurs jours <sup>65</sup>. Cette capacité développée par les microalgues permet de les protéger d'un excès d'énergie. En effet, il s'agit d'une augmentation ou d'une diminution de la teneur en pigments capteurs de la lumière (i.e. Chlorophylle *a*) selon la transition d'éclairement perçue. Selon les analyses chimiques de *Falkowski et al.*, <sup>66</sup> il est question, plus précisément, d'une adaptation de la taille et du nombre des unités photosynthétiques PSU<sup>6</sup> en réponse au changement d'intensité lumineuse. Le temps nécessaire pour accomplir ces mécanismes dépend en grande partie du type de la souche cultivée. La compréhension de ces deux processus, ainsi que leurs interactions, est donc primordiale.

Ces phénomènes de photo-adaptation et photo-inhibition ont été largement étudiés en laboratoire. Cependant, nous trouvons moins de travaux les concernant pour les cultures extérieures exposées au soleil. *Vonshak et al.*, <sup>63</sup> ont été parmi les premiers à rapporter que les cultures solaires de la Spiruline étaient moins affectées par la photo-inhibition que celles cultivées en laboratoire. Les mêmes auteurs ont indiqué, dans un travail ultérieur, que les souches cultivées à des températures significativement inférieures à leur optimum, montrent plus d'impact des intensités lumineuses inhibitrices que les cultures où les températures optimales sont maintenues. Ainsi, ils ont signalé une interaction possible entre la lumière et la température <sup>15</sup> que nous aborderons postérieurement. La turbulence dans les cultures denses en plein air peut également être considérée comme un moyen de prévention du stress photo-inhibiteur, car un bon mélange assure un déplacement des cellules promoteur du régime de fonctionnement dans la lumière.

### 1.4. Les procédés et sentiers technologiques de la filière

De la matière première au produit final (destiné à la consommation), la filière microalgale comporte de multiples maillons (ou procédés) selon le champ d'application in fine. En effet, au moins une trentaine de procédés, pour les chaînes de production et utilisation des microalgues, ont été sous forme d'arbre technologique par *Kerlero de Rosbo et Bernard* <sup>67</sup>. Nous les avons résumés dans le **Tableau 4**.

Dans cette section, nous allons nous intéresser à la chaîne de production. Le premier chaînon de cette phase comprend les intrants du système de culture. Il agit directement sur les coûts de production et il est constitué de souches de microalgues, de l'énergie, des gaz et des nutriments nécessaires pour la croissance de ces microorganismes. L'enjeu aujourd'hui est d'optimiser cette partie pour économiser les intrants et pour donner un caractère durable et écologique au procédé de production.

---

<sup>6</sup> PSU (Usine Photosynthétique) : un concept défini en 1930 comme le nombre de pigments impliqués dans la production d'oxygène lors de l'excitation provoquée par la capture des photons

**Tableau 4 :** La filière de microalgues et ses différents itinéraires technologiques

Étapes de la chaîne de production		Technologies	Description
Chaîne de production	Culture	Préparation du milieu de culture	<b>Intrants nécessaires à la croissance :</b> Souche, Source de C, N, P, Source d'énergie, micronutriments
		Bassins ouverts, Photobioréacteur (Phototrophe) <sup>7</sup> , Fermenteurs (chimiotrophe) <sup>8</sup>	<b>Éclairage :</b> naturel, artificiel ou mixte <b>Forme de PBR :</b> plat, tubulaire, Sacs... etc. Bassins ouverts : <b>intensifs ou extensifs</b>
	Récolte et concentration	Centrifugation, Sédimentation, Flottation, Flocculation, Filtration	<b>Produit :</b> Pate algale de 2-25% de MS <sup>9</sup> selon la technologie
	Séchage	Séchage Solaire, Séchage Indirect Par Vapeur, Séchage Flash, Séchage Spray, lyophilisation, Lit Fluidisé, Micro-Ondes	<b>Produit :</b> Gâteau d'algue apte à conserver de 15-30% de MS
Chaîne de transformation	Extraction et transformation	Presse mécanique, solvants organiques, Fluides Supercritiques (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O), Lyse enzymatique, ultrasons, milking (extraction in situ)	<b>Produit :</b> Biomolécules d'intérêt Purification et transformation selon le produit visé

Le deuxième chaînon comporte la technologie de culture. La méthode de production est spécifique à l'espèce de microalgue choisie. En effet, les systèmes de culture de microalgues et cyanobactéries en photo-autotrophie peuvent être globalement classés en deux grandes catégories selon leur contact ou non avec l'environnement extérieur :

#### 1.4.1. Systèmes ouverts

Ils sont simples, connus et majoritairement utilisés pour la culture industrielle des microalgues dans les dernières décennies. Les systèmes ouverts sont plus faciles et moins chers à construire et à exploiter que les réacteurs fermés<sup>68</sup>. Ces systèmes sont les moins énergivores et ont une maintenance et un nettoyage faciles<sup>31</sup>. Communément utilisés par les maréchaux, ils sont célèbres par leur maturité technologique et par leur scale-up facile et réussi (multiplication d'unité). Ils se trouvent sous quatre types<sup>17</sup> :

<sup>7</sup> Phototrophe : microorganisme utilisant de la lumière comme source d'énergie avec la photosynthèse, et le dioxyde de carbone comme source de carbone, pour la croissance.

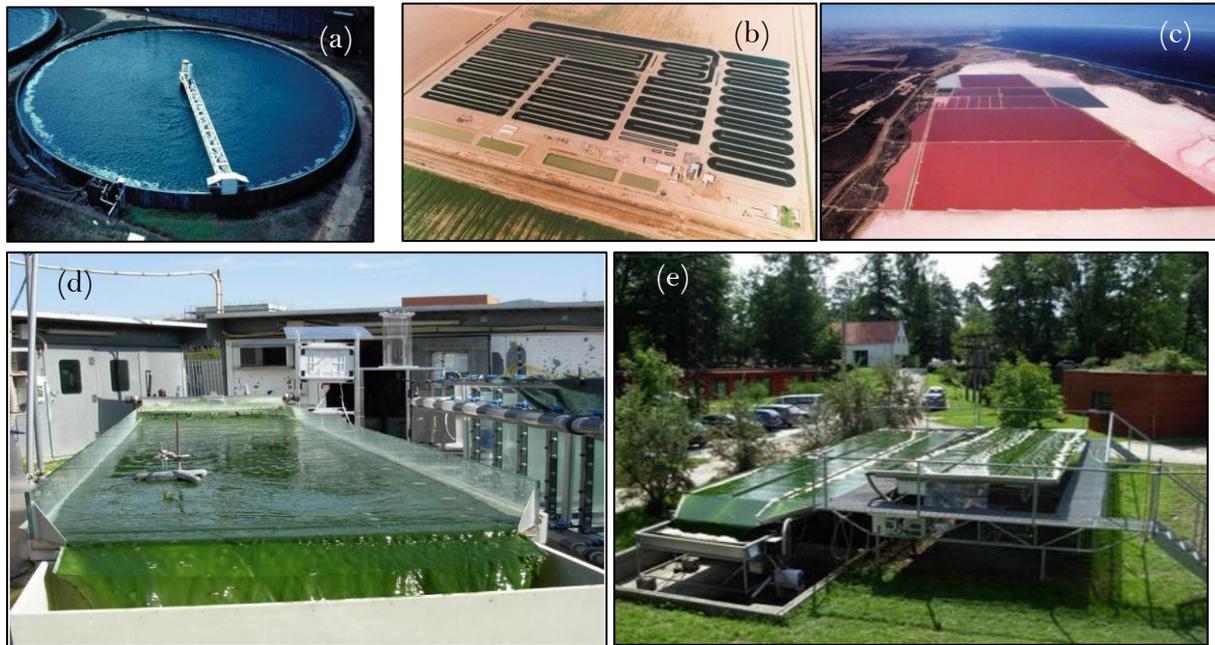
<sup>8</sup> Chimiotrophe : microorganisme utilisant la respiration comme métabolisme principale

<sup>9</sup> MS : matière sèche

- Lacs et lagunes naturels ;
- Grands bassins peu profonds non mélangés et souvent utilisés pour la culture de *Dunaliella salina* ou pour la Spiruline ;
- Bassins circulaires à pivotement central pour le mélange, principalement utilisée pour *Chlorella* en Asie ;
- Bassins mixtes à roues à aubes (Raceways), majoritairement utilisés pour la culture de Spiruline.

En plus des soucis d'agitation et de faible turbulence rencontrés dans ce type de système qui impactent l'efficacité de l'utilisation de la radiation solaire, notamment par la provocation de la photo-inhibition des cellules dans la couche supérieure exposée à une forte irradiation, les principales limitations résident dans les problèmes de contaminations par la faune et d'autres organismes hétérotrophes à croissance rapide, accompagnés des grosses pertes d'eau par évaporation due aux fortes chaleurs ou au vent. À titre d'exemple, *Das et al.*,<sup>69</sup> signalent une perte d'eau d'environ 0,8 cm.j<sup>-1</sup> dans un climat tempéré chaud dans le cas d'un Raceway. Des risques de dilution par la pluie dans les régions à fortes précipitations peuvent également impacter les cultures. Des fuites de CO<sub>2</sub> par diffusion dans l'atmosphère en découlent aussi<sup>70</sup>, sans oublier la nécessité de disposer de vastes surfaces de terre. De plus, en raison de l'aération inefficace de cultures en plein air, leurs taux de transfert de masse sont très faibles, ce qui entraîne une productivité en biomasse moindre<sup>29,71</sup>.

Afin de fournir suffisamment de lumière à la culture et assurer un mélange adéquat, tout en évitant les pertes évoquées précédemment, un compromis est nécessaire sur la profondeur optimale du bassin<sup>11</sup>. En ce sens, le concept technologique d'une culture ouverte en cascade en couche mince (Thin-Layer Systems) est apparu et a démontré des rendements de biomasse plus élevés par rapport aux autres systèmes ouverts (10-15 g.L<sup>-1</sup> MS contre 0.5-1 g.L<sup>-1</sup> MS dans les Raceways et étangs ouverts<sup>72</sup>). Cela est expliqué par le court chemin lumineux offrant à la culture l'aptitude à bénéficier efficacement de la lumière solaire. Il s'agit d'un système de bacs inclinés peu profonds de 2 à 5 cm de profondeur, disposés les uns au-dessous des autres pour former une cascade de sauts hydrauliques, sur lesquels les cultures de microalgues circulent continuellement pour assurer un mélange suffisant pour l'intermittence de la lumière et l'échange de gaz avec les cellules<sup>73</sup>. Les différentes technologies recensées jusqu'ici sont visibles sur les photos de la **Figure 7**.



**Figure 7 :** Photographies des systèmes ouverts dans le monde : (a) bassin pour *Chlorella* à Taiwan. (b) Raceways à *Spiruline* en California, USA. (c) bassins naturels de 200 ha de *Dunaliella Salina* en Australie <sup>29</sup>. (d) & (e) Système de cascade en couche mince de 60L et 500-1500L respectivement à Trebon, République Tchèque <sup>72,73</sup>.

L'efficacité et la viabilité des systèmes ouverts à l'extérieur dépendent des conditions environnementales. En effet, les microalgues dans ce cas subissent des variations journalières et saisonnières des conditions extérieures. De ce fait, cela limite le nombre de microalgues aptes à résister à ces circonstances. Généralement, il s'agit de celles qui sont habituées à des conditions extrêmes de température, de pH et de salinité.

Parmi les pistes principales pour dépasser ces verrous, les cultures sous les serres assurent un environnement clos et contrôlé afin de protéger les cultures des fluctuations météorologiques indésirables, notamment le vent, la pluie et les particules étrangères présentes dans l'air. Cette alternative technologique permet d'améliorer les rendements en biomasse qui peuvent doubler voire multiplier les productivités par 10. Elle offre aussi des possibilités de conception pour optimiser le microclimat à l'intérieur en jouant sur la température, la qualité de l'éclairage naturel, l'humidité et le dioxyde de carbone interne pour fournir ce dont cette souche d'algue a besoin <sup>74</sup>. En effet, *Vonshak et al.*, <sup>63</sup> ont démontré que les productivités les plus importantes pouvaient être atteintes en ombrageant des cultures denses de la *Spiruline* cultivées en extérieur et en les protégeant de l'exposition totale au rayonnement solaire.

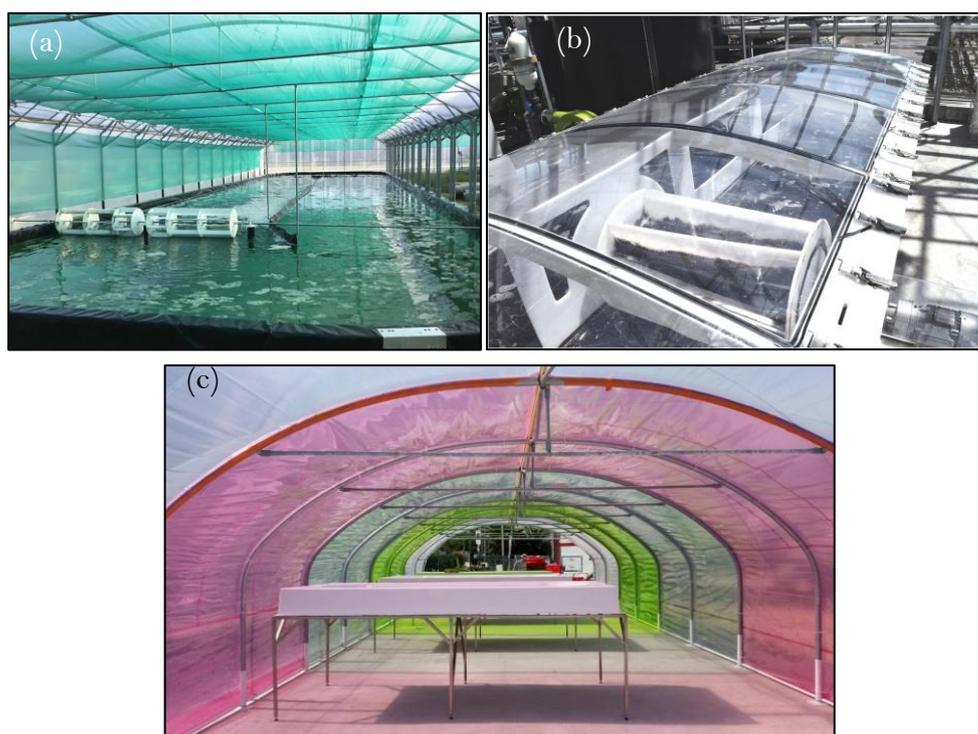
Dans cet ordre d'idées, des procédés de culture innovants ont été développés pour tirer parti de l'ensemble du spectre solaire en combinant à la fois la production photovoltaïque et de microalgues <sup>75</sup>. Cette idée a été adoptée par le projet Purple Sun visant à concevoir des serres innovantes à base de panneaux solaires semi-transparentes (cf. **Figure 8 (c)**) permettant d'utiliser sélectivement la lumière solaire pour la production de l'électricité nécessaire à la production biologique. Elle conduit à une augmentation de l'efficacité photosynthétique (en raison de l'utilisation préférentielle des longueurs d'ondes d'intérêt) et une réduction de la

mortalité des microalgues due au surchauffage et à la photo-inhibition aux fortes intensités lumineuses <sup>76</sup>.

Dans un contexte d'amélioration des bilans énergétiques et environnementaux, l'utilisation de l'ombrage par des panneaux photovoltaïques sur la couverture de la serre a prouvé son succès comme solution prometteuse pour réduire les impacts du changement climatique suite à l'approvisionnement autonome en électricité locale (application du principe de l'économie circulaire). Cependant, en termes de productions énergétique et biologique, un compromis doit être avancé entre la superficie des panneaux solaires, autrement dit le taux d'ombrage, et la production de biomasse qui est limitée par ce dernier <sup>75</sup>.

Les cultures ouvertes à environnement contrôlé prennent de l'ampleur de nos jours en raison de leur particularité en tant que solution intermédiaire entre les systèmes ouverts (faibles coûts) et les systèmes fermés (rendement élevé), combinant ainsi les avantages de chaque système (faibles coûts et rendement élevé). La **Figure 8** présente des exemples de quelques systèmes de culture couverts en France.

En général, la conception de la serre doit être optimisée pour garantir le climat adéquat aux microalgues, économiser les moyens de contrôle et de régulation. Sous serre, des alternatives technologiques hybrides couplant la lumière naturelle et artificielle peuvent être trouvées permettant de prolonger la durée des cultures et d'intensifier la croissance.



**Figure 8** : Images de bassins couverts (à l'intérieur). (a) Raceway commercial sous serre pour la culture de Spiruline à Torreilles, sud de la France (*Source site de Alg'ethic*). (b) Bassin couvert pilote à Saint Nazaire, France (installation de recherche Algosolis) <sup>77</sup>. (c) Prototype d'un Raceway pilote sous serre photovoltaïque utilisant la lumière colorée au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer <sup>78</sup>.

### 1.4.2. Systèmes fermés

Suite aux lacunes des systèmes ouverts en général, les chercheurs et producteurs commerciaux se sont tournés vers les systèmes fermés qui offrent la possibilité de cultiver des monocultures en conditions axéniques ou à de faibles probabilités de contamination. Il s'agit de récipients clos de tailles et de géométries très variées utilisant la lumière solaire ou artificielle. Contrairement aux précédents, ils permettent un bon contrôle des conditions de culture. Ils sont bien adaptés pour les microalgues sensibles aux contaminations. Ils sont communément appelés « Photobioréacteur », l'acronyme PBR est classiquement utilisé et sera adopté dans la suite. Ils permettent une productivité élevée de biomasse, ils facilitent l'approvisionnement en dioxyde de carbone, l'approvisionnement en eau, le contrôle de la température optimale, des niveaux de pH, des échanges gazeux, et assurent l'aération dans les cultures denses. Bien qu'ils occupent moins de surface au sol, ils ne sont pas toujours ou encore durables économiquement, car les coûts de production (construction et exploitation) demeurent significativement élevés <sup>70</sup>.

Un large éventail technologique peut être identifié, classé en trois grandes catégories généralement réputées adaptées à la culture à grande échelle : PBRs plats, PBRs tubulaires et PBRs à colonne <sup>79</sup> (cités par ordre de pertinence). Cependant, une présentation détaillée des différents types de photobioréacteurs fermés existants peut être trouvée dans les livres et les revues <sup>35,38,80</sup>.

Dans cette partie, nous allons passer en revue quelques-unes de ces typologies en se focalisant particulièrement sur les PBRs tubulaires, dont il est question dans ce travail de thèse.

#### A) Les PBRs plats (panneau plat)

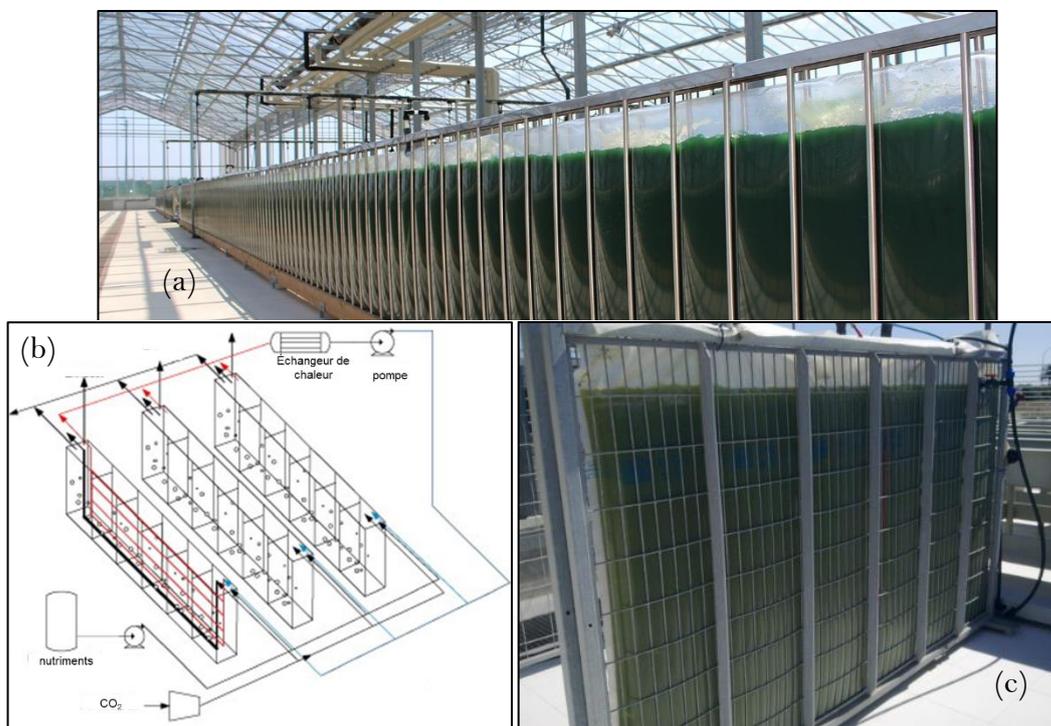
Ce type de PBR a dominé la production des microalgues ces dernières décennies <sup>81</sup>. Ils ont fait l'objet de beaucoup de considération en raison de leur grande surface d'éclairage et leur faible épaisseur optique (i.e. court trajet lumineux) conduisant à un rapport surface sur volume élevé (généralement de 16 à 80 m<sup>-1</sup>) <sup>82</sup>. Ils sont sous forme rectangulaire construits avec des matériaux transparents en verre (chambres en verre) <sup>83</sup> ou PMMA <sup>84</sup> ou de sacs en plastique (feuilles de PVC) <sup>85,86</sup> au sein desquels circule une fine couche de la suspension microalgale. L'agitation est assurée soit par un moteur de rotation mécanique, soit par bullage d'air à travers un tube perforé.

Les panneaux ont généralement une épaisseur de 1 à 20 cm <sup>87</sup> et peuvent être placés horizontalement ou verticalement côte à côte, à quelques centimètres de distance, pour former une structure compacte qui entraîne une certaine dilution de la lumière du soleil (ex. **Figure 9**). Ils peuvent également se retrouver en position inclinée à un angle approprié (correspondant à la latitude du lieu géographique), ou doté d'un système de suivi de la course du soleil pour maximiser la collecte du rayonnement solaire par rapport à la position horizontale <sup>88</sup>. La chambre plate a été la configuration la plus simple (conception plate de base), mais des réacteurs alvéolaires ont également été proposés, dans lesquels des panneaux plats (feuilles) sont divisés en une série de canaux rectangulaires internes (appelés alvéoles) <sup>82</sup>.

Pour des panneaux verticaux placés parallèlement, l'orientation influence fortement la productivité. En effet, les résultats de simulation de *Slegers et al* <sup>89</sup> signalent que pour des

latitudes élevées, les panneaux parallèles orientés nord-sud produisent environ le double de leurs semblables orientés est-ouest. En termes de performances, outre leur productivité volumique élevée en conditions extérieures (parfois supérieures à  $2 \text{ g.L}^{-1}\text{d}^{-1}$ )<sup>82</sup>, il a été rapporté que les PBRs plans verticaux présentent une efficacité photosynthétique élevée et une accumulation de concentration d'oxygène dissous moindre par rapport aux autres systèmes notamment ceux horizontaux et tubulaires<sup>90-92</sup>.

Concernant l'aspect économique de ce type de PBR, *Tredici et al.*,<sup>93</sup> ont réalisé une analyse technico-économique complète d'une usine de 100 ha pour définir les coûts de production de *Tetraselmis suecica* à différents endroits (entre 3 et 5  $\text{€}.\text{kg}^{-1}$ ). Les résultats de cette étude ouvrent des pistes de comparaison avec les performances des autres technologies, voire avec d'autres produits alimentaires ou de haute valeur ajoutée.

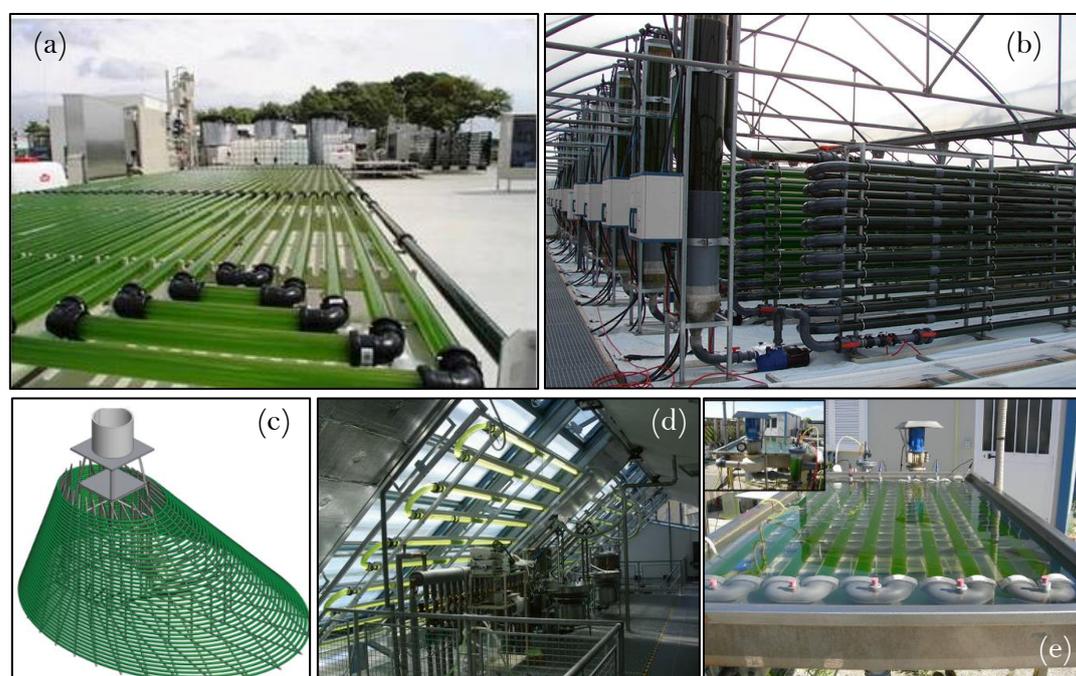


**Figure 9 :** (a) Photographie d'une ferme de Spiruline en PBRs plats en Italie (Société AlgaVenice)<sup>94</sup>. (b) Schéma conceptuel des panneaux plats en verre placés en parallèle modifié<sup>81</sup>. (c) Image d'un photobioréacteur plat pilote installé dans les locaux du Département de génie chimique de l'Université d'Almeria (Espagne)<sup>95</sup>.

## B) PBRs tubulaires

Bien que certains auteurs aient affirmé que les réacteurs plat pouvaient être plus attrayants suite à leurs efficacité photosynthétique et productivité surfacique<sup>96,97</sup>, les résultats de *Tredici et al.*<sup>98</sup> sont convaincants et il semble que la conversion de la lumière solaire soit meilleure dans les PBRs tubulaires car leur surface incurvée entraîne une dilution spatiale de la lumière ce qui est bénéfique pour la croissance. En plus, les problèmes d'agitation (zones

mortes et adhérence à la paroi) et de stress cellulaire résultant de l'aération rencontrés dans les systèmes plans, ont conduit les développeurs de projets de culture à grande échelle à recourir actuellement à la géométrie tubulaire, alors même que ce mode de culture existe depuis environ 50 ans <sup>99,100</sup>. Par ailleurs, cette technologie présente presque autant d'avantages que la précédente : un bon rapport surface éclairée/volume, des productions de biomasse importantes et des rendements photosynthétiques intéressants, en plus de leur facilité de mise en œuvre. Cette conception est la plus courante des systèmes fermés développés à l'échelle industrielle pour les microalgues <sup>35</sup>. Leurs avantages et inconvénients ont été intensivement discutés dans les livres, pour n'en citer que quelques-uns <sup>101,102</sup>. Parmi les premiers travaux d'investigation de cultures de Spiruline en photobioréacteur tubulaire solaire, on retrouve celui de *Torzillo et al.* <sup>103</sup>, en Italie, qui rapportent une productivité surfacique annuelle de 33 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (soit 90% plus élevée qu'une culture en Raceway aux mêmes conditions climatiques).



**Figure 10 :** Quelques types de photobioréacteurs tubulaires à l'échelle pilote et semi-industrielle. (a) PBRT horizontal de AlgaeParc au Pays-bas <sup>86</sup>. (b) PBRT vertical de 30 m<sup>3</sup> à l'unité de recherche d'Almeria en Espagne <sup>30,104</sup>. (c) Schéma conceptuel d'un PBRT de type Fibonacci en cours de développement <sup>82</sup>. (d) PBRT serpentin basé sur un concentrateur solaire <sup>48</sup>. (e) PBRT sous l'eau <sup>105</sup>.

Les tubes utilisés sont généralement en verre, en polyéthylène ou en PMMA. Ces matériaux ont la propriété de prévenir l'adhésion des microalgues aux parois et donc réduisent l'encrassement. Ils peuvent être sous différentes configurations : serpentins horizontaux <sup>106</sup>, droits horizontaux <sup>103,107,108</sup>, verticaux <sup>99</sup>, hélicoïdaux <sup>109,110</sup>, inclinés <sup>68,98,111</sup> ou sous d'autres formes innovantes. Le but étant d'augmenter le ratio surface éclairée/volume et améliorer ainsi la distribution et l'utilisation de la lumière solaire ; on peut citer : PBRT<sup>10</sup> de type

<sup>10</sup> PBRT : Acronyme pour photobioréacteur tubulaire

Fibonacci <sup>112,113</sup>, PBRT à bobine <sup>114</sup> ou de forme d'onde sinusoïdale <sup>115</sup>. À l'échelle industrielle, les PBRTs droits disposés horizontalement ou implémentés verticalement sont les systèmes les plus exploités dans des conditions solaires.

Quelle que soit la conception spécifique du réacteur tubulaire, celui-ci est divisé en deux sections majeures qui doivent être conçues avec précision : (1) une section photo-active tubulaire baptisée "capteur solaire" ; (2) le réservoir de mélange (Colonne à bulle, Airlift ou Bassin).

La première est la section principale du réacteur (où se produisent la photosynthèse et la croissance de la biomasse), tandis que le réservoir de mélange est principalement utilisé pour éliminer l'oxygène et pour contrôler les variables de la culture.

La circulation entre les deux sections se fait par le biais d'une pompe de circulation mécanique ou via un Airlift par injection de gaz.

Quant à la régulation thermique, il s'agit principalement du refroidissement l'été, car le surchauffage du milieu est inévitable dans ce type de réacteur à cause de : (i) son volume fermé (absence de refroidissement par évaporation), (ii) la fraction du spectre solaire non photosynthétique qui participe majoritairement à l'augmentation de la température de la culture, et (iii) sans oublier la chaleur dissipée par les cellules du fait de leurs activités biologiques bien que cette contribution reste faible. Un chauffage modéré, dans certaines circonstances, est nécessaire également pour éviter l'arrêt de la croissance. Sur cette base, on distingue différents moyens de contrôle de température: soit par ombrage en superposant deux ou trois tubes <sup>106</sup>, soit via des échangeurs de chaleur internes (tubes concentriques émergés dans le dégazeur) <sup>86,116</sup>, soit par une immersion des tubes sous l'eau (bain-marie) <sup>103,105</sup>, ou par aspersion des tubes avec de l'eau ce qui engendre une consommation d'eau non négligeable <sup>103</sup>.

Les principaux facteurs de conception affectant directement ou indirectement les performances du réacteur tubulaire sont (1) le diamètre des tubes, (2) la disposition des tubes (horizontale, verticale ou inclinée) (3) la longueur des tubes. Plus précisément, les deux premiers impactent plutôt la disponibilité de la lumière, dans le système, qui est le paramètre d'optimisation dominant dans les systèmes solaires.

Concernant le diamètre, la plupart des premiers PBRTs utilisaient des tubes droits de 10 à 30 cm de diamètre <sup>117</sup>. Cependant, après plusieurs années de recherche, ce dernier est réduit à environ 5 jusqu'à 9 cm <sup>101</sup>. En effet, comme on peut s'y attendre dans un système photo-limité, plus le diamètre est petit, meilleure est la productivité volumétrique. En plus, un tube étroit entraîne un meilleur mélange permettant une bonne exposition des microalgues aux cycles lumière\sombre, par conséquent une utilisation efficace de la lumière améliorant la croissance et réduisant la consommation énergétique <sup>98,110</sup>. Dans notre étude, nous examinerons l'effet de cette lumière intermittente à laquelle les cellules sont soumises.

Plus concrètement, les effets de ces paramètres de décision notamment le diamètre des tubes, leur agencement et la distance entre les rangés, sur les performances du système de production ont été déjà analysés. En effet, les résultats des simulations de *Slegers et al.* <sup>107</sup>, pour des PBRT horizontaux empilés horizontalement et verticalement, ont indiqué que les productivités surfaciques optimales sont atteintes pour des tubes de diamètre inférieur à 0,1m (soit 0,06m)

en disposition verticale. Cette conception assure un régime lumineux optimal (i.e. par dilution de lumière), cependant elle est plus affectée par l'effet d'ombrage et l'effet canyon<sup>11</sup> entre les tubes que la configuration horizontale. Ces deux phénomènes dépendent de l'agencement du réacteur et de la distance horizontale entre les tubes. Les mêmes auteurs ont rapporté que les PBRT horizontaux doivent être placés avec un espacement de 1/2 jusqu'à 2/3 du diamètre.

Pour soutenir ces conclusions, notamment sur l'effet des petits diamètres des tubes, ainsi que pour comparer les performances des différents designs des PBRTs, nous présentons dans le **Tableau 5** quelques données expérimentales des productivités obtenues pour la Spiruline (*A. platensis*) cultivée en PBRTs extérieurs. Il est clair qu'une comparaison entre les différentes conceptions tubulaires n'est pas triviale, car les productivités de chaque technologie dépendent, d'une part, des paramètres opératoires, notamment le débit d'injection d'air ou de circulation (i.e. le nombre de Reynolds de l'écoulement dans le tube), la concentration de dioxygène et la conduite du réacteur (mode de fonctionnement batch ou continu avec ou sans recyclage), et, d'autre part, des conditions climatiques liées à l'emplacement du réacteur. En général, dans les cultures extérieures, la meilleure production est atteinte lorsque le ratio de surface éclairée sur volume est élevé (> 25).

**Tableau 5** : Les productivités de la Spiruline dans différentes conceptions tubulaires extérieures.

Design du PBRT	Diamètre interne (cm)	S <sub>éclairée</sub> /V (m <sup>-1</sup> )	Productivité surfacique <sup>12</sup> moyenne (g.m <sup>-2</sup> .j <sup>-1</sup> )	Productivité volumétrique moyenne (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> )	Concentration de biomasse optimale (g.L <sup>-1</sup> )	Référence
(Configurations non renseignées)	14	9	22	0,2	0,4-0,6	101
	13	10	23	0,23	0,6-0,8	
	7,4	17	23	0,4	1,2-1,4	
	5	25	25	0,65	1,4-2	
	2,5	50	27	1,4	3,5-6	
À tube unique droit	5	25,83	-	1,05 <sup>a</sup>	3	118
Incurvé (en U)	2,6	47,85	23,8	1,19	10 <sup>a</sup>	119
Rangées tubulaires ondulées (verticales)	1	400	35 (avec 10 rangées de tubes)	2,2 (avec 5 rangées de tubes)	3	115
Bobine (tubes en Spirale)	1	-	-	2,32 <sup>a</sup>	16,4 <sup>a</sup>	114

<sup>a</sup> valeur maximale atteinte.

<sup>11</sup> Effet Canyon : La difficulté d'accéder à la lumière naturelle

<sup>12</sup> Productivité surfacique : notion utilisée souvent dans la littérature pour estimer les performances de la filière et comparer les productions dans différentes conceptions indépendamment du volume ; exprimée en (quantité de biomasse produite par unité de surface occupée au sol et unité de temps).

Cependant, il est important de souligner que pour ces cas de figure, les intensités lumineuses maximales captées impactent fortement la croissance en provoquant la photo-inhibition. Parmi les alternatives suggérées pour éviter ce phénomène, il est possible d'augmenter la concentration de biomasse et ainsi bénéficier de l'auto-ombrage cellulaire dû à l'absorption et de la diffusion de la lumière par les algues (i.e. le cas des cultures denses) <sup>53</sup>, protégeant ainsi la culture de l'effondrement (cf. **Tableau 5**). Inversement, une autre stratégie a été proposée, utilisant des concentrations cellulaires plus faibles, basée sur le concept de dilution de la lumière solaire afin de réduire l'intensité d'irradiance, d'améliorer sa distribution au sein du volume, et de diminuer ainsi l'impact des fortes températures dues à l'ensoleillement.

*Carlozzi et al.* <sup>115</sup> ont défini le ratio photique, qui n'est autre qu'un facteur de conception et de dimensionnement des PBRs, comme étant le rapport de la surface éclairée sur la surface occupée au sol Eq(3) :

$$R_f = S_{\text{éclairée}}/S_{\text{occupée}} \quad (3)$$

Basé sur ce principe, les valeurs théoriques les plus élevées de ce ratio sont atteintes par la verticalisation des systèmes de cultures tubulaires. Bien évidemment, pour un même volume de culture et quel que soit le diamètre des tubes, une disposition verticale permet d'augmenter la surface éclairée du système par rapport à la surface horizontale occupée (tubes droits adjacents), tout en réduisant la surface au sol occupée. Cela amène à des productivités surfaciques plus élevées et rejoint les résultats de simulation rapportés par *Slegers et al* <sup>107</sup>.

Toutes les études visant une optimisation de la conception de PBR pour la filière des microalgues arrivent à une conclusion commune stipulant que l'accès optimal à la lumière solaire est le critère phare du dimensionnement des photobioréacteurs (et photo-procédés en général). Cela est dû au fait que leurs productivités sont strictement limitées à la géométrie offrant les valeurs les plus élevées aux grandeurs  $S_{\text{éclairée}}/V$  et  $R_f$ . Bien que cela attribue plus d'avantages en faveur des PBRs tubulaires verticaux (i.e. grande surface éclairée pour un même ou plus faible volume), les systèmes tubulaires horizontaux restent plus faciles à composer en systèmes plus grands. Ceci se produit par l'augmentation de diamètre ou par la multiplication (la mise en place de tubes parallèles). Ils sont donc plus adaptés au changement d'échelle sans se poser la question de la disponibilité de la lumière solaire qui constitue, à contrario, une contrainte technique principale pour la duplication d'un système agencé verticalement à cause de l'ombrage entre les tubes. En outre, les photobioréacteurs tubulaires horizontaux ont démontré leurs fiabilité et capacité d'atteindre des productivités annuelles de biomasse élevées, *Molina et al.*, <sup>106</sup>, ont enregistré environ 1,2 g.L<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> ou 20 g.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>, en Espagne (soit 2 fois et 1,03 fois plus qu'un Raceway et PBRT tubulaire respectivement, en été aux Pays-Bas) <sup>120</sup>. Cela dit, sur le plan économique les coûts d'investissement et d'énergie de ces deux types de réacteur restent significativement plus élevés que ceux de leurs semblables ouverts. En effet, les usines de production à grande échelle sont plutôt basées sur un assemblage d'unités de réacteurs modulaires au lieu d'utiliser des tubes trop longs. Dès lors, chaque unité nécessite une variété de dispositifs de contrôle de la large gamme des facteurs de croissance. L'étude de *Norsker et al.*, <sup>121</sup> rapporte un CAPEX<sup>13</sup> d'environ 0,51M€/h

---

<sup>13</sup> CAPEX : "CAPital EXpenditure" correspond au total des dépenses d'investissement (corporel et incorporel) consacrées à l'achat d'équipement.

à l'échelle de 100 ha pour les PBRTs, alors qu'il est compris entre 0,37 M€/ha pour les bassins Raceways et 0,8 M€/ha pour les panneaux plats.

La longueur des tubes est également un facteur déterminant de la conception, non moins important que les autres. En effet, il agit essentiellement sur le temps de résidence des cellules dans le récepteur solaire. La caractérisation de la longueur optimale des tubes dépend à la fois des conditions hydrodynamiques, notamment le mélange et le débit de circulation, et de la contrainte d'accumulation d'oxygène qui inhibe la croissance. L'augmentation de cette longueur est corrélée à l'augmentation du temps de mélange <sup>101</sup>. Cette longueur doit être dimensionnée telle que les pertes en CO<sub>2</sub> soient mineures. Généralement, elle est comprise entre 100 et 150 m selon le diamètre et le taux de rendement photosynthétique de l'espèce de biomasse.

En plus de la longueur et du diamètre des tubes, il a été communément signalé que le mélange ou bien l'agitation est une des limitations techniques du dimensionnement de ces configurations. La mise en mouvement du milieu de culture devrait assurer une distribution suffisamment homogène des besoins nécessaires aux microalgues dans le réacteur pour éviter toute éventuelle carence ou formation des volumes morts. Cependant, cela n'est vrai que pour les substrats nutritifs car, pour la lumière qui n'est pas un nutriment miscible, l'agitation intervient plutôt sur la distribution des cellules au sein du volume où la répartition de l'éclairement est hétérogène. Elles impactent donc leur exposition à la lumière en agissant sur la fréquence de leur passage entre les zones sombres et éclairées du réacteur <sup>35</sup>. Ainsi, l'agitation influence la croissance sans pour autant qu'il existe concrètement une corrélation décrivant le lien direct entre ce facteur et les performances du réacteur.

D'autre part, les caractéristiques hydrodynamiques dans les tuyaux, notamment la turbulence et le cisaillement (i.e. coefficient de friction), sont étroitement liées aux conditions d'agitation. Des vitesses d'écoulement excessives induisent une forte énergie et par conséquent des niveaux de turbulence élevés. Il en résulte des contraintes de cisaillement qui peuvent être préjudiciables à la culture par la destruction mécanique des cellules <sup>122</sup>. C'est pourquoi, on peut s'attendre à une corrélation multi-échelle importante entre l'intensité de la turbulence et la forme des microalgues pour évaluer les dommages potentiels causés par les interactions entre les cellules et les tourbillons. Par conséquent, l'agitation dans le tube devrait être tel que les dimensions des micro-tourbillons ne soient pas inférieures aux dimensions cellulaires <sup>123</sup>. L'échelle de longueur des micro-tourbillons de Kolmogorov (la théorie de la turbulence isotropique locale) <sup>124</sup> peut être estimée par :

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4)$$

avec  $\eta$ (m) est la taille des micro-tourbillons,  $\nu$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) est la viscosité cinématique et  $\varepsilon$  (m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>) est le taux de dissipation d'énergie.

Bien que cela dépende de la souche cultivée, *Molina et al.*, <sup>123</sup> signalent qu'une vitesse de circulation supérieures à 1 m.s<sup>-1</sup>, dans un tube de 0,06 m de diamètre, provoque un écroulement de la culture *P. tricornutum*. Pareillement, *Carlozzi et Torzillo* <sup>119</sup> ont rapporté un ordre de grandeur similaire de la vitesse maximale d'écoulement acceptable par la Spiruline (à savoir 0,97 m.s<sup>-1</sup>). La puissance spécifique nécessaire pour atteindre ces vitesses d'écoulement est

estimée à  $100 \text{ W.m}^{-3}$  en utilisant un Airlift et  $500 \text{ W.m}^{-3}$  dans le cas d'un pompage mécanique<sup>95</sup>. Cela explique les coûts d'agitation élevés, déclarés dans la littérature, ayant une contribution de 30% dans les coûts d'investissement totaux de ces systèmes<sup>121</sup>.

Les critères de conception mentionnés dans les paragraphes précédents (soient le diamètre et la longueur du tube ainsi que l'agitation) sont interdépendants et contraints par la concentration d'oxygène inhibitrice et les conditions de cisaillement qui peuvent endommager les cellules, il est donc difficile d'évaluer leurs effets séparément. Nous avons donc consacré le paragraphe 5 du **Chapitre I**) pour présenter l'influence de l'accumulation d'oxygène sur la croissance qui constitue l'obstacle majeur de la géométrie tubulaire des PBRs.

Cette présentation générale des photobioréacteurs tubulaires, issue de la littérature, n'a pas pour vocation première l'optimisation et le dimensionnement d'un système idéal de culture de microalgues. Néanmoins, elle permet d'identifier les enjeux de cette conception qui peuvent aider les producteurs à choisir et retenir leurs réacteurs en fonction de la connaissance de leurs caractéristiques. Les défis à relever pour contourner les restrictions du système PBRT sont généralement résumés dans les points suivants :

- Assurer à la culture un éclairage le plus uniforme possible car c'est le facteur prépondérant ;
- Optimiser l'orientation et conserver des ratios  $S_{\text{éclairée}}/V$  et  $R_f$  élevés et une faible épaisseur optique<sup>14</sup> pour réduire les zones sombres ; ces trois grandeurs sont les paramètres cruciaux caractérisant la géométrie du réacteur du point de vue dilution et distribution de la lumière ;
- Optimiser l'agencement des tubes pour réduire la surface occupée et augmenter les productivités qui peuvent compenser les coûts d'investissement ;
- Assurer un mouvement adéquat du milieu de culture, ce qui permet de maintenir l'homogénéité des nutriments dans le volume du réacteur, d'exposer la biomasse à la lumière disponible, de prévenir le stress de cisaillement qui endommage les cellules et d'éviter les pertes de  $\text{CO}_2$  et l'encrassement aux parois ;
- Réduire, autant que faire se peut, l'accumulation inhibitrice d'oxygène dans les tubes et le gradient de pH.

### C) Autres géométries moins courantes

Toujours à l'échelle industrielles, nous trouvons également les PBRs à colonne verticale. À cause de leur forme, dans certaines études<sup>68</sup>, cette technologie est classée avec les photobioréacteurs tubulaires. Ce type de système est peu coûteux, compact et facile à utiliser, leur diamètre est variable. Ils sont mélangés à l'aide du bullage par injection d'air à travers des diffuseurs ou spargers par le bas<sup>125</sup>. Dans cette catégorie, on peut trouver

---

<sup>14</sup> Épaisseur optique : paramètre clé pour le dimensionnement des PBRs, c'est le trajet lumineux parcouru par la lumière depuis la surface éclairée ; elle fournit une information sur la capacité d'atténuation de la lumière par les microalgues. Généralement, c'est la grandeur exprimée dans la partie exponentielle de la loi de Beer-Lambert.

également la configuration annulaire, une géométrie qui confère au PBR l'opportunité d'utiliser un éclairage artificiel radial sur la paroi et au centre <sup>39</sup>.

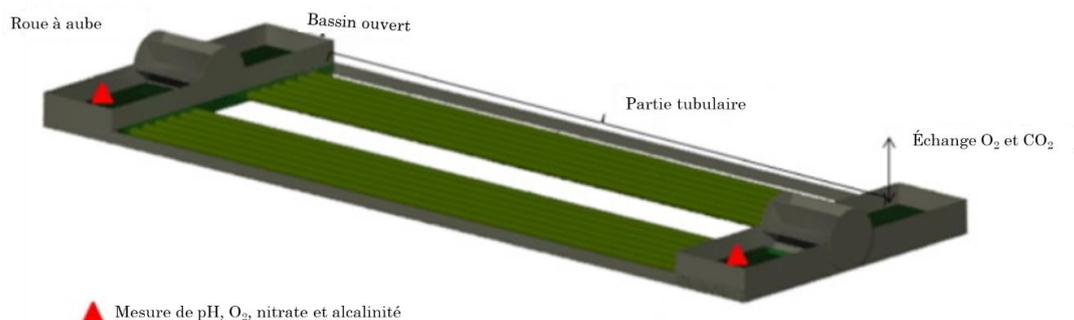
En plus de la source naturelle, les PBRs colonne sont généralement dotés d'un éclairage volumique interne par des sources artificielles pour prolonger les cultures solaires par un apport continu de la lumière. L'apport de cette dernière peut être maintenu le jour et la nuit. Sur cette base, des chercheurs se sont orientés vers la mise au point du concept de la captation et la dilution contrôlée<sup>15</sup> du flux solaire en volume via des fibres optiques internes dans un PBR cylindrique <sup>126,127</sup>. Ce type de PBR solaire optimisé a pour objectif d'accroître la productivité de la production industrielle de microalgues par l'optimisation de la répartition volumique de l'éclairage.

Une attention particulière a été accordée aux sacs en polyéthylène suspendus baptisés "PBRs Poly-bag". Ils sont également utilisés pour la production commerciale peu coûteuse et prometteuse des microalgues, car ils sont caractérisés par une surface d'exposition au soleil comparable à celle des panneaux plats. Cette technologie présente de nombreux avantages, notamment des niveaux de production élevés, des coûts d'investissements et d'exploitation moindres, une densité de biomasse élevée, une évolutivité industrielle et une faible consommation d'énergie <sup>128</sup>. Un système de culture pilote comprenant 20 sacs (chaque sac ayant une largeur de 20 cm et une longueur de 2 m, une épaisseur de matériau de 0,2 mm et un volume de 16 litres) en polyéthylène fixés sur un support en métal a été montré comme étant un PBR prometteur pour la culture solaire de *S. obliquus* <sup>129</sup>.

Des systèmes hybrides combinant les deux systèmes de culture ouverts et fermés sont aussi bien réputés pour exploiter les avantages de chaque système. Ce système comme le montre la **Figure 11**, est composé d'un photobioréacteur horizontal tubulaire lié à deux réservoirs à ciel ouvert de part et d'autre, situé à Barcelone (Espagne) <sup>130</sup>. La boucle tubulaire est constituée de 6 tubes pour chaque direction d'écoulement. Ils ont l'avantage d'avoir un rapport surface / volume élevé (suite à la géométrie tubulaire) et de profiter de l'évaporation pour baisser la température et de contrôler et suivre les différents paramètres opératoires notamment le pH et les concentrations de nutriments. La recirculation de la culture, à travers chaque série de tube, est assurée à l'aide d'une roue à aube mécanique <sup>130</sup>. Ces conceptions visent principalement la réduction des coûts de fonctionnement liés en majorité à l'énergie, tout en améliorant la production.

---

<sup>15</sup> Dilution de lumière : diminuer le flux de lumière auquel les microalgues sont soumises afin d'augmenter l'efficacité de la conversion des photons en biomasse.



**Figure 11** : Schéma représentatif d'un système hybride : un photobioréacteur horizontal tubulaire couplé à deux réservoirs à l'air libre contrôlé <sup>130</sup> (modifié).

#### D) Pionniers internationaux de PBRs tubulaires industriels

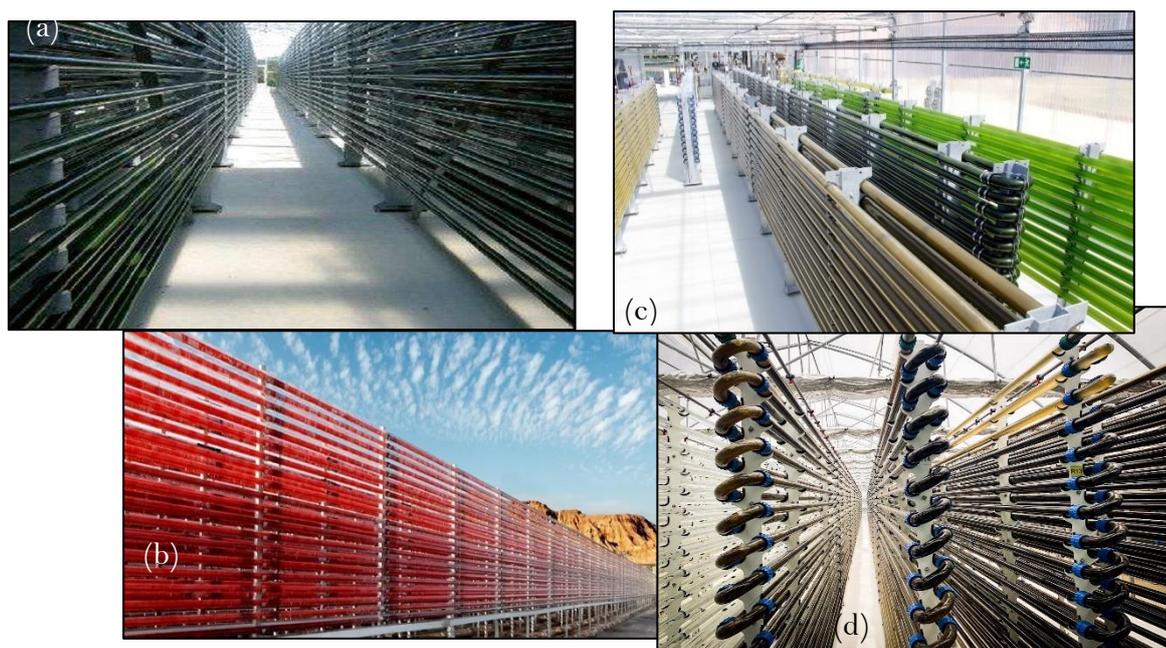
Comme nous l'avons vu dans la partie 1.2, il existe actuellement plusieurs entreprises cultivant les microalgues à grande échelle que ce soit en bassins ou en photobioréacteurs.

L'Allemagne est le premier producteur au niveau européen, depuis les années 2000, l'entreprise *Roquette Klötze GmbH & Co. KG* <sup>131</sup> exploite l'une des plus grandes installations industrielles mondiales de PBRs tubulaires en verre disposés verticalement pour la production de *Chlorella* <sup>64</sup>. À Klötze, la production annuelle de *Chlorella* est estimée de 30 à 60 t.an<sup>-1</sup> sous conditions saisonnières naturelles. Le volume total de la culture est d'environ 600 m<sup>3</sup>, réparti dans 500 km de tubes placés sous une serre <sup>132</sup>. Pareillement, *Salata GmbH* à Ritschenhausen en Allemagne, utilise un système similaire avec des modules d'un volume de 15 à 42 m<sup>3</sup> pour la production d'une douzaine d'espèce de microalgues et cyanobactéries entre autres, la Spiruline avec des productivités variant de 0,2 à 0,8 g.L<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> <sup>132</sup>.

Parallèlement, en Israël, l'usine *Algatechnologies Ltd* <sup>133</sup> procède à la production d'astaxanthine à partir d'*H. pluvialis* dans des PBRs tubulaires verticaux et horizontaux de 300 km de long, sur une surface de 1,2 ha. Par rapport aux deux premières usines de *Roquette Klötze* et *Salata* en Allemagne, les performances de l'usine israélienne sont largement renforcées par le rayonnement solaire élevé disponible dans le désert d'Arava (sud d'Israël) <sup>110</sup>.

Au Portugal, l'usine d'*AlgaFuel* à Pataias, exploite un des plus grand photobioréacteurs jamais construits. Il s'agit de tubes en PMMA de longueur totale de 330 km occupant un terrain de 1 ha pour une culture de *Chlorella* et *Nannochloropsis* de 1300 m<sup>3</sup>. Les tubes sont placés horizontalement dans une structure en forme de barrière pour former des murs verticaux <sup>134</sup>.

En France, bien qu'elle figure sur la liste des plus grands producteurs européens <sup>23</sup>, les filières de microalgues restent en grande majorité artisanales, malgré le développement de connaissances et de recherches dans ce secteur. Jusqu'à nos jours et à notre connaissance, le manque de technicité a fait qu'il n'existe pas d'usine de photobioréacteurs fermés pour la production industrielle avec une maturité technologique comparables à celles mentionnées dans les paragraphes ci-avant. Néanmoins, en 2007, une strat-up de biotechnologie en Occitanie baptisée *Microphyt*, s'est lancée dans le monde des PBRs tubulaires avec une unité de cinq photobioréacteurs (de 5000 L) sous serres, produisant des ingrédients actifs naturels pour les marchés de la cosmétique, de l'alimentation et de la santé **Figure 12**.



**Figure 12** : Les plus grands photobioréacteurs tubulaires en Europe et dans le monde. (a) Roquette Klötze GmbH & Co. KG en Allemagne <sup>131</sup>. (b) Algatechnologies Ltd en Israël <sup>133</sup>. (c) AlgaFuel à Pataias au Portugal <sup>134</sup>. (d) Microphyt <sup>135</sup>.

### 1.5. Évaluations des performances des PBRs solaires existants

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à comparer les avantages et les facteurs limitants des principaux systèmes solaires de production de microalgues existants <sup>45,68,97,129,136–138</sup>. La grandeur sur laquelle est basée la comparaison est généralement la productivité surfacique car la surface dédiée à la culture en masse des microalgues est une question cruciale pour les industriels, bien que ce type de culture (i.e. en utilisant les photobioréacteurs) n'ait pas besoin de terres arables. De plus, en augmentant la productivité surfacique, on réduit les surfaces occupées ce qui permettrait aux microalgues d'éviter de rentrer en compétition avec les autres plantes terrestres.

Comme nous l'avons déjà évoqué, pour améliorer les performances d'un photobioréacteur solaire, les approches de conception, présentées précédemment, se basent sur l'optimisation des paramètres d'ingénierie  $R_f$  et  $S_{\text{éclairée}}/V$ . Il faudrait donc :

- Augmenter sa surface éclairée ;
- Améliorer l'efficacité photosynthétique en diluant le flux solaire capté dans son volume.

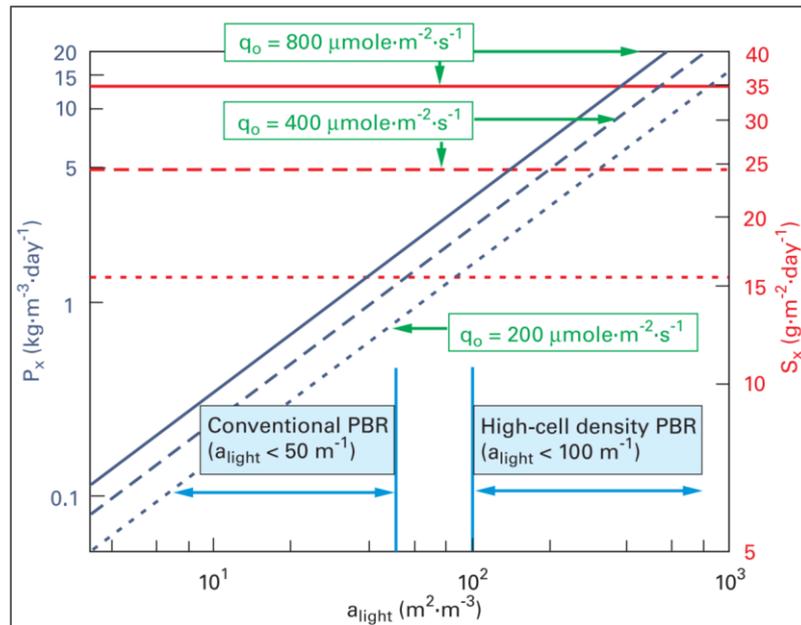
Dans la communauté du génie des procédés et bioprocédés c'est la productivité volumique qui prend plus de place dans la mise au point des procédés. Lorsque cette grandeur est élevée, le volume du réacteur est faible et en conséquence, les coûts d'investissement et de fonctionnement (à savoir coûts énergétiques liés à l'agitation, à la régulation thermique au pompage, à la récolte etc..) sont moindres. Ceci rend le procédé moins onéreux et plus rentable

si les concentrations de biomasse sont élevées. Ces considérations économiques sont déterminantes lors de l'étape de la mise à échelle du procédé.

Suivant ce principe, *Cornet et Dussap*<sup>139</sup> ont réalisé une comparaison entre les productivités expérimentales obtenues dans des types très différents de photobioréacteurs à éclairage artificiel, cultivant la Spiruline (*A. platensis*). Ils ont ainsi confirmé que les seuls paramètres de conception pour un réacteur sont le ratio  $S_{\text{éclairée}}/V$ , qu'ils ont appelé « surface spécifique éclairée  $\alpha_{\text{light}}$  », et la fraction volumique sombre  $f_d$ . En effet, la productivité volumique est améliorée en diminuant autant que possible l'épaisseur optique de la culture (i.e. en réduisant le volume du réacteur ou en augmentant la concentration de biomasse), ce qui revient à augmenter la surface spécifique éclairée sans pour autant modifier la forme d'hétérogénéité en lumière dans le volume. À partir de là, *Pruvost et Cornet*<sup>140</sup> ont mis en évidence la caractéristique spécifique de l'intensification des PBRs. En effet, ils ont démontré l'utilité d'opérer en PBR plat à couche mince ( $L < 0,01$  m avec une  $\alpha_{\text{light}} > 100\text{m}^{-1}$ ) par rapport aux géométries habituelles ( $\alpha_{\text{light}} = 20\text{m}^{-1}$  pour un PBR tubulaire de profondeur 0,05m,  $\alpha_{\text{light}} = 0,3\text{m}^{-1}$  pour un Raceway de profondeur 0,3 m). Cette conception développée par le GEPEA appelée « Algofilm » permet un fonctionnement solaire à très forte concentration et amène à des productivité volumiques  $> 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$ <sup>141</sup>.

En se basant sur le facteur d'ingénierie  $S_{\text{éclairée}}/V$ , *Pruvost et Cornet*<sup>140</sup> ont rendu compte de la possibilité d'augmenter considérablement la productivité volumétrique tout en maintenant la productivité surfacique. À titre comparatif, la **Figure 13** montre que la productivité volumique augmente avec le flux d'éclairement capté et avec la surface spécifique éclairée  $\alpha_{\text{light}}$  (le ratio  $S_{\text{éclairée}}/V$ ). En revanche, les productivités surfaciques ne dépendent pas de ce facteur de conception, elles sont directement proportionnelles à flux radiatif collecté. En effet, pour des sites fortement ensoleillés ayant des intensités moyennes journalières  $> 700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , les productivités volumiques sont plus que 5 fois supérieures en passant d'un système de captation solaire conventionnel avec  $S_{\text{éclairée}}/V < 1$  (ex. Raceway) à un système à faible épaisseur optique, tubulaire ou plat avec  $S_{\text{éclairée}}/V \approx 100$  (à culture dense). Quant à la productivité surfacique, elle reste maintenue quelle que soit la conception.

Remarque : il est à noter qu'à l'heure actuelle, il n'existe pas de consensus sur la manière d'exprimer les performances d'un photobioréacteur en termes de productivité surfacique. Comme déjà mentionné, elle est généralement donnée par la production rapportée au temps et à la surface de sol occupée. Cependant, dans les travaux de *Pruvost*<sup>140</sup>, l'approche adoptée est basée sur l'efficacité thermodynamique de conversion du rayonnement. Cette grandeur est donc exprimée en quantité de biomasse produite par unité de surface éclairée et par unité de temps. La différence entre les deux expressions ne se pose pas pour les systèmes plats horizontaux, mais devient cruciale lors du changement de configuration, notamment pour les géométries tubulaires horizontales, ou encore plus ou moins complexes, où la surface éclairée, qui régit cette grandeur, est différente de celle occupée au sol.



**Figure 13** : Influence de l'éclairement et du ratio  $S_{\text{éclairée}}/V$  du réacteur sur les productivités surfacique et volumique <sup>140</sup>.

Pour clôturer cet état de l'art sur les conceptions des réacteurs, nous présentons dans le **Tableau 6** un aperçu sur quelques ordres de grandeurs de performances réelles rapportées dans la littérature pour différentes technologies de PBRs solaires.

De ce point de vue, bien que les données du **Tableau 6** soient en faveur des photobioréacteurs plats (à faible épaisseur) en termes de productivités, on a déjà évoqué les différentes limitations technologiques que pose cette configuration et qui sont liées à son volume confiné, notamment les difficultés de transfert de gaz et d'agitation, le réchauffement rapide et l'encrassement par la formation des biofilms. En effet, il n'existe pas de conception idéale, des compromis doivent être établis entre les coûts d'investissement et de fonctionnement et les différents paramètres de cultures affectant les performances. Il existe encore une marge d'amélioration considérable pour répondre au besoin de connaissances et évoluer vers des systèmes de production industrielle prévisibles et plus efficaces que les bassins ouverts (les plus utilisés à grande échelle), tout en garantissant les coûts de production (i.e. les coûts économiques et les impacts environnementaux) et la consommation d'utilité (i.e. le bilan énergétique) les plus bas possibles.

**Tableau 6** : Comparaison des performances de différents concepts de PBR existants <sup>97,142</sup>.

Conception	Espèce	Localisation	Diamètre ou épaisseur (m)	$S_{\text{éclairée}}/V$ ( $\text{m}^{-1}$ )	$R_f$	Performances
PBR tubulaire verticaux	<i>Nannochloropsis</i> sp.	Pays-Bas	0,046	61,6	2,10	10,13 <sup>a</sup>
PBR tubulaire horizontaux	<i>Nannochloropsis</i> sp.	Pays-Bas	0,046	63,7	1,32	5,96 <sup>a</sup>
	<i>Spiruline</i>	Florence, Italie	0,074	17	-	8,21 <sup>a</sup>
Panneaux plats verticaux parallèle	<i>Nannochloropsis</i> sp.	Pays-Bas	0,02	100	1,45	50 <sup>b</sup>
	<i>Spiruline</i>	États- Unis	0,032	80	-	12-24 <sup>a</sup>
Raceway	<i>Nannochloropsis</i> sp.	Pays-Bas	0,2	5	1	4,2 <sup>a</sup>
	<i>Spiruline</i>	Florence, Italie	0,035	-	1	5,47 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> données expérimentales de la productivité surfacique moyenne annuelle ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$ )

<sup>b</sup> données de simulation de la productivité maximale annuelle ( $\text{g}\cdot\text{panneau}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ )

Enfin, bien que tout au long de cette section nous ayons présenté les différents procédés de production de microalgues en dégageant les éventuels verrous limitant leurs performances, nous ne visons guère une démarche d'optimisation ou d'amélioration pour proposer la conception et la conduite les plus performantes. Dans le présent travail, nous évaluons les performances d'un procédé de production de Spiruline relativement simple basé sur un réacteur semi-industriel modulaire de géométrie tubulaire reproductible, applicable au changement d'échelle par multiplication.

## 2. État de l'art sur les méthodes de prédiction des performances des photobioréacteurs au regard de la lumière

La simulation des photobioréacteurs est intrinsèquement complexe en raison de la dépendance inhérente de la biomasse aux conditions de son microenvironnement telles que la répartition de la lumière, la disponibilité des nutriments, la température et les contraintes de cisaillement conduites par l'écoulement hydrodynamique et ses propriétés, etc. Dans cette section, nous nous concentrons sur la lumière comme étant le facteur déterminant en supposant, dans un premier temps, que les autres facteurs ne sont pas limitants dans le procédé.

Dans la littérature, les modèles généralement utilisés pour la simulation des performances des PBRs varient considérablement dans les hypothèses émises, leurs coûts de calcul et leur capacité prédictive (i.e. sa validation) pour la conception et la mise en échelle du réacteur. Toutefois, tous ces modèles se basent sur de nombreuses hypothèses simplificatrices pour réduire la complexité résultant de l'interaction entre la photosynthèse, les variables environnementales et la fonction métabolique. Bien que la voie navigable pour la modélisation des photo-bioprocédés soit largement documentée <sup>140,143,144</sup>, le développement et l'amélioration des outils théoriques facilitant son accès sont toujours en cours d'effervescence.

Ici, l'ambition est de résumer quelques travaux de la littérature qui ont été consacrés au développement de méthodes numériques pour l'évaluation des productivités de la biomasse dans les photobioréacteurs. Ainsi, nous distinguons une catégorie d'études basées sur une formule analytique relativement simple et générale comme outil rapide d'estimation des performances potentielles maximales <sup>139</sup>, et une autre où les chercheurs ont opté pour une approche de modélisation, plus approfondie, basée sur le couplage de sous-modèles constitutifs décrivant les processus qui se mettent en place et qui déterminent les performances du réacteur, notamment le transfert radiatif <sup>49,145-148</sup>, l'écoulement de fluide par la CFD <sup>149-153</sup>, le transfert de masse <sup>154,155</sup>, et la cinétique photosynthétique de la biomasse <sup>60,156</sup>. Nous allons donc aborder ces deux catégories afin de répondre à la question de notre choix de modélisation et d'initier une des démarches entreprises dans notre travail qui sera détaillée dans le [Chapitre II](#).

### 2.1. Formules générales pour l'évaluation de la productivité dans un PBR

*Cornet et Dussap* <sup>139</sup> ont proposé des formules simples et prédictives pour l'évaluation des performances cinétiques et énergétique des PBR avec un grand intérêt d'être appliquée dans le domaine de l'ingénierie des PBRs. Les auteurs se sont focalisés dans leur approche de modélisation sur la distribution et la disponibilité de la lumière dans le volume, facteur clé dans ces technologies, et ses effets et conséquences sur les productivités volumiques moyennes de la biomasse en considérant tous les autres paramètres maintenus à leurs valeurs optimales (i.e. non limitants).

En considérant la théorie de la fraction éclairée au sein du volume, en d'autres termes le volume réactionnel dans lequel la photosynthèse se réalise, qui est définie comme le ratio du volume éclairé sur le volume total (à partir de la localisation du point de compensation d'irradiance,  $\gamma = \frac{V_l}{V_{total}}$ ), les mêmes auteurs <sup>49,53</sup> ont déjà proposé un modèle structuré pour décrire le taux de croissance volumétrique moyenne en ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ) notée  $\langle r_{X,l} \rangle$  comme l'intégrale spatiale sur le volume éclairée  $V_l$  du taux de cinétique local  $r_{X,l}$  en s'appuyant sur le couplage avec l'irradiance local  $I$ , le rendement énergétique  $\rho$ <sup>16</sup> et la rendement quantique massique de conversion moyen  $\bar{\phi}$ <sup>17</sup> (en utilisant des analyses de principe du transfert d'énergie d'excitation dans l'antenne photosynthétique vers le centre de réaction puis du schéma Z de la photosynthèse) :

$$\langle r_{X,l} \rangle = \gamma \cdot \frac{1}{V_l} \cdot \iiint (\rho_{max} \frac{K}{K+I} \cdot \bar{\phi} \cdot E_a \cdot X \cdot I) dV \quad (5)$$

avec  $(E_a \cdot X \cdot I)$  est défini comme la vitesse volumique d'absorption des photons ( $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ) soit le produit de la section d'absorption massique  $E_a$  ( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ), par l'irradiance locale  $I$  ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et par la concentration de biomasse  $X$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Pour développer cette équation, les auteurs ont d'abord établi le champ de distribution du flux radiative dans le volume du PBR pour un cas simple (i.e. rectangulaire et relativement mince) permettant de réduire le modèle de transfert radiatif (ou Equation de Transfert Radiatif) à une forme simplifiée monodimensionnelle et de proposer ainsi une solution analytique <sup>148</sup> se basant sur l'approche de deux flux pour quantifier la valeur de  $I$  et pouvoir la coupler au modèle cinétique (voir 2.2.2 plus loin) .

En avançant quelques hypothèses restrictives à la conception et aux conditions d'éclairage utilisées, ils ont pu effectuer l'intégrale de l'Eq (5) et proposer une première approximation simple du taux de croissance volumétrique maximal atteint  $\langle r_{X,l} \rangle_{max}$  afin d'étendre le résultat, à n'importe quelle géométrie en définissant la zone éclairée spécifique du PBR (i.e. le facteur d'ingénierie  $S_{éclairée}/V_{total}$ ) au lieu de la fraction éclairée  $\gamma$  comme suit :

$$\langle r_{X,l} \rangle_{max} = \rho_{max} \cdot \bar{\phi} \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{S_{éclairée}}{V_{total}} \cdot q_{\Omega} \quad (6)$$

où  $\alpha$  est un facteur prenant en compte l'absorption et la diffusion linéaire ainsi que la fraction rétrodiffusée de la lumière par les cellules de microalgues <sup>148</sup> et  $q_{\Omega}$  est la densité de flux radiatif hémisphérique incident homogène et quasi collimaté.

---

<sup>16</sup> Le rendement énergétique  $\rho$  est la partie dissipative de l'énergie absorbée par l'antenne. Elle est donnée par <sup>157</sup>:  $\rho = \rho_{max} \cdot \frac{K}{K+G}$  avec  $K$  est une caractéristique de la teneur en pigments de l'antenne photosynthétique.

<sup>17</sup> Le rendement quantique de masse moyen  $\bar{\phi}$  ( $\text{kg}_X\cdot\mu\text{mol}^{-1}$  de photon) correspond à la partie conservatrice de l'énergie photonique absorbée dans le réacteur (la partie des processus photoniques conduisant à une séparation de charges au centre de la réaction) <sup>139</sup>.

Bien que cette formulation ait montré une bonne validité pour la cas étudié (i.e. un PBR plat mince), son champ d'application reste restreint à une conception et des conditions d'éclairage particulières. En effet, dans le même travail <sup>139</sup>, les auteurs signalent son caractère limitatif, c'est pourquoi ils se sont affranchis des restrictions utilisées (i.e. liés à la géométrie, la nature du flux radiatif incident) dans la construction de l'expression (6) pour la généraliser à des cas plus ou moins complexes de PBR utilisés dans la pratique. Ils ont alors développé une formule plus générale pour estimer la productivité volumique maximale atteinte dans toute forme de PBR rencontrée dans la littérature à partir de la formule mathématique suivante :

$$\langle r_{X,l} \rangle_{max} = \rho_{max} \cdot \bar{\Phi} \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{S_{\text{éclairée}}}{V} \cdot \frac{K}{\left(\frac{n+2}{n+1}\right)} \cdot \ln\left[1 + \frac{\frac{n+2}{n+1} \cdot q_n}{K}\right] \quad (7)$$

En rajoutant un terme de correction  $\frac{n+2}{n+1}$  pour prendre en compte le degré de collimation  $n$  du flux radiatif incident pour les cas où le flux de photons incidents non collimatés (comme la composante diffuse du rayonnement solaire), les auteurs rapportent que cette formule a reçu une validation expérimentale assez satisfaisante (avec un écart maximal de 15% pour la cyanobactérie *A. platensis* à l'échelle du laboratoire), ce qui lui offre la qualité d'un outil robuste pour la simulation des performances d'une variété de configuration PBR.

Dans des travaux plus récents, l'expression du taux de croissance volumique maximal Eq(7) a été encore plus étendue pour une application solaire à travers l'inclusion de l'angle d'incidence du rayonnement collimaté  $\theta$  et ainsi évaluer les productivités maximales éventuelles dans un PBR rectangulaire en conditions solaires pour la production de *A. platensis* et *Chlamydomonas reinhardtii* <sup>88,158-160</sup>. L'équation(8) tient compte des deux composantes de la radiation solaire : la composante diffuse où  $n = 1$  et  $\theta = 0$  ; et la composante directe collimatée où  $n = \infty$  et  $\theta \in [0; \pm \frac{\pi}{2}]$  avec  $q$  est le flux radiatif solaire total (diffus + direct) et  $x_d$  est la fraction de la composante diffuse :

$$\langle S_X \rangle_{max} = \rho_{max} \cdot \bar{\Phi} \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{S_{\text{éclairée}}}{V} \cdot K \cdot \left[ \frac{x_d}{2} \cdot \ln\left[1 + \frac{2 \cdot q}{K}\right] + (1 - x_d) \cdot \cos(\theta) \cdot \ln\left[1 + \frac{q}{K \cdot \cos(\theta)}\right] \right] \quad (8)$$

Cependant, il est à noter que malgré leur simplicité et fiabilité, de nombreux défis restent à relever avant que ces formules puissent être largement utilisées pour toute sorte de conceptions de PBR notamment ceux extérieurs. En effet, elles n'évaluent que les performances maximales atteignables dans un système de production fonctionnant en atténuation de lumière optimale (i.e. régime cinétique  $\gamma=1$ ) ce qui ne reflète pas exactement les productivités réelles obtenues dans les cas pratiques où le taux de croissance réel est souvent impacté par les régimes lumineux reçus provoquant la photoinhibition ou la limitation. En outre, à notre connaissance, il n'existe pas encore des travaux expérimentaux permettant d'étendre le domaine de validité de ces expressions notamment au cas d'un photobioréacteur tubulaire solaire.

En revanche, bien qu'un terme de correction lié à la nature du flux de photons incident (collimaté ou non) soit introduit dans la formule générale finale, la solution analytique de transfert radiatif utilisée pour décrire le profil de lumière dans le milieu manque de précision en raison des approximations simplificatrices envisagées pour réduire le problème à une atténuation unidimensionnelle en considérant l'absorption et la diffusion linéaire alors que le phénomène de transport de lumière sont d'autant plus complexes et fortement dépendants de la géométrie et des conditions d'éclairage.

Plus encore, le couplage cinétique avec le champ spatial d'irradiance, à partir duquel sont issues ces formules, d'une part, ne met pas en évidence le comportement de la biomasse quant à l'hétérogénéité locale en lumière au sein du volume car, selon l'écriture des formules, l'influence de la lumière sur les performances maximales du réacteur s'applique à travers l'efficacité de conversion photosynthétique qui est liée uniquement au rayonnement hémisphérique incident à l'échelle de tout le PBR (i.e. aux parois). D'autre part, ces formules ne maîtrisent pas l'effet de l'agitation ou la circulation de la biomasse dans le volume réactionnel a fortiori lorsque la fraction éclairée  $\gamma < 1$  (c'est-à-dire qu'il existe un fort gradient lumineux avec des fractions de volume en obscurité non négligeables). Or, il est bien connu qu'en plus de l'inhomogénéité de la distribution d'éclairage, l'exposition périodique à des cycles lumière/obscurité impacte rigoureusement la cinétique de croissance et l'efficacité de conversion photosynthétique <sup>161</sup>.

Bien entendu, cela ne remet pas en cause le caractère général et prédictif de ces expressions. Quand bien même sous leur forme simple, elles sont d'un intérêt considérable pour la communauté scientifique de photobioprocédés, notamment du point de vue d'une comparaison de leur capacité prédictive à des modèles et corrélations plus complexes décrivant la relation entre les différentes interactions intrinsèques se produisant au sein du réacteur.

## **2.2. Approches de simulation par couplage de sous-modèles**

À notre connaissance, pour l'évaluation du taux de croissance photosynthétique, les approches susmentionnées se concentrent sur la réponse instantanée des microalgues à la lumière locale. En effet, ces simulations n'incluent pas la réponse dynamique des cellules à la lumière réellement vue lorsqu'elles se déplacent le long du gradient lumineux, ce qui permet de rendre compte de l'effet des cycles lumière/obscurité appelés « lumière clignotante » <sup>162-164</sup>. Cet effet, qui est entraîné par la combinaison du mélange (grande échelle tourbillonnaire et turbulence locale) et de l'hétérogénéité spatiale de la lumière, dépend de la géométrie du bioréacteur. Des études expérimentales et de modélisation de PBR éclairés à l'échelle du laboratoire pour différentes espèces ont fréquemment montré que le mélange peut induire une gamme de niveaux de lumière fluctuants, avec des fréquences allant de 0,05 à 50 Hz, tandis que des fréquences supérieures à 1 Hz peuvent améliorer les performances du PBR <sup>96,151,165,166</sup>.

Pendant ces deux dernières décennies, plusieurs études de simulation numérique se sont intéressées à la modélisation de l'effet du couplage de l'hydrodynamique, du champ d'irradiation et de la cinétique en utilisant différentes approches. Selon le classement proposé par *Béchet* <sup>167</sup> mentionné précédemment, ces approches sont catégorisées dans le type III qualifiées de mécanistes et capables de tenir compte des variations temporelles de l'exposition

à la lumière. Il n'en demeure pas moins que ce couplage constitue une tâche difficile compte tenu de la complexité des phénomènes fondamentaux à prendre en compte et qui ont lieu sur des échelles de temps très disparates.

Parmi ces approches, on retrouve celle adoptée par *Wu* et *Merchuk* <sup>168,169</sup> qui ont utilisé le temps de circulation dans une colonne à bulle et dans un réacteur à air pulsé à boucle interne (respectivement) pour coupler les trajectoires des cellules, avec un modèle de transfert radiatif simple utilisant la loi de Beer-Lambert. Ces trajectoires ont été calculées a priori individuellement sans avoir recours à la résolution du champ hydrodynamique, et combinées avec le profil de lumière afin d'avoir l'histoire lumineuse des cellules nécessaire pour la détermination du taux de croissance. Ainsi, la confrontation de leurs simulations aux expériences a obtenu des résultats satisfaisants.

L'approche de simulation lagrangienne est la plus courante pour le calcul des trajectoires de l'histoire de la lumière vue par les cellules qui peuvent être directement couplées aux modèles de croissance. Le principe de cette approche repose sur le suivi d'un nombre de trajectoires de particules suffisamment grand pour produire des informations statistiquement significatives pour l'historique d'exposition à la lumière cellulaire. Les traces de particules de microorganismes dans le milieu peuvent être obtenues soit à l'aide d'expériences de suivi automatisé de particules radioactives (CARPT) <sup>170</sup>, soit au moyen de simulations : (i) par des simulations numériques directes (DNS) <sup>171</sup>, (ii) en se basant sur la prédiction de champ de vitesse à partir de la CFD pour des PBRs : annulaires et à bulles <sup>172-174</sup>, torique <sup>149,150</sup>, plat <sup>175</sup> ou d'autre géométries (une liste exhaustive des PBRs étudiés par CFD au cours de la dernière décennie se trouve dans la revue de *Bitog et al.*, <sup>176</sup>), ou bien (iii) par approche stochastique utilisant un modèle de marche aléatoire appliquée pour un PBR tubulaire <sup>177,178</sup>.

D'autres approches plus ou moins complexes ont été proposées pour évaluer les performances de différentes configurations de photobioréacteur <sup>179</sup>. La dynamique de l'exposition des microalgues à la source lumineuse dépend à la fois de la conception du photobioréacteur et des conditions de fonctionnement. Deux phénomènes jouent un rôle important dans l'histoire du rayonnement dans la cinétique biologique de la biomasse : le champ lumineux dans la suspension et la trajectoire cellulaire dans le photobioréacteur.

### 2.2.1. Simulation de la turbulence

Dans le photobioréacteur, la turbulence, induite par le mélange, joue un rôle clé pour le transport et la distribution des espèces chimiques et microalgues dans le volume. Par ailleurs, il s'agit d'un transport diffusif responsable des cycles lumière/obscurité auxquels les microalgues sont exposées lorsqu'elles passent des surfaces fortement irradiées à des régions de faibles irradiances. Dans les conceptions dépourvues de structures turbulentes c'est-à-dire à écoulement laminaire, les microalgues éprouvent un régime d'éclairement constant pendant une longue durée provoquant, selon l'intensité lumineuse de la zone où elles se trouvent, des conditions de photo-inhibition ou de photo-limitation qui entravent leur efficacité photosynthétique <sup>180-182</sup>. En revanche, il a été démontré à travers plusieurs travaux que la navette rapide entre les zones éclairées et sombres permet de rendre compte de l'effet appelé "lumière clignotante" qui améliore considérablement le taux de photosynthèse <sup>51,62,166,172,183,184</sup>. La description la plus précise du flux de microalgues dans le photobioréacteur est très coûteuse

car elle implique la résolution d'une équation de Newton pour chaque cellule couplée aux modèles de Navier-Stokes pour la phase continue.

En général, dans les réacteurs gaz-liquide, la turbulence dans la phase liquide est modélisée à l'aide d'un modèle standard de viscosité turbulente ou du modèle de contrainte de Reynolds. En même temps la phase gazeuse est souvent supposée être laminaire. Le modèle de turbulence standard le plus utilisé pour la phase liquide est le modèle k- $\epsilon$  et ses variantes en raison de sa simplicité <sup>152,185–187</sup>. Pour certains cas tels que les réacteurs à écoulements rotationnels (à savoir le PBR torique), ce modèle est remplacé par le modèle de k- $\omega$  qui est jugé plus performant <sup>149,188</sup>.

Pour enregistrer les mouvements des particules de biomasse dus à la turbulence du milieu de culture dans le réacteur et donc accéder aux données de l'exposition de lumière, de nombreux articles ont adopté une approche de marche aléatoire Lagrangienne. Une discussion détaillée de ce modèle peut être trouvée dans la littérature <sup>189–191</sup>. En effet, le transport des cellules dans le photo-bioréacteur peut être décrit par la diffusivité turbulente notée  $D_T$ . *Olivieri et al.*, <sup>178</sup> ont évalué les positions à chaque instant  $\vec{p}$  des particules dans trois géométries de PBR différentes (plan, tubulaire et annulaire) selon le modèle de diffusivité proposé par *Hunter* <sup>192</sup> :

$$\vec{p}_{(t+dt)} = \vec{p}_{(t)} + \sqrt{2 D_T \Big|_{\vec{p}_{(t)} + \frac{1}{2} \vec{\nabla} D_T dt}} dt \cdot \vec{\epsilon} + \vec{u}_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}} \cdot dt \quad (9)$$

où  $\sqrt{2 D_T \Big|_{\vec{p}_{(t)} + \frac{1}{2} \vec{\nabla} D_T dt}} dt \cdot \vec{\epsilon}$  représente la composante diffusive aléatoire pure du mouvement dont  $\vec{\epsilon}$  est le vecteur aléatoire,  $\vec{\nabla} D_T \Big|_{\vec{p}_{(t)}} \cdot dt$  est la composante déterministe du mouvement et  $\vec{u}_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}} \cdot dt$  est la composante convective du flux liquide régis par la vitesse instantanée à une position donnée  $\vec{u}_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}}$ .

Dans la même optique, *Pruvost et al.*, <sup>150</sup> ont calculé les positions des particules dans un PBR torique au moyen de la vitesse instantanée comme suit :

$$\vec{p}_{(t+dt)} = \vec{p}_{(t)} + \vec{u}_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}} \cdot dt \quad (10)$$

Où la vitesse instantanée est exprimée en fonction de la vitesse moyenne du liquide  $\overline{u}_L$

$$\vec{u}_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}} = \overline{u}_L + \vec{u}'_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}} \quad (11)$$

déterminée à partir des résultats de la CFD et de la partie fluctuante  $\vec{u}'_L \Big|_{\vec{p}_{(t)}}$ .

Pour les fluctuations de vitesses induites par la structure spatiale des tourbillons, les auteurs ont opté pour une formulation Langevin afin de prendre en compte d'une part, le caractère purement stochastique de cette partie, et d'autre part, les structures turbulentes dans le champ

d'écoulement. Une approche quasi-similaire est entreprise dans notre étude et la méthodologie sera détaillée dans le [Chapitre III](#).

### 2.2.2. Simulation du transfert radiatif

La simulation du champ d'irradiation local dans les photobioréacteurs doit prendre en compte le bilan énergétique de la lumière, y compris la transmission, l'absorption, la diffusion dans la culture d'algues, ainsi que la géométrie de la surface éclairée (ex. courbures des parois). La forme différentielle directionnelle de l'ETR (The integro-differential Radiative Transfer Equation <sup>193</sup>), en régime quasi permanent, s'écrit pour un chemin optique  $s(\vec{r}, \vec{\Omega})$  et une longueur d'onde  $\lambda$  considérée selon *Cornet* <sup>194</sup> :

Le premier terme du membre de droite correspond à la décroissance de la lumière due à

$$\frac{dI_\lambda(s, \vec{\Omega}, t)}{ds} = -(a_\lambda + \sigma_\lambda) \cdot I_\lambda(s, \vec{\Omega}, t) + \frac{\sigma_\lambda}{4\pi} \iint_{4\pi} I_\lambda(s, \vec{\Omega}', t) \cdot p_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad (12)$$

l'absorption et à la diffusion dans la suspension de microalgues où  $a_\lambda(s, t)$  et  $\sigma_\lambda(s, t)$  sont les coefficients spectraux linéiques d'absorption et diffusion respectivement. Et le second terme représente la diffusion multiple de la radiation avec la fonction de phase de diffusion  $p_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$ . Ces paramètres définissent les propriétés radiatives du milieu étudié (ils sont variables dans le temps et dépendants de la concentration de la biomasse dans le milieu). Cependant, en raison de la complexité de la résolution analytique ou même numérique de l'équation lorsque tous les phénomènes sont inclus, certaines approches basées sur des approximations peuvent être trouvées dans la littérature.

Par exemple, la loi de Beer-Lambert invoquant des hypothèses restrictives, notamment, application pour une lumière monochromatique, la négligence de la diffusion, le déplacement de la lumière dans une seule direction, a été largement utilisée pour estimer l'atténuation interne de la lumière dans différents designs de photobioréacteur <sup>107,195-198</sup>. Sa formule est dérivée de l'équation générale du transfert radiatif :

$$I = I_0 \cdot \exp(-K_a \cdot p \cdot X) \quad (13)$$

avec  $I$  est le flux de photons local,  $I_0$  est le flux de photons incidents,  $p$  est la longueur du trajet optique,  $X$  est la concentration de la biomasse,  $K_a$  est le coefficient d'extinction. Pour améliorer sa capacité de rendre compte de l'effet des fortes concentrations de biomasse dans le milieu certains travaux ont proposé une fonction hyperbolique pour le calcul du coefficient d'extinction <sup>199</sup>. Pour pallier aux limitations de la loi de Beer-Lambert et prendre en compte la diffusion par les cellules de microalgue, plusieurs solutions analytiques et numériques ont été proposées. Entre autres, nous retrouvons « l'approche P1 » qui s'appuie sur une solution analytique approximative de l'ETR en supposant que l'énergie est distribuée uniformément dans toutes les directions (i.e. isotropie). Cette approche a été largement appliquée pour les réacteurs photo-catalytiques solaires tubulaires à titre d'exemple <sup>200</sup>.

Dans le domaine des photobioréacteurs, l'approximation de « deux flux » proposée par *Cornet et al.*, <sup>49,53,145,201</sup> a été extensivement utilisée pour résoudre le champ de lumière dans le volume. Le problème d'atténuation de lumière y est réduit à un modèle monodimensionnel en considérant une diffusion linéaire suivant deux directions de propagation (vers l'avant et vers l'arrière ou rétrodiffusion), d'où son nom.

Pour une incidence collimatée de radiation, le profil d'irradiance dans un cas de PBR rectangulaire simple est donné par en fonction de l'axe  $z$  et de la profondeur  $L$  par :

$$I(z) = I_0 \cdot 2 \cdot \frac{(1 + \alpha) \cdot \exp[-\delta(z - L)] - (1 - \alpha) \cdot \exp[\delta(z - L)]}{(1 + \alpha)^2 \cdot \exp(\delta L) - (1 - \alpha)^2 \cdot \exp(-\delta L)}$$

Avec

$$\delta = X \cdot \sqrt{E_a(E_a + 2 \cdot b \cdot E_s)} \quad (14)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{(E_a + 2 \cdot b \cdot E_s)}}$$

Les paramètres  $E_a$ ,  $E_s$  et  $b$  sont le coefficient massique d'absorption, de diffusion et la fraction rétrodiffusée par les cellules respectivement. Ces paramètres sont des propriétés spécifiques à la biomasse étudiée.

Ce modèle a été appliqué pour la cyanobactérie *A. Platensis* <sup>159</sup> et *Chlamydomonas reinhardtii* <sup>148,202</sup> avec une adaptation de la formule pour prendre en compte de l'effet de non collimation de la lumière.

Bien que cette solution analytique ait démontré des résultats intéressants et soit extrêmement célèbre, elle souffre de quelques limitations notamment concernant sa simplicité, l'unidimensionnalité de la propagation de la radiation et le manque d'universalité de son application pour des cas plus ou moins complexes. Dès lors, d'autres études ont opté pour des méthodes numériques de résolution telles que la méthode des volumes finis <sup>203</sup>, la méthode de Galerkin discontinue <sup>204</sup>, et la méthode de Monte Carlo appliquée à un réacteur photocatalytique plan <sup>205</sup> ou à différentes géométries de PBR <sup>127,146,206,207</sup>. Les méthodes de résolution de l'ETR sont nombreuses et utilisées dans un panel de spécialité de thermique et physique. Cependant, il est hors de question ici de toutes les passer en revue, nous avons choisi de présenter les plus couramment appliquées dans le monde des photobioréacteurs.

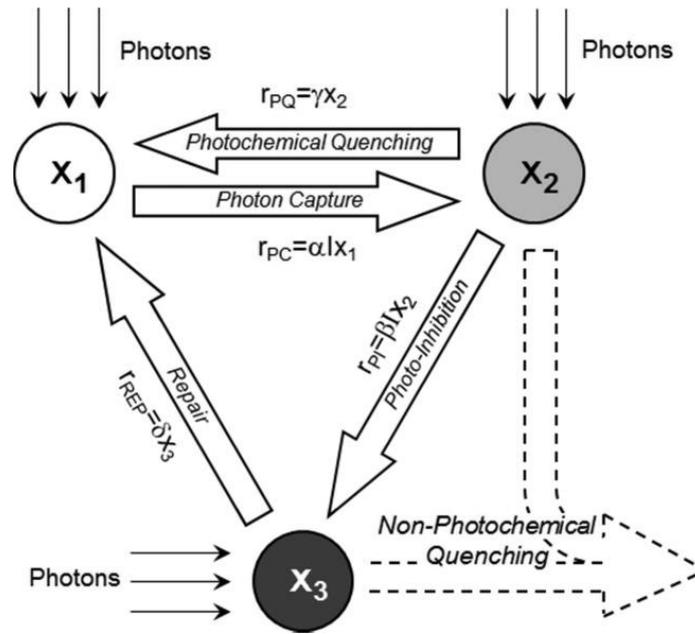
Dans notre étude, c'est la méthode de Monte Carlo <sup>208</sup> qui a été retenue comme une approche appropriée pour la modélisation multi-phénomènes (les détails de la méthodologie de cette approche sont présentés dans le [Chapitre III](#) et exhaustivement dans la thèse de *Gernigon* <sup>39</sup>).

### 2.2.3. Modèles biologiques dynamiques

#### A) Modèles basés sur l'unité du système photosynthétique PSU

Étant donné que l'apport de lumière est le facteur clé dans les performances des PBR fermés, il existe une variété d'approches de modélisations mathématiques pour décrire la dépendance du taux de photosynthèse à ce paramètre, notamment en termes de la disponibilité de la lumière et de l'adaptation à la lumière. Dans le cas des PBRs hétérogènes en distribution de lumière, lorsque les concentrations de biomasse sont élevées (ou faible trajet lumineux), tout modèle photosynthétique utilisé pour simuler les performances du réacteur doit faire preuve d'une capacité à tenir compte des forts gradients de lumière et des variations temporelles de l'exposition à la lumière, y compris des cycles Lumière/Obscurité courts, ainsi que la réponse biologique des cellules à ces variations.

Ainsi, un modèle biologique robuste est nécessaire pour décrire correctement l'effet des changements de lumière sur la dynamique de la photosynthèse. Certains modèles mécanistiques existants impliquent des processus métaboliques internes agissant à différentes échelles de temps (i.e. photoinhibition et acclimatation) <sup>61,209–212</sup>. Ces travaux sont généralement basés sur le concept d'unité photosynthétique PSU initié par *Eilers et Peeters* <sup>156</sup>. Il s'agit de considérer l'usine photosynthétique comme un bloc caractérisé par trois états : ouvert ou au repos, activé ou fermé, et endommagé ou non fonctionnel, indiqués par  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  respectivement comme représenté dans la **Figure 14**. Ce principe a été repris plus tard par certains chercheurs pour rendre compte de l'effet de la photo-inhibition et de la réparation du PSU endommagé dans un contexte d'extinction photochimique et non photochimique ainsi que du phénomène de photo-acclimatation sur la réponse dynamique des processus photosynthétiques <sup>60,213,214</sup>. En effet, le PSU devient activé lorsqu'il capture un certain nombre de photons pendant le processus de capture. À partir de ce moment, le bloc peut avoir deux destins : soit revenir son état naturel en transférant l'énergie à la voie photosynthétique successive (trempe photochimique), ou il continue d'être irradié et il passe à un état d'extinction non photochimique où il dissipe l'excédent de cette énergie radiative capturée. Le processus de photo-inhibition se déclenche lorsque l'extinction photochimique n'assure pas le retour la dissipation nécessaire du surplus énergétique. Dans ce cas, tout photon supplémentaire provoque l'inhibition et le PSU se retrouve en état endommagé.



**Figure 14 :** Schématisation de l'approche d'Eilers et Peters <sup>156,214</sup>.

Ce concept est exprimé par trois équations indiquant les trois états du bloc photosynthétique de la capture de photons à la photoinhibition <sup>208</sup> :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\alpha \cdot I \cdot x_1 + \gamma \cdot x_2 + \delta \cdot x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = \alpha \cdot I x_1 - \gamma \cdot x_2 - \beta \cdot I \cdot x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = \beta \cdot x_2 - \delta \cdot x_3 \end{cases} \quad (15)$$

Des modèles plus ou moins complexes qui tentent de représenter le comportement dynamique ont également été répertoriés dans la littérature <sup>160,215–218</sup>, entre autres nous retrouvons ceux dits « physiologiques » qui tiennent compte d'un nombre considérable de variables à l'intérieur de ces cellules <sup>219,220</sup>. Cependant, malgré leur robustesse pour décrire le comportement dynamique de la biomasse, l'application de ces concepts pour la simulation nécessite la calibration de tous les paramètres du modèle pour l'espèce étudiée. De plus, leur précision de calcul est compromise par la large gamme d'échelles spatio-temporelles des phénomènes cinétiques et hydrodynamiques impliqués dans ce processus. Cela limite donc leur utilisation dans la modélisation à grande échelle.

## B) Modèle de relaxation : Du premier ordre

*Gernigon et al.*, <sup>39,172</sup> ont proposé un modèle dynamique du premier ordre pour relier la réponse des algues aux fluctuations lumineuses afin d'estimer le taux de croissance réel dans un PBR. Ce modèle considère l'histoire lumineuse des cellules et représente les caractéristiques internes de la microalgue pour croître par une variable d'état qui détermine la cinétique de la réponse biologique. Il s'agit d'un modèle qui implique un temps de réponse de la cellule (i.e. temps de relaxation) aux variations de la lumière perçue. Contrairement aux modèles précédents, cette approche conduit à une expression simple du taux de photosynthèse,

qui se prête facilement à une analyse mathématique. Ce modèle, utilisant un seul paramètre qui est le temps caractéristique de l'adaptation de la variable en question aux régimes lumineux parcourus, est plus facile à calibrer que les modèles basés sur la PSU. De plus, il a démontré ses capacités prédictives pour notre souche d'intérêt sur la base de plusieurs données de la littérature [62,221](#). En effet, sa structure et ses propriétés mathématiques ont été bien établies pour un PBR éclairé par une lumière artificielle constante. Ainsi, afin de contribuer à l'effort continu de modélisation de notre équipe de recherche, le présent travail s'appuie sur ce modèle déjà validé pour étendre son champ d'application à un cas de PBR tubulaire fonctionnant en conditions extérieures solaires.

### 3. Conclusion et positionnement du contexte scientifique

L'étude bibliographique réalisée et présentée dans ce chapitre a permis d'abord de passer en revue succinctement les généralités autour de la filière de microalgues et des cyanobactéries (son histoire, son attrait croissant au cours du temps et sa situation actuelle aux échelles mondiale et européenne). Au sein de cette partie, il a été nécessaire de recenser les différentes technologies existantes en identifiant les problèmes d'ingénierie souvent rencontrés dans la phase de production solaire, qui impactent fortement les performances (cinétiques, énergétiques) et la rentabilité de la filière dans son intégralité.

La cyanobactérie traitée dans ce travail, à savoir *Arthrospira platensis* est l'une des principales produites au monde, elle a des caractéristiques particulières qui imposent des conditions de culture bien spécifiques. Il a fallu alors aborder, par une brève présentation, ses caractéristiques biologiques, ainsi que ses mécanismes métaboliques afin d'appréhender comment ces exigences ont un impact sur sa réponse biologique.

La croissance photosynthétique nécessite la lumière, c'est pourquoi, toutes les études de modélisation accordent une importance cruciale à ce paramètre. Au regard de l'utilisation de ce dernier, il y a une particularité à garder en tête, qui complique les approches de simulation des photobioréacteurs comme détaillé dans la dernière section de ce chapitre : le caractère multiphysique des phénomènes se manifestant dans son volume et le couplage des uns aux autres. Nous avons pu constater à travers l'analyse de plusieurs travaux de la littérature que les performances de ce type de réacteur, lorsque les autres conditions opératoires sont optimales, sont essentiellement déterminées par l'interaction complexe entre au moins trois phénomènes fondamentaux à savoir, le transfert radiatif, l'écoulement du fluide, et la cinétique biologique de la biomasse. Par conséquent, une modélisation fouillée requiert des sous-modèles correspondants d'une part, à la description des phénomènes (individuellement), et d'autre part, à la prise en compte de leur couplage et de sa conséquence sur le comportement biologique. Ceci n'est pas trivial, car un degré de complexité est ajouté du fait de leur nature multi-échelle. En effet, les mécanismes impliqués se déroulent sur des échelles de temps très hétéroclites allant de moins de la nanoseconde pour le transfert radiatif, à plusieurs heures pour le doublement de la biomasse. Et, en parallèle, les hétérogénéités spatiales d'irradiance caractérisant les photo-bioréacteurs fermés imposent aux cellules de biomasse un régime dynamique dans leur réponse biologique face aux variations temporelles de l'exposition à la lumière. Le but de notre travail sera de mieux appréhender ces interactions afin de maîtriser le développement des outils de simulation capables de fournir des prédictions fiables pour des photobioréacteurs simples et soutenir leur mise à l'échelle.

Il convient de noter que, malgré la variété des approches de modélisation dans l'optique associée à l'étude de l'utilisation de l'énergie lumineuse, il existe peu de modèles qui prennent en compte, en plus des phénomènes susmentionnés, les effets des autres facteurs opératoires. Aujourd'hui, si l'on souhaite obtenir un modèle plus complet, il serait nécessaire d'inclure dans ces approches l'influence des autres événements ayant lieu pendant la croissance. Notamment l'épuisement des nutriments doit être décrit à travers les équations de conservation des espèces. Il en va de même pour le transfert de matière entre la phase gaz et la phase liquide, et

## Chapitre I.

les réactions chimiques, ainsi que pour l'accumulation de sous-produits (comme l' $O_2$ ) qui affectent le métabolisme cellulaire au sein du milieu de culture.

Le chapitre suivant présente la méthodologie entreprise pour prédire les performances techniques d'un photobioréacteur tubulaire à partir des conditions de fonctionnement en tenant compte de l'ensemble des facteurs pouvant avoir un impact sur la croissance de la biomasse dans la production solaire.



# CHAPITRE II

*Méthodologie générale sur la  
base de modèles de connaissance*



## II. Méthodologie générale sur la base de modèles de connaissance

### 1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la philosophie générale de l'évaluation prédictive des performances d'un photobioréacteur solaire, pour la caractérisation de la réponse du système biologique aux conditions opératoires.

Les exigences de croissance de la souche en question sont fondamentalement similaires à celles des plantes terrestres utilisées pour l'agriculture conventionnelle, à savoir des ressources chimiques et énergétiques. Ses activités métaboliques et sa composition interne dépendent de nombreux facteurs environnementaux, les plus importants étant la disponibilité des éléments nutritifs comme nous l'avons vu dans son équation stœchiométrique Eq(1) au [Chapitre I](#) (essentiellement la source de carbone  $\text{CO}_2$  ou  $\text{HCO}_3^-$ , d'azote  $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$  de phosphate et de soufre etc...), la température et la lumière <sup>222</sup>.

Dans les cultures extérieures, la biomasse est exposée à une variété de changements des conditions environnementales ayant lieu sur différentes échelles de temps. Pour la température et la lumière par exemple, on peut distinguer un cycle saisonnier qui varie en fonction des situations climatiques et géographiques du système de culture. L'autre cycle, diurne, comprend les variations de ces paramètres sur un cycle de 24 heures. Pour la lumière, un troisième cycle entre en jeu, celui imposé par l'agitation et la profondeur de culture (l'épaisseur optique du réacteur évoquée dans le chapitre précédent), ce qui se traduit principalement par des cycles lumière-obscurité fluctuants à l'échelle de la fraction de seconde ou de minute, très courts par rapport aux heures ou aux mois des deux cycles précédents. De même, les nutriments étant consommés, leurs concentrations varient au cours du temps, ce qui entraîne une évolution continue de la composition du milieu de culture auquel la Spiruline est soumise.

Nous cherchons à évaluer a priori une grandeur macroscopique telle que la productivité sur l'ensemble du volume d'un photobioréacteur fonctionnant en conditions solaires sur de longues périodes de temps, typiquement une année. D'un point de vue général, la méthodologie de ce travail porte conceptuellement sur le développement d'une chaîne de modélisation de la croissance globale partant de l'échelle microscopique, où les cellules individuelles répondent aux hétérogénéités locales, jusqu'aux variations des conditions opératoires macroscopiques de la culture à l'échelle du procédé, observées à cause des variations environnementales (météo, localisation) et des variations de concentrations (consommation des nutriments, phases de récolte, réintroduction de nutriments) et de lumière.

Dans la continuité du chapitre précédent, nous présentons dans cette partie les résultats de la littérature mettant en évidence les effets induits de ces variations de façon indépendante (ou couplée) sur les cinétiques biologiques. Un accent particulier sera mis sur l'écriture mathématique de ces phénomènes qui soutiendra la mise en place de l'outil numérique.

Dans un premier temps, nous décrivons la chaîne de modélisation qui vise à représenter la croissance de la Spiruline dans le système étudié sans pour autant nous intéresser aux mécanismes physiologiques internes. Pour ce faire, nous nous référons à la littérature pour résumer les résultats des études antérieures sur l'influence de la variation des facteurs pertinents de croissance. La vocation est donc de détailler les modèles cinétiques biologiques proposés pour chacun de ces paramètres. Ainsi, au sein d'une variété de modèles établis, nous explicitons plus particulièrement ceux qualifiés de « modèles non structurés », pour lesquels nous avons opté dans ce travail afin de décrire l'ensemble des liens qui interviennent entre la cinétique biologique de notre souche d'intérêt et ses conditions réactionnelles.

Si l'on considère les impératifs de la croissance d'un tel système biologique, on ne pourra négliger la complexité des interactions mutuelles entre la biomasse et la composition de son milieu de culture en termes de consommation nutritive, d'équilibre chimique et de transfert de matière. Dès lors, un paragraphe supplémentaire sera dédié à l'appréhension de ces interactions et l'écriture des expressions mathématiques décrivant les phénomènes impliqués.

Ce cheminement est présenté ici en deux grandes étapes consécutives mais interconnectées :

(i) la démarche générale de calcul et d'écriture de la cinétique de croissance intégrale est explicitée en tenant compte des influences de multiples conditions environnementales, de co-limitations notamment de multi-nutriments, de la lumière et de la température, ainsi que leurs interactions. C'est l'objet de ce court chapitre qui intègre des résultats de la littérature, mais aussi quelques petits développements spécifiques à notre travail, plus faciles à présenter ici ;

(ii) l'approche multi-échelle utilisée pour considérer l'impact de l'hétérogénéité de l'intensité lumineuse, au sein du volume et son effet sur la croissance globale fait l'objet d'un chapitre distinct [Chapitre III](#). Il s'agit d'un facteur critique pour l'activité photosynthétique, et l'approche minutieuse développée nécessite nettement plus d'attention.

## 2. Démarche générale

Classiquement, le suivi de la concentration de la biomasse au cours du temps dans un photobioréacteur fermé (batch), se fait par un simple bilan massique qui établit la variation de la biomasse par unité de temps. Ce bilan s'écrit pour la fraction massique ou la concentration en biomasse  $X$ , en fonction de la vitesse de variation biologique de la concentration (croissance ou mort cellulaire)  $\mu$  :

$$\frac{dX_V}{dt} = (\mu - D) \cdot X_V \quad (16)$$

Le terme  $D$  représente le pourcentage de renouvellement de la culture par unité de temps. C'est une variable indépendante exprimée comme le ratio du débit de soutirage du liquide au volume du réacteur. Dans le cas d'un réacteur Batch (notre cas d'étude) ce terme est nul, dans un réacteur continu en régime permanent ce terme est égal au taux de croissance global.

Pour l'évaluation à l'échelle du volume intégral du réacteur  $X_V(t)$ , on procède dans le cas d'un réacteur réel à l'intégration des contributions locales (i.e. dans les différents volumes élémentaires  $dx$ ) ramené au volume entier du réacteur (cf. Eq(17)). On retrouve ainsi une approche très bien implantée dans la communauté du génie des procédés (ou du génie des réacteurs) qui permet de rendre compte des éventuelles hétérogénéités locales au sein de l'ensemble <sup>223</sup>.

$$X_V(t) = \frac{1}{V} \iiint_V X(\mathbf{x}, t) \cdot dx \quad (17)$$

Cet aspect d'hétérogénéité concerne les effets des conditions réactionnelles dans le photobioréacteur qui interviennent dans le calcul de la cinétique globale. Quand bien même on souhaiterait réduire la complexité en considérant des hypothèses d'un réacteur parfaitement agité et homogène (notamment, en termes de distribution des besoins de croissance, des concentrations de réactifs et de biomasse cellulaire), la disponibilité de la lumière, quant à elle, demeurerait hétérogène en tout point du volume en raison des phénomènes de transfert radiatif. Il sera nécessaire d'en tenir compte dans la modélisation de son effet sur la croissance.

Pour ne pas perdre en vue l'exposition à des cycles diurnes et nocturnes sur une journée, il est important d'inclure dans la modélisation de la cinétique biologique, en plus de la croissance photosynthétique représentée par un taux de croissance  $\mu_{croissance}$ , le mécanisme biologique de maintien impliqué durant la nuit. Il s'agit d'introduire un taux de perte de biomasse due à la respiration  $\mu_{nuit}$ . Dès lors, dans le cas d'un réacteur fermé, l'estimation de la quantité réelle de biomasse produite en conditions solaires se fait par la résolution de l'équation de bilan massique de la biomasse, en basculant entre la cinétique de la photosynthèse et celle de la respiration, en fonction du régime lumineux incident :

$$\text{Switch} \begin{cases} \text{Photosynthèse} & : \frac{dX}{dt} = \mu_{\text{croissance}} \cdot X \\ \text{Respiration} & : \frac{dX}{dt} = -\mu_{\text{nut}} \cdot X \end{cases} \quad (18)$$

Comme indiqué dans l'introduction, dans ce chapitre, nous abordons l'estimation de la croissance de la biomasse  $\mu_{\text{croissance}}$  en s'affranchissant dans un premier temps des variations à l'échelle temporelle ou spatiale. Il s'agit en fait de la traduction de résultats expérimentaux obtenus dans des conditions considérées comme stationnaires du point de vue de tous les paramètres. Plus précisément, nous nous intéressons à analyser l'influence de chaque paramètre opératoire à l'échelle macroscopique uniquement et en régime quasi-permanent, en considérant que :

- Les variations de chaque facteur sont assez lentes pour imposer la dynamique à la réponse biologique ;
- Les conditions réactionnelles sont homogènes et identiques dans le volume en supposant que les problèmes de transfert de matière et de chaleur sont maîtrisés et le temps de mélange dans le réacteur est significativement court devant le temps caractéristique de la réaction biologique (pour la lumière, cela suppose de sélectionner des résultats expérimentaux dans des conditions particulières d'homogénéité, l'influence de variations rapides d'éclairement vues par les microorganismes sera examiné et modélisé au [Chapitre III](#)) ;
- La loi de cinétique relative à l'impact de chaque paramètre limitant est établie en maintenant les autres à leur valeur optimale.

Ainsi, l'écriture de l'équation décrivant le taux de croissance noté  $\mu_{\text{croissance}}$  à l'échelle du réacteur global repose sur la construction des modèles cinétiques relatifs à toutes les ressources nécessaires aux métabolismes de la souche. En effet, nous nous basons sur le concept d'un modèle multiplicatif introduit par *Goldman* <sup>224</sup> comme étant la contribution similaire de toutes les ressources limitatives à la croissance de façon simultanée. Autrement dit, il n'est autre qu'une résultante du produit des lois mathématiques représentatives de l'influence de chaque facteur. Il s'écrit en fonction des taux de croissance spécifique  $\mu_{\kappa_i}$  de chaque facteur environnemental comme suit :

$$\mu_{\text{croissance}} = \mu_{\text{max}} \cdot \{ \mu_{\kappa_1} \times \mu_{\kappa_2} \dots \times \mu_{\kappa_i} \} \quad (19)$$

Le terme  $\mu_{\text{max}}$  traduit le taux de croissance maximal global, quand toutes les conditions sont optimales et/ou non limitantes. Cette grandeur est une propriété spécifique à la souche cultivée. La désignation  $\kappa_i$  représente le paramètre opératoire dont l'effet de la variation contrôle la croissance biologique.

Outre les effets des paramètres opératoires individuels sur la biomasse, il existe également des interactions entre ces facteurs qui ont des conséquences sur le comportement du système biologique notamment, entre la lumière et l'agitation <sup>172</sup> ou la température <sup>225</sup>. Ces inter-

## Chapitre II

corrélations constituent l'axe central autour duquel s'articule notre étude. C'est pourquoi nous consacrons les sections (§3,4,5,6 et 7) suivantes à détailler ces effets au regard de la littérature.

### **Remarque :**

Les modèles cinétiques, relatifs à chaque paramètre, utilisés dans notre étude sont présentés dans des encarts gris pour les distinguer de ceux de la littérature.

### 3. Impact de la lumière

Comme nous l'avons déjà mentionné, la lumière constitue le paramètre phare des cultures photosynthétiques. Étant le premier facteur limitant, il a un effet dominant sur la croissance des microalgues et des cyanobactéries. De nombreuses études ont été menées pour quantifier et modéliser la cinétique de réponse relative à ce facteur. Ces études se basent généralement sur des résultats expérimentaux exprimés soit par le taux de production de la biomasse, via la mesure de densité optique  $DO_{680}$  (quantité de chlorophylle produite à proprement parlé) ou via la pesée de la biomasse sèche elle-même, soit par le taux d'oxygène relargué par les microalgues suite à leur activité photosynthétique.

Il convient toutefois de noter que pour étudier strictement l'influence de la variation de l'intensité de la lumière sur la vitesse de croissance spécifique, il est important de s'assurer que la lumière traverse le volume sans baisse notable d'intensité. En effet, les microalgues répondent à la lumière disponible dans le réacteur, or cette disponibilité dépend entièrement des caractéristiques optiques de la culture régies notamment par la concentration de la biomasse. Il est donc primordial, lors de cette analyse de cinétique, de garder l'indépendance des deux paramètres étudiés à savoir le champ d'éclairement et la concentration cellulaire et de veiller que seule la variation de l'intensité lumineuse impacte la réponse photosynthétique, sans effet de la concentration de biomasse qui génère, par son augmentation, une hétérogénéité de la répartition de lumière dans le volume (i.e. effet de l'épaisseur optique) <sup>140</sup>.

Il existe une abondante littérature sur l'étude des effets du changement de l'intensité lumineuse sur le taux spécifique de croissance ou sur le taux d'évolution de l'oxygène photosynthétique pour chaque espèce de microalgues. En effet plus que 40 approches de modélisation ont été recensées pour la description de ce paramètre <sup>226,227</sup>. *Béchet et al.*, <sup>167</sup> ont classé ces modèles en fonction de leur capacité théorique à prendre en compte les gradients de lumière au sein du volume de la culture. Dès lors, on distingue selon l'échelle spatiale (i) une approche globale à l'échelle de la culture entière qui consiste à la prédiction du taux de photosynthèse global en fonction de l'intensité lumineuse incidente ou moyenne atteignant la culture et (ii) une approche locale à l'échelle cellulaire permettant de mettre en évidence l'effet des différentes intensités lumineuses subies localement par les cellules individuelles, et ensuite en calculer la vitesse de croissance globale comme étant la somme des vitesses locales dans le volume. Dans les cultures denses bien agitées, les cellules individuelles subissent de courts cycles de lumière lorsqu'elles passent d'une zone de forte luminosité à une zone proche de l'obscurité, (iii) une nouvelle approche de modélisation est donc identifiée, dans la même étude, elle considère à la fois les gradients de lumière, les cycles lumineux perçus et la réponse biologique de chaque cellule.

Or, toutes ces approches, quelles que soient leurs extensibilités, se réfèrent à la relation fondamentale entre la lumière et la réponse photosynthétique des cellules individuelles, étudiée extensivement dans la littérature et connue sous l'appellation « corrélation Photosynthèse-Irradiance P-I ». Il s'agit de l'étude de la réponse spécifique de la biomasse aux différentes intensités de lumière reçues.

### 3.1. Nature de la lumière

Les taux de photosynthèse dans la zone de saturation et de photo-inhibition diffèrent selon les conditions environnementales (température et turbulence) <sup>48</sup>. Pour *Arthrospira platensis* spécialement, la gamme des intensités lumineuses optimales (de saturation) rapportée précédemment correspond à environ 10 à 15 % de la radiation solaire totale incidente sous des conditions tropicales estivales <sup>15</sup>.

Bien que l'intensité de la lumière soit l'un des facteurs les plus importants de la croissance des microalgues, son spectre est également important. Il a été démontré que les microalgues se développaient dans certaines longueurs d'onde de la lumière mieux que dans d'autres, et certains chercheurs ont donc également étudié cet effet. Cette plage de lumière, baptisé rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) dans plusieurs papiers scientifiques, correspond aux longueurs d'onde de la lumière visible entre 400 et 700 nm. La plage PAR correspond ainsi à près de 43% du spectre complet de l'énergie solaire (pour une normalisation AM 1.5<sup>18</sup>) <sup>140</sup>. Dès lors, les photons de longueur d'onde supérieure à 700 nm et inférieure à 400 nm ne sont pas utilisés par les pigments des microalgues. Par conséquent, environ 57% de la lumière solaire incidente n'est pas disponible pour la photosynthèse.

La pente initiale des courbes de réponse photosynthétique à la lumière (voir **Figure 15** plus loin) est un indicateur utile de l'efficacité photosynthétique. Cette efficacité est élevée lorsque les irradiances sont faibles. Le maximum théorique peut arriver à 10,7% selon *Masoj'rddek et al.*, <sup>48</sup> une valeur qui ne pourrait jamais être atteinte dans une culture de microalgues extérieure suite aux conditions environnementales variables et défavorables (ex. photo-inhibition). En outre, les microalgues lorsqu'elles sont cultivées sous des intensités lumineuses élevées, synthétisent certains pigments protecteurs qui dissipent environ 60% de l'excès de lumière absorbée sous forme de chaleur, mais elles réfléchissent également environ 10% du PAR. Cette lumière photosynthétiquement inactive réduit encore l'efficacité de la conversion photosynthétique à 4% ou 5% dans les meilleurs des cas <sup>48</sup>. L'efficacité d'utilisation de lumière basée sur le taux de croissance spécifique d'*Arthrospira* au laboratoire est comprise entre 1% et presque 9% en fonction de l'intensité lumineuse dans des conditions d'éclairage homogènes <sup>62</sup>. Des efficacités photosynthétiques élevées peuvent être atteintes à des concentrations cellulaires constantes si la capacité de capture de photon est élevée et le taux de mélange est adéquat comme indiqué dans les travaux cités par *Belay* <sup>228</sup>. Cependant, il est important de ne pas confondre le calcul de cette grandeur à partir des cultures du laboratoire (i.e. avec de la lumière artificielle) avec celle utilisant la lumière solaire. En effet, jusqu'à ce jour, le rendement de conversion photosynthétique des cultures solaires à grande échelle est estimé entre 1 à 2 % et environ 20,4 % de l'énergie solaire incidente est irrémédiablement perdue sous forme de chaleur en raison des différentes étapes d'excitation et de désactivation durant la photosynthèse <sup>229</sup>.

---

<sup>18</sup> AM1.5 : « Air Mass » est une notion permettant de mesurer et de normaliser l'absorption des photons d'origine solaire dans l'atmosphère en termes de distribution spectrale et d'intensité du rayonnement arrivant à la surface de la terre. L'intensité du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère terrestre est de 1,366 kW.m<sup>-2</sup>. Le spectre AM1.5 est normalisé pour une puissance irradiée de 1 kW.m<sup>-2</sup> pour quantifier le rayonnement à la surface de la terre.

## 3.2. Réponse Photosynthèse-Irradiance

### 3.2.1. PBR homogène à éclairage permanent

Le lien inhérent entre l'irradiance ou la densité de flux de photons (PFD<sup>19</sup>) et la croissance suit une courbe typique de photosynthèse. Les travaux visant à l'étudier et, par conséquent, en déduire l'influence des intensités locales sur la croissance spécifique d'une souche donnée doivent être menés avec une faible concentration cellulaire (i.e. cultures très diluées) et une faible épaisseur optique (i.e. pas de gradient de lumière en profondeur) afin de garantir une homogénéité de l'exposition à la lumière, c'est-à-dire que toutes les cellules reçoivent la même intensité de lumière.

Pour la Spiruline (*A. platensis*), la souche d'intérêt de ce travail, des expériences antérieures ont été réalisées par notre équipe de recherche, dans le but de formaliser la cinétique relative à ce facteur pour cette cyanobactérie <sup>39</sup>. Néanmoins, en raison des limitations que présente le dispositif utilisé notamment concernant l'homogénéité de la lumière et du manque de données pour les fortes irradiances (représentatives aux conditions solaires), nous nous sommes orientés vers les résultats rapportées dans la littérature. En effet, nous nous sommes basés sur l'étude de *Xue et al.*, <sup>62</sup> qui examine la croissance de la même souche utilisant une conception de réacteur plus appropriée (photobioréacteur à couche mince de 10 mm d'épaisseur ayant une distribution de lumière quasi-homogène) et sous différentes conditions d'éclairage, entre autres, un régime continu en variant l'intensité sur une gamme étendue de 1 à plus de 50 mW.cm<sup>-2</sup> (soit plus de 2000  $\mu\text{mol}$  de photo.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, ce qui est supérieur à l'irradiance solaire moyenne en une journée d'été à Toulouse). Les données de la croissance spécifique issues de l'étude en question <sup>62</sup>, ont été numérisées et utilisées en tant qu'une base de données expérimentales pour notre approche de modélisation qui sera présentée dans le prochain chapitre. Ces résultats sont représentés dans la **Figure 15**.

La vitesse spécifique de la croissance, qui est exprimée en unité de temps<sup>-1</sup> (soit jour<sup>-1</sup> utilisée au cours de ce travail) croît avec l'augmentation de l'intensité de lumière de 0 à 10 mW.cm<sup>-2</sup> passant initialement par une phase linéaire où l'activité photosynthétique est limitée par la lumière et elle révèle une cinétique de premier ordre (i.e. une phase exponentielle rapprochée à une droite dont la pente est le ratio du taux de croissance maximal à l'intensité de saturation <sup>48</sup> qui est au tour de 350- à 450  $\mu\text{mol}$  de photo.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> soit environ 10 mW.cm<sup>-2</sup> pour la souche en question <sup>39,62,230</sup>), suivi d'une phase de ralentissement. Ensuite, elle atteint son maximum de 1,9 j<sup>-1</sup> indiquant un régime de saturation où la croissance reste constante avec l'augmentation de l'éclairement. À des valeurs d'irradiance supérieures à 30 mW.cm<sup>-2</sup> une photo-inhibition se produit indiquant une diminution de la vitesse de croissance avec l'augmentation des irradiances, un effondrement rapide de la biomasse s'en suit jusqu'à la mortalité totale.

---

<sup>19</sup> PFD (Photosynthetic Flux Density) : c'est un flux radiatif traversant une surface élémentaire exprimée généralement en nombre de photons par unité de surface et unité de temps.

Pour formuler mathématiquement la cinétique de la réponse auto-trophique à la lumière reçue, désignée par  $\mu_I$ , et retrouver la tendance révélée par ces données expérimentales, nous avons proposé un modèle combinant deux expressions, conditionné par une intensité critique ( $I_{crit} \approx 37 \text{ mW.cm}^{-2}$ ). La première est un modèle de type Andrew-Haldane, sélectionné parmi les nombreux qui existent, car il offrait un meilleur ajustement que les autres modèles, et en raison de sa capacité à prendre en compte le phénomène d'inhibition identifié. La calibration des paramètres de ce modèle a été réalisée par la méthode de moindre carré sur l'écart absolu entre l'expérience et le modèle. La seconde expression est un polynôme du premier degré décrivant l'effondrement soudain et rapide de la culture lorsque les intensités sont supérieures à celle critique comme suit :

$$\begin{cases} \text{si } I < I_{crit} & \mu_I = 2,9 \cdot \frac{I}{3,9 + I + \frac{(I)^2}{72,25}} \\ \text{si } I > I_{crit} & \mu_I = -0,101 \cdot (I - I_{crit}) + 1,75 \end{cases} \quad (20)$$

### **Propriétés de la fonction $\mu_I$ exploitée dans notre étude :**

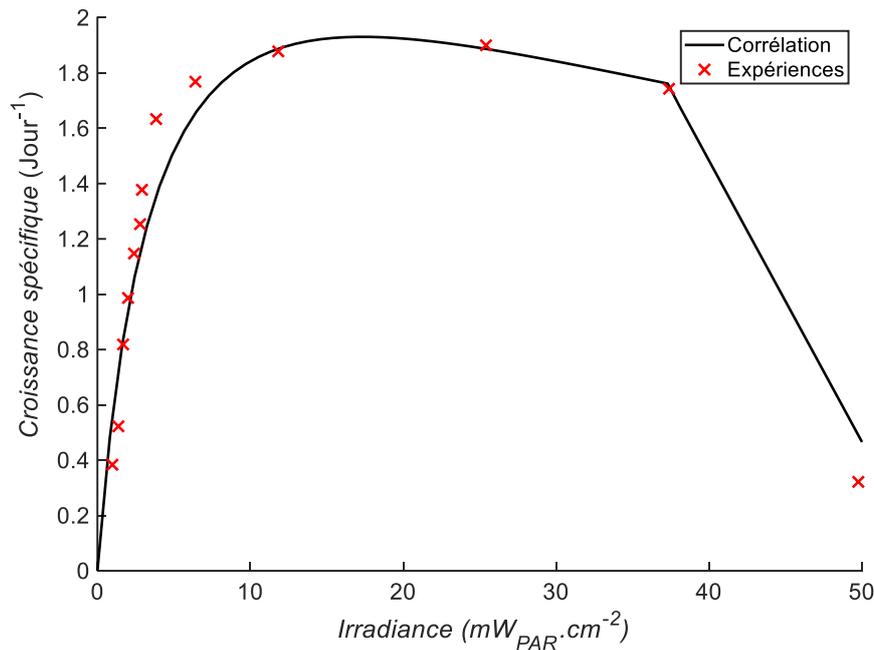
**Unité d'irradiance :** Il est à noter que ces deux équations ont été formulées pour des irradiances exprimées en  $\mu\text{mol}_{hv}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  puisque nous exprimons toutes les puissances radiatives utilisées dans cette partie comme une densité de flux absorbée quantifiée par le nombre de photons (ou nombre de moles de photons  $\text{mol}_{hv}$ ) par une unité de surface et unité de temps. Bien que dans la communauté du solaire thermique, le flux solaire soit une grandeur exprimée en watt par mètre carré et qui correspond à une puissance par surface éclairée, notre écriture est conforme à ce qui est utilisée dans la littérature dans les bioprocédés et plus commode à utiliser pour le couplage avec l'activité photosynthétique. En effet, les photons appartenant à des longueurs d'onde différentes par exemple, le bleu et le rouge, ne possèdent pas la même énergie transportée, cependant, ils participent à la réaction biochimique de la photosynthèse avec la même efficacité en libérant un électron dans les deux cas. Ainsi, il est plus pratique de parler de nombre de photons absorbés que d'énergie. Le passage d'une unité à l'autre se fait par le biais d'une conversion dont le facteur dépend du spectre de la lumière considérée <sup>127</sup>. Pour la partie visible du spectre solaire ce facteur vaut **4,57** pour convertir les  $\text{W.m}^{-2}$  en  $\mu\text{mol}_{hv}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  <sup>231</sup>.

**Le point de compensation :** Comme nous l'avons déjà vu, la Spiruline peut basculer d'un métabolisme à un autre en fonction du régime lumineux, chacun des deux impliquant une cinétique différente. Il existe en effet une irradiance seuil (point déterminant) pour laquelle la croissance est déclenchée c'est-à-dire que la photosynthèse compense la respiration, et les taux d'échange nets pour l' $\text{O}_2$  et le  $\text{CO}_2$  sont égaux à zéro. Pour la Spiruline, cette valeur varie entre 1,05 <sup>39</sup> et 4,75 <sup>222</sup>  $\mu\text{mol}_{hv}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Toutefois, les données expérimentales exploitées ici pour la formulation du modèle ne permettent pas de prendre en compte ce régime cinétique de croissance, car la plus faible intensité lumineuse utilisée est de  $1 \text{ mW.cm}^{-2}$  soit  $47,5 \mu\text{mol}_{hv}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  <sup>231</sup>, donc pour le considérer il aurait fallu un ajustement de la formule en rajoutant le terme seuil de ce point d'irradiance compensatoire comme procédé par Gernigon <sup>39</sup>. La mise en valeur de l'existence de ce point est totalement

légitime sous les conditions expérimentales réalisées (i.e. éclairage permanent et constant) car elle est facile à décrire et à comprendre à l'échelle cellulaire. Cependant, sa transposition à l'échelle du volume réactionnel, présente une faiblesse a fortiori quand il s'agit d'un réacteur non-homogène en lumière et où les cellules circulent sous l'effet d'agitation comme il est question dans ce travail.

Nous avons déjà vu (cf. section 1.3.4 du chapitre précédent) que les phénomènes photosynthétiques de capture et conversion de photons sont les plus rapides (à l'échelle de millisecondes). Si nous considérons le terme de compensation dans la loi de vitesse de croissance Eq (20), cela implique que la cinétique de respiration ou la décroissance de biomasse aux très faibles intensités dépend également de l'irradiance locale perçue et varie avec un temps caractéristique identique à celui de la photosynthèse (i.e. le taux de respiration varie aussi rapidement que la variation de l'irradiance locale). Or, nous avons vu précédemment que les métabolismes de respiration prennent plus de temps à s'instaurer pour cette espèce (de l'ordre de quelques secondes) en raison de l'existence de la même chaîne de transport d'électron, ce qui fait que la cinétique associée est plus sensible à l'intégrale sur le volume qu'aux grandeurs radiatives locales.

À ce titre, nous avons donc choisi de nous affranchir de la valeur du point de compensation et de son introduction dans la cinétique de croissance dans une première approche jusqu'à une amélioration ultérieure évoquant les temps caractéristiques des métabolismes impliqués par la souche en question. En effet, dans ce projet doctoral nous sommes affrontés à la modélisation pour prédire la réponse biologique relative à la lumière d'un photobioréacteur dont le champ d'irradiance est fortement hétérogène dans son ensemble. Ainsi, nous considérons qu'il n'y a pas de catabolisme de biomasse pour les faibles durées d'obscurité en présence de la lumière quelle que soit son intensité (i.e. pendant la journée). Par contre, pendant les longues périodes d'obscurité (i.e. la nuit) le modèle bascule vers une autre cinétique en attribuant un terme négatif au taux de croissance, indiquant les pertes de la biomasse, qui sera présenté dans le paragraphe 4.2.



**Figure 15 :** Courbe de réponse photosynthétique de la *Spiruline* aux variations d'intensité d'éclairage en régime d'éclairage continue. Croix rouge : données expérimentales extraites de l'étude de Xue <sup>62</sup>. Ligne continue : modèle de la cinétique relative à l'irradiance Eq(20).

### 3.2.2. PBR hétérogène : effet de la concentration cellulaire

Dans les PBRs conventionnels (de volume important), l'atténuation de la lumière est inévitable, car la biomasse absorbe les flux lumineux qui sont fournis à la culture. Ainsi, la concentration cellulaire réduit la disponibilité de la lumière, dans les parties internes des photobioréacteurs, en ralentissant le taux de croissance par rapport à ce qu'il vaut près de la surface éclairée. Ce phénomène, connu sous le nom de l'effet d'auto-ombrage cellulaire (i.e. auto-inhibition causée par la biomasse elle-même), a été largement étudié dans les cultures de microalgues troubles <sup>232,233</sup>. Dans les conditions de laboratoire, le suivi in-situ de l'évolution de la densité de biomasse en fonction du temps dans un PBR fortement hétérogène en lumière, révèle une transition rapide de la phase exponentielle à une croissance linéaire indiquant ainsi une condition de limitation, car l'accès des cellules à la lumière est entravé par l'absorption et l'ombrage mutuel. Pendant cette phase, le taux de croissance se maintient constant, tant que la lumière est le seul facteur limitant, sur une durée de quelques jours, jusqu'à ce qu'une carence nutritive se produise <sup>39</sup>. Dans ce cas de configuration, le paramètre qui détermine la réponse à la lumière est le chemin optique qui, à son tour, dépend de la densité de biomasse et a un impact sur le taux de croissance. Ce phénomène peut être surmonté, soit par la réduction de l'épaisseur de la culture (faible concentration et faible profondeur optique du réacteur) et ainsi en se rapprochant du cas du PBR homogène traité précédemment, soit par un bon mélange dans le système, garantissant une exposition favorable des microalgues à deux rythmes d'obscurité et de lumière suivant leur déplacement dans des régions à gradient de

lumière. Ces cycles imposent un régime physiologique unique qui a été traité dans plusieurs travaux [180,234,235](#).

Lors du calcul de la vitesse de croissance spécifique à l'éclairement, il convient néanmoins de prendre garde du caractère fortement hétérogène de ces configurations. Contrairement au cas précédent, les formules de l'Eq(20), étant modélisée à l'échelle cellulaire, ne peuvent pas être exploitée pour prédire le taux de photosynthèse réel (global) du système vis-à-vis de l'utilisation de l'éclairement. En effet, la répartition spatiale de la lumière à laquelle l'ensemble de la biomasse est exposé, requiert une attention particulière. Dans la littérature [39,164,180](#), nous trouvons deux approches d'évaluation de la vitesse volumique de croissance au regard de la lumière perçue, noté  $\mu_{IV}$ , tenant compte de l'hétérogénéité du champ d'irradiance volumique :

- 1)  $\mu_{IV}^{ins}$  : Elle est déterminée par la réponse instantanée des cellules à la lumière vue, elle s'écrit comme la somme de toutes les vitesses locales  $\mu_I(I)$  en chaque emplacement de volume  $\delta x$  :

$$\mu_{IV} = \mu_{IV}^{ins} = \frac{1}{V} \cdot \iint \mu_I(I) \cdot \delta x = \langle \mu_I(I) \rangle_V \quad (21)$$

- 2)  $\mu_{IV}^{full}$  : Elle est calculée à partir de l'irradiance moyenne ( $\frac{1}{V} \cdot \iint I \cdot \delta x$ ), reçue par toutes les cellules, qui est définie comme l'intégrale de toutes les irradiances locales réparties dans le volume réactionnel :

$$\mu_{IV} = \mu_{IV}^{full} = \mu_I \left( \frac{1}{V} \cdot \iint I \cdot \delta x \right) = \mu_I(\langle I \rangle_V) \quad (22)$$

Ces deux approches de modélisation seront utilisées dans notre cas d'étude et seront abordées dans le [Chapitre III](#) sur l'aspect temporel de la capacité des cellules individuelles à convertir la lumière. Les deux vitesses volumiques de croissance sont différentes, car la fonction  $\mu_I$  n'est pas linéaire.

Un certain nombre de modèles mathématiques qui tiennent en compte de la photo-acclimatation et la photo-inhibition dans la description de la réponse dynamique des cellules photosynthétique à la lumière, sont aussi disponibles [209,236–238](#).

## 4. Impact de la température

Après la lumière, la température représente l'une des principales limitations biologiques pour la production de biomasse en extérieur, en raison des fluctuations saisonnières et diurnes qui peuvent présenter une différence de 20°C dans les zones non-tropicales. Ses impacts sur la croissance et sur la productivité sont frappants, surtout pour les systèmes ouverts, en raison de la difficulté à maintenir une température optimale pendant une longue période. *Torzillo et al.*, [103](#) ont comparé, dans une de leurs études, le rendement de la

production de la Spiruline dans un bassin ouvert et dans un PBR tubulaire. Ils ont suggéré que les rendements élevés obtenus dans les PBRs peuvent être attribués au meilleur profil de température dans ces systèmes et à leur capacité à atteindre les températures optimales plus facilement quand les températures extérieures sont plus faibles (ex. le matin). Néanmoins, dans ces mêmes systèmes, nous sommes confrontés au problème de surchauffe qui survient en milieu de journée lorsque les températures internes dépassent la température optimale. Un système de refroidissement devient donc obligatoire.

Il n'est pas surprenant que ce paramètre soit l'un des critères de sélection de la souche cultivée, compte tenu de son rôle important dans la productivité. La gamme de températures optimales de croissance est une caractéristique spécifique à l'espèce. Elle permet à la cellule de subir la photosynthèse sans modifier aucun paramètre biochimique ou physiologique inhérent, tout en garantissant des vitesses de croissance maximales <sup>239</sup>. Pour la Spiruline, qui est qualifiée de mésophile, la température usuelle utilisée dans les cultures en laboratoire, est comprise dans la plage 35-38°C, mais il existe des souches qui se développent bien à une température allant jusqu'à 40-42°C <sup>240,241</sup>. Il est cependant important de comprendre la réponse biologique de cette espèce lorsque les conditions thermiques ne sont pas aussi favorables.

### 4.1. Effet de la température sur la photosynthèse

La nécessité de mettre en évidence l'impact de la température sur le taux de croissance/photosynthèse est évidente surtout pour les systèmes extérieurs sans régulations thermique. Afin de tenir compte quantitativement de cet effet dans la cinétique de croissance, les expériences en laboratoire sont souvent réalisées en régime permanent de température et les modèles décrivant la réponse relative à la température sont totalement empiriques.

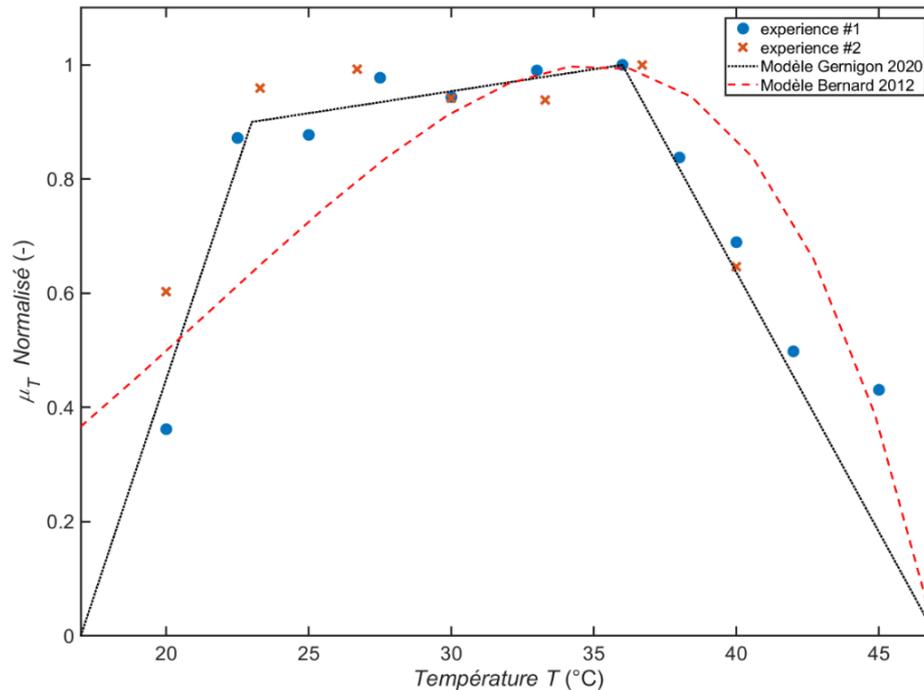
En général, les courbes de croissance en fonction de la température sont asymétriques avec une augmentation pour les basses températures, une zone de maximum croissance considérée comme optimale et une diminution abrupte (selon les espèces) pour les hautes températures. En effet, l'augmentation des températures situées en dessous de l'optimum améliore les taux de croissance, les températures élevées, en revanche, au-delà de l'optimum, sont délétères. Une fourchette étroite entre l'optimale et la létale indique que l'espèce est sensible au stress thermique, tandis qu'une fourchette large peut indiquer que l'espèce est capable de s'acclimater à des températures plus élevées (tout comme la photo-adaptation dans l'effet de la lumière) par le biais de plusieurs stratégies d'adaptation, comme des ajustements physiologiques rapides, ou des séquences générationnelles lentes offrant à la microalgue suffisamment de temps pour s'acclimater aux changements saisonniers et assurer ainsi un taux de croissance relativement stable dans les cultures en conditions extrêmes <sup>167,239</sup>.

Les premiers modèles qui ont tenté d'évaluer l'impact de la température sur les vitesses de croissance sont basés sur la loi d'Arrhenius dérivée de l'équation thermodynamique de Van't Hoff. Cependant, cette équation ne prédit pas l'impact négatif des températures élevées sur l'activité métabolique dans les systèmes biologiques <sup>242</sup>. Alternativement, *Bernard et Rémond* <sup>243</sup> ont proposé un modèle pour exprimer le taux de croissance spécifique en fonction des températures minimale, maximale et optimale pour la photosynthèse ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  et  $T_{\text{opt}}$ )

incluant ainsi la réponse de croissance à haute température. Malgré son succès à prédire avec précision la croissance de 15 espèces, il comprend 4 paramètres dont l'estimation n'est pas toujours facile et l'incertitude sous-jacente peut être très importante. En raison de la forte pente négative de la partie décroissante de la courbe, toute variation de la température supérieure à l'optimale induit une forte diminution du taux de croissance, ce qui nécessite plus d'attention compte tenu des phénomènes d'adaptation que l'on avait invoqués précédemment. En plus, la plage de croissance optimale est représentée dans ce modèle sous forme de crête avec un taux maximal à  $T_{opt}$ , tandis que pour certaines espèces, cette plage peut s'étaler sur un plateau plus ou moins large comme dans le cas de la Spiruline.

Les PBRs extérieurs sont exposés à des variations de température plus ou moins rapides et importantes en fonction de l'emplacement géographique et de la saison. Pour quantifier l'effet de la température sur la croissance dans notre cas d'étude (un système extérieur de production de Spiruline), un modèle incluant toutes les plages de température en dehors des conditions opératoires envisageables, est nécessaire. Sur la base des expériences menées par *Gernigon*<sup>39</sup> sur la même souche dans des conditions d'éclairage et d'agitation constantes, nous avons tenté d'appliquer le modèle de *Bernard*<sup>243</sup> sur les données disponibles. Cependant, nous avons constaté qu'il ne représente pas avec fidélité la réponse de croissance de la Spiruline à des températures autres que celle optimale (voir **Figure 16**). Pour ces raisons, et à cause d'un manque de données expérimentales suffisantes concernant cette souche pour identifier avec précision les paramètres de ce modèle, nous optons pour le modèle proposé par *Gernigon*<sup>39</sup>, utilisant une régression linéaire par morceaux. Les fonctions de température utilisées pour l'estimation de la vitesse de croissance spécifique  $\mu_T$ , sont données par les formules suivantes :

$$\mu_T(T) = \begin{cases} \text{si } T < 17 \text{ ou } T > 47 : \mu_T(T) = 0 \\ \text{si } T \in [17 ; 23] : \mu_T(T) = 0,150 \cdot T - 2,55 \\ \text{si } T \in [23 ; 36] : \mu_T(T) = 0,00769 \cdot T + 0,723 \\ \text{si } T \in [36 ; 47] : \mu_T(T) = -0,0909 \cdot T + 4,27 \end{cases} \quad (23)$$



**Figure 16 :** Réponse spécifique de la Spiruline aux variations de température : comparaison des données expérimentales et modèle de Gernigon <sup>39</sup> avec le modèle Bernard et Rémond <sup>243</sup>.

**Remarque :** Il apparaît dans la littérature que les températures de croissance optimales peuvent diverger lors de l'étude de la même espèce. Les conditions environnementales peuvent déplacer le curseur de température optimale dans un sens ou dans l'autre <sup>240</sup>.

### Propriétés de la cinétique $\mu_T$ exploitée dans notre étude

- 1) Dans notre approche de modélisation, nous considérons que l'effet des fluctuations dynamiques de la température du milieu de culture (dans la gamme opératoire) sur la croissance de la microalgue est instantané. En effet, cette souche répond immédiatement aux changements de température survenus comme il a été prouvé par les expériences de la littérature <sup>39</sup>. Aucune inertie, ni temps d'équilibre n'est observé lors des variations brusques du régime thermique.
- 2) Il a été également signalé <sup>39</sup> que les températures inférieures à 22,5°C et supérieures à 38°C ont des effets délétères menant à l'effondrement de la culture. Cependant, ce phénomène n'est pas instantané. En plus, l'adaptation de la vitesse de croissance après un tel évènement n'a pas été étudiée (en particulier lors du passage des gammes non-viables à la plage opératoire usuelle) ce qui limite l'applicabilité du modèle en l'état pour la quantification de l'impact d'un retour des plages de températures critiques en dehors des conditions de viabilité de la souche en question.

## 4.2. Effet de la température sur la respiration

Chez les cyanobactéries, la respiration se produit exclusivement durant les longues périodes d'obscurité. Il a été largement documenté que chez cette catégorie de microorganismes (la Spiruline en particulier), les taux de respiration sont 10 à 50 fois plus faibles que les taux de photosynthèse <sup>49,222,244</sup>. Toutefois, tout comme pour la photosynthèse, la température joue un rôle important dans la respiration. Les résultats de *Torzillo et al.* <sup>245</sup> d'un PBR tubulaire extérieur ont montré que lorsque la Spiruline est cultivée à des températures jour-nuit optimales, et à une concentration optimale de la biomasse, 10-16% de la production de biomasse diurne est perdue pendant la nuit. Lorsque la température de la culture tombe en dessous de l'optimum, ou lorsque la culture est réalisée à une faible concentration cellulaire sous une irradiance élevée, une augmentation de la synthèse des carbohydrates est enregistrée, conduisant à des pertes de biomasse nocturnes relativement plus importantes. Certains auteurs rapportent une perte nocturne de 35% de la biomasse produite dans la journée dans les systèmes ouverts <sup>4</sup>.

Pour bien comprendre la sensibilité de la respiration de cette espèce à la température, et cerner son effet sur la cinétique de son métabolisme nocturne, *Torzillo et Vonshak* <sup>57</sup> ont mené des expériences pour suivre le taux d'absorption de l'oxygène de cette souche dans l'obscurité. Les résultats de la vitesse de respiration ont révélé une relation exponentielle dépendant de la température entre 20°C et 45°C (i.e. le taux de respiration augmentant avec la température) et des valeurs nulles pour les températures inférieures à 15°C ou supérieures à 50°C (Cf. **Figure 17**). Ils ont décrit alors le taux de consommation d'O<sub>2</sub>  $R_{O_2}$  en ( $\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{mg de Chlorophylle}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) par la fonction exponentielle de la température (en °C) suivante :

$$R_{O_2}(T) = 0,771 \cdot \exp(0,0636 \cdot T) \quad (24)$$

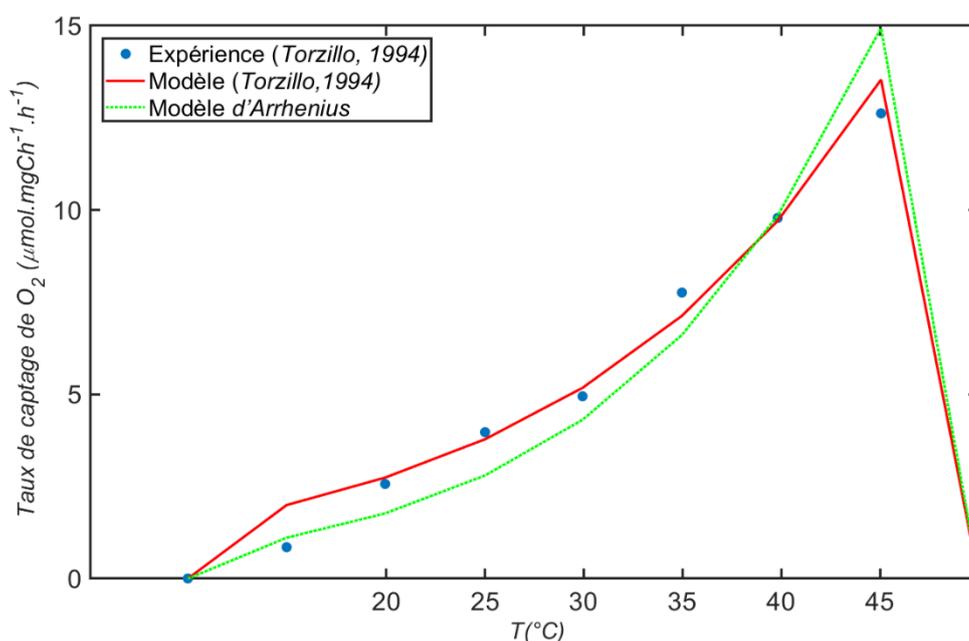
Un peu plus tôt, *Cornet* <sup>246</sup> dans sa thèse, avait trouvé la même allure exponentielle. Il a proposé de représenter l'effet de la température sur le taux de respiration de la Spiruline sous la forme d'une loi d'Arrhenius où il a exprimé la vitesse de captage de O<sub>2</sub> en ( $\text{kmol O}_2 \cdot \text{Kg de Phycocyanine}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) :

$$R_{O_2}(T) = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (25)$$

Avec  $A$  une constante pré-exponentielle,  $T$  (en K),  $\Delta H$  l'énergie d'activation (en  $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ) et  $R$  la constante universelle des gaz parfait qui vaut  $8,314$  (en  $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Récemment, *Leborgne et Pruvost* <sup>247</sup>, ont effectué une étude comparative du taux de décomposition de la biomasse (Biomass Decay Rate) en ( $\text{h}^{-1}$ ) de la microalgue *Chlamydomonas reinhardtii* et la cyanobactérie *Arthrospira platensis* (notre souche d'intérêt) dans un photobioréacteur torique. Pareillement, ils ont démontré l'efficacité de la loi d'Arrhenius à

corrélent le taux de réaction à la température et ont confirmé que le taux de respiration pendant la nuit chez les procaryotes (cyanobactéries) est amplement plus faible que chez les eucaryotes (microalgues).



**Figure 17 :** Évolution du taux de consommation d'oxygène par la *Spiruline* en fonction de la température de la nuit : confrontation des résultats expérimentaux de Torzillo et Vonshak <sup>57</sup> aux modèles.

Ce taux de respiration est également affecté par l'irradiance capturée par les cellules et les températures atteintes dans la journée, comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent : plus l'intensité lumineuse est élevée, plus le taux de respiration dans l'obscurité est élevé. Ainsi, nous terminons ce paragraphe par une constatation assez importante relative à la température optimale de la respiration qui, selon les résultats de littérature, s'avère beaucoup plus élevée que celle de la photosynthèse. Ceci permet de guider les producteurs de *Spiruline* à l'extérieur (exposée aux cycles diurnes et nocturnes) à garder la température de la culture la nuit la plus basse possible pour éviter les pertes de biomasse.

**Propriétés de la cinétique de respiration exploitée dans notre étude**  $\mu_{\text{nuit}}$  :

La vitesse de respiration exprimée par les deux formules (24) et (25) n'est pas homogène en unité, en plus les conditions réactionnelles ne sont pas similaires. Ainsi, pour faciliter la comparaison, nous avons ajusté les paramètres de la loi d'Arrhenius par les expériences de *Torzillo* et *Vonshak* <sup>57</sup> à l'aide de la méthode des moindres carrés. Cela a permis de donner finalement des valeurs aux termes de  $A$  et  $\Delta H$  différentes de celle rapportées par Cornet <sup>246</sup> soient  $9,71 \cdot 10^8$  ( $\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{mg de Chlorophylle}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) et  $6,58 \cdot 10^7$  ( $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ) respectivement.

Il convient de noter que dans la pratique, la majorité des mesures d'évolution de biomasse se réfèrent à la quantité de la Chlorophylle présente dans les cellules. Bien que la phycocyanine soit un pigment caractéristique et indicateur de la croissance de cette souche, la vocation ici est de quantifier la biomasse perdue par le métabolisme de respiration (à travers la consommation de ses ressources carbonées internes). En réalité, ces modèles décrivent la quantité d'oxygène consommée par gramme de Chlorophylle et non pas de biomasse. À défaut des données insuffisantes concernant la proportion de la Chlorophylle dans la biomasse cultivée, dans notre étude nous avons émis l'hypothèse que cela revient à la même quantité de Spiruline, c'est-à-dire que le taux de Chlorophylle n'est pas modifié.

Dès lors, pour répondre à la question de la perte de biomasse la nuit, notre modèle se base sur la combinaison de l'Eq(25) et de l'équation stœchiométrique de la respiration obscure Eq(2), pour en déduire la vitesse spécifique de consommation de Spiruline que nous avons choisi d'appeler dans ce manuscrit  $\mu_{\text{nuit}}$  en ( $\text{j}^{-1}$ ), comme suit :

$$\mu_{\text{nuit}}(T) = 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{R_{\text{O}_2}(T)}{\frac{Y_{\text{O}_2}}{X}} \quad (26)$$

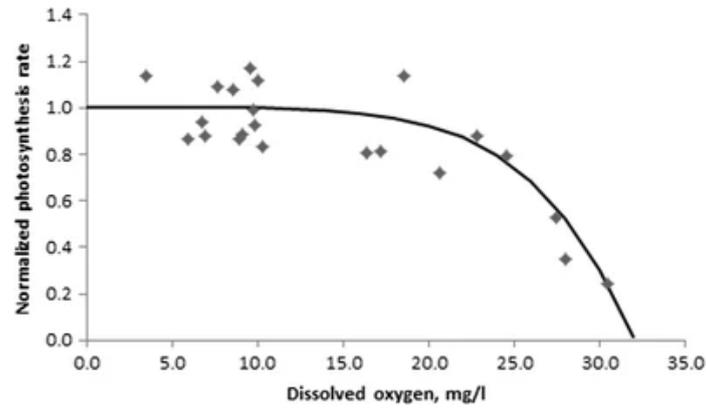
avec  $2,4 \cdot 10^{-2}$  un facteur de conversion d'unité et  $Y_{\text{O}_2/X}$  (g d' $\text{O}_2$ /g de biomasse) le rendement massique de consommation d' $\text{O}_2$  par quantité de biomasse établi à partir de la stœchiométrie :  $1,06 \cdot \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{biomasse}}}$ .

Avant de clôturer ce paragraphe, nous rappelons que, dans ce travail, nous souhaitons simuler le fonctionnement d'un photobioréacteur extérieur qui subit des variations de température journalières et saisonnières. En effet, bien que la maintenance de la température de la culture dans la gamme optimale soit obligatoire, il est nécessaire d'évaluer ce paramètre dans certaines circonstances. Pour ce faire, une modélisation fine du comportement thermique de celui-ci face aux conditions météorologiques auxquelles il est soumis, est indispensable. Ainsi, la caractérisation et le calcul des différents transferts de chaleur ayant lieu dans le procédé sont primordiaux et feront l'objet du [Chapitre IV](#).

## 5. Impact de la concentration d'oxygène

La concentration du dioxygène est un indicateur de l'activité métabolique de l'espèce, il est le coproduit de la photosynthèse. On signale, dans les systèmes de cultures de microalgues clos, des valeurs de concentration en O<sub>2</sub> en phase liquide quatre fois supérieures à la saturation au contact de l'air pendant la photosynthèse <sup>248</sup>. En effet, elles dépassent 14 mg.L<sup>-1</sup> (soit environ 200% de la saturation au contact d'air) pendant les journées bien ensoleillées, et peuvent s'accroître avec la concentration de biomasse, ce qui constitue un problème majeur pour les cultures denses dans les photobioréacteurs fermés. Les fortes concentrations d'oxygène favorisent la photorespiration, comme mentionnée dans 1.3.4 (§ B) du Chapitre I, c'est-à-dire que le ratio dioxyde de carbone/O<sub>2</sub> s'affaiblit. Par conséquent, l'oxygène entre en compétition avec le dioxyde de carbone pour la Rubisco impliquée en réduisant ainsi la fixation du CO<sub>2</sub> et donc le taux de photosynthèse <sup>116,249-251</sup>.

Avant l'étude de *Torzillo et al.*, en 1986 <sup>103</sup>, cet effet inhibiteur a été négligé pendant plusieurs années. Ces auteurs ont mis en évidence la première preuve de l'inhibition de l'oxygène sur la croissance d'*Arthrospira maxima* dans un photobioréacteur solaire tubulaire. Leurs résultats ont montré que les PBRTs de 500m ont une productivité 30% plus faible que leurs similaires à 250m, ils ont attribué cette différence de rendement à l'effet négatif de l'accumulation d'oxygène dans les réacteurs à long circuit circulaire. Ces résultats ont été soutenus par les travaux en laboratoire de *Marquez* <sup>250</sup> et *Vonshak* <sup>15</sup> qui ont rapporté une réduction drastique du taux photosynthétique de la Spiruline cultivée sous des concentrations d'O<sub>2</sub> supérieures à 22 mg.L<sup>-1</sup> (soit 300% de saturation), ce qui était en accord avec l'effet de la photooxydation et la mort cellulaire documentés antérieurement pour les fortes concentrations d'oxygène <sup>252</sup>. De nombreux chercheurs ont rapporté une diminution de la productivité lorsqu'une concentration élevée d'oxygène était présente dans les cultures d'algues <sup>108,253</sup>. Cette inhibition était déjà bien connue chez les plantes et appelée "effet Warburg" <sup>254</sup>. Une réduction de 30% de la productivité a été également signalée pour les cultures de *Chlorella vulgaris* lorsque la concentration d'O<sub>2</sub> dissous était supérieure à 30 mg.L<sup>-1</sup> <sup>255</sup>. Néanmoins, ils ont rapporté qu'un stripping efficace grâce à une meilleure efficacité du transfert de masse gaz-liquide (en Airlift avec  $K_{La} > 10 \text{ h}^{-1}$ ) pourrait permettre d'éviter cette accumulation d'oxygène dans les systèmes de culture.



**Figure 18 :** Influence de la concentration d'oxygène dissous sur le taux de photosynthèse de *S. almeriensis* <sup>256</sup>.

Bien que l'effet de la concentration d'oxygène soit largement étudié et identifié comme un facteur d'inhibition dans certains cas, les modèles mathématiques décrivant la cinétique relative à l'oxygène dans la croissance photosynthétique, en tant que paramètre limitant, restent rares.

*Concas et al.*, <sup>257</sup> ont proposé un modèle du premier degré linéaire pour la prise en compte de cet effet inhibiteur de l'oxygène dans la cinétique de croissance de la Spiruline :

$$\mu_{O_2} = \mu_{max} \cdot \left(1 - \frac{[O_2]}{[O_2]_{max}}\right) \quad (27)$$

$\mu_{max}$  est le taux de croissance spécifique maximal cellule qui vaut  $2,06 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  dans cette étude,  $[O_2]$  et  $[O_2]_{max}$  sont, respectivement, les concentrations d'oxygène dissous dans le milieu et à laquelle la croissance des algues est inhibée qui vaut  $47,9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

D'autres études peuvent être repérées dans la littérature proposant des modèles de second ordre ou autres, tenant compte de l'influence de l'oxygène dissous sur le taux de photosynthèse <sup>256,258</sup>. Néanmoins, dans notre travail, nous avons fait le choix d'écarter l'hypothèse d'une éventuelle limitation due à ce phénomène en supposant que les concentrations d'oxygène dissous dans la culture ne dépassent pas  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (cf. **Figure 18**).

La question est donc comment justifier ce choix et éviter cette accumulation en oxygène qui se produit dans les cultures extérieures à forte densité de biomasse. Évidemment, en tenant compte de la conception et l'exploitation du réacteur. En effet, une longueur maximale des tubes du photobioréacteur doit être établie et la libération de l'oxygène vers la phase gazeuse doit être promue en dégazant le liquide et en favorisant la turbulence comme prédit par *Camacho-rubio et al.*, <sup>259</sup>.

### 5.1. Influence de la longueur du tube

Nous savons d'ores et déjà, qu'à part la multiplication d'un module similaire, la seule façon d'augmenter la taille d'un photobioréacteur tubulaire est d'augmenter son diamètre et/ou sa longueur. Cette dernière est un facteur de conception limitant pour la croissance

puisque, sous certaines conditions, elle provoque l'accumulation d'oxygène et la modification du pH à la sortie du tube ainsi que les pertes de dioxyde de carbone <sup>259</sup>.

Selon *Pirt et al.*, <sup>99</sup> l'équation permettant d'estimer la quantité d'oxygène dissous produite dans un photobioréacteur est la suivante :

$$\Delta[O_2] \text{ (g.L}^{-1}\text{)} = \frac{\mu_{croissance} \cdot X \cdot \Delta t}{Y_{\frac{X}{O_2}}} \quad (28)$$

où  $\mu$  est le taux de croissance globale (unité de temps<sup>-1</sup>),  $X$  est la concentration de biomasse en (g.L<sup>-1</sup>),  $\Delta t$  est le temps passé dans un circuit et/ou dans le réacteur (ou temps de résidence) et  $Y_{\frac{X}{O_2}}$  est le ratio massique entre la biomasse produite et l'oxygène relargué. Pour la Spiruline,  $Y_{\frac{X}{O_2}}=0,53$  (i.e. selon l'Eq(1) 1,872 g d'O<sub>2</sub> est produit pour 1g de biomasse). Si nous disposons des valeurs de tous les termes de l'Eq(28), il sera possible de quantifier la teneur d'oxygène dégagée pendant un temps de séjour donné. Désormais, pour une vitesse d'écoulement de culture donnée, nous sommes en mesure de déterminer la longueur maximale admissible d'un tube de PBR pour maintenir l'oxygène en dessous du seuil d'inhibition à l'aide de l'équation suivante :

$$L_{max} = \frac{Q_l}{S} \cdot ([O_2]_s - [O_2]_e) \cdot \frac{1}{r_{O_2max}} \quad (29)$$

avec

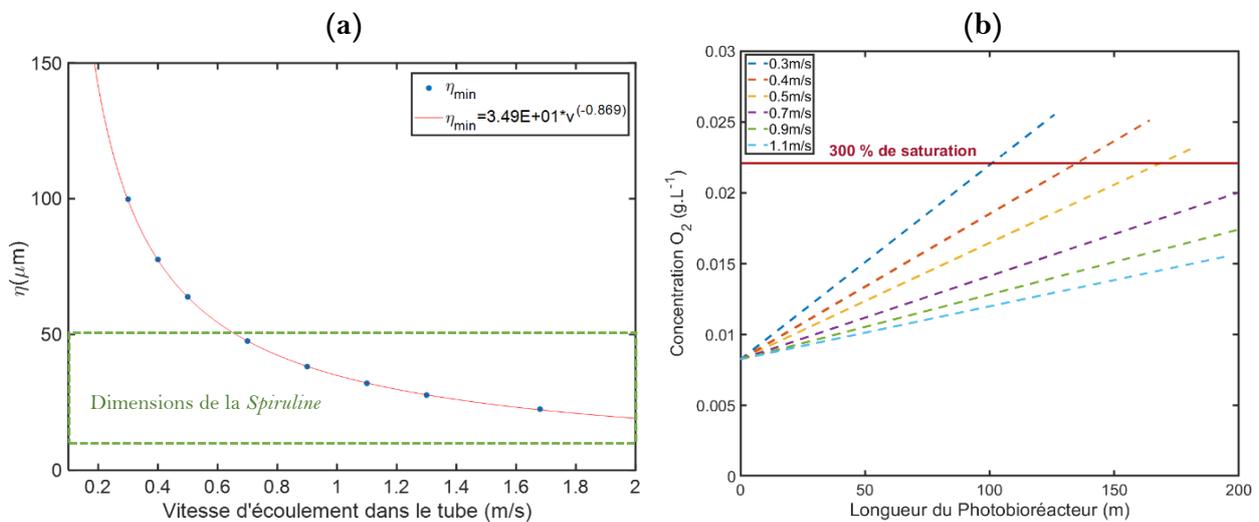
$$r_{O_2max} = \frac{d[O_2]}{dt} = \frac{\mu_{max} \cdot X}{Y_{\frac{X}{O_2}}}$$

où  $L_{max}$  est la longueur maximale du tube,  $Q_l$  est le débit volumique de la culture,  $S$  est la section du tube,  $([O_2]_s - [O_2]_e)$  est la différence des concentrations volumiques d'oxygène entre l'entrée et la sortie du tube, et  $r_{O_2max}$  est le taux volumique maximal de génération d'oxygène par photosynthèse dans le tube.

Les études expérimentales réalisées pour l'optimisation de ce paramètre, indique que pour des diamètres variant de 5 à 10 cm, la longueur maximale de tube adéquate, pour ne pas dépasser des niveaux d'O<sub>2</sub> de 300% de saturation et pour minimiser les pertes de CO<sub>2</sub>, se situe entre 80 et 120 m pour une vitesse d'écoulement de culture comprise entre 0,3 et 0,5 m.s<sup>-1</sup> <sup>99,106,259-261</sup>. En effet, cette grandeur dépend d'une part de la vitesse d'écoulement (ou le débit du milieu de culture) qui est responsable de la turbulence dans la partie tubulaire et qui doit être telles que les dimensions des micro-tourbillons Eq(4) restent supérieures à celle de la souche cultivée. D'autre part, la longueur limite est déterminée pour la valeur maximale de la vitesse de production d'oxygène, cependant, nous connaissons déjà que dans le cas des cultures extérieures, la vitesse de croissance maximale est atteinte uniquement sous des conditions opératoires et d'éclairement bien spécifiques (ou optimales). Pour la Spiruline les productivités volumiques maximales atteignables dans un tube droit solaire vont de 1,02 <sup>119</sup> à 1,05 <sup>118</sup> g.L<sup>-1</sup>.J<sup>-1</sup> correspondant à 0,022 mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>. Pour obtenir la longueur maximale du circuit tubulaire, la concentration d'oxygène à l'entrée est souvent supposée égale à 100% de saturation en air <sup>260</sup> (soit une concentration dissoute de 8,26 mg.L<sup>-1</sup> à 25°C).

## 5.2. Caractérisation de la longueur optimale dans notre cas d'étude

À l'appui de l'Eq(4), l'influence de la vitesse du liquide dans le tube sur la micro-échelle spatiale de Kolmogorov est représentée sur la **Figure 19-(a)** indiquant qu'à au-delà de  $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la taille minimale des micro-tourbillons devient égale ou plus petite que les dimensions de la Spiruline ce qui provoque des dommages par les forces de cisaillements. Cela rejoint les résultats expérimentaux de la littérature <sup>106,119</sup> rapportant qu'une vitesse du liquide supérieure à  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  impacte fortement la culture provoquant une lise cellulaire et un effondrement. Identiquement, en utilisant l'Eq(29), l'évolution de la concentration de l'oxygène dissous le long du tube a été calculée en fonction de six vitesses d'écoulement différentes de  $0,3$  à  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pour une productivité de biomasse maximale issue de la littérature <sup>119</sup> de  $1,19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$  ainsi la longueur du circuit tubulaire solaire a été limitée pour une concentration de  $22 \text{ mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ . Pour un diamètre constant de  $5 \text{ cm}$ , nous constatons dans la **Figure 19-(b)** que plus la vitesse de circulation dans le tube est grande plus la longueur admissible est grande (car le temps de passage est petit). Compte tenu des effets fatals des contraintes mécaniques induites par l'augmentation du cisaillement hydrodynamique, des vitesses d'écoulement du liquide inférieures à  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sont envisageables permettant des longueurs du circuit maximales allant de  $100$  à  $150 \text{ m}$ . Ceci est en accord avec les dimensions des PBRs tubulaires signalées dans la littérature <sup>106</sup>. Dans notre cas d'étude, nous optons pour une vitesse de  $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , par conséquent, une longueur de  $120 \text{ m}$  pour la partie tubulaire.



**Figure 19 :** Effet de la vitesse de la culture dans un PBR tubulaire sur : (a) les longueurs minimales des micro-tourbillons produits par la turbulence ; (b) l'évolution de la concentration d' $\text{O}_2$  dissous et les longueurs admissibles du circuit solaire, pour un tube de diamètre de  $5 \text{ cm}$  et une productivité maximale de  $1,19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ .

## 6. Impact de la nutrition

Les microalgues ont besoin de divers nutriments pour se développer et lorsqu'elles subissent une limitation nutritive, leur croissance peut être affectée de manière significative. Les composés carbonés et azotés jouent un rôle prépondérant dans la croissance et la composition organique des cellules. Il existe également de nombreux nutriments et/ou micronutriments qui sont nécessaires à la croissance optimale des microalgues <sup>262,263</sup>.

La Spiruline est connue par sa culture alcaline dans les lacs salins. Pour l'étude de sa croissance, plusieurs milieux ont été étudiés en fonction des conditions de croissance locales. Mais, le milieu de *Zarrouk* reste la source du milieu de base le plus couramment utilisé pour la croissance de cette cyanobactérie même si la souche étudiée est *Spirulina maxima* <sup>12</sup>. C'est la première étude, à notre connaissance, qui détaille les besoins de nutriments à la croissance de cette espèce. Plus tard, d'autres milieux ont été préparés en modifiant la recette de *Zarrouk* afin d'optimiser la production de biomasse et minimiser les coûts. Dans la revue de *Soni et al.*, <sup>138</sup>, un tableau résumant la composition chimique de quelques milieux existants dans la littérature, est présenté à titre comparatif. Bien que les cultures de Spiruline ne soient généralement pas réalisées dans des conditions axéniques<sup>20</sup>, l'eau utilisée doit être propre et pas trop dure pour éviter la précipitation chimique et la formation des boues.

La modélisation biologique de la cinétique de croissance relative aux nutriments sera abordée dans cette section. Le carbone et l'azote sont les constituants majeurs de la cellule (cf. composition élémentaire de la Spiruline <sup>13,240</sup>). C'est la raison pour laquelle nous réservons les paragraphes qui suivent à l'étude de l'influence de ces deux espèces prédominantes sous formes de bicarbonates ou/et carbonate et nitrates.

Dans la littérature ouverte, de nombreux modèles mathématiques sont utilisés pour relier la concentration en nutriments à l'évolution de la biomasse. Ils peuvent ainsi être classés en : (i) **modèles non-structurés** où le taux de croissance de la biomasse est une fonction directe de son environnement et la biomasse est considérée dans son intégralité ; dans cette catégorie on retrouve les modèles de type Monod <sup>264</sup> (ii) **modèles structurés** qui font intervenir l'évolution de la composition interne des cellules et d'autres paramètres physiologiques (ex : la taille, la morphologie etc.); dans cette seconde catégorie on retrouve les modèles de type Droop <sup>265</sup> qui sont plus difficiles à manipuler. Pour ne pas alourdir inutilement ce paragraphe, on peut citer un résumé d'une multitude de modèles qui se trouvent dans la littérature <sup>227</sup>.

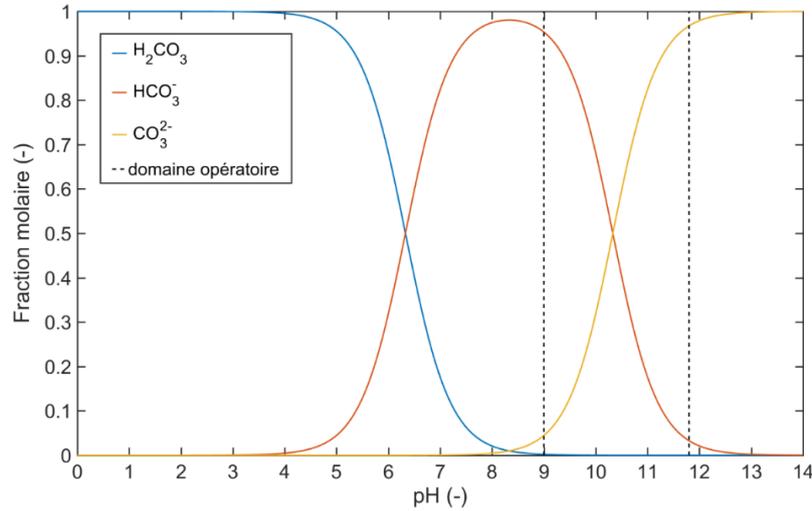
### 6.1. Effet du substrat carboné

Le carbone est la source inorganique primordiale pour la croissance et la photosynthèse de la Spiruline. Dans l'eau, il se trouve sous formes de  $H_2CO_3$ ,  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$  et  $CO_3^{2-}$  dont la proportion varie en fonction du pH. Ces espèces sont à l'origine de l'effet tampon dans les systèmes d'eau douce. Étant donné que notre souche croît dans les milieux alcalins à pH supérieur à 9, ce substrat se trouve dans le milieu de culture sous forme d'ions de bicarbonate

---

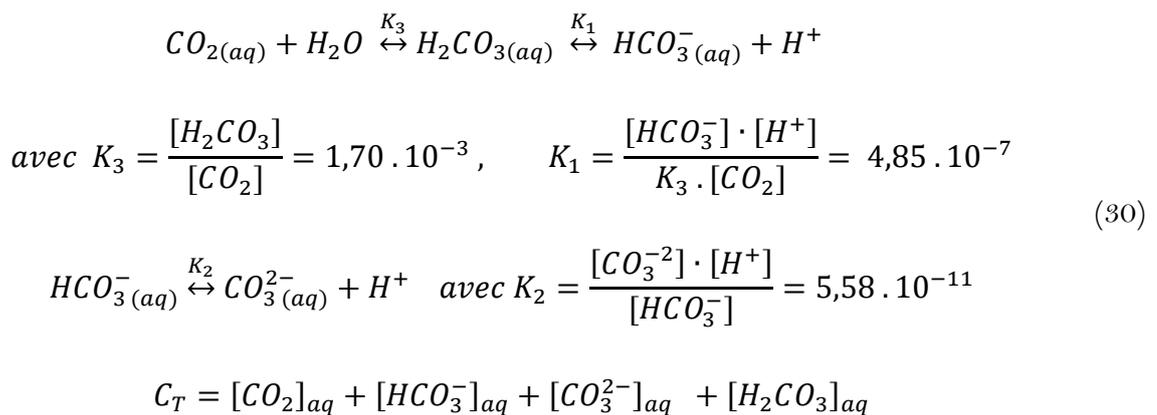
<sup>20</sup> Conditions axéniques : milieu stérile qui est complètement exempt de germes contaminants.

$\text{HCO}_3^-$  majoritairement et de carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$  (cf. **Figure 20**). Les besoins en carbone peuvent être assurés soit par l'injection de  $\text{CO}_2$ , soit par l'ajout de sel carbonaté comme le bicarbonate de sodium  $\text{NaHCO}_3$  qui permet de produire les ions en question. Une autre solution consiste à utiliser des cuves de pré-carbonatation permettant de fournir des grandes quantités de carbone inorganique par bullage de  $\text{CO}_2$  gazeux. Cependant, le défi consiste toujours à gérer la physicochimie du milieu carbonaté <sup>266</sup>.



**Figure 20** : Distribution des formes du carbone dissous dans l'eau en fonction du pH <sup>39</sup>.

Les équilibres acido-basiques des différentes espèces carbonées présentes dans la solution (dioxyde de carbone, acide carbonique, bicarbonate et carbonate) ainsi que la formule du carbone total sont donnés par le système d'équation ci-après avec les coefficients d'acidité respectifs :



Les grandeurs des constantes d'équilibre  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont issues de la littérature <sup>39,266</sup> pour une température de solution de  $37^\circ\text{C}$ .

Pour étudier l'influence de la nutrition carbonée sur la cinétique de croissance de la *Spiruline*, il est nécessaire de prendre conscience du caractère amphotère de l'espèce de carbone apporté

au milieu. En effet, si la source carbonée est fournie sous forme de bicarbonate de sodium, la quantité introduite au milieu ne correspond pas exactement à celle assimilée par les cellules, en raison des équilibres acido-basique dans la solution associés au pH. Par ailleurs, quelles que soient la forme et la concentration du carbone, celles-ci affectent directement le pH. Ce dernier est également un autre paramètre important pour la croissance des microalgues. En effet, *Zarrouk*<sup>12</sup>, dans sa thèse rapporte que, d'une part le pH influence directement l'activité photosynthétique de l'espèce qui doit admettre des limites physiologiques d'acidité et de basicité, et, d'autre part, qu'il joue un rôle indirect sur la croissance en modifiant la dominance des espèces carbonés et la solubilité de certains élément nutritifs comme le carbonate. Pour la Spiruline, les données expérimentales de la littérature<sup>12,13,39,267,268</sup> témoignent d'une augmentation du pH avec la croissance de la biomasse. Cela a été justifié par l'échappement de CO<sub>2</sub> du milieu en raison de l'agitation, par la consommation de la source de carbone pour la photosynthèse et la libération de l'ion OH<sup>-</sup> comme sous-produit de l'activité métabolique de la souche. Cette augmentation devient nocive si le pH dépasse 11,3 car elle entraîne une destruction des cellules par la modification néfaste du pH intracellulaire qui devrait être proche de la neutralité dans les cas optimaux<sup>12</sup>.

Pour le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> dissous, les résultats de *Silva et Pirt*<sup>269</sup> ont montré qu'à des concentration très élevées, soit 440 mg CO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> à 37 °C, la croissance des microalgues peut être inhibée. Plus exactement, dans les photobioréacteurs fermés, le CO<sub>2</sub> se comporte comme un inhibiteur à des pressions partielles supérieures à 0,6 atm<sup>269</sup>. Cependant, nous ne pouvons pas distinguer l'origine de cette inhibition qui est provoquée à la fois par le CO<sub>2</sub> lui-même et par son effet sur l'acidité.

De ce point de vue, il n'est donc pas évident de distinguer l'impact du pH sur la photosynthèse de celui de la source carbonée<sup>12,13,267</sup>. C'est pourquoi, une bonne compréhension de la relation entre le pH et la concentration en carbone dans le milieu et également entre le taux de croissance et ces deux paramètres est nécessaire. Cependant, dans les approches de modélisation existantes, cette relation entre ces deux paramètres manque, car les modèles considèrent leurs effets ensemble et donc un seul d'entre eux est inclus dans les modèles (i.e. soit la quantité du carbone inorganique total C<sub>T</sub> soit le pH)<sup>256,261,270</sup>.

*Filali et al.*,<sup>271</sup> ont utilisé la quantité de carbone inorganique total dans un modèle de type Monod pour prédire la croissance de *Chlorella vulgaris* ; cette approche a montré une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Néanmoins, bien que ce modèle montre l'effet positif d'une concentration élevée de carbone sur la croissance des microalgues, ils ne montrent pas son effet néfaste à des valeurs de pH en dehors de la plage optimale. Par conséquent, il ne peut être appliqué que dans une gamme étroite de pH. Dès lors, des modèles considérant une loi de Monod avec un effet inhibiteur pour le carbone ont été jugés comme plus appropriés<sup>272</sup>.

D'autre part, dans les thèses respectives de *Zarrouk*<sup>12</sup> et *Gernigon*<sup>39</sup>, il a été noté que la forme préférentielle de carbone inorganique absorbé par la Spiruline est le ion hydrogénocarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, qui est l'espèce prédominante en fonction de la plage optimale de pH de la Spiruline (entre 9 et 11,5 cf. **Figure 20**). De plus, la quantité de carbone réellement assimilée par la biomasse et qui intervient dans la cinétique n'est pas exactement celle de bicarbonate introduit,

car ce dernier se transforme, en partie, en carbonate (Cf. Eqs (30)) à des valeurs de pH élevées. Par conséquent, dans le deuxième travail mentionné <sup>39</sup>, l'auteur propose un modèle considérant la concentration de bicarbonate après réaction dans la solution et introduit une inhibition liée à la concentration élevée du carbonate dans le milieu (plutôt qu'une inhibition par le bicarbonate comme c'est documenté dans certaines études antérieures <sup>272</sup>) pour décrire l'influence de la nutrition carbonée sur la cinétique de croissance de cette espèce. Ainsi, le modèle proposé combine deux cinétiques : celle liée à la concentration en bicarbonate, et celle décrivant l'effet négatif du carbonate. Bien que ce modèle reproduise avec satisfaction les résultats expérimentaux, il ne décrit que l'effet limitant du bicarbonate et le ralentissement de la cinétique lié à la formation de sa base conjuguée, mais ce indépendamment du pH (i.e. car le pH a été contrôlé), alors que ce dernier est en évolution continue dans la culture en raison de la croissance et de la consommation du bicarbonate (i.e. le pH du milieu devient basique). Cela peut expliquer la raison du faible écart enregistré entre le modèle et les expériences, signalé par le même auteur. Dans ce contexte, des études supplémentaires semblent nécessaires pour voir l'effet du pH et de la teneur en carbone sur la croissance des microalgues séparément.

Malgré cela, il y a très peu de chercheurs qui ont inclus dans leur modèle l'effet du carbone en tant que facteur limitant et son impact sur la composition du milieu.

**Cinétique relative au carbone exploitée dans notre étude**  $\mu_C$  :

Étant donné que notre étude porte sur la même souche que celle étudiée par *Gernigon* <sup>39</sup>, nous exploiterons le modèle proposé pour la cinétique relative à l'influence de la source de carbone, et qui est issu d'une série de campagnes expérimentales à cet effet. Pour davantage de détails sur le modèle et le protocole, le lecteur peut se référer au document cité.

$$\mu_C = 1,24 \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]}{0,00658 + [\text{HCO}_3^-]} - 10,6 \cdot [\text{CO}_3^{2-}] \quad (31)$$

$[\text{HCO}_3^-]$  et  $[\text{CO}_3^{2-}]$  sont les concentrations molaires de bicarbonate et carbonate en solution respectivement en (mol.L<sup>-1</sup>)

La quantité initiale de bicarbonate à introduire est déterminante, car elle permet d'assurer une cinétique de croissance idéale. Lors de la croissance, d'une part cette espèce est consommée par conséquent une limitation nutritionnelle se survient par rapport à ce substrat et, d'autre part, le pH augmente donnant à lieu à des ions de carbonate qui inhibe la croissance.

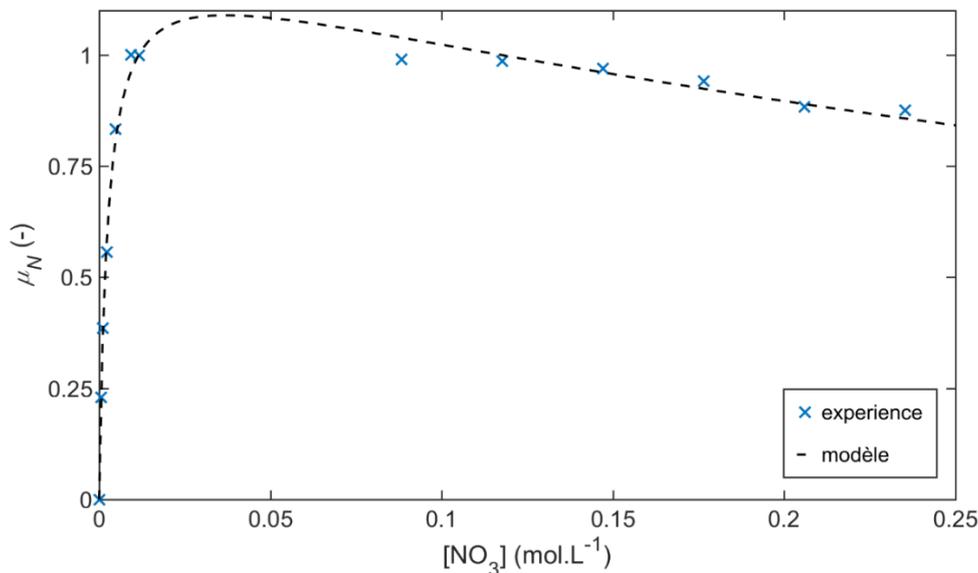
## 6.2. Effet du substrat azoté

La Spiruline est capable d'utiliser plusieurs formes azotées. Elle peut utiliser l'ammonium quand le pH de la culture se situe entre 8 et 8,5, car, à un pH élevé, la concentration en ammoniac libre atteint des valeurs qui pourraient être inhibitrices à la croissance. Le nitrate est la forme d'azote convenable à assimiler pour cette souche <sup>12</sup>. Toutefois, l'ammonium et l'urée, séparément ou en combinaison avec le nitrate, peuvent être

utilisés pour une croissance avec des rendements acceptables, comme le montrent les recettes des milieux de culture rapportées dans la revue de *Soni et al.*, <sup>138</sup>.

Ces formes d'azote peuvent affecter les composants de l'appareil photosynthétique cellulaire qui représente une grande partie de l'azote total contenu dans les microalgues. Par conséquent, les cellules réagissent à une réduction de la disponibilité en azote en réduisant la taille de l'appareil photosynthétique.

L'influence de la concentration de l'azote (sous forme de nitrate) sur la croissance de *Spirulina maxima* a été étudiée par *Zarrouk* <sup>12</sup>. Ses conclusions stipulent que les concentrations maximales tolérées par cette microalgue sont aux environs de 7,5 g.L<sup>-1</sup>. Au-delà de cette dernière, un stress se manifeste suite à une inhibition. En revanche, des conditions expérimentales avec de faibles teneurs d'azote limitent la vitesse de croissance. En se basant sur ces résultats, une normalisation a été effectuée, puis une corrélation empirique a été proposée pour décrire la cinétique de croissance relative au substrat azoté, en utilisant un modèle de type Andrews Eq(32) pour prendre en compte l'effet inhibiteur des fortes concentrations <sup>39</sup>.



**Figure 21 :** Données expérimentales normalisées de l'influence de la quantité de nitrate en solution de *Zarrouk* <sup>12</sup> vs le modèle de Andrews ajusté <sup>39</sup>.

**Cinétique relative à l'azote exploitée dans notre étude  $\mu_N$ :**

Tout comme la cinétique relative à la source de carbone, nous utiliserons, dans ce travail, le modèle déjà établi par *Gernigon* <sup>39</sup> pour décrire l'influence de la source d'azote sous forme de nitrate sur la vitesse de croissance. L'expression de la corrélation est :

$$\mu_N = 1,14 \cdot \frac{[NO_3^-]}{0,00250 + [NO_3^-] + \left(\frac{[NO_3^-]}{0,738}\right)^2} \quad (32)$$

$[NO_3^-]$  est la concentration molaire de nitrate en mol.L<sup>-1</sup>

## Chapitre II

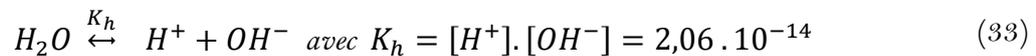
Bien que nous soyons conscients que d'autres éléments tels que le phosphore, le sulfate et les oligoéléments sont nécessaires pour la croissance de la Spiruline, leur concentration dans le milieu est considérée comme largement suffisante pour satisfaire les besoins stœchiométriques et leur rendement (ou ratio) de conversion massique est faible comparativement aux bicarbonate et nitrate.

## 7. Caractérisation du milieu de culture

La composition de l'environnement, dans lequel la cyanobactérie croît, évolue au cours du temps en raison de la consommation des nutriments par la biomasse et des interactions des différents constituants chimiques entre eux dans la solution (réactions et équilibres chimiques), ainsi que sous les effets des phénomènes de transfert de matière. Par conséquent, pour être en mesure de bien prédire le comportement du système biologique qui est en lien direct avec le milieu, il faut prendre en considération tous les bilans de matières et les réactions chimiques ayant lieu au sein du volume.

### 7.1. Équilibres des espèces chimiques

Comme mentionné précédemment, les espèces chimiques en solution, en l'occurrence le carbone sous ses différentes formes, interagissent entre elles via des réactions acido-basiques (présentées dans les Eqs (30)). Ainsi, pour évaluer correctement les quantités de ces espèces en solution, il est indispensable de prendre en compte ces réactions ainsi que les bilans de matière appropriés. Néanmoins, la prise en compte de la seule contribution des espèces carbonées (dans la chimie du système) n'est pas suffisante pour rendre compte de l'évolution du milieu. Il est important d'y ajouter l'équation de l'électroneutralité Eq (34) qui met en évidence les ions existant dans la solution, notamment l'oxonium et l'hydroxyde résultant de l'auto-pyrolyse de l'eau Eq (33), tout en considérant que les concentrations des autres anions et cations sont négligeables en solution par rapport aux anions et cations majoritaires (cf. *Tableau 7*).



$$2 \cdot [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-] + [NO_3^-] + [Cl^-] = [H^+] + [Na^+] \quad (34)$$

Par la combinaison des équations (30), (33) et (34), on obtient un système algébrique de cinq équations d'équilibre à résoudre pour représenter l'évolution de la chimie du milieu.

Il est clair que la composition du milieu est bien plus complexe que le système présenté ci-avant. En effet, elle engage d'autres interactions entre les espèces chimiques présentes comme les oligoéléments et les sels qui ne sont pas prises en compte. Nous précisons alors, que cette simplification du système, permettant de réduire la complexité de sa résolution, se base sur quelques considérations issues des travaux précédents <sup>39</sup> :

1. Le système algébrique établi considère seulement l'équilibre des réactions acido-basiques des espèces du carbone et de la dissociation de l'eau ;
2. Toutes les réactions chimiques de complexation et précipitations qui peuvent avoir lieu entre l'ensemble des espèces sont ignorées (les concentrations des sels sont largement inférieures à la solubilité).

3. Tous les ions en dehors de ceux considérés ici sont des espèces spectatrices dont la concentration n'est pas limitante pour la croissance et n'a pas d'effet majeur sur l'évolution du milieu.

Un modèle élaboré avec un degré de raffinement plus élevé, tenant compte des effets des interactions chimiques avec les espèces ignorées ici, pourrait être considéré ultérieurement, comme réalisé par *Besson* <sup>21</sup> à l'aide du logiciel PHREEQC.

Le **Tableau 7** présente les concentrations et conditions initiales des différents composants du modèle.

**Tableau 7:** Caractérisation du milieu de culture utilisé <sup>39</sup>

Constituants	Concentration massique g.L <sup>-1</sup>	Concentration molaire mol.L <sup>-1</sup>	Solubilité dans l'eau à 25°C (g.L <sup>-1</sup> )
NaOH	1,4	0,035	(-)
NaHCO <sub>3</sub>	19	0,226	87
NaNO <sub>3</sub>	4,65	0,054	921
NaCl	4	0,068	358,5

## 7.2. Transfert de CO<sub>2</sub>

Outres les équilibres chimiques entre les différentes formes du carbone inorganique dissous dans la solution aqueuse, un autre phénomène est à prendre compte : il s'agit du transfert de masse entre phases. La molécule d'acide carbonique dissous  $H_2CO_3$  est en équilibre dans la solution Eq (30) avec les autres espèces du carbone. Or, le  $CO_2$  dissous, obéit quant à lui à un équilibre physique avec la phase gazeuse (i.e. transfert gaz-liquide) si une interface gaz-liquide est présente dans le système de production.

Si l'on se réfère au diagramme de distribution des différentes formes de carbone dissous dans le milieu et la plage du pH opératoire de notre souche d'intérêt (voir **Figure 20**), on constate que l'espèce de  $CO_2$  dissous dans le milieu est quasiment inexistante. De plus, bien que la solubilité du  $CO_2^*$  soit faible ce qui impose une résistance au transfert de masse dans la phase liquide, la quantité de dioxyde de carbone transférée vers le gaz reste très faible par rapport à la quantité de carbone introduite (i.e. sous forme de bicarbonate) car, comme nous l'avons mentionné, le pH augmente au cours de la croissance (à la fois en raison de la consommation de bicarbonate par la biomasse et de la formation de carbonate). Néanmoins, dans notre approche de modélisation nous considérons ce phénomène de transfert et quantifions ainsi la quantité de  $CO_2$  qui pourrait être relarguée de notre photobioréacteur, ce qui pourrait être une limitation d'un tel procédé dont les objectifs s'inscrivent dans un contexte environnemental.

Dans un contacteur ou réacteur gaz liquide fermé comportant une interface (surface libre ou bullage), la modélisation du flux échangé en ( $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ) entre les deux phases s'écrit dans la même approche que pour l'oxygène dissous :

$$\frac{d[CO_2]_{aq}}{dt} = K_L a_{CO_2} \cdot ([CO_2^*] - [CO_2]_{aq})$$

*avec*

$$[CO_2^*] = \frac{y_{CO_2} \cdot P}{H_{CO_2}}$$
(35)

Il s'agit du produit d'un coefficient volumétrique de transfert  $K_L a_{CO_2}$  par une différence de potentiel c'est-à-dire entre la quantité de carbone inorganique total dissous  $[CO_2]_{aq}$  et la solubilité de dioxyde de carbone pouvant être obtenue dans le milieu  $[CO_2^*]$ . Cette dernière est calculée à partir du ratio entre la pression partielle de  $CO_2$  dans le gaz (supposant un gaz parfait)  $y_{CO_2} \cdot P$  et la constante de Henry du dioxyde de carbone  $H_{CO_2}$ .

Dans les systèmes gaz-liquide avec bullage, la plus grande résistance au transport de masse réside dans le film liquide autour des bulles. Cette résistance, qui est quantifiée par le coefficient de transfert de masse volumétrique côté liquide, est influencée par divers facteurs tels que la forme et la taille des bulles, la vitesse relative des bulles de gaz et de la phase liquide, ainsi que le taux de dissipation d'énergie turbulente <sup>154</sup>. Entre autres, le coefficient volumique de transfert de  $CO_2$  entre les deux phases, pourrait être estimée à partir des corrélations disponibles pour le coefficient de transfert de l'oxygène  $K_L a_{O_2}$  en utilisant les diffusivités en phase aqueuse de  $O_2$  et  $CO_2$  (resp.  $D_{O_2}$  et  $D_{CO_2}$ ) <sup>273</sup> :

$$K_L a_{CO_2} = K_L a_{O_2} \cdot \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{D_{O_2}}}$$
(36)

Le modèle de pénétration d'*Higbie* et le modèle de cellules de *Foucault* <sup>274</sup> sont les modèles les plus largement utilisés pour la prédiction théorique des coefficients de transfert de masse gaz-liquide dans les réacteurs biologiques.

### 7.3. Substrats et produits des processus biologiques

Pendant la croissance, la Spiruline assimile les ressources nutritionnelles qui sont à sa disposition dans la solution. En retour, la composition de cette dernière intervient sur la vitesse de croissance de cette souche comme nous l'avons pu le voir dans les paragraphes précédents. Pendant la nuit, la biomasse se décompose en utilisant l'oxygène disponible dans le milieu (i.e. par respiration), par conséquent l'oxygène dissous est alors un substrat consommé par ce métabolisme.

Afin de décrire au mieux l'évolution du milieu au regard de la consommation des nutriments et d'oxygène dissous, les équations stœchiométriques de la synthèse/consommation de biomasse énoncées dans (§ 1.3.4 Chapitre I) et celles de conservation de la matière ont été utilisées. Ainsi, les valeurs théoriques des rendements (ou ratio) de conversion massique des substrats considérés (à savoir le bicarbonate et le nitrate pour la photosynthèse et l'oxygène dissout pour la respiration) dans la biomasse totale (dont la masse molaire des glucides est estimée de 23,73 mol.g<sup>-1</sup> <sup>246</sup>) peuvent être déduits :

*Pour la photosynthèse*

$$Y_{C/X} = \frac{M_{HCO_3^-}}{23,73} = 2,571 \text{ (g de } HCO_3^- \cdot g^{-1} \text{ de biomasse)} \quad (37)$$

$$Y_{N/X} = \frac{0,173 \cdot M_{NO_3^-}}{23,73} = 0,452 \text{ (g de } NO_3^- \cdot g^{-1} \text{ de biomasse)} \quad (38)$$

*Pour la respiration*

$$Y_{O_2/X} = 1,06 \cdot \frac{M_{O_2}}{23,73} = 1,428 \text{ (g } O_2 \cdot g^{-1} \text{ de biomasse)} \quad (39)$$

où le rendement de consommation des bicarbonates est  $Y_{C/X}$ , celui des nitrates  $Y_{N/X}$ , et celui de dioxygène  $Y_{O_2/X}$ .

Pendant la croissance, la vitesse de production de biomasse (i.e. le taux de croissance spécifique total noté  $\mu_{croissance}$ ), permet de calculer l'évolution de la composition du milieu concernant la consommation des substrats de carbone et d'azote, et la production de dioxygène à l'aide des équations des bilans matières partiels d'un réacteur fermé (Batch) Eqs(40), (41) et(42).

Lors de la respiration, la Spiruline utilise ses réserves internes en consommant l'oxygène dissous dans son environnement. En plus d'être consommé dans ce catabolisme nocturne qui est régi par le taux spécifique  $\mu_{nuit}$ , le dioxygène dissous est transféré depuis le milieu liquide vers la phase gazeuse aux interfaces gaz-liquide présentes. Pour la quantification de sa concentration dans la culture, on prend en compte la vitesse de transfert de matière à l'interface entre le liquide et le gaz modélisée selon une approche classique sous la forme du premier terme du membre de droite de l'Eq (43). Le second terme représente la consommation de ce constituant dans le milieu. La respiration libère du dioxyde de carbone, à des hautes valeurs de pH. Ce composant peut se transformer en bicarbonate mais également être transféré dans en phase gazeuse si elle est présente, c'est pourquoi nous tenons compte de sa production et de son transfert dans les processus nocturne Eq(44).

Il convient de noter que le PBR considéré est divisé en deux parties : une première partie tubulaire (collecteur solaire) fermée sans contact avec l'air (supposée être sans phase gazeuse, car la longueur est limitée dans cet objectif); et une deuxième partie qui sert de réservoir ouvert (colonne à bulle) où s'opèrent les différents phénomènes de transfert gaz-liquide notamment le dégazage du surplus d'O<sub>2</sub> dans l'atmosphère (i.e. stripping de l'O<sub>2</sub> par bullage)

d'où l'introduction du coefficient  $V_C/V_R$  (soit  $V_C$  le volume du réservoir et  $V_R$  le volume total du réacteur).

Nous considérons que la croissance se réalise sur tout le volume du réacteur bien que nous sommes conscients que l'échelle de temps de résidence dans la colonne doit être comparée à celle du temps biologique de croissance pour vérifier la validité de cette hypothèse. De fait, nous supposons que ce temps de passage dans la colonne n'impacte pas significativement le taux de production de biomasse.

Les différentes équations différentielles qui assurent le suivi de la concentration des substrats et produits des deux métabolismes impliqués (photosynthèse et respiration), dans ce procédé, sont présentées ci-dessous. Il s'agit de bilans de matières partiels (pour chaque constituant).

***Pour la photosynthèse***

$$\text{Substrats : } \frac{d[HCO_3^-]}{dt} = -\frac{Y_{C/X}}{M_{HCO_3^-}} \cdot \mu_{\text{croissance}} \cdot X \quad (40)$$

$$\frac{d[NO_3^-]}{dt} = -\frac{Y_{N/X}}{M_{NO_3^-}} \cdot \mu_{\text{croissance}} \cdot X \quad (41)$$

$$\text{Produit : } \frac{d[O_2]}{dt} = \frac{\mu_{\text{croissance}} \cdot X}{Y_{X/O}} + K_L a_{O_2} ([O_2^*] - [O_2]) \cdot \frac{V_C}{V_R} \quad (42)$$

***Pour la respiration***

$$\text{Substrat : } \frac{d[O_2]}{dt} = -\frac{Y_{O/X}}{M_{O_2}} \cdot \mu_{\text{nuit}} \cdot X + K_L a_{O_2} ([O_2^*] - [O_2]) \cdot \frac{V_C}{V_R} \quad (43)$$

$$\text{Produit : } \frac{d[CO_2]}{dt} = \frac{Y_{CO_2/X}}{M_{CO_2}} \cdot \mu_{\text{nuit}} \cdot X + K_L a_{CO_2} ([CO_2^*] - [CO_2]) \cdot \frac{V_C}{V_R} \quad (44)$$

$[O_2^*]$  et  $[CO_2^*]$  sont les concentrations en dioxygène et dioxyde de carbone dissous soient 8,2 mg.L<sup>-1</sup> et 0.6 mg.L<sup>-1</sup> à 25°C respectivement.  $Y_{CO_2/X}$  est le ratio de conversion stœchiométrique de production de CO<sub>2</sub> par la Spiruline dans la nuit (produit de respiration).

## 8. Outils et méthodes numériques mis en œuvre

La résolution de l'ensemble des équations considérant les bilans de masse, de transferts de matière, les équilibres d'espèces chimiques permettant de caractériser le comportement de notre système biologique en termes de : production de biomasse, de consommation de carbone et d'azote et de production, et de transfert d'oxygène et de  $\text{CO}_2$ , est accomplie à l'aide d'un outil numérique développé sous le logiciel **Matlab** ©.

Conceptuellement, le système considéré est constitué d'équations algébriques pour résoudre les équilibres des espèces chimiques et d'équations différentielles pour suivre l'évolution du milieu biologique au cours du temps.

Les principaux composants pour lesquels on a choisi volontairement d'évaluer la concentration sont :

des composants dissous :

1.  $\text{NO}_3^-$  : l'azote, disponible sous forme de nitrate, il est consommé par la Spiruline.
2.  $\text{CO}_2$  : le dioxyde de carbone, en équilibre chimique avec le bicarbonate et le carbonate. Il est transféré vers la phase gazeuse et est produit aussi par le processus de respiration nocturne.
3.  $\text{HCO}_3^-$  : le bicarbonate, qui est consommé par la Spiruline.
4.  $\text{CO}_3^{2-}$  : le carbonate, une autre forme de carbone en équilibre chimique avec les deux autres, qui n'est pas utilisée par la cyanobactérie.
5.  $\text{O}_2$  : le dioxygène dissous, il est produit lors de la photosynthèse et est consommé par la respiration, mais aussi transféré dans l'atmosphère.
6.  $\text{OH}^-$  : l'hydroxyde, il est utilisé dans les équilibres ioniques et neutralité du milieu.
7.  $\text{H}_3\text{O}^+$  : l'oxonium, il est utilisé dans les équilibres ioniques et neutralité du milieu.
8.  $\text{Cl}^-$  : le chlorure, il est utilisé dans les équilibres ioniques et neutralité du milieu.
9.  $\text{Na}^+$  : le sodium, utilisé dans la neutralité du milieu.

et un composant particulière :

10. X : la concentration de biomasse qui augmente avec la photosynthèse et décroît avec la respiration.

Le suivi numérique de ces éléments implique deux étapes principales et consécutives :

- 1) L'évaluation de la chimie du milieu depuis les conditions initiales de démarrage de la culture. Ceci se fait en résolvant un système de cinq équations représentant des équilibres acido-basiques et de neutralité électrique de la solution, et données par les Eqs (30), (33) et (34) respectivement.

La solution de ces inconnues, à savoir les quatre formes de carbone, l'oxonium et l'hydroxyde, est obtenue par la méthode numérique itérative de Newton-Raphson utilisant une matrice jacobienne. Le critère de convergence et le nombre d'itérations entre deux solutions successives sont imposées à 0,001 et 20 respectivement. Cette

méthode de résolution a été exploitée intégralement depuis un algorithme déjà pré-implémentée.

- 2) La résolution simultanée des équations différentielles explicitées précédemment : l'Eq(18) soit avec les Eqs (40) (41) (42) et (35) en cas de photosynthèse, ou avec l'Eq(43) en cas de respiration. Cela s'opère par la méthode numérique d'Euler explicite du premier ordre.

Le domaine temporel de résolution entre deux variations successives de la concentration des composants du système global est discrétisé sur un pas de 5 min soit 288 simulations pour un jour de culture. Ce pas de temps a été choisi en considérant la croissance biologique et de sorte de tenir compte du temps de passage du liquide dans la partie tubulaire du réacteur. Ainsi, cette procédure d'évaluation des grandeurs du système global se déroule par un processus d'incrémentation dans le temps, depuis la condition initiale, jusqu'à ce qu'une contrainte s'impose (soit la durée de la période de simulation, soit l'épuisement de nutriments ou récolte de biomasse...).

Pour considérer les deux cinétiques biologiques impliquées dans le comportement de la biomasse, en conditions de culture diurnes et nocturnes, ce processus de calcul itératif alterne entre les deux métabolismes, l'alternance étant conditionnée par l'intensité seuil de la lumière. Par ailleurs, les termes intervenant dans les systèmes d'équations algébriques ou différentielles, tels que les constantes d'équilibre acido-basiques  $K_i$  et les rendements stœchiométriques de conversion  $Y_i$  ainsi que les coefficients de transfert liquide-gaz  $K_L a$  de  $O_2$  et de  $CO_2$ , sont prédéfinies comme des entrées. Tandis que les taux de croissance et de perte de biomasse sont calculés indépendamment via des fonctions faisant intervenir l'effet de chaque paramètre opératoire énoncé précédemment. En effet,  $\mu_{nuit}$  est calculé par l'eq (26) et  $\mu_{croissance}$  par :

$$\mu_{croissance} = \mu_{max} \cdot \mu_T \cdot \mu_N \cdot \mu_C \cdot \mu_{I_V}^a \quad (45)$$

où  $\mu_{I_V}^a$  qui est la vitesse de croissance spécifique relative à l'influence de la lumière, est calculée par une corrélation qui met en évidence le lien entre la réponse dynamique de la cellule aux fluctuations de lumière perçues et les conditions de fonctionnement et d'ensoleillement. La présentation détaillée de la méthode d'établissement de cette corrélation sera réalisée dans le chapitre suivant.



# CHAPITRE III

## *Évaluation numérique des performances d'un PBR solaire tubulaire*

Ce chapitre est basé sur l'article suivant avec des extensions non publiées :

- Laifa, R.; Morchain, J.; Barna, L.; Guiraud, P. A Numerical Framework to Predict the Performances of a Tubular Photobioreactor from Operating and Sunlight Conditions. *Algal Res.* **2021**, *60*, 102550.



### III. Évaluation numérique des performances d'un PBR tubulaire solaire

Ce chapitre s'appuie sur la méthodologie de modélisation présentée dans le chapitre précédent pour la prédiction de la croissance globale à l'échelle macroscopique au regard des paramètres opératoires de lumière et physico-chimiques. Le présent chapitre met en évidence la nécessité de prendre en compte l'effet de l'histoire d'exposition de la biomasse aux hétérogénéités de lumière qui caractérisent un photobioréacteur réel (non homogène). In fine, cette approche permet en outre de quantifier un critère d'évaluation des performances du procédé de production concernant l'utilisation de l'énergie lumineuse dans les conditions opérationnelles étudiées.

Avant d'entamer la description des différents compartiments du modèle utilisé, notons que le cas d'application est un PBR tubulaire horizontal, représenté dans cette partie par un seul tuyau isolé d'un diamètre de  $D = 0,05$  m, le milieu contenant la souche de l'espèce *Arthrospira platensis* (Spiruline).

Ce chapitre comporte deux sections : la première (1) est consacrée à l'étude du comportement dynamique d'une population de cellules vis-à-vis des variations locales et temporelles des conditions d'éclairement auxquelles elle est soumise dans un photobioréacteur tubulaire fonctionnant en conditions solaires. L'objectif est d'évaluer la cinétique spécifique de croissance à l'échelle du réacteur global.

La deuxième section (2) rassemble les résultats obtenus par l'étude de transfert radiatif (§2.1) et du suivi des trajectoires sous l'influence de la turbulence ainsi que leur couplage lagrangien (§2.2). Une série massive d'expériences numériques représentatives d'une large gamme de conditions d'ensoleillement (i.e. positions géographiques, quantité et qualité du flux lumineux) et de fonctionnement (i.e. concentration de biomasse et débit de circulation) a été réalisée dans le (§ 2.3). Elle met en évidence la possibilité de développer une corrélation simple permettant le calcul rapide du taux de croissance réel lié à l'utilisation de l'énergie lumineuse par la biomasse directement en fonction des paramètres opératoires macroscopiques. Pour finir, dans l'optique de simuler une culture de spiruline réelle dans un PRB tubulaire en tenant compte de la variabilité des conditions opératoires, l'ensemble des données de taux de croissance issues du modèle cinétique concernant la lumière ont été regroupées puis intégrées dans le modèle global de croissance biologique décrivant l'influence des autres paramètres Eq(45), aboutissant à un outil de prédiction qualitative des performances du réacteur dans sa globalité (§2.3.6).

# 1. Méthode de calcul des cinétiques au regard de la lumière

Le cœur de notre approche réside dans l'accès à la distribution de « l'efficacité de conversion de la lumière » dans la population de la biomasse. Fondamentalement, dans le volume de culture, la lumière est spatialement hétérogène en raison de l'absorption et de la diffusion par les cellules. Par conséquent, dans un champ lumineux stationnaire, les cellules transportées par le fluide sont exposées à un signal lumineux fluctuant auquel elles répondent de manière dynamique. Les caractéristiques de ce signal résultent de la convolution du champ lumineux stationnaire avec celui de la vitesse et la localisation de la cellule. Le premier champ est établi via des simulations rigoureuses de transfert de lumière qui ont été réalisées grâce à un algorithme de Monte Carlo incluant la géométrie du PBR, les caractéristiques de sa paroi (réfraction, réflexion et transmission) et les propriétés radiatives de la microalgue (description du modèle dans la section 1.2). La seconde information, concernant les trajectoires cellulaires, est obtenue à l'aide d'un modèle de marche aléatoire discrète et du profil de vitesse de l'écoulement turbulent connu (détaillé dans la section 1.2.3). La combinaison de ces deux champs indépendants détermine "le taux de changement de lumière le long de la trajectoire de la cellule".

Le champ volumique de lumière dans un PBR est établi instantanément (suite à la forte célérité de la lumière). Par conséquent, les modèles de transport radiatif, sont résolus indépendamment des flux hydrodynamiques et de la croissance biologique pour chaque concentration de biomasse, supposée homogène dans le PBR. Par ailleurs, les cellules sont supposées suivre passivement les lignes de courant et n'ont pas d'impact sur le champ d'écoulement. Cette hypothèse est justifiée par les faibles valeurs de la fraction volumique et du nombre de Stokes pour les cellules dans notre cas d'étude. Cela amène à un couplage à sens unique où l'écoulement du fluide impacte uniquement les positions spatiales des cellules.

## 1.1. Cinétiques de la réponse de la population à la lumière reçue $\mu_{IV}^a$

Les cellules photosynthétiques sont connues pour adopter un taux de croissance qui est lié à l'intégrale de la lumière reçue sur une échelle de temps définie. Ainsi, les microalgues ne sont pas en équilibre avec leur environnement local. En d'autres termes, leur taux de croissance réel  $\mu_{IV}^a$  n'est pas fixé par l'intensité moyenne reçue par les cellules (définie par l'intégration totale de l'intensité lumineuse, c'est-à-dire  $\mu_I(\langle I \rangle_V)$  donnée par l'eq(21)), ni par les champs lumineux locaux en tant que réponse instantanée (pas d'intégration de l'intensité lumineuse, c'est-à-dire  $\langle \mu_I(I) \rangle_V$  donnée par l'eq(22)), mais doit inclure le signal lumineux précédemment rencontré dans un passé récent (défini par l'échelle de temps d'intégration susmentionnée). Ce fait a été identifié et rapporté par Terry en 1986 <sup>275</sup>, qui a introduit le concept de « l'intégration proportionnelle de la lumière » :

$$\Gamma = \frac{\mu_{I_V}^a - \langle \mu(I) \rangle_V}{\mu(\langle I \rangle_V) - \langle \mu(I) \rangle_V} \quad (46)$$

Ce taux de croissance spécifique *normalisé*,  $\Gamma$ , est observé et mesuré expérimentalement. Cependant, il n'existe pas de méthode prédictive pour quantifier le taux de croissance réel et son écart par rapport aux deux cas asymptotiques (pas d'intégration ou intégration complète de l'intensité lumineuse). Nous proposons de prédire cette quantité  $\mu_{I_V}^a$  à partir de la distribution locale de la capacité des cellules individuelles à convertir la lumière. Dans la lignée des travaux précédents de notre équipe de recherche, nous nommons cette **propriété cellulaire**,  $\mathbf{i}$ , nous supposons que la population de microalgues est ségrégée selon cette propriété et nous supposons que les microalgues caractérisées par  $\mathbf{i}$  sont capables de croître à  $\mu_I(\mathbf{i})$ . La relation  $\mu_I = f(I)$  décrivant le lien inhérent entre l'intensité lumineuse constante I et la photosynthèse est donnée précédemment par l'Eq(20).

Nous définissons maintenant la fonction de densité de probabilité en masse  $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t})$  telle que  $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t})d\mathbf{i}$  est la fraction massique des algues avec leur propriété  $\mathbf{i} \in [\mathbf{i}, \mathbf{i} + d\mathbf{i}]$  à l'emplacement  $\mathbf{x}$  à l'instant  $\mathbf{t}$ . Le taux de croissance spécifique moyen local réel de la population  $\mu^a(\mathbf{x}, \mathbf{t})$  en masse obéit à la définition suivante <sup>184</sup> :

$$\mu_I^a(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = \int_0^\infty \mu_I(i) \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t}) d\mathbf{i} \quad (47)$$

En introduisant la concentration locale d'algues,  $X(\mathbf{x})$ , comme masse totale d'algues dans ce volume élémentaire  $d\mathbf{x}$ , le gain de masse par unité de temps sur tout le volume du réacteur est extrait d'une intégration volumique. Le taux de croissance résultant à l'échelle du réacteur est :

$$\mu_{I_V}^a = \frac{\dot{m}_V}{m_V} = \frac{\int_V X(\mathbf{x}) \int_0^\infty \mu_I(i) \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t}) d\mathbf{i} d\mathbf{x}}{\int_V X(\mathbf{x}) d\mathbf{x}} \quad (48)$$

Ainsi, la difficulté majeure dans le calcul du taux de croissance réel à l'échelle du réacteur vient de la détermination de la distribution des propriétés cellulaires  $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t})$ . En effet, la distribution spatiale des cellules est uniforme (l'iso-densité cellulaire est validée dans la section 2.2.1) de sorte que le taux de croissance spécifique réel devient :

$$\mu_{I_V}^a(t) = \frac{1}{V} \int_V \int_0^\infty \mu_I(i) \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t}) d\mathbf{i} d\mathbf{x} \quad (49)$$

La même quantité peut également être exprimée en utilisant la distribution de la propriété cellulaire à l'échelle du réacteur,  $\mathbf{p}_V(\mathbf{i}, \mathbf{t})$  :

$$\mu_{I_V}^a(t) = \int_0^\infty \mu_I(i) \frac{1}{V} \int_V \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{i}, t) d\mathbf{x} d\mathbf{i} = \int_0^\infty \mu(i) \mathbf{p}_V(\mathbf{i}, t) d\mathbf{i} \quad (50)$$

Dans ce travail, la distribution  $\mathbf{p}_V(\mathbf{i}, t)$  est approchée par la probabilité de trouver une cellule avec la propriété  $\mathbf{i}$ , et, quelle que soit sa localisation, elle s'écrit en fonction du nombre de cellules  $N(\mathbf{i}, t)$ . Le problème est donc résolu en suivant l'emplacement d'un grand nombre de particules tout en adaptant leur propriété interne  $\mathbf{i}$ .

$$\mathbf{p}_V(\mathbf{i}, t) = \frac{N(\mathbf{i}, t)}{\sum N(\mathbf{i}, t)} \quad (51)$$

Nous avons vu dans le premier chapitre section (2.2.3 §A), un modèle de relaxation de premier ordre proposé et validé expérimentalement pour une prédiction suffisamment réaliste des performances du PBR <sup>172</sup>. Ce modèle de non-équilibre reflète cette adaptation biologique dynamique des microalgues aux fluctuations lumineuses environnantes. Selon les auteurs, chaque cellule est caractérisée par une propriété interne définie comme son efficacité de conversion de la lumière,  $\mathbf{i}$ , qui tend vers la lumière locale ressentie par la cellule,  $I(\mathbf{x})$ , et elle est donnée par :

$$\partial \mathbf{i} / \partial t = 1/\tau \cdot (I(\mathbf{x}) - \mathbf{i}) \quad (52)$$

avec  $\tau = 0,3$  s étant la constante de temps de relaxation des cellules qui a été calibrée par des données expérimentales assez récentes sur la souche en question <sup>62,172</sup>. Ce modèle permet de décrire l'effet de la fréquence de la lumière clignotante sur le taux de croissance global de la population. Il a déjà démontré sa reproductibilité et son succès pour une large gamme de fréquences lumineuses (c'est-à-dire plusieurs durées de cycle jour/nuit).

Du point de vue calcul, l'évaluation du taux de croissance réel à l'échelle de la population intégrale d'algues, s'effectue par convergence statistique sur un grand nombre de particules lagrangienne (représentative des cellules d'algue)  $N_p$  et sur un grand nombre  $N_k$  d'évènements consécutifs échantillonnés jusqu'à ce que la condition initiale  $N_p(\mathbf{i}, 0)$  soit oubliée, c'est-à-dire que la moyenne d'ensemble soit constante :

$$\mu_{I_V}^a = \frac{1}{N_p N_k} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_k} \mu_I(i) \quad (53)$$

À partir de la combinaison des Eqs (50) et (52), et en considérant deux cas limites quant au temps de réponse biologique, nous retrouvons les deux approches de calcul de cinétique liées à l'influence de l'hétérogénéité d'irradiance dans le PBR, déjà abordés dans le (Chapitre I § 3.2.2).

Il est ainsi simple de montrer que si ce temps de réponse aux fluctuations lumineuses est infiniment petit ( $\tau \rightarrow 0$ ), alors  $p(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t}) = \delta(\mathbf{i} - I(\mathbf{x}, t))$ , ce qui signifie que toutes les cellules à  $\mathbf{x}$  sont dans le même état  $\mathbf{i} = I(\mathbf{x}, t)$ . Ce cas est communément appelé réponse instantanée. Nous récrivons alors l'Eq(21) sous la forme suivante :

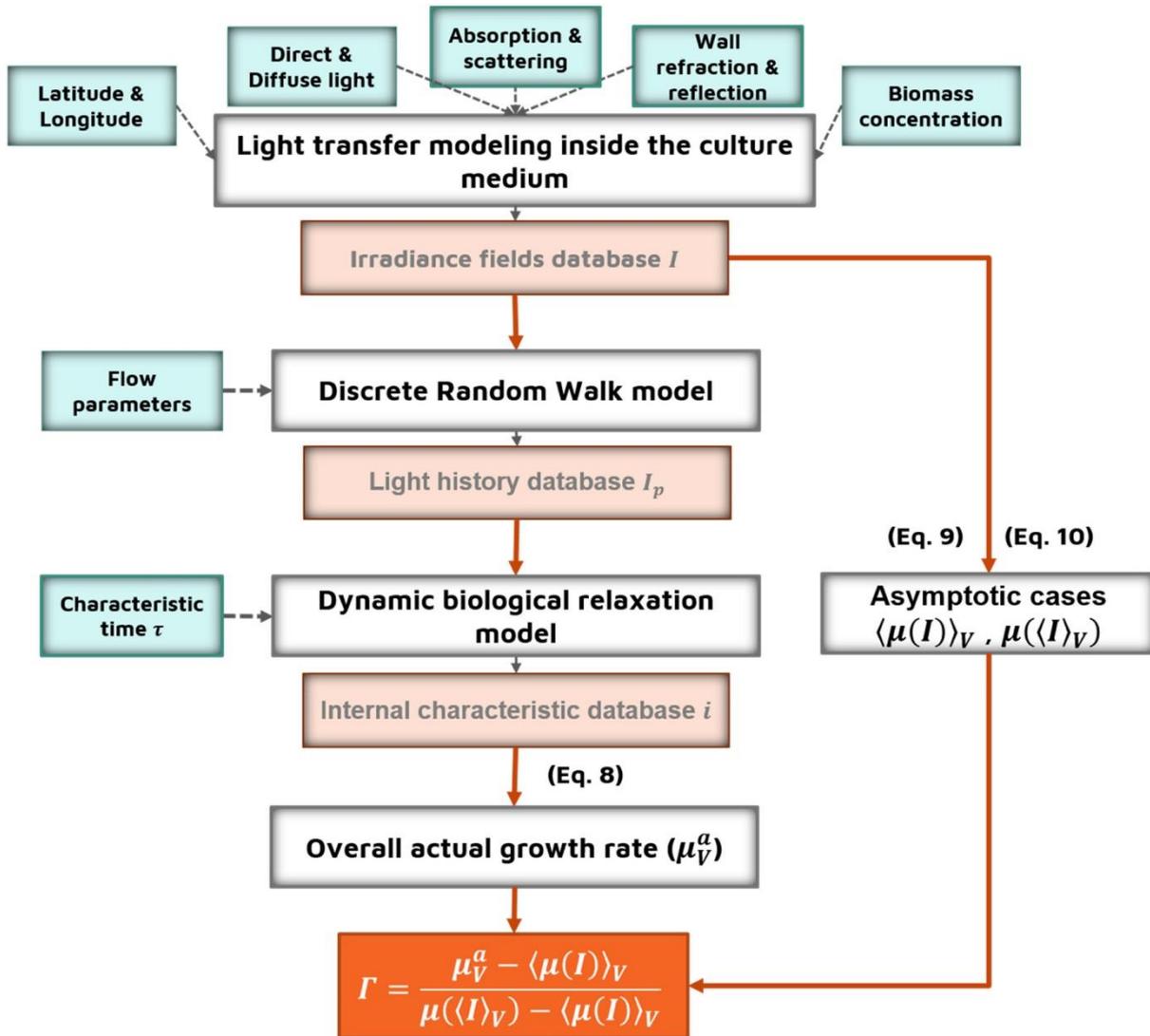
$$\mu_{V,\tau \rightarrow 0}^a = \frac{1}{V} \int_V \int_0^\infty \mu_I(i) \delta(i - I(\mathbf{x}, t)) di \, d\mathbf{x} = \frac{1}{V} \int_V \mu_I(I(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x} = \langle \mu_I(\mathbf{I}) \rangle_V \quad (54)$$

De même, si le temps de réponse à la fluctuation lumineuse est infini ( $\tau \rightarrow \infty$ ),  $p(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t})$  devient indépendant de la coordonnée spatiale et donc  $p(\mathbf{x}, \mathbf{i}, \mathbf{t}) = \delta(\mathbf{i} - \langle I \rangle_V)$ . Ce cas est communément appelé intégration complète, nous retrouvons alors l'Eq(22) :

$$\mu_{V,\tau \rightarrow \infty}^a = \frac{1}{V} \int_V \int_0^\infty \mu_I(i) \delta(i - \langle I \rangle_V) di \, d\mathbf{x} = \frac{1}{V} \int_V \mu_I(\langle I \rangle_V) d\mathbf{x} = \mu_I(\langle I \rangle_V) \quad (55)$$

Le croquis de la **Figure 22** résume la méthodologie de modélisation entreprise dans cette étude pour calculer le taux de croissance global du PBR tubulaire puis en déduire la valeur du *taux de croissance spécifique normalisé*,  $\mathbf{F}$ , en utilisant les deux cas asymptotiques mentionnés ci-dessus. Cette approche est appliquée à un tube horizontal (considéré comme l'élément modèle d'un PBR multi-tubulaire) fonctionnant dans une gamme de conditions dynamique telles que la concentration de biomasse et l'énergie lumineuse, qui varient dans le temps et selon la position géographique de l'usine.

Le point clé de cette partie est de décrire  $\mathbf{F}$  en fonction des paramètres de fonctionnement étudiés et donc d'en déduire théoriquement le taux de croissance spécifique réel  $\mu_{V,\tau}^a$ . Ainsi, une série de 380 simulations a été réalisée pour balayer une large gamme de cas opératoires, puis  $\mathbf{F}$  a été corrélé aux principaux paramètres.



**Figure 22 :** Schéma de la démarche de modélisation du taux de cinétique réel spécifique à de la lumière  $\mu_{IV}^a$ . Case verte : paramètre d'entrée ; Boîte grise : méthode de modélisation. Boîte rose : base de données des résultats <sup>184</sup>.

## 1.2. Disponibilité de lumière dans un tube de PBR solaire

Il est important de bien quantifier le champ local de la lumière au sein du PBR, en particulier lorsque les hétérogénéités d'éclairement sont frappantes. Dans cette section, le but est de simuler la distribution lumineuse dans la suspension en fonction du flux radiatif solaire variable, en un lieu défini. Ici, nous décrivons la propagation et la distribution de la lumière solaire (composée d'une fraction directe et diffuse) dans tout le volume.

La position apparente du soleil est décrite par deux angles principaux zénith ( $\varphi$ ) et azimut solaire ( $a_z$ ). Ces angles sont calculés à l'aide d'équations issues de la littérature <sup>276</sup>, qui incluent la localisation géographique (latitude et longitude) du site, le jour de l'année et l'heure. Leurs expressions sont données par les Eq(56) et Eq(57) respectivement <sup>276</sup> :

$$\varphi = \arccos(\sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \quad (56)$$

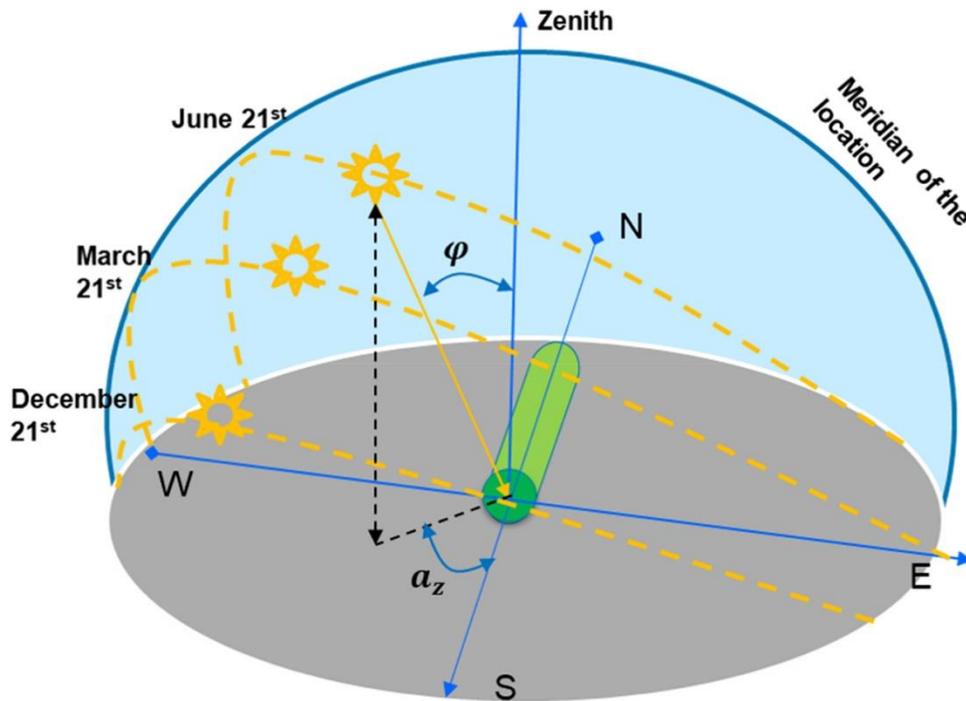
$$a_z = \text{sign}(\omega) \cdot \left| \frac{\cos \varphi \cdot \sin \Phi - \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \Phi} \right| \quad (57)$$

$\varphi$  est l'angle entre la verticale et la ligne du soleil, c'est-à-dire l'angle d'incidence du rayonnement d'un faisceau sur une surface horizontale.  $a_z$  est le déplacement angulaire par rapport au sud de la projection du faisceau sur le plan horizontal, représentés sur la **Figure 23**. Les déplacements à l'Est du sud sont négatifs et à l'Ouest du sud sont positifs.  $\Phi$  est la latitude du site qui est une constante.  $\delta$  est la déclinaison solaire qui varie avec le numéro du jour dans l'année,  $N$  et  $\omega$  l'heure angulaire qui est le déplacement angulaire du soleil à l'Est ou à l'Ouest du méridien local dû à la rotation de la terre sur son axe (à hauteur de  $15^\circ$  par heure) ; négative dans la matinée, et positive dans l'après-midi, elle est déterminée en fonction de l'heure solaire  $t_{\text{solaire}}$ , et sont donnés respectivement <sup>276</sup> par :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360(284 + N)}{365}\right) \quad (58)$$

$$\omega = 15(t_{\text{solaire}} - 12) \quad (59)$$

Comme pour les panneaux de cellules photovoltaïques, pour un système de culture tubulaire en extérieur, le flux maximum collecté lors de la course du soleil est obtenu lorsque le tube est aligné sur un axe nord-sud, cette orientation a été par conséquent sélectionnée. Par contre, le tube est posé horizontalement au sol, sans essayer de compenser l'effet de la latitude par son inclinaison comme il est d'usage de le faire pour les panneaux solaires.



**Figure 23 :** Représentation schématique des angles de la position du soleil et de l'orientation du PBR tubulaire <sup>184</sup>.

### 1.2.1. Conditions initiales et aux limites

Notre modèle inclut les caractéristiques particulières du flux solaire incident à savoir :

- i. L'incidence non-normale et isotrope des deux composantes (directe et diffuse respectivement) de la lumière du soleil arrivant sur la paroi du PBR et entraînant l'entrée et la propagation des photons dans le réacteur ;
- ii. La variation horaire et annuelle des niveaux de rayonnement diffus et la densité de flux de la lumière incidente directe en fonction de la localisation géographique.

Le concept repose sur l'utilisation d'un repère orthonormé OXYZ comme un marqueur mobile de photons pour suivre l'incidence et la propagation 3D du rayonnement solaire depuis la surface du tube considéré. Ce référentiel avec E,  $\mathbf{z}$  et S comme vecteurs unitaires, a été défini pour caractériser la direction d'arrivée et de pénétration du flux de photons au sein du PBR en coordonnées sphériques par deux angles appropriés ( $\Psi$ ) et ( $\theta$ ), qui eux-mêmes, sont exprimés en fonction des angles solaires zénithaux ( $\varphi$ ) et azimutaux ( $\alpha_z$ ). La **Figure 24** illustre l'ensemble de la géométrie considérée pour les deux composantes de la lumière solaire. Ainsi, à la paroi extérieure du réacteur (conditions aux limites et initiales), ( $\Psi$ ) qui est l'angle que fait un rayon non-normal avec du plan vertical OXY et ( $\theta$ ) qui est l'angle entre la projection du rayon sur le plan OXY et l'axe OX (il varie entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$ ) s'expriment sous deux différentes formes selon le type d'incidence :

- a. Incidence collimatée (i.e. la lumière directe dont la direction est régie par les coordonnées solaires) :

$$\Psi = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \cos \alpha_z) \quad (60)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \varphi \cdot \sin \alpha_z}{\sqrt{(\sin \varphi \cdot \sin \alpha_z)^2 + \cos^2 \varphi}}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (61)$$

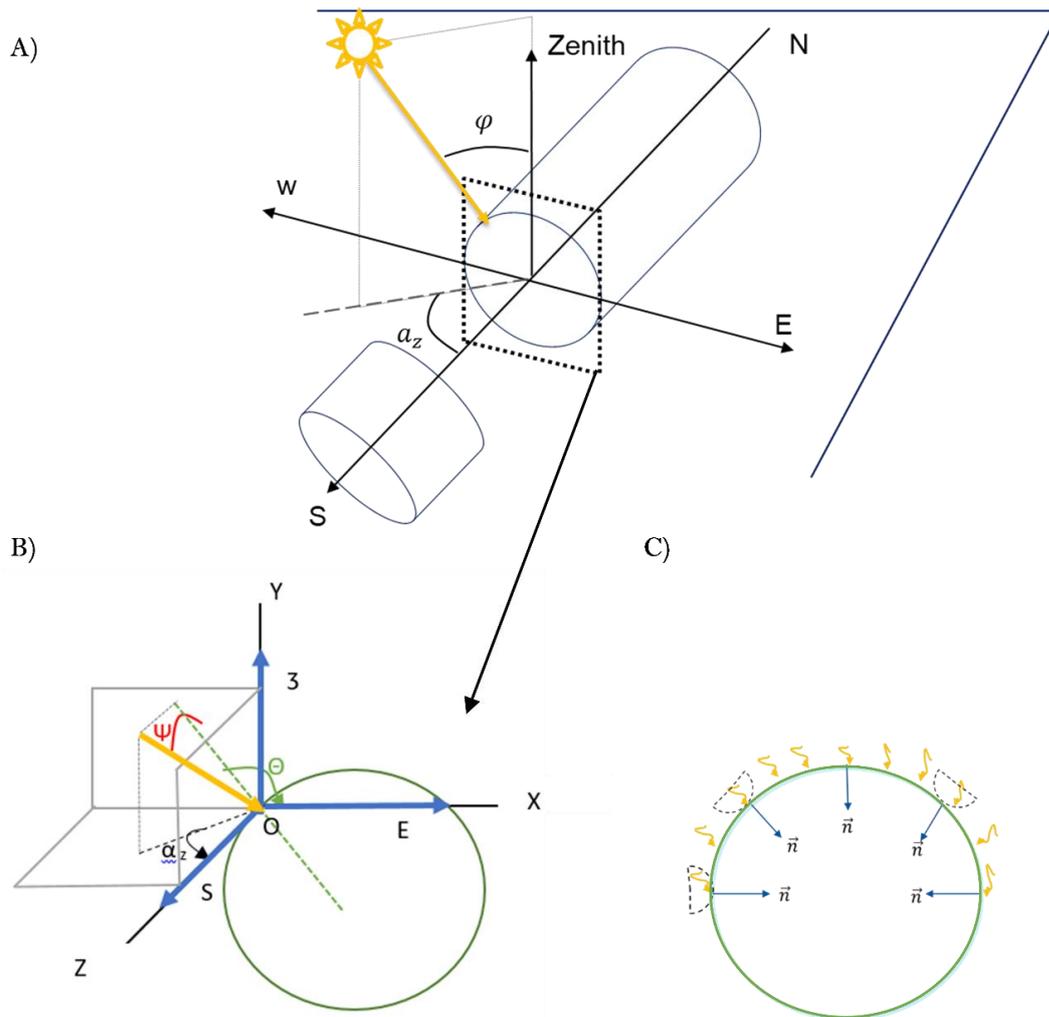
- b. Incidence isotrope *lambertienne* (la lumière diffuse provient de n'importe quelle direction) :

$$\Psi = 2\pi R_\varphi \quad (62)$$

$$\theta = \sin^{-1}(R_\theta) \quad (63)$$

avec  $R_\varphi$  et  $R_\theta$  sont des nombres échantillonnée sur  $[0, 1]$  qui pourront représenter la nature aléatoire de sa propagation.

Grâce à ces informations à l'état initial lors de l'arrivée des photons à la surface, il est ainsi possible de suivre leur déplacement dans le volume du PBR à partir de la position apparente du soleil.



**Figure 24 :** Schéma des conditions aux limites et initiales ; deux types d'incidence : A) schéma de l'incidence de la lumière sur un tuyau horizontal, B) incidence collimatée du rayonnement direct dans un marqueur OXYZ mobile, C) incidence lambertienne isotrope.

### 1.2.2. Principe et phénomènes physiques considérés

La simulation du champ d'irradiation local au sein d'un PBR doit tenir compte du bilan énergétique lumineux comprenant les différents phénomènes ayant lieu : la transmission, l'absorption, la diffusion dans le milieu, ainsi que la réflexion et la réfraction en raison de la géométrie de la surface éclairée (courbure des parois).

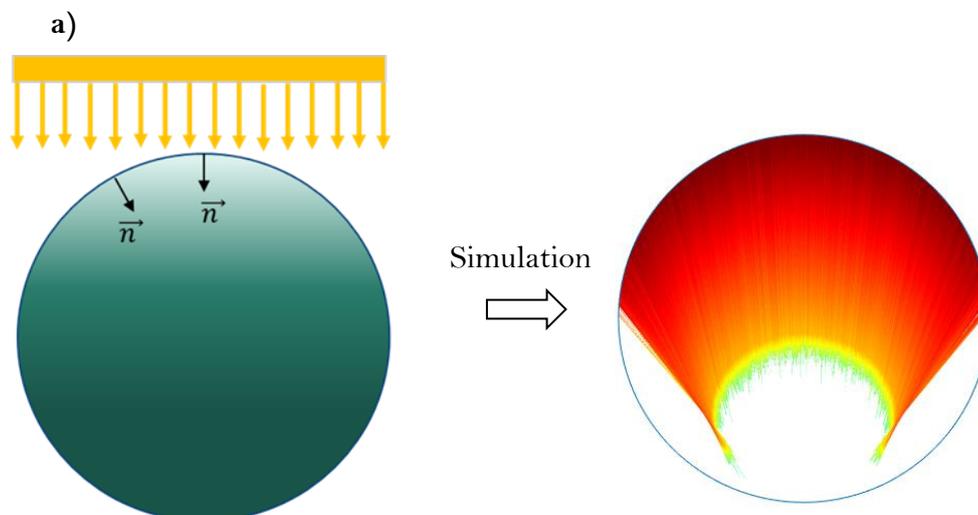
La méthode Monte Carlo est utilisée ici comme une approche appropriée pour cette modélisation multi-phénomènes (des détails sur cette méthode sont décrits dans la littérature <sup>208</sup>). Il s'agit d'une méthode stochastique itérative basée sur le lancement d'un grand nombre de paquets de photons et le suivi de leur marche aléatoire jusqu'à la convergence statistique. Cette technique permet d'inclure une variété d'événements correspondants aux phénomènes physiques susmentionnés.

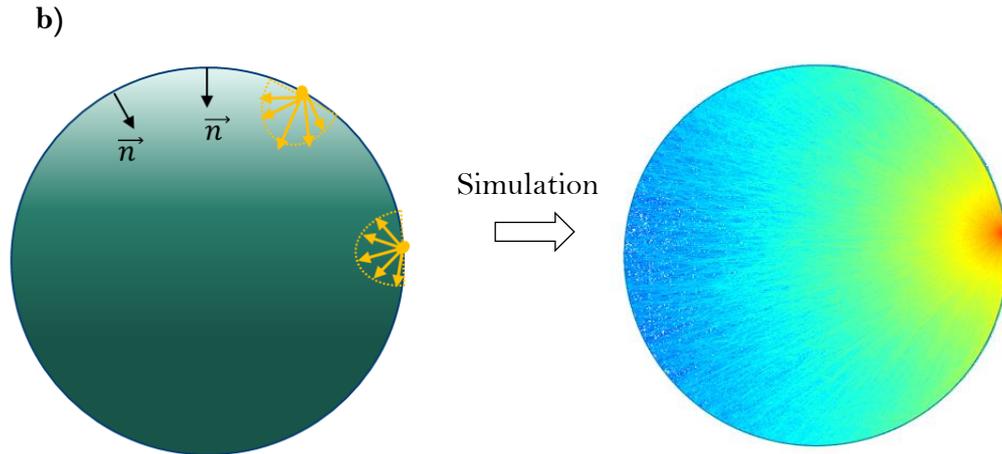
Chaque groupe de photon lancé se voit initialement attribuer une énergie d'une unité, notée  $W_0=1$ . Au cours de leur voyage, les photons subissent les événements suivants :

#### 1- Lancement des photons

Dans cet algorithme, Les photons sont donc lancés à la position en coordonnées cartésiennes  $(x = rand \times 2r, y = \sqrt{(r^2 - x^2)})$  de la surface du tube, avec *rand* est un nombre aléatoire dans l'intervalle  $[0, 1]$ . La direction dépend du type d'incidence, il y a donc deux approches de traitement des conditions de lancement des photons :

- Pour le rayonnement solaire direct on considère qu'il s'agit d'une source collimatée. En effet, tous les photons sont lancés verticalement sur la surface du tube. Cette approche consiste à répartir les N photons délivrés sur une distribution de position (les positions de départ sont tirées aléatoirement sur le diamètre du tube selon une loi uniforme) ce qui correspond à un rayonnement collimaté à la surface.
- Pour le rayonnement solaire diffus, on se base sur une approche d'une multitude de sources ponctuelles radiales avec émission diffuse isotrope.





**Figure 25 :** Schéma de la procédure du lancement des photons et leur propagation dans le volume du réacteur. a) cas d'une source collimatée : tous les photons sont émis selon la même direction (représentant la composante directe du rayonnement solaire). b) Cas d'une source ponctuelle diffuse où chaque point de la surface est une source ponctuelle : les photons reçus à une position quelconque de la surface proviennent de plusieurs directions (représentant la composante diffuse du rayonnement solaire).

## 2- Déplacement des photons

Les photons se déplacent à l'intérieur du PBR dans les 3 dimensions de l'espace. Comme l'éclairement est identique dans la direction OZ, les résultats sont considérés dans un seul plan de coupe du tube afin d'accélérer la convergence de la méthode. Bien entendu, l'angle hors la section plane (OXY) décrite par  $\Psi$  en (60) et (62) est considéré lors de chaque déplacement élémentaire, quant à  $\theta$ , il représente l'angle déterminant la direction du voyage du photon dans le repère cartésien (OXY) décrit par (61) et (63).

Le photon démarre de la surface du tube avec les coordonnées  $(x, y)$  dans une direction régie par un déplacement élémentaire  $dep$  (une longueur élémentaire) et les deux angles de direction en coordonnées sphériques  $(\Psi, \theta)$  dans le repère OXY cartésien (pour la simplicité du calcul des positions) lors de son parcours, l'orientation du photon s'écrit alors :

$$\begin{cases} Ux = dep \cdot \cos \Psi \cdot \cos \theta \\ Uy = dep \cdot \cos \Psi \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (64)$$

Les coordonnées de la nouvelle position du photon  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  sont calculées par :

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + Ux \\ y_{n+1} = y_n + Uy \end{cases} \quad (65)$$

3- Déviations de la trajectoire du photon

Lorsqu'ils rencontrent la paroi du PBR ou une cellule de microalgue les photons sont déviés de leur trajectoire, par réfraction ou réflexion à la surface interne du PBR ou par diffusion respectivement. Les deux angles d'orientation sont par conséquent modifiés et recalculés de nouveau.

$$\begin{cases} \Theta_{n+1} = \Theta_n + d\Theta \\ \Psi_{n+1} = \Psi_n + d\Psi \end{cases} \quad (66)$$

$d\Theta$  et  $d\Psi$  sont les déviations correspondantes aux angles  $\Theta$  et  $\Psi$  respectivement.

- i. La déviation par rapport au dioptre : les photons lancés rencontrent la paroi du tube, ils sont donc redirigés par l'effet de réfraction. Si les indices de réfraction du milieu extérieur et celui du milieu de culture sont respectivement  $n_1$  et  $n_2$  alors la loi de Snell-Descartes révèle la relation entre l'angle d'incidence  $i$  et l'angle de transmittance  $i'$  par rapport à la normale du point de la paroi (en considérant l'aspect courbé de la surface :

$$n_1 \sin i = n_2 \sin i' \quad (67)$$

la déviation devient alors :

$$d\Theta = i' - i \quad (68)$$

- ii. La lumière solaire n'étant pas polarisée, les photons obéissent aux lois de Fresnel ; la fraction d'énergie contribuant à la photosynthèse est égale à la fraction transmise dans le volume du réacteur qui est inférieure à l'énergie solaire arrivant à la surface. La réflectance de la loi de Fresnel est donnée par <sup>277</sup> :

$$R(\Theta) = \frac{1}{2} \times \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\tan^2(i - i')}{\tan^2(i + i')} \quad (69)$$

Donc, l'énergie du photon transmis dans le réacteur devient :

$$W_1 = W_0 \cdot (1 - R(\Theta)) \quad (70)$$

Cette technique est également appliquée pour les photons qui atteignent la paroi interne où une fraction de leur énergie est perdue par réfraction vers l'extérieur. La probabilité qu'un photon soit réfléchi à l'intérieur dépend de l'angle d'incidence  $i$  (par rapport à la paroi) et des indices de réfraction des milieux comme indiqué ci-

dessus. Seulement la fraction  $R(\Theta)$  sera réfléchié donc les photons perdent une fraction de leur énergie dans la paroi et leur nouveau poids  $\mathbf{W}$  devient :

$$W_{n+1} = W_n \cdot R(\Theta) \quad (71)$$

iii. Diffusion anistropique multiple

Quand les photons rencontrent une masse cellulaire (ou une cellule), ils seront diffusés et leur direction de propagation sera modifiée de manière aléatoire. Ce phénomène discret est dû à la différence d'indice optique entre les microorganismes et le milieu de culture (c'est-à-dire les effets de diffraction). Dans notre algorithme de Monte Carlo, les photons lancés doivent parcourir une distance avant chaque interaction avec les cellules. La longueur de parcourt est échantillonnée selon une fonction de probabilité logarithmique configurée par la capacité de la microalgue, à diffuser les photons, connue par le coefficient massique de diffusion  $Es$  et la concentration de biomasse  $X$ .

$$d = \frac{-\log(rand)}{Es \cdot X} \quad (72)$$

Une fois diffusés, les photons seront déviés mais leur énergie reste conservée. Dans cette méthode, la procédure d'échantillonnage des chemins optiques prend en compte la probabilité que cet événement se produise, après diffusion, dans un élément d'angle solide autour de sa nouvelle direction. Par conséquent deux angles  $d\Theta_1$  et  $d\psi_1$  sont tirés aléatoirement de nouveau :

- $d\Theta$  : Est échantillonné selon une loi de probabilité de Henyey-Greensteinn, elle est calculée à partir de la réciproque de cette fonction (73) qui s'appelle aussi la fonction de phase, et elle est la distribution des directions de diffusion régit par le coefficient d'anisotropie  $g$  <sup>278</sup> :

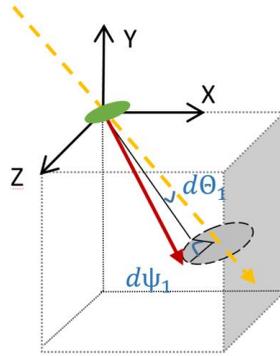
$$\mu = \left\{ \frac{1}{2 \cdot g} \left[ 1 + g^2 - \left( \frac{1 - g^2}{1 - g + 2 \cos(180 \cdot rand)} \right)^2 \right] \right\} \quad (73)$$

$$d\Theta_1 = \cos^{-1} \mu \quad (74)$$

grâce à cet angle le photon sera dévié de son ancien axe de propagation.

- $d\Psi$  : est le deuxième angle (déviation azimutale) échantillonné ensuite selon une densité de probabilité uniforme  $[0-2\pi]$

$$d\psi_1 = rand \cdot 2 \pi \quad (75)$$



**Figure 26 :** Représentation de l'interaction entre les photons et une cellule de microorganisme

Ce sont ces deux angles qui déterminent la nouvelle direction du photon après diffusion et le nouveau déplacement sera calculé à partir de son ancienne position et les deux angles précédemment calculés Eq(65).

#### 4- Absorption de l'énergie par le milieu

À mesure que les photons s'éloignent de la surface éclairée, ils perdent leur énergie, car le milieu est considéré absorbant. Plus précisément, ce sont les microorganismes qui absorbent le flux de photons utilisant leur pigment. La loi d'extinction de Beer-Lambert Eq (76) est appliquée pour considérer ce phénomène pendant le déplacement des photons. Elle est caractérisée par la capacité d'absorption des photons par les microalgues connue par le coefficient massique d'absorption  $E_a$ , la concentration de biomasse  $X$  et la distance parcourue  $dep$  selon :

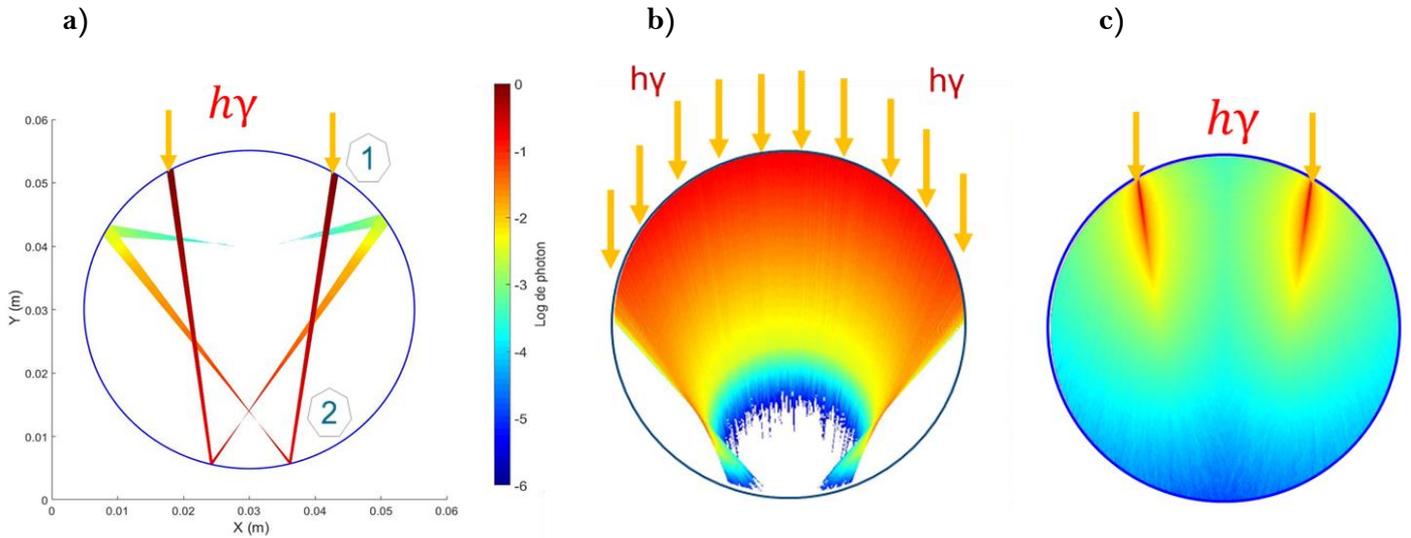
$$W_{n+1} = W_n \cdot \exp(-E_a \cdot X \cdot dep) \quad (76)$$

Quelques considérations et simplifications ont été avancées pour la commodité du calcul, nous citons :

- Le milieu est monophasique, absorbant et diffusant ;
- Les propriétés radiatives des cellules sont constantes et indépendantes de la longueur d'onde (i.e. notion d'un milieu gris) pour la Spiruline la valeur moyenne du spectre des coefficients d'absorption et de diffusion respectivement sont :  $E_a=162 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$ ,  $E_s=640 \text{ m}^2.\text{kg}^{-1}$  <sup>290</sup>;
- Accélération de la convergence grâce à l'invariance le long de l'axe horizontal du tube ;
- La concentration et la taille cellulaire de la biomasse est homogène dans le volume du réacteur ;
- Les phénomènes d'émission sont négligés.

La **Figure 27** présente les représentations des phénomènes considérés dans notre étude de transfert radiatif en les intégrant un par un, en commençant par la réfraction et la réflexion à la paroi du réacteur qui permettent de rediriger les photons depuis leur arrivée, puis en incorporant le phénomène d'absorption caractérisant le procédé en question, et enfin en

ajoutant la diffusion dans les cellules qui provoque la déviation des photons de leurs trajectoires rectilignes.



**Figure 27 :** Illustration des différents phénomènes physiques inclus dans le modèle pour une incidence collimatée : a) Réfraction et réflexion spéculaire à la paroi, b) Réfraction et absorption du milieu, c) Tous les phénomènes (réflexion, réfraction, absorption, diffusion).

### 1.2.3. Calcul du champ d'irradiance global

Étant donné que la nature de l'incidence entre la lumière directe et diffuse est différente, les champs d'éclairement correspondants sont calculés séparément. En effet, le PBR est considéré comme recevant des rayons lumineux directs parallèles sur la paroi hémicylindrique supérieure exposée au soleil, alors que la composante diffuse de la lumière solaire est supposée avoir une incidence lambertienne isotrope sur toute la surface. La lumière diffuse peut provenir de n'importe quelle direction sur toute la paroi du tuyau (propagation aléatoire dans l'espace). Le champ d'éclairement global  $I$  correspondant à la lumière solaire est finalement calculé par la somme des contributions résultant de chaque répartition spatiale pour le rayonnement direct  $I_b$  et diffus  $I_d$ :

$$I(x, y, z) = I_0 \times [\alpha \times I_d(x, y, z) + (1 - \alpha) \times I_b(x, y, z)] \quad (77)$$

où  $\alpha$  est la fraction de contribution de la lumière diffuse et  $I_0$  est l'intensité globale de la lumière incidente.

Pour réduire le coût de calcul et obtenir une bonne précision de simulation, il a été constaté qu'une matrice 2D discrétisée avec un maillage carré de  $10^6$  segments, et une dizaine de millions de trajectoires de photons, était nécessaire pour obtenir la convergence du calcul et une représentation satisfaisante du champ de distribution de la lumière. Le modèle a été implémenté à l'aide du logiciel MATLAB© 2017b (Mathworks) et grâce à l'option de

## Chapitre III

parallélisation nous avons pu simuler simultanément une série de cas de champs d'irradiance permettant de couvrir une large gamme de conditions opératoires.

### 1.3. Transport des cellules : Étude Lagrangienne

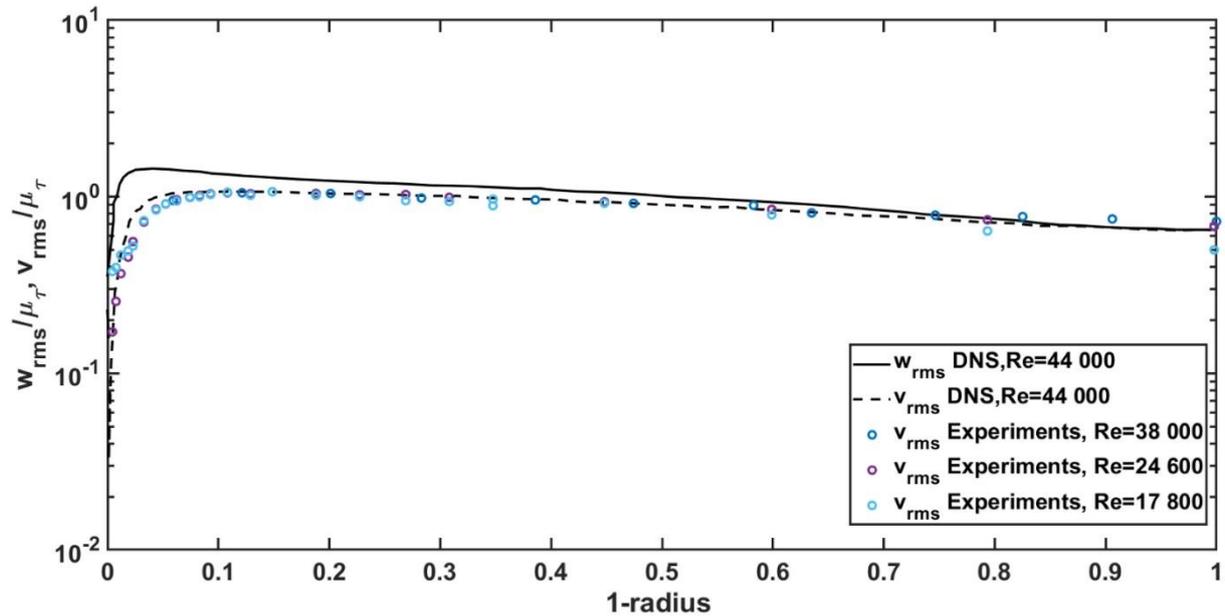
#### 1.3.1. Au regard de la littérature

En plus de la détermination du champ d'irradiance, il est important de simuler les trajectoires cellulaires individuelles entraînées par le flux de fluide porteur dans le PBR. Le champ lumineux étant identique tout le long de l'axe du réacteur tubulaire, seuls les mouvements radiaux et azimutaux des cellules modifient l'intensité lumineuse qu'elles subissent le long de leur trajectoire. Ces mouvements radiaux et azimutaux des cellules sont générés par la turbulence et les éjections de paroi. L'approche la plus complète et la plus précise pour cette situation serait la résolution directe des équations de Navier-Stokes DNS (Direct Numerical Simulation) ou, éventuellement, l'utilisation des méthodes LES (Large Eddy Simulation). Cependant, leur mise en œuvre est limitée par les coûts de calcul ; car elles nécessitent une discrétisation en temps et en espace assez fine afin de capter toutes les structures de la turbulence qui agissent sur la trajectoire des microalgues. Ainsi, la valeur ajoutée d'une simulation aussi complexe ne peut se justifier que si les détails fins des trajectoires sont d'une grande importance quant à la réaction dynamique biologique des cellules. La trajectoire des particules dans une simulation d'écoulement basée sur des modèles de turbulence de type RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) fait très souvent référence à un modèle de marche aléatoire discret. Dans le présent travail, la modélisation repose sur une méthode de suivi des cellules lagrangiennes basée sur les trajectoires des algues à partir de profils d'écoulement turbulent 1-D radiaux calculés par un modèle  $k,\varepsilon$  profitant des caractéristiques d'axisymétrie de cet écoulement tubulaire. Dans ce cas, un modèle de marche aléatoire discret fournit une approche efficace en temps de calcul. En effet, pour un écoulement dans un tube à différents nombres de Reynolds, le temps nécessaire pour effectuer une simulation CFD avancée comme proposée dans les études rapportées dans [Chapitre I §2.2.1](#), pourrait prendre des mois, alors que l'approche utilisée ici ne prend que quelques minutes.

Seules les fluctuations de vitesse radiale et azimutale interviennent pour produire le mouvement cellulaire dans le champ lumineux. Ils peuvent être représentés par les deux composantes efficaces ( $v_{rms}$  et  $w_{rms}$ ) transversales au flux principal. Une collection de quelques données expérimentales et numériques de la littérature a été utilisée pour observer et analyser ces fluctuations de vitesse dans des écoulements turbulents dans une conduite horizontale.

La **Figure 28** présente les profils des rapports des variances RMS radiale et azimutale par la vitesse de frottement  $\mu_T$  correspondant à différents cas d'études [279,280](#). Cette figure indique que ces deux vitesses fluctuantes adimensionnelles sont presque similaires quel que soit le nombre de Reynolds, à savoir 17 800, 24 600, 38 000 et 44 000 qui correspondent à la gamme de nombre de Reynolds testés dans études (15 000-84 000, cf. plus loin **Tableau 9**). De plus, leurs valeurs restent quasiment maintenues dans la région interne du tube jusqu'au début de la sous-couche visqueuse où elles commencent à décroître progressivement. En effet, la turbulence tend vers l'isotropie au centre de la conduite et présente une anisotropie croissante vers la couche limite dont l'épaisseur varie avec le nombre de Reynolds. Ceci reproduit le

comportement classique d'un écoulement monophasique turbulent dans une conduite cylindrique, largement étudié depuis longtemps <sup>281-284</sup>.



**Figure 28** : Profils des composantes RMS radiale et tangentielle normalisés par la vitesse de frottement pour plusieurs  $Re$  résultant de données expérimentales <sup>277</sup> et de travaux numériques <sup>278</sup>.

Sur la base de cette analyse de travaux de littérature, dans notre suivi lagrangien, les deux composantes transversales des valeurs d'écart type des vitesses de fluide (vitesses RMS) sont **supposées être égales et constantes** sur toute la section. De plus, ces valeurs de fluctuation peuvent être déduites de celle obtenue au centre du tube où la turbulence est isotrope. Pour atteindre cette valeur, il faut effectuer le calcul de la turbulence en phase continue.

La résolution numérique des équations de continuité et de Navier-Stokes a été effectuée en utilisant le modèle  $k-\varepsilon$  (approche RANS).

### 1.3.2. Principe et propriétés du modèle de suivi de particules

Certaines hypothèses ont été émises :

- i. Le fluide porteur est supposé être incompressible et newtonien ;
- ii. Les cellules ont une petite taille et une densité équivalente à celle de la phase continue. Ainsi, elles sont considérées comme des particules fluides qui suivent les lignes d'écoulement sans impacter l'écoulement de la phase continue.

Une modélisation fidèle de l'irrégularité et des caractéristiques aléatoires de l'écoulement turbulent devrait être capable de capturer les détails de la diffusion turbulente due aux structures tourbillonnaires qui est le principal mécanisme de dispersion des particules dans le fluide. *Taylor* <sup>285</sup> en 1920 introduit le concept de diffusion turbulente pour la modélisation du

transport de particules passives en proposant un modèle stochastique couplé à une approche lagrangienne pour un écoulement turbulent homogène isotrope statistiquement stationnaire.

Ainsi, les trajectoires des particules sont gouvernées par une partie liée à l'écoulement moyen de la phase continue et une autre partie liée à l'action des structures de turbulence pilotées par les fluctuations instantanées. Il est donc nécessaire d'intégrer l'équation de la trajectoire en utilisant les composantes instantanées de la vitesse vues par la particule au cours de ses mouvements qui, dans le cas d'une conduite horizontale, s'écrivent en coordonnées cylindriques comme :

$$\begin{aligned} u_z(t) &= \bar{u} + \acute{u}(t) \\ u_r(t) &= \acute{v}(t) \\ u_\theta(t) &= \acute{w}(t) \end{aligned} \quad (78)$$

Avec  $\bar{u}$  est la vitesse longitudinale moyenne et  $\acute{u}(t)$ ,  $\acute{v}(t)$ ,  $\acute{w}(t)$  sont respectivement les composantes des vitesses fluctuantes instantanées longitudinale, radiale et tangentielle.

Pour une simulation plus réaliste de la partie fluctuante, une approche stochastique a été utilisée ici via un modèle de marche aléatoire discrète (DRW, Discret Random Walk), initiée par *Hutchinson et al.* <sup>286</sup> pour l'étude de la dispersion des particules dans un écoulement turbulent. Le modèle DRW suppose qu'une particule interagit avec une séquence de tourbillons qui sont caractérisés par un intervalle de temps d'interaction  $\tau_t$  et des fluctuations de vitesse aléatoires qui sont maintenues constantes pendant ce temps. Le principe est qu'une fois ce temps d'interaction écoulé, une nouvelle fluctuation aléatoire indépendante de la précédente est introduite pour rendre compte d'une interaction avec un nouveau tourbillon. Ce temps caractéristique est appelé "durée de vie caractéristique du tourbillon" et est défini comme une constante donnée par les caractéristiques locales de l'écoulement turbulent  $k$  et  $\varepsilon$ :

$$\tau_t = 2 \cdot T_L \quad (79)$$

$$T_L \approx 0.15 \cdot \frac{k}{\varepsilon} \quad (80)$$

avec  $T_L$  est « le temps intégral lagrangien fluide ».

Les vitesses fluctuantes sont échantillonnées dans une distribution normale de moyenne nulle et d'écart type égal à la valeur RMS des fluctuations de vitesse (cf. Eq(81)). En supposant que la turbulence est isotrope au centre du tube, la valeur efficace en tout point de l'écoulement s'écrit en fonction de l'énergie cinétique turbulente locale comme suit :

$$v' \sim N(0, v'_{rms}) \quad (81)$$

$$u'_{rms} = v'_{rms} = w'_{rms} = \sqrt{(2k_c/3)} \quad (82)$$

$k_c$  étant l'énergie cinétique au centre du tube.

Le pas de temps choisi pour notre simulation est  $dt = 0.05$  s. Cette valeur est fixée de manière à ce qu'elle soit égale ou inférieure à la durée de vie des tourbillons  $\tau_t$  au centre du tube (résultant des considérations postulées dans le paragraphe précédent) allant de (0,09 à 0,44 s) pour le cas étudié. Ce choix de pas de temps se fait également en respectant d'une part les conditions classiques permettant une stabilité numérique acceptable de la solution avec un moindre coût en temps de calcul, et, d'autre part, la gamme de fréquence des signaux d'éclairement échantillonnés (soit 20 Hz), qui permet une bonne intégration des événements subis par la cellule dont le temps de relaxation biologique est de  $\tau = 0,3$  (s).

Dès lors, le positionnement des particules  $(r, \theta, z)$  est calculé comme suit :

$$\begin{cases} r_{t+dt} = r + u_r(t) \cdot dt \\ \theta_{t+dt} = \theta + u_\theta(t) \cdot dt \\ z_{t+dt} = z + u_z(t) \cdot dt \end{cases} \quad (83)$$

### 1.3.3. Conséquences du modèle DRW

L'utilisation de l'approche lagrangienne provoque un piégeage préférentiel non-physique des particules à côté des parois du PBR en raison du manque de résolution de grille raffinée nécessaire pour modéliser correctement le mouvement des cellules dans les couches limites. En plus, cela peut être dû à l'hypothèse que la turbulence est isotrope partout dans le volume. En effet, dans la zone pariétale, la turbulence n'est ni homogène ni isotrope comme observé précédemment sur la **Figure 28**, où la composante radiale de la vitesse est plus petite que la composante tangentielle. En conséquence, les particules dans la couche limite turbulente sont décélérées de manière significative et ne sont pas renvoyées dans l'écoulement. Les fluctuations radiales calculées au voisinage de la paroi ne sont pas suffisantes pour générer le retour des particules à l'intérieur de l'écoulement. Par conséquent l'équation de continuité pour les particules n'est pas respectée. Ce problème numérique a également été soulevé par plusieurs études de simulation CFD utilisant la méthode lagrangienne pour suivre les particules dans différents types de PBR <sup>150,172,287,288</sup>.

Comme il n'est pas possible de reproduire numériquement les structures turbulentes dites "Bursting" présentes dans la couche limite à l'aide d'une approche  $k-\varepsilon$ , (seule l'approche DNS pouvait le faire), deux types de conditions à la limite à côté de la paroi sont proposés dans la littérature : soit la paroi est absorbante, ou bien elle est réfléchissante. Le premier type consiste à arrêter le suivi de la trajectoire de la cellule une fois qu'elle rencontre la paroi et à échantillonner un nouveau départ de marche aléatoire <sup>190</sup>. Le second type admet que les particules adoptent des conditions de rebond à la frontière, cependant cela entraîne quand même une accumulation des particules dans les zones en question <sup>178</sup>.

Dans notre cas de figure, afin de pallier ce problème d'accumulation, nous avons opté pour une approche proche de la limite de type réfléchissante en gérant l'éjection des particules par les parois, par le rebond des particules. L'objectif est de s'assurer que la concentration des

particules dans la section respecte ainsi l'équation de continuité, c'est-à-dire que leur concentration reste homogène puisqu'il n'y a pas de phénomène les concentrant quelque part dans l'écoulement. Le principe est d'éjecter les particules à faible vitesse de la sous-couche visqueuse dans le flux interne. Le rebond des particules est géré par un coefficient de rebond adapté. L'homogénéité de la concentration en cellule sur la section du tube sera ainsi vérifiée ultérieurement (§2.2.1). Il est clair que ce coefficient de rebond empirique utilisé ne correspond pas aux classiques coefficients de rebond représentatif des conditions physiques réelles de rebond d'une particule sur une paroi. De plus, les microalgues, vu leur taille et leur iso-densité avec le fluide environnant ne rebondissent pas. Ce coefficient de rebond traduit en fait la turbulence anisotrope en paroi, qui permet de réinjecter les microalgues dans la section du tube.

L'approche lagrangienne nécessite la simulation de nombreuses trajectoires. En effet, plus de cent mille calculs ont été lancés pour former un échantillon statistiquement représentatif des nombreux chemins empruntés par les cellules. La vocation est de produire des informations significatives pour l'historique d'exposition à la lumière cellulaire. Les particules sont initialement injectées dans la section d'entrée du tube pour assurer leur répartition homogène.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Transfert radiatif

Ce modèle a été conçu dans le but de simuler l'évolution dynamique de la distribution de la lumière dans le cadre d'un PBR fonctionnant toute l'année en conditions solaires. Les paramètres variant dans le temps sont : la concentration cellulaire  $X$  (dans le cas d'un réacteur discontinu), les angles d'incidence de la lumière directe ( $\alpha_z, \varphi$ ), l'irradiation incidente globale, la fraction du rayonnement diffus.

La liste des grandeurs physiques et des paramètres utilisés pour les simulations (entrées du modèle) est présentée dans le **Tableau 8**.

**Tableau 8 :** Entrées du modèle pour le cas d'application (culture de spiruline dans un tube en polyméthacrylate de méthyle fin PMMA).

Paramètre	Valeur	Reference
Orientation du système	Nord-Sud	-
Angles de lumière incidente ( $\alpha_z, \varphi$ )	Variable*	
Contribution coefficient of the diffuse irradiance $\alpha$	Variable*	289
Global incident irradiance $I_0$	Variable*	289
Jour de l'année $N$	Variable*	-
Coefficient de diffusion massique $E_s$	640 (m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup> de <i>Spiruline</i> sèche)	290
Coefficient d'absorption massique $E_a$	162 (m <sup>2</sup> .kg <sup>-1</sup> de <i>Spiruline</i> sèche)	290
Coefficient de fonction de phase (diffusion) $g$	0,97	278
Indice de réfraction de l'air $n_{air}$	1	
Indice de réfraction du milieu $n_{broth}$	1,34	172
Indice de Réflexion PMMA $n_{PMMA}$	1,49	291
Diamètre du tube $D$	0,05 (m)	-
Épaisseur de la paroi	0,004 (m)	-
Concentration de biomasse	0,3-1,5 (g.L <sup>-1</sup> )	-

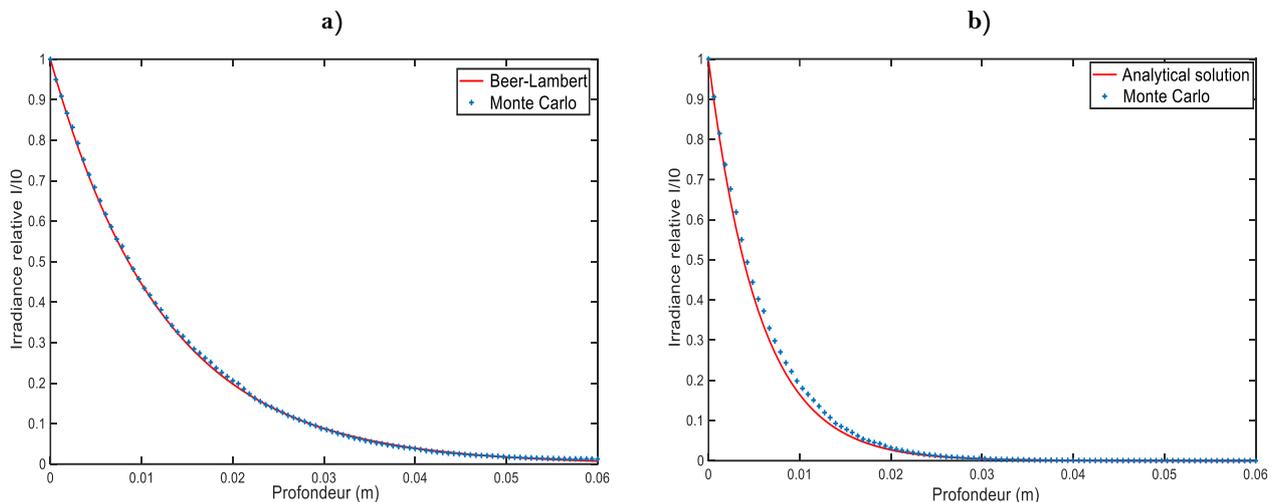
\* Valeur variable dépendant du lieu, du jour et de l'heure.

#### 2.1.1. Confrontation du modèle à la littérature

Avant toute utilisation du modèle développé pour la simulation des cas réels plus ou moins compliqués, nous avons procédé à sa validation partielle. Dans un premier temps, nous avons démontré que le modèle prédit bien la décroissance exponentielle régie par la loi de Beer-Lambert en considérant uniquement l'atténuation due à l'absorption, comme le montre

la **Figure 29-(a)** où l'on peut voir que les résultats de la simulation de Monte Carlo et ceux de la loi exponentielle de Beer-Lambert se chevauchent.

Cette première approche de validation nous a permis de poursuivre le processus de validation et d'augmenter le degré de complexité en considérant d'autres phénomènes physiques lors du suivi des photons tels que la diffusion multiple comme décrit dans la section 1.2.1. Il est donc nécessaire de confronter les résultats d'une solution analytique de la RTE qui prend en compte ces phénomènes. Pour ce faire, nous avons utilisé la solution décrite par Cornet <sup>201</sup> pour une RTE unidimensionnelle basée sur l'approximation à 2 flux donnée par l'Eq(14). Pour une concentration de biomasse de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ , un bon accord peut être observé entre les résultats des deux méthodes de résolution (i.e. numérique et analytique) ; bien qu'une petite différence soit observée autour de la profondeur de 0,01 m, dans la **Figure 29-(b)**. Celle-ci est expliquée soit par un artefact numérique, ou par l'aspect de diffusion multiple (et non à deux flux) utilisé dans notre modèle. Étant donné que la solution analytique testée est déjà validée par des mesures expérimentales, et n'ayant pas accès à des données similaires sur l'irradiance locale pour notre cas de figure, nous considérons que cette procédure de validation est satisfaisante et que notre modèle pourra être implémenté pour des études de cas plus complexes.

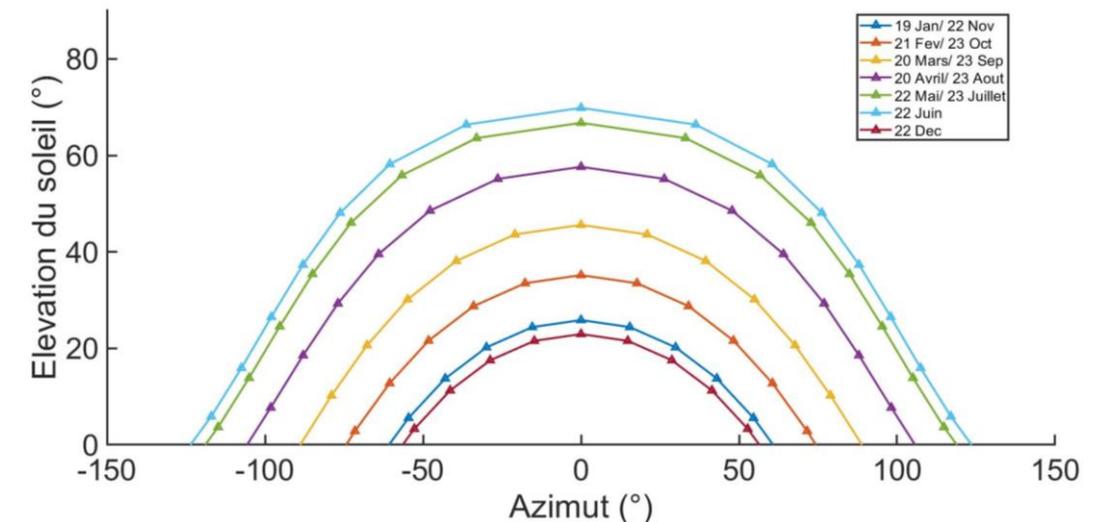


**Figure 29 :** Comparaison avec les résultats de Monte Carlo et les solutions analytiques pour : **(a)** considérer l'absorption seulement pour  $X= 0,5 \text{ g.L}^{-1}$ . **(b)** considérer à la fois l'absorption et la diffusion pour  $X= 1 \text{ g.L}^{-1}$ .

### 2.1.2. Application au PBR tubulaire solaire

Étant donné que les caractéristiques de la lumière directe varient dans le temps, la plage des valeurs possibles des angles Zénith et Azimut a été considérée afin de représenter plusieurs moments de la journée et de l'année (cf. **Figure 30**). Par conséquent, en utilisant le profil symétrique de la course du soleil, il a été possible de sélectionner 28 cas représentatifs à savoir 4 moments de la journée (c'est-à-dire 4 couples  $(\varphi, \alpha_z)$ ) de 6h à midi avec un intervalle de 2 heures pour 7 jours caractéristiques de l'année. Pour chaque cas, dix champs d'irradiance sont calculés pour des concentrations cellulaires allant de 0,3 à  $1,5 \text{ g.L}^{-1}$ . Ainsi, 280 cas ont été réalisés. Tous les résultats de la simulation du champ d'irradiance pour des concentrations de

cellules et des positions du soleil sélectionnées sont stockés dans une base de données et exploités ultérieurement (§ 2.3.6).



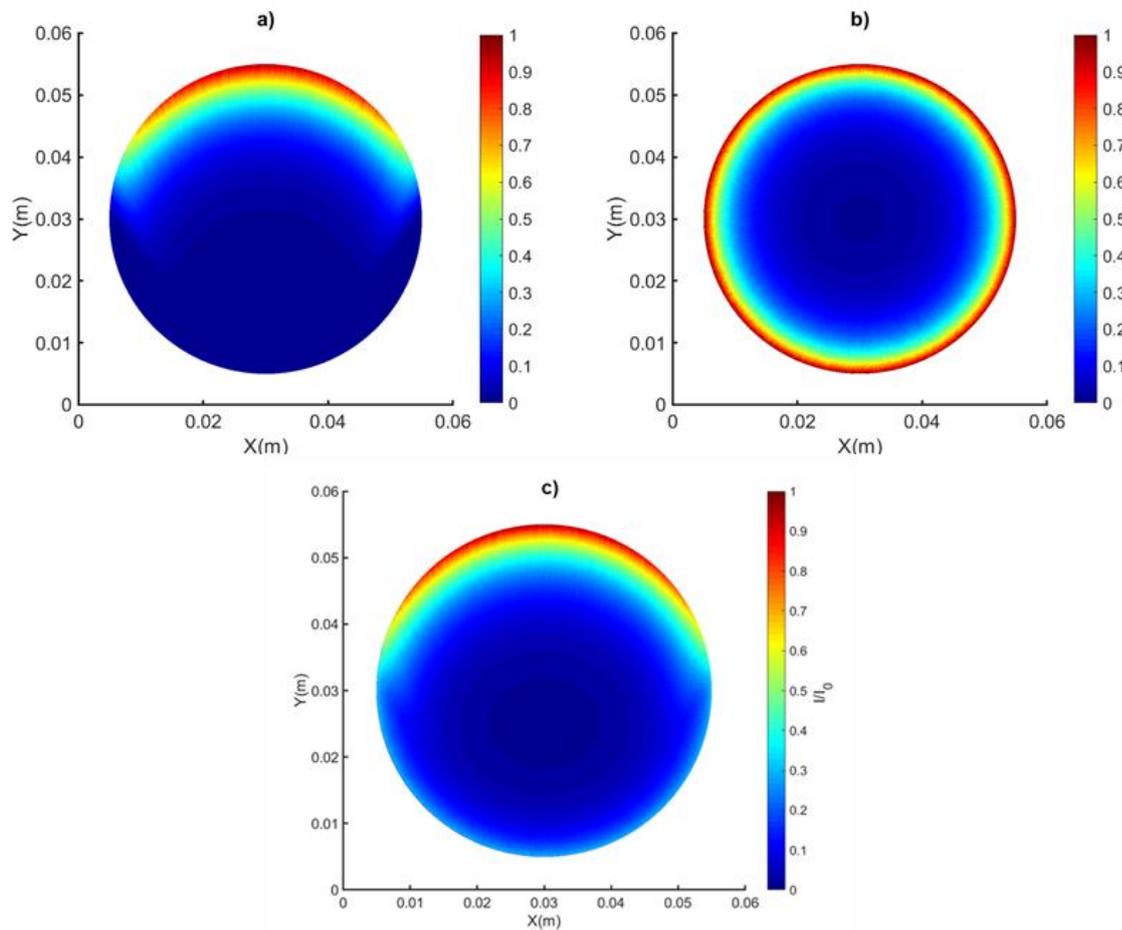
**Figure 30 :** Parcours du soleil à Toulouse.

Les champs sont présentés sous forme normalisée par rapport à l'énergie reçue dans chaque surface élémentaire éclairée (c'est-à-dire divisée par le nombre de photons utilisés en simulation et la surface du maillage). Du fait de l'invariance le long de l'axe horizontal du tube, la géométrie est réduite à la section transversale. Par conséquent, les résultats sont les projections de l'énergie accumulée en 3D des photons dans le volume sur cette section.

Un seul exemple est montré ici, un cas représentatif d'une journée d'été typique à Toulouse, France ( $43,36^\circ$  N,  $1,26^\circ$  E) au midi solaire où l'angle zénithal  $\vartheta = 20^\circ$ , l'angle azimutal  $\alpha_z = 0^\circ$  et la fraction diffuse  $\alpha = 0,38$ . Les champs d'irradiance avec  $1 \text{ g.L}^{-1}$  de biomasse pour le rayonnement solaire direct et diffus sont représentés respectivement sur la **Figure 31-(a)** & **(b)** et la **(c)** présente la distribution totale de la lumière solaire reçue sur la culture.

Comme on peut le voir, il existe une hétérogénéité spatiale frappante de la distribution de la lumière, d'où une différence significative entre les régions proches de la paroi et celles au centre du tube **Figure 31**. Il s'agit d'une spécificité habituellement rencontrée dans la littérature pour les PBR limités en lumière, et qui est due à l'absorption et à la diffusion de la lumière dans le milieu. De plus, l'effet de la réfraction et de la réflexion de la lumière collimatée directe sur le mur est clairement visible sur la **Figure 31-(a)**. Ainsi, en raison de la surface incurvée, la lumière directe du soleil traversant l'interface PBR est soumise à un effet de redirection et obéit aux lois de Fresnel. De ce fait, la fraction d'énergie transmise dans le volume du réacteur est inférieure à l'énergie solaire arrivant à la surface. Ceci explique la distribution non uniforme de l'irradiation dans la zone proche de la surface éclairée (c'est-à-dire l'hémisphère faisant face au soleil). Cette caractéristique a également été observée par <sup>198</sup>. Le champ d'irradiance lumineuse diffuse illustré à la **Figure 31-(b)** est nettement différent de celui du rayonnement diffus et il ne dépend que de la concentration. Comme cette partie du rayonnement est isotrope, la lumière provient de n'importe quelle direction et elle est mieux

répartie que la lumière directe sur toute la paroi du tuyau. Cependant, par rapport au champ global, le champ lumineux diffus semble non significatif même si sa contribution est  $\alpha = 0,38$ .



**Figure 31 :** Champs d'éclairage énergétique local normalisés à la concentration de biomasse  $X = 1(\text{g.L}^{-1})$  : (a) pour la lumière solaire directe avec  $\vartheta = 20^\circ$   $\alpha_Z = 0^\circ$ , (b) la lumière solaire diffuse, (c) la somme de la contribution des deux champs direct et diffus pour midi solaire d'un jour d'été à Toulouse coefficient diffus  $\alpha = 0,38$ .

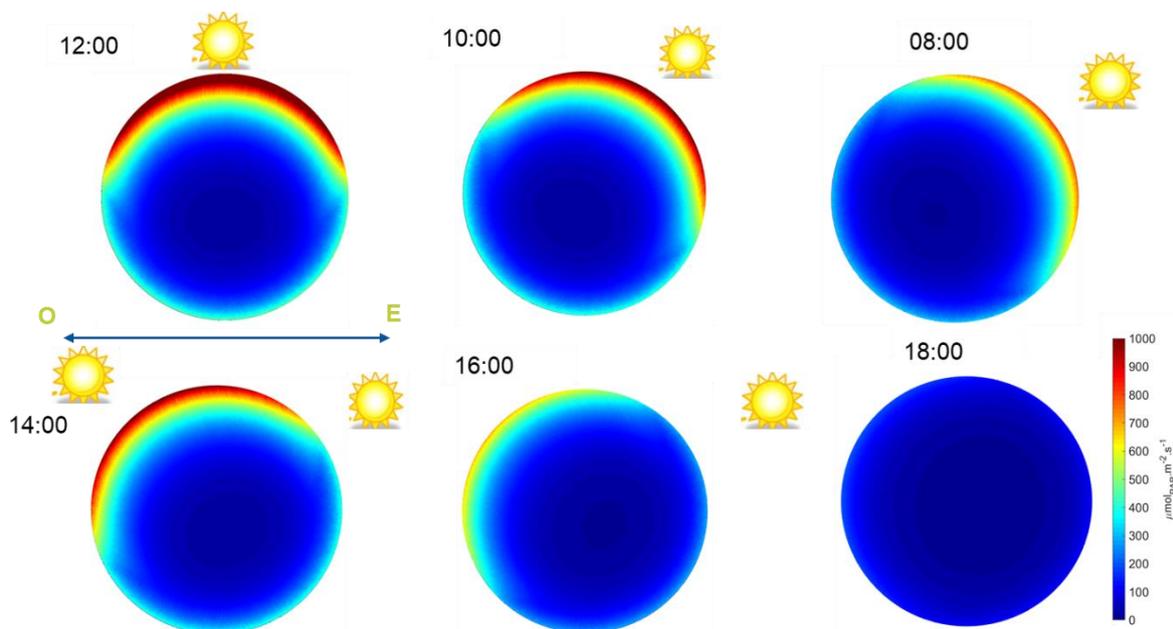
Les distributions d'irradiance calculées seront ensuite multipliées par la valeur globale d'irradiance incidente  $I_0$  correspondant au cas étudié. Les données relatives à la densité de flux lumineux incident (direct et diffus) utilisées pour notre cas d'application ont été tirées du Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) <sup>292</sup>. Il s'agit d'un outil de simulation gratuit du service de la science et de la connaissance de la Commission européenne, qui fournit pour chaque mois, la variation temporelle quotidienne de l'irradiance (en  $\text{W.m}^{-2}$ ) reçue dans n'importe quelle localisation géographique et en fonction de l'orientation et de l'inclinaison de la surface (angle d'inclinaison ou surface de suivi solaire). Toute autre source de données d'éclairage peut être utilisée. Les données sont corrigées par un facteur de 0,43 pour ne considérer que la partie du spectre solaire (AM 1,5) contribuant à la photosynthèse par rayonnement actif (PAR : 400-700 nm), puis elles sont converties en  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Avec une adaptation appropriée du modèle, ce modèle peut être appliqué à (i) d'autres géométries PBR (par exemple PBR rectangulaire ou plat), et (ii) d'autres types d'éclairage de surface ou de volume (par exemple LED artificielle).

### 2.1.3. Effets de la concentration de biomasse et de la lumière incidente

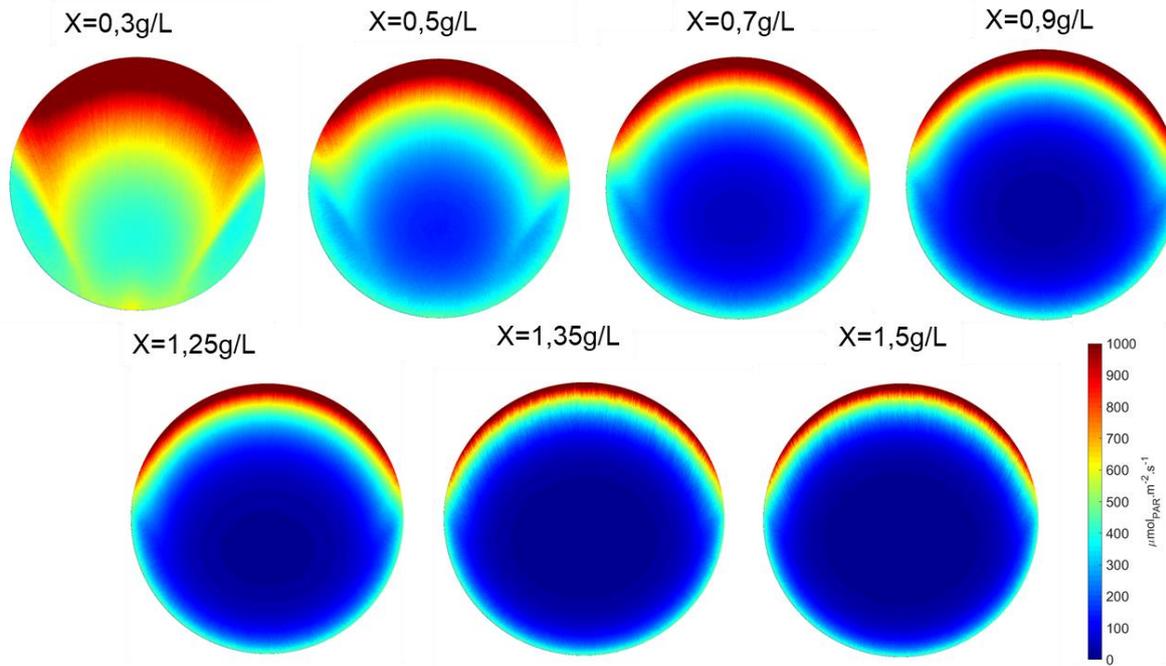
Pour représenter quelques cas de figure, nous avons choisi 4 moments de la journée de 6h00 à midi avec un intervalle de 2 heures pour 7 mois de l'année et 10 concentrations de cellules.

Plusieurs paramètres ont été étudiés, par exemple, dans la **Figure 32** une attention particulière est portée à l'évolution du champ d'irradiation avec la variation temporelle de l'angle d'incidence et de l'intensité de la lumière en considérant la fraction diffuse pour la même concentration  $X=0.9 \text{ g.L}^{-1}$ . Ces résultats sont pertinents pour quantifier rigoureusement la distribution locale de la lumière dans les photobioréacteurs solaires fonctionnant en mode continu où la concentration est contrôlée.



**Figure 32 :** Effet de la variation de l'intensité de la lumière solaire incidente sur le champ d'irradiation sur un jour d'été typique à Toulouse avec une concentration cellulaire constante  $X= 0,9 \text{ g.L}^{-1}$ .

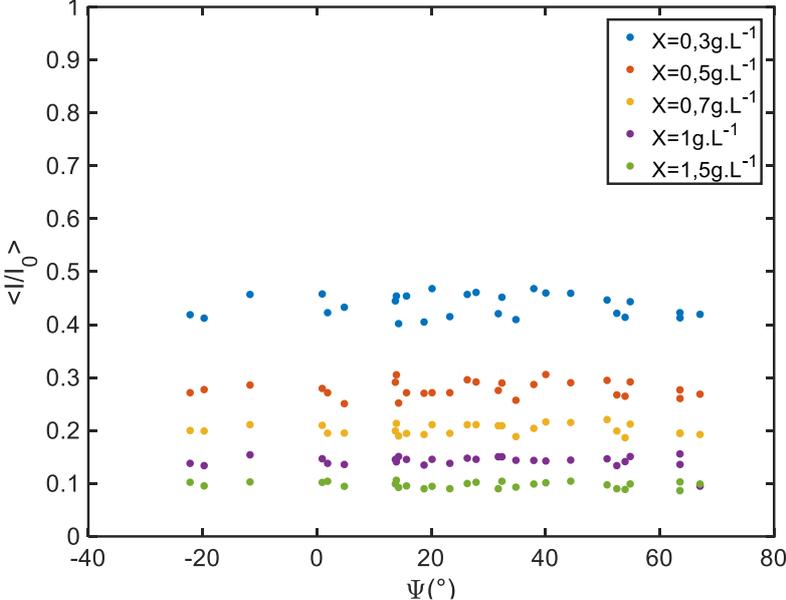
Nous pouvons clairement remarquer des zones où il n'y a pas du tout de lumière et d'autres excessivement éclairées, ces zones seront traversées par les algues le long de leurs trajectoires. Par conséquent, nous sommes en mesure de suivre l'évolution dynamique de la distribution de la lumière dans une culture extérieure réelle en tenant compte du changement de régime lumineux et de l'augmentation de la biomasse à l'aide d'un PBR tubulaire donné situé quelque part dans le monde. Le modèle est également capable de nous donner des informations sur l'atténuation de la lumière due à l'absorption et à la diffusion de la culture lorsque la concentration cellulaire augmente avec le temps, comme le montre la **Figure 33**.



**Figure 33 :** Effet de la concentration de la biomasse sur le champ volumique d'éclairement avec des conditions d'irradiance constantes :  $I_0 = 1402 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , le coefficient de diffusion  $\alpha = 0,38$  et  $\alpha_z = 0^\circ$  (à midi)  $\varphi = 20$ .

#### 2.1.4. Effet de l'angle d'incidence

Nous avons vu précédemment que l'incidence de la lumière est régie par les deux angles zénithal et azimutal. Or, dans notre algorithme, le suivi de la direction et la trajectoire des photons est caractérisé par un couple d'angle en coordonnée sphériques  $\Psi$  et  $\theta$  qui sont eux même fonction des coordonnées astrologiques du soleil. Finalement, la distribution d'irradiance volumique ne dépend pas de l'angle  $\theta$ , car celui-ci sert plutôt à la rotation de la représentation graphique du champ en fonction de l'orientation du soleil de l'Est à l'Ouest. Dès lors, ce qui nous importe est l'effet du second angle  $\Psi$  sur la répartition de la lumière au sein du volume. Nous avons alors calculé la moyenne volumique des 28 cas simulés puis les avons tracés en fonction de l'angle  $\Psi$  (cf. **Figure 34**). Hormis l'effet de concentration de biomasse expliqué dans le paragraphe précédent, nous constatons que la moyenne des champs d'irradiance normalisés est quasiment constante avec la variation l'angle d'arrivée de la radiation. Cette information nous servira d'appui pour démontrer l'indépendance de la cinétique relative à la lumière de ce paramètre.



**Figure 34 :** Effet de l'angle  $\Psi$  sur les champs d'irradiance normalisés  $I/I_0$  pour 5 concentrations de biomasse.

## 2.2. Distribution spatiale des cellules

Nous avons essayé de balayer une gamme de vitesses d'écoulement représentatives à des vitesses typiques dans les PBR tubulaires utilisés à l'échelle technique <sup>64,106</sup> pour tester l'effet de la turbulence sur les performances. Le **Tableau 9** résume les différents paramètres des conditions testées dans ce travail.

**Tableau 9** : Détails sur les conditions d'écoulement turbulent dans la conduite étudiée.

Vitesse d'écoulement $U_b$ (m.s <sup>-1</sup> )	Re ( $U_b \cdot D/\nu$ )	$\mu_T$ (Vitesse de frottement)
0,3	15000	0,0179
0,4	20000	0,0231
0,5	25000	0,028
0,7	35000	0,0376
1,68	84000	0,0791

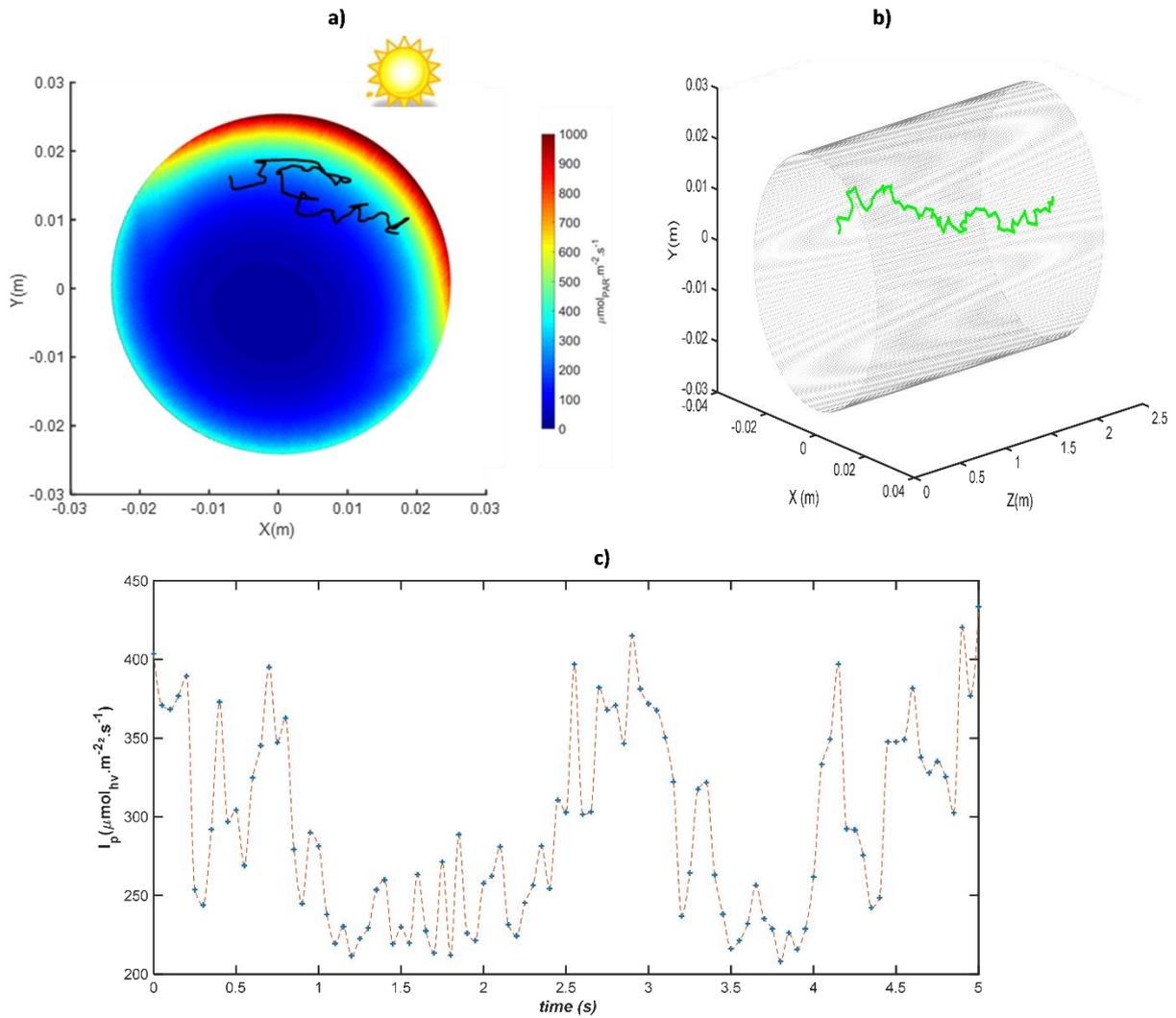
### 2.2.1. Historique d'exposition des cellules à la lumière

L'objectif ici est d'obtenir des données sur l'historique de l'exposition de chaque cellule à la lumière afin de les utiliser dans l'estimation du taux de croissance global. Une collection de différentes trajectoires a été acquise en utilisant la méthode d'échantillonnage du mouvement des cellules dans le réacteur décrite au (§1.3). L'interaction entre l'hydrodynamique et le transfert de lumière est ici mise en évidence. Pour assurer la convergence statistique de la résolution numérique et garantir une représentation significative de tous les événements possibles que subissent les microalgues en PBR, un choix de  $1,5 \times 10^5$  particules à simuler, pour une durée de 5 s et avec un pas de temps de 0,05 s, ont été jugées nécessaires pour générer une quantité suffisante d'informations (c'est-à-dire environ  $10^7$  événements). Ce choix de durée de simulation résulte de l'étude détaillée publiée par *Gernigon et al.* <sup>172</sup> où il est rapporté qu'il y a en fait deux conditions pour obtenir des résultats précis en termes de taux de croissance global à partir d'une base de données de suivi de particules :

- 1- La durée du suivi de la trajectoire des particules doit être longue par rapport à l'échelle de temps du modèle dynamique biologique. Dans le cas présent, un suivi de 5 secondes représente plus de 15 fois l'échelle de temps biologique  $\tau$ . En conséquence, l'état final de la particule (la valeur de  $i$ , et son  $\mu_I(i)$ ) dépend entièrement de la lumière reçue pendant les 1,5 dernières secondes correspondant à  $5 \tau$ . De plus, ce qui est important ici, comme déjà mentionné, est que le temps Lagrangien soit suffisamment plus petit que le temps de simulation. Ainsi, cette durée est considérée comme suffisante pour que l'hydrodynamique de la cellule perde la mémoire de son histoire.

- 2- Le nombre de particules suivies doit être suffisamment grand pour que les valeurs instantanées et locales de  $I$  expérimentées par la cellule soient statistiquement équivalentes à la distribution lumineuse en volume. En d'autres termes, le champ lumineux est correctement échantillonné par notre population de particules individuelles. Ce point est soigneusement traité dans le paragraphe suivant.

Un exemple de trajectoire enregistrée pour une cellule individuelle est illustré à la **Figure 35** pour des conditions hydrodynamiques données (une vitesse d'écoulement de  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$  correspondant à un nombre de Reynolds de 20 000) sur 5 s de simulation. Le principal point d'intérêt de cette enquête est illustré à la **Figure 35-(a)** qui décrit le mouvement bidimensionnel de la particule dans la section transversale du tube où se produit le gradient de lumière. Ces transitions radiales projetées en plan 2D reproduisent bien l'aspect stochastique du déplacement cellulaire prédit par le modèle de marche aléatoire. Ces redirections purement aléatoires permettent de capter toutes les variations lumineuses dues à la turbulence, c'est-à-dire les fluctuations locales caractérisant les tourbillons locaux établis dans ce type d'écoulement. La **Figure 35-(b)** illustre le suivi en temps réel de la même particule où le mouvement radial est représenté le long de l'axe longitudinal en coordonnées cartésiennes 3D. Cette base de données des positions consécutives des cellules est ensuite couplée directement à un champ d'irradiation donné (par exemple simulé pour une concentration de  $0,9 \text{ g.L}^{-1}$  et les conditions d'éclairage d'une journée d'été typique à Toulouse à 10h solaire où  $\alpha = 0,4$ ). Par conséquent, le régime lumineux temporel vu par les microalgues est enregistré sur 5 s avec une fréquence de 20 Hz comme représenté sur la **Figure 35-(c)**. Cette procédure est effectuée pour l'ensemble des particules simulées afin de représenter le régime lumineux réellement vu par chaque particule au cours de son parcours dans le volume réactionnel. Ainsi, il est possible d'aborder l'interaction entre la turbulence et l'hétérogénéité de l'éclairement au sein du PBR volume.



**Figure 35 :** Trajectoire suivie d'une cellule arbitraire pour un  $Re = 20\ 000$  et pendant  $t = 5\ \text{s}$  : **(a)** projection sur un champ d'irradiation (coupe 2D), avec une concentration cellulaire de  $X = 0,9\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $I_0 = 1241\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , coefficient diffus  $\alpha = 0,4$ , **(b)** trajectoire suivie le long de l'axe longitudinal en 3D et **(c)** Intensités lumineuses temporelles enregistrées lors de son mouvement .

Certaines trajectoires cellulaires relativement similaires à celle présentée sur la **Figure 35-(c)** ont été rapportées dans des études antérieures <sup>150,151,172,178</sup>. Cependant, la vérification que la base de données de trajectoire des particules échantillonne correctement la distribution volumique de la lumière n'est presque jamais effectuée.

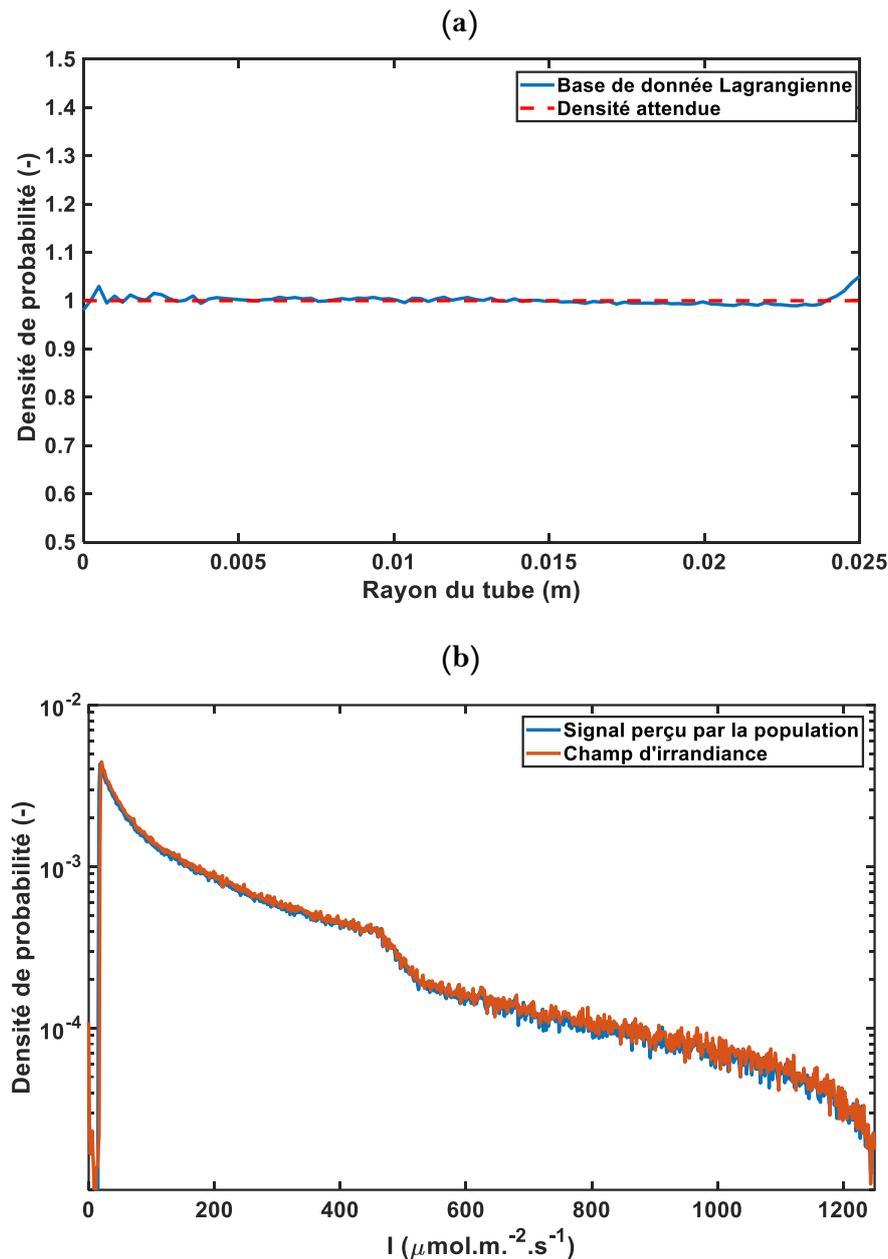
### 2.2.2. Homogénéité de la distribution spatiale des cellules

Nous rappelons qu'ici nous visons à valider l'exploitation de la base de données d'exposition à la lumière pour l'évaluation des taux de croissance de différents comportements de la population de microalgues expliqués dans la section (§ 1.3.2).

Les résultats obtenus précédemment ne peuvent être ni validés expérimentalement ni comparés à d'autres études de simulation. Ainsi, pour garantir la solidité de la méthode de suivi lagrangien (modèle DRW), il est important de vérifier que : (i) cette procédure assure une répartition spatiale homogène des particules dans le volume et (ii) la base de données générée sur les signaux lumineux enregistrés par les cellules permet un bon échantillonnage des valeurs locales d'intensité lumineuse.

Tout d'abord, la *Figure 36-(a)* montre une dispersion spatiale uniforme des cellules le long du rayon du tube, ce qui est un résultat important en soi. En effet, les simulations rapportées dans la littérature réalisées avec des outils CFD <sup>172</sup> en utilisant le modèle de turbulence standard  $k-\varepsilon$  couplé au suivi lagrangien, surestiment l'énergie cinétique turbulente dans la zone de proche paroi et peuvent générer ainsi un biais numérique sur le calcul ultérieur des trajectoires. Ces méthodes surestiment la concentration de particules en proche parois. Dans nos résultats, bien que cette accumulation artificielle (non-physique) existe, du fait du manque de résolution de la couche limite hydrodynamique et de l'adaptation géométrique insuffisante des lois de rebond, elle est cependant réduite à moins de 6% grâce à l'éjection de paroi particulière proposée ici, qui impose une contrainte qui force les cellules à retourner dans le flux.

Par ailleurs, une validation « au point » <sup>172</sup> a été réalisée pour confirmer l'uniformité de la répartition des cellules dans le volume et analyser l'acuité de l'effet de proximité de paroi. Cette méthode consiste à comparer la distribution des intensités lumineuses locales obtenues par le calcul du champ d'éclairement spatial et la base de données de lumière enregistrée par les cellules à l'aide du modèle de suivi stochastique. Cette approche de vérification fournit des informations plus solides qu'une approche intégrale basée sur la comparaison de la lumière moyenne disponible dans le volume et la moyenne de la population obtenue par l'approche lagrangienne, comme cela a été effectué dans d'autres études <sup>150,173</sup>.



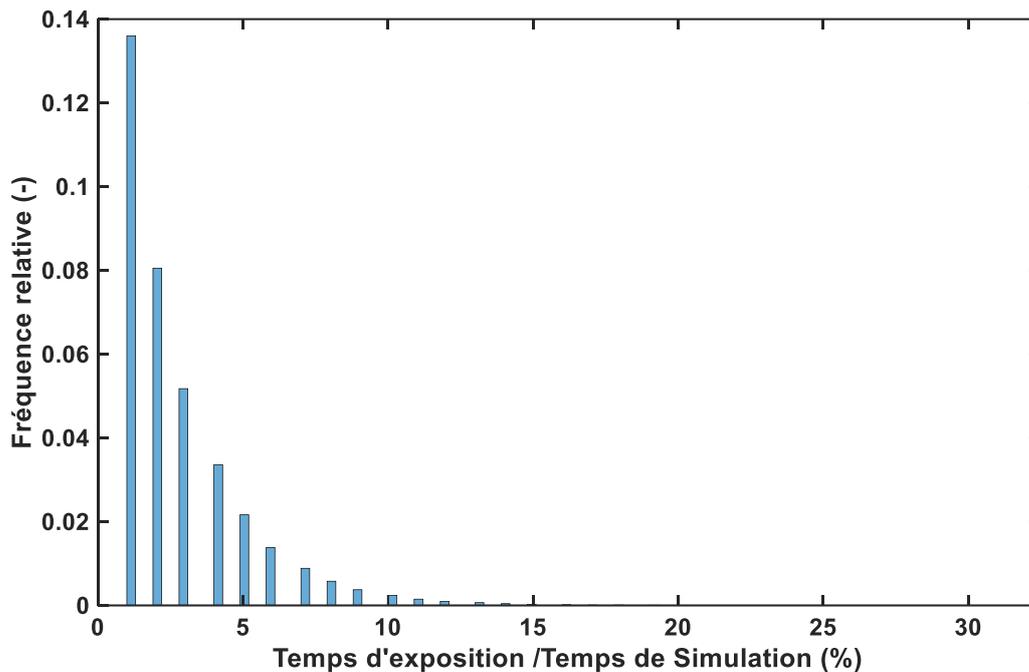
**Figure 36:** (a) La distribution radiale de la densité de population cellulaire dans le tube, (b) Comparaison de la distribution d'éclairement enregistrée par les cellules (en utilisant  $U_b = 0,4 \text{ m.s}^{-1}$  correspondant à un nombre de Reynold de 20 000) avec la distribution lumineuse donné par le champ spatial pour la concentration cellulaire de  $X = 0,9 \text{ g.L}^{-1}$ ,  $I_0 = 1241 \text{ } \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , coefficient diffus  $\alpha = 0,4$ .

Dans la **Figure 36-(b)** les résultats de densité de probabilité montrent que la validation de l'iso-distribution cellulaire est réussie puisque l'irradiance vue par l'ensemble de la population converge statistiquement vers le champ d'irradiance spatiale dans le PBR dans des conditions de fonctionnement données. De plus, il a également été vérifié que l'irradiation moyenne totale de toutes les données générées (toutes les particules et tous les événements) correspond à la moyenne volumique du champ d'éclairement avec moins de 2% d'erreur relative entre les deux valeurs.

### 2.2.3. Répartition du temps d'exposition aux irradiances de la paroi

Malgré de petites prédictions erronées de concentration de particules sur la région proche de la paroi fournies par notre modèle de suivi des particules, nous avons l'intention d'analyser ici son impact sur l'intégration du champ d'irradiation par la population cellulaire. En effet, la question qui se pose ici est de savoir si une **surexposition** (non réelle) est possible dans les zones à très fortes intensités lumineuses provoquant une éventuelle inhibition.

Pour y répondre, nous avons besoin d'informations sur la fréquence d'occurrence des événements de « passage dans la couche visqueuse » et leur durée. Une distribution des temps d'exposition ou de séjour de toutes les particules est calculée et normalisée par le temps de simulation total, comme le montre la **Figure 37**. La forme de cette distribution est semblable à une exponentielle décroissante. Ce dernier conduit à penser à la répartition des temps de séjour pour un réacteur parfaitement agité. Encore une fois, cette constatation appuie la discussion évoquée précédemment concernant la répartition uniforme des cellules dans le réacteur.

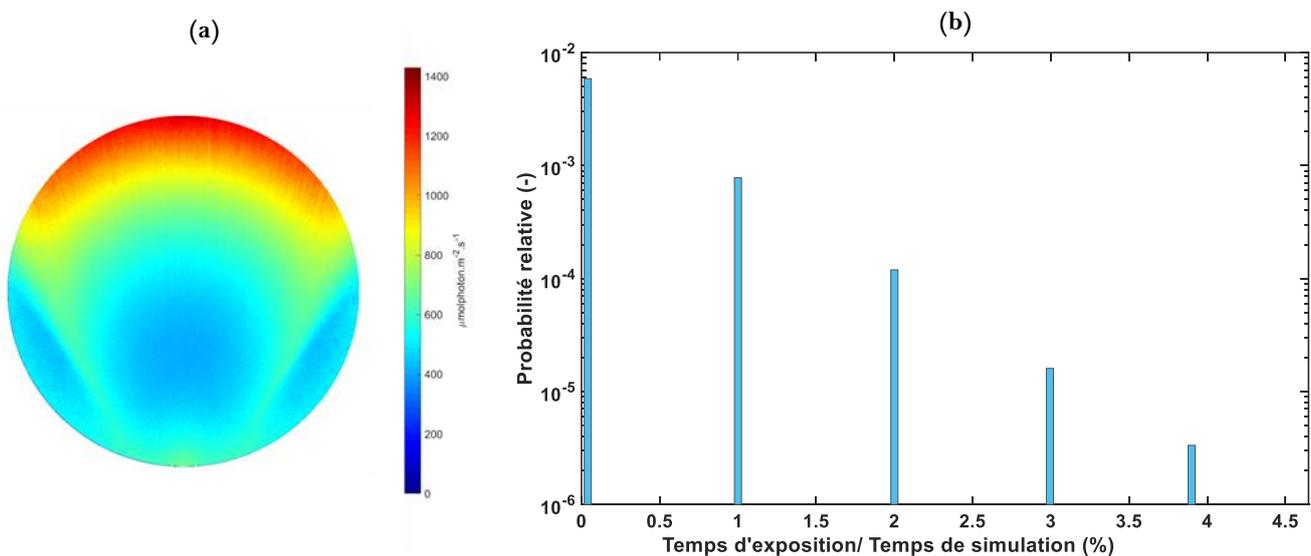


**Figure 37 :** Distribution de la durée normalisée d'exposition des cellules à la couche proche de la paroi pour la valeur de vitesse d'écoulement la plus faible testée dans cette étude (c'est-à-dire  $U_b = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$  correspondant à  $Re = 15\ 000$ ).

Plus précisément, ces données révèlent les temps de passage des particules à travers toute la couche visqueuse à proximité des parois du réacteur (un anneau d'épaisseur variable selon la vitesse d'écoulement). Cependant, cette couche limite peut être extrêmement hétérogène en termes d'intensités lumineuses. Cette hétérogénéité augmente à mesure que la concentration de la biomasse augmente.

À notre connaissance, il n'existe pas de consensus sur la valeur exacte de l'intensité lumineuse et de la durée d'exposition qui provoquent réellement une inhibition de la spiruline. D'après les données expérimentales de la littérature <sup>62</sup>, une période de plus de 10s sous une irradiance d'environ  $2600 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  est suffisante pour avoir un taux de croissance négatif conduisant à un effondrement total de la culture. Ces fortes intensités d'éclairage sont rarement rencontrées dans la réalité sauf dans les régions subtropicales. Le début de l'inhibition dans des conditions d'éclairage permanent a également été signalé pour des intensités  $>1300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Dans cet esprit, nous avons analysé notre base de données d'exposition à la lumière pour les cellules entières suivies afin de vérifier le temps de passage des cellules à travers les zones très éclairées. Pour ce faire, nous avons choisi une condition de fonctionnement extrême où les microalgues pourraient être sujettes à l'inhibition (c'est-à-dire l'irradiation incidente la plus élevée enregistrée à Toulouse, France  $I_0 = 1402 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et  $\alpha=0,33$ , la plus faible concentration de biomasse considérée ici  $X=0,3 \text{ g.L}^{-1}$ , et à la plus faible vitesse d'écoulement testée  $U_b=0,3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Ensuite, nous avons estimé pour chaque cellule le temps d'exposition aux éclairages supérieurs à  $1300 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Les résultats tracés dans la **Figure 38** montrent que les événements de basculement des cellules vers les hautes lumières sont occasionnels et de courte durée. Ainsi, cela indique que les cellules sont plutôt exposées à des flashes lumineux de forte intensité qui ne nuisent pas à la croissance par opposition à une exposition prolongée comme dans le cas du régime lumineux permanent qui provoque la destruction des cellules.

Les résultats confirment la non nocivité d'une telle surexposition à la lumière couplée aux turbulences induites par le mélange.

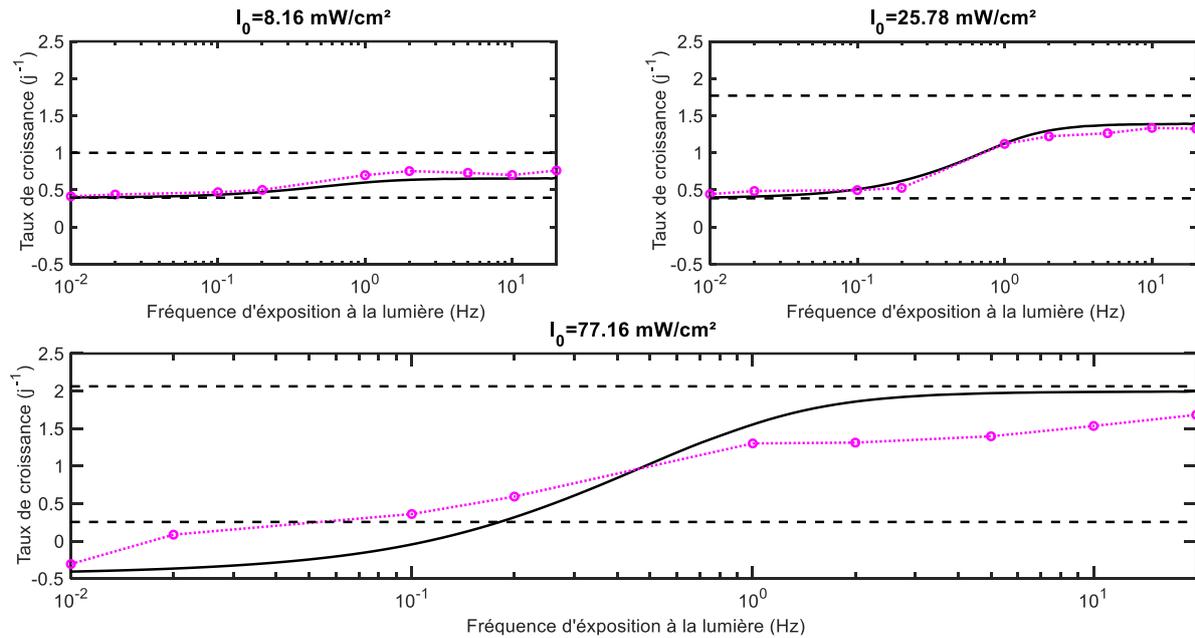


**Figure 38 :** (a) Lumière déposée avec  $I_0 = 1402 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et  $\alpha=0.33$ ,  $X=0.3 \text{ g.L}^{-1}$ , (b) Distribution du temps d'exposition cellulaire aux zones inhibitrices (vitesse d'écoulement  $U_b = 0,3 \text{ m.s}^{-1}$  correspondant à  $Re = 15\,000$ ).

### 2.3. Analyse des résultats du taux de croissance

#### 2.3.1. Justification du choix du modèle biologique utilisé

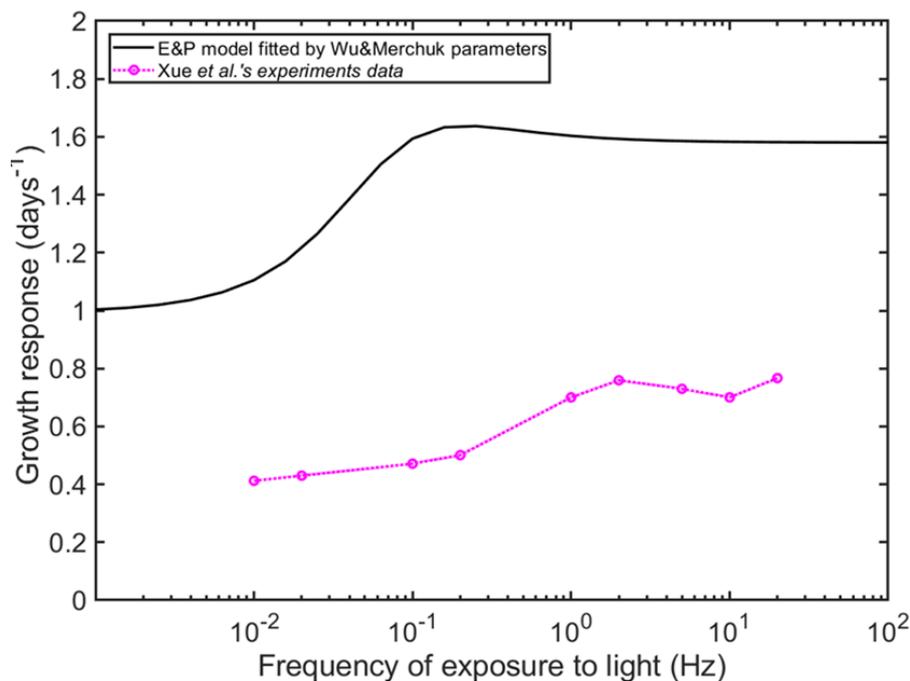
L'objectif est de démontrer la capacité du modèle à reprendre l'évolution de l'amplitude de la cinétique en fonction de la fréquence et l'intensité du flux de lumière délivré. Une représentation de la reproduction par notre modèle des résultats expérimentaux (numérisés à partir de l'article de *Xue et al.* <sup>62</sup>) est présentée dans la **Figure 39**.



**Figure 39** : Réponse de la croissance relative à la lumière  $\mu_V^a$  en fonction de la fréquence du signal et du flux lumineux maximal, modélisée par notre modèle en utilisant  $\tau=0,3$  s (ligne noire pleine), et comparée aux conditions de fonctionnement de l'expérience de *Xue et al.*, <sup>62</sup> (resp. (b),(c) et (d) dans la Figure 6) (ligne rose pointillée avec marqueurs). Les cas limites de la cinétique (ligne noire pointillée) :  $\mu_{V,\tau \rightarrow 0}^a$  et  $\mu_{V,\tau \rightarrow \infty}^a$

Nous constatons que le modèle retrouve avec satisfaction les résultats expérimentaux, hormis pour des flux lumineux élevés, à savoir  $77,16 \text{ mW.cm}^{-2}$ , où il est légèrement éloigné des expériences, cependant, nous retrouvons qualitativement la concavité de la courbe et la transition entre les deux cas limites de la cinétique biologique dans la gamme de fréquence de  $0,1$  à  $1 \text{ s}^{-1}$ . De telles confrontations n'ont pas été réalisées dans les travaux antérieurs basés sur le modèle de *Eilers et Peeters* <sup>156</sup> ajusté par *Wu et Merchuk* <sup>61</sup>. Ces derniers, ont procédé à l'ajustement des paramètres du modèle grâce à des expériences utilisant un cycle obscurité/lumière de 45 secondes (c'est-à-dire une fréquence lumineuse de  $0,02 \text{ Hz}$ ) et une fraction lumineuse (i.e. temps lumière / temps obscurité)  $> 0,6$ , ce qui ne correspond pas à l'échelle de temps attendue des fluctuations lumineuses dans un réacteur tubulaire. C'est pourquoi nous étions réticents à utiliser ce modèle.

Néanmoins, à des fins de comparaison, nous avons pris soin d'utiliser la solution analytique du même modèle rapportée par *Wu et Merchuk* <sup>61</sup> pour simuler la même gamme de fréquences lumineuses que celle réalisée pour notre modèle. Les résultats sont représentés sur la **Figure 40**. Malgré le fait que la forme concave de la courbe en fonction des fréquences soit retrouvée pour ce modèle, la gamme des fréquences de transition entre les deux cas limites est décalée par rapport aux expérimentations de *Xue et al.* <sup>62</sup> (soit  $[0,01-0,1 \text{ s}^{-1}]$  vs  $[0,1-1 \text{ s}^{-1}]$ ). En plus, il est clair que leur modèle utilisant la valeur des paramètres estimés par *Wu et Marchuk* ne reprends pas les résultats expérimentaux pour des fréquences et une fraction de lumière différents de leurs conditions opératoires. Ceci implique un réajustement des paramètres de ce modèle en fonction des conditions expérimentales étudiées, car la validité des constantes trouvées par ces auteurs est probablement limitée à l'espèce et à la gamme des expériences utilisées comme base de données.

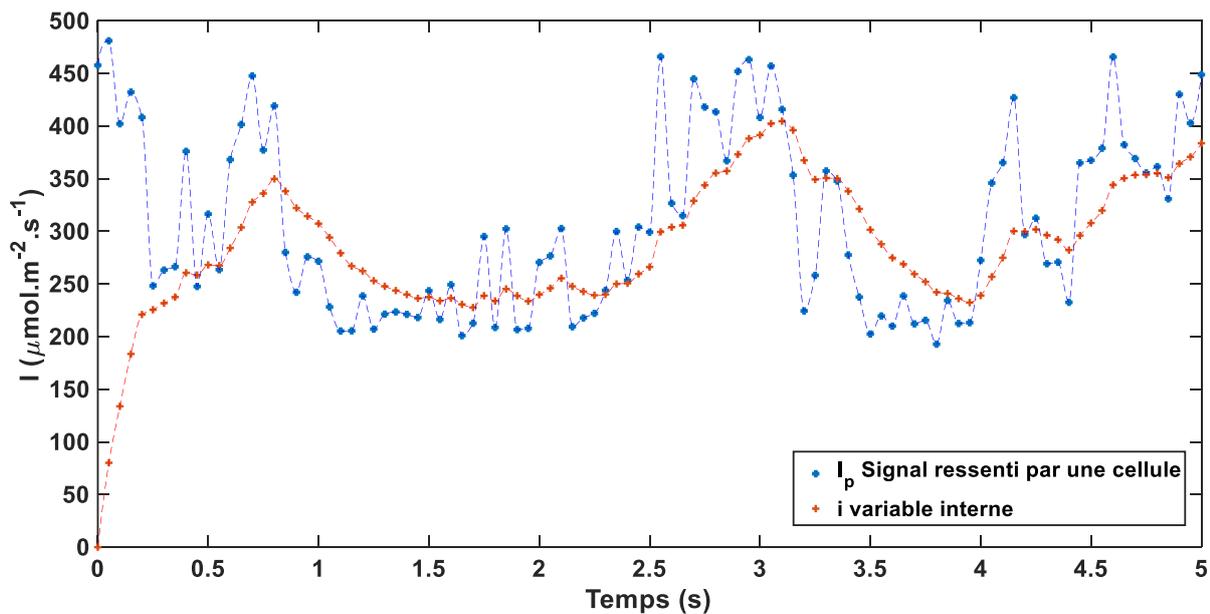


**Figure 40 :** Comparaison du modèle d'Eilers et Peeters <sup>156</sup> (utilisant les valeurs des différents paramètres estimés par *Wu et Merchuk* <sup>61</sup>) avec les résultats expérimentaux de (*Xue et al.*, <sup>62</sup>) pour un flux lumineux maximal de  $I_0=8,16 \text{ mW.cm}^{-2}$  et une fraction de lumière de 20%.

Ceci permet de justifier le choix de notre modèle biologique parmi d'autres rapportés dans la littérature qui sont souvent limités dans leur mise en œuvre en raison de leur complexité intrinsèque due au nombre de variables nécessaires au calcul et à l'identification de leurs nombreux paramètres. Notamment, pour la Spiruline, ces informations sont manquantes. Notre modèle traite de la "fluctuation de lumière par rapport à la lumière moyenne reçue dans un passé récent" ; il compare donc l'environnement actuel (lumière locale) à l'état actuel de la cellule hérité de son histoire passée. La puissance de ce modèle est de pouvoir décrire et représenter les données expérimentales <sup>62,221</sup> à un coût minimal. Dans ces études, le dispositif expérimental a été spécifiquement conçu pour étudier cet effet. Nous affirmons donc que le modèle biologique proposé offre un excellent compromis entre précision et simplicité mathématique.

### 2.3.2. Réponse dynamique biologique

La base de données sur l'histoire de la lumière de chaque particule a alimenté le modèle dynamique exprimé dans l'Eq(52) pour obtenir l'évolution de la variable interne  $i$  qui représente l'adaptation dynamique des cellules individuelles à la lumière détectée  $I_p$ . La **Figure 41** présente le signal variable interne résultant de la réponse biologique aux fluctuations lumineuses enregistrées, pour la même cellule que sur la **Figure 35-(c)**. Il a été constaté que l'amplitude des fortes fluctuations de l'exposition à la lumière est lissée par la variable interne  $i$  due à la turbulence induite par les microstructures hydrodynamiques (c'est-à-dire de petits tourbillons). Cela pourrait s'expliquer par la différence d'échelles de temps des processus hydrodynamiques et biologiques : le temps de relaxation ou réponse cellulaire,  $\tau = 0,3$  s, utilisé dans le modèle dynamique, est bien supérieur à la fréquence d'échantillonnage de l'exposition à la lumière et à la durée de vie des tourbillons. Cela permet donc de filtrer les fortes variations d'exposition lumineuse, pour finalement ne représenter que le schéma de fluctuations induit par les macro-instabilités (c'est-à-dire les grands tourbillons) de l'écoulement étudié.



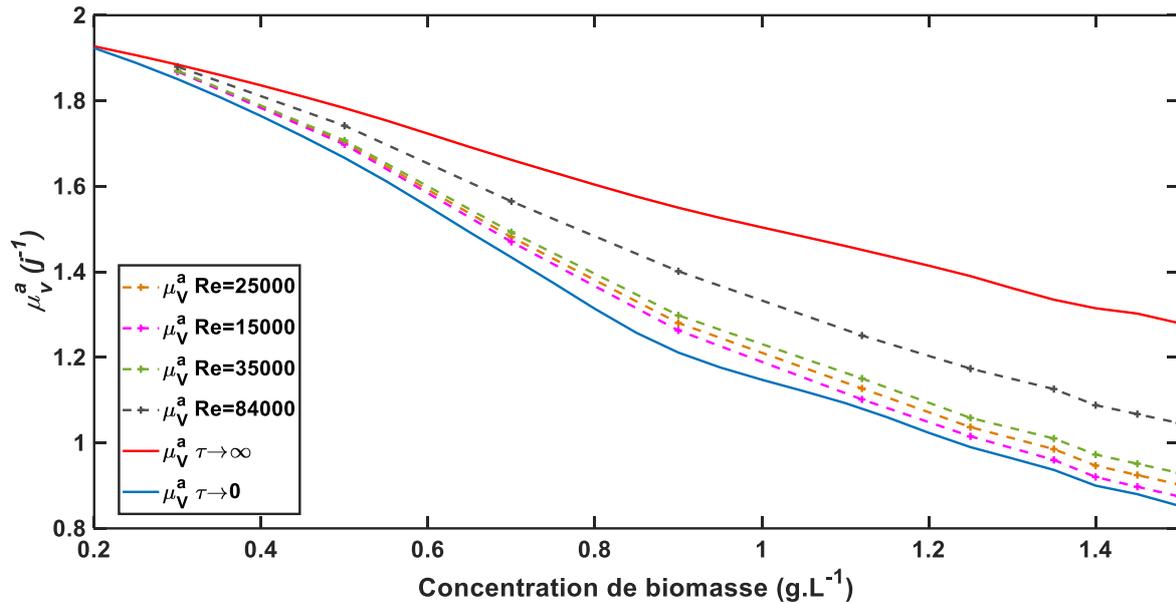
**Figure 41** : Réponse dynamique (ligne pointillée rouge) d'une cellule arbitraire à la lumière captée (ligne pointillée bleue) avec un temps caractéristique  $\tau = 0,3$ s en utilisant le modèle dynamique existant <sup>172</sup>.

La période et l'amplitude des fluctuations lumineuses vues par les cellules dépendent de l'intensité de la turbulence induite par l'hydrodynamique et du gradient lumineux spatial régi par la concentration en biomasse et l'énergie solaire apportée. Les résultats présentés ici reflètent avec pertinence la conséquence de la combinaison de l'histoire lumineuse des cellules avec une cinétique de réponse dynamique régie par le temps caractéristique biologique. Les résultats de la simulation pour l'évolution temporelle de la variable interne  $i$  constituent une

base de données utilisée ensuite pour calculer le taux de croissance global pour un comportement biologique dynamique réel.

### 2.3.3. Cinétique réelle relative à la lumière

Les taux de croissance globaux du PBR relativement à la lumière ont été calculés ici, selon l'approche de modélisation décrite dans la **Figure 22**, pour 10 concentrations comprises entre 0,3 et 1,5 g.L<sup>-1</sup> et pour différentes vitesses d'écoulement de liquide dans le tube  $U_b$  (voir **Tableau 9**) exprimé en nombre de Reynolds. La **Figure 42** présente les résultats de la réponse instantanée  $\tau \rightarrow 0$ , de la réponse d'intégration complète  $\tau \rightarrow \infty$ , et de la réponse dynamique avec adaptation biologique  $\mu_{IV}^a$  (§ 1.1). Aux faibles concentrations de biomasse, les taux de croissance correspondant aux deux cas asymptotiques et au cas réel  $\mu_{IV}^a$  se rejoignent, quelle que soit la vitesse d'écoulement appliquée. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le gradient spatial de lumière est très faible ce qui fournit aux cellules la même exposition lumineuse, donc les réponses des microalgues deviennent similaires. Cependant, à mesure que la concentration de biomasse augmente, les courbes deviennent plus raides et le taux de croissance global diverge selon le comportement des cellules vis-à-vis de la lumière captée. Un écart d'environ 60% est enregistré à une concentration de 1,5 g.L<sup>-1</sup> entre les cas limites (i.e.  $\mu_{IV}^a, \tau \rightarrow 0$  et  $\mu_{IV}^a, \tau \rightarrow \infty$ ). Dans le cas de la réponse biologique dynamique, les résultats se situent entre les deux cas asymptotiques. L'effet de mélange ou de turbulence devient plus remarquable avec l'augmentation de la concentration en biomasse puisque la fraction des volumes sombres et le gradient de lumière augmentent. En effet, comme la vitesse du liquide augmente, les taux de croissance tendent vers le cas limite maximal. Les résultats de la simulation indiquent une amélioration de 20% des performances du PBR lorsque la vitesse passe de 0,3 m.s<sup>-1</sup> à 1,68 m.s<sup>-1</sup> (c'est-à-dire  $Re = 15\ 000$  et  $Re = 84\ 000$  respectivement) pour une concentration cellulaire de 1,5 g.L<sup>-1</sup>. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les algues filtrent les fluctuations de lumière qu'elles voient et répondent à la lumière captée plus lentement qu'à l'adaptation instantanée. Ainsi, plus la turbulence est importante, plus le taux de croissance est proche de la limite supérieure (c'est-à-dire le cas entièrement intégré). Cet effet bénéfique de la turbulence a également été observé dans les résultats expérimentaux de <sup>119</sup> qui a enregistré une augmentation de 29% de la productivité de la spiruline lorsque le régime d'écoulement dans un PBR tubulaire droit passe d'un régime laminaire à un régime turbulent. En effet, cela confirme que la turbulence est responsable des effets bénéfiques de la forte exposition intermittente des cellules à différentes intensités lumineuses dans des gradients spatiaux très hétérogènes. Néanmoins, une turbulence trop forte augmente également les contraintes de cisaillement, qui doivent être limitées pour éviter les dommages de la culture. Cet effet ultérieur n'est pas considéré dans cette étude, puisque les vitesses d'écoulement étudiées ont été volontairement limitées pour éviter ce cas de figure.



**Figure 42 :** Influence de la concentration en biomasse pour différentes conditions d'écoulement turbulent sur le taux de croissance biologique des algues avec des conditions d'éclairage constantes à  $I_0 = 1241 \mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , coefficient diffus  $\alpha = 0,4$  ; réponse avec intégration complète de la lumière (ligne rouge unie) ; réponse instantanée (ligne bleue unie) ; réponse dynamique avec adaptation biologique (lignes pointillées).

#### 2.3.4. Vers une corrélation générale pour un taux de croissance spécifique normalisée $\Gamma$

Toute cette procédure de calcul des taux de croissance spécifiques pour les cas asymptotiques et dynamiques (réels) a été réalisée pour une large gamme de conditions opératoires concernant la concentration de microalgues, le débit exprimé en Reynolds et les caractéristiques de la lumière solaire reçue (irradiance globale incidente, contribution du rayonnement directe/diffus) afin de couvrir un large spectre de possibilités de fonctionnement pour un PBR tubulaire extérieur. Le taux de croissance normalisé  $\Gamma$  a été calculé par Eq(46) pour chaque cas simulé.

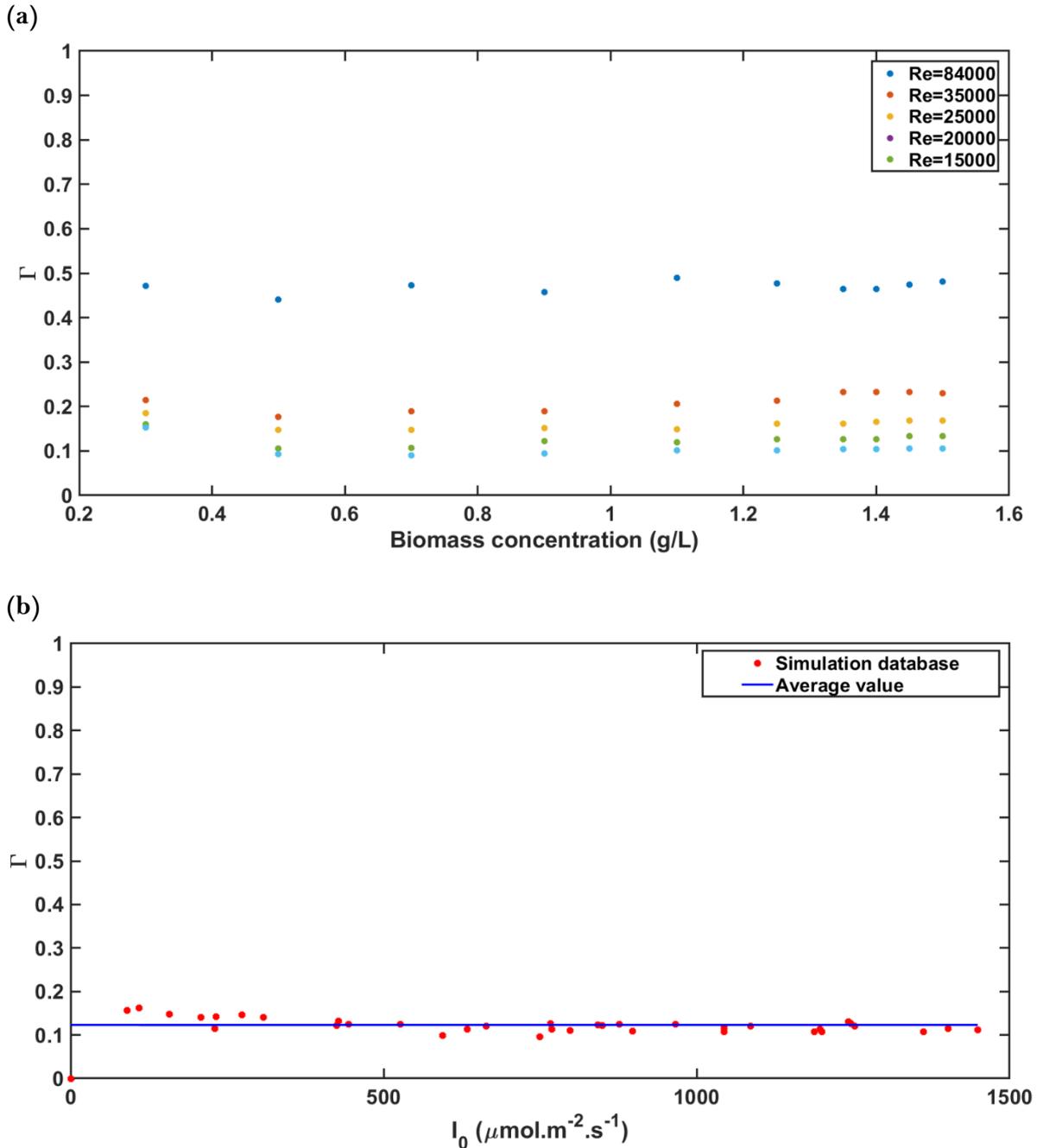
En d'autres termes,  $\Gamma$  traduit la capacité d'un PBR à atteindre ses performances optimales en fonction de la manière dont les microalgues sont exposées à la lumière, qui est dictée par ses conditions de fonctionnement. Étant donné que les simulations numériques nécessitent un couplage entre de grandes bases de données qui prend du temps, une réduction du modèle semble intéressante pour les cas d'application où les performances du PBR pourraient être calculées pour des conditions de fonctionnement réelles (i.e. concentration de la biomasse, écoulement, quantité et qualité de l'éclairage)

$\Gamma$  varie entre 0 et 1, indiquant l'efficacité d'utilisation de la lumière entre l'adaptation instantanée et l'intégration complète. Pour comprendre en profondeur l'effet de différents paramètres de fonctionnement sur la capacité du PBR à diriger ses performances vers les deux

cas asymptotiques, nous avons commencé à rechercher si la concentration cellulaire  $X$  ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et l'intensité solaire incidente  $I_0$  affectent le taux d'utilisation de la lumière (c'est-à-dire  $\Gamma$ ) et par conséquent le taux de croissance réel.

À la vue de la **Figure 42**, il est facile de préjuger que la conséquence de la concentration en biomasse sur la cinétique est filtrée dans le rapport de normalisation. Ainsi, pour vérifier cela, les valeurs correspondantes de  $\Gamma$  en fonction de la concentration, et pour plusieurs valeurs de Reynolds, ont été analysées. Les résultats de la **Figure 43-(a)** mettent en évidence l'indépendance de  $\Gamma$  à la variation de la concentration de la biomasse, quel que soit le nombre de Reynolds, sauf aux faibles concentrations où une très légère non-uniformité est observée. Cette exception pourrait s'expliquer par une meilleure intégration de l'hétérogénéité lumineuse due aux faibles gradients spatiaux pour les faibles concentrations de biomasse.

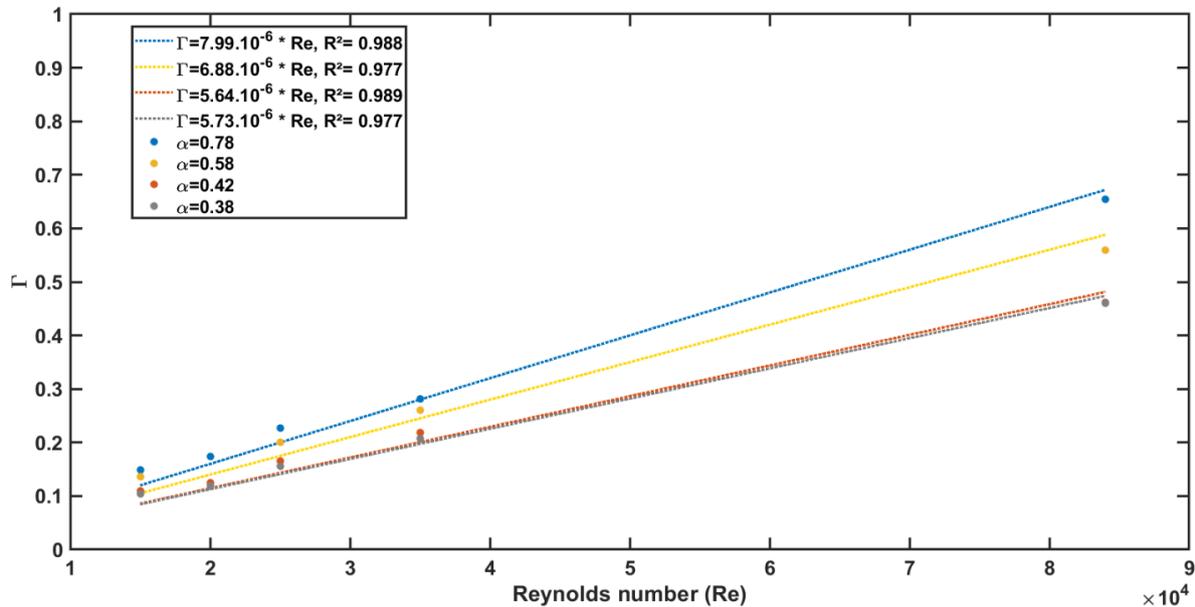
**Figure 43-(b)** montre les valeurs de  $\Gamma$  obtenues à partir de simulations de plusieurs valeurs de flux lumineux incident (dans la gamme des irradiances quotidiennes et saisonnières) fournies par PVGIS <sup>292</sup>, pour Toulouse, France. À une vitesse d'écoulement de  $U_b = 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\Gamma$  est pratiquement constant avec une valeur moyenne de  $\Gamma \approx 0,13$ , et similaire à celle illustrée à la **Figure 43-(a)** pour le même  $\text{Re} = 20\,000$ . Les faibles écarts à la moyenne observés notamment pour les faibles éclaircissements peuvent s'expliquer par la contribution de la composante diffuse de la lumière solaire dans le calcul des champs lumineux, ce qui confère au PBR une meilleure intégration de la lumière suite à un éclaircissement radial supplémentaire et donc une meilleure exposition de la microalgue à la lumière pénétrante. Suite à ces observations, en plus de la concentration en biomasse, on peut également s'affranchir du deuxième paramètre qui est l'intensité lumineuse incidente  $I_0$  pour l'évaluation de ce module  $\Gamma$ . La validation de l'indépendance vis-à-vis de  $I_0$  de dans le calcul gamma basé sur la littérature est détaillé dans l'[Annexe 1](#).



**Figure 43 :** Valeurs de  $\Gamma$  (a) en fonction de la concentration de biomasse  $X$  ( $\text{g.L}^{-1}$ ), (b) en fonction de l'intensité lumineuse incidente  $I_0$  avec constante  $Re = 20\,000$ .

Afin d'évaluer l'effet du mélange induit par la turbulence sur la capacité à améliorer l'utilisation de la lumière,  $\Gamma$  est tracé en fonction de  $Re$  **Figure 44**. Sans surprise, la valeur de  $\Gamma$  augmente avec l'augmentation de  $Re$  approchant le cas asymptotique maximal (c'est-à-dire le cas d'intégration complète, lorsque  $\Gamma = 1$ ) Ces résultats confirment à nouveau qu'une turbulence accrue améliore le taux de croissance. Des données expérimentales conduisant à une conclusion similaire ont été documentées dans la littérature <sup>106,119</sup> : productivité de la biomasse a été améliorée en augmentant la vitesse d'écoulement. Ce phénomène peut être représenté

par une corrélation linéaire ; cependant, l'acuité de cette corrélation doit être validée pour des vitesses d'écoulement élevées où d'éventuels dommages cellulaires pourraient se produire, ce qui implique une limite supérieure du débit. Un effondrement total de la culture a également été rapporté en l'absence de mélange (faible  $Re < 11\,500$ )<sup>106</sup>, ce qui démontre le rôle de la turbulence sur la lumière perçue et utilisée par les cellules.



**Figure 44 :**  $\Gamma$  vs  $Re$  pour différents coefficients de radiation diffuse  $\alpha$ . Les marques rondes représentent les résultats de la simulation. Les lignes pointillées représentent la corrélation  $\Gamma = f(Re)$ .

Ensuite, cette procédure a été effectuée pour quatre cas de champs d'éclairage qui diffèrent par la contribution du rayonnement diffus dans la lumière fournie, représentée par le coefficient  $\alpha$ . Les valeurs de  $\alpha$  correspondent à la plage du rapport moyen du rayonnement diffus au rayonnement global donnée par PVGIS<sup>292</sup>. La **Figure 44** met en évidence l'importance de la configuration d'éclairage PBR sur le taux d'utilisation de la lumière. En effet, pour un nombre  $Re$  donné, les valeurs de  $\Gamma$  sont différentes d'un champ lumineux à l'autre. Ainsi, plus la fraction de rayonnement diffus est élevée, ce qui correspond à une irradiation radiale, meilleur est le transfert de lumière dans le volume PBR et donc meilleure est l'utilisation de la lumière par les cellules. En effet, outre la turbulence induite par la vitesse d'écoulement du fluide, la manière dont la lumière est apportée au PBR est d'une importance majeure dans l'orientation de la cinétique de croissance vers les deux cas limites.

Pour mieux illustrer l'influence du rayonnement diffus sur la croissance biologique, le rapport  $\Gamma/Re$  est tracé en fonction de  $\alpha$  sur la **Figure 45**. Les résultats ont montré que, contrairement à la biomasse et à l'intensité de la lumière incidente, l'hydrodynamique couplée à la manière dont l'énergie lumineuse est fournie à un système de culture, a un effet considérable sur sa capacité à utiliser la lumière disponible. Une expression mathématique peut être proposée pour coupler à la fois le débit et la configuration d'éclairage comme suit :

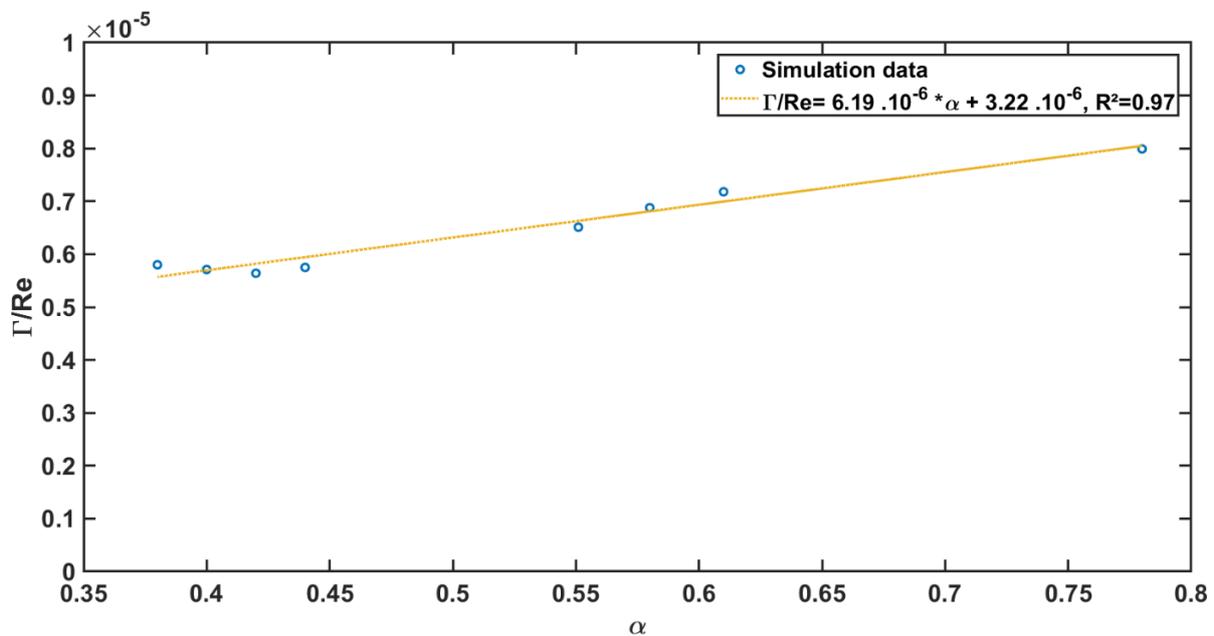
$$\Gamma = 6,19 \cdot 10^{-6} \cdot Re \cdot \alpha + 3,22 \cdot 10^{-6} \cdot Re \quad (84)$$

Puisque  $Re$  ne fait que varier, dans nos expériences numériques avec la vitesse du fluide, il est plus approprié d'écrire cette corrélation en fonction de  $U_b$  comme suit pour le diamètre du tube  $D = 0,05$  m :

$$\Gamma = 0,31 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_b}{\nu} \cdot \alpha + 0,16 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_b}{\nu} \quad (85)$$

où  $\nu$  étant la viscosité cinématique du fluide ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ). Pour le cas de la *Spiruline*, on peut supposer  $\nu = 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ . Ainsi,  $\Gamma$  peut être exprimé directement en fonction de la vitesse d'écoulement du liquide :

$$\Gamma = 0,31 \cdot U_b \cdot \alpha + 0,16 \cdot U_b \quad (86)$$



**Figure 45 :** Effet du coefficient de rayonnement diffus  $\alpha$  sur  $\Gamma/Re$ .

### 2.3.5. Validation

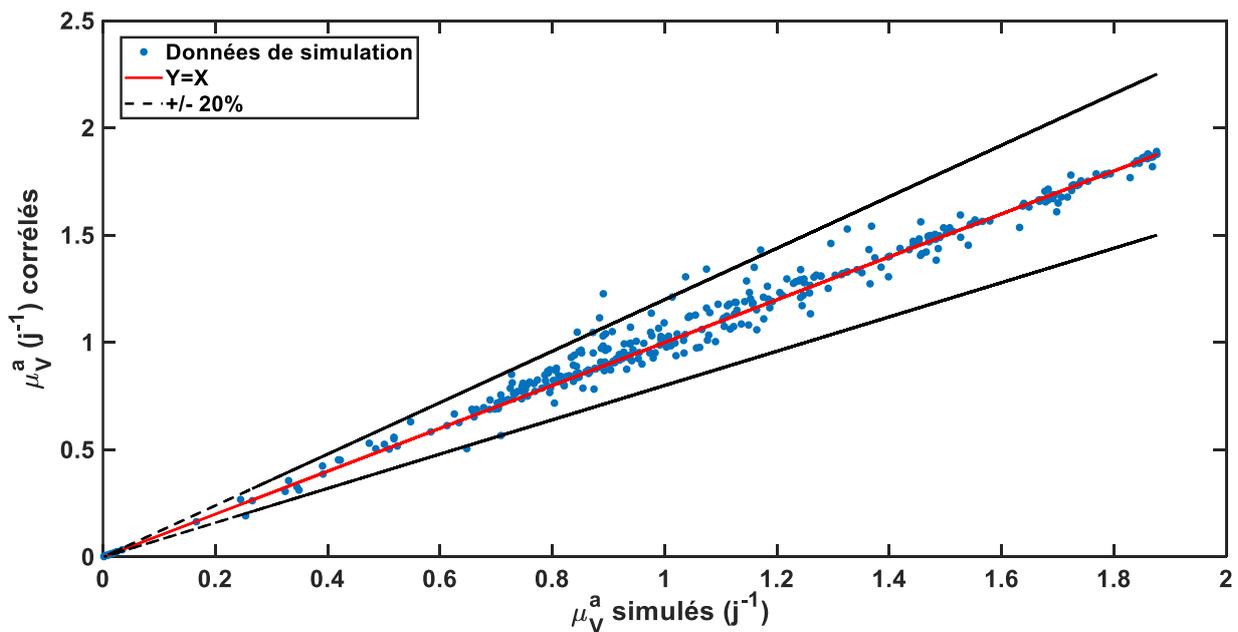
Depuis l'une des deux équations Eq(85) ou Eq(86) il est possible de prédire  $\Gamma$  sans avoir à résoudre le modèle couplé Monte Carlo champ lumineux - hydrodynamique - cinétique de croissance. Cependant, pour éviter toute confusion avec les performances réelles du PBR, il est nécessaire de rappeler que ce module d'ingénierie  $\Gamma$  décrit la capacité du PBR à exposer efficacement les cellules aux diverses fluctuations lumineuses de son volume, ou en d'autres termes, l'efficacité de l'utilisation de la lumière. Par conséquent, afin de prédire le taux de croissance réel relatif à la lumière dans un PBR solaire, une estimation préalable des cinétiques limites (cas instantané et cas d'intégration complète), relative à un champ d'éclairement donné,

est nécessaire (voir section suivante §2.3.6). En effet, les performances du PBR sont exprimées, pour chaque condition opératoire, à l'aide de l'Eq(84) ou l'Eq(86) et l'Eq(46) :

$$\mu_{I_V}^a = [(0,31 \cdot \alpha + 0,16 \cdot U_b) \cdot \mu_I(\langle I \rangle_V) - \langle \mu_I(I) \rangle_V] + \langle \mu_I(I) \rangle_V \quad (87)$$

Les valeurs de  $\mu_{I_V}^a$  calculées par l'Eq(53) (c'est-à-dire résultant de la combinaison des trois informations : la distribution de la lumière, le mouvement de la cellule et le temps de réponse biologique (inertie de la variable interne  $i$ )), sont comparées sur la **Figure 46** aux valeurs de  $\mu_{I_V}^a$  prédites par l'expression Eq(87) en utilisant la corrélation de  $\Gamma$ .

Bien que, écart de 20% entre les données simulées et corrélées (probablement dû aux petites erreurs commises lors de la corrélation du lien entre  $\Gamma$  et la turbulence et  $\alpha$ ), la tendance linéaire est trouvée avec un coefficient de détermination de  $R^2=0,98$ . Les résultats obtenus par l'équation(87) peuvent être considérés comme suffisamment en accord avec ceux obtenus en utilisant l'approche de modélisation complète. Ainsi, la fiabilité de l'utilisation de ces corrélations pour une estimation facile du taux de croissance spécifique global du PBR est validée.



**Figure 46 :** Comparaison entre  $\mu_{I_V}^a$  basée sur l'Eq(87) et  $\mu_{I_V}^a$  issue d'expériences numériques (de l'approche de simulation).

Ceci constitue une approche pragmatique pour réduire la complexité du calcul du modèle intégral pour la simulation du fonctionnement d'un PBR en conditions réelles.

### 2.3.6. Bases de données pour les cinétiques asymptotiques

Les deux réponses asymptotiques Eqs(52) et (53), peuvent être obtenus par un couplage direct entre les résultats du champ d'éclairement et le modèle cinétique de croissance relatif à la lumière  $\mu_I$  en s'affranchissant des données des trajectoires cellulaires réelles et de la capacité cellulaire à convertir la lumière. En effet, il a été déjà démontré <sup>172</sup> que lorsque  $\tau$  tend à zéro, la variable intrinsèque  $i$  est en équilibre avec l'irradiance locale vue par la cellule  $I_p$ . Par conséquent, la distribution volumique de la lumière suffit pour calculer le taux de croissance global comme étant la moyenne en volume des taux de croissance locaux. Lorsque  $\tau$  tend vers  $\infty$ , les cellules réagissent lentement comme si elles étaient continuellement exposées à la valeur moyenne dans le temps du signal d'éclairement énergétique qui correspond à la moyenne du volume. Par conséquent, leur taux de croissance est basé sur la moyenne temporelle de la lumière perçue. Pour valider cela, les deux cinétiques limites ont été calculées avec les deux approches : à partir des données irradiances échantillonnées par les trajectoires des cellules pour les deux valeurs limites de  $\tau$ , et à partir des champs volumiques d'irradiance (la moyenne). La comparaison de ces deux approches présentées en [Annexe 2](#) montre que leurs résultats sont identiques.

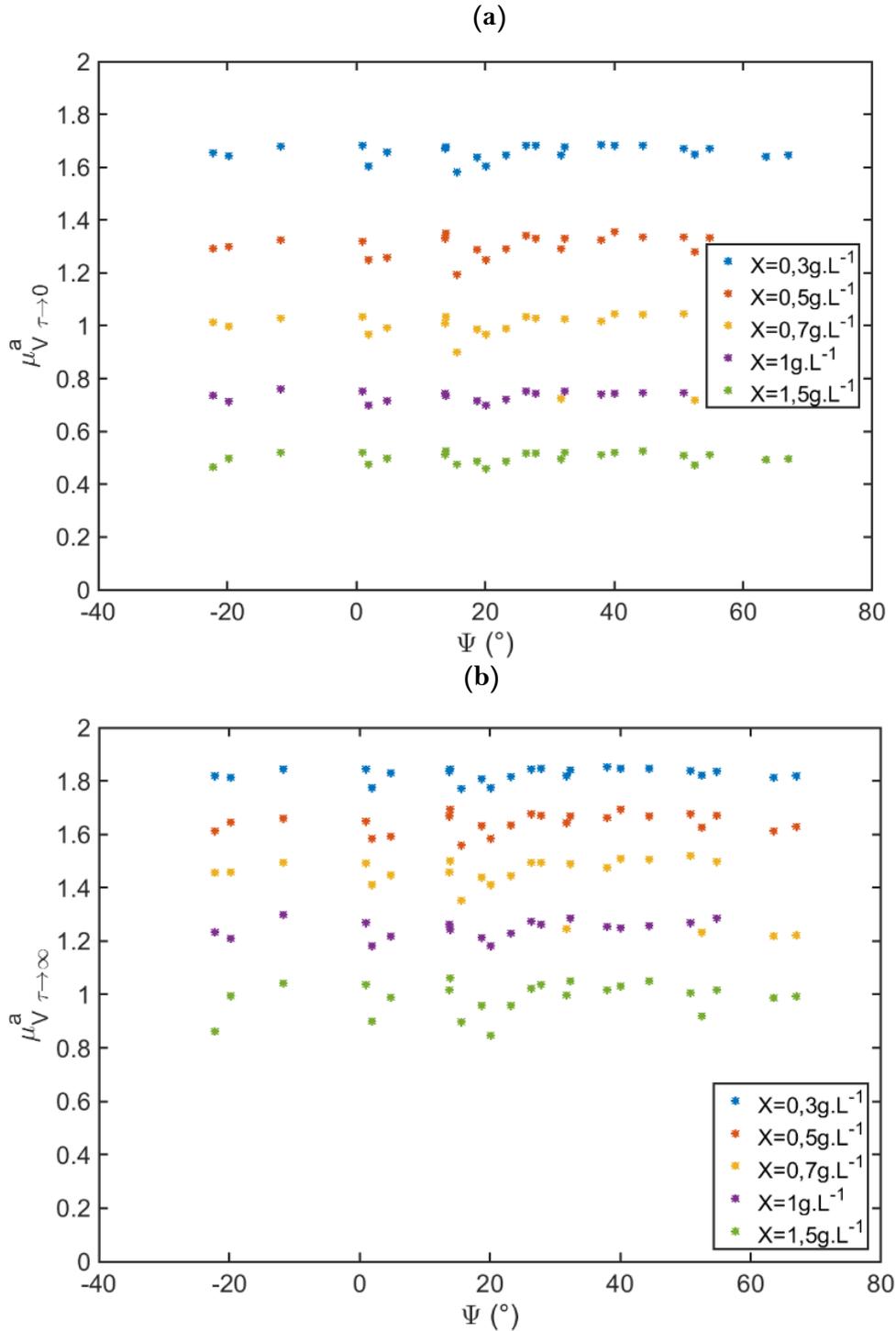
Dans notre travail, les champs d'irradiance ont été simulés séparément pour balayer un nombre suffisant de conditions opérationnelles (en termes de conditions d'ensoleillement et de concentrations de biomasse) ensuite utilisés pour le calcul de ces cinétiques. La résultante est une base de données pour chacune des réponses, qui est fonction de l'angle d'incidence du rayonnement, l'intensité de la lumière solaire et la concentration de biomasse.

Au vu du nombre de ces paramètres étudiés, il se trouve que la base de données collectée est peu commode à exploiter. Par conséquent, nous avons procédé préalablement à une simple analyse de sensibilité des données de cinétique aux paramètres en question. Tout d'abord, nous avons vu dans § 2.1.4 que les moyennes des irradiances locales pour les cas testés sont indépendantes de l'angle d'incidence du flux radiatif, cela implique que la résultante de la cinétique de croissance pour un comportement intégré  $\mu_{V,\tau \rightarrow \infty}^a$  l'est aussi. En effet, selon sa formule Eq(53), ce taux de croissance  $\mu_I(\langle I \rangle_V)$  est fixé par l'intensité moyenne de chaque distribution simulée en utilisant la fonction  $\mu_I$  (Eq(20) la courbe de réponse photosynthétique à la lumière).

Néanmoins, il convient de vérifier que cela est valable de même pour la cinétique du comportement instantané  $\mu_{V,\tau \rightarrow 0}^a$  qui est calculée à partir de l'intégration des irradiances locales Eq(52). Pour ce faire, les taux de croissance correspondant à cette réponse ont été obtenus à partir de la moyenne spatiale des cinétiques locales  $\langle \mu_I(I) \rangle_V$  pour un  $I_0$  et  $\alpha$  donnés, ensuite tracés en fonction de la gamme de variation l'angle  $\Psi$ .

La **Figure 48** présente l'évolution des taux de croissance calculés pour chacune des réponses en fonction de l'angle d'arrivée du rayonnement solaire et de la concentration de biomasse. Les résultats démontrent que les taux de croissance sont quasiment invariants avec ce paramètre. Cela sous-entend que la direction d'arrivée du flux lumineux n'impacte pas directement les cinétiques de croissance. Nous pouvons conclure que l'effet de l'hétérogénéité

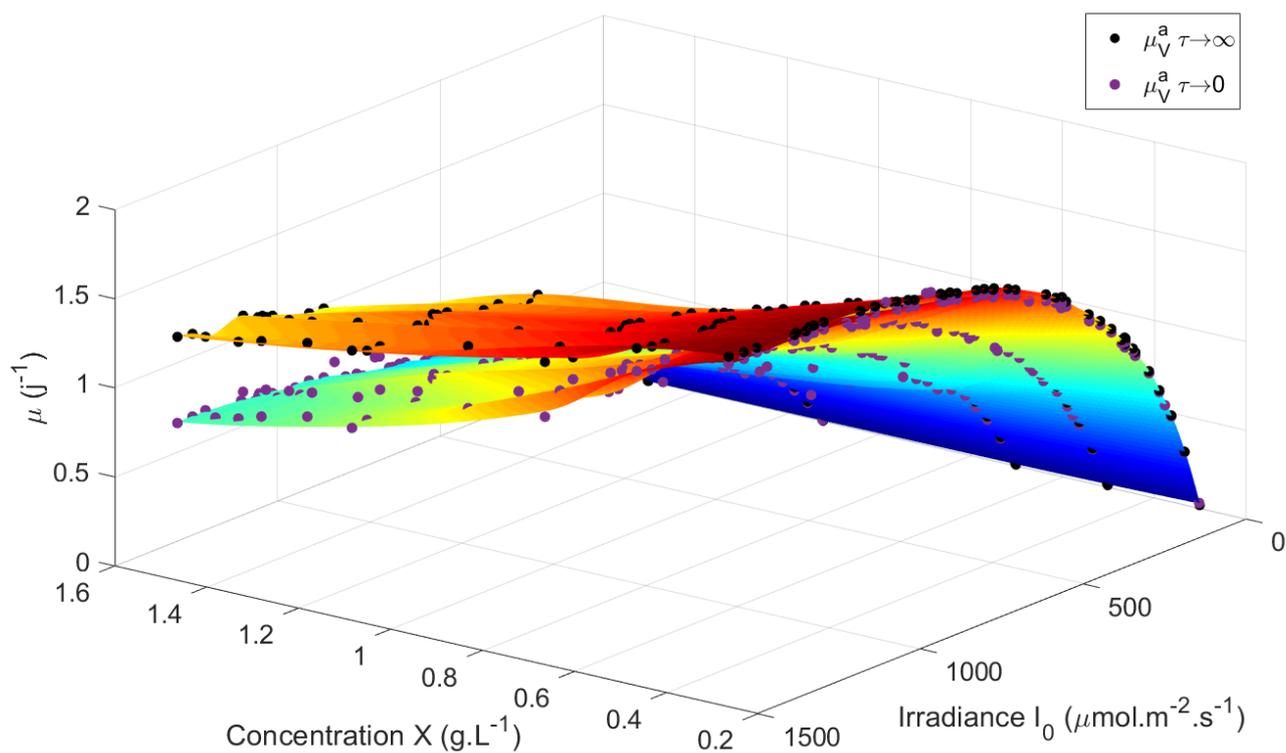
spatiale d'irradiance à l'intérieur du réacteur sur la croissance est régi principalement par la concentration cellulaire si l'intensité d'éclairage est constante. Ces informations nous permettent de s'affranchir de ce paramètre lors de l'exploitation des données de cinétiques obtenues.



**Figure 47 :** Effet de l'angle d'incidence  $\Psi$  sur les deux cinétiques asymptotiques pour 5 concentrations de biomasse, intensité incidente constante  $I_0=1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et  $\alpha =0,38$ . (a) Comportement instantané  $\mu_{V,\tau \rightarrow 0}^a$  ; (b) Comportement à intégration complète  $\mu_{V,\tau \rightarrow \infty}^a$ .

Dès lors, les 280 taux de croissance (pour chacune des réponses) calculés pour les intensités de lumière  $I_0$  réelles correspondantes aux moments et aux journées de l'année choisis pour la simulation, ont été restructurés dans une base de données 2-D en fonction de deux variables uniquement ; à savoir la densité cellulaire et l'intensité du flux radiatif incident. Néanmoins, il s'agit de données dispersées pour un nombre limité de cas qui ne représente pas toutes conditions opératoires rencontrées dans le cas d'un fonctionnement annuel. Par conséquent, nous avons opté pour une méthode d'interpolation numérique utilisant la fonction Matlab© «*scatteredInterpolant*». Cela a permis de générer des nouvelles valeurs interpolées de taux de croissance pour un maillage de concentration  $X$  et d'irradiance incidente  $I_0$  plus serré.

L'ensemble de données des deux cinétiques en question ainsi que leurs surfaces interpolées sont présentés dans la **Figure 48** en fonction de la concentration cellulaire et l'intensité de l'ensoleillement. Sur cette figure, nous retrouvons deux résultats mentionnés antérieurement : lorsque l'on se réfère à l'axe des irradiances, les résultats des taux de croissance retrouvent l'allure concave de la fonction  $\mu_I$  (Réponse photosynthétiques à la lumière Eq(21)), lorsqu'on observe les données par rapport à l'axe des concentrations de Spiruline  $X$ , nous retrouvons les deux courbes asymptotiques présentées dans la **Figure 42** qui révèlent l'effet de la concentration de biomasse sur la divergence des deux cinétiques. En effet, il est plutôt question ici, de l'effet de l'hétérogénéité spatiale des irradiances dans le volume sur le taux de croissance global. Ces hétérogénéités deviennent plus impactantes au regard de l'influence de l'irradiance sur la croissance quand l'épaisseur optique augmente, en d'autres termes, quand la concentration cellulaire augmente. Cependant, à des faibles concentrations, les gradients des champs de lumière sont faibles, cela conduit à une parité entre les deux cinétiques extrêmes, car les irradiances locales ne sont pas loin de la moyenne volumique d'irradiance.



**Figure 48 :** Représentation des données calculées et des surfaces interpolées des deux cinétiques  $\mu_{V,\tau \rightarrow 0}^a$  et  $\mu_{V,\tau \rightarrow \infty}^a$  en fonction de la concentration de biomasse et de l'irradiance incidente.

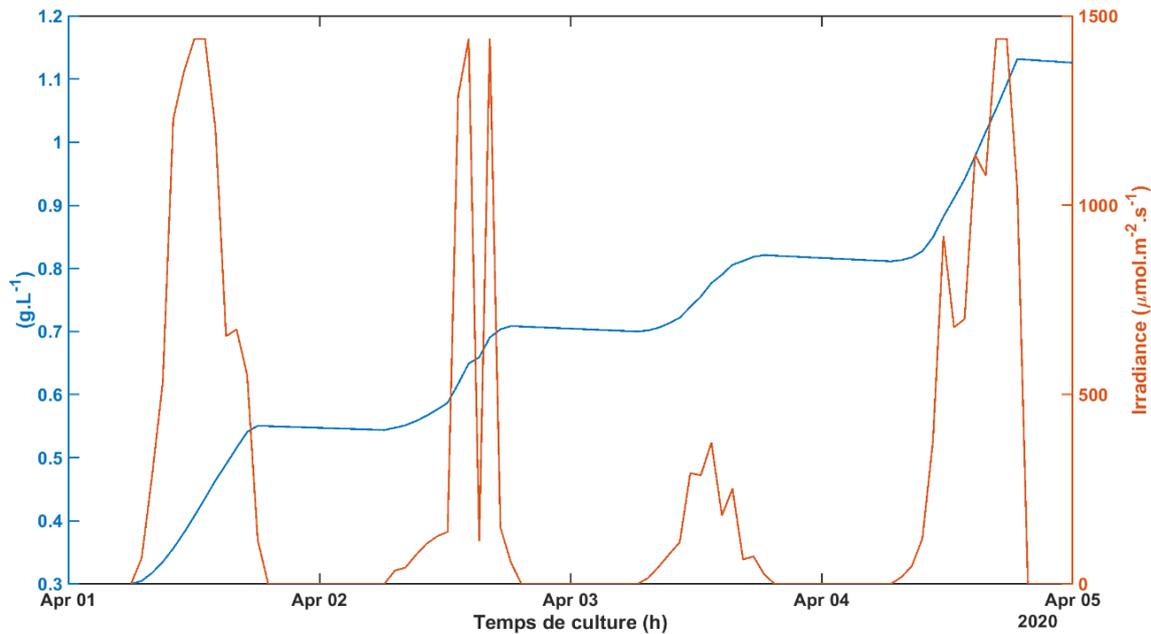
## 2.4. Simulation du fonctionnement de PBR solaire thermostaté

Dans cette partie, nous présentons les résultats du modèle global incluant les processus physico-chimiques et bio-cinétiques cruciaux pour simuler la croissance de la Spiruline. Cet outil est appliqué à un PBR tubulaire en conditions solaires dynamiques afin de fournir des informations sur le fonctionnement et d'explorer les effets des facteurs affectant la croissance de la souche en question. Il s'agit ici de l'évaluation de la production quotidienne de la cyanobactérie en utilisant les variations diurnes et nocturnes des conditions d'ensoleillement. Nous étudions un cas où le PBR est thermostaté (i.e. sa température est supposée contrôlée à sa valeur quasi-optimale à savoir 36°C). Étant très sensible à l'environnement extérieur, la valeur de cette température et son effet sur les performances du réacteur seront discutés dans le chapitre suivant.

### 2.4.1. Exemple de simulation de la croissance et de l'évolution des substrats

Les *Figure 49* et *Figure 51* présentent l'évolution des variables sur 4 jours. Les données d'ensoleillement sont celles du 1<sup>er</sup> au 5 avril 2020, à Toulouse. Il est important de noter que la culture démarre le premier jour, avec une inoculation en biomasse à 0,3 g.L<sup>-1</sup>, et un apport initial en nutriments sous la forme de sel de bicarbonate, nitrate et chlorure de sodium (cf. *Tableau 7*).

La *Figure 49* présente la concentration de la biomasse et la valeur d'irradiance en fonction du temps. La courbe de concentration en biomasse a une allure ondulatoire qui reproduit les cycles jour et nuit en suivant les irradiances correspondantes. Notre modèle est capable de décrire les processus biologiques de croissance (crêtes) et de respiration (décroissances) invoqués précédemment. La concentration de biomasse est passée de 0,3 g.L<sup>-1</sup> à 1,15 g.L<sup>-1</sup> après 4 jours représentatifs de culture du mois d'avril. La pente de la courbe de concentration varie avec l'évolution de l'irradiance durant les journées, on peut noter les baisses d'évolution quand l'irradiance faiblit, comme pendant la journée du 2 avril. Pendant la nuit, la consommation du contenu cellulaire dans les processus de respiration apparait dans la légère décroissance de la concentration de biomasse dont la pente est déterminée par le  $\frac{dX}{dt} = -\mu_{nuit} \cdot X$ . Nous avons fixé ici le taux de respiration  $\mu_{nuit} = 0,024 \text{ j}^{-1}$ , valeur mesurée pour la Spiruline à la température de 36°C selon les résultats de la thèse de *Cornet* <sup>246</sup>.

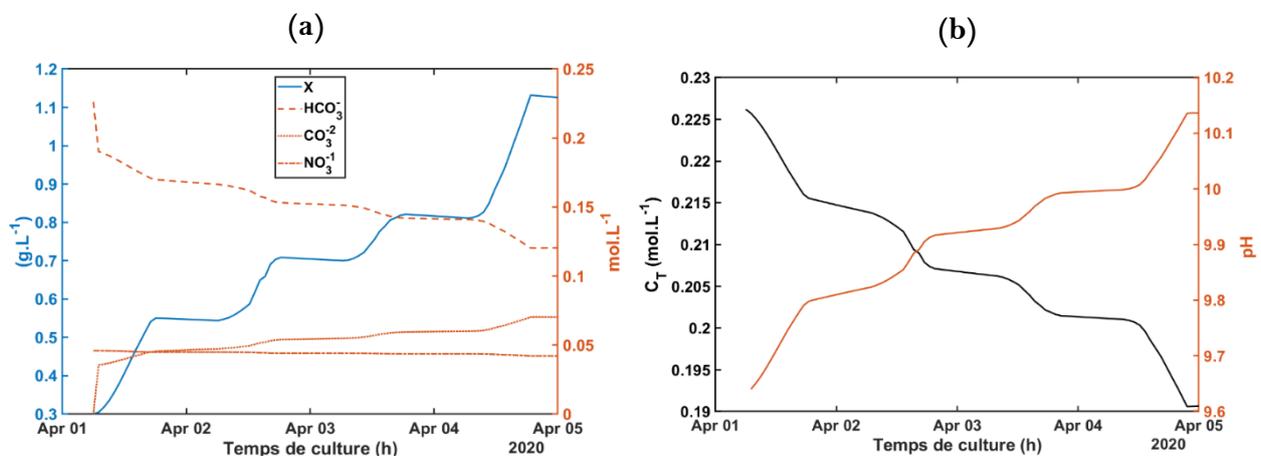


**Figure 49 :** Croissance de la Spiruline sur une culture de 4 jours du mois d'avril à Toulouse. Courbe bleue : Concentration de biomasse ; Courbe orange : Irradiance solaire globale dans le PAR.

Les figures suivantes montrent les concentrations des éléments nutritifs, comme le bicarbonate et l'azote, ainsi que le carbonate, composant intermédiaire qui se crée par les processus d'équilibres chimiques entre les différentes formes de carbone. **Figure 50-(a)** montre l'évolution des sources carbonées et azotée pendant la croissance. La faible pente décroissante de la courbe du nitrate, s'explique par le faible coefficient  $Y_N^X$  dû à la stoechiométrie. L'augmentation de la concentration du carbonate dans le milieu est à la fois due à la dissociation du bicarbonate (cf. Eq(30)) comme nous pouvons le constater en particulier à l'instant initial de la culture (où la concentration de bicarbonate passe de 0,22M à 0,19 M immédiatement), mais aussi à la basification du milieu de culture suite à la consommation de bicarbonate par la biomasse. La **Figure 50-(b)** montre les variations journalières du carbone total  $C_T$  et du pH liées à l'activité de la Spiruline. Une croissance de pH de 9,6 à au-delà de 10 déplace les équilibres des espèces carbonées vers la formation du carbonate. Dans la journée, l'activité photosynthétique engendre une production des ions hydroxyde  $OH^-$  et une consommation de bicarbonate qui permet de basculer le pH à des zone plus basiques créant ainsi les ions carbonate. Dans la nuit, la respiration produit le dioxyde de carbone et l'hydrogène, ce qui entraîne une baisse du pH. Cependant, sur la courbe, nous remarquons que pendant les premières nuits il n'y a pas de creux de pH très marquants. Cela peut être expliqué par la faible vitesse de l'activité respiratoire  $\mu_{nuit}$ .

À ces valeurs de pH, il n'y a pas de dioxyde de carbone dissous dans le milieu, les seuls composants carbonés qui existent significativement sont le bicarbonate et sa base conjuguée. Nous savons déjà que la Spiruline ne consomme que le bicarbonate, mais aussi qu'une partie de ce dernier est transformée en carbonate (non consommable). Afin d'acquérir l'information sur la quantité de carbone qui sert à la croissance, nous avons suivi l'évolution du carbone total dans le milieu. Ainsi, il est possible de s'assurer qu'il y a quand même une fraction de carbone introduit qui sert à la croissance et de vérifier que le programme résout bien les

équations différentielles et simultanément le système algébrique des équilibres chimiques. Toutefois, les résultats montrent qu'au bout de 4 jours de culture, seulement 15% de la teneur de carbone apporté initialement ont été utilisés pour passer de  $0,3 \text{ g.L}^{-1}$  à  $1,15 \text{ g.L}^{-1}$  de Spiruline. Bien que la durée de culture considérée semble relativement courte pour que la quantité de bicarbonate soit épuisée ou la croissance soit inhibée par la concentration de carbonate dans le milieu, les résultats expérimentaux de Gernigon <sup>39</sup> ont indiqué qu'uniquement 50% de la quantité de bicarbonate introduite est convertie pour produire  $1,8 \text{ g.L}^{-1}$  de biomasse en cas de croissance continue (avec éclairage constant et continue) et sans régulation de pH. Ces résultats indiquent que, dans ces conditions, la moitié de la source de carbone inorganique se trouve sous forme de carbonate qui ne peut pas être consommé par la biomasse. Bien que ce phénomène ne semble pas néfaste quant à la biomasse elle-même (sous réserve qu'aucune inhibition ne se produise), a posteriori, cela entraîne des impacts indésirables sur les performances environnementales du procédé.



**Figure 50 :** a) Croissance de la Spiruline avec les concentrations des composants du milieu de culture : Bicarbonate, carbonate et nitrate en concentration molaire. b) Évolution de la concentration du carbone total dans le milieu et du pH.

Nous avons vu que les systèmes de culture fermés (entre autres tubulaires) ont tendance à accumuler l'oxygène lors de la photosynthèse. La concentration de ce constituant peut largement dépasser dans certains cas 300% de saturation (ce qui donnerait une valeur en solution supérieure à  $0,022 \text{ g.L}^{-1}$  ce qui provoque un effet délétère sur les performances du PBR, bien qu'on peut aussi supposer qu'il se trouverait plutôt sous une forme gazeuse, car le milieu est très hétérogène, C'est pourquoi un système de dégazage stimulant le transfert gaz-liquide pour stripper le surplus d'oxygène est primordial dans la conception de ce type de réacteur. Notre simulateur prend en compte ce dispositif installé après une longueur de PBR de 120 m, calculée au paragraphe § 5.2 du Chapitre II.

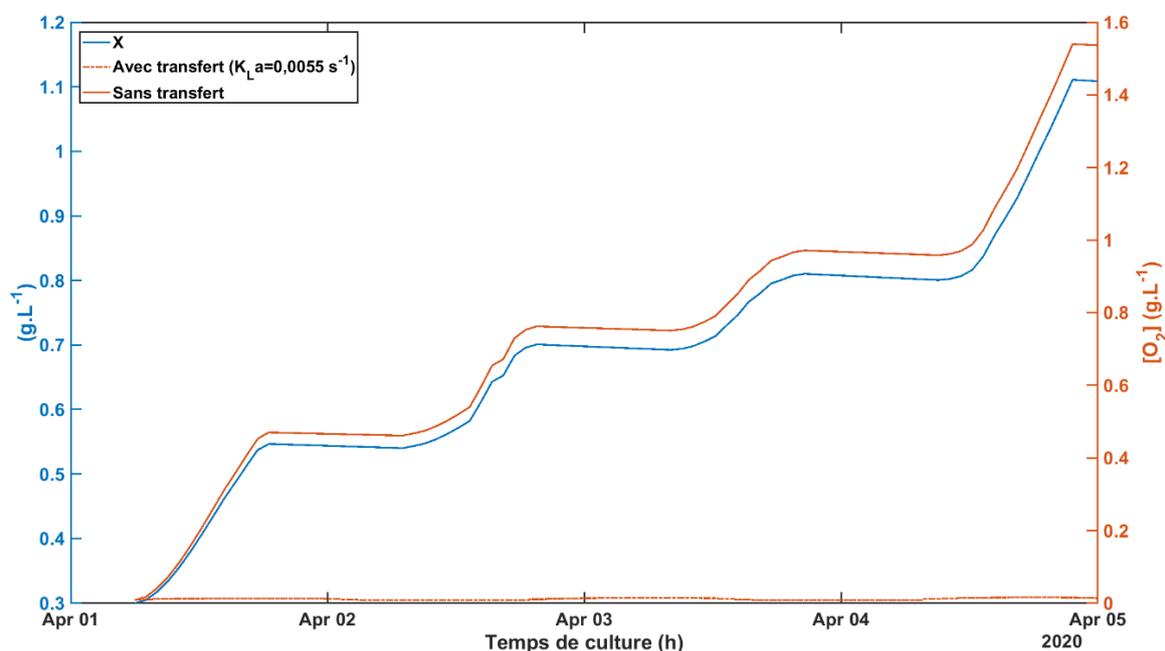
Pour terminer cet exemple de simulation globale, nous inspectons la capacité de notre programme à simuler ce transfert d'oxygène. La détermination de la concentration en oxygène dissous au cours du temps se fait par l'intégration des équations de bilan de matière (42) et (44) qui font intervenir un premier terme représentant le taux de

production/consommation de l'O<sub>2</sub> par la biomasse et un second terme caractérisant le transfert gaz-liquide. En supposant que les conditions de transfert s'effectuent dans une colonne à bulle et qu'elles sont constantes dans le temps, le coefficient volumique de transfert  $K_L a$  est supposé constant. Nous avons testé en guise d'exemple concret de contacteur si un échangeur du même type que celui utilisé par *Gernigon* dans son travail de thèse <sup>39</sup> pouvait réduire la concentration en dioxygène à la sortie de la partie tubulaire. Nous nous sommes ensuite appuyés sur ses données expérimentales pour évaluer les valeurs de ce coefficient adéquates (voir [Annexe 3](#)). Un coefficient de transfert de l'ordre de 0,0055 s<sup>-1</sup> (soit 19,8 h<sup>-1</sup>) s'avère être correct pour assurer un transfert de gaz efficace via la colonne permettant de maintenir la concentration en oxygène dissous à des valeurs proches d'environ 150% de saturation en air (soient 0,013 g.L<sup>-1</sup>) quand la productivité de la Spiruline est maximale. Bien que la valeur du  $K_L a$  soit environ 60% plus faible que celle prédite dans le travail de *Camacho Rubio et al.*, <sup>259</sup> pour un PBR tubulaire horizontal couplé à un Airlift ou celle rapportée par *Molina et al.*, <sup>106</sup> ( $K_L a$  entre 0,05 et 0,15 s<sup>-1</sup>), elle appartient à la plage typique des coefficients de transfert gaz-liquide estimés dans différentes géométries de PBR, équipé d'une technologie de dégazages, qui varient entre 0,0005 s<sup>-1</sup> <sup>255</sup> et 0,013 s<sup>-1</sup> <sup>293</sup>.

D'autre part, nous pouvons également déterminer la valeur de ce coefficient par une simple évaluation du bilan de matière, en connaissant les concentrations en oxygène à l'entrée et la sortie du contacteur gaz-liquide. Dans le cas d'une croissance maximale, la teneur en oxygène atteinte est d'environ 0,022 g.L<sup>-1</sup> à la sortie du tube. Pour évacuer cette accumulation et descendre, en 5 minutes, à 0,013 g.L<sup>-1</sup> dans une colonne à bulle dont le volume fait 30% du volume total du réacteur, les résultats indiquent un  $K_L a = 0,0071$  s<sup>-1</sup>. Cette valeur n'est pas loin de celle retenue pour nos simulations. Or, nous pouvons la considérer comme la limite des performances de transfert car elle est estimée pour le cas où la productivité est maximale, ce qui est resté rarement atteignable en conditions extérieures.

Dans la **Figure 51**, nous présentons les résultats de la simulation du profil de la concentration d'oxygène accumulé avec et sans considération du transfert gaz-liquide. Notons bien au préalable que nous ne tenons pas compte de l'effet délétère de l'oxygène sur la biomasse dans la cinétique de croissance, le but ici n'étant que de prédire la quantité d'oxygène qui pourrait s'accumuler (sans stripping) et de voir si le système de stripping simulé permet effectivement de s'en prémunir. En effet, sans stripping, nous constatons que la concentration d'oxygène, au bout de quelques heures, dépasse largement la limite inhibitrice qui est d'environ 0,03 g.L<sup>-1</sup>. Cela constituerait, sans aucun doute, un problème majeur pour la culture ! À l'opposé, si l'on considère un système de dégazage pour évacuer cet excès (avec un  $K_L a = 0,0055$  s<sup>-1</sup>), nous observons que les concentrations d'oxygène dissous oscillent autour de 0,0085 et 0,013 g.L<sup>-1</sup> et ce malgré la variation du taux de production/consommation d'oxygène pendant les processus biologiques de croissance et de respiration. Cela confirme que notre modèle intègre bien les bilans de matière pour chaque pas de temps de la durée de culture choisie. Ces résultats

permettent de s'assurer que les performances de transfert calculées garantissent un bon stripping de l'oxygène et un contrôle de sa concentration en dessous du seuil tolérable.



**Figure 51:** Profil de la concentration d'oxygène dissous avec et sans stripping, pendant la croissance.

#### 2.4.2. Stratégies de récolte

Trois scénarii de récolte ont été construits pour avoir une idée de conditions permettant d'obtenir la productivité optimale de la Spiruline, en gardant un œil critique sur les résultats en fonction de la réalité et de la faisabilité. La question est d'imposer des contraintes appropriées aux stratégies de récolte de manière à maximiser la biomasse produite et extraite d'un PBR fonctionnant **en mode batch**. Il convient de noter que, pour tous ces scénarii, toute la biomasse n'est pas soutirée. L'idée est d'en garder une partie pour reconstituer un inoculum à une concentration de 0,3 g.L<sup>-1</sup> (concentration initiale) par ajout d'eau et de nutriments après récolte partielle. De plus, pour le premier et pour le dernier cas, un recyclage du milieu de culture, indépendant du procédé de la récolte, est considéré pour minimiser toute perte de nutriments.

Le **Tableau 10** résume les trois scénarii (S1, S2 et S3) avec une description de chaque stratégie proposée pour le soutirage.

**Tableau 10** : Les consignes imposées pour chaque scénario de récolte envisagé.

Scénario	Mode de culture	Description
S1	Batch	La récolte est contrôlée en fixant une concentration optimale de biomasse dans le réacteur égale 1,7 g.L <sup>-1</sup> <b>tout au long l'année</b> .
S2	Batch	La récolte est contrôlée en fixant <b>un seuil</b> de concentration des nutriments dans le réacteur ( $[HCO_3^-]_{min} = 0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ et $[NO_3^-]_{min} = 0,026 \text{ mol.L}^{-1}$ ).
S3	Batch	La récolte est <b>quotidienne en fin de journée</b> .

Les performances d'un PBR en batch évaluées ici sont des productivités annuelles qui sont calculées à partir de la productivité de la biomasse en (g.L<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>) sur chaque cycle de récolte ( $i$ ) obtenue par l'Eq(88) avec une concentration initiale fixe  $X_{ini}$  et de récolte  $X_{opt}$  et une période de culture qui varie selon les conditions d'irradiance  $t_{culture}$ . En effet, la productivité volumétrique annuelle de la biomasse Eq(89) est égale à la productivité de la biomasse de toutes les cultures batch sur une année ( $N$ ).

$$P(i) = \frac{X_{opt} - X_{int}}{t_{culture}(i)} \quad (88)$$

$$P_v = \frac{\sum_{i=1}^N P(i)}{N} \quad (89)$$

Dans un premier temps, six concentrations de biomasse ont été évaluées comme point de consigne de récolte afin d'identifier la meilleure pour le soutirage. Les simulations sont réalisées sur une année complète et les résultats sont présentés sur la **Figure 52-(a)**. La productivité optimale de Spiruline est obtenue lorsque le soutirage est effectué quand la concentration de biomasse est de 1,7 g.L<sup>-1</sup>. Pour cette valeur de concentration, la productivité annuelle simulée est de 95,45 kg.m<sup>-3</sup>.an<sup>-1</sup>. Cela nous a amené à considérer cette stratégie de récolte comme un premier scénario « **S1** » (de référence) à étudier.

Dans un deuxième temps, deux scénarii supplémentaires ont été testés pour déterminer la politique d'exploitation préférentielle afin d'optimiser les performances de cette technologie de PBR sur une année.

Le scénario « **S2** » consiste à déclencher la récolte en fonction de la concentration résiduelle des éléments nutritifs dans le milieu de culture, car le taux de croissance est également impacté par la quantité de bicarbonate et d'azote. En effet, ces nutriments sont consommés par la biomasse et leurs concentrations diminuent, ce qui provoque une dégradation de la cinétique de croissance. Nous nous sommes basés sur les cinétiques respectives de l'influence de ces composants (§6.1 et §6.2 du chapitre précédent) pour définir des seuils correspondant à des taux de croissance relatif  $\mu_C$  et  $\mu_N$  inférieurs à 1 (pour rappel, 1 représente l'optimum de vitesse

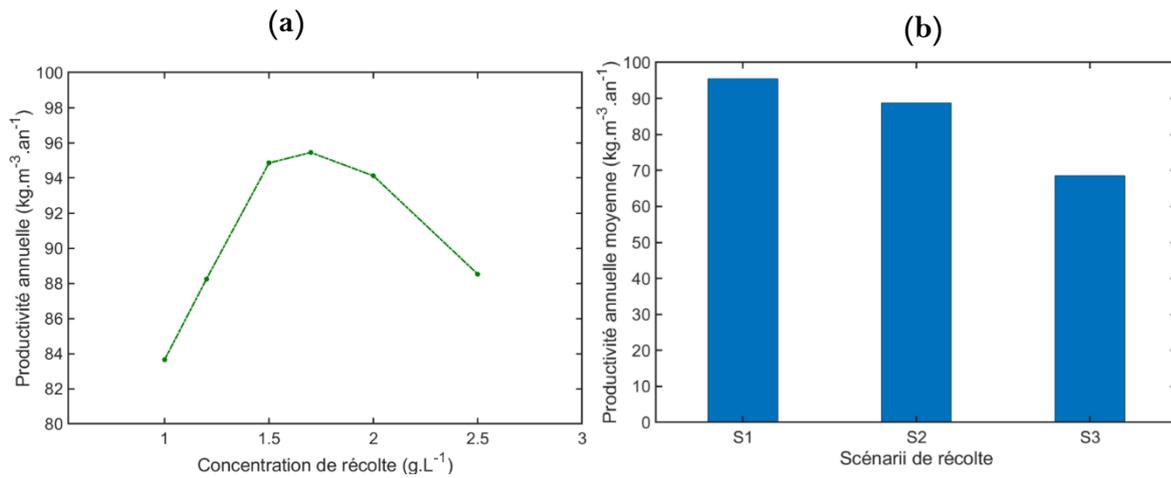
spécifique relative à un nutriment). Lorsque la quantité de ces nutriments atteint ces seuils, la récolte est déclenchée avec un renouvellement du milieu.

Un troisième scénario « **S3** » considère lui un soutirage journalier en fin de journée. Il est testé, car il permettrait d'éviter les pertes de biomasse pendant les cycles nocturnes dues à la respiration.

La *Figure 52-(b)* présente, pour chaque scénario, la productivité annuelle obtenue. Le *Tableau 11* résume les informations obtenues concernant la production annuelle, le nombre de soutirage ainsi que les cycles de renouvellement du milieu de culture pour chaque scénario testé.

Il s'avère que les résultats de productivité soutiennent le mode de fonctionnement « **S1** », où l'opération de récolte est lancée par une concentration consigne de biomasse dans le PBR constante sur toute l'année. Le scénario « **S2** » est également pertinent au vu de la productivité assez proche de celle du S1. Si l'on analyse les données d'un point de vue pratique et des dépenses engendrées, il paraît le plus intéressant car le nombre de cycles de récolte et d'approvisionnement en nutriments est moindre, ce qui permet de réduire les coûts énergétiques liés à la récolte et d'économiser les quantités de nutriment à utiliser, car toute technique de récolte génère une perte en nutriment (même si cette perte n'est pas comptabilisée ici). Quant au « **S3** », il n'est pas surprenant qu'il présente la plus faible des productivités, car en maintenant la durée de la culture constante et égale à une journée, les quantités de biomasse produites restent faibles et varient en continue en fonction des conditions d'ensoleillement du jour, sans atteindre des valeurs optimales pour l'utilisation de la lumière disponible.

Cette étude rapide de scénarii n'a pas pour vocation une optimisation du procédé. Il s'agit d'une simple exploration, à titre démonstratif, des potentialités de quelques éventuelles conditions de fonctionnement pour maximiser la productivité de la Spiruline dans un photobioréacteur tubulaire solaire. Comme alternative d'amélioration des performances du réacteur, nous avons aussi évalué le mode de fonctionnement continu en variant le taux de dilution ( $D$  cf. Eq (16)) néanmoins les résultats n'ont pas été présentés dans ce manuscrit, même s'ils semblaient prometteurs.



**Figure 52 :** Productivités annuelles simulées : (a) en fonction des concentrations en biomasse pour le déclenchement de la récolte ; (b) pour les différents scénarii de récolte pour une culture discontinue de Spiruline.

**Tableau 11 :** Productivités, Nombre de cycles de récolte et de renouvellement du milieu sur une année de culture pour les différents scénarii.

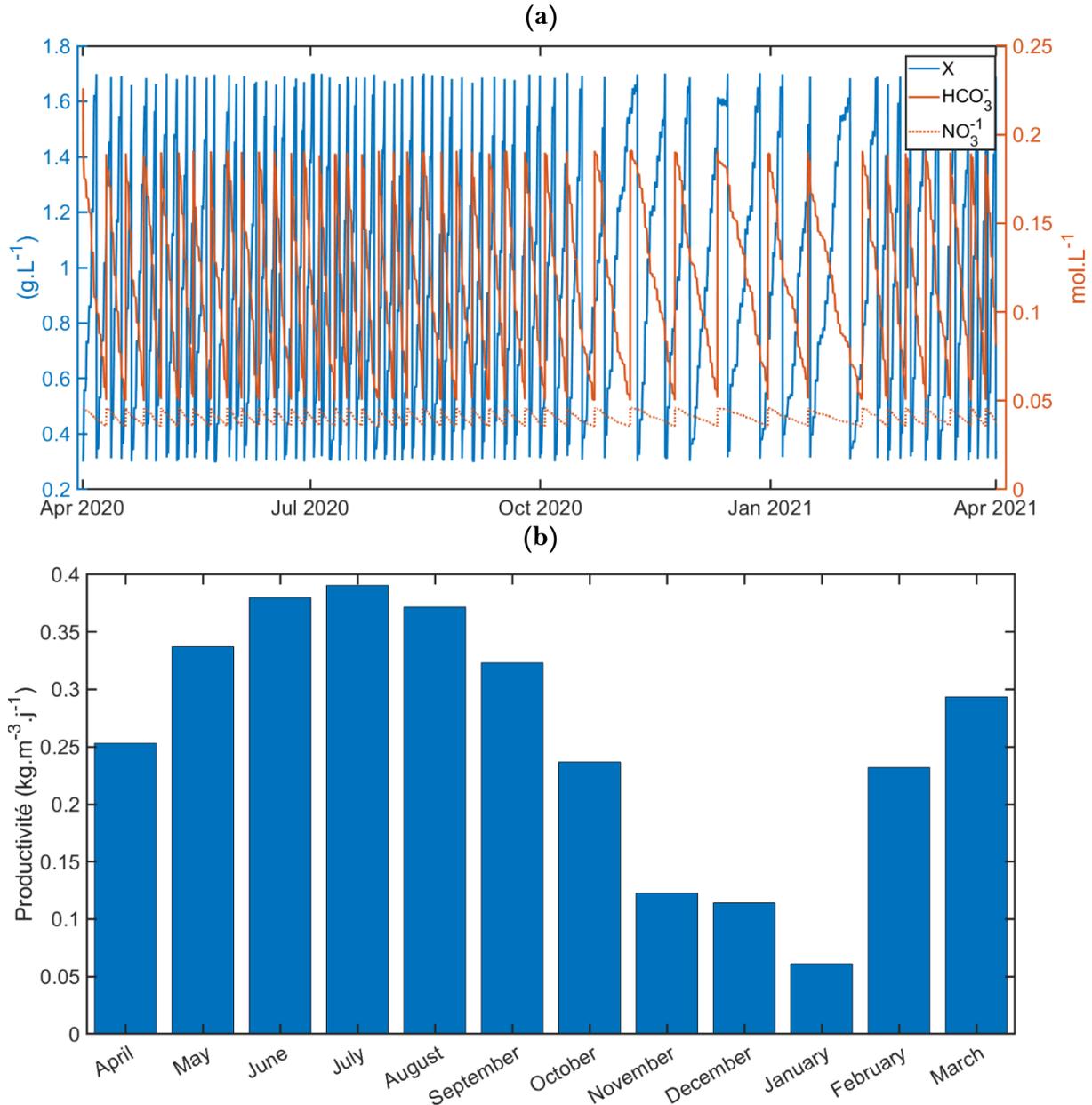
Scénario	Productivités (kg.m <sup>-3</sup> .an <sup>-1</sup> )	Nombre de batch effectué/ an	Nombre d'apport de nutriments
S1	95,45	67	41
S2	88,69	37	37
S3	68,45	365	29

### 2.4.3. Quelques réflexions sur une production annuelle

En considérant une récolte contrôlée par la concentration en biomasse dans le milieu (Scenario S1, i.e.  $X=1,7$  g.L<sup>-1</sup>), les évolutions de cette dernière et des composés nutritifs dans le PBR au cours du temps depuis le lancement jusqu'à la fin d'une année de culture, sont présentés **Figure 53-(a)**. Les cycles de récolte sont moins fréquents en période d'automne et d'hiver, ce qui s'explique par la faible croissance de la Spiruline due aux conditions d'ensoleillement liées à la localisation du site, autrement dit, en raison des faibles irradiances caractérisant ces deux saisons. L'apport de nutriments au milieu n'est pas réalisé immédiatement après la récolte, mais lorsqu'une carence en source de carbone survient. Sur ce même graphique nous remarquons donc que les pics de la courbe représentant l'évolution de la quantité de bicarbonate ne coïncident pas souvent avec les cycles de soutirage. La variation de la concentration de ce substrat est le résultat de la résolution des équilibres chimique (Eq(40)). Les vitesses de consommation des nutriments varient d'un batch à un autre en raison de la variation du taux de croissance globale  $\mu_{croissance}$  qui est à son tour dépendant du taux relatif à la lumière (Eq(45)).

Les performances du PBR ont été exprimées en productivité volumique journalière moyenne pour chaque mois, et présentées sous forme d'histogramme **Figure 53-(b)**. Nous tenons à préciser que le calcul de ces productivités se réfère au nombre de récolte réellement effectuées

chaque mois. En réalité, bien que ces valeurs donnent une bonne estimation technique de la productivité réalisable au cours du temps, elles peuvent apparaître approximatives, car on n'arrête pas forcément la culture en fin du mois.



**Figure 53 :** Évolution de la production de la *Spiruline* simulée au cours du temps. **(a)** Courbe de croissance de la biomasse (courbe bleue continue) et de consommation des nutriments (courbes oranges) en fonction du temps pour une année. **(b)** Histogramme de la productivité sur chaque mois.

Nous remarquons, sans surprise, que les mois de printemps et d'été sont les plus productifs de l'année avec un maximum de 0,38 kg.m<sup>-3</sup>.j<sup>-1</sup> en mois de juillet.

À titre comparatif, nous avons appliqué la solution analytique proposée par *Cornet* et *Dussap*<sup>139</sup> pour l'estimation de la productivité maximale de la biomasse décrite dans le Chapitre I (§

2.1). Pour ce faire, nous avons sélectionné un jour idéal où les conditions d'ensoleillement sont définies comme la limite supérieure du rayonnement utilisable par le PBR à cet endroit (à savoir un jour de ciel clair de juillet à Toulouse). Pour calculer la limite théorique atteignable de la production de biomasse en ce jour par l'eq(8), la moyenne quotidienne de la densité du rayonnement solaire disponible  $\bar{q}$  (i.e. irradiance direct + diffuse) a été utilisée, qui est de  $1159,5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (soit environ  $590 \text{ W.m}^{-2}$ ) ainsi qu'un coefficient de rayonnement diffus moyen  $\bar{x}_d = 0,17$ , un angle moyen de zénith  $\bar{\theta} = 40,39$  et un PBR tubulaire de  $S_{\text{éclairée}}/V = 40$  (si on considère que la surface éclairée est seulement  $\frac{1}{2}$  de la surface totale du tube). Ainsi, nous avons obtenu une productivité théorique maximale de  $0,40 \text{ kg.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$ . Cette valeur est assez proche du maximum des productivités obtenues par nos simulations dynamique pour le même mois (soit  $0,38 \text{ kg.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$  cf. **Figure 53-(b)**).

Le résultat de cette comparaison a permis de mettre en éprouve la fiabilité de nos simulations pour l'estimation de la limite supérieure des productivités réalisables dans un PBR solaire tubulaire, face à une formule générale qui a déjà prouvé sa validité expérimentalement pour des PBRs à éclairage artificiel. Quand bien même l'écart entre les deux valeurs de productivité maximale est relativement faible (en régime permanent Eq(8) *vs* en régime dynamique), il est important de préciser que les deux approches de calcul sont nettement différentes dans leur considération des aspects multiphysiques et dynamiques du procédé. En effet, contrairement à la démarche entreprise dans la présente thèse, la formule Eq(8)<sup>139</sup> a été proposée en supposant que : (1) il n'existe aucune limitation autre que la lumière, (2) il n'y a pas d'effet de respiration pendant les cycles nocturnes, (3) la performance optimale du réacteur est déterminée par la simple connaissance de la lumière captée par la surface du réacteur et son angle d'incidence sans tenir en compte de l'effet des hétérogénéités lumineuse spatiales liées au phénomène de transfert. Or, ces considérations ne sont pas toujours valables pour les cultures solaires et l'utilité de leurs résultats se limite à la performance du PBR dans des conditions de fonctionnement optimales.

À titre indicatif, le **Tableau 12** situe le résultat de nos simulations par rapport aux quelques données expérimentales et de modélisation déjà rapportées dans la littérature (quelques-unes sont déjà présentées dans le **Chapitre I**). Pour pouvoir comparer nos résultats de simulations à ceux de *Slegers et al.*,<sup>107</sup> (étudiant la même configuration de réacteur en France), nous avons exprimé les performances en productivité surfacique (en considérant une surface au sol occupée de  $8,8\text{m}^2$  pour le système tubulaire élémentaire considéré), la valeur obtenue indique une productivité annuelle de  $36,33$  (tonne.  $\text{Ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ). L'écart enregistré entre les deux productivités (soit 48%) peut être expliqué par la différence de la souche utilisée (i.e. caractéristiques biologiques) et l'approche de simulation entreprise. En effet, *Slegers et al.*, ne considèrent que l'influence de l'irradiance sur la croissance en supposant que les autres paramètres sont optimaux.

**Tableau 12** : Données de la littérature sur les performances des PBRs solaires (tubulaires et plat) issue des études expérimentales et de modélisation.

Travail	Espèce	Système de culture	Localisation	Diamètre ou épaisseur (m)	Productivité volumique ou surfacique*
Torzillo et al., <sup>245</sup> (exp)	<i>Spirulina</i>	Tubulaire Horizontal	Italie (Florance)	0,048	0,52 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) maximale en juillet.
Zittelli et al., <sup>118</sup> (exp)	<i>A.platensis</i>	Tubulaire Horizontal	Italie (Florance)	0,05	0,83 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) automne 0,44 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) hiver 0,61 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) printemps
Carlozzi et al., <sup>119</sup> (exp)	<i>Spirulina</i>	Tubulaire Horizontal	Italie (Florance)	0,03	1,19 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) maximale
Cette étude (sim)	<i>A.platensis</i>	Tubulaire Horizontal	France (Toulouse)	0,05	0,38 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) maximale 95,45 (kg.m <sup>-3</sup> .an <sup>-1</sup> ) annuelle
Pruvost et al., <sup>159</sup> (sim)	<i>A.platensis</i>	Plat horizontal	France (Nantes)	0,1	0,05 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) théorique maximale
Acien Fernandez et al., <sup>260</sup> (sim)	<i>P. tricornutum</i>	Tubulaire	Espagne (Almería)	0,06	1,5 (g.L <sup>-1</sup> .j <sup>-1</sup> ) moyenne annuelle
Slegers et al., <sup>107</sup> (sim)	<i>P. tricornutum</i>	Tubulaire horizontal	Pays-Bas France Algérie	0,06	46,3 (tonne.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )* 71,2 (tonne.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )* 96,8 (tonne.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )*

\* productivité surfacique exprimée en tonne de production de biomasse sèche par hectare de surface au sol par an.

sim : donnée de simulation

exp : donnée expérimentale

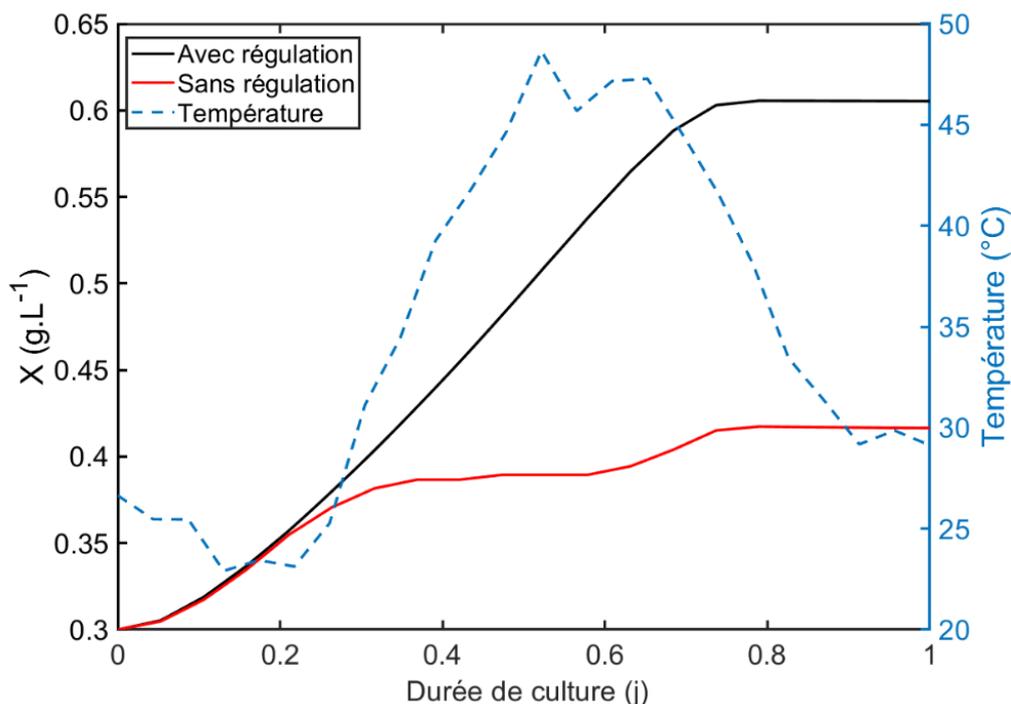
### 3. Conclusion

Désormais, nous disposons d'un outil de modélisation multi-échelles capable de prédire la croissance biologique en s'appuyant sur : (i) un modèle biologique pour décrire l'influence de l'éclairement en considérant le comportement dynamique des cellules aux variations spatiales et temporelles de la lumière perçue, (ii) des modèles cinétiques pour les interactions entre la biomasse et son milieu de culture, l'influence de la consommation des nutriments et de la température ; (ii) des bilans de matières considérant les équilibres chimiques entre les différentes formes des espèce carbonées et les phénomènes de transfert

gaz-liquide. Ce modèle permet de lier ces échelles chimiques et biologiques à l'échelle du procédé, en prenant compte l'effet des paramètres opératoires et d'ensoleillement, notamment, la vitesse de circulation du milieu et le caractère spécifique de la lumière solaire en termes de rayonnement incident direct et diffus.

Cet outil offre la possibilité de simuler le fonctionnement dynamique et la conduite d'un photobioréacteur tubulaire (PBR) pour une culture de Spiruline (*Arthrospira Platensis*) en conditions solaires. Les résultats indiquent que la meilleure productivité ( $95,45 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{an}^{-1}$ ) est obtenue lorsqu'une récolte est réalisée à une concentration de  $1,7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Cependant, il n'est pas trivial de déterminer une concentration de biomasse optimale de récolte permettant une productivité maximale sur toutes les périodes l'année car les conditions d'ensoleillement sont très variables.

Toutefois, en plus de l'irradiance solaire, la température est un des facteurs limitant les processus de production de microalgues en extérieur sur lesquels il convient de se pencher. Il est donc important d'inclure ce paramètre dans l'analyse des résultats de productivité en se basant sur la combinaison du modèle de croissance de biomasse et l'évolution de la température de la culture. La **Figure 54** illustre l'impact de ce paramètre en comparant deux cultures, une à température régulée, et l'autre à la température extérieure réellement mesurée sur le lieu de culture. Rien qu'au bout d'une journée de culture à partir des conditions initiales déjà utilisées dans ce chapitre, on peut mesurer un écart conséquent de concentration de biomasse. Notre objectif dans le chapitre suivant sera donc d'évaluer les transferts thermiques dans différentes situations afin de prédire d'une part la production de biomasse, mais également de calculer les quantités d'énergie nécessaires dans plusieurs scénarii de contrôle thermique, pour réchauffer et refroidir le PBR.



**Figure 54 :** Simulation de l'effet de la variation de la température sur la croissance de la Spiruline.

# CHAPITRE IV

*Étude de la dynamique  
thermique du PBR solaire*



## IV. Étude de la dynamique thermique du PBR solaire

Dans certains cas de culture de microalgues, la température est connue comme un problème majeur d'ingénierie, car son contrôle nécessite l'utilisation de solutions de chauffage et de refroidissement basées sur des échangeurs de chaleur, des chaudières externes ou souvent une immersion directe dans des piscines <sup>294</sup>. Ces solutions engendrent habituellement des coûts d'exploitation élevés <sup>11</sup>.

Ainsi, il est important de suivre l'évolution de la température de la culture dans les PBRs en disposant de modèles dynamiques répondant aux données météorologiques, qui puissent être utilisés comme des outils de conception du réacteur ou pour la sélection de la souche à cultiver en fonction de l'emplacement du réacteur et de la marge des températures appropriées pour les besoins biologiques.

Nous avons vu dans le chapitre I que les microalgues et cyanobactéries utilisent plus de 95% de l'énergie lumineuse reçue comme source de chaleur pour leur activité biochimique. Cela sous-entend que généralement l'activité photosynthétique s'effectue avec une efficacité thermodynamique de moins de 5 % sur la région du PAR <sup>295,296</sup>. En dehors de cette gamme, les plus grandes longueurs d'onde du spectre solaire, à savoir l'infrarouge ( $> 0,7 \mu\text{m}$ ), contribuent majoritairement au chauffage de la culture en augmentant la température, en particulier dans les PBRs fermés.

Le comportement thermique des PBRs solaires a été évalué dans plusieurs études expérimentales ou de modélisation. Pour les PBRs ouverts (raceways), qui souffrent souvent de l'évaporation sous forte radiation solaire provoquant des pertes d'eau jusqu'à  $32 \text{ cm.mois}^{-1}$  <sup>297</sup> et  $10\text{--}20 \text{ L.m}^{-2}$  de culture <sup>298</sup>, des modèles dynamiques de température de culture considérant les différents phénomènes de transfert thermique, entre autre l'évaporation, ont été proposés, et certains ont été validés expérimentalement <sup>298–304</sup>. Cependant, pour les PBRs fermés extérieurs, où la température du milieu est généralement contrôlée, il y a moins d'études décrivant leurs profils thermiques. Par ailleurs, nous notons que *Béchet et al.*, <sup>305</sup> étaient les premiers à proposer un modèle entièrement mécaniste, pour un PBR isolé à colonne pneumatique situé à Singapour, en fonction des paramètres météorologiques (i.e. irradiation lumineuse, température de l'air, vitesse du vent). Ils ont validé leurs résultats expérimentalement pour quelques jours de culture avant de les utiliser pour quantifier les demandes de refroidissement pour les différentes saisons. *Goetz et al.*, <sup>306</sup> ont utilisé la modélisation thermique d'un PBR plat horizontal à Saint-Nazaire pour prédire les régimes de température dans le système de culture et ainsi déterminer l'évolution de la consommation d'énergie nécessaire pour maintenir la température du système de culture dans la gamme des besoins des microalgues. De la même manière, *Endres et al.*, <sup>307</sup> ont développé un modèle de température pour une rangée de PBRs en considérant l'effet d'ombrage et de réflexion entre les différents réacteurs. La simulation a été effectuée pour une année de culture à différentes zones géographiques afin d'estimer la productivité des microalgues cultivées dans une installation extérieure de taille industrielle de PBRs à panneau plat vertical. Le comportement thermique d'un PBR tubulaire (annulaire) avec un refroidissement interne a été étudié <sup>308</sup> pour

estimer les coûts énergétiques effectifs de production d'hydrogène. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux sur la simulation de la dynamique thermique d'un PBR tubulaire horizontal solaire en réponse aux conditions extérieures.

L'objectif de cette étude est la simulation de la température dans une culture fonctionnant sur une année entière pour un site exemplaire à Toulouse, en France, de coordonnées géographiques (43° 35' 59.99", 1° 25' 59.99"). Le but est, d'une part, d'étudier le comportement de notre système sans régulation de température avec une ambition de sonder un mode de gestion thermique, à savoir l'utilisation d'une serre, et d'autre part, d'estimer les besoins en énergie à fournir pour envisager une culture annuelle sous conditions optimales. Cette analyse débouche sur la détermination des hotspots de consommation énergétique en cas de contrôle de température. Notre étude porte sur la cyanobactérie *Arthrospira platensis* (alias *Spirulina*) qui a une température optimale de croissance qui s'entend sur la gamme de 23°C à 37°C<sup>39</sup>.

Le présent chapitre comporte différentes sections. Dans un premier temps, l'approche de modélisation thermique entreprise est détaillée en présentant dans la partie § 1 les principes et les hypothèses et dans la partie § 2 la formulation mathématique des différents bilans de chaleur pour deux scénarii, à savoir le PBR extérieur et le PBR sous serre. Ensuite la troisième section (§3) synthétise les résultats obtenus pour les deux configurations étudiées (§ 3.1 et 3.2), ce qui permet au final de comprendre qu'une régulation thermique est indispensable. C'est ainsi que nous concluons cette section sur la démarche de contrôle de température et l'évaluation des demandes énergétiques associées dans le cas d'un PBR extérieur (§3.3)

## 1. Principes et hypothèses de la modélisation thermique mise en œuvre

En se basant sur l'état de l'art assez pauvre à ce sujet (peu d'études sont rapportées dans la littérature <sup>309</sup>), et le besoin de prévoir une configuration optimale (du point de vue de la productivité, consommation énergétique et impacts environnementaux), un modèle est développé et implémenté en code de calcul, pour représenter la dynamique thermique d'un PBR solaire tubulaire. Bien qu'un seul photobioacteur soit étudié ici comme un cas modèle, tous les effets dynamiques de la course du soleil par rapport à l'orientation et la géométrie du système ont été considérés.

Deux cas de figure ont été étudiés pour la même géométrie de PBR. Le premier consiste à étudier un PBR exposé directement aux conditions extérieures. Le second étudie le même PBR mis sous serre, comme piste de stratégie de régulation et de gestion thermique. L'étude de ces deux configurations en parallèle fait l'objet de ce chapitre.

Pour le PBR :

Nous rappelons que le PBR est de géométrie cylindrique positionné à l'horizontale, orienté Nord-Sud, avec un milieu de culture qui est en circulation continue (à vitesse constante) en boucle fermée. Le diamètre et la longueur de la partie tubulaire du PBR étudiée sont respectivement 0,05 m et 120 m respectivement (soit un volume de 0,235 m<sup>3</sup>). Le PBR est positionné à une hauteur de 5 cm par rapport au sol pour éviter la formation de saleté entre le tube par les précipitations.

Un certain nombre de considérations et hypothèses ont été émises pour réduire la complexité de la modélisation :

1. Le réacteur est bien mélangé et le temps de résidence du liquide dans le tube < 5min est plus petit que les variations temporaires de température considérées. Par conséquent, la température du milieu de culture est uniforme dans le volume du réacteur (il n'y a pas de gradient radial ni axial de la température dans le tube) ;
2. Les conditions extérieures, selon l'axe du tube, sont invariantes ;
3. Les propriétés thermo-physiques intrinsèques du milieu de culture à savoir la masse volumique, la capacité calorifique, la viscosité dynamique et la conductivité sont considérées égales à celles de l'eau à température et pression standards ;
4. Seule la surface latérale du tube est considérée pour le calcul des flux de chaleur du PBR, justifié par la valeur de son diamètre petite par rapport sa longueur ;
5. L'évaporation du sol et l'humidité de l'air ne sont pas prises en compte, ce qui est une simplification importante ;
6. L'émissivité thermique de la paroi du PBR est négligée, et les radiations thermiques atteignant la paroi sont transmises ( $\tau_p$ ) et absorbées ( $\epsilon_e$ ) par le milieu de culture ;
7. La conduction à travers la paroi du réacteur est négligée (ce point sera validé dans la section 2) ;
8. Tous les compartiments étudiés sont considérés comme des corps gris diffus (i.e. le milieu de culture et le sol, et la couverture de la serre), selon la loi de rayonnement de *Kirchhoff*, leurs flux d'émission et d'absorption dans l'infrarouge sont égaux ( $\alpha = \epsilon$ ) ;
9. Les propriétés radiatives des surfaces qui rayonnent (dans l'infrarouge) ne dépendent pas de la longueur d'onde ni de l'angle du rayonnement ;

de plus, pour la serre :

10. La serre est de configuration parallélépipède avec un toit plat horizontal, orientée Nord-Sud et sans végétation ;
11. La température des surfaces voisines (sol, couverture de la serre, air ambiant, etc..) est uniforme ;
12. La conduction à travers la paroi et la couverture de la serre est négligée (ce point sera validé dans la section 2) ;
13. L'énergie de la radiation thermique n'est ni absorbée ni émise par l'air à l'intérieur de la serre ;
14. La distribution de température dans la serre est homogène ;
15. L'air à l'intérieur est brassé et peut être échangé à fréquence  $N$  ( $h^{-1}$ ) ;
16. La couverture de la serre sont considérées comme un seul élément avec des propriétés thermo-physiques homogènes ;
17. Les effets d'ombrage de la structure de la serre ne sont pas considérés.

Toutes les réflexions notables par le sol ont été considérées avec l'introduction d'un modèle de sol multicouche permettant un calcul rigoureux de son échange thermique avec son environnement. Les effets de l'ombrage par le voisinage sont négligés. Les propriétés radiatives et thermo-physiques des différents composants étudiés sont présentées dans le **Tableau 17** (dans §2.7).

Pour les différents calculs et simulations, les données météorologiques et d'irradiance solaire sont obtenues à l'aide de la visionneuse NSRDB, une base de données américaine (The National Solar Radiation Database) ("[NSRDB Data Viewer](#), "2020), qui est une collection de valeurs horaires de mesures satellites du rayonnement solaire global horizontal, direct normal et diffus horizontal, et d'autres données météorologiques. Cet outil est géré et mis à jour par une équipe spécialisée de prévisionnistes du National Renewable Energy Laboratory (NREL). D'autres bases de données météorologiques et de radiation solaire moyenne journalière peuvent être extraites depuis la visionneuse de données de la NASA ("[NASA POWER | Data Access Viewer](#),"), ou depuis les stations météorologiques les plus proches du site étudié, notamment celle de Toulouse-Blagnac <sup>312</sup>.

Les données météorologiques, qui constituent les entrées du modèle, sont représentées par :

- La date, l'heure solaire, la localisation ;
- L'irradiance solaire totale horizontale ( $W.m^{-2}$ ) ;
- Le coefficient de la radiation solaire diffuse ;
- La température de l'air extérieure à 2 m ( $^{\circ}C$ ) ;
- La vitesse du vent à 10 m ( $m.s^{-1}$ ) ;
- La direction du vent ( $^{\circ}$ ) par rapport au sud ;
- La température apparente de rayonnement de la voûte céleste (calculée en K) ;
- La température du point de rosée ( $^{\circ}C$ ).

Toute autre localisation peut être testée par notre simulateur, mais nos résultats peuvent être transposés à d'autres régions dans le monde ayant un climat comparable à celui étudié ici. Une liste exhaustive de tous les termes et abréviations utilisés dans ce chapitre est présentée dans le [Glossaire](#).



## 2. Formulation mathématique des bilans thermiques

Dans cette section nous visons à instaurer un modèle thermique pour les deux systèmes étudiés. Les bilans thermiques décrits ici s'écrivent en se basant sur les différents flux énergétiques dus aux mécanismes de transfert de chaleur considérés qui affectent le système à savoir l'irradiance solaire, la convection, la conduction, le rayonnement (en d'autres termes la radiation thermique en infrarouge).

### 2.1. La conduction dans les parois du PBR et de la serre

Avant la mise en place des modèles thermiques, nous avons effectué une pré-analyse simplifiée pour positionner en termes de pertinence les flux de chaleur considérés dans notre étude. En effet, nous avons assumé préalablement que les parois du PBR et de la serre se comportent comme des systèmes minces sans inertie. Cela nous amène à négliger le flux relatif à la conduction dans ces deux compartiments. Néanmoins, il serait plus avisé de valider cette prémisse par un examen de la résistance thermique de chaque paroi.

Nous avons choisi de comparer les résistances thermiques  $R_{th}$  (exprimée en  $K.W^{-1}$ ), correspondantes aux transferts par conduction liés à chaque paroi (PBR et serre). Les deux parois sont entourées de fluides de part et d'autre, les phénomènes de convection se produisent sur chacune de ces faces et un phénomène de conduction est responsable du transfert thermique à travers la paroi.

La résistance thermique de conduction d'une surface cylindrique (qui est la géométrie de notre PBR) est donnée par :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S} = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \quad (90)$$

Où  $R_1, R_2, e, S, L, \lambda$  sont les rayons interne et externe du cylindre, l'épaisseur de la surface, l'aire de la surface, la longueur de la surface et la conductivité thermique du matériau respectivement.

Pour une plaque plane la notion de résistance thermique surfacique peut être utilisée, elle est exprimée en ( $K.m^{-2}.W^{-1}$ ):

$$r_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (91)$$

La résistance thermique liée à la convection est exprimée en fonction du coefficient de convection thermique  $h$  :

$$R_{cv} = \frac{1}{h \cdot S} \quad (92)$$

Pareillement, ici la résistance thermique surfacique de convection est simplement :

$$r_{cv} = \frac{1}{h} \quad (93)$$

Ainsi, nous avons fait les calculs pour des épaisseurs de surfaces de 4 mm pour la paroi du PBR et de la serre et pour un cylindre de longueur de 120 m. À titre comparatif, le tableau ci-après résume les valeurs de chaque résistance pour les surfaces respectives, calculées pour un coefficient annuel moyen de convection forcée de l'air extérieur, des coefficients de convection interne constants (i.e. pour le fluide dans le cylindre et pour l'air à l'intérieur de la serre) et en fonction des conductivités présentées dans le **Tableau 17** plus loin. Pour la couverture de la serre, c'est la résistance thermique surfacique qui est considérée, car il s'agit d'une surface plane où la longueur et la largeur sont nettement plus importantes que l'épaisseur.

**Tableau 13** : Résistances thermiques pour la surface du PBR et la couverture de la serre

Surface	Résistance thermique de conduction	Résistance thermique de convection externe	Résistance thermique de convection interne	Résistance thermique en série
PBR extérieur (K.W <sup>-1</sup> )	1,48·10 <sup>-4</sup>	2,8·10 <sup>-3</sup>	3,76·10 <sup>-5</sup>	2,9·10 <sup>-3</sup>
Couverture de la serre (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	2,9·10 <sup>-3</sup>	9,75·10 <sup>-2</sup>	3,21·10 <sup>-1</sup>	4,22·10 <sup>-1</sup>
PBR dans la serre (K.W <sup>-1</sup> )	1,48·10 <sup>-4</sup>	2,95·10 <sup>-1</sup>	3,76·10 <sup>-5</sup>	2,95·10 <sup>-1</sup>

La résistance thermique en série correspond à la résistance globale qui est la somme de toutes les résistances associées aux phénomènes de transfert de chaleur atteignant la surface du système. À la lecture de ces valeurs, nous constatons clairement que la résistance de conduction est au moins 10 fois plus faible que celle de la convection extérieure, et nous pouvons valider l'hypothèse que la résistance thermique de conduction de la paroi de la serre et celle du PBR peuvent être négligées. Ce résultat permet de nous affranchir de la conduction dans nos modèles thermiques et de considérer donc que la température des parois de part et d'autre est identique. De plus, au-delà des simplifications déjà énoncées, la deuxième constatation que l'on peut faire à la lumière du **Tableau 13** est que la résistance liée à la convection du liquide dans le PBR est négligeable comparée à la résistance globale. Ce qui indique que le transfert est très rapide entre la paroi et le milieu de culture. De ce fait, nous admettons désormais que les températures du milieu et la paroi sont égales et nous nous libérons de la convection interne dans le PBR. D'autres hypothèses simplificatrices spécifiques à chaque situation seront validées par la suite.

En amont de toute présentation des bilans et des expressions des flux qui les constituent, nous désirons mettre un accent particulier sur l'échange par convection de l'air dont la contribution au comportement thermique de la culture dans les deux cas étudiés est fondamentale.

## 2.2. Transfert thermique par convection de l'air à une paroi

Le transfert thermique par convection fait référence au transfert de chaleur entre la surface d'un corps (généralement solide) et le fluide (gaz ou liquide) qui entre en contact avec sa surface. En réalité, la convection est une combinaison de deux phénomènes physiques, à savoir la conduction thermique et le renouvellement du fluide près de la paroi ou transfert de masse. Le transfert de chaleur par convection entre une surface et un fluide qui l'entoure s'exprime par la relation dite « *loi de refroidissement de Newton* » donnée par *Newton* <sup>313</sup>. Elle stipule que le taux de décroissance de la température d'un corps chaud homogène immergé dans un fluide froid homogène est à tout instant proportionnel à la différence de température entre eux (donné par l'Eq (94)) :

$$Q = h \cdot \Delta T \quad (94)$$

Avec  $h$  le coefficient de transfert convectif moyen et  $\Delta T = (T_s - T_\infty)$  la différence de température entre la surface et le fluide respectivement, à un endroit éloigné de la surface.

La convection de chaleur est couplée au transfert de masse dans un écoulement par conséquent l'estimation du coefficient  $h$  requiert la résolution des équations de conservation de la masse, la quantité de mouvement et de l'énergie au voisinage de la surface solide. Du fait de l'immobilité du fluide à la sous-couche proche de la surface (vitesse nulle), le transfert de chaleur se fait d'abord par conduction pure et peut donc être exprimé selon *la loi de Fourier* (i.e. le taux de conduction) <sup>314,315</sup> à l'interface. La combinaison de cette loi avec la *loi de refroidissement de Newton* permet de relier le coefficient d'échange par convection et le gradient de température dans le fluide et la paroi :

$$h = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\lambda \left( \frac{\delta T}{\delta y} \Big|_{y=0} \right)}{\Delta T} \quad (95)$$

Néanmoins, pour une formulation plus simple le coefficient de convection  $h$  moyen peut-être exprimé comme suit :

$$\bar{h} = \overline{Nu}_L \cdot \lambda_\infty / L \quad (96)$$

Où  $\overline{Nu}_L$  est le nombre de Nusselt moyen (qui est par définition le ratio du transfert par convection au transfert par conduction pure),  $\lambda_\infty$  est la conductivité thermique du fluide et  $L$  la longueur caractéristique de la surface considérée.

Le transfert de chaleur par convection est fortement lié à l'écoulement du fluide et aux géométries et états de surface du solide, il est généralement classé en deux catégories : convection libre (ou naturelle) et convection forcée. On parle de convection libre quand le mouvement du fluide est dû à des différences de densité, et de convection forcée quand le mouvement du fluide est forcé en l'absence de différence de densité.

Quand la convection est naturelle, le Nusselt  $Nu$  s'écrit en fonction du nombre de Grashof  $Gr$  et du nombre de Prandtl  $Pr$ , alors qu'en convection forcée le  $Nu$  est calculé en fonction des Nombres de Reynolds  $Re$  et de Prandtl  $Pr$ . Le **Tableau 14** énumère les nombres adimensionnels qui apparaissent fréquemment dans le transfert de chaleur en général et dans notre étude en particulier.

**Tableau 14** : Nombres adimensionnels utilisés pour le transfert de chaleur.

Nombre	Formule	Définition des termes
Grashof ( $Gr$ )	$\beta \cdot L^3 \cdot g \cdot (T_s - T_\infty) / \nu_{\infty m}^2$	$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique volumétrique du fluide ( $K^{-1}$ ) $g$ : Accélération due à la pesanteur ( $m \cdot s^{-2}$ ) $\nu_{\infty m}$ : Viscosité cinématique du fluide évaluée à la température moyenne de la surface et du fluide ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
Nusselt ( $Nu$ )	$h \cdot \lambda_\infty / L$	$\lambda_\infty$ : Conductivité thermique du fluide ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ )
Rayleigh ( $Ra$ )	$Gr \cdot Pr = \beta \cdot L^3 \cdot g \cdot \frac{T_s - T_\infty}{\nu_{\infty m} \cdot \alpha}$	$Pr$ : Nombre de Prandtl
Reynolds ( $Re$ )	$V_\infty \cdot L / \nu_\infty$	$V_\infty$ : Vitesse du fluide ( $m \cdot s^{-1}$ ) $\nu_\infty$ : Viscosité cinématique du fluide évaluée à la température du fluide ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
Prandtl ( $Pr$ )	$C_p \cdot \mu / \lambda$	$C_p$ : Capacité calorifique massique ( $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ ) $\mu$ : Viscosité dynamique ( $Pa \cdot s$ ) $\lambda$ : Conductivité thermique ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ )

\*Toutes les propriétés physiques du fluide sont évaluées à la température moyenne, sauf la viscosité dynamique qui doit être évaluée à la température de la paroi.

### 2.2.1. Convection naturelle

Lorsque la convection libre a lieu, le mouvement du fluide est dû aux différences de densité en son sein. Ces différences peuvent résulter de gradients de température, de concentration ou de composition <sup>314</sup>. Ici nous nous intéressons au transfert de chaleur associé à la convection naturelle entraînée par des gradients de température dans un fluide newtonien. Il existe une multitude de corrélations empiriques plus ou moins complexes permettant d'évaluer le transfert de chaleur par convection naturelle à partir des surfaces externes de corps de formes diverses confrontées dans l'ingénierie <sup>314-316</sup>. L'avantage de ces équations est qu'elles sont faciles à programmer dans les codes informatiques utilisés pour la conception et les études thermiques. Ces corrélations sont établies en termes de  $Nu$ ,  $Ra$  et  $Pr$ , des paramètres qui impliquent des propriétés physiques, une échelle de longueur caractéristique et une différence de températures de référence. Le **Tableau 15** résume les corrélations du  $\overline{Nu}$  pour les configurations d'intérêt traitées dans notre étude et qui sont extensivement étudiées dans la littérature.

**Tableau 15 :** Sélection des corrélations empiriques de  $\overline{Nu}_L$  pour des configurations et géométries de surface immergées dans un flux externe correspondantes à notre études <sup>315</sup>.

Géométrie	Formule de $\overline{Nu}_L$	Longueur caractéristique $L$
Plaque plane verticale	$\left\{0,825 + \frac{0,387 \cdot (Ra_L)^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$ (97)	Hauteur de la plaque
Cylindre horizontal long	$\left\{0,60 + \frac{0,387 \cdot (Ra_D)^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$ (98)	Diamètre du cylindre
Plaque horizontale : Surface supérieure chaude ou surface inférieure froide	$\begin{aligned} &0,54 \cdot (Ra_L)^{1/4} \\ &(10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, Pr \geq 0.7) \\ &0,15 \cdot (Ra_L)^{1/3} \\ &(10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, tout Pr) \end{aligned}$ (99)	$\frac{\text{Aire de surface}}{\text{périmètre}}$
Plaque horizontale : Surface supérieure froide ou surface inférieure chaude	$\begin{aligned} &0,52 \cdot (Ra_L)^{1/5} \\ &(10^4 \leq Ra_L \leq 10^9, Pr \geq 0.7) \end{aligned}$ (100)	$\frac{\text{Aire de surface}}{\text{périmètre}}$

Plusieurs corrélations supplémentaires peuvent être trouvées dans la littérature selon le cas investigué.

### 2.2.2. Convection forcée

Si le mouvement du fluide est induit par le vent, une pompe, un ventilateur ou un dispositif similaire, la convection est dite forcée. Les formules pour l'évaluation des taux de transfert de chaleur par convection sont généralement établies par une combinaison d'analyse théorique et expérimentale. Ici, de nouveau, il convient de distinguer la convection forcée par les flux internes, de la convection forcée par les flux externes, selon la géométrie.

#### a) Écoulement interne dans un tube cylindrique

Dans le transfert par convection forcée dans un flux interne (ou milieu confiné), les corrélations et les données expérimentales pour le Nombre de  $Nu$  sont fournies en fonction de la géométrie des conduits et du régime d'écoulement <sup>314,317</sup>. Une attention particulière doit être portée quant au choix de la corrélation du coefficient d'échange ou du nombre de  $Nu$  appropriée pour le cas étudié. Dans ce travail, le champ d'application est limité à l'étude de l'écoulement incompressible et régulier d'un fluides newtonien (i.e. eau) dans un tube cylindrique en régime turbulent. La longueur caractéristique est le diamètre hydraulique  $D_h$  à savoir ici le diamètre du tube  $D$ . Les effets de la convection naturelle, de changements de phase, du transfert de masse et des réactions chimiques ou biologiques ont été ignorés. Le nombre de  $\overline{Nu}_D$  pour la convection à l'intérieur d'un tube est donné alors par <sup>315</sup> :

$$\overline{Nu}_D = 0.023 \cdot Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n \quad \begin{cases} n = 0.4 \text{ pour } T_s > T_\infty \\ n = 0.3 \text{ pour } T_s < T_\infty \end{cases} \quad (101)$$

$T_s$  et  $T_\infty$  sont les températures de la surface et le fluide respectivement.

### b) Surface plane horizontale ou verticale dans un écoulement externe

Les flux de pertes thermiques par convection externe traités ici, sont dus au vent. Les surfaces solides sujettes à ce type de transfert peuvent être de géométries tubulaire (le tube du PBR) ou plane horizontale et verticale (représentant le sol, les parois et le toit de la serre).

Il a été rapporté <sup>318</sup> un certain nombre de corrélations empiriques et semi-empiriques, pour déterminer le coefficient de pertes thermiques par convection dues au vent  $h_w$  pour une surface plane d'un capteur solaire. Ces corrélations sont explicites en  $v_w$  et  $L$ , elles ont généralement la forme de  $h_w = a(v_w)^b/L^c$  c'est-à-dire que ce coefficient est corrélé avec la vitesse du vent  $v_w$  (m.s<sup>-1</sup>) à une puissance  $b$ , et décroît le long de la surface  $L$  (m) dans la direction du vent. On retrouve aussi des équations algébriques ayant pour forme  $h_w = a + b(v_w)^n$  proposées initialement par *Jürges* <sup>319</sup> et qui ont été largement appliquées pour le calcul de ce coefficient pour des surfaces planes horizontales ou verticales avec différentes valeurs des constantes empiriques  $a, b$  et  $n$ . Ces dernières dépendent de la situation sous laquelle ces corrélations sont produites <sup>317,320,321</sup>. Il n'est pas question ici de passer en revue toutes les équations empiriques existantes, car cette procédure a été déjà adoptée dans une étude comparative exhaustive <sup>318</sup> qui nous a servi de guide pour la sélection de la corrélation la plus convenable. En effet, notre choix s'est porté sur les équations issues de la théorie de la couche limite qui prennent en compte le régime d'écoulement (laminaire, transitoire et turbulent) ainsi que la direction du vent, car ces expressions ont prouvé leur concordance avec différents résultats expérimentaux. Pour une surface horizontale isotherme, le coefficient d'échange par convection du vent peut être estimé soit à partir du nombre de  $\overline{Nu}_L$  calculé par :

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_L &= 0,664 \cdot Re_L^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{pour } Re_L \leq 5.10^5 \text{ et } Pr \geq 0.6 \\ \overline{Nu}_L &= 0,0369 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{pour } Re_L \geq 10^8 \text{ et } 60 \geq Pr \geq 0.6 \end{aligned} \quad (102)$$

soit directement en fonction de la vitesse du vent  $v_w$  et la longueur de la surface  $L$  comme suit :

$$\begin{aligned} h_w &= 3,83 \cdot (v_w)^{\frac{1}{2}} \cdot L^{-\frac{1}{2}} \quad \text{pour } Re_L \leq 5.10^5 \\ h_w &= 5.74 \cdot (v_w)^{\frac{4}{5}} \cdot L^{-\frac{1}{5}} \quad \text{pour } Re_L \geq 10^8 \\ h_w &= 5.74 \cdot (v_w)^{\frac{1}{2}} \cdot L^{-\frac{1}{2}} - 16.46 \cdot L^{-1} \quad \text{pour } 5.10^5 \leq Re_L \leq 10^8 \end{aligned} \quad (103)$$

Ces corrélations qui ont été générées pour un flux d'air parallèle à la surface de la plaque (horizontale), à savoir un angle d'attaque du vent nul, ont été jugées valables pour les différentes orientations et angles d'inclinaison par rapport au flux d'air. Cependant, des expériences ont été menées <sup>322</sup> sur des surfaces avec différents angle d'inclinaison afin

d'examiner la validité de l'équation la plus couramment utilisée pour prédire ce coefficient de convection forcée. Ils ont conclu que les pertes de chaleur par convection varient avec l'angle d'arrivée du vent. Pour les mêmes raisons, des études numériques ont été réalisées <sup>323</sup> sur l'effet de l'angle d'attaque ou de l'inclinaison de la surface plane (d'un collecteur solaire) sur le coefficient de convection. Les auteurs ont proposé un facteur qui représente le rapport du nombre de Nusselt moyen sur une surface plane inclinée à celui sur une surface plane horizontale, qui s'écrit en fonction de l'angle d'attaque du flux d'air selon l'inclinaison de la surface. Néanmoins, leur corrélation est restreinte à la convection forcée à un flux laminaire et la direction du vent n'était pas considérée, à notre connaissance.

Cette problématique a été précédemment soulevée dans le domaine du bâtiment pour un objectif d'améliorer l'évaluation des échanges thermiques convectifs entre l'air extérieur et les surfaces murales. Des simulations à l'aide de la CFD ont été effectuées <sup>324</sup> pour prédire le coefficient de transfert convectif sur les murs verticaux et le toit d'un bâtiment. Les effets de la vitesse du vent  $v_w$ , sa direction par rapport à la surface, et la différence de températures surface-air ont été étudiés. Les résultats des calculs de dynamique des fluides numériques indiquent que la différence de température n'a pas d'effet, et fournissent des corrélations de ce coefficient en fonction de la vitesse du vent pour différents angles vent-surface (entre le vent et la normale de la surface) pour les murs verticaux au/sous vent et le toit, reportées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 16:** Corrélations du coefficient de transfert de chaleur convective obtenues pour une vitesse du vent de 1 à 15 ( $m.s^{-1}$ ) et une différence de température surface-air de 10 °C pour les murs verticaux au vent et verticaux sous vent <sup>324</sup>.

Murs	Angle direction du vent	Équation ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
Vertical au vent	0°	$h_w = 5,15 \cdot (v_w)^{0,81}$
	±45	$h_w = 3,34 \cdot (v_w)^{0,84}$
	±90	$h_w = 4,78 \cdot (v_w)^{0,71}$
Vertical sous vent	±135	$h_w = 4,05 \cdot (v_w)^{0,77}$
	±180	$h_w = 3,54 \cdot v^{0,76}$

Tout comme les surfaces horizontales, il est à noter qu'il existe une diversité de formules empiriques ou issues d'analyse numérique pour prédire le coefficient convectif dû au vent pour les murs verticaux face ou sous le vent, certaines peuvent être trouvées dans la littérature <sup>325</sup> pour n'en citer que quelques-unes.

L'estimation des pertes thermiques, par convection externe, qui contribue a posteriori à l'évaluation des demandes énergétiques, est très sensible au choix du coefficient de transfert, il convient alors de prêter plus attention aux corrélations utilisées pour la prédiction *la plus correcte* de ce coefficient. En effet, du fait de la géométrie de la serre considérée dans notre étude et sa configuration proche de celle des murs d'un bâtiment exposés au vent dans diverses directions, les équations présentées dans le **Tableau 16**, sont retenues.

### c) Cylindre dans un écoulement externe

Un autre écoulement externe implique le mouvement du flux d'air perpendiculairement à l'axe d'un cylindre circulaire. Pour ce cas de figure, une seule équation complète a été proposée <sup>326</sup> pour le nombre  $\overline{Nu}_{D,N}$  qui couvre toute la gamme de  $Re_D$  pour lesquels des données sont disponibles, ainsi qu'une large gamme de  $Pr$ . L'équation est recommandée pour tous les  $Re_D$  et  $Pr \geq 0,2$  et a la forme suivante :

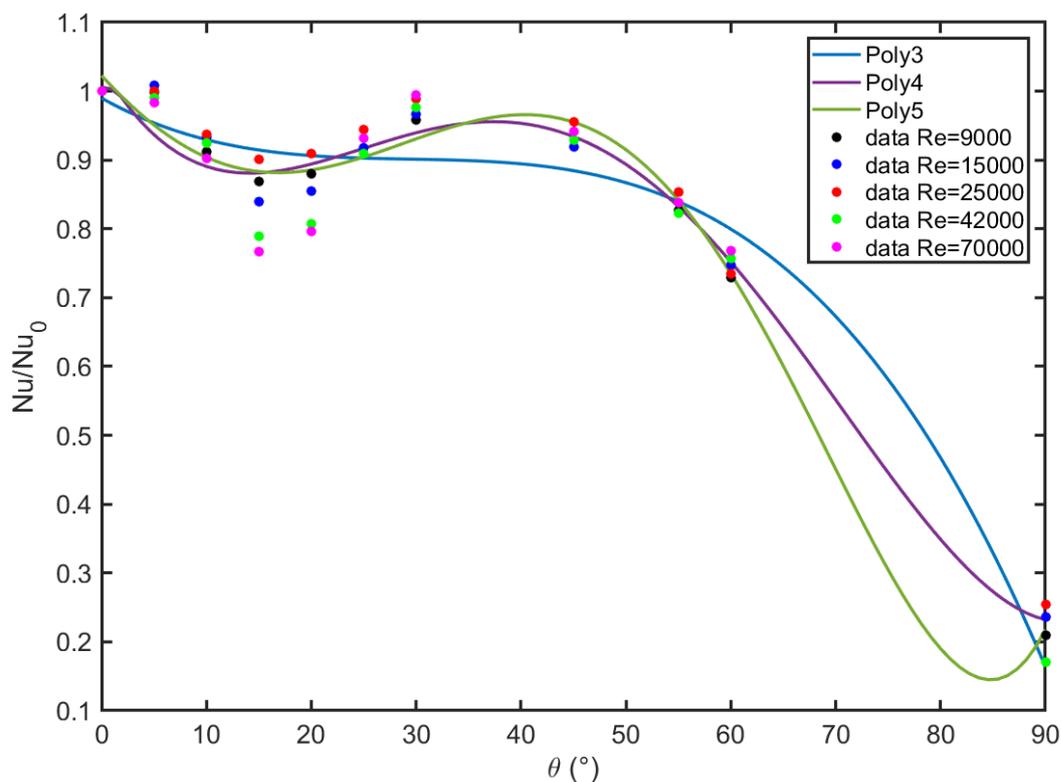
$$\overline{Nu}_{D,N} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (104)$$

Néanmoins, d'autres cas de figure où l'écoulement du fluide (l'air) n'est pas transverse au cylindre, existent. Ainsi, de la même manière que la plaque plane verticale, l'angle d'attaque  $\theta_w$  (°) que fait le flux d'air avec la normale du cylindre à un effet sur les pertes thermiques convectives. Cet effet a été analysé <sup>327</sup>. Il a été conclu que « lorsque l'angle de déviation par rapport à l'écoulement frontal augmente, le nombre de Nusselt décroît d'abord, atteint un minimum pour un angle de 15° et ensuite augmente jusqu'à un maximum qui se situe entre 30° et 45° ». Les auteurs ont fourni des données expérimentales du nombre  $\overline{Nu}_D$  pour différents  $Re_D$  et angles de soufflerie ( $0^\circ \geq \theta_w \geq 60^\circ$ ) par rapport au flux d'air normal. Cependant, pour des angles au-delà de 60°, les données ne sont pas disponibles. Il doit être noté que pour  $\theta_w=90^\circ$  le flux d'air est axial, autrement dit, parallèle à la surface latérale du tube. À notre connaissance, jusqu'aujourd'hui aucune recherche bien établie n'a été entreprise pour un tube long pour déterminer le coefficient de convection forcée, ou bien proposer une corrélation pour le prédire. Dans notre cas, nous admettons que lorsque le flux est parallèle à l'axe du tube, la surface est assimilée à une plaque plane horizontale et le coefficient est calculé à partir des corrélations de  $\overline{Nu}_L$  de Eq(102) où la longueur caractéristique  $L$  est la longueur du tube.

Dans les autres cas, il faut compléter théoriquement les données de Sparrow et al., <sup>327</sup> pour les angles  $\theta_w > 60^\circ$ . Pour ce faire, nous nous sommes basés sur l'homogénéité dimensionnelle du coefficient de convection  $h_w$  pour en déduire les  $\overline{Nu}_D$  respectifs. Nous avons calculé, à différents  $Re_D$  dans la même gamme étudiée par Sparrow, le  $\overline{Nu}_{D,N}$ , puis retracé les données expérimentales de la Fig. 5 de l'étude en question en intégrant nos données théoriques (pour un angle  $\theta_w=90^\circ$ ). À partir de l'ensemble de ces données, une régression a été construite en utilisant la fonction *polyfit* de Matlab© pour ajuster la courbe de  $\frac{\overline{Nu}_D(\theta_w)}{\overline{Nu}_D(\theta_w=0)}$  et assurer la continuité des valeurs de  $Nu$  pour tout  $\theta_w$  de 0° à 90° (cf. **Figure 55**).

L'effet du  $Re_D$  sur le ratio  $\frac{\overline{Nu}_D(\theta_w)}{\overline{Nu}_{D,N}}$  est remarquable pour les angles de  $\theta_w=15^\circ$  et  $\theta_w=20^\circ$ . En effet, un écart d'environ 88% est observé entre le cas avec valeur maximale  $Re_D=9000$  et minimale  $Re_D=70000$ . Cependant, cet écart est plus faible pour les autres angles où nous constatons que les valeurs du ratio sont superposables pour les différents  $Re_D$  étudiés. Dans notre procédure de régression, cet écart n'est pas pris en compte et le *fitting* est réalisé sur toutes les données (sans distinction par rapport au  $Re_D$ ). Un polynôme de degré 4 a été retenu

pour notre étude afin de simuler la variation du  $Nu_D$  en fonction de l'angle d'arrivé du vent  $\theta_w$  (à savoir sa direction) et la vitesse du vent, via le calcul du  $\overline{Nu_{D,N}}$ , car ce polynôme décrit bien les données de la gamme de Reynolds à laquelle le tube est exposé (soit  $Re_D$  entre 900 et 8 000 correspondants à des vitesses du vent jusqu'à 8 km.h<sup>-1</sup>).



**Figure 55 :** Régression polynomiale multiple des données du Ratio (Nusselt à une orientation donnée ( $\theta$ ) au Nusselt transverse  $\theta=0^\circ$ ) pour une gamme de  $Re_D$  allant de 9000 à 70 000 sur la base des données de <sup>327</sup> et des valeurs pour une plaque plane pour  $\theta =90^\circ$ .

### 2.3. Modélisation de la température du sol

La température de la surface du sol  $T_s$  intervient directement à travers l'échange radiatif net avec le PBR et contribue indirectement, dans le cas de la serre, à la modification du microclimat intérieur de la serre. Cet effet est le résultat de l'inertie thermique du sol. En raison de l'absence de mesures dynamiques horaires de la température de la surface du sol  $T_s$  sur le site météorologiques de la NASA <sup>311</sup> et celui de météo France <sup>312</sup>, il est essentiel de la déterminer en fonction du temps. Dans certains travaux, les auteurs ont, soit supposé que cette dernière est égale à celle de l'air ambiant  $T_{amb}$  <sup>328</sup>, soit ils ont complètement négligé l'échange thermique entre leur système et le sol <sup>306</sup> afin de réduire la complexité du modèle à résoudre. Ces travaux négligent l'effet de l'inertie du sol qui pourrait avoir un impact non insignifiant sur la température de surfaces/systèmes environnants. Dans notre approche de modélisation, les flux de chaleur liés au sol ainsi que ce phénomène de stockage et restitution d'énergie sont considérés.

#### 2.3.1. Modélisation des flux de chaleur dans le sol

Quels que soient les échanges thermiques avec l'environnement extérieur, la surface supérieure du sol transfère de la chaleur à travers la sous-couche voisine par phénomène de conduction selon la loi de Fourier :

$$Q_{s_0-s_1}^{cond} = \lambda_s \cdot S_s \cdot \frac{(T_{s_0} - T_{s_1})}{z_0/2} \quad (105)$$

Où  $\lambda_s$  est la conductivité thermique du sol (considéré matériau homogène),  $S_s$  la surface du sol et  $z_0$  l'épaisseur de la première couche. De fait, le bilan d'enthalpie pour la surface du sol serait :

$$\rho_s \cdot V_{s_0} \cdot Cp_s \frac{dT_{s_0}}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i^{ext} + Q_{s_0-s_1}^{cond} \quad (106)$$

$V_{s_0}$  est le volume de la première sous-couche du sol,  $Cp_s$  est la capacité calorifique massique du sol,  $Q_i^{ext}$  sont les différents flux de chaleur affectant la surface du sol en fonction de son environnement (à savoir dans notre cas les échanges avec l'atmosphère ou le microclimat de la serre) et  $Q_{s_0-s_1}^{cond}$  est le transfert de chaleur par conduction à travers la première couche depuis la surface du sol. La présence et le changement de phase de l'eau ne sont pas pris en compte.

De la sorte, pour estimer le flux de conduction dans la première sous-couche, nous avons besoin de déterminer le gradient de température dans les autres sous-couches en profondeur. Ce profil est obtenu par la résolution de l'équation de propagation unidirectionnelle de la chaleur par conduction donnée par :

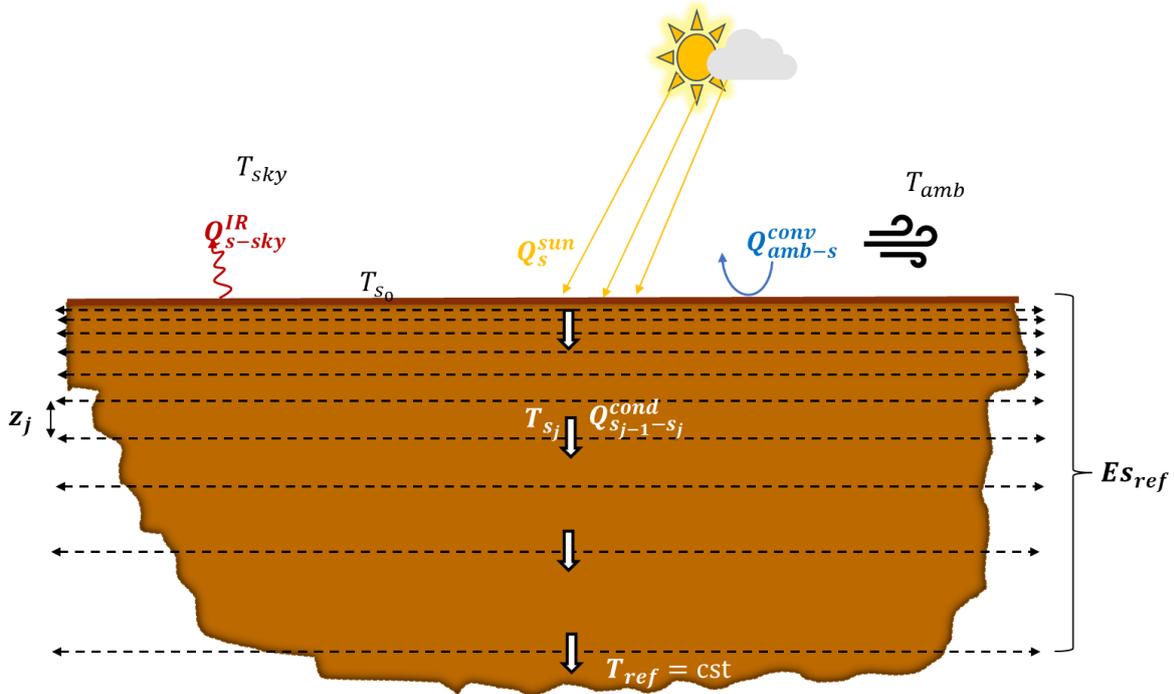
$$\rho_s \cdot V_s \cdot Cp_s \frac{dT_s}{dt}(t, z) = \lambda_s \cdot S_s \cdot \frac{d^2 T_s}{dz^2}(t, z) \quad (107)$$

La résolution analytique de cette équation aux dérivées partielles nécessite des conditions aux limites à  $z=0$  et  $z=\infty$  et une condition initiale à  $t=0$ . Compte tenu de la variation dynamique de la température à la surface à  $z=0$  qui dépend des conditions extérieures, la solution analytique sera plus difficile à établir. Un modèle de multicouches a été alors réalisé en se basant sur les bilans d'énergie dans chaque sous-couche du sol afin de calculer sa température (cf. **Figure 56**). Pour une sous-couche  $j$  donnée, le bilan s'écrit comme suit :

$$\rho_s \cdot V_{s_j} \cdot Cp_s \frac{dT_{s_j}}{dt} = Q_{s_{j-1}-s_j}^{cond} - Q_{s_j-s_{j+1}}^{cond} \quad \forall j=1,2,3,\dots, N \quad (108)$$

Avec  $Q_{s_{j-1}-s_j}^{cond}$  le flux conductif entre les sous-couches  $j-1$  et  $j$ , qui s'écrit de manière similaire à celui de de l'Eq (105) :

$$Q_{s_{j-1}-s_j}^{cond} = \lambda_s \cdot S_s \cdot \frac{(T_{s_{j-1}} - T_{s_j})}{(z_{j-1} + z_j)/2} \quad (109)$$



**Figure 56** : Exemple des différents modes d'échanges énergétiques avec et dans le sol.

Ce modèle est fondé sur une discrétisation du sol en onze sous-couches d'épaisseur variable suivant une loi exponentielle :

$$z_j = 0,001 \cdot \exp(j \cdot 0,693) \quad (110)$$

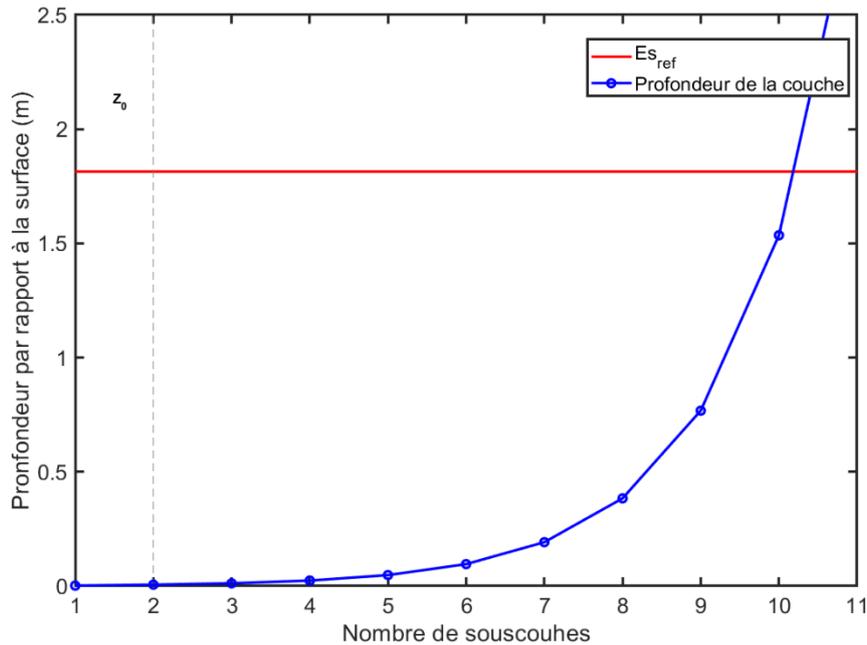
l'épaisseur de la première sous-couche est choisie  $z_0=2$  mm

Ce mode de décomposition, plus serrée en proche surface, a été privilégié pour bien représenter l'amortissement de l'amplitude des variations de la température de la surface du sol (i.e. la petite épaisseur de la première couche) à travers la profondeur du sol. À partir d'une certaine profondeur  $Es_{ref}$ , le gradient de température est quasiment nul, et la température n'est plus affectée par les variations de celle de surface, elle devient constante et égale à la température moyenne annuelle  $T_{ref}$ . Cette profondeur est donnée par <sup>329</sup> :

$$Es_{ref} = 4400 \cdot a_s^{\frac{1}{2}} \quad (111)$$

Avec  $a_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot c p_s}$  représentant la diffusivité thermique du sol moyenne.

Les valeurs des propriétés thermo-physiques du sol considéré correspondent à un sol légèrement humide sans végétation. Pour un sol de  $a_s = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  <sup>329</sup>, la température se stabilise en régime établie avec une valeur égale à  $T_{ref}$  à une profondeur de 1,81 m. Cette profondeur de référence dépend fortement du type du sol et de sa capacité à diffuser la chaleur.

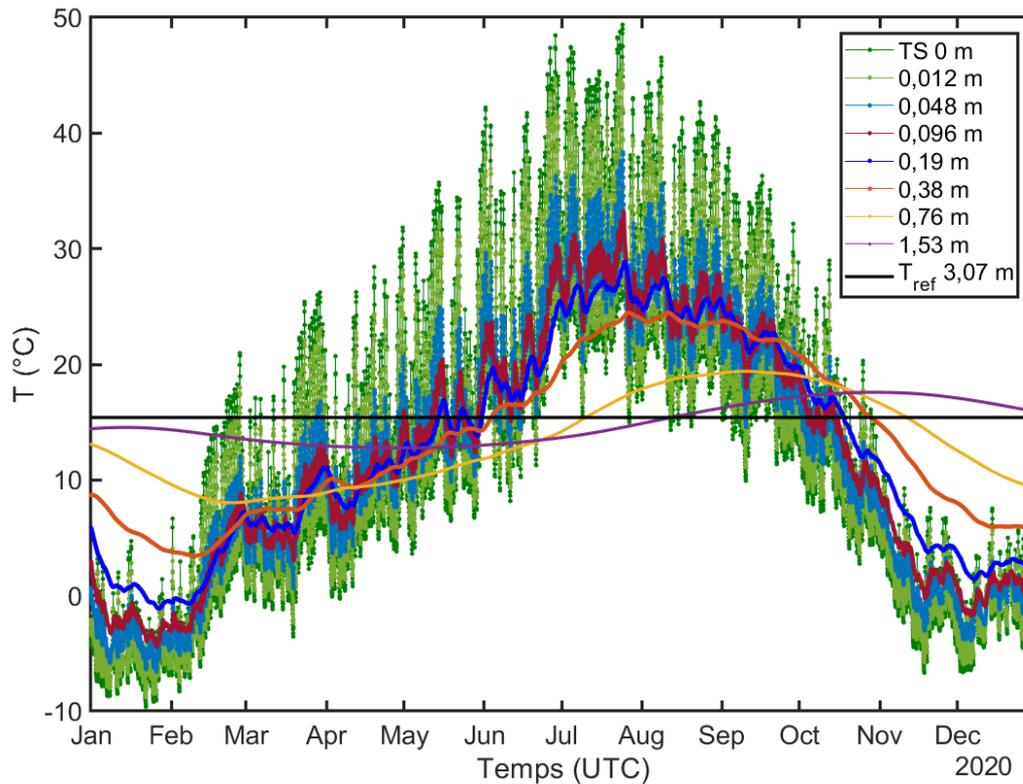


**Figure 57 :** Discrétisation de la profondeur du sol considéré pour le modèle de multicouches.

Le but de cette simulation est de fournir une base de données de la température de la surface du sol considéré  $T_s$  (0 m) qui sert d'entrée pour notre modèle thermique. Accessoirement, ces profils pourraient être exploités pour définir des alternatives à usage de rafraîchissement ou de chauffage par des ingénieurs ou des thermiciens dans de divers domaines d'application. Le lecteur est invité à consulter la procédure de résolution et d'initialisation des températures dans l'Annexe 4.

### 2.3.2. Application

L'analyse du comportement thermique du sol en profondeur ne figure pas parmi les objectifs de cette étude et cela n'est pas indispensable si on s'intéresse à des courtes durées (à l'échelle de l'heure ou de la journée). Néanmoins, pour mieux comprendre de quelle façon s'établissent les températures dans les couches les plus profondes de la terre et pour visualiser l'inertie du sous-sol, il est nécessaire d'étudier le profil annuel des températures dans les différentes sous-couches (à différentes profondeurs). Nous rappelons qu'il existe deux types de variations climatiques annuelles auxquelles le sol est soumis : les variations journalières qui ont le plus d'impact sur les couches superficielles, et les variations saisonnières auxquelles les sous-couches plus profondes sont plus sensibles. Les résultats de simulation sur l'année 2020 après deux années d'itération sont présentés dans la **Figure 58**. Nous pouvons constater à partir de cette figure que les couches à une profondeur au-delà de 20 cm ne sont plus affectées par la variation journalière des conditions extérieures. Par exemple, en décembre, quand la température dehors est au voisinage de 0 °C à 38 cm de la surface, la température est plus élevée et est égale à 7,7 °C. Sur cette même année les températures dans le sous-sol (profondeur >50 cm) peuvent être représentées sous la forme d'une sinusoïde oscillant autour de la température  $T_{ref}$  (constante sur toute l'année) avec un déphasage important par rapport aux variations saisonnières. En effet, les températures maximales à ces profondeurs sont enregistrées en hiver, contrairement aux couches supérieures où les maxima sont atteints en été. Ceci traduit l'aptitude du sol à emmagasiner en son sein l'énergie captée depuis l'extérieur et de la relarguer quand il fait froid. Cette propension de stockage de chaleur est liée à la capacité calorifique du sol en question. Dans la littérature, des profils ayant des allures similaires ont été décrits mais peuvent différer en termes de valeurs de températures, à la même profondeur, selon la nature du sol (conductivité thermique et teneur en humidité) <sup>330,331</sup>.



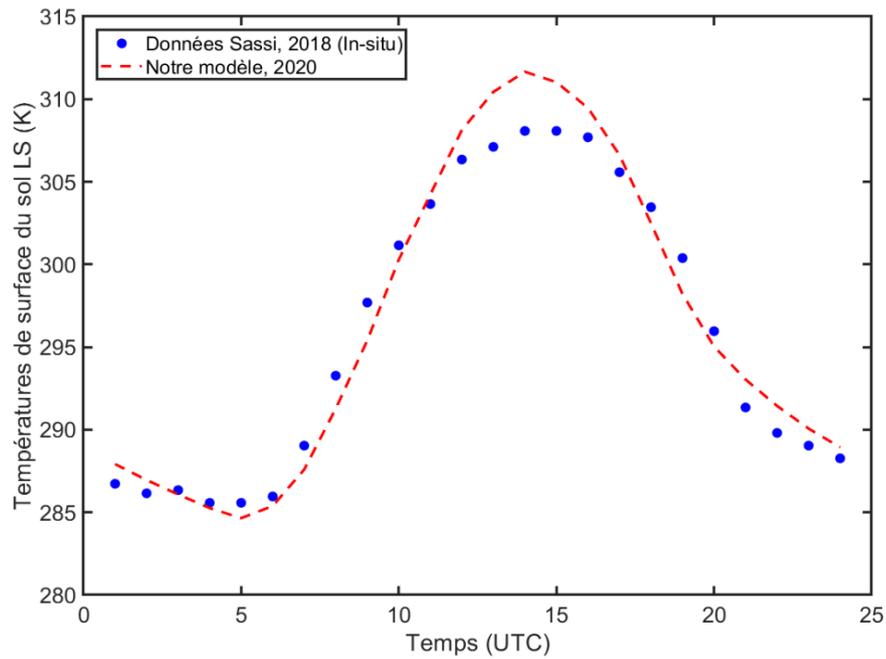
**Figure 58 :** Profils temporels de la température d'un sol naturel à différentes profondeurs et de la température de l'air à 2 m à (Toulouse, France du 1 Janvier 2020 au 31 décembre 2020).

### 2.3.3. Validation sur un cas de la littérature

À défaut du manque d'accessibilité aux données issues des observations expérimentales ou satellitaires à une fréquence temporelle horaire, pour valider nos profils de température du sol obtenus, nous nous sommes tournés vers la littérature pour effectuer des comparaisons.

Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les données de LST (*Land Surface Temperatures*) publiés dans l'étude <sup>332</sup>. Dans cette dernière les températures LST locales de la station de Toulouse sont fournies afin de les comparer à celles enregistrées par des capteurs infrarouges et micro-ondes. Parmi les résultats présentés, nous nous sommes focalisés sur la variabilité journalière de la température moyenne de la surface du sol durant une période estivale typique (*Juillet et Août 2018*). Pour procéder à la comparaison, un profil journalier moyen de la température du sol pour les mois *Juillet et Août 2020* issu de nos simulations a été généré et tracé dans la **Figure 59** pour le confronter aux données extraites de la Figure 3 (a) de *Sassi et al.*, <sup>332</sup>. Ainsi, nous constatons qu'hormis la crête entre midi et 14h obtenus par notre modèle, qui est probablement due aux journées de fortes chaleurs et irradiances enregistrées au cours de l'été de l'année 2020, nos résultats de simulation sont en bon accord avec les températures mesurées in-situ et rapportées dans l'étude en question. Les deux profils moyens sont pratiquement superposables avec un écart absolu moyen de 1,45 °C.

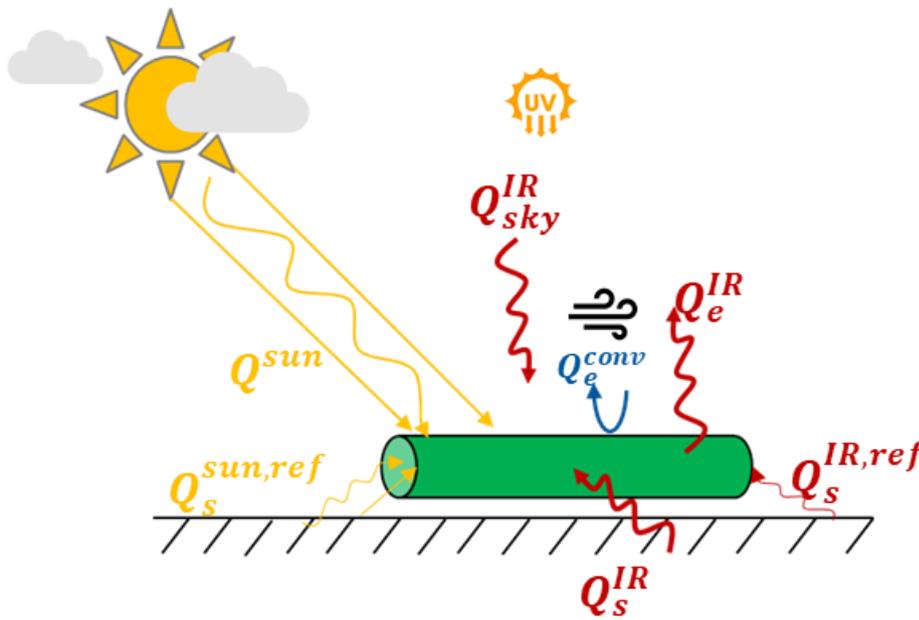
Dès lors, nous pouvons confirmer la capacité de notre modèle thermique à estimer correctement la course journalière des températures de la surface du sol.



**Figure 59 :** Comparaison de la variation temporelle de la température moyenne (en K) du sol calculée par notre modèle thermique pour Juillet 2020 et les données du model LST (Figure 3) de Sassi et al., 332 à Toulouse.

## 2.4. Expressions des bilans d'énergie du Photobioréacteur extérieur

Ici, quatre températures sont impliquées : la température ambiante  $T_{amb}$ , celle du sol  $T_s$ , celle du ciel  $T_{sky}$  et la température de l'eau dans le PBR  $T_e$ . Compte tenu des considérations faites précédemment, le calcul de la température de la culture  $T_e$ , pour le PBR tubulaire extérieur se réduit à deux équations différentielles : l'une correspondant à l'eau dans le tube, et l'autre concerne la surface du sol. D'autres variables dynamiques témoignant des conditions environnementales interviennent également, notamment la radiation solaire et le vent (avec sa vitesse et sa direction) (cf. *Figure 60*).



**Figure 60:** Illustration de la partie tubulaire du photobioréacteur et les flux de chaleur considérés dans ce scénario.

L'équation du bilan thermique pour le fluide dans le PBR permet de calculer la température  $T_e$  :

$$\rho_e \cdot V_e \cdot Cp_e \cdot \frac{dT_e}{dt} = Q^{sun} + Q_{sky}^{IR} + Q^{sol} - Q_e^{conv} - Q_e^{IR} \quad (112)$$

Avec  $Q^{sol} = Q_s^{IR} + Q_s^{IR,ref} + Q_s^{sun,ref}$

L'apport de chaleur provient majoritairement de la radiation solaire  $Q^{sun}$  en période de jour, une faible quantité de chaleur émise par rayonnement infrarouge de la voûte céleste  $Q_{sky}^{IR}$  fait partie également des gains dans le bilan, mais aussi une partie non négligeable de chaleur provenant du sol  $Q^{sol}$  suite à la réflexion de la radiation solaire  $Q_s^{sun,ref}$  et infrarouge  $Q_s^{IR}$  et  $Q_s^{IR,ref}$ , qui contribue au réchauffement de la culture. Les pertes considérées ici sont dues aux

échanges de la culture par convection avec l'air ambiant  $Q_e^{conv}$  et la radiation infrarouge émise par le milieu de culture  $Q_e^{IR}$ .

Nous rappelons que le bilan énergétique du sol a déjà été établi par l'équation Eq(106) où  $T_{s_0} = T_s$  est la température de la surface qui nous intéresse.  $\sum_{i=1}^n Q_i^{ext}$  s'écrit comme la somme du gain par radiation solaire  $Q_s^{sun}$ , et des pertes par convection  $Q_s^{conv}$  et par radiation infrarouge  $Q_s^{IR}$ .

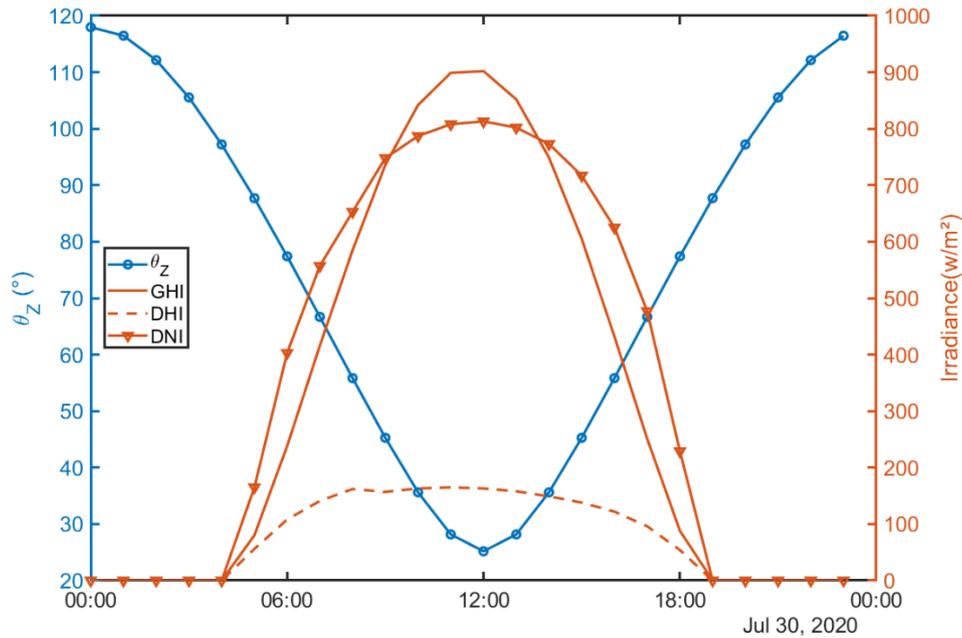
Dans ce qui suit, nous développons l'expression des différents flux affectant le réacteur. Ces derniers sont affichés au membre de droite de l'équation précédente. Cela sera accompagné d'une discussion justifiant les choix des formules retenues et des expressions/valeurs des différents coefficients d'échange.

#### 2.4.1. Radiation solaire $Q^{sun}$

Le flux du rayonnement solaire total provenant du soleil se compose de la radiation directe et de la radiation diffuse, comme nous avons pu le voir dans le [Chapitre III](#). La géométrie cylindrique du PBR nous permet de supposer que le PBR se comporte comme un système de suivi de soleil où la paroi hémicylindrique supérieure reçoit toujours les rayons directs normaux quelle que soit la position du soleil. Par conséquent, ce sont les valeurs du *DNI* (Direct Normal Irradiance) qui sont prises en compte pour le calcul du flux de radiation solaire direct. Elle est exprimée par l'Eq (113) en fonction du *GHI* (Global Horizontal Irradiance), de l'angle zénithal  $\varphi$ , du *DHI* (Diffuse Horizontal Irradiance) et du coefficient de la radiation diffuse  $\alpha$ . Par ailleurs, la composante diffuse de la lumière solaire est supposée avoir une incidence lambertienne isotrope provenant de plusieurs directions.

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \varphi} = \frac{GHI \cdot (1 - \alpha)}{\cos \varphi} \quad (113)$$

Dans la **Figure 61**, les caractéristiques de la radiation solaire en termes d'irradiances directe, diffuse et normale, ainsi que la position du soleil (exprimée par l'angle zénithal  $\varphi$ ) sont présentées pour un jour typique de l'année, le 30 juillet 2020 à Toulouse. Nous constatons que les courbes du *GHI* et  $\varphi$  ont une forme en cloche avec une crête et une cavité respectivement à midi solaire. Cependant, les valeurs de l'irradiance globale dans la deuxième moitié du jour sont plus élevées que leurs homologues du matin. Cette caractéristique, qui dépend sans doute de la localisation géographique, explique l'allure non-symétrique de la courbe du *DNI*. Ce concept est crucial en particulier dans la conception et l'optimisation des centrales solaires thermiques.



**Figure 61 :** Exemple de l'évolution journalière du GHI, du DHI et de l'angle du zénith calculé par Eq(56) ainsi que le DNI respectif Eq (113).

D'une part, ce n'est pas tout le rayonnement transmis (i.e. en fonction du  $\tau_p$ ) par le soleil vers le milieu de culture qui est absorbé et utilisé en tant que chaleur par le milieu de culture. Hormis les faibles pertes par réflexion et fluorescence, il y a une part du spectre visible (ou PAR), baptisée ici  $f_a$ , dont la valeur varie entre 2.5 % et 5 % selon la souche de microalgues cultivée<sup>333</sup>, qui ne contribue pas au réchauffement de la culture car elle est utilisée pour la croissance de la biomasse, pour son entretien ou bien pour la conversion de son énergie chimique. L'excédent pourrait être dissipé sous forme de chaleur. Il s'agit de l'efficacité thermodynamique de photosynthèse de la microalgue. Pour la cyanobactérie *Arthrospira platensis*,<sup>295</sup> ont rapporté que cette efficacité était de moins de 5 % pour un système de captation passive de lumière solaire. Il est ainsi nécessaire d'en tenir compte et de la soustraire du flux de chaleur solaire absorbé. Dans la présente étude, nous considérons que cette fraction  $f_a=3\%$  comme valeur moyenne issues des données de la littérature<sup>62</sup>.

D'autre part, le milieu de culture comportant les microalgues n'absorbe pas 100 % de la radiation solaire incidente comme ce qui est rapporté dans plusieurs travaux<sup>298,306,328</sup>. Ces auteurs ont utilisé de l'eau avec l'encre de Chine dans leurs réacteurs pour l'assimiler à un corps noir afin de garantir une absorption totale du rayonnement solaire et ainsi valider leurs simulations. De la même manière, dans l'étude de Béchet *et al.*,<sup>305</sup> les chercheurs ont utilisé un coefficient d'absorption de 97 % égal à celui de l'émission dans les ondes infrarouges, en supposant que l'absorptivité sur tout le spectre solaire, y compris le visible, est égale à l'émissivité dans l'infrarouge par l'application de la loi de radiation thermique de Kirchhoff. Ces valeurs de coefficient d'absorption ont tendance à surestimer les températures du milieu de culture par rapport aux conditions réelles. De plus, cette approximation n'est pas toujours valable, en particulier pour les milieux clairs comme l'eau qui a une émissivité en infrarouge égale à 90 % mais ne peut pas absorber la même quantité de lumière dans le visible, autrement, elle apparaîtrait sombre. Étant donné qu'il n'y a pas de consensus sur la valeur de ce coefficient,

et du fait de sa dépendance à la couleur du milieu de culture qui est fonction de la densité microalgale, nous nous sommes basés sur les valeurs d'absorption des feuilles des plantes dans la région visible du spectre solaire. Elles varient généralement dans une fourchette de 65 à 90 % selon l'espèce <sup>334</sup>. En outre, ce coefficient dépendant du spectre et des longueurs d'onde, nous avons alors considéré une valeur de coefficient d'absorption globale de 70 % en assumant que la culture est dense.

À partir de ces considérations, le bilan solaire net s'écrit comme suit :

$$Q_e^{sun} = \tau_p \cdot \alpha_e \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot DNI + DHI \right) \cdot S_p \cdot (1 - f_a) \quad (114)$$

Avec  $\tau_p$  la transmittance du PBR,  $\alpha_e$  le coefficient d'absorption solaire,  $S_p$  la surface du PBR et  $f_a$  la fraction de lumière qui contribue à la photosynthèse.

Puisque l'on connaît l'éclairement solaire direct et diffus arrivant sur une surface horizontale ( $W \cdot m^{-2}$ ) ainsi que l'angle zénithal selon la localisation, l'heure, le jour de l'année et l'orientation du PBR, nous pouvons facilement calculer le flux solaire capté par notre système.

#### 2.4.2. Flux radiatifs infrarouges $Q^{IR}$

Ces flux radiatifs correspondent aux rayonnements dans les longues longueurs d'onde d'infrarouge  $[0,7- 20 \mu m]$ , émis par la voûte céleste, le sol et le réacteur lui-même. Ces flux sont importants surtout pendant la nuit ou au petit matin où on remarque un phénomène de formation de gelée sur les surfaces en échange direct avec le ciel même si la température ambiante est supérieure à 0 °C. Ce point sera évoqué plus loin dans la discussion des résultats.

L'expression du flux de radiation infrarouge dépend de l'émittance de l'élément considéré, de sa surface d'échange et de sa température à la puissance quatre. Pour les trois éléments considérés dans ce cas, les flux radiatifs infrarouges sont exprimés comme suit :

- Rayonnement émis par le sol (surface plane horizontale) reçu par le PBR :

$$Q_S^{IR} = \tau_p \cdot \epsilon_e \cdot (\epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4) \cdot S_s \cdot F_{s \setminus p} \quad (115)$$

Où  $\epsilon_e, \epsilon_s$  sont les émissivités respectives de l'eau et du sol, et  $F_{s \setminus p}$  est le facteur de forme du sol vers le PBR.

- Rayonnement émis par le PBR :

$$Q_e^{IR} = \tau_p \cdot (\epsilon_e \cdot \sigma \cdot T_e^4) \cdot S_p \quad (116)$$

- Rayonnement émis par la voûte céleste reçu par le PBR :

$$Q_{sky}^{IR} = \tau_p \cdot \epsilon_e \cdot (\epsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{sky}^4) \cdot S_p \quad (117)$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann, et  $\epsilon_{sky}$  l'émissivité du ciel. Les facteurs de formes pour les Eq (116) et Eq (117) sont égaux à 1.

Nous pouvons combiner les Eq (116) et (117) dans une seule équation exprimant l'échange net entre le ciel et le PBR (comme retrouvée dans la littérature) :

$$Q_{e-sky}^{IR} = \tau_p \cdot \sigma \cdot \epsilon_e \cdot (\epsilon_{sky} \cdot T_{sky}^4 - T_e^4) \cdot S_p \quad (118)$$

Tout comme le coefficient d'absorption d'énergie solaire, le coefficient d'émission ou l'émissivité est fonction de la nature du matériau. Pour le sol, il se situe généralement dans la gamme de 0,93 à 0,96. Pour l'eau à 27 °C le coefficient d'émissivité est de 0,96 <sup>315</sup>.

L'émissivité du ciel dépend de la longueur d'onde et sa valeur varie entre 0,75 et 0,95. Dans la littérature, les auteurs prennent généralement une valeur de  $\epsilon_{sky}=1$  supposant que le rayonnement d'une surface avec le ciel se comporte comme un corps diffus noir <sup>298,305,306</sup>. Par contre, pour un ciel clair la nuit, l'émissivité du ciel est donnée par <sup>315</sup> :

$$\epsilon_{sky} = 0,741 + 0,0062 \cdot T_{dp} \quad (119)$$

Où  $T_{dp}$  est la température de point de rosée en (°C).

Nous avons calculé ce coefficient pour une journée d'été où le ciel était clair la nuit avec une moyenne de 65 % d'humidité relative et 24,5 °C de température ambiante. Nous avons constaté que ce coefficient fluctue dans un intervalle de [0,8-0,85 °C]. Ces valeurs sont assez proches de celles déjà rapportées dans la littérature <sup>299</sup> et obtenues pour l'air par une approche de calcul basée sur une distribution spectrale. Dans notre modèle, la valeur retenue est donc de  $\epsilon_{sky}=0,8$ .

Quant à la température du ciel ou voûte céleste  $T_{sky}$ , elle est critique pour l'évaluation du refroidissement radiatif (ou passif) par le ciel. Plusieurs relations empiriques ont été proposées pour la définir – cet aspect est détaillé dans [Annexe 5](#). Dans la suite de notre étude, nous avons retenu l'Eq(120) pour le calcul du  $T_{sky}$  (justifié dans [Annexe 5](#))

$$T_{sky} = T_{amb} \cdot \left[ 0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,000073 \cdot T_{dp}^2 + 0,013_{bullet} \cos(15t_s) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (120)$$

Avant de passer au prochain phénomène de transfert thermique, nous tenons à préciser que les différents facteurs de formes qui participent dans cette partie sont calculés à partir des corrélations algébriques fournies par la littérature pour les rayonnements de quelques formes géométriques élémentaires typiques, et en utilisant également les relations d'additivité et réciprocité. Les formules sont données dans la section [2.6](#).

### 2.4.3. Flux réfléchi par le sol $Q_s$

Le sol joue un rôle considérable dans le bilan de chaleur de l'eau dans le tube comme nous pouvons le discerner de l'Eq (112). Les flux provenant du sol sont des gains pour la culture. Il s'agit du flux de radiation IR du sol reçu par le PBR  $Q_s^{IR}$  (Eq (115)) ainsi que la

réflexion de la radiation solaire et du ciel en infrarouge  $Q_s^{sun,ref}$ ,  $Q_s^{IR,ref}$  respectivement vers le PBR.

- Le flux de radiation IR du ciel qui arrive au sol est :

$$Q_{sky-s}^{IR} = (\epsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{sky}^4) \cdot S_s \quad (121)$$

- Le flux de radiation solaire provenant du soleil et reçu par le sol (surface horizontale) est :

$$Q_s^{sun} = \alpha_s \cdot GHI \cdot S_s \quad (122)$$

En ce sens, les expressions des flux réfléchis par le sol et reçu par l'eau dans le PBR s'écrivent :

$$Q_s^{IR,ref} = \tau_p \cdot \epsilon_e \cdot (1 - \epsilon_s) \cdot Q_{sky-s}^{IR} \cdot F_{s/p} \quad (123)$$

$$Q_s^{sun,ref} = \tau_p \cdot \alpha_e \cdot alb_s \cdot Q_s^{sun} \cdot F_{s/p} \cdot (1 - f_a) \quad (124)$$

avec  $(1 - \epsilon_s)$  la réflectivité du sol aux rayonnements infrarouges et  $alb_s$  l'albédo du sol. Étant considéré dense, le milieu de culture dans le PBR a un coefficient d'absorption dans l'IR égale à son émissivité  $\epsilon_e$ . Les autres coefficients de ces expressions sont déjà décrits dans la partie 2.4.1.

Ces flux de chaleur dépendent de plusieurs variables dynamiques environnementales à savoir l'énergie solaire  $GHI$ , la température du ciel  $T_{sky}$  et celle du sol  $T_s$ . Les valeurs de ces variables sont fournies depuis la base de données météorologiques.

#### 2.4.4. Flux convectif $Q^{conv}$

Comme nous avons pu le voir dans §2.2, nous sommes confrontés ici à deux flux de convection forcée, l'un du au vent extérieur et l'autre au mouvement du liquide (milieu de culture) dans le tube. Néanmoins, suite à la discussion dans la section 2 de ce chapitre concernant les résistances thermiques, le second échange convectif n'est pas pris en compte : la température du milieu de culture est considérée égale à celle de la paroi du réacteur. Dans ce cas, le flux de chaleur entre l'air ambiant et l'eau s'écrit :

$$Q_e^{conv} = S_p \cdot h_{Ae/p} \cdot (T_{amb} - T_e) \quad (125)$$

Où  $h_{Ae/p}$  est le coefficient d'échange convectif entre l'air ambiant et la paroi du réacteur. Il dépend à la fois de la vitesse du vent  $v_w$  et de sa direction  $\theta_w$ . Il est calculé à l'aide de l'équation Eq (96) où le nombre  $Nu_D$  est déterminé à partir du Nusselt pour un écoulement normal au tube  $\overline{Nu_{D,N}}$  et la régression polynomiale présentée dans la **Figure 55**. Afin de tester la validité de ces considérations encore une fois, nous avons procédé au calcul du flux de convection interne entre le liquide et la paroi du réacteur exprimé par :

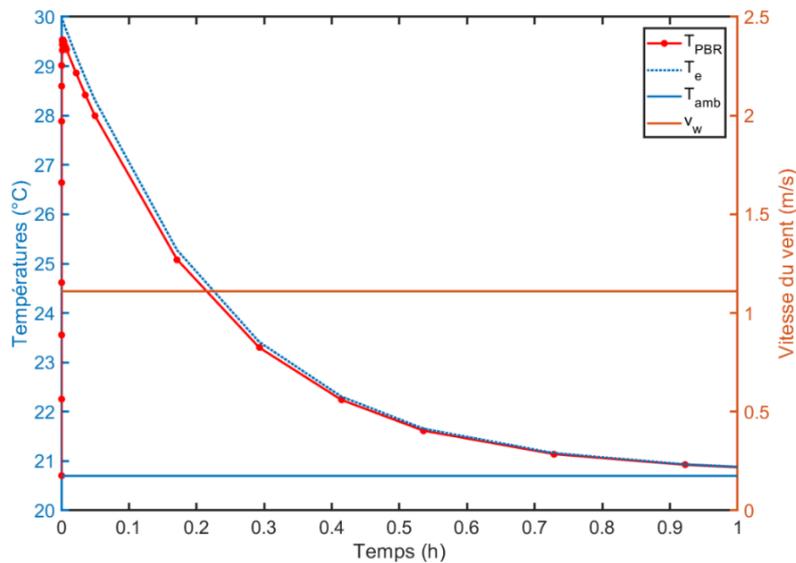
$$Q_{e/PBR}^{conv} = S_e \cdot h_{e/p} \cdot (T_{PBR} - T_e) \quad (126)$$

Avec  $S_e$  la surface interne de la paroi du réacteur qui est presque égale à celle du réacteur  $S_p$  (à cause de la petite épaisseur de paroi) et  $h_{e/p}$  le coefficient de convection interne calculé par l'Eq ((101) pour une vitesse débitante d'eau  $U_b=0,4 \text{ m.s}^{-1}$ . Ensuite, nous avons résolu l'équation différentielle pour estimer la température de l'eau en régime stationnaire ( $T_{amb}=20,7 \text{ °C}$ ,  $v_w=1,11 \text{ m.s}^{-1}$ ) en considérant uniquement deux flux de convection : avec l'air extérieur et avec le fluide dans le réacteur. Pour des températures initiales de l'eau et de la paroi  $T_e=30 \text{ °C}$  et  $T_{PBR}=20,7 \text{ °C}$  respectivement, les résultats présentés dans la

**Figure 62** montrent que l'équilibre thermique entre la paroi du réacteur et l'eau s'établit très rapidement. En effet, au bout de quelques dizaines de secondes les températures sont déjà assez proches. Après une heure, nous constatons que les deux courbes se superposent. À la lecture de ces résultats, nous pouvons d'ores et déjà assumer que l'eau et la paroi du PBR sont en équilibre et ainsi confirmer la validité de l'Eq (125) pour le calcul du flux d'échange convectif entre l'air et l'eau.

Semblablement à l'eau dans le PBR, le sol est en échange convectif avec l'air ambiant. Nous l'assimilons à une surface plane horizontale. L'expression de ce flux ne différant pas des deux expressions précédentes, celui-ci s'écrit :

$$Q_s^{conv} = S_s \cdot h_{Ae/s} \cdot (T_{amb} - T_s) \quad (127)$$



**Figure 62 :** Évolution de la température de l'eau et celle de la paroi en régime permanent (avec une température d'air ambiant, une vitesse de vent et une vitesse de liquide interne constantes).

## 2.5. Expressions des bilans d'énergie de la serre

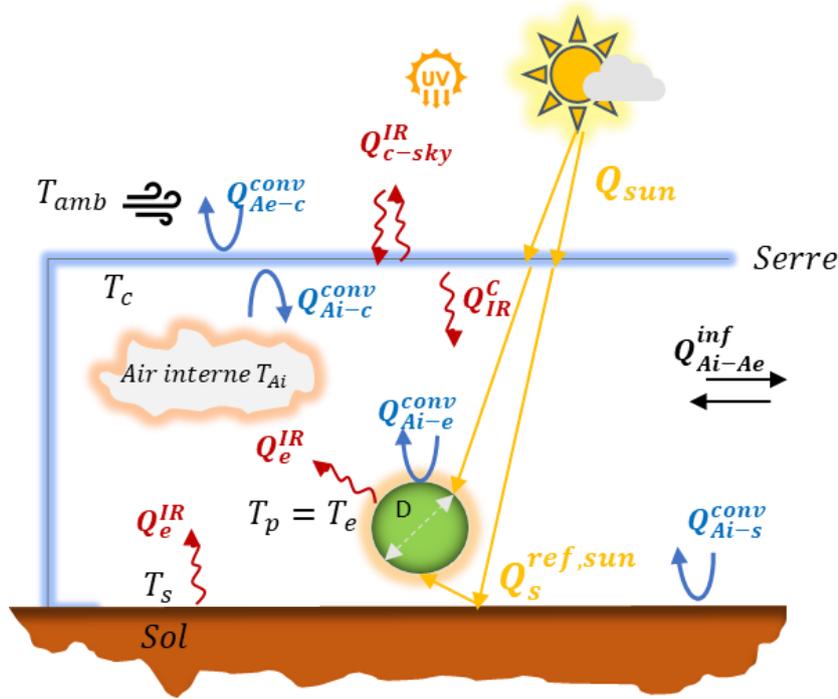
Les méthodes d'agriculture en serre ont été étudiées extensivement. Des revues de littérature ont été proposées <sup>335,336</sup> sur les considérations liées à la conception et au contrôle des serres avec une présentation exhaustive des travaux réalisés depuis les années 1970.

L'objectif d'une serre est de garantir un environnement intérieur ou « microclimat » adéquat pour la croissance des cultures en général et de les protéger des conditions extérieures qui peuvent être sévères. En dehors de l'agriculture, les serres sont utilisées également pour des applications de séchage à effet de serre <sup>337</sup> et de dessalement d'eau de mer <sup>338</sup>. Afin de comprendre le comportement de cette construction notamment dans le domaine de l'agriculture, une étude thermique de son microclimat est cruciale. Les chercheurs ont maintes fois eu recours à la modélisation et à la simulation thermique pour pouvoir prédire son aspect thermique ainsi que les paramètres influençant significativement le stockage d'énergie et le transfert de chaleur à l'intérieur (notamment sa forme géométrique, son orientation, les propriétés radio-thermiques de ses matériaux et ses systèmes de ventilation et de chauffage). Une revue de littérature recensant les travaux réalisés sur des différents systèmes de serre a été publiée par <sup>339</sup> qui fournissent des consignes sur le choix des matériaux de revêtement et la conception de la serre.

Quant à la modélisation thermique des serres, la plupart des études décomposent le système en éléments essentiels pour étudier les mécanismes de transfert thermiques unidirectionnels qui sont supposés, soit en considérant la serre vide <sup>340</sup> soit avec une culture donnée à l'intérieur <sup>341</sup>. Nous trouvons également d'autres travaux qui ont mis un accent particulier sur la quantité d'énergie solaire collectée par couverture et transmise vers le microclimat de la serre en incluant l'effet des coordonnées astronomiques, c'est à dire les angles azimutaux du soleil <sup>342-345</sup>. Les variables d'état souvent étudiées dans le cas des serres sont la température et l'humidité. De ce fait, la majorité des études prennent en compte l'évapotranspiration du sol et de la culture qui contribue en grande partie à la modification de l'environnement intérieur <sup>346,347</sup>. Des modèles jugés « complets », qui sont validés expérimentalement et capables de prédire les conditions internes d'une serre agricole en fonctions des plusieurs paramètres ont été rapportés <sup>339</sup>.

De la même manière que pour le cas du PBR extérieur, nous décrivons ici les bilans d'énergie pour les différents éléments de ce système, ainsi que la procédure de calcul des différents flux de chaleur. Comme représenté dans la **Figure 63**, cinq températures interviennent ici : la température ambiante  $T_{amb}$ , la température de la couverture de la serre  $T_c$ , la température de l'air intérieur de la serre  $T_{Ai}$ , la température de l'eau  $T_e$  et la température du sol  $T_s$  dans la serre. Dans ce scénario, nous avons considéré une serre de géométrie parallélépipédique orientée Nord-Sud d'une longueur identique à celle du tube du PBR. Cette configuration simple est choisie pour réduire les complexités géométriques de notre étude (notamment à travers les facteurs de formes utilisés dans le calcul des flux radiatifs comme invoqué précédemment). De plus, l'ensemble des dimensions de la serre utilisée ici ne correspondent pas à un contexte technique/pratique particulier. Ces dimensions sont considérées à titre théorique pour tester la pertinence du modèle thermique proposé et mettre en évidence les

limites, les voies d'amélioration de ce dernier, notamment via une étude de sensibilité et servant à dégager les influences de quelques paramètres de dimensionnement. Dès lors, le calcul de la température de la culture  $T_e$ , pour le PBR tubulaire dans la serre repose sur la combinaison de quatre équations différentielles correspondantes aux quatre éléments considérés, à savoir la couverture de la serre, l'air interne, le PBR (milieu de culture) et le sol. Tout comme la plupart des modèles thermiques, le nôtre comporte également des hypothèses et des considérations théoriques simplificatrices et utiles pour notre simulation. Certaines de ces simplifications sont déjà énoncées dans § 2 et d'autres seront émises au fil de cette partie.



**Figure 63 :** Représentation schématique du système PBR dans une serre et les différents flux de chaleur considérés.

Le flux principal à l'intérieur de la serre est généré essentiellement par la convection due à la ventilation naturelle ou l'infiltration, mais aussi par la convection libre. Dans le sol, le flux de chaleur transfère à travers les différentes couches par le biais de la conduction comme nous l'avons vu dans la section dédiée : Modélisation de la température du sol. La radiation solaire constitue la source principale d'énergie dans la serre. Toutefois, du fait de la transmissivité de la couverture de la serre ainsi que des émissivités de ses différents éléments dans les longueurs d'onde infrarouge, la perte de chaleur durant la nuit est considérable. Ceci est un phénomène déjà mis en évidence dans la partie précédente et qui va se manifester de nouveau plus loin dans les résultats de simulations. Désormais, les bilans d'énergie pour les éléments considérés s'écrivent

Pour la couverture :

$$\rho_c \cdot V_c \cdot C_c \cdot \frac{dT_c}{dt} = Q_c^{sun} - Q_{c-Ae}^{conv} - Q_{c-Ai}^{conv} + Q_c^{IR} \quad (128)$$

Pour l'air intérieur :

$$\rho_{Ai} \cdot V_{Ai} \cdot C_{Ai} \cdot \frac{dT_{Ai}}{dt} = Q_{c-Ai}^{conv} - Q_{Ai-s}^{conv} - Q_{Ai-e}^{conv} + Q_{Ai-Ae}^{inf} \quad (129)$$

Pour le PBR :

$$\rho_e \cdot V_e \cdot C_e \cdot \frac{dT_e}{dt} = Q_e^{sun} - Q_{e-Ai}^{conv} + Q_e^{IR} \quad (130)$$

Pour le sol :

$$\rho_s \cdot V_s \cdot Cp_s \cdot \frac{dT_s}{dt} = Q_s^{sun} - Q_{s-Ai}^{conv} - Q_s^{cond} + Q_s^{IR} \quad (131)$$

Les indices :  $s, e, Ai, c$  correspondent aux éléments considérés dans notre étude à savoir, le sol, l'eau du PBR, l'air intérieur et la couverture de la serre respectivement. De même que pour le cas du PBR extérieur, nous présentons l'expression de chaque flux qui intervient dans ces bilans d'énergie.

### 2.5.1. Radiation solaire $Q^{sun}$

Le flux solaire est calculé pour chaque élément de la serre sauf pour l'air interne dont nous admettons qu'il n'absorbe pas de radiation solaire ni infrarouge. Pour l'eau dans le PBR, la procédure de calcul de ce flux ne change pas par rapport au cas précédent (i.e. PBR extérieur). Par contre le coefficient de transmission de la couverture (toit et parois) de la serre intervient dans ce cas car ce n'est pas toute la radiation solaire reçue par la serre qui va être transmise au PBR. Par conséquent, le flux solaire donné par l'Eq (114) devient :

$$Q_e^{sun} = \tau_c \cdot \tau_p \cdot \alpha_e \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot DNI + DHI \right) \cdot S_p \cdot (1 - f_a) \quad (132)$$

Avec  $\tau_c$  le coefficient de transmission de la couverture (toit et parois) de la serre qui joue un rôle important sur la quantité d'énergie transférée. Dans cette étude, nous conservons une valeur moyenne et constante de ce coefficient, malgré l'erreur commise en négligeant sa possible variation due aux angles d'arrivée des rayons du soleil.

De plus, il est clair que l'énergie solaire collectée et absorbée diffère d'une paroi à une autre, d'une part, en fonction de la configuration des parois (i.e. l'inclinaison et l'orientation) et d'autre part, en raison de la variation du coefficient d'absorption due aux angles d'arrivée des rayons du soleil. En effet, une attention particulière a été portée dans quelques travaux sur ces points : une analyse de la radiation solaire absorbée par chaque paroi, selon sa position, a par exemple été réalisée par *Jadallah et al.*,<sup>342</sup>. Sous ces hypothèses, la radiation solaire totale absorbée par la couverture (toit et parois) de la serre est la somme des radiations incidentes (directe, diffuse ou réfléchi) sur chaque surface :

$$G_i(t) = GHI(1 - \alpha) \cdot f_{i,direct} + DHI \cdot f_{i,diffuse} + alb_s \cdot f_{i,réfléchi} \cdot GHI \quad (133)$$

$$G_t(t) = \sum_{i=1}^5 G_i(t) \cdot S_i \quad (134)$$

Avec  $G_i$  la radiation solaire reçue par la surface  $i$ .  $f_{i,direct}$ ,  $f_{i,diffuse}$  et  $f_{i,réfléchi}$  sont des facteurs géométriques de chaque surface pour la radiation directe, diffuse et réfléchi respectivement. Ces facteurs sont calculés en fonction de l'angle d'incidence sur la surface  $i$

par rapport à l'horizontale  $\theta_i$ , l'inclinaison  $\beta_i$  et l'angle du zénith  $\varphi$ , en se basant sur les expressions proposées <sup>317</sup> et utilisées pour les PBR écrans plats verticaux <sup>89</sup> :

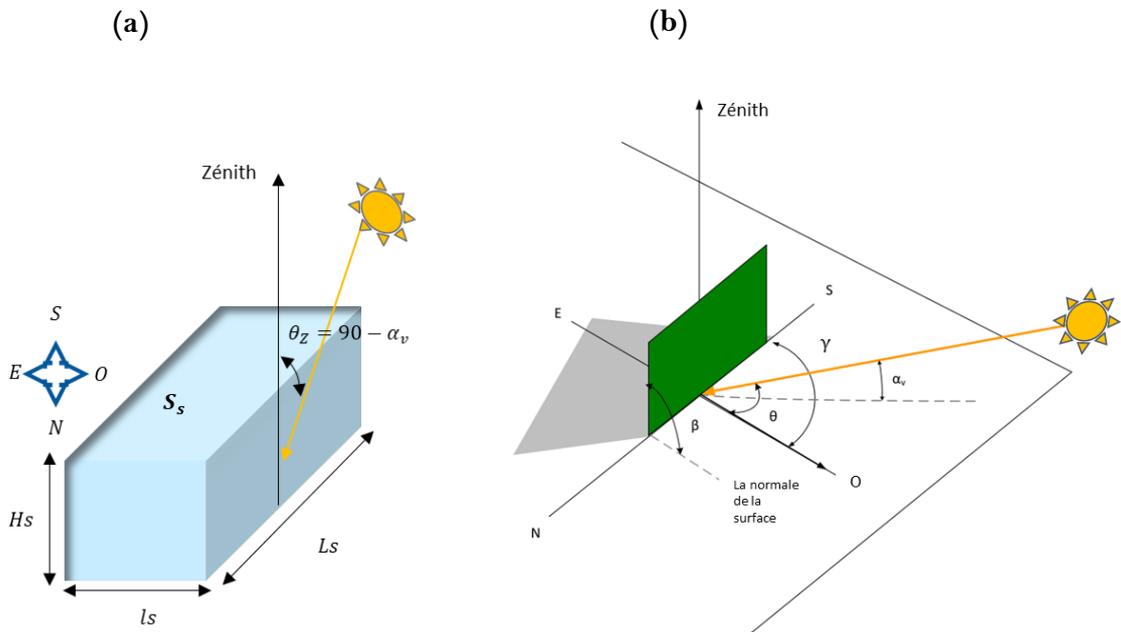
$$f_{i,direct} = \frac{\cos(\theta_i(\beta_i, \gamma_i))}{\cos \varphi} \quad (135)$$

$$f_{i,diffuse} = \frac{1 + \cos(\beta_i)}{2} \quad (136)$$

$$f_{i,réfléchi} = \frac{1 - \cos(\beta_i)}{2} \quad (137)$$

Le  $\gamma_i$  est l'azimut de la paroi  $i$  (angle entre la normale à la surface et le sud), comme illustré dans la

**Figure 64.**



**Figure 64 :** Représentation graphique des différents angles impliqués dans le calcul de l'angle d'incidence solaire sur les parois de la serre. (a) aperçu de la configuration de la serre. (b) illustration des paramètres solaires sur une paroi plate verticale <sup>89</sup>.

L'angle  $\theta_i$  se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \\ & \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \\ & \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega) \end{aligned} \quad (138)$$

Les formules des différents angles ont été présentées précédemment dans le [Chapitre III § 1.2](#).

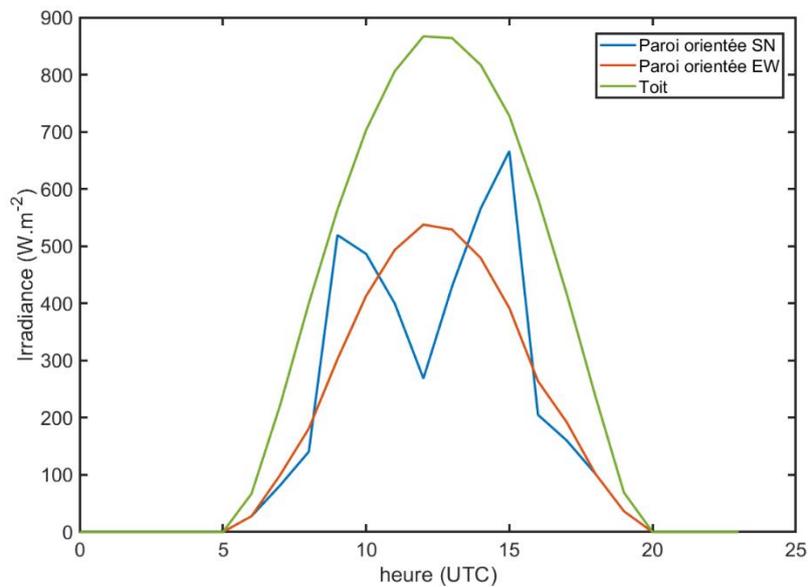
En utilisant ces équations, nous sommes capables de calculer l'énergie solaire reçue par chaque paroi. La **Figure 65** présente les résultats de l'irradiance collectée  $G_i(t)$  par les parois verticales orientées Sud-Nord  $\gamma=90^\circ$ , et Est-Ouest  $\gamma=0^\circ$  ainsi que le toit, pour une journée

d'été caractéristique (30 Juillet 2020) à Toulouse, France. Nous émettons l'hypothèse que les parois parallèles reçoivent la même quantité d'irradiance. Par symétrie, nous dupliquons cette quantité pour chaque paroi verticale dans le calcul de l'irradiance solaire totale reçue par la couverture  $G_t(t)$ .

Ainsi, le flux solaire absorbé par la couverture de la serre s'écrit :

$$Q_c^{sun} = \alpha_c \cdot G_t(t) \quad (139)$$

Avec  $\alpha_c$  le coefficient d'absorption de la couverture de la serre.



**Figure 65 :** L'énergie solaire disponible en fonction du temps pour les parois verticales et le toit de la serre dans un jour d'été caractéristique à Toulouse.

Quant au flux solaire absorbé par le sol à l'intérieur de la serre, on considère uniquement le rayonnement solaire transmis à travers les parois sans prendre en compte les différents phénomènes de réflexions et de diffusion des parois. Il est écrit en fonction du coefficient d'absorption du sol  $\alpha_s$  :

$$Q_c^{sun} = \alpha_s \cdot \tau_c \cdot GHI \quad (140)$$

### 2.5.2. Flux convectifs sensibles $Q^{conv}$

Dans ce cas de figure, quatre flux d'échanges convectifs se produisent : entre les surfaces solides considérées (i.e. la couverture de la serre, le PBR et le sol), l'air ambiant extérieur et le microclimat intérieur (cf. **Figure 63**). Nous allons lister ces flux avec leurs expressions.

- Entre la couverture et l'air ambiant  $Q_{c-Ae}^{conv}$

Il s'agit d'une convection forcée où le coefficient d'échange  $h_w$  est calculé à partir de la vitesse du vent mesurée à 10 m du sol et sa direction (angle d'arrivée par rapport à la surface

considérée). Le flux total de la couverture s'écrit comme la somme des flux de convection sur chaque paroi :

$$Q_{c-Ae}^{conv} = \sum_{p_v=1}^4 Q_{p_v-Ae}^{conv} + Q_{toit-Ae}^{conv} \quad (141)$$

où  $Q_{p_v-Ae}^{conv}$  est le flux de convection due au vent sur les parois verticales  $P_v$  :

$$Q_{p_v-Ae}^{conv} = h_w \cdot S_{p_v} \cdot (T_c - T_{amb}) \quad (142)$$

Et celui du toit  $Q_{toit-Ae}^{conv}$  :

$$Q_{toit-Ae}^{conv} = h_w \cdot S_s \cdot (T_c - T_{amb}) \quad (143)$$

Les formules pour le calcul des  $h_w$  sont données précédemment par les corrélations du

pour les parois verticales au/sous le vent (selon son angle d'attaque) et celles de l'Eq (103) pour le toit (plaque plane horizontale).

○ Entre la couverture et l'air intérieur  $Q_{c-Ai}^{conv}$

L'échange entre la face interne de la couverture et l'air dans la serre est considéré, dans une première approche, comme de la convection naturelle (serre sans ventilation). Identiquement au flux précédent, la puissance échangée s'écrit comme la somme des flux de toutes les parois. De plus, étant donné que les températures de l'air interne et de la couverture sont uniformes, nous pouvons écrire :

$$Q_{c-Ai}^{conv} = h_{c-Ai} \cdot S_c \cdot (T_c - T_{Ai}) \quad (144)$$

Avec  $S_c$  la surface de la couverture de serre totale et  $h_{c-Ai}$  est le coefficient total d'échange entre la serre et l'air interne. Il est calculé comme suit :

$$h_{c-Ai} = \frac{\sum_{p_v=1}^4 (h_{p_v-Ai} \cdot S_{p_v}) + h_{Toit-Ai} \cdot S_s}{S_c} \quad (145)$$

$h_{p_v-Ai}$  et  $h_{Toit-Ai}$  sont calculées à partir du nombre de  $\overline{Nu}_L$  donné par les formules des Eqs (97), (99) et (100) du **Tableau 15** pour la convection naturelle où nous tenons compte de la valeur absolue de la différence des températures dans le nombre de  $Ra$ .

○ Entre le PBR et l'air interne  $Q_{e-Ai}^{conv}$

Tout comme la face interne de la couverture de la serre, la surface du PBR (consécutivement le milieu de culture), est sujette à la convection naturelle. Le flux d'échange est alors :

$$Q_{e-Ai}^{conv} = h_{p-Ai} \cdot S_p \cdot (T_e - T_{Ai}) \quad (146)$$

Avec  $h_{e-Ai}$  le Coefficient d'échange de convection naturelle entre le tube du PBR et l'air intérieur de la serre, calculé par l'équation de Nusselt utilisant la corrélation  $\overline{Nu}_L$  pour un cylindre (Eq(98)).

○ Entre le sol et l'air interne  $Q_{s-Ai}^{conv}$

Par analogie avec les cas précédents, le flux convectif échangé entre l'air et le sol dans la serre est considéré naturel. Par conséquent, le même coefficient d'échange calculé pour le toit de la serre à partir des Eqs (98) et (99), sera utilisé pour le sol interne :

$$Q_{s-Ai}^{conv} = h_{s-Ai} \cdot S_s \cdot (T_s - T_{Ai}) \quad (147)$$

Remarque :

En cas de ventilation, comme éventuelle perspective, la convection peut être aussi forcée. Par conséquent, nous pouvons considérer la vitesse moyenne du mouvement de l'air intérieur  $U_m$  (m.s<sup>-1</sup>) dans le calcul du coefficient d'échange convectif pour les trois éléments précédents  $h_{c-Ai}$ ,  $h_{e-Ai}$  et  $h_{s-Ai}$  comme proposé dans la littérature <sup>348</sup> considérant la contribution de la convection naturelle et forcée, autrement dit la convection mixte :

$$h_{c/e/s-Ai} = a_1 \cdot |T_{c/e/s} - T_{Ai}|^{a_2} + b_1 \cdot U_m^{b_2}$$

$$U_m = L_s \cdot \frac{N}{3600} \quad (148)$$

Avec  $a_1, a_2, b_1, b_2$  des paramètres d'échange thermique pour la convection libre (premier terme) et forcée (second terme) respectivement,  $L_s$ , la longueur de la serre et nombre de renouvellement d'air horaire  $N$  (h<sup>-1</sup>).

○ Autre échange : infiltration ou renouvellement de l'air  $Q_{Ai-Ae}^{inf}$

En cas de présence d'une ouverture dans la serre, l'air interne serait en échange avec l'air extérieur. Le flux de cet échange dépendrait de la différence entre l'énergie de l'air entrant et de l'air sortant. Puisque nous considérons que la capacité calorifique massique de l'air intérieur et de l'air extérieur sont identiques, ce flux s'exprime en fonction du nombre de renouvellement d'air horaire  $N$  (h<sup>-1</sup>) et l'écart entre les températures extérieure et intérieure comme suit <sup>349</sup> :

$$Q_{Ai-Ae}^{inf} = \rho_{Ai} \cdot C_{p_{Ai}} \cdot V_s \cdot \frac{N}{3600} \cdot (T_{Ai} - T_{Ae}) \quad (149)$$

Avec  $V_s$  le volume de la serre.

### 2.5.3. Flux radiatifs infrarouges $Q^{IR}$

Les échanges radiatifs nets en infrarouges considérés dans cette partie sont ceux qui ont lieu entre les différentes surfaces des éléments de notre système ainsi que celui de la serre avec la voûte céleste (cf. **Figure 63**). En effet, l'intérieur de la serre est considéré comme un environnement confiné où toutes les surfaces sont isothermes et supposées opaques et diffuses avec une émissivité égale à leur absorptivité. Ici, nous présentons les bilans de radiation infrarouge sur chaque élément, qui s'écrivent comme la somme algébrique du flux émis (sortant) et de ceux absorbés (provenant des autres surfaces).

#### ○ La couverture de la serre $Q_c^{IR}$

Les parois de la serre sont en échange avec le ciel d'une part, et avec les surfaces de l'intérieur de la serre d'autre part. Nous supposons pour ce cas que les échanges entre les surfaces des parois sont négligeables. Son bilan radiatif s'exprime alors en fonction des températures à la puissance 4 :

$$Q_c^{IR} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot [-(T_c^4 \cdot S_c) + (\epsilon_{sky} \cdot T_{sky}^4 \cdot S_c) + (\epsilon_s \cdot T_s^4 \cdot S_s \cdot F_{s/c}) + (\epsilon_e \cdot T_e^4 \cdot S_p \cdot F_{p/c})] \quad (150)$$

Le premier terme du dernier facteur de l'Eq (150) représente la perte par émission de la couverture. Les autres termes correspondent aux différents gains résultants de la radiation des surfaces voisines.

#### ○ L'eau dans le PBR $Q_e^{IR}$

Pareillement, le PBR est en échange radiatif net avec le sol et les parois de la serre. Le bilan radiatif en infrarouge s'écrit comme :

$$Q_e^{IR} = \epsilon_e \cdot \sigma \cdot [-(T_e^4 \cdot S_p) + (\epsilon_s \cdot T_s^4 \cdot S_s \cdot F_{s/p}) + (\epsilon_c \cdot T_c^4 \cdot S_c \cdot F_{c/p})] \quad (151)$$

Pour le PBR, nous considérons que la paroi du tube ne contribue pas aux échanges radiatifs. Par conséquent, nous ne prenons en compte que l'émissivité du milieu de culture.

#### ○ Le sol $Q_s^{IR}$

Comme nous l'avons vu dans les bilans précédents, la surface du sol échange des radiations avec les éléments qui l'entourent. Le flux de radiations du sol est donné par :

$$Q_s^{IR} = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot [-(T_s^4 \cdot S_s) + (\epsilon_c \cdot T_c^4 \cdot S_c \cdot F_{c/s}) + (\epsilon_e \cdot T_e^4 \cdot S_p \cdot F_{p/s})] \quad (152)$$

$F_{p/c}$ ,  $F_{s/c}$ ,  $F_{s/p}$ ,  $F_{c/p}$ ,  $F_{p/s}$  et  $F_{c/s}$  sont les différents facteurs de forme entre les surfaces des éléments considérés. Ils sont calculés par les expressions données dans la section 2.6.

Remarque

Une approche nodale peut être aussi adoptée ici, en considérant la serre en comme un système confiné, et en procédant au calcul des flux radiatifs transférés entres les différents éléments le constituant. Dans cette approche, on considère que le flux radiatif sortant d'une surface  $i$  est égale à la somme des flux reçus par les surfaces voisines  $j$ . On note le flux radiatif net d'une surface  $i$ , par  $Q_i$  qui dépend de la différence entre les radiosités  $J$ . Cette méthode a été bien détaillée par <sup>315</sup>. Dans notre cas d'étude, on aura un système de trois équations correspondantes à la surface du PBR, du sol et de la serre.

Dans l'approche nodale, le flux radiatif du PBR par exemple, s'écrit comme :

$$Q_p = \frac{\sigma T_e^4 - J_p}{\frac{1 - \epsilon_e}{\epsilon_e S_p}} = \sum_{j=1}^2 Q_{pj} = \frac{(J_p - J_s)}{(S_p \cdot F_{p/s})^{-1}} + \frac{(J_p - J_c)}{(S_p \cdot F_{p/c})^{-1}} \quad (153)$$

De la même façon s'écrit le flux radiatif net pour chaque élément. Connaissant les facteurs de forme  $F$  et les surfaces  $S$  de chaque composant, nous serons capables d'estimer la valeur de la seule inconnue  $J$ . Ainsi, nous déterminerons les pertes par radiation infrarouge pour chaque surface. Cette approche a été testée pour la serre vide mais les résultats ne sont pas présentés ici.

## 2.6. Facteurs de forme

Pour calculer les échanges par radiation entre les différentes surfaces, il est indispensable d'évaluer avec fidélité la surface considérée par cet échange, d'où l'introduction du concept de facteur de forme. Les facteurs de formes utilisés dans ce travail sont calculés par les corrélations issues de la littérature <sup>314,315,350,351</sup>.

Dans une première approche, on assimile le tube du PBR à un cylindre infini qui est en échange avec : une plaque rectangulaire plane (le sol), le ciel (pour le cas extérieur) ou les parois de la serre (pour le deuxième cas d'étude). Compte tenu des relations d'additivité et de réciprocité, les formules s'écrivent comme suit :

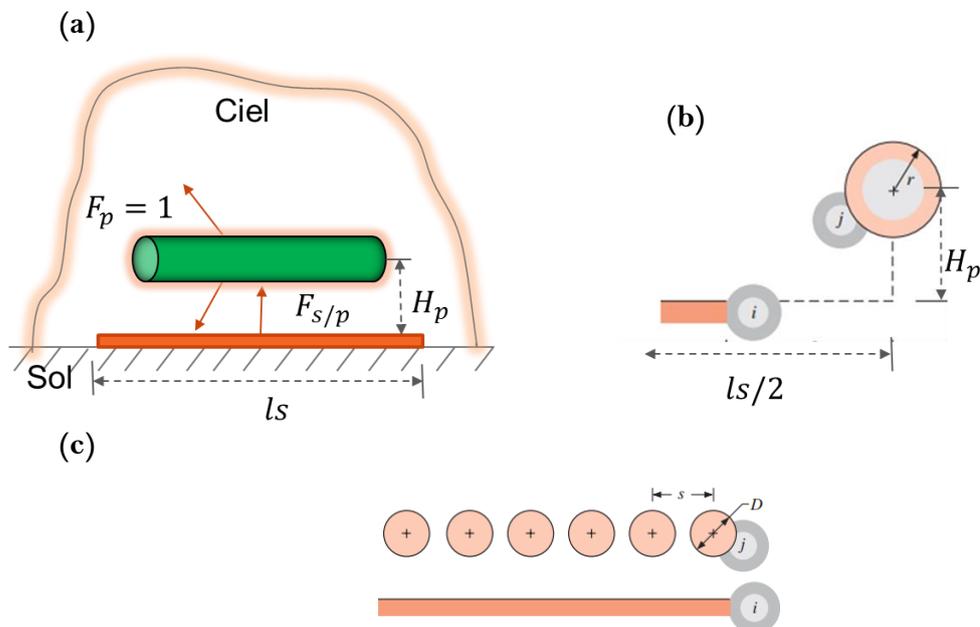
1- Cas PBR extérieur

$$F_{p/s} = \frac{1}{\pi} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{ls/2}{H_p}\right) \quad (154)$$

$$\begin{cases} F_{p/sky} + F_{p/s} = 1 \\ F_{s/p} + F_{s/sky} = 1 \end{cases} \quad (155)$$

$$S_s \cdot F_{s/p} = S_p \cdot F_{p/s} \quad (156)$$

Dans le présent scénario on a besoin uniquement de la valeur du  $F_{s/p}$  pour le calcul de la part du rayonnement du sol envers le PBR. Ce facteur dépend intrinsèquement des dimensions de notre système  $S_p$ , mais aussi de sa configuration, à savoir la hauteur du PBR par rapport au sol  $H_p$  et la largeur du sol  $ls$ .

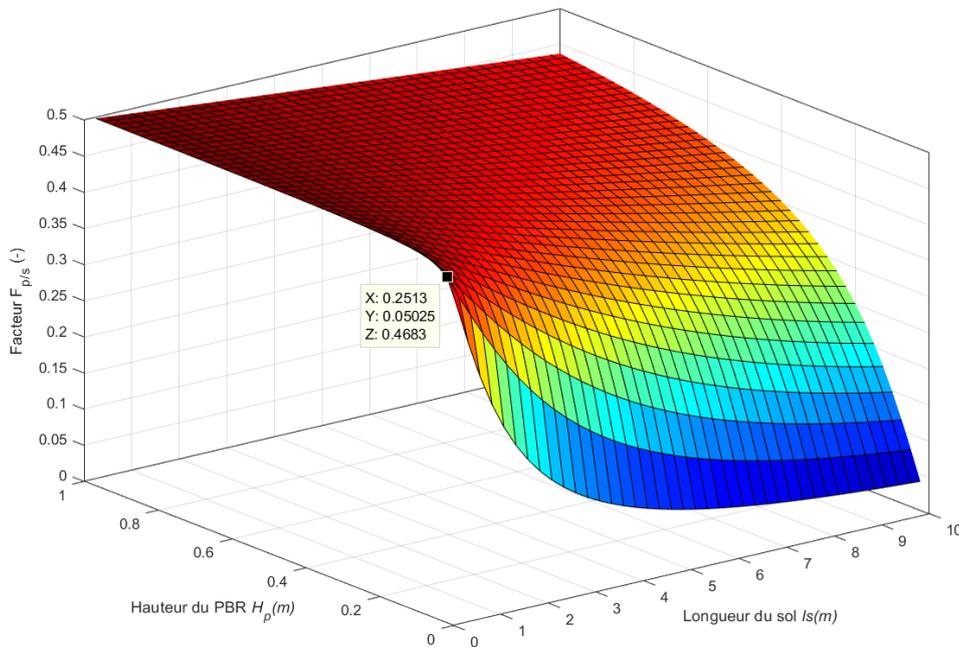


**Figure 66:** représentation schématique de : (a) la configuration du PBR extérieur et (b) une géométrie élémentaire (c) une rangée de tubes <sup>315</sup> pour le calcul des facteurs de forme.

Dans le cas de d'une rangée de tubes, le facteur de forme entre le sol et les tubes devient :

$$F_{s/p} = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{D}{s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{D}{s} \right) \tan^{-1} \left[ \left( \frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (157)$$

Le facteur de forme du PBR  $F_{p/s}$  est représenté en fonction de la largeur du sol considérée  $ls$  et de la hauteur de PBR par rapport au sol dans la **Figure 67**. À partir de l'Eq (154) nous pouvons en déduire que pour un sol de largeur infinie, le facteur  $F_{p/s}$  tend vers sa valeur maximale qui est de 0,5. Ce facteur est le facteur de forme de base à partir duquel nous déduisons tous les autres facteurs  $F_{s/p}$  en utilisant les équations de réciprocité et d'additivité. Par exemple, dans ce cas, la contribution énergétique du sol dans l'évolution de la température du milieu de culture est fonction de  $S_s \cdot F_{\frac{s}{p}}$ . Celle-ci peut être substituée par  $S_p \cdot F_{\frac{p}{s}}$ .



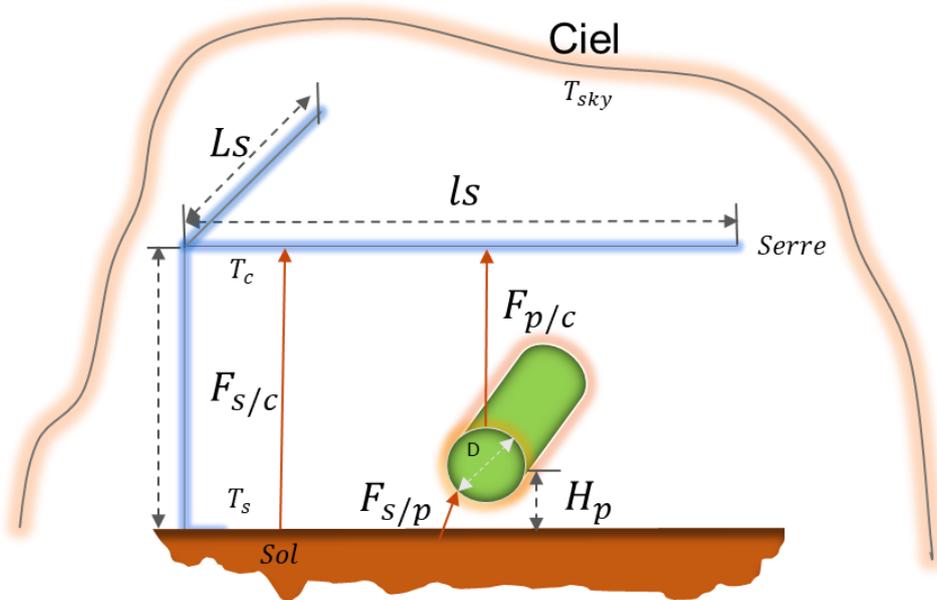
**Figure 67:** Facteur de forme du PBR  $F_{p/s}$ , en fonction de la largeur du sol  $ls$  et la hauteur du tube  $H_p$ ; et un point de calcul pour  $H_p=0,05$  m et  $ls=0,25$  m.

## 2- Cas du PBR dans la Serre

Dans ce cas de figure, nous avons 3 éléments : la couverture, le PBR et le sol. Les facteurs de forme qui interviennent dans le calcul des flux de rayonnement entre ces différentes surfaces sont :  $F_{c/s}$ ,  $F_{c/p}$ ,  $F_{s/p}$ . Les autres facteurs en découlent des relations d'additivité et de réciprocité. De la même manière que le cas précédent, le PBR est considéré comme un long

cylindre infini. La formule de son facteur de forme avec le sol  $F_{p/s}$  ne change pas (Eq (154)). Tous les autres facteurs s'écrivent en fonction de ce dernier comme suit :

$$\begin{cases} F_{c/s} + F_{c/p} + F_{c/sky} = 1 \\ F_{s/p} + F_{s/c} = 1 \\ F_{p/c} + F_{p/s} = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} F_{c/p} = \frac{S_p}{S_c} \cdot (1 - F_{p/s}) \\ F_{c/s} = \frac{S_s}{S_c} \cdot (1 - F_{s/p}) \\ F_{s/p} = \frac{S_p}{S_s} \cdot F_{p/s} \end{cases} \quad (158)$$



**Figure 68** : représentation schématique de la configuration du système PBR + serre avec les facteurs des formes respectifs.

## 2.7. Propriétés du système étudié

Désormais, nous disposons d'un outil de simulation thermique pour notre PBR (pour les deux configurations traitées) qui nous permet d'étudier sa réponse vis-à-vis de la variation dynamique des conditions ambiantes.

Dans notre première approche, le PBR en question est un long cylindre de 120 m où aucun effet d'ombrage de surface voisine n'est pris en compte. Évidemment, une autre configuration du PBR, par exemple en serpentin où l'effet de forme se manifeste, pourrait être envisagé comme une des perspectives de ce travail.

Afin de mener à bien les simulations, il est nécessaire de définir les différentes propriétés des matériaux qui constituent notre système (serre et PBR). La paroi du photobioréacteur est en PMMA (poly méthacrylate de méthyle acrylique), la couverture de la serre est en verre, quant au sol, n'ayant pas une idée précise sur la constitution du sol de la serre et suite à la variabilité des propriétés physiques et radiatives selon son type, nous l'avons considéré comme une terre légèrement humide sans végétation (cf. section 2.3). L'air intérieur de la serre est supposé ayant les mêmes propriétés que l'air extérieur (sans vapeur d'eau) suite à une ventilation naturelle assurant un brassage et un renouvellement d'air et ainsi un échange entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Les propriétés physiques et optiques de ces éléments sont renseignées dans le *Tableau 17*.

**Tableau 17 :** Caractéristiques des éléments considérés dans l'étude thermique à une température de 27°C <sup>315</sup>.

Élément	Propriété	Valeur	Unité
Eau	Masse volumique ( $\rho_e$ )	997	(kg.m <sup>-3</sup> )
	Albédo ( $Alb_e$ )	0,3	
	Absorbance dans le visible ( $\alpha_e$ )	0,7	
	Émissivité ( $\epsilon_e$ )	0,96	
	Viscosité dynamique ( $\mu_e$ )	0,001	(Pa.s)
	Capacité calorifique massique ( $Cp_e$ )	4181	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Conductivité ( $\lambda_e$ )	0,6	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
PMMA (paroi du PBR)	Transmittance solaire ( $\tau_p$ )	0,82	
	Transmittance dans le visible ( $\tau_p$ )	0,9	
	Conductivité ( $\lambda_p$ )	0,18	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Sol	Masse volumique ( $\rho_s$ )	2050	(kg.m <sup>-3</sup> )
	Absorbance dans le visible ( $\alpha_s$ )	0,65	-
	Albédo ( $Alb_s$ )	*	-
	Émissivité ( $\epsilon_s$ )	0,93	-
	Diffusivité thermique ( $a_s$ )	1,37.10 <sup>-7</sup>	(m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
	Capacité calorifique massique ( $Cp_s$ )	1840	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Conductivité ( $\lambda_s$ )	0,52	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Transmittance dans le visible ( $\tau_c$ )	0,8	

## Chapitre IV

Verre (couverture de la serre)	Capacité calorifique massique ( $Cp_c$ )	750	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Absorbance dans le visible ( $\alpha_c$ )	0,115	
	Masse volumique ( $\rho_c$ )	2500	(kg.m <sup>-3</sup> )
	Conductivité ( $\lambda_c$ )	1,4	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Émissivité ( $\epsilon_c$ )	0,915	
Ciel	Émissivité ( $\epsilon_{sky}$ )	0,8	
Air	Masse volumique ( $\rho_{Ae}$ )	1,16	(kg.m <sup>-3</sup> )
	Viscosité dynamique ( $\mu_{Ae}$ )	18,4·10 <sup>-6</sup>	(Pa.s)
	Capacité calorifique massique ( $Cp_{Ae}$ )	1005	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Conductivité ( $\lambda_{Ae}$ )	0,025	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )

\*Variables en fonction des caractéristiques du sol.

### 3. Résultats et discussions

Dans cette section, les résultats du modèle développé, sont discutés pour les deux cas testés séparément. Tout d'abord, nous présentons les profils temporels de la température sur plusieurs durées de simulation afin de prédire au mieux le comportement du PBR dans une culture réelle. Ensuite, nous analysons la contribution des flux de chaleur affectant chaque cas de figure afin de comprendre leur impact sur le bilan d'énergie du PBR. Nous concluons cette section par l'estimation des besoins énergétiques nécessaires pour maintenir la température dans la plage optimale de notre souche, spécialement lorsque les conditions météorologiques sont critiques. Nous notons que les données météo de *Toulouse pour l'année 2020* ont été sélectionnées pour réaliser les différents calculs.

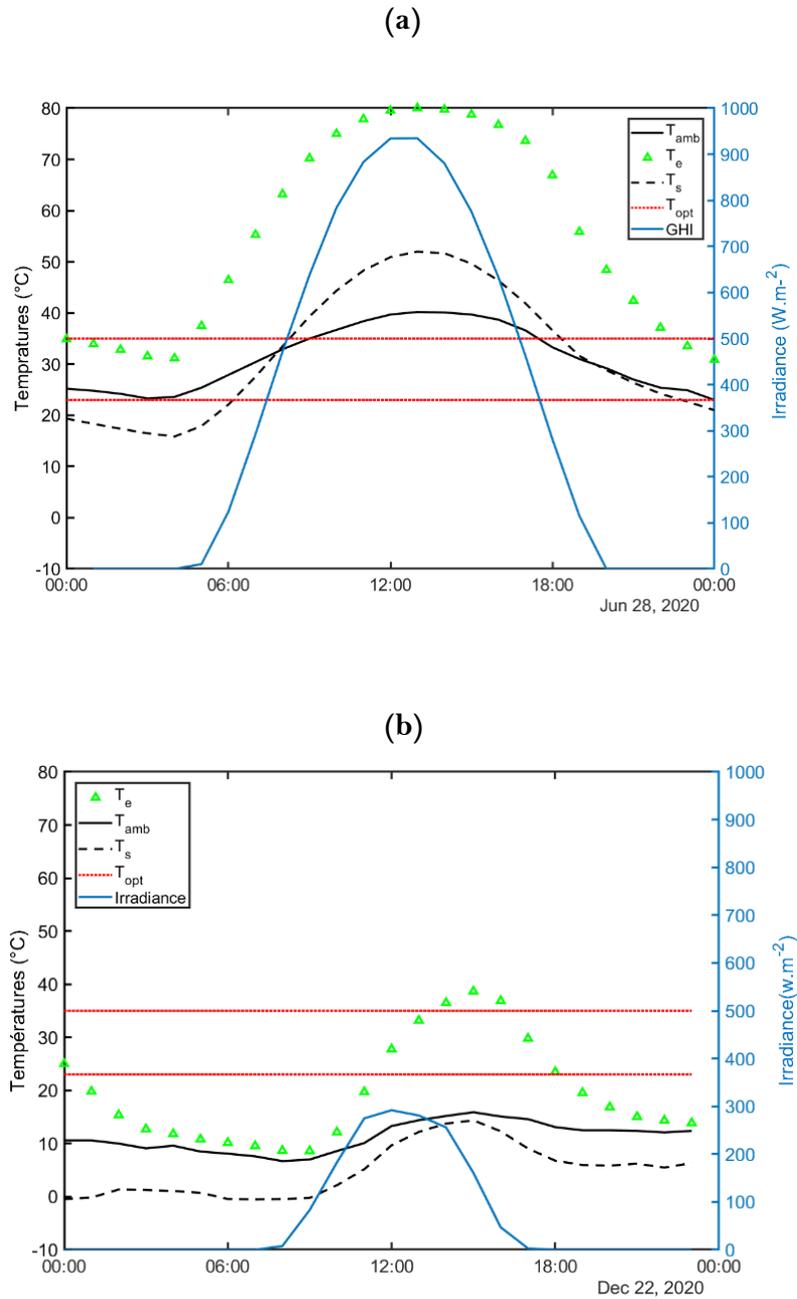
#### 3.1. Comportement thermique d'un PBR extérieur

##### 3.1.1. Simulations à l'échelle d'un ou plusieurs jours

Nous avons commencé le calcul avec des courtes durées de simulation, limitées à des journées d'été et d'hiver représentatives. Nous avons exécuté le programme pour une surface de sol infinie  $ls \rightarrow \infty$ . Dans les **Figure 69-(a)** et **(b)**, le profil de la température du sol  $T_s$  est illustré, avec la variation de la radiation solaire reçue sur une surface horizontale  $GHI$  et la température ambiante  $T_{amb}$  pour deux jours caractéristiques à Toulouse (jour de canicule *28 Juin 2020* et jour beau d'hiver *22 Décembre 2020* respectivement). Au cours de la journée, les températures ambiantes et du sol augmentent avec la radiation solaire, mais avec un certain retard pour le sol dû à son inertie, pour atteindre des valeurs crêtes respectives de  $15,9\text{ °C}$  et de  $14,38\text{ °C}$  en ce jour typique d'hiver, et de  $40\text{ °C}$  et  $50,2\text{ °C}$  en été. Cette dernière température peut s'expliquer par les valeurs élevées de la température de l'air, de la radiation solaire enregistrée ce jour-là, qui dépasse  $900\text{ W.m}^{-2}$  ( $GHI$ ), ainsi que par le grand nombre d'heures d'insolation. Ces profils de températures ne semblent pas surprenants pour une région située au sud-ouest de la France, dont le climat est qualifié de semi-océanique où les températures maximales **moyennes** en période estivale dépassent la barre de  $27\text{ °C}$  et celles **moyennes** minimales en hivers atteignent  $2,4\text{ °C}$  (selon les données de *météo France* entre 1981 et 2010).

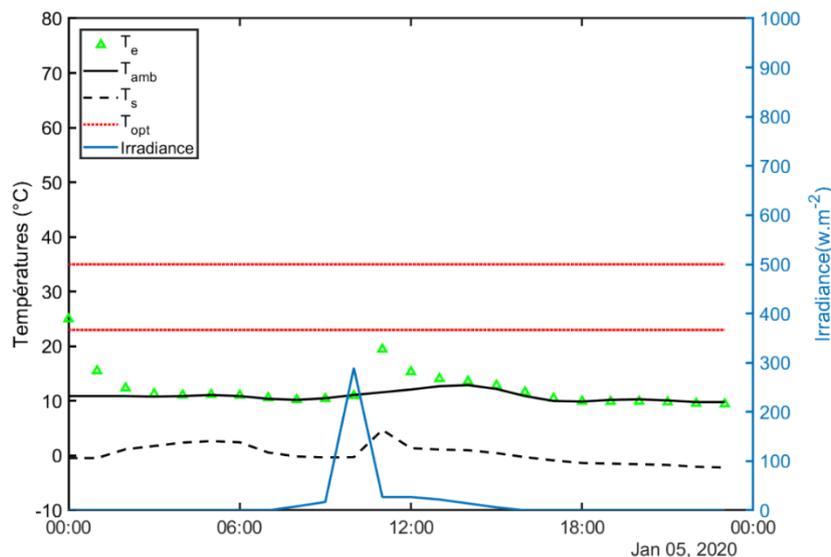
Le profil de la température dans le PBR, représenté par des marques (triangles) vertes, ainsi que la plage optimale de fonctionnement de notre système qui est entre  $[23-37]\text{ °C}$ . Les températures du milieu de culture pour les deux jours simulés semblent suivre les fluctuations diurnes des conditions environnantes (la température de l'air, du sol) avec un cycle jour-nuit plus accentué et des températures plus élevées dans la journée. Comme pour le sol, la réponse thermique du PBR au rayonnement solaire révèle un retard de 2 à 4h, selon le jour, qui s'explique par la bonne capacité thermique du milieu de culture à stocker l'énergie. D'autre part, il est à noter que la température maximale à l'intérieur du réacteur peut arriver jusqu'à  $80\text{ °C}$  lors d'une journée chaude d'été typique (soit le double de la température extérieure) et elle franchit légèrement la barre des  $37\text{ °C}$  dans l'après-midi d'une belle journée en hiver. Ce comportement n'est pas insolite pour un système de géométrie confinée (sans pertes par évaporation) exposé directement au soleil avec un rapport surface/volume considérable et une aire de collecte de lumière solaire conséquente. En effet, le PBR fonctionne dans ce cas comme

un système de stockage thermique en raison de sa masse thermique, et sa température est le plus souvent supérieure à celle de l'extérieur le jour, suite aux gains dus au rayonnement solaire et au sol.



**Figure 69** : Profils temporels des températures : ambiante (ligne noire pleine), du sol (ligne noire discontinue), du PBR (marques vertes) et des températures optimales minimale et maximale (ligne rouges pointillés) ainsi que l'irradiance solaire globale GHI (ligne bleue), pour un jour typiques d'été (a) et d'hiver (b), à Toulouse 2020.

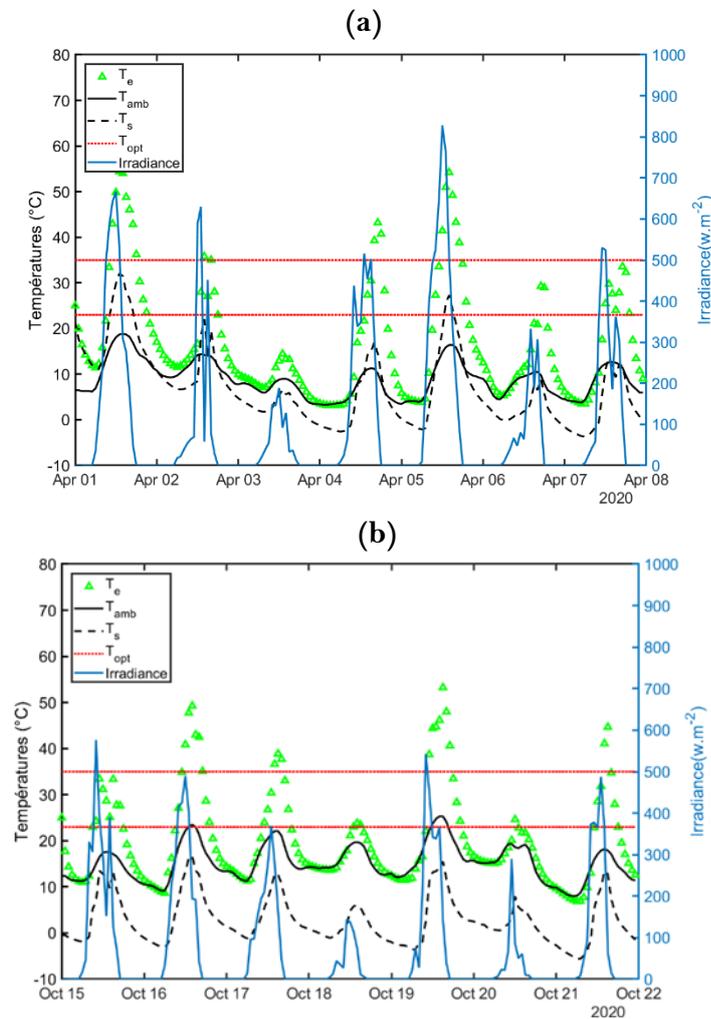
Pour illustrer cet effet important des radiations, nous avons mené une simulation, à titre d'exemple, lors d'une journée d'hiver très nuageuse où l'irradiance est très faible, donc l'effet des radiations qui chauffent la culture limité (cf. **Figure 70**). Sans surprise, les températures du réacteur résultantes diminuent jusqu'à ce qu'elles atteignent l'équilibre avec l'air ambiant où elles continuent à suivre les fluctuations de ce dernier tant qu'il n'y a pas de source de chaleur qui agisse sur le bilan énergétique du PBR pour compenser ses pertes. Pendant la nuit, et surtout en hiver, les températures de la culture baissent et restent en dehors de la gamme optimale pendant plus de 2/3 de la durée simulée, soit 17h/24h. À l'aube, elles se situent à environ 11°C en dessous de la valeur limite minimale. Cette diminution de température est principalement liée au transfert de chaleur depuis le PBR vers l'extérieur où les températures sont plus faibles. Un effet semblable se produit en été, mais dans une moindre mesure, car l'écart entre les températures demeure assez faible. Les régimes thermiques présentés ici sont discutés pour un jour de conditions extrêmes délibérément choisies pour simuler le comportement du réacteur étudié. Néanmoins, nous pouvons être confrontés à des conditions climatiques similaires et à une certaine fréquence sur les périodes estivale ou hivernale. Dans ces situations critiques, la croissance de notre souche d'intérêt est limitée voire complètement effondrée. Par conséquent des mesures de contrôle et de régulation thermique s'imposent ou un arrêt total de la culture peut être envisagé.



**Figure 70:** Profil journalier des températures de l'air ambiant, du sol, du réacteur et de la plage limite de fonctionnement, en jour d'hiver très nuageux ( $GHI_{max} = 280 \text{ W.m}^{-2}$ ).

Dans la **Figure 71-(a)** et **(b)**, des profils de température d'une semaine arbitraire au printemps (Avril, 2020) et en automne (octobre, 2020) ont été calculés afin de suivre le comportement d'une culture réelle opérant dans ces circonstances. Tout comme les deux jours testés précédemment, nous constatons encore une fois que l'apport d'énergie est principalement dû au rayonnement solaire, et que, pour les jours où le  $GHI$  dépasse 400 ( $\text{W.m}^{-2}$ ), les températures à l'intérieur du réacteur dépassent les 37 °C et qu'il est nécessaire de refroidir la culture. Paradoxalement, pour les jours où l'irradiance est faible ou pendant la nuit, l'air ambiant fournit de l'énergie thermique au réacteur en gardant les niveaux de température assez

proches. Cependant, cet apport reste relativement faible par rapport à celui du soleil, les températures sont alors plus faibles que la limite inférieure optimale ( $23^{\circ}\text{C}$ ), et le recours à un système de chauffage peut être souhaitable.



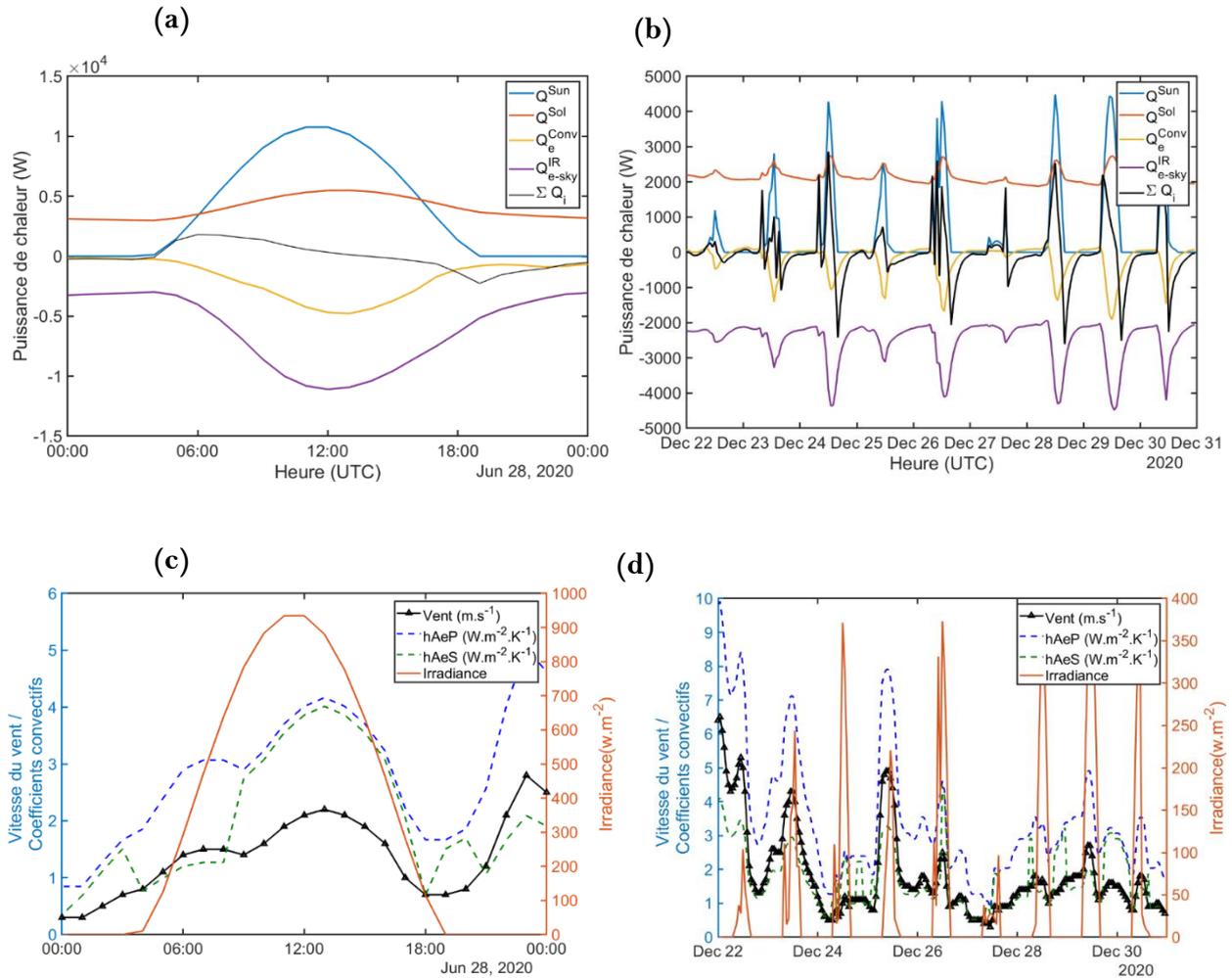
**Figure 71 :** Profils temporels des températures : ambiante (ligne noire pleine), du sol (ligne noire discontinue), du PBR (marques vertes) et des températures optimales minimale et maximale (ligne rouges pointillés) ainsi que l'irradiance solaire globale GHI (ligne bleue), pour une semaine (7 jours) de printemps et d'automne respectivement (a-b), à Toulouse, 2020.

Ainsi, nous pouvons visualiser numériquement, in fine, l'action de ces conditions météorologiques sur le fonctionnement du PBR en cas d'absence de régulation, et leur impact sur la croissance de microalgues a posteriori. Là encore, les résultats de nos simulations pourraient répondre à un questionnement phare pour les producteurs de spiruline, ou de microalgues en général, concernant la réponse des cultures extérieures en PBR fermés face aux fluctuations des conditions environnantes et la présence éventuelle de cas critiques pour la souche cultivée.

Suite à l'examen rapide des exemples précédents, il apparaît essentiel d'analyser la contribution des échanges thermiques affectant le bilan d'énergie de notre système dans leur individualité. Ceci nous permettra de comprendre au mieux le rôle de chaque élément considéré dans cette étude sur l'évolution de la température dans le réacteur et d'ouvrir une

voie d'éventuelle d'amélioration puis d'optimisation de la gestion thermique en se basant sur le calcul des puissances échangées. Dans le prolongement de la synthèse des résultats, les flux thermiques transférés depuis et vers notre PBR extérieur sont calculés pour un volume de culture de  $0,274 \text{ m}^3$  et sont présentés dans la **Figure 72-(a)** et **(b)** pour les mêmes jours typiques d'été et d'hiver. Au total, il y a quatre mécanismes d'échange principaux qui gouvernent le bilan énergétique du réacteur comme nous l'avons déjà évoqué dans la section 2.4. Les autres flux thermiques impliqués dans la détermination de la température du sol extérieur ne sont pas présentés ici.

L'allure dynamique de ces flux montre que, pendant la journée, les gains de chaleur suivent la course journalière de l'irradiance solaire. Ils sont majoritairement le résultat de l'absorption de cette énergie provenant directement du soleil,  $Q^{sun}$  qui, par exemple, dépasse  $5\text{kW}$  en été (contre  $3\text{kW}$  en hiver), et de celle arrivant du sol  $Q^{Sol}$ , combinant l'émission de la radiation infrarouge de ce dernier et la réflexion d'une fraction de la radiation solaire. Cette dernière est 1,16 fois supérieure que  $Q^{sun}$  en été et du même ordre de grandeur que  $Q^{sun}$  en hiver. Ces valeurs de puissances ne sont données qu'à titre indicatif en vue de fournir des informations sur l'ampleur des apports énergétiques qui compensent les pertes par convection et par radiation avec la voûte céleste dans le bilan du réacteur, et pour justifier également la montée rapide en température du milieu de culture rapportée antérieurement.



**Figure 72 :** (a) et (b) les profils journaliers des flux de chaleur impliqués dans le calcul de la température de la culture. (c) et (d) l'évolution temporelle quotidienne des conditions météorologiques en été et en hiver respectivement.

Durant la nuit, la capacité du sol à resituer l'énergie stockée se manifeste à travers son flux thermique qui se maintient non nul et à une valeur positive reflétant ainsi l'échange par émission radiative en infrarouge. En été, ce flux est tellement important, suite aux fortes températures de la surface du sol (**Figure 72-(a)**), qu'il corrige les pertes depuis le réacteur et équilibre sa température. Cependant, en hiver où les températures ambiantes baissent, les différences entre les températures nocturnes du ciel ( $T_{sky}$ ) et celles du réacteur ( $T_e$ ) sont significativement élevées, ce qui mène à une forte décharge de chaleur depuis le réacteur vers l'extérieur par rayonnement en infrarouge provoquant son refroidissement. Cet échange thermique est connu sous le nom de refroidissement radiatif ou passif et il explique la descente de la température de l'eau en dessous de celle de l'air dans certains cas en hiver.

Nous joignons aux flux thermiques, deux figures **Figure 72-(c)** et **(d)** pour illustrer la variabilité des paramètres extérieurs qui sont intrinsèquement mis en jeu dans le calcul de ces flux, à savoir la vitesse du vent et l'irradiance solaire (*GHI*). Les coefficients de convection forcée avec la surface du sol et celle du réacteur qui en découlent, sont également présentés sur les mêmes figures. Le premier constat que l'on peut faire est, qu'en ce jour d'été, les vitesses

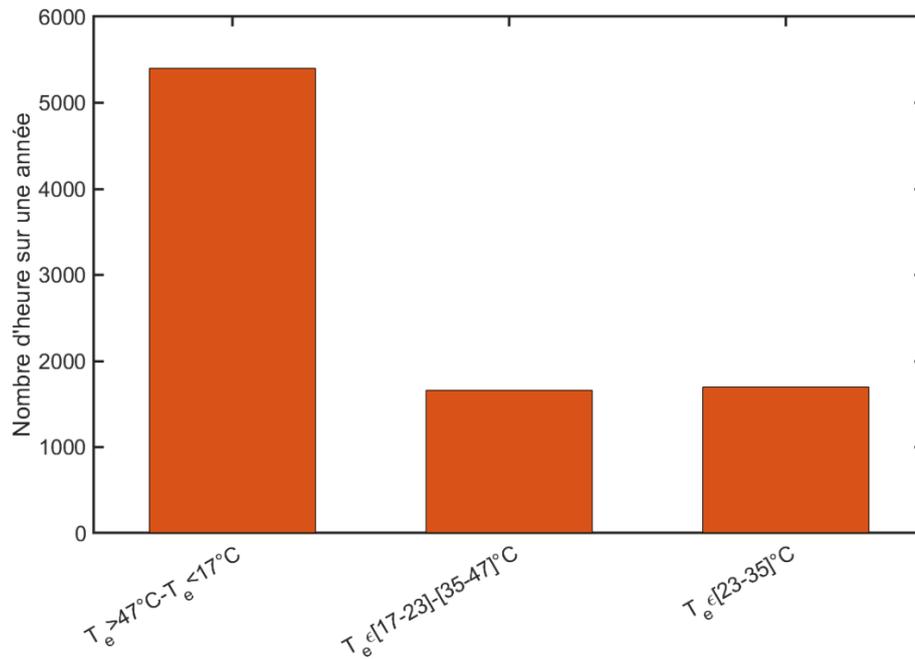
du vent sont supérieures à leurs homologues en hivers. Par conséquent, les valeurs de ces coefficients convectifs, qui dépendent des caractéristiques du vent (vitesse et orientation), varient dans une fourchette plus étendue en été de 1,8 à 11 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) qu'en hiver 1,1 à 9 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). De plus, nous notons un écart entre les valeurs des deux coefficients en question ( $h_{Ae/S}$  et  $h_{Ae/P}$ ) légèrement plus prononcé en été qu'en hiver. Par contre, à ce stade, il n'est pas trivial de justifier cette différence, ni de valider les valeurs obtenues de ces coefficients car, d'une part, la géométrie des deux surfaces d'échange en question (sol et PBR) est différente, ce qui implique des corrélations de calcul distinctes (voir partie convection 2.2), et d'autre part, nous ne disposons pas de données de mesure in-situ de ces coefficients. De fait, nous admettons que ces résultats sont la conséquence des corrélations empiriques utilisées en fonction de la situation rencontrée dans notre étude.

Ces résultats servent d'appui supplémentaire pour comprendre les évolutions temporelles de la température du PBR présentées précédemment. Ainsi, nous pouvons en conclure que nos simulations sont capables de traduire la réponse thermique du PBR en réponse à son environnement, quelles que soient les conditions confrontées. De plus, les bilans de chaleur bouclent bien et l'énergie est conservée, à savoir que l'évolution de la température est cohérente avec les puissances de chaleur gagnées et perdues par le réacteur.

### 3.1.2. Simulations à l'échelle d'une année

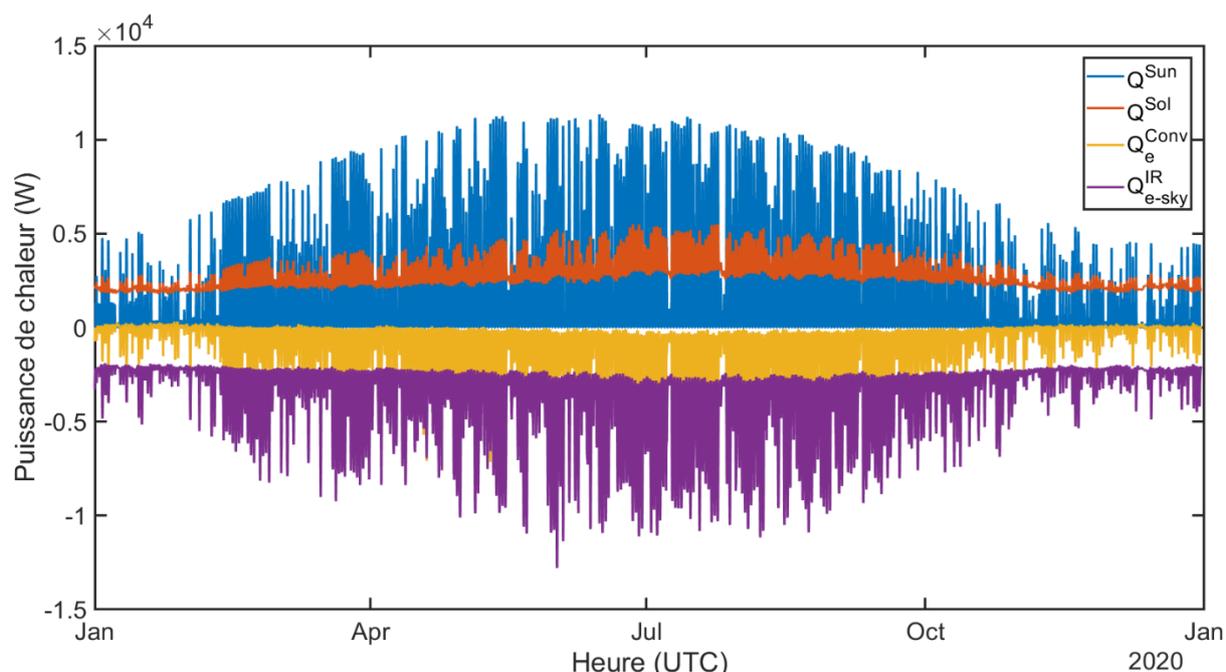
Maintenant, nous procédons à une simulation sur un an pour examiner l'évolution de la température du PBR. Pour rappel, les températures élevées ne sont pas les seules à nuire à la croissance des microalgues, les températures très basses le sont également. En d'autres termes, les fluctuations de température en dehors de la zone optimale affectent le rendement de la culture. C'est pourquoi les cultures annuelles sont limitées généralement par les températures extrêmes du système de culture. Dans cette analyse, les distributions horaires de la température du milieu de culture seront présentées autrement : Trois plages de température sont définies pour étudier les régimes thermiques du PBR : la plage optimale pour la croissance  $[23-37] \text{ }^\circ\text{C}$ , les plages critiques mais tolérables  $17 < T_e < 23 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $37 < T_e < 47 \text{ }^\circ\text{C}$  où la croissance biologique est réduite fortement (inhibée) et la plage d'effondrement irréversible  $47^\circ\text{C} > T_e$  et  $T_e < 17 \text{ }^\circ\text{C}$  où les microalgues meurent. Les résultats de simulation ont été traités de manière à compter le nombre d'heures pendant lesquelles la température de la culture est placée dans chacune des plages définies, puis présentés sous forme d'histogramme dans la **Figure 73**, afin de visualiser et d'identifier au mieux les risques éventuels que peut rencontrer une culture tout au long de l'année.

Selon les résultats, le nombre d'événements de températures extrêmes est sévèrement élevé, soit plus que 4 fois supérieur aux événements où la température est dans la plage optimale. Cela n'est pas seulement vrai pour les conditions météorologiques extrêmes, car pendant 80,6 % de l'année entière, la température du PBR se situe en dehors de la plage tolérée. Ceci implique qu'une culture annuelle, qui est soumise à des fluctuations environnementales typiques comme celles étudiées ici, est sujette le plus souvent à des températures nocives tant en phases chaudes que froides.



**Figure 73 :** Histogramme en nombres d'heures pour les plages de températures de la culture.

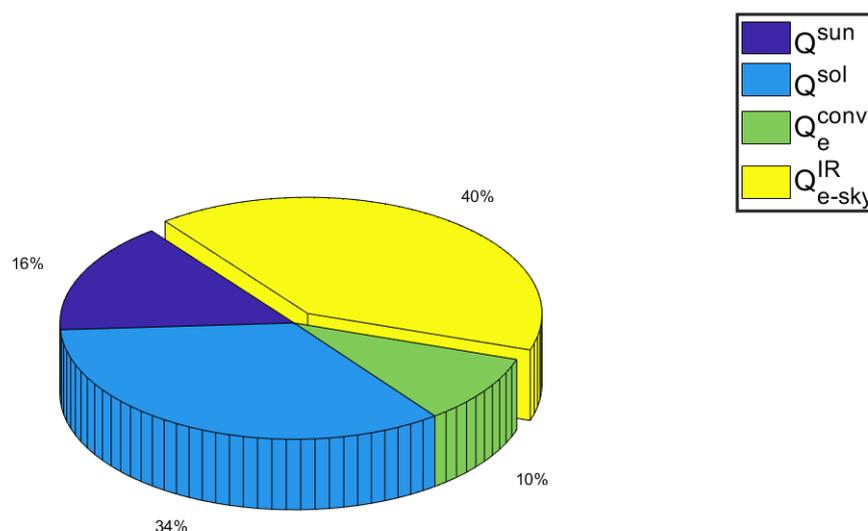
À l'appui de ces résultats, les profils temporels annuels des flux de chaleur du réacteur sont présentés dans la **Figure 74**. Comme déjà indiqué dans la section précédente, pendant la journée, le flux solaire  $Q^{sun}$  et le flux qui provient du sol  $Q^{sol}$  (qui combine la radiation en infrarouge et la réflexion de lumière solaire) sont les principaux contributeurs au chauffage du réacteur en hiver mais aussi à sa surchauffe pendant l'été. Les courbes montrent des pics individuels de différentes amplitudes correspondant aux valeurs maximales de l'irradiance quotidienne capturées par notre système. Par exemple, un gain maximal de 16,68 kW est enregistré lors d'un jour de forte irradiance en juillet. Sur la même période annuelle, des courbes symétriques de pertes de chaleur par radiation du réacteur à grandes longueurs d'ondes vers l'atmosphère  $Q_{e-sky}^{IR}$  et par convection avec l'air ambiant  $Q_e^{conv}$  sont illustrées sur le même graphique. Ces déperditions thermiques ont un impact mineur, en été, sur le bilan de chaleur par rapport aux gains importants de l'énergie solaire. Par conséquent, la somme globale des flux reste positive et la température continue à augmenter. D'autre part, en l'absence du soleil, ce sont ces pertes qui prennent le dessus car elles ne dépendent pas des conditions d'irradiance, mais elles suivent plutôt l'évolution de l'écart entre la température du PBR et son environnement. La puissance maximale du flux de radiation IR émise par le réacteur s'avère être du même ordre que la radiation solaire, soit 12,79 kW (en valeur absolue) au 1<sup>er</sup> juin à midi solaire, lorsque la température dans la culture atteint les 70 °C. Cela implique que la culture peut libérer autant de chaleur qu'elle en absorbe. Cette analyse des flux illustre le comportement thermique de la culture décrit ci-avant.



**Figure 74** : Profils temporels annuels des flux thermiques les plus importants impactant le photobioréacteur.

Un camembert illustrant les moyennes annuelles de chaque flux de chaleur gagnés et perdus (en valeur absolue) par le réacteur est présenté sur la **Figure 75**. De ces résultats, nous retenons, qu'en moyenne, l'échange radiatif net entre le réacteur et l'atmosphère constitue le flux le plus important des pertes du réacteur. Quant aux pertes par convection forcée, liées aux conditions extérieures, ils contribuent en moyenne à 10 % du bilan thermique du réacteur sur une année, ce qui est relativement faible par rapport aux autres contributions.

Concernant les flux de gain, le flux du sol incluant la radiation en infrarouge et les différentes réflexions considérées vient en première position. Il représente la majeure source de chaleur avec une contribution de 34 % à l'énergie principalement gagnée par le réacteur. Quant à l'énergie solaire directement absorbée par la culture, elle participe à seulement 16 % (uniquement contribution en journée soit 4326 h sur une année) dans le bilan thermique total annuel. Nous rappelons également, que cette énergie est calculée à partir des données réelles de *DNI* et *DHI* d'un ciel en présence de nuages, par conséquent le rayonnement solaire direct reçu est moindre par rapport au cas d'un ciel totalement dégagé en continue.



**Figure 75 :** Répartition de la contribution moyenne annuelle des flux impactant le comportement thermique du PBR.

Remarques :

- Cette analyse de contribution des différents mécanismes thermiques impactant le comportement du réacteur se base sur les flux de chaleur échangés (exprimées en  $W$ ) pour les dimensions de notre système étudié. Bien que ces flux soient proportionnels à la surface latérale du réacteur, certains d'entre eux font appel à des facteurs de forme suite à la géométrie cylindrique du réacteur. Par conséquent, nous avons jugé qu'il serait moins représentatif de les exprimer en unité de surface cultivée comme cela est couramment rapporté dans la littérature pour des configurations PBR plus simples.
- Nous notons que la moyenne annuelle des flux est calculée par la pondération des valeurs absolues des puissances, représentées dans la **Figure 75**, par une année (i.e.  $\frac{\sum Q_i \cdot dt}{\sum dt}$ ) afin de comprendre la contribution des différents échanges thermiques du réacteur avec son environnement.

Dans le **Chapitre III**, dans certaines limites, nous avons vu que plus la quantité de lumière captée et transférée dans le volume du PBR est importante plus la productivité de biomasse est élevée. En contrepartie, nous constatons ici qu'une irradiance qui dépasse  $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  soit ( $1041 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) s'accompagne d'une élévation néfaste de la température du milieu de culture, ce qui nuit aux performances du réacteur. En effet, malgré le fameux caractère presque thermophile de notre souche d'intérêt, lui permettant de supporter les conditions difficiles de hautes températures, sa culture continue en extérieur semble infructueuse dans les conditions du site géographique testé ici. Par conséquent, l'appel à des systèmes de chauffage et de refroidissement est indispensable si l'on souhaite garantir un fonctionnement annuel optimal du réacteur et s'affranchir des problèmes d'inhibition ou d'effondrement total de la culture.

### 3.2. Comportement thermique d'un PBR sous une serre

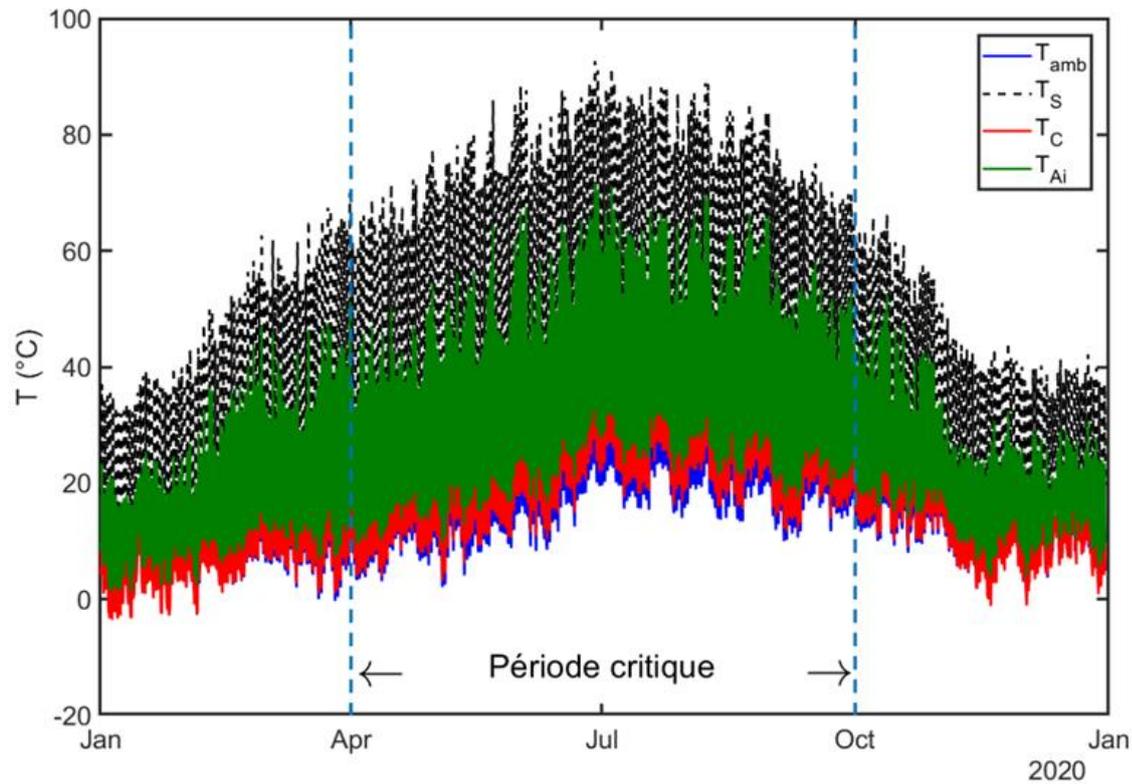
Le modèle de PBR avec serre a été exécuté en utilisant le même fichier météo que celui utilisé pour le PBR extérieur. Dans une première approche, des dimensions arbitraires de la serre ont été choisies pour réaliser les calculs soit une largeur  $ls=1\text{m}$ , une hauteur  $Hs=1\text{m}$  et une longueur égale à la moitié de celle du tube  $Ls=60\text{m}$  (i.e. la partie tubulaire du réacteur est disposée sous forme de U).

Nous nous sommes proposés de mener une simulation sur une année, dans un premier temps, pour une configuration de serre vide afin d'analyser la distribution des températures dans son microclimat. Les résultats sont présentés dans la **Figure 76** avec un zoom sur un jour d'hiver en Janvier et un jour d'automne en Novembre **Figure 77**. Ensuite, nous augmentons le degré de complexité de cette analyse en intégrant le PBR dedans.

#### 3.2.1. Serre vide

Le premier constat que l'on peut faire, à partir de la **Figure 77**, est que la température intérieure de la serre ne descend pas en dessous de celle de l'air extérieur, c'est-à-dire que l'air à l'intérieur reste plus chaud du fait des différents apports thermiques internes et de la faible fréquence du renouvellement d'air avec l'atmosphère extérieure. La température maximale de l'air interne atteint  $60\text{ }^\circ\text{C}$  et plus en plein été quand le rayonnement solaire est trop important. La température de la couverture totale de la serre (i.e. parois latérales et toiture), se situe généralement entre les deux températures externe et interne. Le sol étant l'élément le plus chaud dans la serre, les résultats de simulation montrent que sa température dépasse  $40\text{ }^\circ\text{C}$  en mi-saison (début de printemps et fin d'automne) et peut franchir les  $80\text{ }^\circ\text{C}$  en été lorsque l'irradiance solaire est élevée ( $>900\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Il en résulte que le sol est un contributeur majeur au flux de chauffage dans de la serre. Ces circonstances constituent un risque d'effondrement total des cultures en général, et de la spiruline en particulier. Il est alors impératif d'éviter ces cas défavorables, en analysant les coûts qui mettent en balance l'arrêt total de la culture en cette période, l'ajout d'une climatisation/ventilation naturelle ou artificielle pour la dissipation de ce surplus d'énergie ou un système de régulation directe de la température de la culture.

Si nous analysons plus précisément le comportement de la serre vide, le premier constat que l'on peut faire est qu'il serait plus judicieux de faire des cultures seulement pendant les périodes où le microclimat de la serre semble bénéfique pour notre souche. Cela correspond exclusivement à deux saisons de l'année, à savoir les périodes hivernales et automnales, représentées par la plage délimitée de la distribution temporelle de la température dans la **Figure 77**. Une solution possible pourrait être d'ouvrir la serre, pendant cette période critique, de manière à assurer une bonne circulation de l'air et des conditions intérieures similaires à celles de l'extérieur, puisque le PBR placé en extérieur fonctionne dans des conditions plus souvent acceptables.



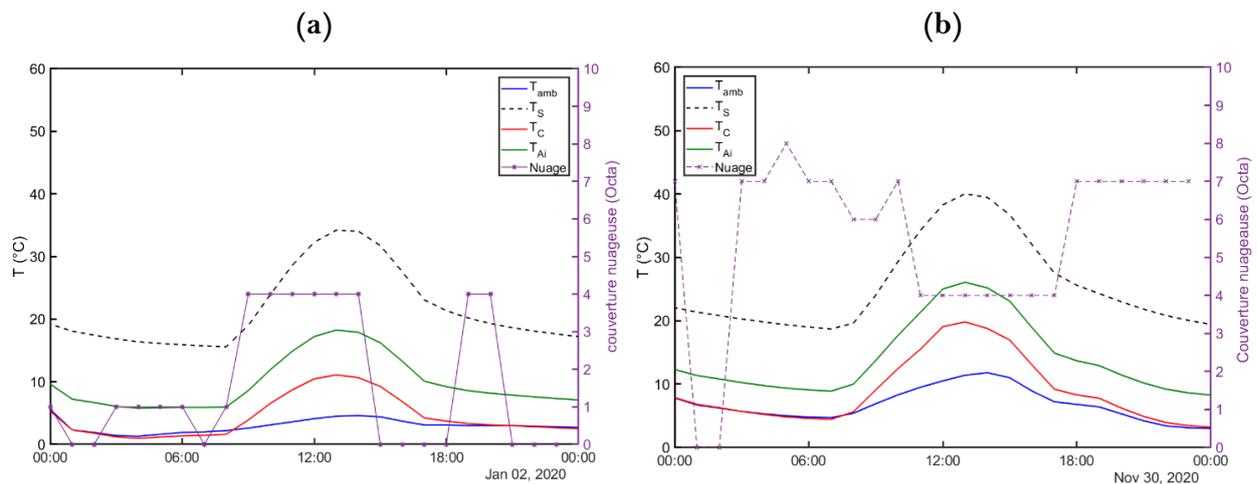
**Figure 76 :** Distribution horaire de la température de la paroi, de l'air intérieur et du sol de la serre vide sur toute l'année (temps en UTC).

Des zooms sur une échelle de temps plus courte (échelle d'une journée) sont présentés sur les **Figure 77-(a)** et **(b)**. Les résultats sont dérivés de la simulation annuelle, ils présentent l'évolution du microclimat dans la serre ainsi que les paramètres climatiques extérieurs pour deux jours typiques contrastés : en hiver avec un ciel relativement dégagé (*2 Janvier 2020*) et à la fin de l'automne avec une nuit à ciel couvert (*30 Novembre 2020*) respectivement.

Nous constatons que pour les deux nuits, le profil de la température de la couverture de la serre suit l'évolution de la température ambiante. Une légère différence est observée entre les deux profils pour la nuit claire au lever du jour (**Figure 77-(a)**) Ceci est expliquée par les pertes dues aux importantes radiations infrarouges entre la paroi de la serre et le ciel dont la température ( $T_{sky}$ ) est beaucoup plus froide à faible nébulosité. Ce phénomène est moins visible pour le cas de la nuit nuageuse (**Figure 77-(b)**) où la nébulosité est relativement élevée et la température extérieure et celle du ciel sont moins faibles, ce qui atténue la différence avec la température de la paroi et donc diminue les pertes par échanges radiatifs. Quant à l'air interne, il n'est pas affecté par la présence ou l'absence des nuages, sa température suit l'évolution de la température de la couverture et celle du sol. Elle décroît subtilement mais se maintient au-dessus de l'air extérieur au cours de la nuit avec un écart d'environ 5 °C en moyenne.

Pendant les deux journées, bien que les températures extérieures soient basses, les compartiments de la serre sont plus chauds. Les températures de la couverture, de l'air intérieur et du sol suivent des schémas similaires avec des amplitudes différentes. Les simulations enregistrent un écart maximal entre la température intérieure et extérieure de la

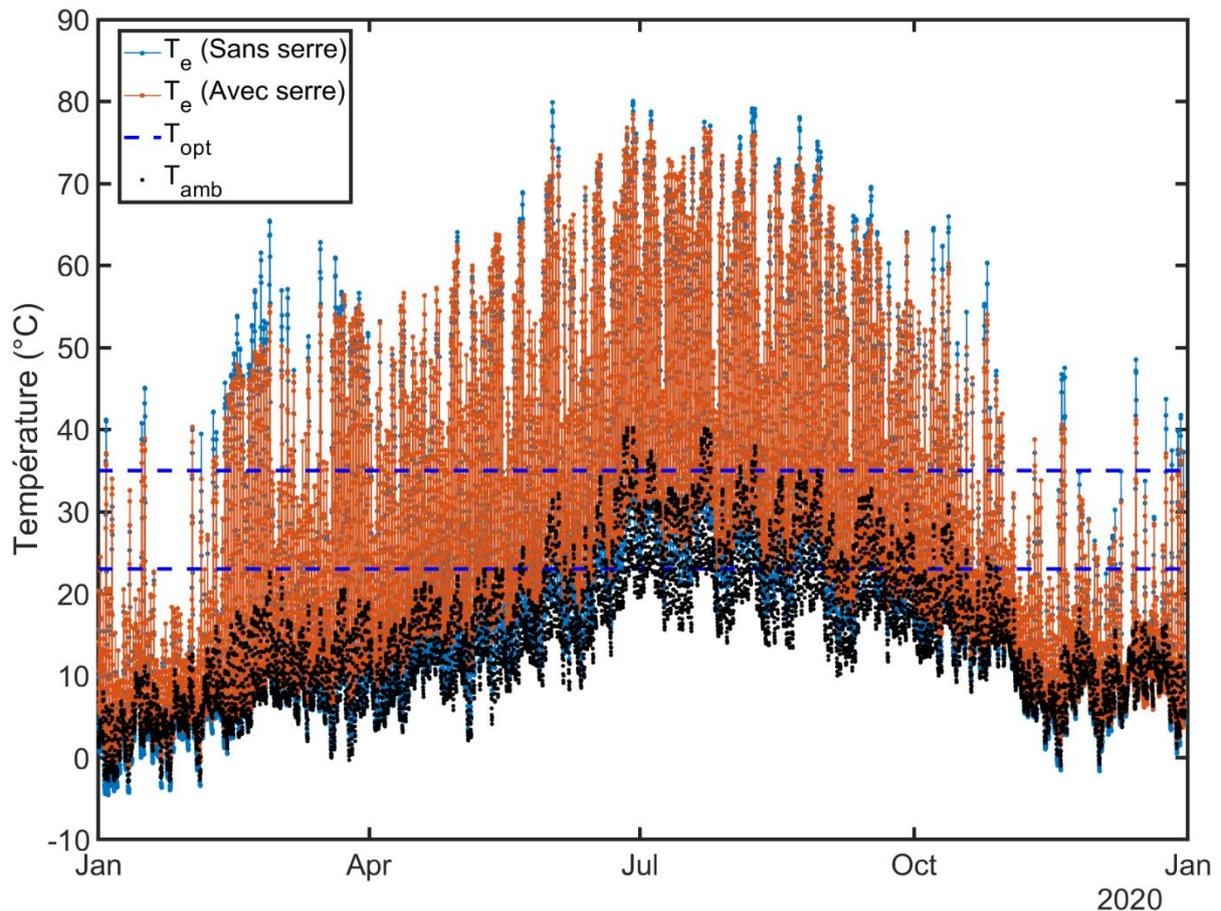
serre de 13,76 °C et de 14,6 °C en début d'après-midi pour la journée d'hiver et d'automne respectivement. Comme nous l'avons précédemment expliqué, la majeure partie de l'énergie de chauffage fournie à la serre provient du sol, car ce dernier absorbe directement l'irradiation solaire  $GHI$ . Il se réchauffe rapidement et émet ensuite vers son environnement (c'est-à-dire l'air interne et la couverture) par rayonnement à ondes longues et par convection. Contrairement à l'air interne de la serre, qui ne participe qu'aux échanges par convection avec les surfaces voisines, la paroi absorbe, à son tour, une fraction de l'énergie solaire captée, ce qui lui permet d'augmenter, mais de façon moindre que le sol, sa température au cours de la journée. En effet, ces températures élevées dans la serre s'expliquent principalement par le taux de renouvellement d'air, par infiltration ou ventilation naturelle, choisi pour notre simulation (Nombre d'échange d'air 1 h<sup>-1</sup>) et l'impact du rayonnement solaire et infrarouge absorbé par les surfaces de ses compartiments (i.e. sol et couverture). Les écarts des températures observés entre les deux journées présentées ici, sont dus aux conditions climatiques extérieures différentes, notamment les températures ambiantes, les vitesses du vent et l'irradiance solaire qui affectent le microclimat sous la serre.



**Figure 77.** Distribution horaire de la température de la paroi, de l'air intérieur, du sol de la serre vide et la nébulosité (a) Pendant un jour d'hiver et (b) Pendant un jour d'automne.

## 3.2.2. PBR sous serre

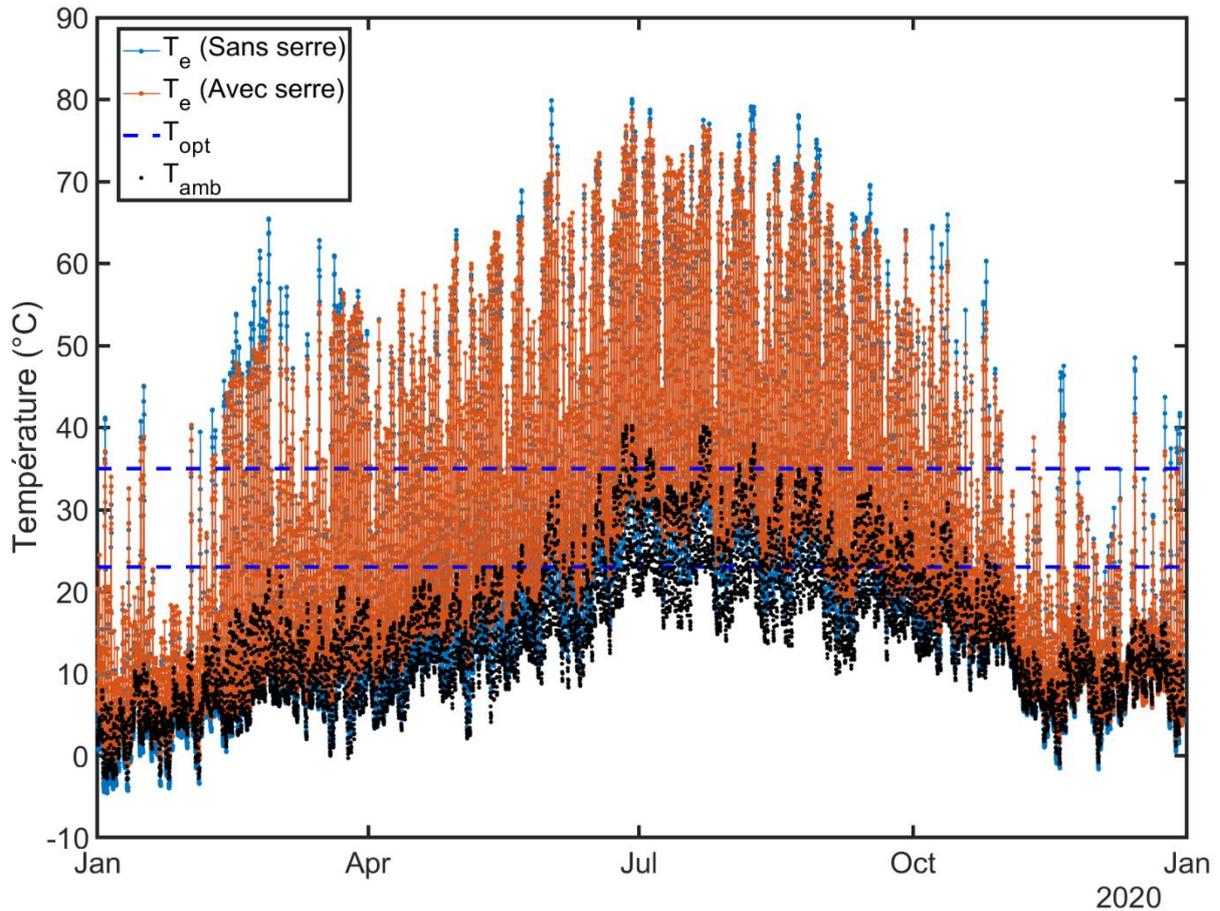
La



**Figure 78** présentent la variation de la température d'un PBR extérieur et son homologue sous la serre pendant une année. La distribution quotidienne de ces températures a été particulièrement étudiée pour deux jours spécifiques contrastés en termes d'irradiance sur une journée parfaitement ensoleillée et une autre plus sombre, afin de mieux représenter le comportement de chaque configuration et de mettre à l'épreuve la capacité de la serre à agir sur la réponse du PBR aux fluctuations météorologiques intenses de l'extérieur.

Avant d'aborder l'analyse des profils journaliers, nous constatons clairement, à partir des résultats de la simulation des deux cas avec/sans serre, que les basses températures extérieures, en particulier les températures minimales nocturnes, affectent davantage le PBR extérieur que celui sous la serre. De toute évidence, les températures du PBR sous serre restent généralement plus élevées que celles du PBR extérieur quand l'air ambiant est froid. En revanche, lors des journées chaudes les températures internes de la serre augmentent davantage ce qui impliquerait normalement une surchauffe de la culture en conséquence. Quand bien même le cas serait, les températures maximales dans le PBR extérieur sont, pour certains jours, supérieures à celles de son homologue dans la serre. En effet, nous remarquons des pics pour la configuration exposée directement aux conditions extérieures qui atteignent des valeurs de 80 °C et 65,4 °C (*vs* 77 °C et 55 °C sous serre) pendant la période estivale et hivernale respectivement. À titre indicatif, les écarts absolus sur les températures journalières

maximales et minimales entre les deux installations ont une moyenne annuelle de 4,5 °C et 3,2 °C respectivement.

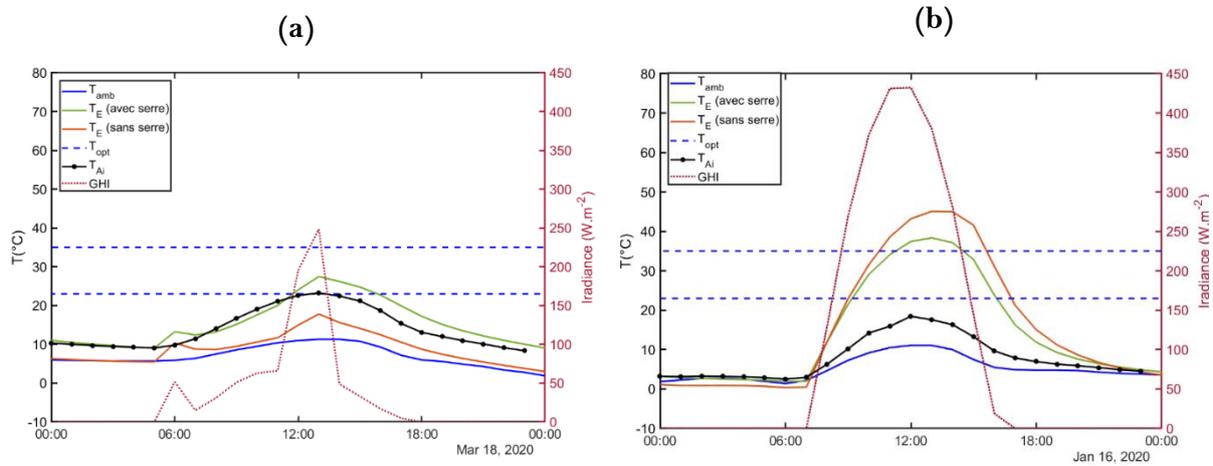


**Figure 78 :** Comparaison de l'évolution temporelle de la température du photobioréacteur sous et sans serre pour un fonctionnement annuel.

Dans les deux **Figure 79**, les dynamiques thermiques de la culture sont présentées pour une petite échelle de temps. Tout d'abord, les températures du milieu dans les deux configurations ont une évolution similaire, présentant un pic au moment du sommet de l'irradiance (ou décalé d'une heure environ), mais avec un écart moyen variable d'un jour à l'autre.

En l'absence ou à de faibles valeurs d'irradiance solaire, ce qui est le cas d'un jour typique en Mars 2020 (cf. **Figure 79-(a)**), le photobioréacteur extérieur reste plus frais que son équivalent dans la serre pendant la journée. Cette situation n'est pas surprenante puisque l'air intérieur de la serre agit comme un tampon thermique en contribuant au réchauffement du réacteur et au maintien de sa température au-dessus de celle extérieure (différences maximales d'environ 16 °C avec l'air ambiant et de 10 °C avec le PBR extérieur). Cela signifie qu'à l'extérieur, les gains d'énergie solaire demeurent insuffisants pour compenser les pertes par convection avec l'air ambiant à basse température. Simultanément, ces mêmes gains permettent d'augmenter la température de la culture dans la serre pour atteindre la gamme optimale et d'y rester pendant au moins 4 heures avant de redescendre. Cela montre la valeur ajoutée de la serre dans la création d'un microclimat moins agressif pour les microalgues en atténuant les effets

des conditions météorologiques extérieures difficiles (températures extérieures très basses ou irradiation solaire élevée).



**Figure 79 :** Confrontation de l'évolution temporelle de la température du photobioréacteur avec et sans serre (a) et (b) lors d'un jour de faible et de forte irradiance solaire respectivement (temps en UTC).

Lors de la journée ensoleillée du mois de *Janvier 2020* (cf. **Figure 79-(b)**), la situation est inversée et c'est la culture du PBR en plein air qui devient plus chaude que celle du PBR en intérieur. Cet écart entre les températures des deux configurations en question est plus marqué au milieu de la journée (entre 10h00 et 16h00 UTC). Cela s'explique par le fait que la culture extérieure est celle qui absorbe le plus de rayonnement, étant donné l'exposition directe du PBR au soleil, et dont la température augmente le plus. En revanche, le PBR intérieur ne reçoit que la radiation transmise par les parois de la serre, soit 20 % de moins que le cas extérieur (cf. coefficient de transmission du verre dans le **Tableau 17**). Par conséquent le rayonnement absorbé est moindre, ce qui réduit l'augmentation de la température de la culture. À cela s'ajoute le fait que l'air dans la serre est relativement plus frais que dans le cas précédent, ce qui n'apporte pas un chauffage supplémentaire dans ce cas de figure. Ainsi, ces deux derniers graphiques discutés ici, servent d'illustrations représentatives de certains pics enregistrés dans la **Figure 78** et soutiennent le discours tenu précédemment.

Pour illustrer différemment le comportement thermique de la serre, une analyse de contribution des différents flux de chaleur impliqués dans l'évolution de son microclimat est réalisée. Suite au grand nombre de flux d'échange thermique entrant en jeu dans le calcul de la température du réacteur dans la serre, nous avons choisi de présenter les valeurs moyennes de chaque flux thermique au courant des quatre saisons de l'année sous formes d'histogramme **Figure 80**.

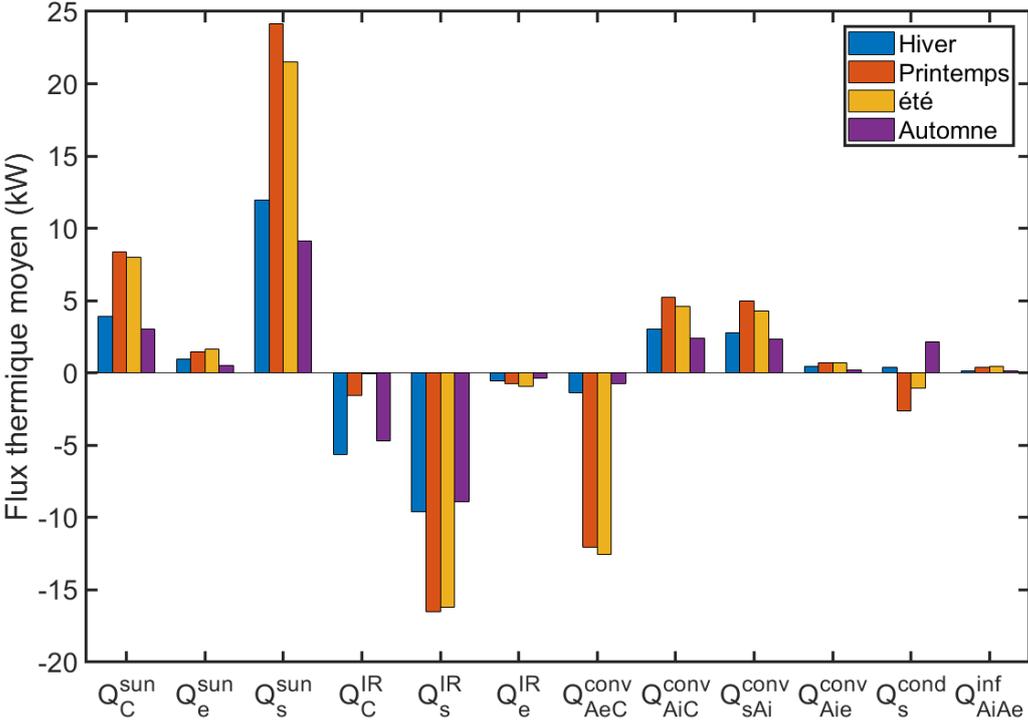


Figure 80 : Les flux moyens de chaleur échangée entre les différents éléments de la serre et du PBR.

### 3.3. Introduction de la régulation de la température

#### 3.3.1. Approche de régulation

Les observations précédentes montrent clairement que l'utilisation d'une régulation thermique est vitale pour notre culture. Notre modèle thermique est utilisé dans cette partie afin de prendre en compte le contrôle et le maintien de la température du PBR dans la gamme de température de fonctionnement idéale. La régulation est directement appliquée au milieu contenu dans le PBR. Du point de vue de la simulation, cela se fait à travers l'ajout d'un terme source  $Q_{source}$  au bilan de chaleur du réacteur. Ainsi, lorsque la température est en dehors de l'intervalle de consigne, elle est régulée en tout ou rien avec une unité de puissance modulable, instantanée et de signe positif en période de chauffage ou négatif en phase de refroidissement.

Plus explicitement, il s'agit de maintenir le bilan thermique nul  $\frac{dT_e}{dt} = \mathbf{0}$  en rajoutant (ou en soustrayant) l'énergie nécessaire pour compenser les pertes (ou éliminer le surplus) de chaleur au PBR pour maintenir sa température interne égale à la limite optimale inférieure (ou supérieure). Le terme de la puissance source  $Q_{source}$  utilisé par notre modèle s'écrit pour chaque pas de temps comme suit :

$$Q_{source}(dt) = \delta_{reg} \cdot \left\| \sum_i^n Q_i(dt) \right\| \quad (159)$$

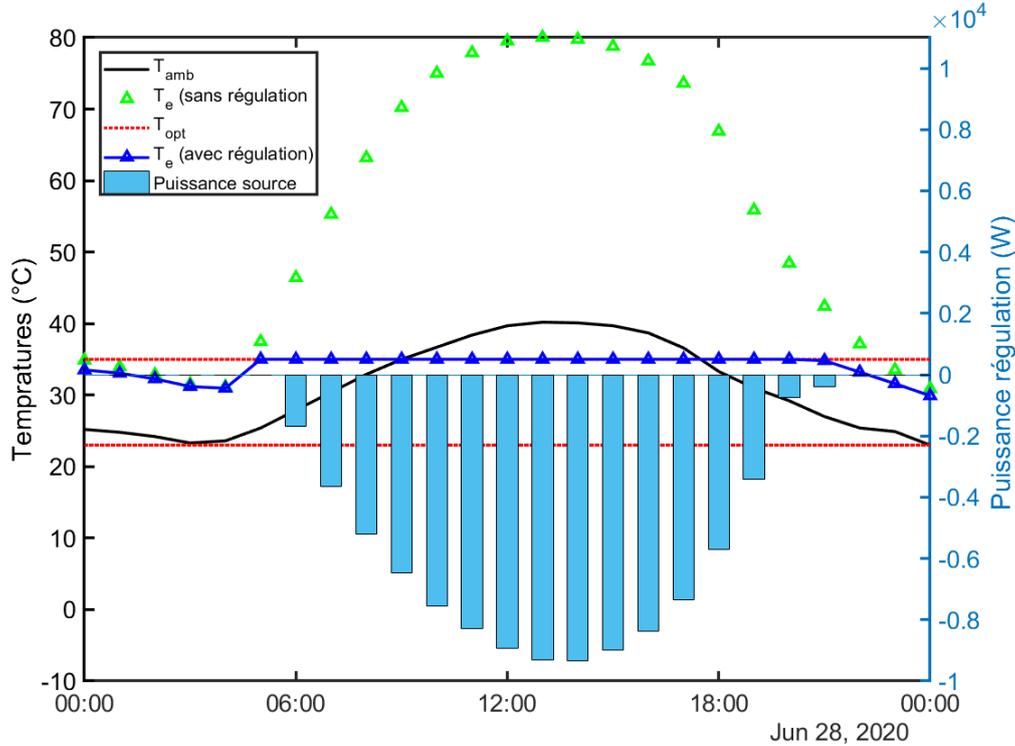
$$\begin{cases} \delta_{reg} = -1 & \text{si } T_e > T_{max} \\ \delta_{reg} = 1 & \text{si } T_e < T_{min} \\ \delta_{reg} = 0 & \text{si } T_{min} < T_e < T_{max} \end{cases}$$

avec  $\sum Q_i$  la somme des différents flux impliqués dans l'établissement du comportement thermique du réacteur. Dans ce cas, le bilan thermique du PBR, pour les deux configurations, exprimé par les Eqs (112) et (130) devient :

$$\rho_e \cdot V_e \cdot Cp_e \cdot \frac{dT_e}{dt} = \sum Q_i + Q_{source} \quad (160)$$

Dans une première approche, nous avons résolu l'Eq (160) pour un PBR extérieur pendant le même jour typique présenté sur la **Figure 69-(a)** afin d'étudier l'effet de l'application d'une régulation thermique. Les résultats de l'évolution de la température interne du réacteur et de la puissance source fournie sont présentés dans la **Figure 81**. La puissance représentée ici correspond aux besoins de refroidissement nécessaires pour compenser l'excès de chaleur dû à l'ensoleillement. Elle est exprimée en (W) et calculée sur un pas de temps d'une heure. Nous notons qu'il ne s'agit pas de la différence  $\Delta T$  entre la température du PBR (sans régulation) et la température de consigne, car en introduisant le terme source  $Q_{source}$  au bilan du réacteur, l'évolution des autres flux thermiques sera impactée et par conséquent les puissances de ces échanges seront différentes par rapport au cas où nous n'appliquons pas la régulation (i.e. pour ce cas de figure, les pertes diminuent, car la température de la culture imposée est plus faible donc l'écart entre les températures avec l'air ambiant est réduit). En d'autres termes, lorsque

la température du réacteur est maintenue égale à la consigne supérieure (ou inférieure) on intervient sur les grandeurs des flux où cette température participe, à savoir celles de la convection et de la radiation en infrarouge. En effet, le besoin thermique nécessaire au maintien de l'équilibre zéro, dans ce cas, sera différent de celui calculé par la différence directe entre la température du réacteur non régulé et celle de la plage optimale.



**Figure 81 :** Évolution de la température du PBR sans régulation (marques vertes) et avec régulation (ligne avec marques bleues). Demandes thermiques de refroidissement pour réguler la température du PBR issus de la simulation d'une journée de canicule à Toulouse, 2020 (histogramme bleu).

### 3.3.2. Estimation des besoins énergétiques de régulation

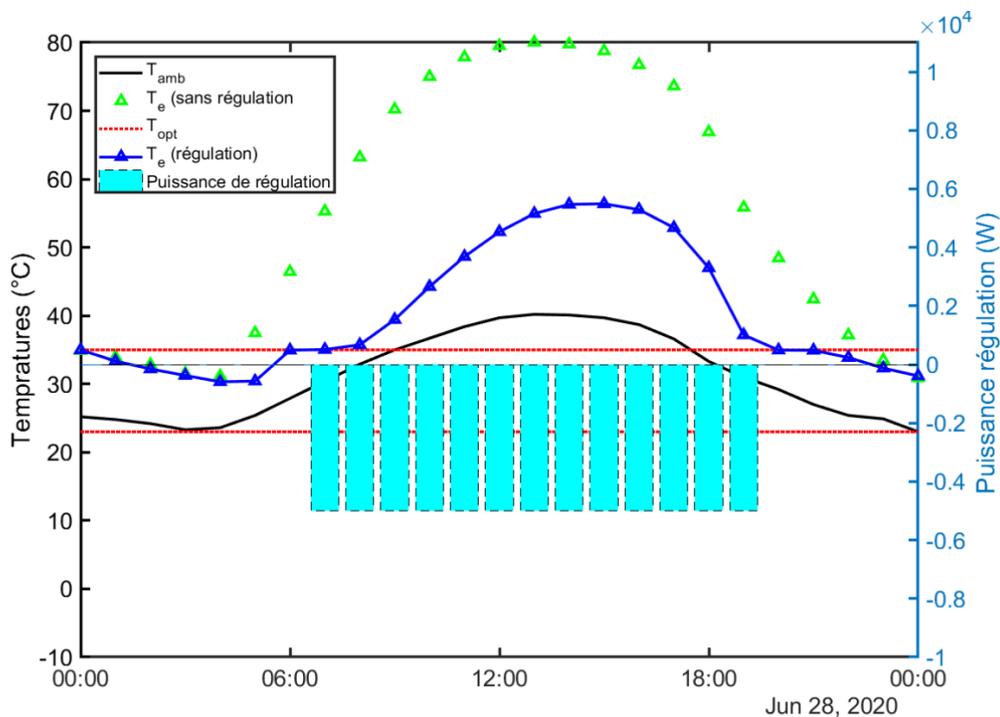
Avant de passer à l'estimation de la demande énergétique associée à la régulation thermique pour un fonctionnement annuel, nous tenons à préciser que l'énergie à apporter au système est obtenue en utilisant l'intégration de cette puissance source sur le pas de temps considéré, comme suit :

$$E_{chaud/froid} = \int Q_{source(chaud/froid)} \cdot dt \quad (161)$$

Pour cette journée d'été très chaude (cf. **Figure 81**), l'énergie thermique totale de refroidissement à fournir pour maintenir sa température à 37 °C est de 95,3 kWh (avec un maximum de 9,3 kWh à 14 h solaire).

Cette méthode de régulation, qui consiste à introduire un module de régulation de puissance variable qui suit la variabilité des flux thermiques dans le PBR, semble coûteuse en termes d'énergie consommée, car elle fait intervenir une réponse thermique idéale du système. Pour une éventuelle réduction de ces dépenses, nous avons la possibilité d'appliquer une unité de

régulation à une puissance moyenne constante dans l'Eq (160) et d'analyser le comportement thermique du réacteur. En fait, l'efficacité de cette voie de réduction des coûts de régulation est uniquement fonction de la valeur de la puissance utilisée. Cela entraînera sans doute une baisse des besoins énergétiques sans pour autant améliorer la réponse thermique de la culture en la maintenant dans la plage souhaitée. Concrètement, pour vérifier cela, il serait plus séant d'étudier le comportement du réacteur et d'estimer l'énergie échangée pour une puissance totale inchangée. Nous avons donc réalisé la simulation du même cas de figure pour une puissance de 5 kW. Cette valeur est sélectionnée depuis la plage des puissances résultantes pour la régulation thermique sur une journée (cf. **Figure 81**), le profil de la température interne du PBR extérieur est présentée sur la **Figure 82**. Nous constatons qu'en appliquant ce moyen de régulation, on parvient à baisser la température de la culture d'environ 23,4 °C en début de l'après-midi mais elle reste en dehors de la plage tolérable pour la croissance (elle passe de 79,76 °C à 56,31 °C). Cela s'accompagne également d'une réduction des besoins énergétiques de 31,8 %. En d'autres termes, la demande totale d'énergie pour refroidir ce jour-là en particulier passe de 95,3 kWh à 65 kWh. Ceci dit, cette puissance s'avère insuffisante pour maintenir efficacement la plage de température souhaitée. Puisque les régimes thermiques du photobioréacteur sont très dépendants des conditions environnementales variables, nous avons choisi une unité de contrôle thermique qui prend en compte ces conditions et leur variabilité temporelle au courant de la journée, en adaptant son besoin en puissance requise afin qu'elle soit efficace pour améliorer la réponse thermique du système de culture. Le modèle que nous avons développé est capable de simuler les tests de puissance de chauffe ou de refroidissement, donc de permettre de faire des choix raisonnés lors de la construction d'une installation de culture.



**Figure 82 :** Comparaison des profils de la température interne du PBR sans régulation et avec unité de régulation de puissance thermique constante à 5 kW.

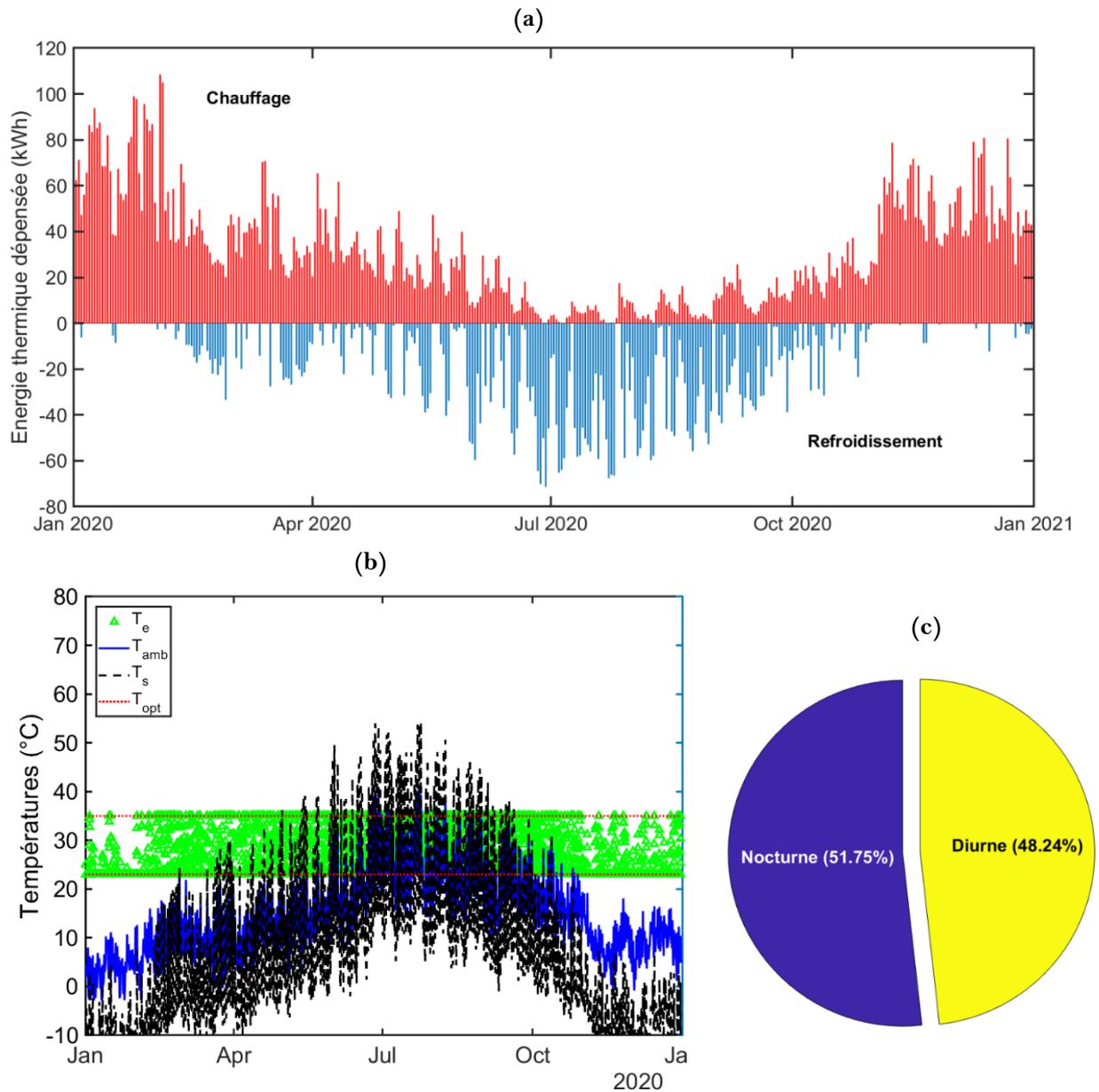
### 3.3.3. Application au PBR tubulaire extérieur : scénario de référence.

L'analyse précédente des moyens de régulation possibles nous amène à nous pencher sur la stratégie la plus idéale théoriquement, qui entraîne certes des coûts d'exploitation (techniques et énergétiques) relativement significatifs, mais qui aboutit à fixer la température de la culture dans la plage optimale d'intérêt. C'est donc cette démarche qui sera adoptée pour les deux configurations (PBR avec et sans serre) étudiées dans ce chapitre. Néanmoins, seuls les résultats d'une culture extérieure dans notre PBR tubulaires sans serre, seront présentés dans cette section comme cas de référence. Bien évidemment, la philosophie d'analyse demeure identique pour le second cas. Quant à l'étude de l'effet de l'ajout d'une serre sur les dépenses énergétiques annuelle du PBR, elle sera abordée dans le [Chapitre V](#) comme une des voies potentielles de réduction de coûts énergétiques et environnementaux de notre système.

Dès lors, nous nous intéressons à la détermination des besoins thermiques de notre PBR pour un fonctionnement ininterrompu sur une année entière. Les simulations réalisées, pour la régulation de  $0,235 \text{ m}^3$  de culture tout au long de l'année, révèlent une disparité dans les valeurs de puissances investies pour apporter ou retirer de la chaleur à notre PBR pendant une heure. En effet, des maxima de  $7,5 \text{ kW}$  (soit  $27,3 \text{ kW.m}^{-3}$  de culture) pour le refroidissement pendant un après-midi d'un jour de canicule et  $5,5 \text{ kW}$  (soit  $20 \text{ kW.m}^{-3}$ ) pour le chauffage pendant les premières heures d'une journée d'hiver froide ont été enregistrés. Par conséquent, pour ces deux journées typiques, nous pouvons constater que, malgré la limite supérieure de la température optimale élevée ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la puissance fournie par le dispositif de régulation pour enlever la chaleur au PBR reste relativement importante par rapport à celle en cas d'apport de chaleur. Cela peut s'expliquer par le rapport  $S_{\text{éclairée}}/V=20$  qui permet une collecte directe efficace de l'irradiance solaire, ainsi un surchauffage rapide et conséquent quand l'ensoleillement est puissant.

Les résultats de l'énergie thermique de chauffage et de refroidissement respectivement, sont présentés dans la **Figure 83-(a)**. En utilisant l'Eq (161) nous estimons l'énergie thermique totale consommée à  $16\,577 \text{ kWh.an}^{-1}$  pour une régulation en permanence de notre système (soit  $70\,540 \text{ kWh.m}^{-3} \cdot \text{an}^{-1}$  cela implique un coût de  $12\,273 \text{ €.an}^{-1}$  pour réguler la température de  $1 \text{ m}^3$  en considérant qu'en 2022  $1 \text{ kWh} = 0,174 \text{ €}$  en France). Bien que plus de 67 % de cette énergie contribue au chauffage, des pics individuels quotidiens dans les besoins de refroidissement supérieurs à  $70 \text{ kWh.jour}^{-1}$  sont enregistrés en particulier en été. Il convient de noter que les jours où l'énergie est destinée à part entière soit au chauffage soit au refroidissement sont rares. En effet, l'histogramme montre qu'au fil des périodes de chaleur ou de froid, la stratégie de contrôle thermique pourrait basculer entre l'évacuation ou l'apport de chaleur au système suivant les températures nocturnes et diurnes qui fluctuent autour de la plage optimale de fonctionnement, comme illustré sur la **Figure 83-(b)**. Cette figure montre, d'ailleurs, que la température du réacteur reste toujours entre les limites de  $T_{\text{min}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{max}} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ . Par ailleurs, nous avons estimé la répartition des besoins en régulation totaux sur les périodes nocturnes et diurnes, comme le montre la **Figure 83-(c)**: plus de la moitié (soit 51 %) de l'énergie totale annuelle consommée est destinée au maintien de la température du réacteur à  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  (limite optimale inférieure) pendant la nuit (100% dus au

chauffage). Ce résultat pourrait nous orienter vers des pistes de réflexion sur la gestion de la régulation thermique nocturne dans une optique d'optimisation des dépenses énergétiques.



**Figure 83 :** (a) Les demandes thermiques journalières pour la régulation et le maintien de la température optimale d'une culture de 0,235 m<sup>3</sup> tout au long de l'année 2020 à Toulouse entre 23 °C et 37 °C. (b) Profil annuel de la température de la culture régulée en fonction des conditions ambiantes. (c) Répartition des besoins totaux annuels sur les périodes nocturnes et diurnes.

## 4. Conclusion

L'outil numérique construit et présenté dans ce chapitre a pu démontrer sa capacité à prédire la dynamique thermique d'un procédé de culture solaire de Spiruline, ainsi que ses besoins énergétiques liés à la régulation de ce système qui est sujet aux variations des conditions environnementales. L'approche entreprise s'appuie sur des modèles des échanges thermiques pour deux cas, à savoir un PBR tubulaire à l'air libre et le même sous serre. Les simulations réalisées montrent que le contrôle de la température dans la gamme optimale peut ne pas être trivial, car les dépenses d'énergie thermique sont importantes. Par ailleurs, bien que ces résultats puissent constituer un support solide qui rend compte des réflexions et des efforts nécessaires à investir pour appréhender une production solaire de Spiruline, ils souffrent d'une déficience de validation par des données expérimentales. Toutefois, le modèle développé est basé sur la description détaillée des différents mécanismes de transfert thermiques et fournit des résultats cohérents. Il n'en demeure pas moins vrai que cet outil est adaptable à la zone climatique étudiée ; son application n'est pas limitée à la localisation utilisée. En plus, l'avantage de ce programme est qu'il s'agit d'un modèle générique pour les PBRs tubulaires, paramétré, offrant à l'utilisateur des possibilités de gestion et d'amélioration tant sur le plan de la conduite de la régulation thermique que sur les caractéristiques des systèmes étudiés (les matériaux et dimensions du PBR et de la serre, qualité du sol...etc.). En effet, ceci ouvre la voie à une perspective d'optimisation du système via une analyse de sensibilité quantifiant l'impact de la variation des propriétés du système sur la réponse thermique de la culture.

Dans une vocation de proposition et d'analyse des solutions envisageables pour gérer les dépenses énergétiques associées, dans le chapitre suivant ce modèle est intégré avec le simulateur de croissance présenté au [Chapitre III](#) pour fournir les données aux analyses énergétiques et environnementales de plusieurs scénarii par la méthode ACV.

# CHAPITRE V

*Analyse des coûts énergétiques  
et environnementaux liés à la  
production solaire de la  
Spiruline*



## **V. Analyse des coûts énergétiques et environnementaux liés à la production solaire de la Spiruline**

Pour évaluer les performances d'un système de production de biomasse, ici la Spiruline, dans un contexte plus large, des caractérisations globales doivent être effectuées. Dans ce dernier chapitre, nous évaluons les performances techniques, énergétiques et environnementales d'un tel procédé à l'échelle semi-industrielle. Cette évaluation implique la détermination affinée de ses entrants et utilités, entre autres les besoins énergétiques (pour la régulation thermique, l'agitation de la culture et la récolte) ou nutritives (pour la croissance de la biomasse).

En effet, dans la continuité du [Chapitre IV](#), une analyse des consommations énergétiques liées au comportement thermique du réacteur a été entreprise, puis couplée à une évaluation des impacts environnementaux de toute la chaîne de production permettant une analyse holistique de ce système de culture.

# 1. Analyse des besoins énergétiques bruts et de coûts électriques liés à la régulation thermique

Dans cette section, les dépenses énergétiques liées à la régulation thermique pour un PBR tubulaire fermé solaire de volume  $0,235 \text{ m}^3$  sont quantifiées et présentées. Dans un premier temps, une comparaison est réalisée entre les deux configurations traitées dans le chapitre précédent (à savoir PBR avec et sans serre) pour analyser la pertinence de l'utilisation d'une serre comme moyen de gestion thermique pour ce procédé. L'énergie nécessaire pour contrôler thermiquement le PBR est, dans tous les cas, présentée en besoins thermiques (sous forme brute) et en coûts électriques fournis par une pompe à chaleur. À partir de ces résultats, quelques pistes de réflexion pour la réduction de ces coûts sont proposées et évaluées. Le but est d'identifier les hotspots de consommation énergétique du système qui permettent de déboucher sur des solutions techniques envisageables pour l'amélioration des performances globales du système.

## 1.1. Quantification des dépenses électriques

Dans la pratique, les producteurs des microalgues en conditions solaires optent, soit pour des méthodes de régulation conventionnelles comme des échangeurs (thermocouples) immergés dans la culture pour le chauffage et des piscines d'eau fraîche ou des systèmes d'aspersion de surface pour le refroidissement (cf. [Chapitre I §1.4.2B](#)), soit pour des machines thermiques telles que les thermopompes ou les pompes à chaleur.

Pour une approche de dimensionnement et d'écoconception, nous avons besoin de calculer les apports énergétiques en termes d'électricité consommée. L'estimation des consommations électriques associées à la régulation thermique est fonction de la machine thermique utilisée. Pour notre cas de figure, nous avons envisagé une pompe à chaleur (PAC) air-eau réversible comme système de chauffage et de refroidissement. Les puissances des pompes à chaleur (PAC) air-eau se situent le plus souvent entre 5 et 20 kW. Cela correspond à la gamme des puissances évaluée dans cette étude.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est caractérisée par le ratio de l'énergie thermique utile transférée sur l'énergie électrique consommée, connu sous le nom de coefficient de performance « COP ». Cependant, depuis 2013, il a été jugé que la notion de ce coefficient n'est pas suffisante pour représenter les performances d'une thermopompe utilisée pour chauffer en hiver et refroidir l'été. Des nouvelles notions considérant l'effet de la saison sont donc apparues notamment, le SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) et SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) pour désigner les performances énergétiques du mode « chaud » et « froid » respectivement vis à vis de sa période d'utilisation.

Ainsi, le travail fourni à la PAC est évalué à partir des demandes en énergie thermique pour le chauffage et le refroidissement déterminées dans cette étude, comme suit :

$$W_{ch} = \frac{Q_{chauffage}}{SCOP} \quad (162)$$

$$W_{fr} = \frac{Q_{froid}}{SEER} \quad (163)$$

Les valeurs du SCOP et SEER sont étroitement associée au type de machine thermique et sont données par le fabricant. Nous considérons ici une PAC d'un SCOP=3 et d'un SEERS=5,6, et nous allons utiliser cette méthode pour l'optimisation des conditions thermiques dans les scénarios proposés dans le chapitre suivant.

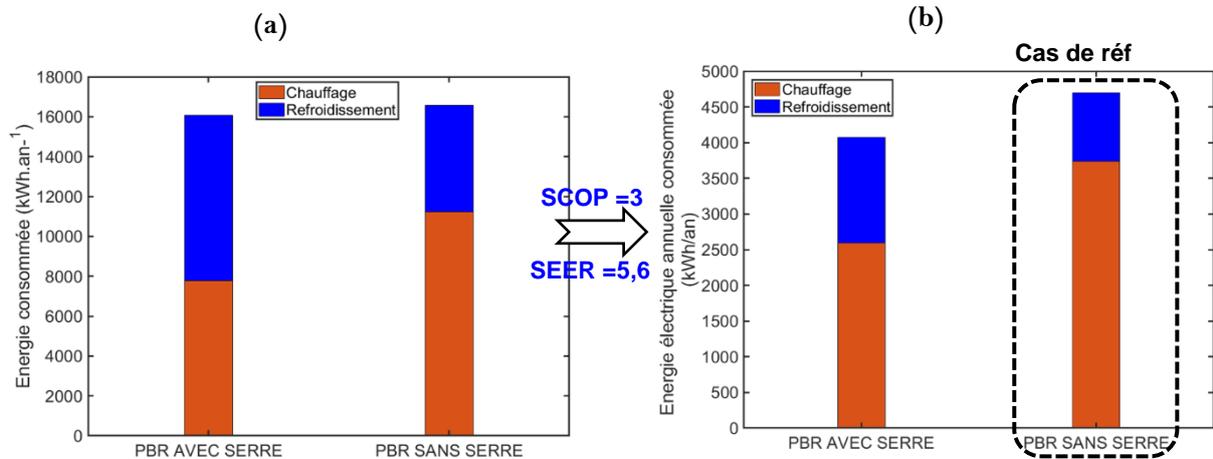
## 1.2. Comparaisons des besoins énergétiques (chaleur) et des dépenses énergétiques (électriques) pour le fonctionnement d'un PBR élémentaire avec et sans serre

L'objectif ici est de valider (ou non) numériquement la capacité de la serre étudiée à fournir des améliorations sur l'aspect thermique du PBR. Cela se reflète par la transformation d'une intuition physique (pour laquelle on s'est inspiré des avantages de la serre à pallier les conditions climatiques moins optimales et répondre aux besoins environnementaux spécifiques de diverses cultures) dans une analyse énergétique d'une telle conception permettant éventuellement la baisse des besoins de notre réacteur, sans pour autant chercher à l'optimiser.

Tout d'abord, nous tenons à rappeler que pour la comparaison réalisée entre les deux configurations (i.e. avec et sans serre), les mêmes conceptions évoquées du PBR et de la serre précédemment sont traitées ici. Il s'agit d'un tube élémentaire de 0,05 m de diamètre et de 120 m de longueur, disposé en U, occupant une surface au sol d'environ 8 m<sup>2</sup> (soit une largeur de 0,13 m et une longueur de 60 m). Les paramètres du scénario de référence sont définis dans le **Tableau 20**, une description générale du système sera abordée dans la partie 2.4. La serre est considérée de 1 m d'hauteur avec une surface au sol de 60 m<sup>2</sup> (soit 1 m de largeur et 60 m de longueur).

Afin de faciliter la comparaison et de représenter au mieux les potentiels de chaque conception, les résultats de cette analyse sont présentés sous forme d'histogrammes. La **Figure 84** présente la quantité d'énergie thermique et de consommations électriques totales pour les deux configurations, pour maintenir la température de la culture dans la gamme optimale en permanence, tout au long de l'année. Dans la **Figure 84-(a)** nous constatons que les besoins de chauffage et de refroidissement dans les deux configurations sont quasiment identiques en termes d'énergie brute (environ 16 000 kWh.an<sup>-1</sup> de chaleur à apporter et à extraire du réacteur). En revanche, les données de consommation d'électricité de la **Figure 84-(b)** montrent qu'un PBR extérieur exposé directement aux conditions climatiques est la conception la plus consommatrice avec un total annuel de 4700 kWh.an<sup>-1</sup> (1,6 fois supérieure à l'énergie solaire globale capturée par 1m<sup>2</sup> de surface à Toulouse par an, soit 2912kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> <sup>292</sup>). Toutefois, l'utilisation de la serre permet une réduction des dépenses totales annuelles de 13,5%. Bien que les coefficients de performance de la PAC utilisée soient différents pour le chauffage et le refroidissement, cette différence est expliquée principalement

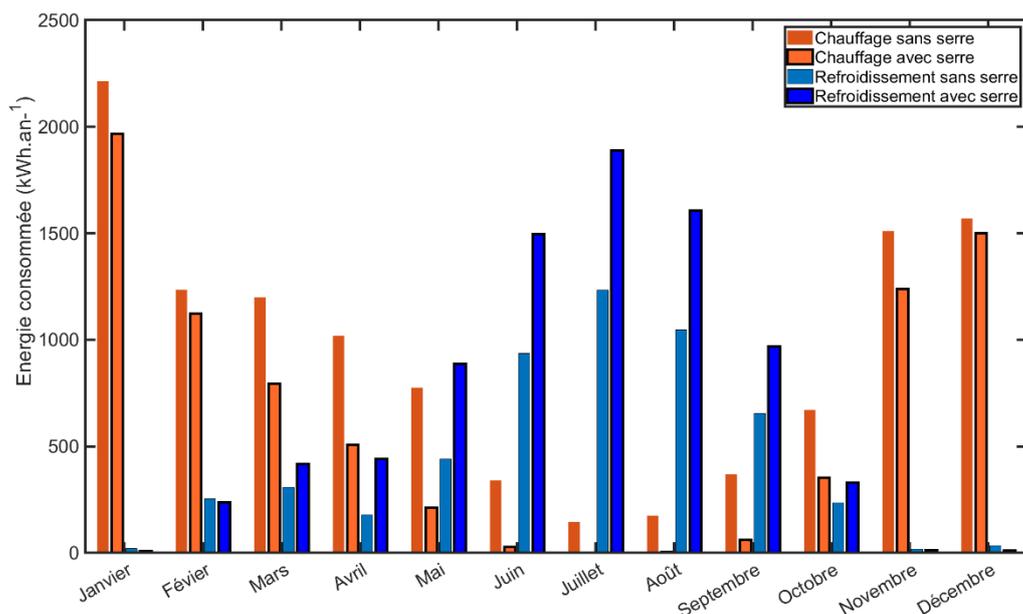
par la baisse des besoins en chauffage dans la serre. En effet, nous enregistrons une diminution de plus de 30% sur l'année (que pour les coûts du chauffage).



**Figure 84 :** Consommations énergétiques du PBR dans une configuration sans et avec serre. (a) Besoins thermiques ; (b) Dépenses électriques dus à l'utilisation de la PAC.

Ceci corrobore les conclusions du chapitre précédent concernant la modélisation thermique du microclimat de la serre. En effet, cela confirme que cette structure contribue à amortir les fluctuations importantes de la température extérieure, en particulier pendant la nuit, en emmagasinant de la chaleur (les températures à l'intérieur de la serre restent toujours plus élevées qu'à l'extérieur), ce qui a pour conséquence une économie d'énergie pour garder la température du réacteur au-dessus de 23°C.

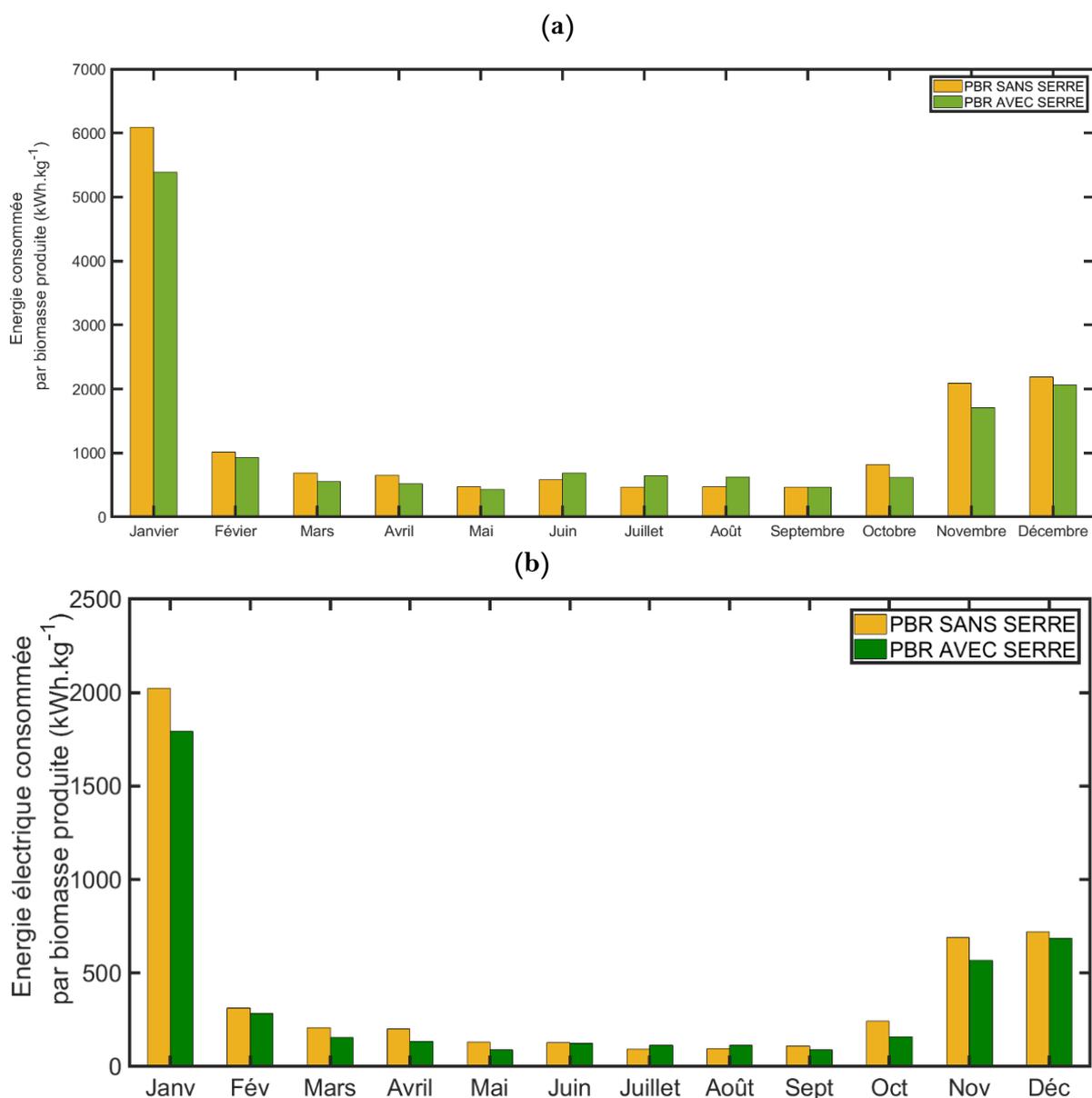
Cette caractéristique est avantageuse surtout pour la période froide de l'année. Cependant, elle constitue une contrainte à prendre en compte pendant la période de forte chaleur. D'ailleurs, nous constatons que l'énergie nécessaire pour refroidir est plus importante avec la serre. Ceci est illustré dans la **Figure 85** qui présente la comparaison des consommations mensuelles pour le chauffage et le refroidissement des deux cas étudiés. En effet, le PBR dans la serre, nécessite 65% en plus d'énergie allouée au refroidissement qu'un PBR extérieur, en période estivale (de Juin à Août).



**Figure 85** : Répartitions mensuelles des besoins de chauffage et de refroidissement.

Cependant, il serait plus significatif de confronter les performances énergétiques en tenant compte aussi de leur productivité : les consommations énergétiques mensuelles ont été pondérées par les productions mensuelles obtenues par la simulation du PBR thermorégulé à la fin du [Chapitre III](#). Dès lors, la **Figure 86** montre les potentialités du PBR avec et sans serre en termes de quantité d'énergie consommée par kg Spiruline produite par mois. Puisque la température du réacteur est régulée en continu, les productivités demeurent identiques dans les deux conceptions, il suffit alors de comparer uniquement les consommations énergétiques totales pour en tirer des conclusions sur l'utilité et l'effet de la serre. Il n'y a pas d'écart important entre les deux systèmes, hormis pour la période hivernale où le choix de couvrir le réacteur est bénéfique, ce qui renvoie au concept de base de la serre.

Malgré le faible gain apporté par la serre, ce constat ne constitue pas une raison suffisante pour exclure définitivement la serre comme stratégie de maîtrise de la demande thermique de la culture. Bien au contraire, ceci ouvre des perspectives notamment pour évaluer l'effet de la modification des dimensions de cette structure et de la conduite du contrôle thermique.



**Figure 86 :** Répartitions mensuelles des coûts énergétiques totaux associés à la production de biomasse. (a) en kWh d'énergie brute ; (b) en kWh d'électricité consommée par la PAC.

### 1.3. Étude des voies d'amélioration des consommations énergétiques : scénarii comparatifs (réalistes)

Des voies d'optimisation de la consommation d'énergie liée à la régulation thermique d'une culture solaire de microalgues dans un PBR plat incliné et dans un raceway fermé ont été proposées par Artu <sup>328</sup>, telles que la modification de l'épaisseur du milieu de culture, la nature de la surface du PBR et la suspension de la régulation la nuit. Les résultats de la combinaison de ces solutions technologiques montrent une baisse d'environ 60% des dépenses annuelles totales si un réacteur film idéal, de très faible épaisseur, et possédant un film filtrant les rayonnements infrarouges à la paroi, est utilisé avec un maintien de la température minimale pendant la nuit à 5°C. Bien que ces pistes s'avèrent avoir un effet de réduction de la consommation énergétique, elles impliquent des coûts d'investissement significatifs comparés au potentiel de production de ces configurations de PBR, notamment au niveau des puissances requises pour remonter la température à la consigne de fonctionnement lorsque le jour se lève (surtout en hiver), ainsi que des surcoûts économiques et environnementaux associés à l'utilisation du matériau de ce revêtement anti-infrarouges. En plus, ce revêtement empêche le chauffage de la culture par ces longues longueurs d'onde, et réduit la transmission de la lumière visible utile à la photosynthèse. Malgré la pertinence que présente cette étude sur la gestion des consommations énergétiques, les résultats se limitent à la configuration et à la conduite des PBRs étudiés. Il est ainsi perspicace d'étudier la sensibilité d'autres géométries de PBR, tubulaire ou cylindrique par exemple, en observant leur effet combiné sur la productivité de biomasse et sur leur performance énergétique. Dans ce chapitre, nous proposons quelques scénarii qui pourraient contribuer à ces voies de réduction de coûts énergétiques.

#### 1.3.1. Effet de la dimension de la serre

Précédemment, nous avons analysé une serre d'une largeur de 1 m où le PBR tubulaire occupe 13% de la surface de son sol (soit un facteur de 7,5 entre les deux surfaces). Cependant, d'un point de vue pratique, nous jugeons que cette dimension (à savoir la largeur de la serre) est peu optimale. Il est donc possible d'établir une conception plus rationnelle en tenant compte de toutes les contraintes, notamment les dimensions du PBR et la distance nécessaire entre les tubes, ce qui sera probablement bénéfique pour le système de production tant sur le plan technique qu'environnemental (surface au sol occupée). Par conséquent, nous avons évalué une nouvelle largeur de serre de 0,2 m (soit 4 fois le diamètre du tube), qui est 5 fois inférieure au cas précédent.

Dans cette partie nous étudions l'effet de la largeur et de la hauteur de la serre sur les besoins de thermorégulation du PBR (tout en maintenant les autres paramètres constants, comme le volume de la culture et l'aspect géométrique du réacteur).

Le **Tableau 18** résume les dimensions des différents scénarii testés pour la conception de la serre. La longueur est conservée de manière à y faire rentrer le PBR en question. Il ne serait donc pas pertinent d'étudier l'évolution de cette dimension.

**Tableau 18** : Dimensions des différents cas de serres testés.

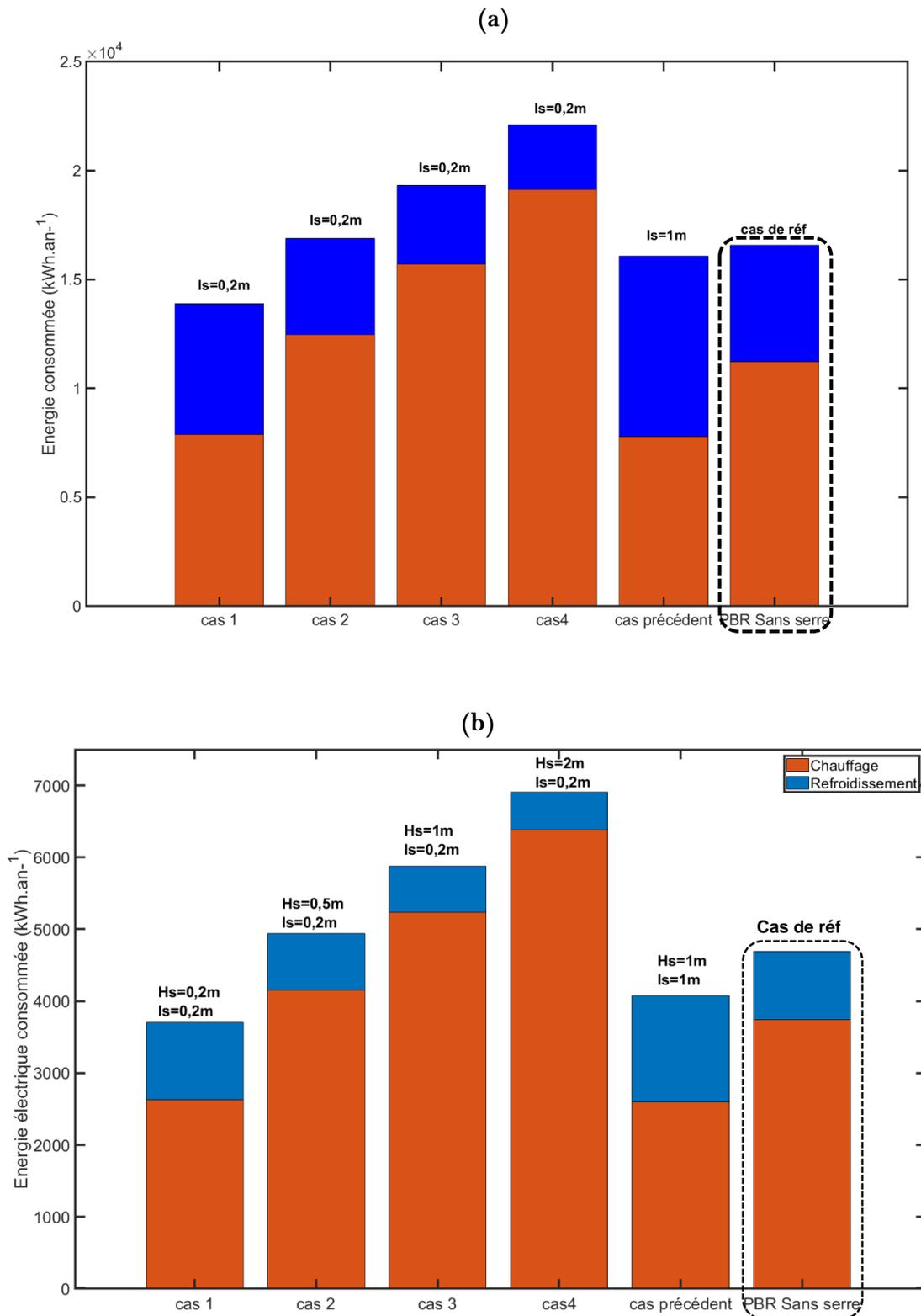
Dimensions	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas précédent
Longueur $L_s$ (m)	60				
Largeur $l_s$ (m)	0,2				1
Hauteur $H_s$ (m)	0,2	0,5	1	2	1
Volume $V_s$ (m <sup>3</sup> )	2,4	6	12	24	60
Surface de la serre $S_s$ (m <sup>2</sup> )	36,08	72,2	132,40	252,80	182
Surface au sol $S_{sol}$ (m <sup>2</sup> )	12				60
Ratio $H_s/l_s$	1	2,5	5	10	1
Ratio $V_s/S_{sol}$ (m)	0,2	0,5	1	2	1

Les résultats de cette analyse sont présentés dans la **Figure 87** qui indique l'énergie consommée pour la régulation annuelle permanente du réacteur en fonction des dimensions de la serre. On note que la productivité est la même dans tous les cas, car la température est régulée. Bien que, pour chaque scénario, les proportions de l'énergie attribuée au chauffage et au refroidissement en termes de besoins thermiques et de consommations électriques de la PAC ne soient pas similaires (cf. **Figure 87-(a)** et **(b)**), les écarts entre les différents scénarii que ce soit pour le chauffage ou le refroidissement sont identiques.

Tout d'abord, l'effet de la largeur de la serre  $l_s$  pour une hauteur constante ( $H_s=1$  m) est étudié, afin de déduire l'importance relative de ce paramètre. Les résultats de la **Figure 87-(a)** montrent que la diminution de la largeur de 1 à 0,2 m implique une augmentation des besoins totaux en énergie d'environ 16%. Bien que les besoins en refroidissement soient réduits de 56%, cette augmentation est due à l'énergie allouée au chauffage, qui est deux fois supérieure dans le cas d'une petite largeur. La même tendance est observée dans la **Figure 87-(b)** avec un écart plus important entre les coûts totaux des deux cas (soit 44% en kWh d'électricité totale nécessaire) qui est expliqué par la différence entre les coefficients de performance de la PAC pour le chauffage et le refroidissement.

En effet, puisque les ratios volume serre/surface du sol sont identiques, comme nous le constatons dans le **Tableau 18**, la diminution du volume interne d'un facteur 5 ( $H_s/l_s=1$ ) implique une réduction des surfaces d'échange thermique avec le réacteur, notamment celle du sol et celle de la couverture. Une telle réduction conduit à diminuer l'inertie thermique de la serre dans sa globalité (en particulier l'inertie thermique du sol) et sa contribution dans le bilan énergétique du PBR, ce qui explique les faibles températures de la culture et les besoins importants en chauffage.

Par ailleurs, pour une surface au sol constante dans la serre ( $S_{sol}=12$  m<sup>2</sup>) nous constatons que la hauteur a un effet monotone sur les besoins thermiques du réacteur. En effet, les consommations énergétiques augmentent à mesure que la hauteur de la serre augmente. Cependant, cette augmentation n'est pas totalement linéaire avec le ratio  $H_s/l_s$ .

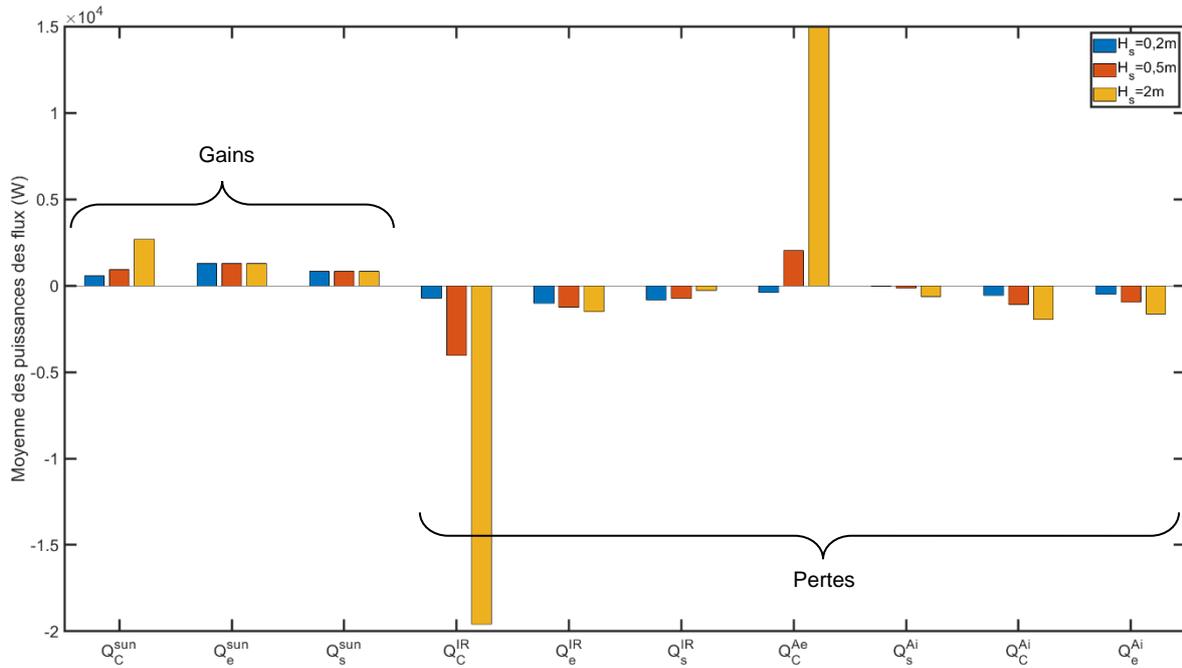


**Figure 87 :** Consommations énergétiques pour les différentes dimensions de serres évaluées comparées au cas de référence : (a) Besoins thermiques et (b) Coûts électriques.

Ces résultats montrent que la variation des dimensions de la serre n'agit pas significativement sur le comportement thermique du réacteur qui se trouve à l'intérieur. L'augmentation de la taille de la serre diminue son effet sur l'amortissement de la variation des conditions météorologiques externes. Cela ne semble pas surprenant, dans la logique où c'est le volume de l'air interne qui varie dont l'inertie est suffisamment faible par rapport à celle du sol qui, elle, reste constante. Ce qui engendre pour conséquence des pertes plus significatives (notamment par convection et rayonnement), d'où l'augmentation des besoins en chauffage pour les plus grands volumes de serre.

Pour soutenir ces justifications, la **Figure 88** présente la moyenne annuelle des flux de transfert thermiques des différentes composantes de la serre (couverture, sol et PBR). Nous remarquons que les gains apportés par le soleil au sol et au PBR sont invariables (car leurs surfaces restent constantes). En revanche, malgré l'augmentation de la radiation solaire absorbée par la couverture pour les serres plus grandes, les pertes de chaleur de ce système demeurent incorrigibles en particulier au lever du jour. Elles sont dues principalement au rayonnement infrarouge, et cela devient significativement marquant quand la surface totale de la serre est plus grande. Ceci provoque une baisse de température importante surtout pendant les nuits d'hiver. À cela s'ajoute d'autres pertes dues à la convection sur les parois de la serre, dont la surface augmente avec le volume de cette structure.

En effet, les fluctuations de la température de la culture autour de la gamme optimale, sont moindres quand le PBR est mis dans une serre dont la hauteur est assez proche du sol à savoir la plus faible dimension testée ( $H_s = 0,2$  m soit 4 fois le diamètre du réacteur). Ceci explique l'amélioration observée des coûts énergétiques, à savoir une réduction de 16% sur la demande énergétique brute (et de 22% de la consommation électrique liée à la PAC utilisée) par rapport à la configuration de référence d'un PBR extérieur.



**Figure 88 :** Distributions des flux de chaleurs impliqués dans le comportement thermique pour différentes tailles de serre.  $Q_C^{sun}, Q_e^{sun}, Q_d^{sun}$  : flux de radiation solaire absorbé par la couverture, la culture et le sol respectivement.  $Q_C^{IR}, Q_e^{IR}, Q_s^{IR}$  : flux de radiation émis par la couverture, la culture et le sol.  $Q_s^{Ai}, Q_C^{Ai}, Q_e^{Ai}$  : flux de perte par convection entre l'air interne et le sol, la couverture et la culture respectivement.  $Q_C^{Ae}$  : flux convection entre la couverture et l'air extérieur.

**Remarque :** il convient de noter que, du fait des échanges thermiques entre la culture et son environnement dans la serre, la régulation thermique affecte aussi les températures des autres milieux/objets dans la serre, particulièrement quand la taille de cette dernière est petite. Ceci pourrait également justifier en partie la présence du microclimat favorable et assez proche des besoins thermique de la culture quand la hauteur de la serre est faible.

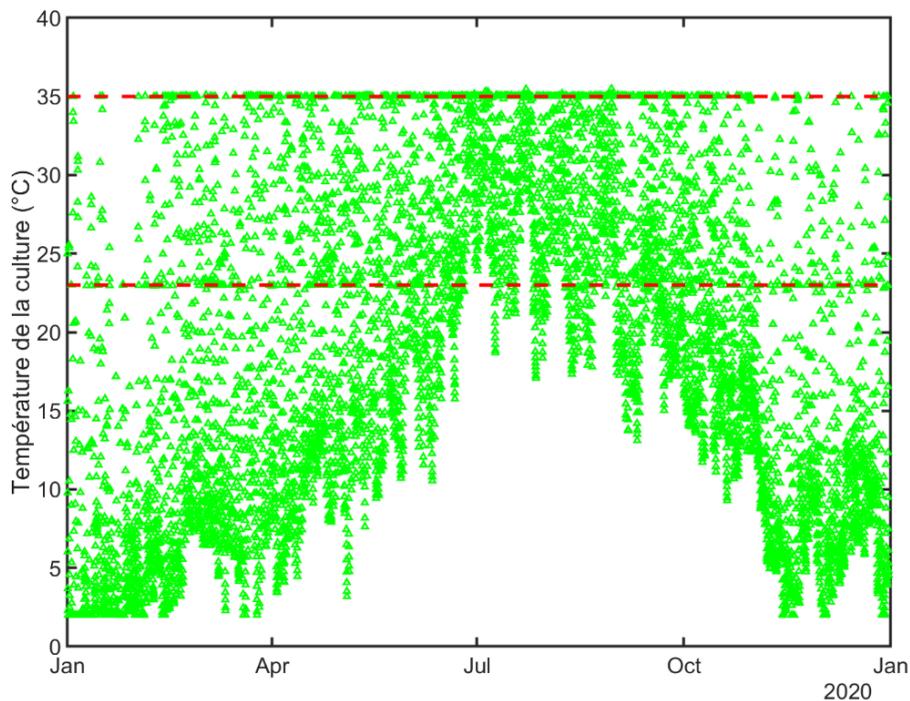
### 1.3.2. Effet de l'arrêt de la régulation pendant la nuit

Nous avons vu dans le chapitre précédent §3.3.3 que plus de 51% des besoins de chauffage annuels sont consommés la nuit pour maintenir la température de la culture dans la plage de fonctionnement. Or, la croissance photosynthétique nécessitant une température optimale a lieu pendant la journée. Selon les résultats de la littérature sur le taux du catabolisme nocturne de cette cyanobactérie <sup>247</sup>, il a été conclu qu'il est plus intéressant de maintenir les températures au niveau le plus bas possible pendant les cycles nocturnes pour limiter l'activité respiratoire et empêcher ainsi les pertes de biomasse conséquentes.

Il semble donc pertinent d'évaluer un scénario où la régulation thermique du réacteur est arrêtée dès que la nuit tombe (c'est-à-dire pour des valeurs nulles de rayonnement solaire). Cependant, pour éviter les fortes chutes de température de la culture (températures négatives

dans les nuits hivernales), dans nos simulations, nous avons considéré une limite inférieure de 2°C permettant de maintenir la culture en vie.

Les résultats de l'évolution de la température de la culture issus des simulations d'une configuration de PBR extérieur (i.e. sans serre, mêmes dimensions que dans le [Chapitre IV](#)) sont présentés dans la **Figure 89**. Elle montre la température de la culture quand la régulation thermique est appliquée uniquement le jour, lorsque la biomasse réalise la photosynthèse. Avec cette politique de régulation uniquement diurne, on constate que le nombre d'heures où la température est dans la gamme de fonctionnement n'est que de 100h inférieur à la durée d'ensoleillement annuelle à Toulouse (i.e. soit 4326 h quand le rayonnement >0 W.m<sup>-2</sup>). Ces heures correspondent aux jours de faible ensoleillement et de températures ambiantes basses (en hiver) où les températures dans la culture n'atteignent pas 23°C. Ceci s'explique par l'insuffisance de la puissance de chauffage appliquée par rapport à celle alors nécessaire pour atteindre cette limite inférieure de température. Étant conscients de l'effet de ce phénomène sur la production de biomasse, ceci a été bien pris en compte dans la simulation de la croissance à travers la cinétique relative à la température (où le  $\mu_T$  est inférieur au cas idéal).



**Figure 89** : Évolution de la température de la culture en absence de la régulation nocturne.

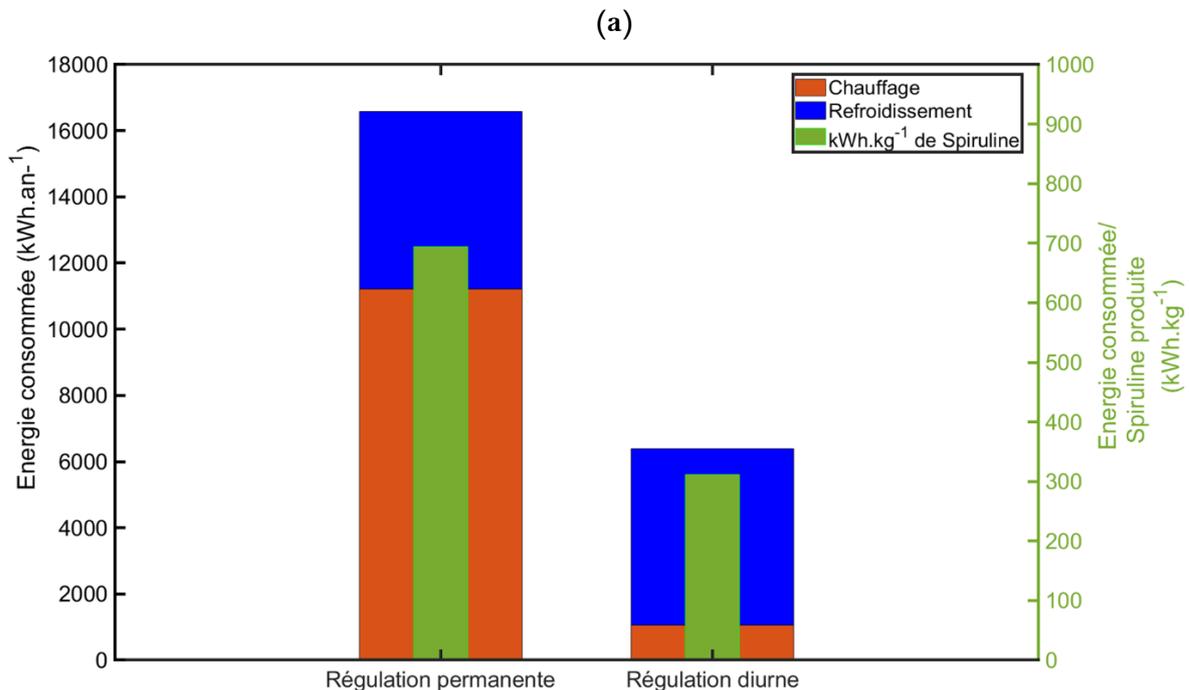
Dans les **Figures 90**, les demandes thermiques et les consommations électriques associées à la régulation de la température sont présentées. Nous constatons qu'en arrêtant la régulation pendant la nuit, on parvient à réduire les besoins énergétiques brutes totales d'environ 62,5% (et 72% de consommations électriques) par rapport au cas de référence où la régulation thermique est continue sur toute l'année. Les résultats montrent que cette réduction concerne uniquement les besoins en chauffage ; quant au refroidissement, l'énergie dépensée est identique, car on n'agit pas sur le refroidissement du réacteur pendant la journée. Bien que cette valeur paraisse importante, elle semble cohérente avec ce qui a été rapporté dans la

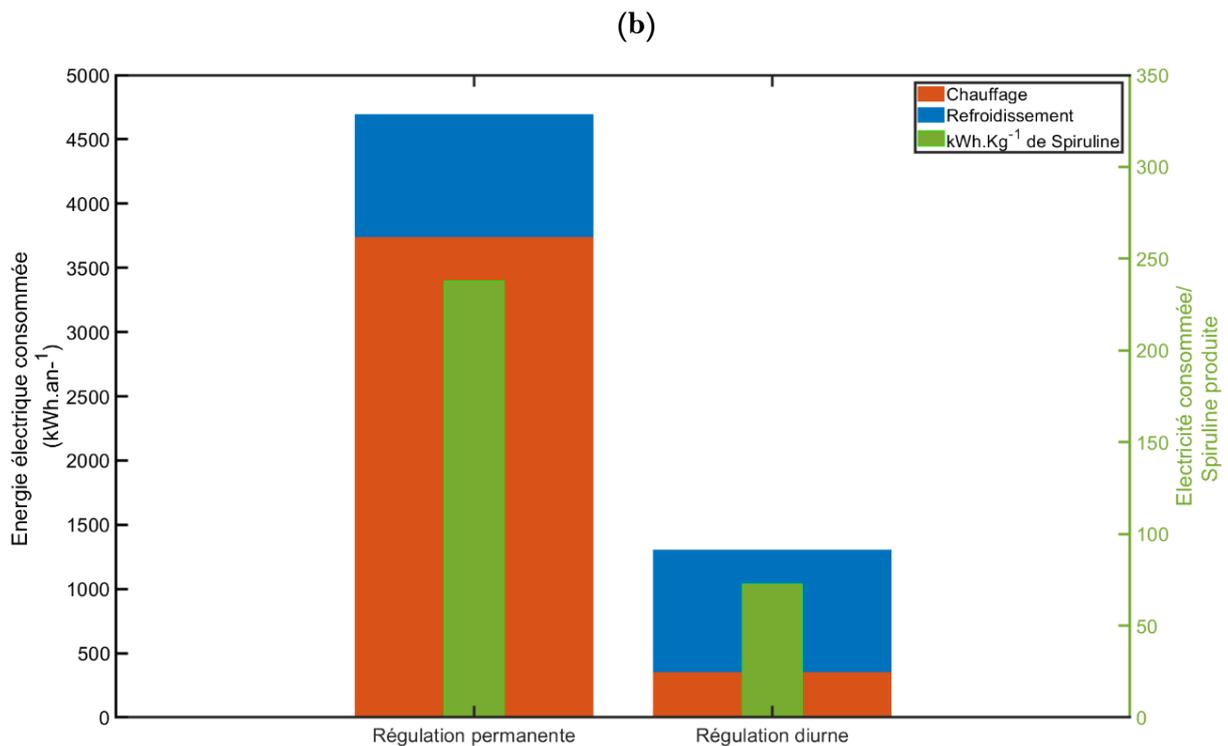
littérature <sup>328</sup>, notamment pour un PBR plan de trois centimètres d'épaisseur (à savoir une réduction de 45% par rapport à un système thermorégulé en permanence).

Pour approfondir encore cette analyse, et prendre en compte les pertes éventuelles de biomasse dues à des éventuelles températures non-optimales (évoquées précédemment), nous avons analysé les résultats des modes de régulation sous forme de ratio d'énergie consommée/quantité de biomasse produite. En toute évidence, l'option de la régulation diurne seule demeure intéressante vis-à-vis du potentiel de production de notre système. En effet, pour produire 1kg de Spiruline, les demandes énergétiques annuelles attribuées au contrôle de la température sont 2,2 fois inférieurs (et 3,5 fois en termes d'électricité consommée par la machine de régulation) dans le cas d'une régulation diurne uniquement.

Remarques :

- Bien que cette voie de fonctionnement soit a priori préférable, les puissances nécessaires pour ramener la température de 2°C à 23°C dans les premières heures de la journée restent quand même très conséquentes et peu réalistes pour les machines thermiques existantes.
- De plus, dans notre approche de modélisation de la régulation (en tout ou rien), l'énergie nécessaire ( $Q_{source}$ ) (ou les performances de la technologie utilisée) pour apporter/extraire du système la chaleur varie selon les besoins thermiques (puissance).





**Figures 90 :** comparaison des dépenses énergétiques annuelles des deux modes de régulation thermique pour un PBR mis à l'extérieur (a) En énergie brute, (b) En consommation électrique.

### 1.3.3. Couplage de la serre avec la régulation diurne uniquement

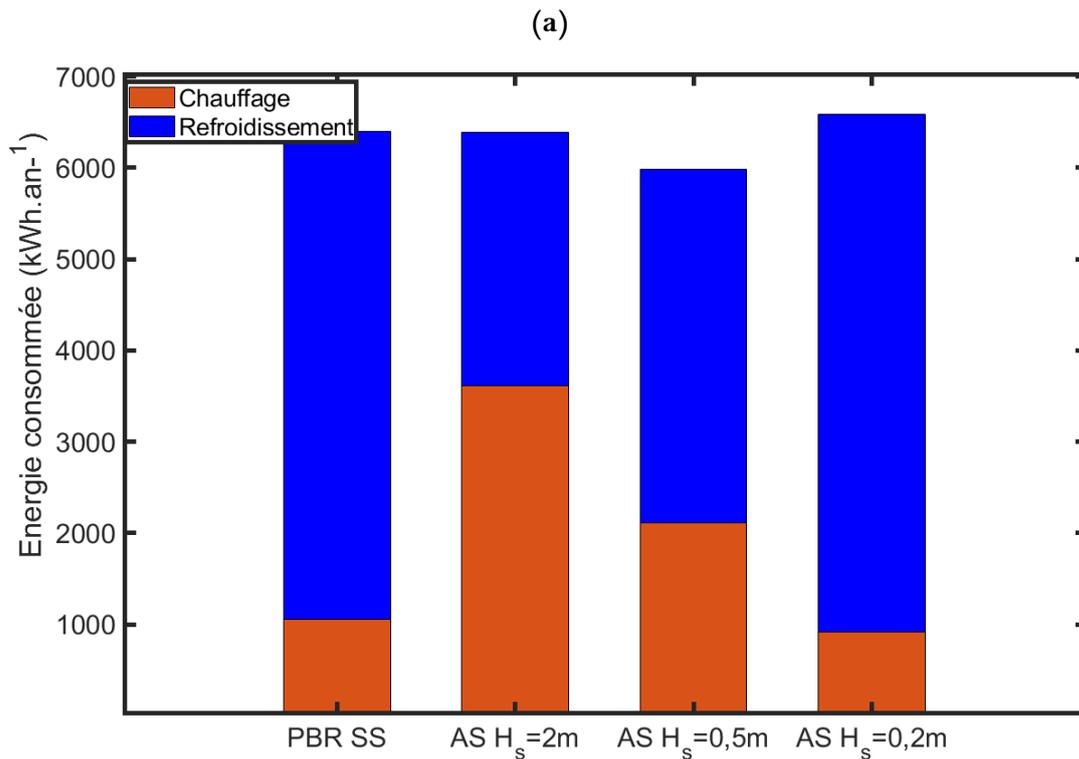
Sur la base des résultats des deux sections précédentes, il nous a semblé intéressant d'étudier l'effet de la combinaison d'une serre avec la régulation diurne, sur l'évolution des coûts énergétiques de la production solaire de Spiruline.

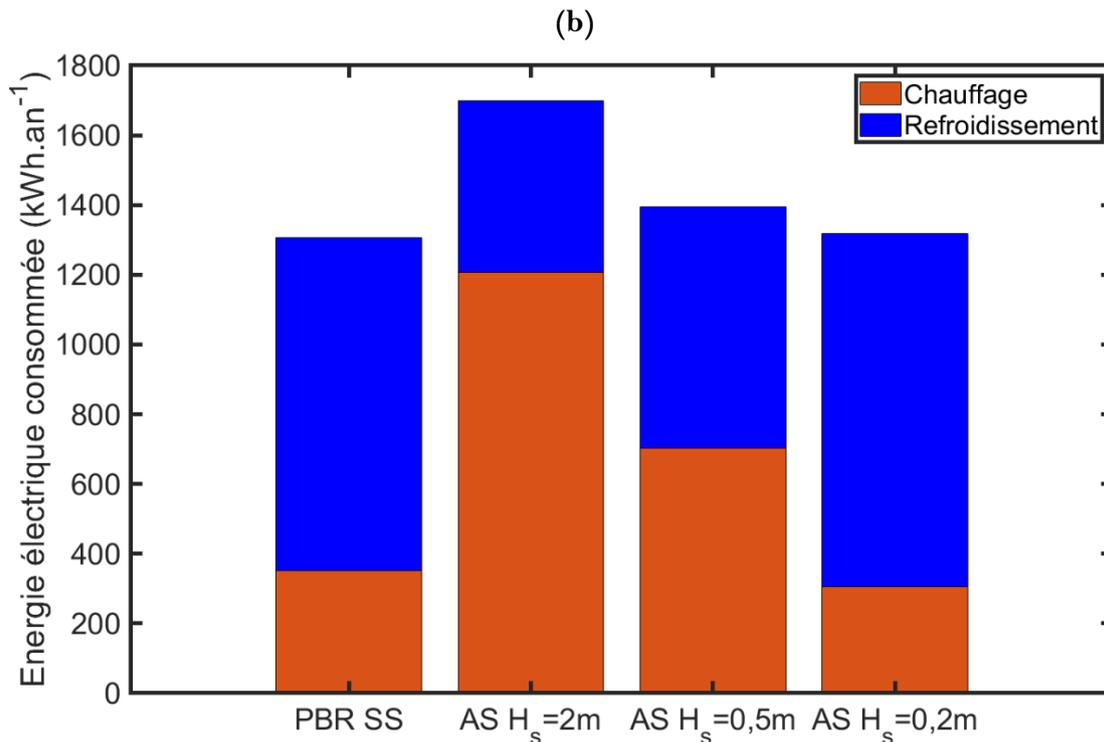
Nous avons évalué trois tailles de serre (de hauteur variable) parmi celles proposées précédemment :  $H_s = 0,2$  m,  $H_s = 0,5$  m et  $H_s = 2$  m. Nous jugeons que la serre d'une hauteur de 1 m n'est pas pertinente d'un point de vue pratique (on ne peut pas évoluer à l'intérieur) et technique (ce ne serait plus une simple couverture).

Les résultats issus des différentes simulations ont conduit aux histogrammes présentés dans la **Figure 91** où l'acronyme « PBR SS » désigne un réacteur sans serre et « AS » un réacteur dans une serre. À l'inverse de ce qui était espéré, l'ajout d'une serre en utilisant ce mode de régulation n'apporte pas d'amélioration significative aux dépenses énergétiques ni au rendement du réacteur par rapport au cas du PBR extérieur. En effet, en comparant les besoins thermiques totaux de la **Figure 92-(a)**, nous constatons qu'il n'y a presque pas de différence entre les différents scénarii évalués sauf pour le cas d'une serre de hauteur de 0,5m qui semble la moins énergivore avec une demande totale en énergie brute de 5981 kWh.an<sup>-1</sup>.

Par ailleurs, si l'on se penche sur les résultats de la consommation électrique **Figure 91-(b)**, nous constatons que les deux scénarios de PBR avec régulation diurne uniquement, mis à l'extérieur ou dans une serre de 0,2m de hauteur, sont les configurations les moins

consommatrices avec des coûts électriques similaires de  $1300 \text{ kWh}\cdot\text{an}^{-1}$ . En se focalisant sur les cas de la serre uniquement, nous remarquons que les petites hauteurs à savoir  $50 \text{ cm}$  et  $20 \text{ cm}$  semblent un peu plus bénéfiques pour une réduction des coûts énergétiques. En revanche, nous constatons que l'effet de la hauteur de la serre est moins important comparé au mode de régulation continue. En effet, lorsque le volume de la serre est 10 fois plus petit (passage de  $24 \text{ m}^3$  à  $2,4 \text{ m}^3$ ), une baisse de  $22\%$  de la consommation électrique totale est signalée. Bien que les besoins de refroidissement dans la journée soient plus importants dans les petites structures de serre, en raison de la surchauffe causée par les gains solaires (i.e. un ratio  $S_{sol}/V_s$  10 fois supérieur pour la serre basse), une réduction d'environ  $74\%$  est enregistrée uniquement sur les besoins de chauffage la journée. Ceci est dû aux mêmes raisons que celles évoquées précédemment concernant l'énergie nécessaire pour compenser les pertes qui se produisent dans les serres à grande taille, en portant la température de la culture à  $23^\circ\text{C}$  quand les conditions extérieures sont défavorables (en hiver). Nous pouvons en déduire que plus le rapport  $S_{sol}/V_s$  est grand, moins l'énergie dépensée pour chauffer le système est importante en activant la régulation en début de journée, en raison de la contribution radiative non négligeable du sol (lorsqu'il fait froid).



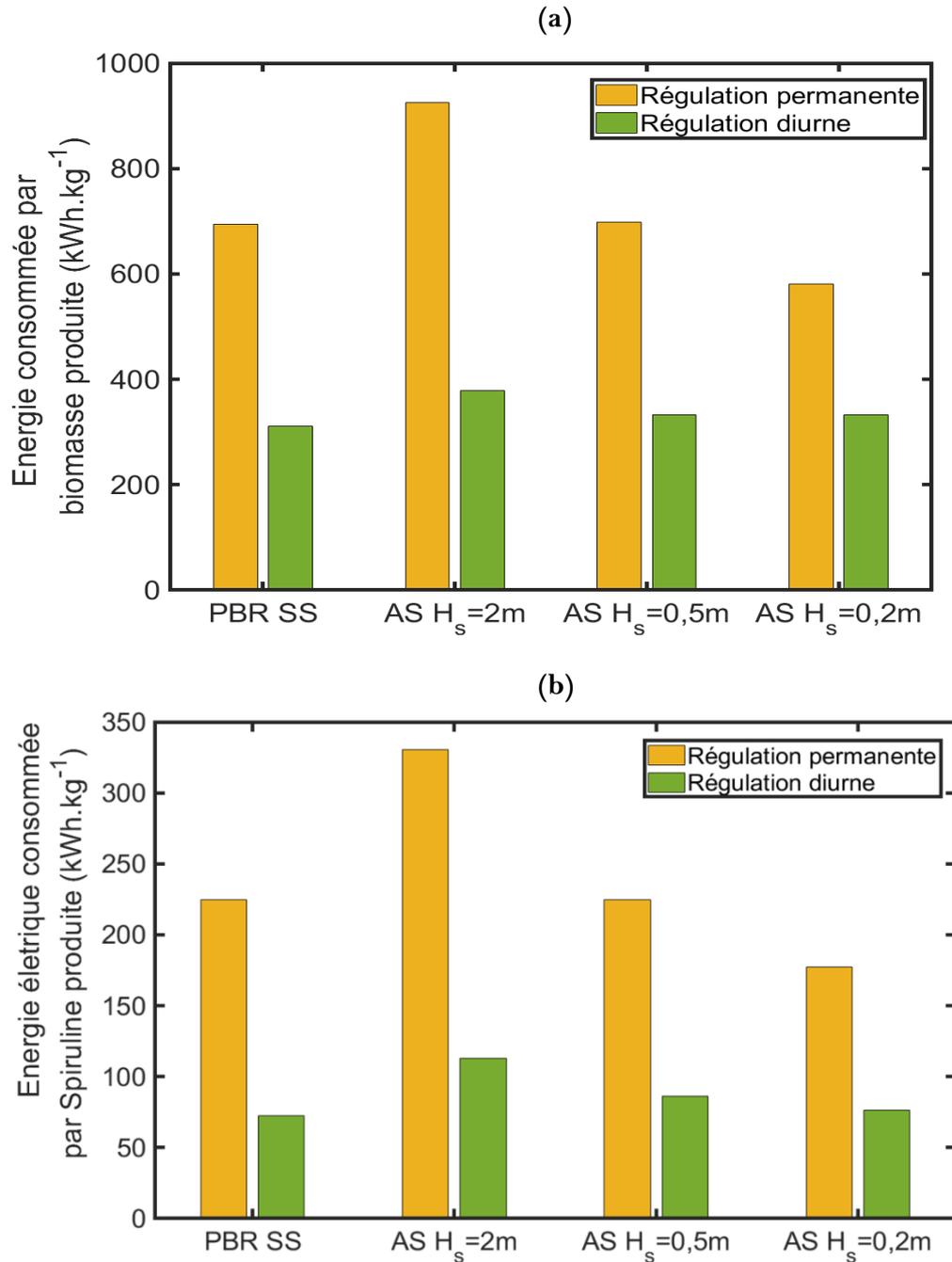


**Figure 91** : Consommations d'énergie des différentes structures de serre avec régulation diurne uniquement : (a) en kWh d'énergie thermique brute, (b) en kWh d'électricité consommée.

Bien que ces résultats montrent que, en cas d'arrêt de la régulation la nuit, l'ajout d'une serre n'a pas d'impact sur l'économie d'énergie, il serait plus pertinent et raisonnable de les confronter au cas de référence où le PBR est exposé directement aux conditions extérieures avec une régulation permanente (cf. les **Figure 92**). En effet, les performances du réacteur, exprimées en termes d'énergie brute consommée pour produire 1 kg Spiruline, démontrent une amélioration par rapport au cas de référence entre 45 et 52% (et 50% et 65% en termes de consommations électriques) en utilisant une serre combinée à un contrôle thermique diurne uniquement.

Au terme de cette exploration des voies possibles pour améliorer les demandes énergétiques, la conclusion qui peut être tirée est en faveur d'une configuration extérieure sans serre avec régulation diurne. Cependant, le problème de la surchauffe du réacteur n'est pas résolu pour cette configuration, car les besoins de refroidissement la journée restent similaires au cas d'une régulation permanente. Il est désormais nécessaire de trouver un compromis des solutions techniques pour atténuer les besoins en refroidissement (comme l'ombrage des cultures) dans la journée sans impacter négativement la productivité ou le coût de production (kWh.kg<sup>-1</sup>).

Cette étude nous a conduit à identifier plusieurs paramètres en termes de configuration (avec et sans serre) et de mode de régulation et par conséquent à évaluer leurs impacts (séparément et couplés) en parallèle sur les performances de production de biomasse et la réduction des consommations énergétiques liées au contrôle de la température du milieu de culture.



**Figure 92** : Comparaison des performances énergétiques du PBR pour tous les scénarios évalués. En termes de : (a) Besoins énergétiques bruts (b) Consommations électriques liées à la PAC utilisée

Bien entendu, il existe également d'autres paramètres dont l'effet pourrait être analysé, tels que : (i) l'influence de la variation du volume du réacteur en modifiant le diamètre du tube (i.e. l'effet de l'inertie thermique de la culture) tout en considérant son impact sur la productivité, (ii) l'influence du type du sol de la serre en changeant ses caractéristiques physicochimiques (ex. utilisation du béton, du sable ou autre), (iii) l'influence de la conduite du réacteur en

matière de durée de fonctionnement et de période de lancement (ex. utilisation de la serre uniquement pendant l'hiver et ouverture pendant le reste de l'année) et (vi) influence de la modification des matériaux de la serre et du PBR. Cependant, cela s'inscrit dans le cadre des perspectives de cette étude.

Dès lors, nous allons étudier aussi les potentialités de ces pistes à réduire également les coûts environnementaux de la production solaire de Spiruline. Le **Tableau 19** résume les différents scénarios qui feront l'objet d'une Analyse de Cycle de Vie. Par ailleurs, nous tenons à préciser que le cas d'une absence totale de la régulation thermique a été exclu de cette analyse, car les températures atteintes dans le réacteur sont critiques, comme discuté dans le **Chapitre IV** et provoquent un effet délétère sur la croissance (effondrement irréversible). Dans les modèles existants, ce phénomène de mortalité n'est pas reproduit avec fiabilité, ce qui nous a amené à l'écartier de notre modèle et de nos simulations.

**Tableau 19** : Présentation des différents scénarii évalués par la suite.

Scénario/ Paramètres	SS-RP (Scénario de référence)	SS-RJ	AS-RP 0,2	AS-RP 0,5	AS-RP 2	AS- RJ 0,2	AS- RJ 0,5	AS- RJ 2
Avec/Sans serre	Sans	Sans	Avec					
Hauteur de la serre (m)			0,2	0,5	2	0,2	0,5	2
Mode de régulation thermique	Permanente	Diurne	Permanente			Diurne		

## 2. Analyse de cycle de vie d'un système solaire semi-industriel de production de Spiruline fraîche

### 2.1. Introduction

Par définition, l'ACV consiste à l'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés au cycle de vie d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la production, l'utilisation, la collecte et le traitement en fin de vie, y compris tout recyclage et élimination. L'ISO définit l'ACV comme la « compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long de son cycle de vie »<sup>352</sup>.

Afin d'étudier la symbiose industrielle de la culture de microalgues et cyanobactéries avec d'autres industries, de nombreuses études ont évalué les impacts environnementaux et la durabilité de divers systèmes de production (et diverse espèces) à grande ou petite échelle. Cependant, la majorité d'entre elles utilisent l'ACV pour étudier les impacts de la production de carburant ou de biogaz à base d'algues<sup>81,353-357</sup>. À notre connaissance, il y a beaucoup moins d'études qui examinent le cycle de vie de la production des microalgues, notamment la Spiruline (*Arthrospira platensis*)<sup>358,359</sup>, en tant qu'aliment pour la nutrition humaine et animale. De plus, les données de ces études ont généralement été recueillies à partir de la littérature ou étaient basées sur des essais en laboratoire à petite échelle.

Dans le même contexte, il existe également des ACV à but comparatif portant sur les performances environnementales de différentes configurations de réacteurs notamment, des PBR tubulaire horizontaux (ou verticaux), plats et en bassins ouverts<sup>81,120,354</sup>, et des PBR à couche ultra-mince à mailles<sup>360</sup>. La plupart de ces évaluations indiquent que les impacts environnementaux liés à la production extérieure de la biomasse sont dus à la consommation d'énergie, à la consommation d'eau et de nutriments, à l'utilisation des terres, et, dans certains cas, aux émissions directes de gaz à effet de serre (ex. la production d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) dans les cultures axéniques de *Chlorella vulgaris*)<sup>361</sup>.

Dans le cadre de la production solaire de la Spiruline, une évaluation du bilan environnemental de systèmes de culture hypothétiques, couplée à une analyse de sensibilité de Morris sur les paramètres (kg CO<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup> de biomasse) a été rapportée dans la littérature<sup>77</sup>. Cependant, les recherches sont restreintes aux deux configurations de réacteurs les plus courantes, à savoir des bassins Raceways ouverts et couverts (mis sous serre). Les résultats sont basés sur des paramètres de croissance moyens (la productivité surfacique moyenne annuelle) en utilisant la moyenne des fluctuations météorologiques, notamment la densité moyenne du flux solaire incident et la fraction diffuse moyenne.

Concernant les PBR tubulaires horizontaux, il existe très peu d'études publiées. *Pérez-López et al.*,<sup>120</sup> ont utilisé l'ACV pour comparer les performances environnementales de trois systèmes pilotes de culture de *Nannochloropsis sp.*, à savoir des PBRs tubulaires horizontaux, verticaux et un bassin ouvert. Bien que leur analyse se base sur des données de production

réelle mesurées expérimentalement, ils considèrent comme granulométrie temporelle la saison, et comparent les données de chaque réacteur durant trois saisons uniquement (hiver, automne et été).

Dans la même perspective de contribution au développement durable de la filière des microalgues pour des fins alimentaires, notre étude se concentre sur le système solaire tubulaire pour la production annuelle de la Spiruline à travers une analyse des impacts environnementaux qui déterminent les hotspots du procédé dans sa globalité, afin d'améliorer l'efficacité de la production, tout en diminuant les impacts sur l'environnement.

Selon la série 14040 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) <sup>362</sup>, le cadre technique de la méthodologie ACV se compose de quatre phases : (1) la définition de l'objectif et de la portée de l'étude; (2) l'analyse de l'inventaire de flux de matière et d'énergie ; (3) le calcul d'impact grâce à la méthode d'impact de cycle de vie ; et (4) l'interprétation des résultats. Dans la suite de cette partie, ce cadre sera adopté pour notre étude.

### **2.2. Objectif et portée de l'étude**

L'objectif ici est d'évaluer les performances environnementales d'une configuration semi-industrielle de PBRs tubulaires horizontaux, avec : (i) la présence ou l'absence d'une serre et (ii) divers modes de fonctionnement du réacteur en termes de régulation thermique. Ces systèmes de production seront comparés et les hotspots seront identifiés afin de proposer des améliorations.

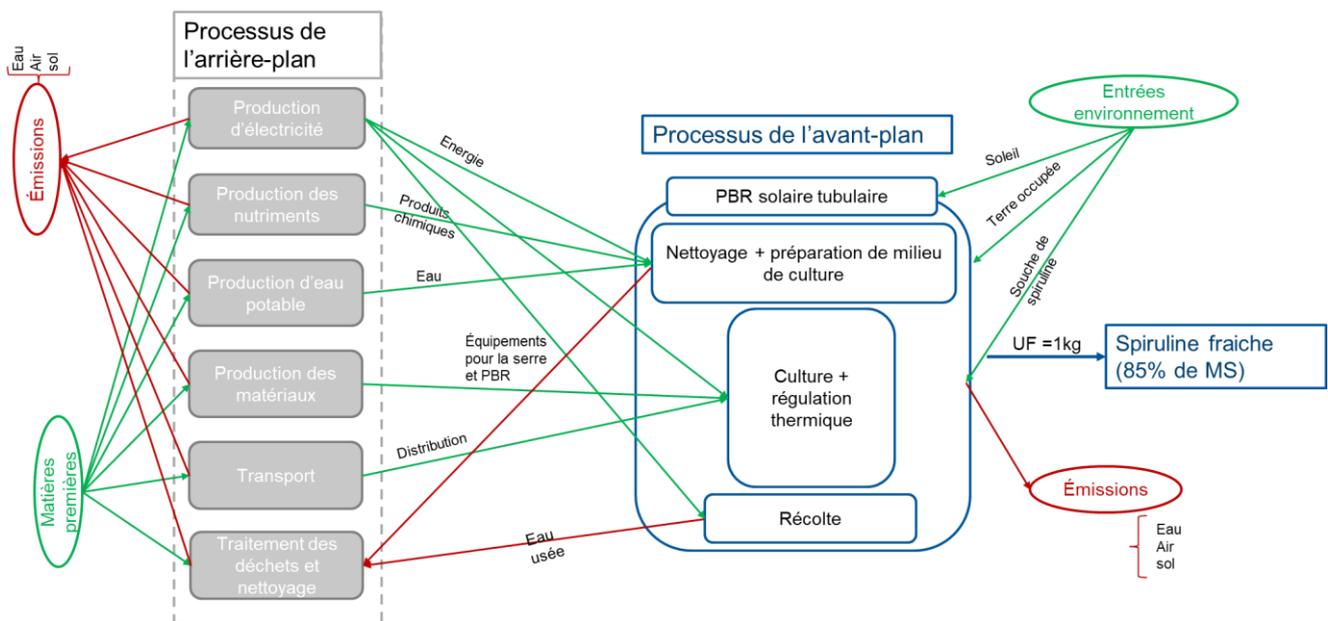
Il s'agit finalement d'une approche globale d'écoconception, basée sur la modélisation multi-échelles, de la production de biomasse, couplant un modèle dynamique de croissance qui capture les différents aspects métaboliques, multiphysiques (hétérogènes) du procédé en fonction des variabilités des conditions opératoires, à un modèle de comportement thermique du système permettant d'estimer les besoins énergétiques nécessaires à son fonctionnement. L'ACV est réalisée sur la base des résultats des simulations de la croissance de la spiruline en prenant en compte la variation dynamique des conditions météorologiques de la ville de Toulouse, en sud de la France.

Une telle approche exige la définition d'une unité fonctionnelle (UF) appropriée, des limites du système tout en assurant la qualité des données recueillis. Notre UF est « la production et la récolte de 1kg de Spiruline fraîche (à 85% environ de teneur en humidité), produite pendant 1 an en France, à Toulouse ». La comparaison des différents scénarii évalués sera faite en termes d'impact environnemental relatif à cette unité fonctionnelle. Le système étudié couvre le cycle de vie de la production de Spiruline, i.e. de l'extraction des matières premières jusqu'à l'obtention du produit, "cradle to gate".

Les frontières du système comprennent les processus de premier-plan, à savoir le système de production et de récolte incluant le PBR tubulaire solaire et la cuve de stripping d'oxygène, ainsi que le filtre presse de récolte. Le système de premier plan est connecté à des processus d'arrière-plan qui permettent de prendre en compte les origines de flux entrants (i.e. les matériaux de construction, l'énergie, les produits chimiques et les nutriments, l'eau et le

transport) et le devenir des flux sortants du système de premier plan (i.e. le traitement des eaux usées issues de la récolte et du nettoyage). La **Figure 93** illustre les limites du système, ses différents flux intermédiaires et élémentaires, ainsi que les ressources utilisées directement depuis l'environnement.

Les données nécessaires pour les processus d'arrière-plan sont extraites de la base de données ecoinvent 3.7.1 <sup>363</sup>. La fin de vies des matériaux de l'infrastructure du système et de son fonctionnement n'est pas prise en compte. On peut considérer que ces matériaux (verre, plastique, métaux) sont facilement recyclables.



**Figure 93** : Schéma des frontières du cycle de vie pour la production de Spiruline fraîche (Scénario de base).

## 2.3. Descriptif du système de premier plan

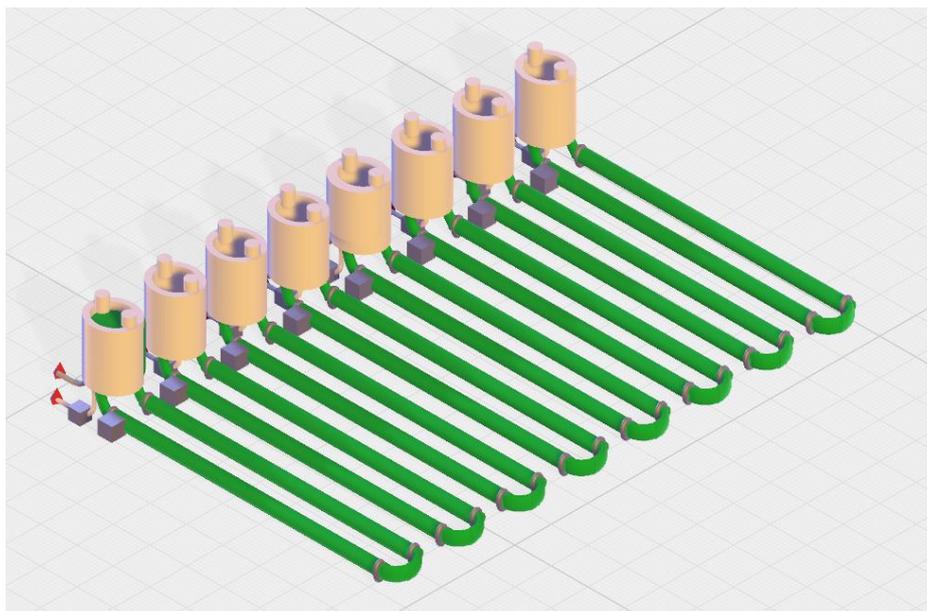
### 2.3.1. Configuration du PBR étudié

Nous considérons que la culture est réalisée dans un système solaire, constitué principalement d'un PBR tubulaire transparent disposé sous forme de U, connecté à un réservoir permettant de recirculer la suspension de spiruline en boucle fermée. Le volume de la partie tubulaire a été fixé à environ 72% du volume totale de la culture (soit 11,75 m<sup>3</sup>). Nous rappelons que le réservoir est utilisé pour l'évacuation du surplus d'oxygène, l'approvisionnement des nutriments, la régulation thermique, le mélange, et la récolte de la biomasse dont la concentration varie entre 0,3 et 1,7 g.L<sup>-1</sup>. Une distance de 2/3 le diamètre du tube a été sélectionnée sur la base des recommandations de la littérature <sup>106,107,260</sup> pour l'espacement optimal entre les tubes, afin d'éviter l'effet de l'ombrage mutuel et assurer la conception adéquate des coudes des tubes en U. La surface totale occupée par le système de production est considérée comme la somme de la surface occupée par le collecteur solaire

tubulaire et le système de stripping. Les dimensions du système élémentaire et semi-industriel considéré dans cette analyse sont données dans le **Tableau 20**.

**Tableau 20** : Les dimensions du système tubulaire simulé pour l'ACV (Scénario de référence).

Système	Tubulaire élémentaire	Semi industriel
Longueur (m)	120	
Diamètre interne	0,046	
Diamètre externe du tube (m)	0,05	
Espaces entre les tubes	0,033	
Hauteur des tubes par rapport au sol (m)	0,05	
Nombre de tube élémentaire	1	50
Volume collecteur tubulaire (m <sup>3</sup> )	0,235	11,75
Volume de la partie non tubulaire (m <sup>3</sup> )	0,1	5
Surface totale du sol occupé (m <sup>2</sup> )	15	750



**Figure 94 :** Schéma conceptuel de huit PBR tubulaires élémentaires constituant notre système semi-industriel hypothétique pour la production de Spiruline fraîche.

### 2.3.2. Étapes de fonctionnement

Le processus de premier plan comprend trois étapes principales pour lesquelles la consommation d'énergie et de matière sont calculées sur la base des approches de modélisation décrites dans les Chapitres précédents. Il s'agit de l'étape de :

#### a) Nettoyage et préparation du milieu de culture

La première étape du processus est le nettoyage du système de production, elle se réalise par un procédé de désinfection /stérilisation. Le photo-bioréacteur est rempli d'une solution d'acide citrique à 1 g/L pendant quelques heures. La stérilisation s'effectue en utilisant une solution à 2 mg/L d'hypochlorite de sodium). Le PBR est ensuite rincé avec de l'eau potable 3 fois pour éliminer les agents détergents. D'autres protocoles de nettoyage existent dans la littérature <sup>77,120</sup>. Nous considérons que ce protocole de lavage est effectué 2 fois par an.

L'approvisionnement en milieu de culture et en inoculum se réalise à l'intérieur d'un réservoir (colonne à bulle) où les différents nutriments et sels sont mélangés puis pompés dans les tubes. La préparation est faite au préalable de son insertion dans le réacteur selon la formulation utilisée déjà par notre équipe dans une étude antérieure <sup>39</sup> et qui est donnée dans le **Tableau 7**. L'inoculum est introduit à une concentration initiale de 0,3 g/L. Les sources principales nécessaires à la croissance de la spiruline sont le carbone, l'azote, le phosphore et le soufre. Ces derniers sont fournis, respectivement, sous forme de bicarbonate de sodium  $\text{NaHCO}_3$ , de nitrate de sodium  $\text{NaNO}_3$ , et de différentes formes de phosphate et sulfate non explicités dans cette étude. Ce milieu a été formulé pour assurer un excès de nutriments pour éviter toute limitation éventuelle, et de sorte que l'on puisse produire jusqu'à 5g/L dans les

conditions optimales de basicité et de salinité, tout en respectant la stœchiométrie relative à la formule brute de la spiruline (donnée par l'Eq (1)).

## b) Culture

Nous considérons que la culture est réalisée en discontinu (fonctionnement Batch) où la période de culture dépend des conditions météorologiques extérieures. Son arrêt est conditionné par une consigne sur la concentration de biomasse. La température du milieu de culture peut être régulée à l'aide d'un équipement de chauffage et refroidissement pour fournir une température dans la plage de fonctionnement optimale [ $23^{\circ}\text{C}$  -  $37^{\circ}\text{C}$ ]. Nous supposons que cette régulation est assurée par une pompe à chaleur (air/eau) réversible avec un coefficient de performance  $\text{COPS} = 3$  en mode chauffage et un  $\text{SEER}$  (Seasonal Efficiency Energy Ratio) = 5,6 en mode refroidissement. Évidemment, ces coefficients dépendent de la machine utilisée. Ils sont utilisés pour estimer la consommation électrique de notre système solaire à partir des besoins de chaud et en froid calculés préalablement par notre modèle thermique.

En ce qui concerne le pH, nous considérons qu'aucune régulation de ce paramètre n'est implémentée. Néanmoins, avec ce mode de fonctionnement, le pH évolue avec le temps. Cela est la conséquence de la modification de la composition du milieu de culture suite à la consommation des nutriments et aux interactions chimiques ayant lieu entre les différentes espèces dans l'eau. Les résultats expérimentaux du suivi de pH enregistrent une augmentation continue en fonction du temps (ex. **Figure 50.(b)** où le pH passe 9,6 à 10,1 dans 5 jours). À ces valeurs de pH, d'une part les équilibres initiaux entre les espèces se déplacent et l'espèce du carbonate devient majoritaire provoquant ainsi une éventuelle inhibition de la croissance, et d'autre part, l'équilibre du  $\text{CO}_2$  gazeux  $\text{CO}_2^*$  avec le carbone inorganique dissous dans le milieu est modifié, d'où le transfert de  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère. Le métabolisme de nuit intervient également sur ces équilibres suite au relargage du  $\text{CO}_2$  par les cellules. Sur la base de notre modèle de production, qui inclut les équilibres chimiques et les phénomènes de transfert, nous avons pu calculer la quantité de  $\text{CO}_2$  émise par le système sur l'échelle d'une année. Les résultats indiquent une valeur de  $0,09 \text{ g.L}^{-1}.\text{an}^{-1}$  (soit  $6,9.10^{-4} \text{ kg de CO}_2 \text{ perdu/kg de biomasse produite}$ ).

La mise en mouvement de la culture est assurée par un système de pompage dans la partie tubulaire. Suite à l'analyse préalable de l'évolution de la concentration d'oxygène atteignable en fonction de la longueur du tube pour le plus haut taux de croissance (chapitre III), la vitesse moyenne de circulation dans cette partie du réacteur est imposée à  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$  (soit un débit de  $2,83 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ ), la longueur des tubes est de 120 m et le temps de passage dans les tubes de 5 min. L'évacuation de l'oxygène et l'homogénéisation du milieu de culture s'effectuent avant l'entrée dans les tubes, dans un réservoir sous forme de colonne à bulle (stripper), équipé d'un système de bullage (libération d'air dans la cuve par des distributeurs de bulles poreux de 0,8 mm de diamètre), afin de favoriser les phénomènes de transfert de matière gaz-liquide. Le

débit de bullage utilisé est imposé à  $32,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Ce débit d'air, calculé au chapitre III est adapté à ce type de colonne à bulle afin d'atteindre un coefficient de transfert volumique  $K_{LaL}$  de  $0,0055 \text{ s}^{-1}$ , une valeur jugée suffisante pour réduire la concentration en dioxygène à 150% de saturation.

### c) Récolte et renouvellement des nutriments

La récolte de la culture s'effectue sous la consigne de la concentration de biomasse atteinte dans le réacteur (i.e. un optimum de  $1,7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Le nombre de cycles de récolte dépend des conditions météorologiques et de la conduite du PBR. Au moment de la récolte, 78,8% du volume total est pompé vers un filtre-presse industriel pour concentrer la biomasse. Le débit de pompage est imposé de manière à respecter la pression maximale du filtre utilisé (filtre en Polypropylène). Le rétentat de filtration est le produit d'intérêt de notre procédé à savoir de la Spiruline à 15% de matière sèche. Pour éviter une trop grande consommation d'eau et de nutriments, le perméat est recyclé totalement dans la culture. Quand les quantités des nutriments deviennent insuffisantes pour la croissance ; le milieu est renouvelé. Ceci est gouverné par une concentration seuil de nutriments dans le milieu.

L'eau utilisée pour le nettoyage du filtre pour chaque cycle de récolte n'est pas prise en compte dans cette étude.

#### **2.3.3. Scénarii comparatifs**

Sur la base des données issue de l'analyse énergétique précédente, l'étude comprend au total huit scénarii (comprenant le scénario de référence) visant à comparer les performances environnementales du système de culture ; à savoir deux méthodes de contrôle de température (i.e. régulation permanente sur toute l'année *vs* une régulation diurne uniquement) appliquées à un PBR extérieur et au même PBR sous trois configurations de serre (i.e. trois hauteurs de serre différentes). Le **Tableau 19** dans §1.3.3 présente les divers scénarii évalués.

## 2.4. Réalisation des inventaires du cycle de vie

Dans cette section, nous nous intéressons aux méthodes de calcul et à la collecte des données des entrées et des sorties pour les trois étapes du processus de premier plan (cf. **Figure 93**). Les inventaires de notre système comprennent la consommation d'eau potable et des produits chimiques (pour le nettoyage et la nutrition), des matériaux pour l'infrastructure et des équipements, de l'énergie (électricité) pour la régulation thermique et pour d'autres postes de fonctionnement (aération et pompage pour la circulation et la récolte), et du transport.

Les inventaires liés au processus d'arrière-plan, notamment les procédés de production de chaque intrant pour la culture de spiruline et le traitement des déchets en sortie, sont obtenus à partir de la base de données ecoinvent 3.7.1 <sup>363</sup>.

La procédure de quantification des flux de matière et d'énergie pour chaque étape du processus de premier-plan, et pour chaque scénario, est basée sur les résultats de simulation dynamique du fonctionnement annuel du procédé. Les différentes consommations sont attribuées à la quantité de biomasse produite sur une année et donc ramenées à l'unité fonctionnelle.

Quelques hypothèses ont été considérées dans les calculs à titre de simplification :

- Les matériaux nécessaires pour la construction des différentes structures (serre et PBR) sont considérés, alors que l'énergie nécessaire pour la construction des installations n'est pas prise en compte.
- Les pertes éventuelles des nutriments résiduels dans la boue de la Spiruline fraîche récoltée ne sont pas prises en compte.
- Dans l'étape de pré-culture, seulement le nettoyage est considéré.
- Les pertes d'eau liées à l'évaporation sont négligées car le système n'est pas totalement ouvert.
- Pour le transport des produits chimiques et des matériaux de construction, une distance de transport moyenne de 150 km a été considérée.

### 2.4.1. Évaluation des flux intermédiaires associés au système de production (tous les scénarios)

#### A) Évaluation de la consommation d'eau et de produits chimiques et nutritifs

La quantité de nutriments consommés (kg) est calculée par rapport au volume d'eau de la culture, en se basant sur la composition du milieu de culture (**Tableau 7**) et les rendements stœchiométriques décrits dans le **Chapitre II**. Ainsi, la consommation annuelle des nutriments est proportionnelle à la quantité de Spiruline produite sur une année. Les quantités sont données dans le tableau de résultats d'inventaire **Tableau 26**.

Quant aux produits chimiques pour le nettoyage (l'hypochlorite de sodium et l'acide citrique), ils sont quantifiés par rapport au volume du réacteur selon les concentrations énoncées dans le protocole de lavage, en supposant que le PBR est lavé 2 fois par an. La quantité d'eau utilisée

pour chaque évènement de nettoyage est estimée à 4 fois le volume total du réacteur (une étape de stérilisation et trois de rinçage). L'eau du lavage en sortie est dirigée vers une station de traitement d'eau usée.

En ce qui concerne l'eau utilisée pour la culture, elle est quantifiée par un bilan massique considérant : (1) la quantité à ajouter après chaque soutirage (soit 78% du volume total de sorte que la concentration de biomasse dans le nouveau batch soit égale à  $0,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), (2) la quantité d'eau recyclée après la séparation (par filtration) sachant que la biomasse obtenue est à 85% d'humidité et (3) un renouvellement total de l'eau de culture après chaque nettoyage.

Dès lors, la quantité d'eau et de nutriment de culture varie d'un scénario à un autre en fonction de la productivité du système.

**Tableau 21** : Teneurs des produits chimiques pour le nettoyage.

Produits de nettoyage	Quantité	Unité
NaClO (hypochlorite de sodium)	0,002	( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> (Acide citrique)	1	( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
Eau pour le nettoyage	117,43 (3 fois le volume)	( $\text{m}^3$ )
Produits de la culture		
Eau pour la culture	16,78	( $\text{m}^3$ )
Nutriments	Quantité stœchiométrique	( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )

## B) Estimation des matériaux et des équipements utilisés

Concernant les matériaux utilisés pour la construction du PBR, ils sont quantifiés à partir des dimensions du réacteur et de ses différents accessoires d'alimentation et de récolte en utilisant la masse volumique de chaque produit ou ses propriétés de performances. Le **Tableau 22** présente les quantités des différents matériaux, équipements (ex. pompe à chaleur, pompe de circulation et filtre presse) et l'espace requis estimés. Hormis le nombre de PAC qui varie en fonction du scénario adopté, les valeurs de ces composantes du système restent invariables.

**Tableau 22** : Caractéristiques des différents matériaux et équipements du PBR

Matériaux	Quantité (kg)	Durée de vie	Masse volumique ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Description
Polyéthylène (PEHD)	14,1	10 ans	930	Utilisé pour la construction du réservoir
Polypropylène (PP)	2,25	20 ans	890	Utilisé pour la tuyauterie et les conduites d'alimentation en eau et nutriment et récolte de culture
Poly méthacrylate de méthyle acrylique (PMMA)	233	20 ans	1188	Utilisé pour la partie tubulaire transparente du PBR (Partie photo active)

<b>Acier inoxydable</b>	5,52	10 ans	7500	Utilisé pour la structure du support des tube et du réservoir
<b>Équipement</b>	Unité	Durée de vie		Description
<b>Pompe de circulation</b>	50	20 ans		Utilisée pour la mise en mouvement et la circulation de la culture entre la partie tubulaire et la colonne à bulle ainsi que le soutirage. La pompe est considérée d'efficacité de 0,8.
<b>Pompe à chaleur</b>	*	20 ans		Utilisée pour la régulation thermique. La puissance maximale de la PAC utilisée est supposée de 10kW (modulable) Ses coefficients de performances saisonniers sont : COPS =3 SEER=5,6
<b>Filtre-presse</b>	2,56	20 ans		Utilisé pour la séparation solide-liquide après la récolte. Le filtre est considéré en polypropylène
<b>Surface au sol requise</b>	15 000 m <sup>2</sup> .an	20 ans		La surface de terre occupée pendant toute la durée de vie de l'installation

\*quantité variable en fonction du scénario

La serre est considérée de forme parallélépipédique. Le **Tableau 23** présente les dimensions des 3 serres de différentes tailles, comme discuté dans le [Chapitre IV](#).

**Tableau 23** : Les caractéristiques des serres.

	Quantité (kg)			Durée de vie	Description
Matériaux de construction					
<b>Cas</b>	1	2	3	30 ans	Revêtement : Parois et toit
<b>Hauteur</b>	0,2 m	0,5 m	2 m		
<b>Verre plat</b>	6280	6700	8800		
<b>Acier</b>	2423,32	2443,82	2546,32	10 ans	Structure porteuse

### C) Estimation des énergies consommées

En plus de la régulation thermique, il existe d'autres postes de consommation d'énergie, notamment le mélange et la circulation, l'aération, la récolte et la filtration. Les paramètres nécessaires à leur quantification sont présentés ci-dessous.

Le **Tableau 24** résume les informations nécessaires pour le calcul d'énergie lié à la circulation de la culture entre les tubes et la colonne à bulle.

**Tableau 24 : Paramètres pour le calcul de la consommation d'énergie liée au pompage d'eau**

Propriétés	Unité	Valeur	Description
Viscosité dynamique de la culture à 25°C	(Pa.s)	0,001	Caractéristiques du système de culture (grandeurs physiques et de fonctionnement)
Masse volumique de la culture « $\rho$ »	(kg.m <sup>-3</sup> )	1000	
Pesanteur « g »	(m.s <sup>-2</sup> )	9,8	
Nombre d'heure de fonctionnement par an (97% de l'année)	(h)	8497,2	
Efficacité de la pompe	(-)	0,8	Constantes choisies pour notre système
Débit de circulation $Q_{cir}$	(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	7,85. 10 <sup>-4</sup>	
Reynolds	(-)	20 000	
Coefficient de frottement « f »	(-)	2,66. 10 <sup>-2</sup>	
Coefficient de pertes de charge singulières des coudes	(-)	0,6	
Pertes de charge singulières $\Delta H_1$	(m)	5.10 <sup>-3</sup>	Les pertes de charges calculées pour un tube élémentaire de 120m et 5 cm de diamètre.
Pertes de charge linéaires $\Delta H_2$	(m)	5,2.10 <sup>-1</sup>	
Pertes de charge totales $\Delta H$	(m)	5,3.10 <sup>-1</sup>	
Pertes de pression $\Delta P/L$	(Pa.m <sup>-1</sup> )	42,97	Calculés par : $\frac{\Delta P}{L} = \frac{(\Delta H_1 + \Delta H_2) \cdot g \cdot \rho}{L}$
Puissance hydraulique	(W.m <sup>-3</sup> )	3,4.10 <sup>-1</sup>	Calculée par : $P = \Delta P \cdot Q_{cir}$
Énergie électrique consommé (cas de 50 tubes)	(kWh.an <sup>-1</sup> )	2150,74	La puissance multipliée par la durée de fonctionnement et l'efficacité de la pompe

Les consommations d'énergie liées à la récolte et à la filtration sont calculées en considérant le volume de culture soutirée, le nombre annuel de cycles de soutirage, et les pertes de charge de la membrane de filtration. Cette énergie est variable selon les scénarii.

Le **Tableau 25** présente les données relatives à la colonne de stripping d'oxygène et les différents détails de calcul de la consommation énergétiques liée à l'aération.

**Tableau 25** : Détails sur la colonne à bulle et la consommation énergétique associée à l'aération

Propriétés	Unité	Valeur	Description
Hauteur du réservoir « $H_{cb}$ »	(m)		Caractéristiques de la colonne à bulle utilisée pour stripper l'O <sub>2</sub>
Section « $S_{cb}$ »	(m <sup>2</sup> )		
Diamètre interne « $D_i$ »	(m)		
Débit d'aération $Q_{aeration}$	(L.min <sup>-1</sup> )	32,30	Données
Vitesse ascensionnelle d'une bulle	(m.s <sup>-1</sup> )	0,25	
Taux de rétention gazeuse	(-)	1,8%	
Vitesse du gaz	(m.s <sup>-1</sup> )	0,0045	
Pertes de charge de l'orifice de bullage $\Delta P_{bulleur}$	(Bars)	0,032	Extrait de la thèse de <i>Loubière</i> <sup>364</sup>
Pertes de charge totale $\Delta P$	(Pa)	$5,17 \cdot 10^{-4}$	Calculées par $\Delta P = \rho \cdot g \cdot H_{cb} + \Delta P_{bulleur}$
Puissance consommée	(W)	27,9	Calculée par : $P = \Delta P \cdot Q_{aeration}$
Énergie électrique consommée	(kWh.an <sup>-1</sup> )	295,12	La puissance multipliée par la durée de fonctionnement et l'efficacité de la pompe

## 2.5. Calcul des impacts environnementaux

Les impacts environnementaux du système ont été évalués avec la méthode ReCiPe Endpoint (H, A) pour toutes les catégories d'impacts présents dans la méthode. Cette méthode fournit des résultats d'impact exprimés en points (sans dimension) comme dommages sur trois groupes : la santé humaine, la santé des écosystèmes et l'épuisement des ressources naturelles. Chaque groupe contient plusieurs catégories d'impacts, comme on va le voir plus loin. La méthode ReCiPe Midpoint (H) <sup>365</sup> a été utilisée uniquement pour le changement climatique (GWP 100) afin d'obtenir le résultat de cet impact exprimé aussi en kg CO<sub>2</sub> eq, qui est largement utilisé. L'ACV attributionnelle (modèle d'allocation APOS) a été réalisée avec le logiciel UMBERTO LCA+ et la base de données ecoinvent v3.7.

## **2.6. Résultats**

### **2.6.1. Résultats d'inventaires pour les différents scénarii**

Les résultats d'inventaires, pour la production de 1kg de Spiruline fraîche (humidité 85%), sont présentés dans le *Tableau 26*.

Les consommations de nutriments sont identiques pour tous les scénarii, car elles sont stœchiométriquement proportionnelles à la biomasse produite. De même, dans les scénarii de fonctionnement avec un mode de régulation thermique permanent, et pour les deux configurations (sous et sans serre), les entrants et sortants du système sont invariables, car la production de biomasse est la même. Seules les consommations électriques liées au chauffage et au refroidissement dépendent des scénarii, ainsi que les quantités de matériaux de l'infrastructure de la serre qui augmentent avec sa taille.

**Tableau 26 :** Liste des flux intermédiaires entrants et sortants du procédé (système de premier plan), pour tous les scénarii étudiés.

Processus et équipement de fonctionnement			Unité	Quantité (par 1 kg de Spiruline produite)								Nom du procédé dans Ecoinvent		
				SS-RP (référence)	SS-RJ	AS-RP 0,2	AS-RP 0,5	AS-RP 2	AS-RJ 0,2	AS-RJ 0,5	AS-RJ 2			
Entrées	Produits chimiques, nutriments et eau pour la culture	Acide citrique	(kg)	2,81.10 <sup>-2</sup>	3,33.10 <sup>-2</sup>	2,81.10 <sup>-2</sup>	2,81.10 <sup>-2</sup>	2,81.10 <sup>-2</sup>	3,39.10 <sup>-2</sup>	3,73. 10 <sup>-2</sup>	3,98. 10 <sup>-2</sup>	Citric acid production [RER]		
		Hypochlorite de sodium		1,07.10 <sup>-3</sup>	1,2.10 <sup>-3</sup>	1,07.10 <sup>-3</sup>	1,07.10 <sup>-3</sup>	1,07.10 <sup>-3</sup>	1,29.10 <sup>-3</sup>	1,42.10 <sup>-3</sup>	1,51.10 <sup>-3</sup>	Market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state [RER]		
		Sulfate de potassium		4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	4,41.10 <sup>-2</sup>	Market for potassium sulfate [RER]	
		Phosphate de sodium		4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	4,15.10 <sup>-2</sup>	Market for sodium phosphate [RER]	
		Chlorure de sodium		7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	7,45.10 <sup>-1</sup>	Market for sodium chloride, powder [GLO]	
		Hydroxyde de sodium		2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	2,61.10 <sup>-1</sup>	Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]	
		Nitrate de sodium		6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	6,20.10 <sup>-1</sup>	Sodium nitrate production [RER]
		Bicarbonate de sodium		3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	Market for sodium bicarbonate [GLO]
	Eau de robinet	(m <sup>3</sup> )	1,12.10 <sup>-1</sup>	1,31.10 <sup>-1</sup>	1,12.10 <sup>-1</sup>	1,12.10 <sup>-1</sup>	1,12.10 <sup>-1</sup>	1,35. 10 <sup>-1</sup>	1,49. 10 <sup>-1</sup>	1,59. 10 <sup>-1</sup>	1,59. 10 <sup>-1</sup>	Market for tap water [Europe without Switzerland]		
	Matériaux de construction et articles de fonctionnement	Verre pour la serre	(kg)	0	0	2,10. 10 <sup>-1</sup>	2,24. 10 <sup>-1</sup>	2,95. 10 <sup>-1</sup>	2,54. 10 <sup>-1</sup>	2,98. 10 <sup>-1</sup>	4,17. 10 <sup>-1</sup>	4,17. 10 <sup>-1</sup>	Flat glass production, uncoated [RER]	
Polyméthacrylate de méthyle		1,95.10 <sup>-1</sup>		2,27.10 <sup>-1</sup>	1,95.10 <sup>-1</sup>	1,95.10 <sup>-1</sup>	1,95.10 <sup>-1</sup>	2,35.10 <sup>-1</sup>	2,59.10 <sup>-1</sup>	2,76. 10 <sup>-1</sup>	2,76. 10 <sup>-1</sup>	Market for methyl methacrylate [RER]		
Polyéthylène		1,13.10 <sup>-2</sup>		1,37.10 <sup>-2</sup>	1,13.10 <sup>-2</sup>	1,13.10 <sup>-2</sup>	1,13.10 <sup>-2</sup>	1,36.10 <sup>-2</sup>	1,50.10 <sup>-2</sup>	1,60.10 <sup>-2</sup>	1,60.10 <sup>-2</sup>	Market for polyethylene, high density, granulate, recycled [Europe without Switzerland]		
Polypropylène		4,02.10 <sup>-3</sup>		4,68.10 <sup>-3</sup>	4,02.10 <sup>-3</sup>	4,02.10 <sup>-3</sup>	4,02.10 <sup>-3</sup>	4,85.10 <sup>-3</sup>	5,35.10 <sup>-3</sup>	5,70.10 <sup>-3</sup>	5,70.10 <sup>-3</sup>	Polypropylene production, granulate [RER]		
Acier		4,62.10 <sup>-3</sup>		5,37.10 <sup>-3</sup>	8,18.10 <sup>-2</sup>	8,53.10 <sup>-2</sup>	8,58.10 <sup>-2</sup>	1,03.10 <sup>-1</sup>	1,15.10 <sup>-1</sup>	1,27.10 <sup>-1</sup>	1,27.10 <sup>-1</sup>	1,27.10 <sup>-1</sup>	Steel production, electric, chromium steel 18/8 [RER]	
Pompe à chaleur		article		1,99.10 <sup>-3</sup>	9,74.10 <sup>-4</sup>	6,28.10 <sup>-4</sup>	8,37.10 <sup>-4</sup>	1,26.10 <sup>-3</sup>	7,57.10 <sup>-4</sup>	9,74.10 <sup>-4</sup>	1,39.10 <sup>-3</sup>	1,39.10 <sup>-3</sup>	Heat pump production, brine-water, 10kW [CH]	

Chapitre V

Distributeur		Pompe de circulation		4,83.10 <sup>-4</sup>	5,62.10 <sup>-4</sup>	4,83.10 <sup>-4</sup>	4,83.10 <sup>-4</sup>	4,83.10 <sup>-4</sup>	5,82.10 <sup>-4</sup>	6,42.10 <sup>-4</sup>	6,83.10 <sup>-4</sup>	Water pump production, 22kW [GLO]	
		Air comprimé	(m <sup>3</sup> )	13,8	16,03	13,8	13,8	13,8	16,6	18,3	19,5	Market for compressed air, 700 kPa gauge [RER]	
		Occupation des terres	(m <sup>2</sup> .an)	6,3.10 <sup>-1</sup>	7,3.10 <sup>-1</sup>	6,3.10 <sup>-1</sup>	6,3.10 <sup>-1</sup>	6,3.10 <sup>-1</sup>	7,6.10 <sup>-1</sup>	8,4.10 <sup>-1</sup>	8,9.10 <sup>-1</sup>	Ressources	
	Energie		Électricité pour nettoyage		3,39.10 <sup>-4</sup>	4,58.10 <sup>-4</sup>	3,39.10 <sup>-4</sup>	3,99.10 <sup>-4</sup>	3,99.10 <sup>-4</sup>	4,75.10 <sup>-4</sup>	5,23.10 <sup>-4</sup>	5,57.10 <sup>-4</sup>	Market for electricity, low voltage [FR]
			Électricité pour mise en mouvement et aération	(kWh)	8,66	10,1	8,66	8,66	8,66	10,5	11,5	12,3	
		Électricité pour la régulation		205,4	73,7	77,0	89,1	113,1	163,6	206,1	297,8		
		Électricité pour la récolte et la filtration		1,58.10 <sup>-1</sup>	1,59.10 <sup>-1</sup>	1,58.10 <sup>-1</sup>	1,58.10 <sup>-1</sup>	1,58.10 <sup>-1</sup>	1,59.10 <sup>-1</sup>	1,59.10 <sup>-1</sup>	1,59.10 <sup>-1</sup>		
Transport		Transport des produits chimiques et nutriments	(ton.km)	7,92.10 <sup>-1</sup>	7,93.10 <sup>-1</sup>	7,92.10 <sup>-1</sup>	7,92.10 <sup>-1</sup>	7,92.10 <sup>-1</sup>	7,93.10 <sup>-1</sup>	7,94.10 <sup>-1</sup>	7,94.10 <sup>-1</sup>	Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 [RER]	
		Transport des matériaux d'infrastructure		3,32.10 <sup>-2</sup>	3,76.10 <sup>-2</sup>	7,59.10 <sup>-2</sup>	7,75.10 <sup>-2</sup>	8,85.10 <sup>-2</sup>	9,16.10 <sup>-2</sup>	1,04.10 <sup>-1</sup>	1,26.10 <sup>-1</sup>		
Sortie	Fin de vie	Perméat de la récolte	(m <sup>3</sup> )	1,10.10 <sup>-2</sup>	1,30.10 <sup>-2</sup>	1,10.10 <sup>-2</sup>	1,10.10 <sup>-2</sup>	1,10.10 <sup>-2</sup>	1,32.10 <sup>-2</sup>	1,46.10 <sup>-2</sup>	1,55.10 <sup>-2</sup>	Treatment of wastewater, average, capacity 1.1E10l/year [CH]	
		Eaux usée	(m <sup>3</sup> )	9,83.10 <sup>-2</sup>	1,14.10 <sup>-1</sup>	9,83.10 <sup>-2</sup>	9,83.10 <sup>-2</sup>	9,83.10 <sup>-2</sup>	1,19.10 <sup>-1</sup>	1,31.10 <sup>-1</sup>	1,39.10 <sup>-1</sup>		
		Biomasse produite	(kg)	1								Matériau créé	

## 2.6.2. Évaluation des impacts du cycle de vie des scénarii étudiés (LCIA)

### A) Résultats d'impacts Endpoint et comparaison des scénarii

Les processus impliqués dans le cycle de vie ont été groupés en 5 groupes de contributeurs : Électricité, Produits chimiques (nutriments et produits de nettoyage), Infrastructure, Transport, et autres processus moins influents.

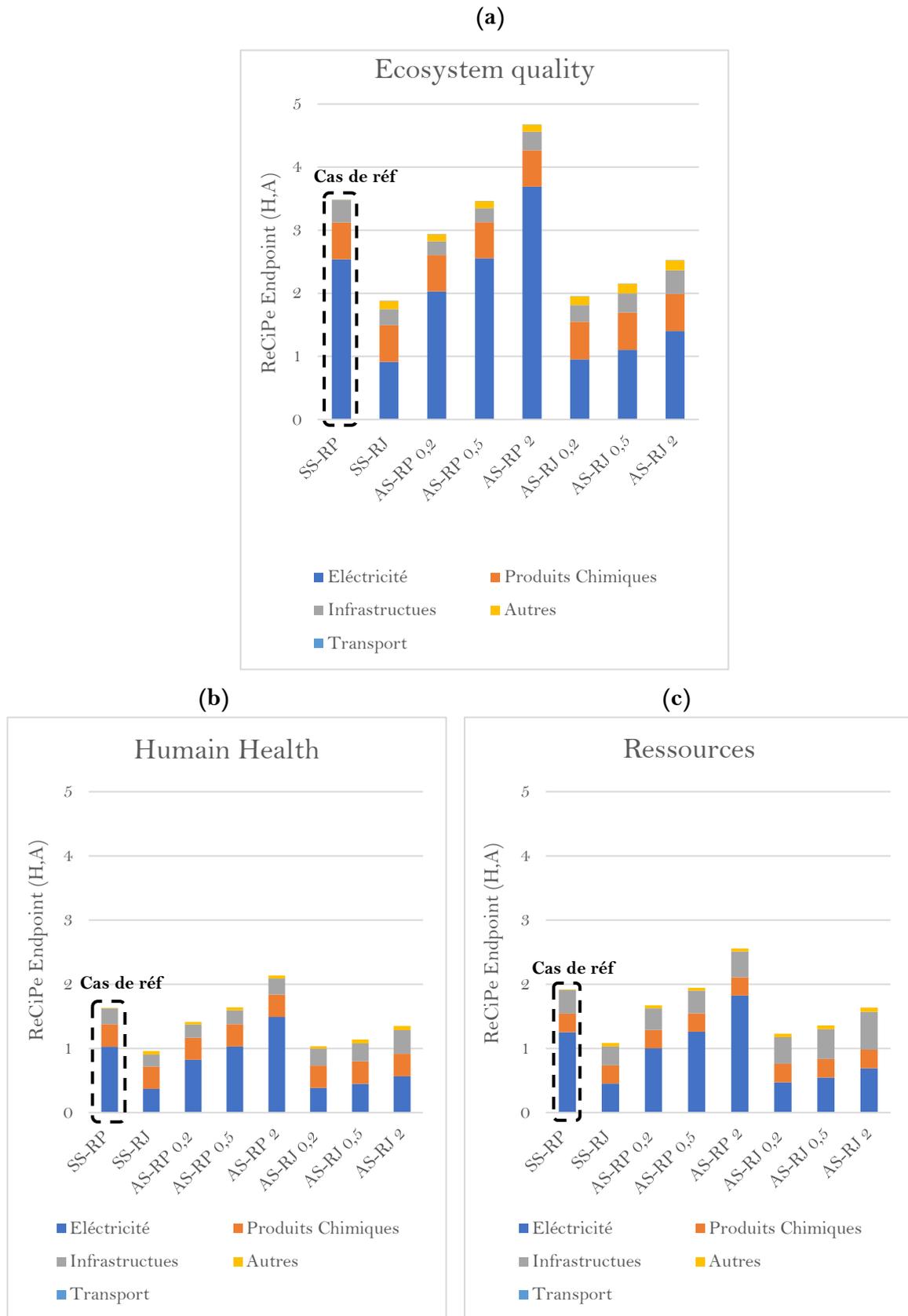
La première analyse concerne la contribution de ces 5 contributeurs sur les groupes d'impact qualité des écosystèmes, santé humaine et épuisement des ressources. Les résultats des impacts finaux sur ces trois groupes sont présentés dans la **Figure 95**. Cela montre que, pour tous les scénarii, la catégorie la plus touchée est la qualité des écosystèmes, avec une contribution de 54% aux impacts globaux, ensuite les ressources (25%) et enfin la santé humaine (21%).

Le classement des scénarii est le même pour les 3 groupes d'impacts. De plus, on constate la même tendance des proportions des contributeurs à un scénario donné, pour les 3 catégories d'impact.

Les cas de fonctionnement avec une régulation thermique diurne uniquement semblent les plus performants vis-à-vis de l'environnement et de la santé humaine, en particulier, pour un PBR mis à l'extérieur ou sous une serre de 0,2m de hauteur (SS-RJ ou AS-RJ0,2). Ils présentent une réduction d'impacts totaux de 44% et 41% respectivement, par rapport au scénario de référence. Les autres scénarii étudiés n'améliorent pas les performances environnementales de la filière.

Les scénarii de culture en mode de régulation thermique permanente (avec ou serre), présentent l'impact le plus élevé, avec une proportion majoritaire de la production d'électricité, ensuite viennent les produits chimiques pour la culture et les matériaux pour l'infrastructure. Les proportions des dommages liées au transport et autres processus sont faibles (voire négligeables) dans ces 3 catégories d'impacts.

Sans surprise, les impacts des produits chimiques utilisés sont quasi-identiques pour tous les scénarii évalués, car leurs quantités (pour produire 1Kg de Spiruline) sont semblables comme l'on a déjà vu dans le paragraphe précédent. Quant à l'infrastructure, les processus de production des différents matériaux et équipements du système génèrent moins d'impacts par rapport aux deux contributeurs précédents. Certes, leurs impacts sont légèrement plus importants dans les configurations avec serre, en particulier quand cette dernière est plus grande, mais la contribution aux impacts totaux du système reste faible et varie en fonction du mode de régulation thermique. En effet, une contribution moyenne de 14% pour les scénarii de fonctionnement sans régulation la nuit a été estimée (contre 8% pour les scénarii avec régulation permanente).

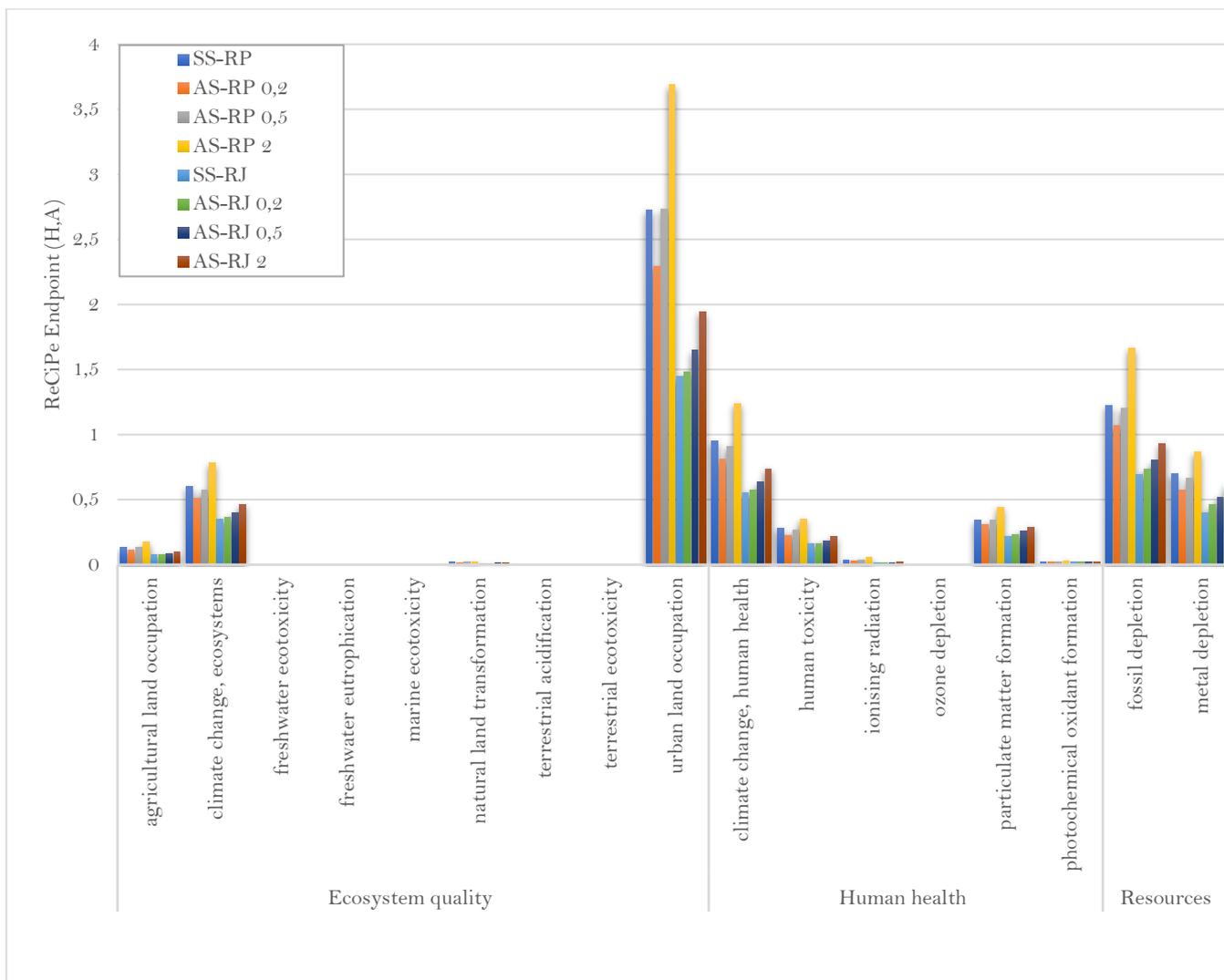


**Figure 95 :** Répartition des différents contributeurs du PBR aux impacts environnementaux finaux, classés par catégories d'impact sur : **(a)** la qualité des écosystèmes, **(b)** la santé humaine et **(c)** l'épuisement des ressources.

Pour comprendre la distribution des impacts de chaque scénario individuel au sein des groupes de dommages analysés, 17 catégories de problèmes potentiels liés à la production solaire de la Spiruline ont été évaluées et présentées dans la **Figure 96**.

Pour tous les scénarii, les résultats montrent que l'impact de l'occupation des terres urbaines domine les catégories de la qualité des écosystèmes suivi de l'impact sur le changement climatique. Ce dernier occupe une place prépondérante dans les catégories de la santé humaine. Par ailleurs, les impacts sur l'épuisement des combustibles fossiles sont en tête des catégories de ressources. Ceci est dû à l'énergie utilisée sur le cycle de vie (premier et arrière-plan).

Concernant l'occupation du sol urbain de notre système, les impacts évalués sont dus à la grande surface nécessaire pour la disposition du collecteur solaire (la partie tubulaire horizontale). En effet, pour un système de production semi-industriel de 16,78 m<sup>3</sup>, il faudrait environ 750 m<sup>2</sup> (soit un ratio  $\frac{S_{occupée}}{Volume}$  d'environ 45). Bien qu'il soit nécessaire de diminuer cette surface (réduire ces impacts) par une optimisation de la conception de la filière (ex. PBRs tubulaires disposés verticalement), une attention particulière doit être portée à l'accès et à la disponibilité de la lumière solaire, le critère phare des performances de ce type de procédé, qui constitue une contrainte technique pour la mise à l'échelle des tubes agencés verticalement à cause de l'ombrage. Ce dernier a un effet négatif sur l'absorption de l'énergie solaire qui contribue au chauffage de la culture ce qui augmente les besoins électriques pour la régulation <sup>120</sup>. Cependant, la vocation ici n'est pas une optimisation de la configuration mais plutôt l'évaluation d'un système tubulaire mise à l'échelle semi-industrielle par une simple multiplication d'un PBR élémentaire. Pour atténuer le poids des impacts écologiques liée à l'utilisation du sol, nous considérons que les terres utilisées sont marginales (n'interfèrent pas avec d'autres activités comme l'agriculture).



**Figure 96 :** Répartition des impacts finaux sur les différentes catégories de la méthode ReCiPe Endpoint, pour les huit scénarii.

L'impact changement climatique domine le groupe santé humaine et constitue la deuxième charge environnementale importante de la qualité d'écosystème. Cela est due aux sources d'énergie utilisées directement ou indirectement par notre système de production. En effet, les processus de combustion de combustibles fossiles pour la production des différents entrants nécessaires à la culture (électricité, matériaux de construction et produits chimiques et nutritionnels) sont à l'origine des émissions des gaz à effet de serre qui provoquent le réchauffement climatique. Cela est soutenu par les résultats des impacts liés à la formation des particules fines (dû à la combustion) dans le groupe santé humaine et à l'épuisement des fossiles et des métaux, dans le groupe des ressources, car ces derniers sont corrélés aux impacts GWP.

Les impacts non-négligeables enregistrés sur les catégories « toxicité humaine » et « formation des particule » dans le groupe santé humaine sont dus principalement aux processus de production de l'énergie et des nutriments comme le bicarbonate et le nitrate, qui génèrent des

substances toxiques dans l'air notamment, le dioxyde de soufre, l'ammoniac, l'oxyde nitreux et les microparticules PM<sub>2.5</sub>.

## B) Résultats d'impact changement climatique

Hormis l'utilisation des terres urbaines, les résultats d'impacts finaux révèlent que le changement climatique (couplé à l'épuisement des fossiles) est le principal contributeur. Les résultats présentés dans la **Figure 97** se focalisent sur les impacts intermédiaires de chaque scénario (par la méthode ReCipe Midpoint) liés à cette catégorie (soit le changement climatique à un horizon de 100 ans « GWP 100 »), exprimés en kg CO<sub>2</sub>-eq.

Si l'on se réfère au scénario de base, les scénarii de fonctionnement avec contrôle diurne de température sont les plus attractifs en termes de performances climatiques. En effet, ils montrent une réduction de 41% pour un PBR extérieur « SS-RJ » et entre 37% et 18% pour un PBR sous serre « AS-RJ » (en fonction de la taille de la serre). En revanche, le mode de fonctionnement avec un contrôle continu annuel ne semble pas être pertinent vis-à-vis de cet impact. Seulement le PBR sous la petite serre peut réduire de 13% l'impact changement climatique dans ce cas. A contrario, les autres configurations augmentent cet impact de 1% et 32% par rapport à la référence.

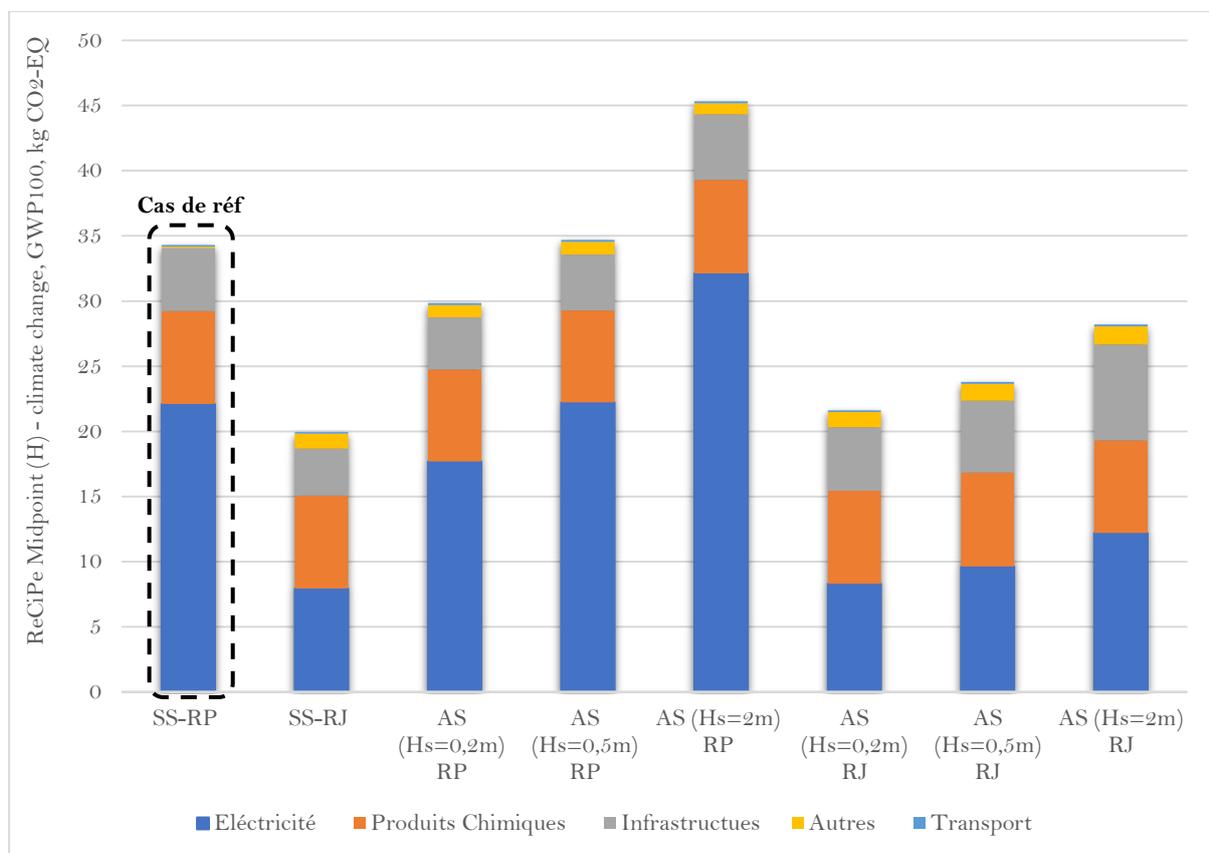
Concernant les contributeurs du système au potentiel de réchauffement global, la **Figure 97** montre que les proportions des processus de production de nutriment et du transport demeurent quasiment inchangées pour tous les scénarios. Quant à l'infrastructure, les impacts sont légèrement élevés dans le cas d'utilisation de la serre, ce qui est dû aux processus de production des matériaux requis pour sa structure. En revanche, les proportions de l'énergie électrique révèlent une variation importante en fonction de la configuration du réacteur et son mode de régulation thermique. En effet, l'électricité est le contributeur majeur pour le système de référence, il représente 64% de l'impact (soit 22,10 kgCO<sub>2</sub>-eq pour un 1kg de Spiruline produite). Cela reste vrai pour les scénarii « AS-RP » où l'électricité joue le rôle dominant dans les impacts environnementaux avec des contributions qui passent de 59% à 71% à mesure que la taille de la serre augmente. Ces résultats sont cohérents avec l'analyse des besoins énergétiques associés à la régulation thermique, présentée dans ce chapitre au §1.3.3.

Bien que ces contributions soient inférieures à celle de l'étude de *Pérez-López et al.* pour la même géométrie de PBR solaire (tubulaires horizontaux) aux Pays-Bas, elles restent néanmoins dans la gamme des contributions de l'énergie à l'impact changement climatique, rapportées dans les études d'ACV de la filière algale, qui vont de 36%<sup>355</sup> à 65%<sup>366</sup> pour les Raceways ouverts et dépasse 90% pour les PBR tubulaire<sup>366,120</sup>. Il faut noter ici que les impacts dus à la consommation d'énergie (électricité) dépendent du mode de production de cette énergie. L'électricité produite en France est plus décarbonée que dans d'autres pays, donc l'impact changement climatique est plus faible pour la même quantité d'énergie fournie.

Par rapport à la référence, l'impact lié à l'électricité passe à 7,94 kgCO<sub>2</sub>-eq.kg<sup>-1</sup> (soit une réduction de 64% par rapport à la référence) pour un PBR extérieur et à 8,31 kgCO<sub>2</sub>-eq.kg<sup>-1</sup> dans une serre de 0,2 m de hauteur (soit une réduction de 62%). Cela indique que le contributeur majoritaire aux impacts environnementaux, dans un tel système de production de biomasse, est

la consommation électrique, en particulier pour le chauffage pendant la nuit. En effet, l'utilisation du mix électrique Français dans notre cas, même s'il est considéré comme le moins émetteur de gaz à effet de serre par rapport à d'autres mix européens <sup>367</sup>, reste la principale origine des émissions de gaz à effet de serre provoquant ainsi une dégradation des performances environnementales de ce procédé.

Cependant, quand bien même une réduction entre 50% et 70% des dépenses énergétiques a été constatée pour ce mode de fonctionnement, la contribution de l'électricité aux impacts totaux du système dans cette catégorie, demeure prépondérante, quelle que soit la conception utilisée (avec ou sans serre), variant entre 38% et 43%. Cela s'explique par les besoins énergétiques importants du système pendant les périodes diurnes, comme discuté dans la partie 1.3 de ce chapitre, mais aussi par l'existence d'autres postes de consommation électrique.



**Figure 97 :** Répartition des différents contributeurs du PBR au potentiel de réchauffement climatique (impact intermédiaires) calculé par la méthode ReCiPe Midpoint pour tous les scénarii.

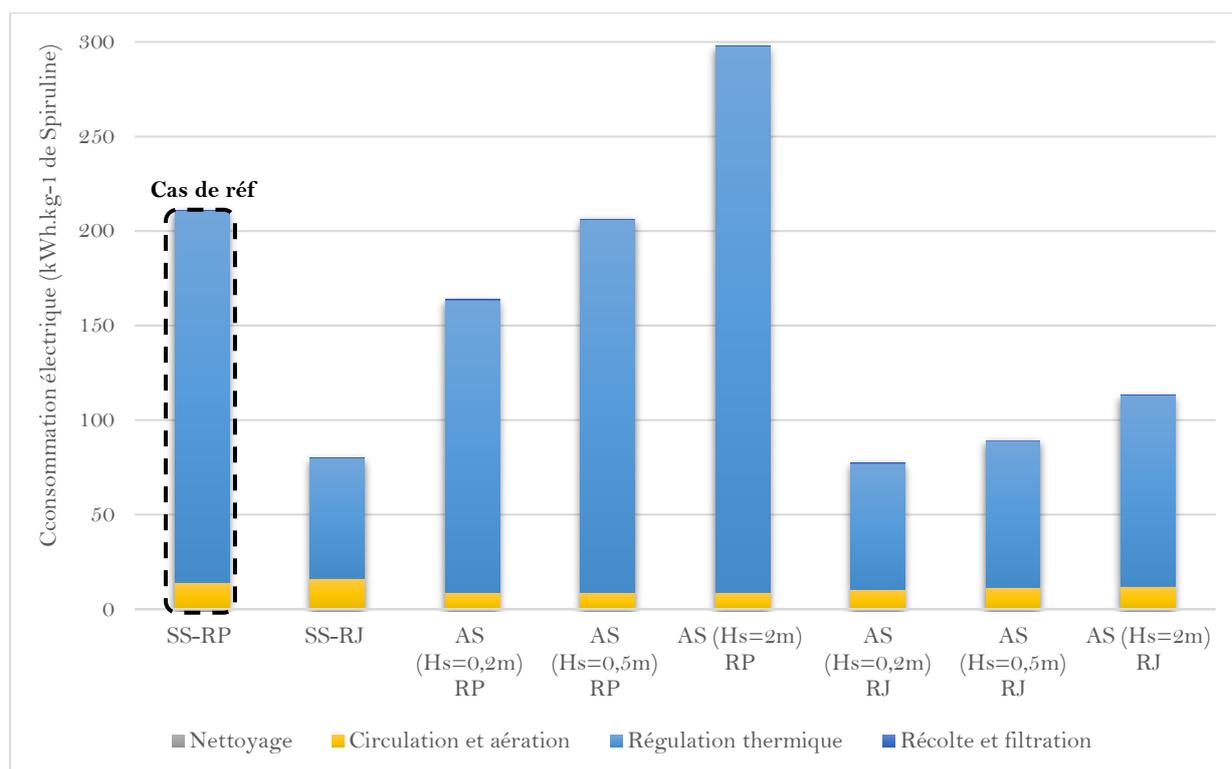
*Analyse du contributeur « électricité »*

La répartition de l'utilisation de l'énergie électrique (kWh.kg<sup>-1</sup> de Spiruline) entre les différents postes unitaires du système, à savoir les processus de nettoyage, de récolte et filtration, du mélange et aération et du contrôle thermique, est présentée dans la **Figure 98**. Effectivement, quelle que soit la configuration et le mode d'exploitation du réacteur, le principal consommateur d'énergie est le module de régulation thermique, c'est-à-dire la pompe à chaleur utilisée pour le chauffage et le refroidissement du système de production. Sa contribution relative dans les

dépenses électriques totales va de 86% à 97%. Ces proportions ont été déjà expliquées par les besoins thermiques annuels du PBR pour maintenir la température de la culture dans la gamme optimale dans les différents scénarii évalués. Ainsi, cela supporte et rejoint les résultats d'impact du réchauffement climatique liée à la production d'électricité.

La conclusion tirée de ces résultats sur l'influence significative du système de régulation thermique sur les performances environnementales du réacteur, n'est pas une découverte pour cette filière. Des études d'ACV antérieures arrivent aux mêmes résultats pour des cultures annuelle dans des réacteurs ouverts <sup>77</sup> ou des cultures saisonnière dans des PBR fermés <sup>120</sup>. Cependant, à notre connaissance, aucune d'entre elles n'aborde la question clé de l'interruption de la régulation nocturne couplée à l'utilisation d'une serre. En effet, dans ces études, le contrôle de température est considéré soit maintenu activé sur toute la période de la culture (nuit et jour), ou arrêté complètement (i.e. pas de régulation thermique). La dernière hypothèse est peu réaliste, car elle rendrait la culture de la Spiruline irréalisable dans notre cas, en raison des très fortes ou faibles températures atteinte dans un PBR tubulaire fermé.

Bien que le volume du réacteur soit constant pour toutes les configurations, les coûts électriques liés au processus de la mise en mouvement de la culture dans les tubes et l'aération dans la colonne à bulle ont des proportions légèrement plus élevées pour les scénarii avec régulation diurne « RJ » en raison de la faible diminution des productivités évaluées pour ces scénarii par rapport à la référence. Néanmoins, la contribution de cette opération unitaire dans les consommations électriques totale reste faible et ne dépasse pas 13% dans les pires des cas. Les processus de nettoyage et de récolte et filtration ont des contributions relatives négligeables dans les consommations énergétiques totales du système en raison de leur faible fréquence dans le fonctionnement de l'installation hypothétique considérée, comparée à celles de l'agitation et du contrôle de température.

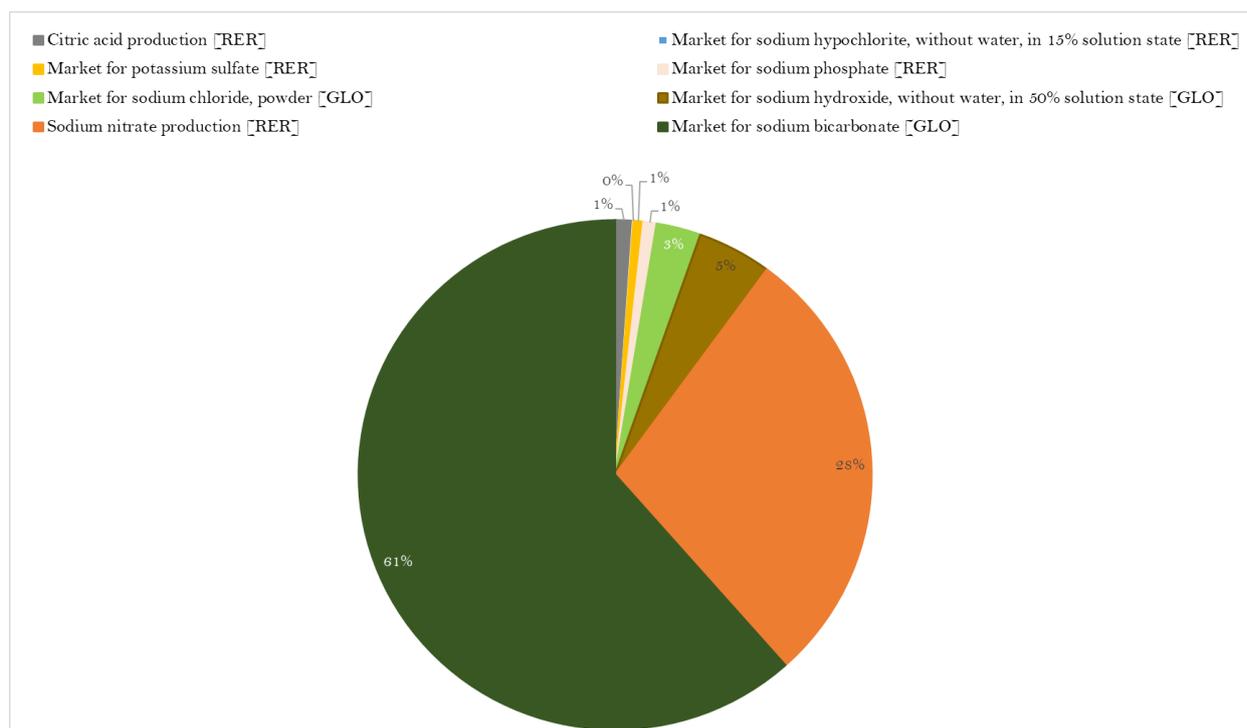


**Figure 98 :** Contributions des différents processus unitaires du système de production à la consommation électrique dans tous les scénarii.

#### Analyse du contributeur « produits chimiques »

Après l'électricité, les produits chimiques ont une contribution significative à l'impact changement climatique (cf. **Figure 97**). Étant proportionnelles à la quantité de biomasse produite (stœchiométrie), les quantités de nutriments utilisées pour 1Kg de Spiruline sont les mêmes pour tous les scénarii. Par conséquent, leurs impacts en (kgCO<sub>2</sub>-eq.kg<sup>-1</sup> de biomasse) sont également identiques. En revanche, leur contribution aux impacts totaux des scénarii peut changer. Les impacts dus aux produits chimiques réunissent ceux des produits de nettoyage et des nutriments. La **Figure 99** présente la répartition de leur contribution aux impacts liés à la production des produits chimiques. Le bicarbonate de sodium a la contribution la plus élevée (61% des impacts de ce sous-groupe), car sa proportion dans la composition du milieu de culture est prépondérante (soit 3,15 kg pour un 1kg de Spiruline **Tableau 26**). En deuxième position vient le nitrate de sodium, avec une contribution relative de 28%, suivi de la soude (NaOH) et du sel (NaCl). Les autres produits ont des contributions moindres, en particulier ceux du nettoyage, en raison de leur faible quantité.

À l'échelle du procédé, les processus de production de bicarbonate de sodium et du nitrate de sodium représentent 12% et 5% de l'impact changement climatique. *Quintero et al.*,<sup>77</sup> rapporte des contributions des éléments nutritifs à l'impact environnemental, d'une culture de Spiruline en bassin ouvert, plus importantes (de 14% à 34% pour le nitrate et 8 à 25% pour le bicarbonate) que celles évaluées dans cette étude. Ceci est probablement dû à la formulation du milieu de culture qui est différente de la nôtre.



**Figure 99 :** Répartition des contributions relatives des processus de production des nutriments et produits du nettoyage dans l'impact au changement climatique lié aux produits chimiques.

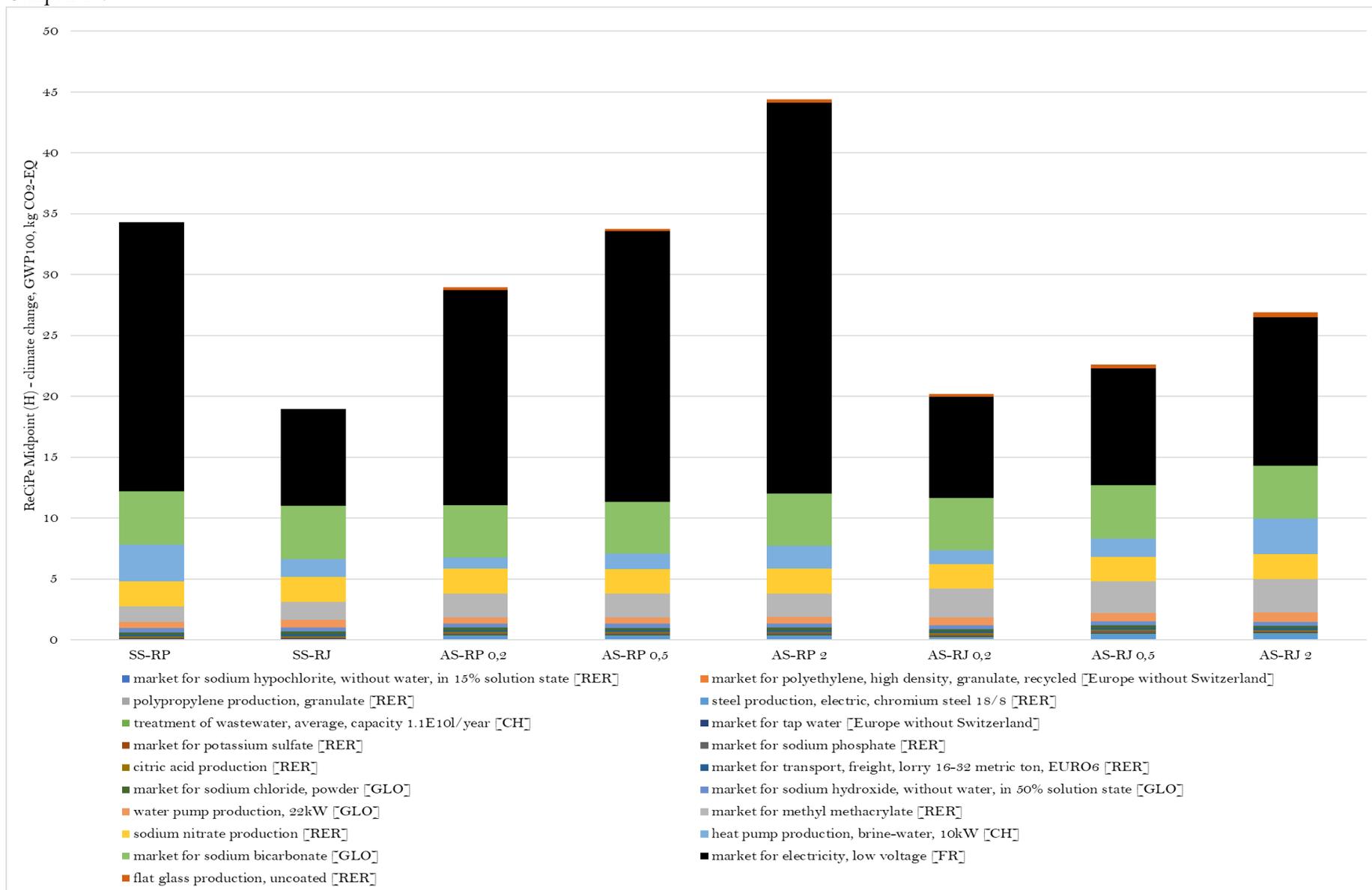
#### Contribution de l'infrastructure

Concernant le contributeur infrastructure, les impacts sont dus à la production des matériaux et des équipements. Ils varient en fonction du scénario, les contributeurs principaux au GWP sont majoritairement la production de Poly-méthacrylate de méthyle (entre 4% et 11%) due au volume important de la partie tubulaire du réacteur, la production de matériaux de la pompe à chaleur (entre 3% et 10%), la production de matériaux de la pompe à circulation (entre 1,5% et 3%). Quant aux impacts liés aux autres matériaux comme le verre et l'acier pour la serre, le polypropylène et polyéthylène pour la tuyauterie et la colonne à bulle, leurs contributions relatives est en dessous de 1%.

#### Autres contributions

Le traitement des eaux usées et l'eau potable nécessaires pour la culture ont une influence négligeable sur les impacts, en raison du système de recyclage total d'eau de récolte adopté dans notre installation hypothétique.

La **Figure 100** présente la contribution au changement climatique de toutes les opérations unitaires impliquées dans le système de culture de Spiruline et pour tous les scénarii évalués.



**Figure 100 :** Contributions de tous les flux entrants et sortants aux impacts environnementaux (catégorie changement climatique) pour les huit scénarii simulés pour un fonctionnement annuel PBR tubulaire semi-industriel à Toulouse.

### 3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'analyse énergétique et l'évaluation environnementale d'un procédé de production de Spiruline fraîche dans un PBR tubulaire solaire situé à Toulouse.

La quantification des besoins énergétiques du système met en évidence, en premier lieu, l'importance de prendre en compte la régulation de la température lors de l'étude de durabilité et de changement d'échelle d'une telle installation. En effet, les résultats soulignent la sensibilité des dépenses énergétiques à la configuration du système et à son mode de régulation thermique.

L'analyse des performances environnementales de ce procédé a été réalisée sur une installation semi-industrielle hypothétique, reposant sur la duplication 50 fois du PBR élémentaire. La satisfaction des besoins énergétiques est assurée par une pompe à chaleur réversible. L'ampleur et la pertinence de ces impacts dépendent de l'origine et de l'exploitation de chaque processus impliqué directement ou indirectement dans le système. En raison de cette sensibilité élevée, les impacts environnementaux de chaque processus de culture ont été évalués et comparés selon leur contribution dans les impacts totaux du système.

Les impacts environnementaux, notamment le changement climatique (évalué par GWP 100), ainsi que les besoins en énergie se sont révélés particulièrement sensibles :

- (i) au mode de contrôle de la température,
- (ii) à la présence ou l'absence de la serre,
- (iii) à la dimension de la serre utilisée.

La comparaison du cas de référence (un PBR solaire extérieur thermorégulé en permanence) avec d'autres configurations et modes de fonctionnement indique qu'il est plus intéressant et attractif d'arrêter le chauffage de la culture pendant la nuit pour un PBR mis à l'extérieur. Cette solution technologique a permis de réduire les coûts énergétiques associés à la production d'un facteur de 3,3 sur l'année tout en garantissant une productivité pertinente. Compte tenu de la contribution considérable de l'électricité dans le profil environnemental du système, il est plutôt convenable d'envisager ce mode d'exploitation pour une installation industrielle en raison de ses plus faibles impacts par rapport au cas de référence. De même, l'ajout d'une serre de petite taille pour ce mode de fonctionnement semblait être également pertinent en termes de réduction d'impact global. Les résultats des autres scénarii évalués, notamment l'ajout d'une serre couplée à une régulation thermique permanente, ont démontré les performances environnementales les plus médiocres.

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt du couplage de la modélisation intégrée du comportement d'un PBR solaire, prenant en compte l'effet de la lumière, de la température, des nutriments, de la configuration et du mode de conduite du procédé, pour pouvoir évaluer les performances énergétiques et environnementales, et proposer des voies d'amélioration.

## Conclusion générale et perspectives

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire était de développer une plateforme de simulation permettant de prédire les performances techniques et environnementales d'un système de production de Spiruline fraîche, tenant compte du lieu d'implantation, et donc des influences météorologiques. Cette plateforme permet de considérer les aspects multiphysiques d'un procédé de production de biomasse exposé à des conditions solaires dynamiques, aux effets de la température ambiante et du vent, d'en calculer la production, d'en évaluer les besoins énergétiques et de nutriments, et d'en calculer les impacts environnementaux. Son développement et les principaux résultats ont été présentés sur les trois derniers chapitres de ce mémoire, les deux premiers permettant de situer ce travail et sa méthode dans le contexte général du développement des filières microalgales, dans la continuité des travaux antérieurs, et dans les choix méthodologiques opérés.

L'approche de modélisation multi-échelle adoptée au troisième chapitre pour simuler la production annuelle d'un module de production permet de considérer les différents aspects d'un procédé de production de biomasse. Cette approche intègre les phénomènes physicochimiques, hydrodynamiques et biologiques qui se produisent dans le volume réactionnel, avec une attention particulière portée aux variations temporelles et géographiques de la lumière solaire en termes de rayonnements direct et diffus. Nous nous sommes également confrontés à la modélisation de la réponse biologique relative à la lumière d'un photobioréacteur dont le champ d'irradiance est fortement hétérogène dans son ensemble. Les résultats de l'utilisation extensive du simulateur dans une démarche d'expérimentation numérique ont permis de montrer que le taux de croissance réel vis-à-vis de la lumière est corrélé aux deux cinétiques de croissance asymptotiques (pas d'intégration et intégration complète de la lumière) et à un nombre limité de variables considérant l'effet de la conception et du fonctionnement du PBR : le nombre de Reynolds (implicitement la vitesse de circulation) et la qualité de la distribution de la lumière à la surface du réacteur (coefficient de la lumière diffuse). À l'aide d'une fonction d'interpolation, les deux cinétiques de croissance asymptotiques sont extraites d'une base de données préétablie en fonction des conditions instantanées du photobioréacteur. Pour un mode de conduite donné, en particulier de récolte, la cinétique réelle de croissance permet l'évaluation des performances techniques du PBR exprimées en productivité volumique annuelle en ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{an}^{-1}$ ) ou en quantité de Spiruline produite en ( $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$ ) tout en suivant la consommation de nutriments.

Les démarches de modélisation et de simulation proposées pour la prédiction des performances techniques du PBR reposent sur quelques considérations théoriques qui pourraient être améliorées ultérieurement :

- Dans le calcul du transfert radiatif au sein du volume de réacteur nous considérons que les propriétés radiatives de la souche en question, issues de la littérature, sont constantes et moyennées sur le spectre des coefficients d'absorption et de diffusion, or dans les conditions solaires, ces caractéristiques sont dépendantes de la longueur

d'onde de la lumière. Il serait ainsi plus judicieux d'intégrer l'effet de la longueur d'onde dans le calcul d'éclairement et sur la variation des propriétés optiques du milieu.

- Dans le modèle de transport de cellules, même si nous avons montré que les temps passés par les particules biologiques dans les zones à fort éclairement en proche parois étaient très faibles, il serait intéressant de revoir l'approche hydrodynamique afin de simuler avec une plus grande acuité le suivi lagrangien en le couplant à une détermination des champs de vitesse instantanée du fluide calculés par simulation numérique directe des équations de Navier Stokes (DNS). Cette approche permettrait de bien représenter les effets tourbillonnaires qui éjectent les particules de la zone de proche paroi, et de s'affranchir de l'utilisation du rebond en paroi pour pallier les problèmes numériques d'accumulation dans cette zone. Nous avons essayé de le faire en utilisant des bases de données internationales de résultats de DNS, mais le temps nécessaire n'était pas compatible avec notre volonté de travailler sur tous les aspects de la modélisation.
- Concernant l'influence du passage de la biomasse de la partie tubulaire solaire à la partie non éclairée (à savoir la colonne à bulle), il conviendrait d'affiner la mesure du point de compensation pour la Spiruline afin d'en tenir compte dans le modèle biologique, car le temps de séjour dans la partie de stripping considérée n'est pas négligeable devant celui dans le tube de production. De plus, un dimensionnement affiné de cette colonne de dégazage de l'oxygène pourrait aussi être réalisé afin de vérifier s'il est possible de limiter ce temps de séjour.
- Il en va de même pour le retour des cellules d'une zone d'inhibition : il conviendrait de réexaminer la constante de temps de relaxation du modèle biologique dynamique relatif à la lumière Eq(52) pour voir s'il est nécessaire de l'adapter, ou d'en considérer une autre spécifique, pour représenter les effets des passages dans les zones de haute intensité lumineuse. Cet examen pourrait se faire expérimentalement ou par l'utilisation de modèles métaboliques.
- Le rayon du tube reste un paramètre dont nous n'avons pas ici balayé l'influence. Même si nous avons entamé ce travail, il reste encore à le finaliser.

À la fin du chapitre trois, il est clair que le choix du mode de conduite ne peut s'affranchir du maintien de la température du milieu de culture dans une gamme imposée par l'espèce cultivée, et donc qu'un système de régulation thermique s'impose pour assurer une production sur l'ensemble de l'année. Le chapitre quatre traite de la modélisation et de la simulation du comportement thermique du réacteur en conditions solaires et sans régulation de température. Il s'agit de rendre compte des effets multiples de ces conditions environnementales sur la température du milieu de culture. Comme pour l'éclairement, le simulateur utilise des données météorologiques, concernant ici les irradiances directe et diffuse, la vitesse et la direction du vent, la température ambiante, la nébulosité et l'albédo du sol. La modélisation concerne les effets radiatifs dans l'infrarouge, conductifs et convectifs contribuant aux flux thermiques échangés entre le photobioréacteur et son environnement.

Ce dernier est considéré soit en extérieur, soit installé dans une serre. Dans les deux cas, l'effet du sol est pris en compte.

Les résultats de simulations indiquent que le PBR se comporte comme un système de stockage de chaleur. Dans les deux cas testés, les contributeurs majoritaires à son chauffage sont la radiation solaire (dans la journée) et le sol (en particulier dans le cas d'une serre), ce qui explique sa température élevée dans les journées où la radiation solaire est significative, même sans être caniculaire. Le flux contributeur principal aux pertes de chaleur, pour le PBR mis en extérieur, est l'échange radiatif net entre le PBR et la voûte céleste ce qui explique de basses températures atteintes dans les nuits claires d'hiver. En revanche, en cas d'une serre, ces températures sont moins faibles, car le microclimat de la serre d'un tampon thermique en contribuant à l'atténuation de cette baisse. Enfin, il a été conclu que l'utilisation d'une régulation thermique est indispensable pour assurer la viabilité notre culture.

Cet outil de simulation offre à l'utilisateur la possibilité de modifier les propriétés du système analysé et de faire des calculs à moindres coûts. Du point de vue de la gestion de la température, il ouvre la voie à des perspectives jugées intéressantes à investiguer qui n'ont pu l'être dans le cadre de ce travail, tel que :

- Analyser la sensibilité du comportement thermique de la culture à la variation des propriétés du système considéré, notamment des caractéristiques du sol (ex. utilisation du béton) ou des matériaux de la serre ou du PBR, ainsi que des épaisseurs des parois de chacun de ces éléments, afin d'identifier les meilleures caractéristiques pour une installation destinée à l'exploitation industrielle.
- Étudier l'impact de l'inertie du milieu de culture, à travers la modification de la géométrie (par exemple le diamètre des tubes ou le volume du réacteur), sur l'établissement de sa température sous les effets des différents flux de chaleur impliqués. Quand bien même certains effets ont déjà été évalués, les résultats ne sont pas présentés dans ce manuscrit et il conviendrait de les affiner.
- Explorer l'effet du design de la serre, car un toit horizontal est utilisé dans cette étude comme première approche pour s'affranchir de la complexité des expressions de transmission de la lumière dans la serre. Or, cette géométrie n'est pas avantageuse en cas de forte précipitation.
- Investiguer l'effet du taux de renouvellement d'air dans la serre (en variant le nombre de renouvellements par heure  $N$  dans l'Eq(149)) sur l'évolution de son microclimat et ainsi sur le comportement thermique du photobioréacteur.
- Vérifier l'hypothèse d'homogénéité de la température à l'échelle du réacteur global (i.e. partie tubulaire et colonne de dégazage) qui permet ici de s'affranchir de modéliser le transfert thermique dans la partie dédiée au dégazage en considérant que le temps de séjour est petit par rapport aux échelles de temps des variations des conditions extérieures.

- Confronter les résultats de la modélisation numérique à des mesures expérimentales permettant de valider l'approche entreprise et de souligner son universalité.

Le dernier chapitre de ce mémoire vise un approfondissement de l'étude de l'aspect énergétique et environnemental de la filière de production solaire considérée. Dans un premier temps, le modèle thermique développé a été utilisé pour simuler la régulation de température pour la plage de confort de l'espèce étudiée (*Spiruline*) et pour proposer des modes de régulation dans le but de diminuer les dépenses énergétiques en vue de l'exploitation du réacteur à une échelle semi-industrielle. L'analyse énergétique, réalisée pour un PBR élémentaire (0,235 m<sup>3</sup>) placé à l'extérieur, a permis d'identifier le besoin en énergie et sa distribution dans le temps. L'ajout d'une serre s'est avéré bénéfique, mais l'efficacité de cette option est fortement dépendante du mode de régulation de la température. Ces résultats nous ont conduits à investiguer des pistes d'amélioration de ces dépenses d'énergie. En effet, les besoins énergétiques bruts en termes de chaleur à apporter ou à extraire du milieu réactionnel ne doivent pas être confondus avec la consommation réelle d'énergie nécessaire pour cette régulation. L'analyse du système a alors été menée en termes d'énergie « brute » et en termes d'électricité consommée par une pompe à chaleur.

Deux pistes de diminution des dépenses énergétiques ont été explorées : une serre avec des paramètres variables (sensibilité de la hauteur de la serre), et une régulation discontinue de la température pour un PBR extérieur et un PBR sous serre.

Plus la hauteur de la serre est importante plus la demande énergétique augmente : pour une augmentation de 10 fois la hauteur, les besoins bruts totaux en énergie s'élèvent de 40% (et la consommation électrique augmente de 50% en utilisant la PAC considérée). Ainsi, une configuration de serre plus petite (à savoir 0,2m de hauteur et 12m<sup>2</sup> de surface au sol) semble la moins énergivore en portant la baisse d'énergie utilisée à 18% (soit 22% en électricité consommée) par rapport au cas de référence (i.e. PBR exposé directement aux conditions extérieures).

Le mode de régulation s'avère être le paramètre le plus influent. Avec une régulation diurne uniquement, les coûts énergétiques de production diminuent de 693,9 à 311,3 kWh.kg<sup>-1</sup> de *Spiruline* produite (soit 55% de baisse en énergie brute et 70% d'économie d'électricité) pour le cas du PBR extérieur. Cette réduction est due principalement à la suppression du chauffage pendant la nuit où il n'y a pas de croissance, en maintenant la température la plus basse possible (soit 2°C), ce qui peut également inhiber l'activité respiratoire (donc les pertes éventuelles de biomasse).

La combinaison de la serre avec le mode de régulation diurne uniquement n'a pas révélé un impact significatif sur les coûts énergétiques, même si la serre est dans sa configuration optimale (hauteur minimale).

Dans un second temps, l'analyse des performances environnementales en utilisant la méthode ACV a été réalisée sur une installation semi-industrielle hypothétique, reposant sur 50 PBR élémentaires en parallèle.

Les résultats de calcul d'impacts par la méthode ReCiPe révèlent une contribution importante de l'utilisation de l'espace (surface au sol) en raison des vastes superficies nécessaires pour la disposition de cette conception de PBR. Ce point pourrait être amélioré si on utilise des toits d'immeubles ou des terrains marginaux non utilisables autrement. La catégorie d'impacts changement climatique est la plus importante en suivant, et est corrélée à l'épuisement des ressources fossiles et à des effets sur la santé humaine. Ces effets sont principalement dus au processus de production des différents intrants du système, y compris l'électricité, qui nécessite la combustion de ressources fossile.

L'analyse de contribution des différents entrants dans la production de Spiruline indique que le principal contributeur aux impacts est la consommation énergétique, notamment pour le contrôle de la température. Le deuxième contributeur vis-à-vis du changement climatique est la production des nutriments en particulier le bicarbonate de sodium et le nitrate de sodium.

Quant au classement des scénarii évalués, la comparaison de leurs performances environnementales a montré que le scénario qui a permis un gain environnemental considérable de (environ 44%, soit de 34 à 19 kgCO<sub>2</sub>-Eq), pour la production solaire de la Spiruline, consiste à une conception de PBR extérieure en limitant la régulation thermique aux périodes diurnes. Ces résultats sont en concordance avec les conclusions de l'analyse énergétique, car l'avantage majeur de cette solution est la réduction de la consommation de l'électricité, qui est le contributeur principal à l'impact environnemental global évalué. Néanmoins, une conception de PBR sous une serre de petite taille optant pour ce même mode régulation a également démontré un attrait intéressant en termes de réduction de coûts énergétiques et environnementaux.

Cette étude ouvre la porte à des perspectives pertinentes à explorer afin d'améliorer davantage le profil environnemental tout en veillant aux performances technique et énergétique de l'installation évaluée, notamment :

- L'analyse de la contribution d'autres marchés de production d'électricité (autre que le mix français) dans les impacts liés à la consommation électrique, et éventuellement, d'autres technologies comme les ressources renouvelables ou la cogénération.
- L'investigation de la faisabilité et de l'utilité de l'exploitation de matériaux de stockage de la chaleur, comme les Matériaux à Changement de Phase (MCP), pour répondre aux besoins thermiques du réacteur et diminuer ainsi les coûts énergétiques.
- L'amélioration de la formulation du milieu de culture pour optimiser la consommation de nutriment (en particulier le bicarbonate), éventuellement par l'ajustement du pH grâce à l'ajout de régulateur alimentaire de pH.

Ce travail a permis de développer une approche intégrée de simulation d'un système de culture exposé aux conditions extérieures, dans le but d'évaluer ses performances productives et environnementales. Grâce à la flexibilité de la plateforme de simulation, l'influence des

## Conclusion générale et perspectives

différents paramètres sur ces performances a pu être explorée. Cependant, le potentiel d'application de l'outil reste encore à être exploré et exploité.

# Valorisation

## *Articles publiés dans des journaux à comité de lecture*

Laifa, R.; Morchain, J.; Barna, L.; Guiraud, P. A Numerical Framework to Predict the Performances of a Tubular Photobioreactor from Operating and Sunlight Conditions. *Algal Res.* **2021**, *60*, 102550

## *Communication orale dans des congrès internationaux*

Laifa, R., Morchain, J., Barna, L., Guiraud, P. (2019). Development of a simulator for microalgae production. ALGAEUROPE 03-05 Dec 2019. Paris

## *Communications écrites dans des congrès internationaux*

Laifa, R., Morchain, J., Barna, L., Guiraud, P. (2021). Simulation of a digital PBR's performances for microalgae and cyanobacteria production. 10th International Conference on Algal Biomass, Biofuels and Bioproducts. 14-16 Juin 2021. USA

Laifa, R., Morchain, J., Aras, A., Barna, L., Guiraud, P. (2019). Development of a benchmark simulator for microalgae production. 15th International Conference on Renewable Resources & Biorafineries 3-5 Juin 2019. Toulouse.



## Bibliographie

- (1) Abdulqader, G.; Barsanti, L.; Tredici, M. R. Harvest of *Arthrospira Platensis* from Lake Kossorom (Chad) and Its Household Usage among the Kanembu. *J. Appl. Phycol.* **2000**, *12* (3), 493–498. <https://doi.org/10.1023/A:1008177925799>.
- (2) Burlew, J. S. 1910-Ed. *Algal Culture, from Laboratory to Pilot Plant.*; Carnegie Institution: Washington, 1953.
- (3) *Algae for Biofuels and Energy*; Borowitzka, M. A., Moheimani, N. R., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5479-9>.
- (4) Vonshak, A.; Richmond, A. Mass Production of the Blue-Green Alga *Spirulina*: An Overview. *Biomass* **1988**, *15* (4), 233–247. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90059-5](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90059-5).
- (5) Richmond, A. *CRC Handbook of Microalgal Mass Culture*; 1986.
- (6) Ciferri, O. *Spirulina, the Edible Microorganism*. *MICROBIOL REV* **1983**, *28*.
- (7) Bewicke, D.; Potter, B. A. *Chlorella: The Emerald Food*; Ronin Publishing, 1984.
- (8) Borowitzka, M. A. *Dunaliella: Biology, Production, and Markets*. In *Handbook of Microalgal Culture*; Wiley-Blackwell, 2013; pp 359–368. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch18>.
- (9) Todd Lorenz, R.; Cysewski, G. R. Commercial Potential for *Haematococcus* Microalgae as a Natural Source of Astaxanthin. *Trends Biotechnol* **2000**, *18*, 160–167.
- (10) Olaizola, M. Commercial Production of Astaxanthin from *Haematococcus Pluvialis* Using 25,000-Liter Outdoor Photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* **2000**, *12* (3), 499–506. <https://doi.org/10.1023/A:1008159127672>.
- (11) Borowitzka, M. A. Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters. *J. Biotechnol.* **1999**, *70* (1), 313–321. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8).
- (12) Zarrouk, C. Contribution à l'étude d'une cyanophycée: Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spiruline maxima* (Setch et Gardner) Geitler. PhD Thesis, Univeristé de Paris, Paris, 1966.
- (13) Fox, R. D. *La spiruline: technique, pratique et promesse*; Edisud: Aix-en-Provence, 1999.
- (14) Tomaselli, L.; Palandri, R. M.; Tredici, M. R. On the Correct Use of the *Spirulina* Designation. *Algol. Stud. Für Hydrobiol. Suppl. Vol.* **1996**, 539–548. [https://doi.org/10.1127/algol\\_stud/83/1996/539](https://doi.org/10.1127/algol_stud/83/1996/539).
- (15) Outdoor Mass Production of *Spirulina*: The Basic Concept. In *Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology, and biotechnology*; Vonshak, A., Ed.; Taylor & Francis: London ; Bristol, PA, 1997.
- (16) Soeder, C. J. An Historical Outline of Applied Algology. In *CRC Handbook of Microalgal Mass Culture*; Amos Richmond, 1986; pp 25–41.
- (17) Borowitzka, M. A. High-Value Products from Microalgae—Their Development and Commercialisation. *J. Appl. Phycol.* **2013**, *25* (3), 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>.
- (18) Laskin, A. I. *Handbook of Microbiology: Condensed Edition*; CRC Press, 2019.
- (19) Pulz, O.; Gross, W. Valuable Products from Biotechnology of Microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2004**, *65* (6), 635–648. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>.
- (20) Kay, R. A.; Barton, L. L. Microalgae as Food and Supplement. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **1991**, *30* (6), 555–573. <https://doi.org/10.1080/10408399109527556>.
- (21) Besson, A. Etude Multi-Échelle de La Récolte de *Dunaliella Salina*—Développement d'un Procédé d'autofloculation-Flottation de Microalgues. PhD Thesis, Toulouse, INSA, 2013.

- (22) *Regulation (EU)*; 2015; Vol. 327.
- (23) Araújo, R.; Vázquez Calderón, F.; Sánchez López, J.; Azevedo, I. C.; Bruhn, A.; Fluch, S.; Garcia Tasende, M.; Ghaderiardakani, F.; Ilmjärv, T.; Laurans, M.; Mac Monagail, M.; Mangini, S.; Peteiro, C.; Rebours, C.; Stefansson, T.; Ullmann, J. Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Front. Mar. Sci.* **2021**, *7*, 1247. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>.
- (24) Amorim, M. L.; Soares, J.; Coimbra, J. S. dos R.; Leite, M. de O.; Albino, L. F. T.; Martins, M. A. Microalgae Proteins: Production, Separation, Isolation, Quantification, and Application in Food and Feed. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2021**, *61* (12), 1976–2002. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1768046>.
- (25) Hochman, G.; Zilberman, D. Algae Farming and Its Bio-Products. In *Plants and BioEnergy*; McCann, M. C., Buckenridge, M. S., Carpita, N. C., Eds.; Springer New York: New York, NY, 2014; pp 49–64. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9329-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9329-7_4).
- (26) Person, J. *LIVRE TURQUOISE - Algues, Filières Du Futur*, Adebitech – Romainville.; 2011.
- (27) Mobin, S.; Alam, F. Some Promising Microalgal Species for Commercial Applications: A Review. *Energy Procedia* **2017**, *110*, 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.177>.
- (28) Vigani, M.; Parisi, C.; Rodríguez-Cerezo, E.; Barbosa, M. J.; Sijtsma, L.; Ploeg, M.; Enzing, C. Food and Feed Products from Micro-Algae: Market Opportunities and Challenges for the EU. *Trends Food Sci. Technol.* **2015**, *42* (1), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.004>.
- (29) La Barre, S.; Bates, S. S. *Blue Biotechnology: Production and Use of Marine Molecules*; John Wiley & Sons, 2018.
- (30) Acién, F. G.; Fernández, J. M.; Magán, J. J.; Molina, E. Production Cost of a Real Microalgae Production Plant and Strategies to Reduce It. *Biotechnol. Adv.* **2012**, *30* (6), 1344–1353. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>.
- (31) Brennan, L.; Owende, P. Biofuels from Microalgae—A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, *14* (2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>.
- (32) Chen, J.; Wang, Y.; Benemann, J. R.; Zhang, X.; Hu, H.; Qin, S. Microalgal Industry in China: Challenges and Prospects. *J. Appl. Phycol.* **2016**, *28* (2), 715–725. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0720-4>.
- (33) Vaz, B. da S.; Moreira, J. B.; Morais, M. G. de; Costa, J. A. V. Microalgae as a New Source of Bioactive Compounds in Food Supplements. *Curr. Opin. Food Sci.* **2016**, *7*, 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.12.006>.
- (34) Hamed, I. The Evolution and Versatility of Microalgal Biotechnology: A Review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2016**, *15* (6), 1104–1123. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12227>.
- (35) *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*; Richmond, A., Hu, Q., Eds.; John Wiley & Sons, Ltd: Oxford, UK, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118567166>.
- (36) Nelissen, B.; Wilmotte, A.; Neefs, J.-M.; De Wachter, R. Phylogenetic Relationships Among Filamentous Helical Cyanobacteria Investigated on the Basis of 16S Ribosomal RNA Gene Sequence Analysis. *Syst. Appl. Microbiol.* **1994**, *17* (2), 206–210. [https://doi.org/10.1016/S0723-2020\(11\)80009-3](https://doi.org/10.1016/S0723-2020(11)80009-3).
- (37) Tomaselli, L. *Morphology, Ultrastructure and Taxonomy. In: Spirulina Platensis (Arthrospira)*; CRC Press, 1997.

- (38) Belay, A. Biology and Industrial Production of *Arthrospira* (Spirulina). In *Handbook of Microalgal Culture*; John Wiley & Sons, Ltd, 2013; pp 339–358. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch17>.
- (39) Gernigon, V. Modélisation Multi-Échelle de La Culture de Microalgues, Université de Toulouse, 2020.
- (40) *A Review on Culture, Production and Use of Spirulina as Food for Humans and Feeds for Domestic Animals and Fish*; Habib, M. A. B., Ed.; FAO fisheries and aquaculture circular; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, 2008.
- (41) Phang, S. M.; Miah, M. S.; Yeoh, B. G.; Hashim, M. A. Spirulina Cultivation in Digested Sago Starch Factory Wastewater. *J. Appl. Phycol.* **2000**, *12* (3), 395–400. <https://doi.org/10.1023/A:1008157731731>.
- (42) Volkmann, H.; Imianovsky, U.; Oliveira, J. L. B.; Sant'Anna, E. S. Cultivation of *Arthrospira* (Spirulina) *Platensis* in Desalinator Wastewater and Salinated Synthetic Medium: Protein Content and Amino-Acid Profile. *Braz. J. Microbiol.* **2008**, *39* (1), 98–101. <https://doi.org/10.1590/S1517-838220080001000022>.
- (43) Babadzhanov, A. S.; Abdusamatova, N.; Yusupova, F. M.; Faizullaeva, N.; Mezhlumyan, L. G.; Malikova, M. Kh. Chemical Composition of *Spirulina Platensis* Cultivated in Uzbekistan. *Chem. Nat. Compd.* **2004**, *40* (3), 276–279. <https://doi.org/10.1023/B:CONC.0000039141.98247.e8>.
- (44) Avino, P.; Carconi, P. L.; Lepore, L.; Moauro, A. Nutritional and Environmental Properties of Algal Products Used in Healthy Diet by INAA and ICP-AES. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2000**, *244* (1), 247–252. <https://doi.org/10.1023/A:1006721811478>.
- (45) Cuellar-Bermudez, S. P.; Garcia-Perez, J. S.; Rittmann, B. E.; Parra-Saldivar, R. Photosynthetic Bioenergy Utilizing CO<sub>2</sub>: An Approach on Flue Gases Utilization for Third Generation Biofuels. *J. Clean. Prod.* **2015**, *98*, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.034>.
- (46) [www.ceva-algues.com/document/fiches-de-composition-nutritionnelle-algues-alimentaires/](http://www.ceva-algues.com/document/fiches-de-composition-nutritionnelle-algues-alimentaires/).
- (47) *Spirulina Platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology, and Biotechnology*; Vonshak, A., Ed.; Taylor & Francis: London ; Bristol, PA, 1997.
- (48) Masojídek, J.; Torzillo, G.; Koblížek, M. Photosynthesis in Microalgae. In *Handbook of Microalgal Culture*; Richmond, A., Hu, Q., Eds.; John Wiley & Sons, Ltd: Oxford, UK, 2013; pp 21–36. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch2>.
- (49) Cornet, J.-F.; Dussap, C. G.; Gros, J.-B. Kinetics and Energetics of Photosynthetic Micro-Organisms in Photobioreactors. In *Bioprocess and algae reactor technology, apoptosis*; Springer, 1998; pp 153–224.
- (50) Hoefnagel, M. H. N.; Atkin, O. K.; Wiskich, J. T. Interdependence between Chloroplasts and Mitochondria in the Light and the Dark. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Bioenerg.* **1998**, *1366* (3), 235–255. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(98\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(98)00126-1).
- (51) Falkowski, P. G.; Owens, T. G. Effects of Light Intensity on Photosynthesis and Dark Respiration in Six Species of Marine Phytoplankton. *Mar. Biol.* **1978**, *45* (4), 289–295. <https://doi.org/10.1007/BF00391815>.
- (52) Giordano, M.; Beardall, J.; Raven, J. A. CO<sub>2</sub> Concentrating Mechanisms in Algae: Mechanisms, Environmental Modulation, and Evolution. *Annu. Rev. Plant Biol.* **2005**, *56*, 99–131. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144052>.
- (53) Cornet, J. F.; Dussap, C. G.; Dubertret, G. A Structured Model for Simulation of Cultures of the Cyanobacterium *Spirulina Platensis* in Photobioreactors: I. Coupling between Light Transfer and Growth Kinetics. *Biotechnol. Bioeng.* **1992**, *40* (7), 817–825. <https://doi.org/10.1002/bit.260400709>.

- (54) Colman, B. Photosynthetic Carbon Assimilation and the Suppression of Photorespiration in the Cyanobacteria. *Aquat. Bot.* **1989**, *34* (1), 211–231. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(89\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0304-3770(89)90057-0).
- (55) Vonshak, A.; Torzillo, G.; Masojidek, J.; Boussiba, S. Sub-Optimal Morning Temperature Induces Photoinhibition in Dense Outdoor Cultures of the Alga *Monodus Subterraneus* (Eustigmatophyta). *Plant Cell Environ.* **2001**, *24* (10), 1113–1118. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00759.x>.
- (56) Torzillo, G.; Sacchi, A.; Materassi, R.; Richmond, A. Effect of Temperature on Yield and Night Biomass Loss in *Spirulina Platensis* Grown Outdoors in Tubular Photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* **1991**, *3* (2), 103–109. <https://doi.org/10.1007/BF00003691>.
- (57) Torzillo, G.; Vonshak, A. Effect of Light and Temperature on the Photosynthetic Activity of the Cyanobacterium *Spirulina Platensis*. *Biomass Bioenergy* **1994**, *6* (5), 399–403. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(94\)00076-6](https://doi.org/10.1016/0961-9534(94)00076-6).
- (58) Hirano, M.; Satoh, K.; Katoh, S. Plastoquinone as a Common Link between Photosynthesis and Respiration in a Blue-Green Alga. *Photosynth. Res.* **1980**, *1* (3), 149–162. <https://doi.org/10.1007/BF00020594>.
- (59) De La Vara, L. G.; Gómez-Lojero, C. Participation of Plastoquinone, Cytochrome c 553 and Ferredoxin-NADP (+) Oxido-Reductase in Both Photosynthesis and Respiration in *Spirulina Maxima*. *Photosynth. Res.* **1986**, *8* (1), 65–78. <https://doi.org/10.1007/BF00028477>.
- (60) Eilers, P. H. C.; Peeters, J. C. H. Dynamic Behaviour of a Model for Photosynthesis and Photoinhibition. *Ecol. Model.* **1993**, *69* (1), 113–133. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90052-T](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90052-T).
- (61) Wu, X.; Merchuk, J. C. A Model Integrating Fluid Dynamics in Photosynthesis and Photoinhibition Processes. *Chem. Eng. Sci.* **2001**, *56* (11), 3527–3538.
- (62) Xue, S.; Su, Z.; Cong, W. Growth of *Spirulina Platensis* Enhanced under Intermittent Illumination. *J. Biotechnol.* **2011**, *151* (3), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.12.012>.
- (63) Vonshak, A.; Guy, R. Photoadaptation, Photoinhibition and Productivity in the Blue-Green Alga, *Spirulina Platensis* Grown Outdoors. *Plant Cell Environ.* **1992**, *15* (5), 613–616. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb01496.x>.
- (64) Pulz, O. Photobioreactors: Production Systems for Phototrophic Microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2001**, *57* (3), 287–293. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>.
- (65) Torzillo, G.; Vonshak, A. Environmental Stress Physiology with Reference to Mass Cultures. In *Handbook of Microalgal Culture*; John Wiley & Sons, Ltd, 2013; pp 90–113. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch6>.
- (66) Falkowski, P. G.; Owens, T. G. Light—Shade Adaptation 1: TWO STRATEGIES IN MARINE PHYTOPLANKTON. *Plant Physiol.* **1980**, *66* (4), 592–595. <https://doi.org/10.1104/pp.66.4.592>.
- (67) Kerlero de Rosbo, G.; Bernard, O. Évaluation Du Gisement Potentiel de Ressources Algales Pour l'énergie et La Chimie En France à Horizon 2030. **2014**, 112.
- (68) Ugwu, C. U.; Aoyagi, H.; Uchiyama, H. Photobioreactors for Mass Cultivation of Algae. *Bioresour. Technol.* **2008**, *99* (10), 4021–4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>.
- (69) Das, P.; Thaher, M. I.; Hakim, M. A. Q. M. A.; Al-Jabri, H. M. S. J.; Alghasal, G. S. H. S. A Comparative Study of the Growth of *Tetraselmis* Sp. in Large Scale Fixed Depth and Decreasing Depth Raceway Ponds. *Bioresour. Technol.* **2016**, *216*, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.058>.
- (70) Tan, X. B.; Lam, M. K.; Uemura, Y.; Lim, J. W.; Wong, C. Y.; Lee, K. T. Cultivation of Microalgae for Biodiesel Production: A Review on Upstream and Downstream

- Processing. *Chin. J. Chem. Eng.* **2018**, *26* (1), 17–30.  
<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.010>.
- (71) Faried, M.; Samer, M.; Abdelsalam, E.; Yousef, R. S.; Attia, Y. A.; Ali, A. S. Biodiesel Production from Microalgae: Processes, Technologies and Recent Advancements. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *79*, 893–913.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.199>.
- (72) Masojídek, J.; Prasil, O. The Development of Microalgal Biotechnology in the Czech Republic. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2010**, *37*, 1307–1317.  
<https://doi.org/10.1007/s10295-010-0802-x>.
- (73) Silva Benavides, A. M.; Ranglová, K.; Malapascua, J. R.; Masojídek, J.; Torzillo, G. Diurnal Changes of Photosynthesis and Growth of *Arthrospira Platensis* Cultured in a Thin-Layer Cascade and an Open Pond. *Algal Res.* **2017**, *28*, 48–56.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.10.007>.
- (74) Fernández, I.; Acien, F. G.; Berenguel, M.; Guzmán, J. L.; Andrade, G. A.; Pagano, D. J. A Lumped Parameter Chemical–Physical Model for Tubular Photobioreactors. *Chem. Eng. Sci.* **2014**, *112*, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.03.020>.
- (75) Morales, M.; Hélias, A.; Bernard, O. Optimal Integration of Microalgae Production with Photovoltaic Panels: Environmental Impacts and Energy Balance. *Biotechnol. Biofuels* **2019**, *12* (1), 239. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1579-4>.
- (76) Bernard, O.; Suay, R.; Bechet, Q.; Poncet, C.; Fatnassi, H.; Mairet, F.; Sciandra, A.; Mangin, A.; Coulon, D.; Boubekri, R. The next Generation of Microalgae Production Systems under Photovoltaic Greenhouses. *Acta Hort.* **2017**, No. 1170, 921–928.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.118>.
- (77) Duran Quintero, C.; Ventura, A.; Lépine, O.; Pruvost, J. Eco-Design of Spirulina Solar Cultivation: Key Aspects to Reduce Environmental Impacts Using Life Cycle Assessment. *J. Clean. Prod.* **2021**, *299*, 126741.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126741>.
- (78) ANR Purple Sun. *ANR Purple Sun*, 2011.
- (79) Kunjapur, A. M.; Eldridge, R. B. Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, *49* (8), 3516–3526.  
<https://doi.org/10.1021/ie901459u>.
- (80) Legrand, J.; Artu, A.; Pruvost, J. A Review on Photobioreactor Design and Modelling for Microalgae Production. *React. Chem. Eng.* **2021**.  
<https://doi.org/10.1039/D0RE00450B>.
- (81) Jorquera, O.; Kiperstok, A.; Sales, E. A.; Embiruçu, M.; Ghirardi, M. L. Comparative Energy Life-Cycle Analyses of Microalgal Biomass Production in Open Ponds and Photobioreactors. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101* (4), 1406–1413.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.038>.
- (82) Tredici, M. R.; Carozzi, P.; Chini Zittelli, G.; Materassi, R. A Vertical Alveolar Panel (VAP) for Outdoor Mass Cultivation of Microalgae and Cyanobacteria. *Bioresour. Technol.* **1991**, *38* (2), 153–159. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90147-C](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90147-C).
- (83) Rapport d'étude de consensus. *Sustainable Development of Algal Biofuels in the United States (2012) Chapter: 2 Overview of Algal Biofuel Supply Chain*; 2012.  
<https://doi.org/10.17226/13437>.
- (84) Lindblad, P.; Fuente, D.; Borbe, F.; Cicchi, B.; Conejero, J. A.; Couto, N.; Čelešnik, H.; Diano, M. M.; Dolinar, M.; Esposito, S.; Evans, C.; Ferreira, E. A.; Keller, J.; Khanna, N.; Kind, G.; Landels, A.; Lemus, L.; Noirel, J.; Ocklenburg, S.; Oliveira, P.; Pacheco, C. C.; Parker, J. L.; Pereira, J.; Pham, T. K.; Pinto, F.; Rexroth, S.; Rögner, M.; Schmitz, H.-J.; Benavides, A. M. S.; Siurana, M.; Tamagnini, P.; Touloupakis, E.; Torzillo, G.; Urchueguía, J. F.; Wegelius, A.; Wiegand, K.; Wright, P. C.; Wutschel, M.; Wünschiers, R. CyanoFactory, a European Consortium to Develop Technologies

- Needed to Advance Cyanobacteria as Chassis for Production of Chemicals and Fuels. *Algal Res.* **2019**, *41*, 101510. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101510>.
- (85) Carvalho, A. P.; Meireles, L. A.; Malcata, F. X. Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. *Biotechnol. Prog.* **2006**, *22* (6), 1490–1506. <https://doi.org/10.1021/bp060065r>.
- (86) Bosma, R.; de Vree, J. H.; Slegers, P. M.; Janssen, M.; Wijffels, R. H.; Barbosa, M. J. Design and Construction of the Microalgal Pilot Facility AlgaePARC. *Algal Res.* **2014**, *6*, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.10.006>.
- (87) Zou, N.; Richmond, A. Effect of Light-Path Length in Outdoor Flat Plate Reactors on Output Rate of Cell Mass and of EPA in *Nannochloropsis* Sp. *J. Biotechnol.* **1999**, *70* (1), 351–356. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00087-5).
- (88) Pruvost, J.; Cornet, J. F.; Goetz, V.; Legrand, J. Modeling Dynamic Functioning of Rectangular Photobioreactors in Solar Conditions. *AIChE J.* **2011**, *57* (7), 1947–1960. <https://doi.org/10.1002/aic.12389>.
- (89) Slegers, P. M.; Wijffels, R. H.; van Straten, G.; van Boxtel, A. J. B. Design Scenarios for Flat Panel Photobioreactors. *Appl. Energy* **2011**, *88* (10), 3342–3353. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.037>.
- (90) Olguín, E. J.; Galicia, S.; Mercado, G.; Pérez, T. Annual Productivity of *Spirulina* (*Arthrospira*) and Nutrient Removal in a Pig Wastewater Recycling Process under Tropical Conditions. *J. Appl. Phycol.* **2003**, *15* (2), 249–257. <https://doi.org/10.1023/A:1023856702544>.
- (91) Sierra, E.; Acién, F. G.; Fernández, J. M.; García, J. L.; González, C.; Molina, E. Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae. *Chem. Eng. J.* **2008**, *138* (1), 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.004>.
- (92) Wolf, J.; Stephens, E.; Steinbusch, S.; Yarnold, J.; Ross, I. L.; Steinweg, C.; Doebbe, A.; Krolovitsch, C.; Müller, S.; Jakob, G.; Kruse, O.; Posten, C.; Hankamer, B. Multifactorial Comparison of Photobioreactor Geometries in Parallel Microalgae Cultivations. *Algal Res.* **2016**, *15*, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.018>.
- (93) Tredici, M. R.; Rodolfi, L.; Biondi, N.; Bassi, N.; Sampietro, G. Techno-Economic Analysis of Microalgal Biomass Production in a 1-Ha Green Wall Panel (GWP®) Plant. *Algal Res.* **2016**, *19*, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.005>.
- (94) Società specializzata nella produzione di Alga *Spirulina* | Algavenice.it. *Algavenice*.
- (95) Acién, F. G.; Molina, E.; Reis, A.; Torzillo, G.; Zittelli, G. C.; Sepúlveda, C.; Masojídek, J. Photobioreactors for the Production of Microalgae. In *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*; Elsevier, 2017; pp 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7>.
- (96) Janssen, M.; Tramper, J.; Mur, L. R.; Wijffels, R. H. Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light Regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-up, and Future Prospects. *Biotechnol. Bioeng.* **2003**, *81* (2), 193–210. <https://doi.org/10.1002/bit.10468>.
- (97) de Vree, J. H.; Bosma, R.; Janssen, M.; Barbosa, M. J.; Wijffels, R. H. Comparison of Four Outdoor Pilot-Scale Photobioreactors. *Biotechnol. Biofuels* **2015**, *8* (1), 215. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0400-2>.
- (98) Tredici, M. R.; Zittelli, G. C. Efficiency of Sunlight Utilization: Tubular versus Flat Photobioreactors. *Biotechnol. Bioeng.* **1998**, *57* (2), 187–197. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980120\)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980120)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J).
- (99) Pirt, S. J.; Lee, Y. K.; Walach, M. R.; Pirt, M. W.; Balyuzi, H. H. M.; Bazin, M. J. A Tubular Bioreactor for Photosynthetic Production of Biomass from Carbon Dioxide: Design and Performance. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1983**, *33* (1), 35–58. <https://doi.org/10.1002/jctb.280330105>.

- (100) Tamiya, H.; Shibata, K.; Sasa, T.; Iwamura, T.; Morimura, Y. Effect of Diurnally Intermittant Illumination on the Growth and Some Cellular Characteristics of *Chlorella*. In *Algal culture fro Laboratory to Pilot Plant*; 1953; pp 76–84.
- (101) Torzillo, G.; Chini Zittelli, G. Tubular Photobioreactors. In *Algal Biorefineries: Volume 2: Products and Refinery Design*; Prokop, A., Bajpai, R. K., Zappi, M. E., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2015; pp 187–212. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_5).
- (102) Tredici, M. R.; Zittelli, G. C.; Rodolfi, L. Photobioreactors. In *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*; American Cancer Society, 2010; pp 1–15. <https://doi.org/10.1002/9780470054581.eib479>.
- (103) Torzillo, G.; Pushparaj, B.; Bocci, F.; Balloni, W.; Materassi, R.; Florenzano, G. Production of Spirulina Biomass in Closed Photobioreactors. *Biomass* **1986**, *11* (1), 61–74. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(86\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(86)90021-1).
- (104) Acién, F. G.; Molina, E.; Reis, A.; Torzillo, G.; Zittelli, G. C.; Sepúlveda, C.; Masojídek, J. 1 - Photobioreactors for the Production of Microalgae. In *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*; Gonzalez-Fernandez, C., Muñoz, R., Eds.; Woodhead Publishing Series in Energy; Woodhead Publishing, 2017; pp 1–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7>.
- (105) Carlozzi, P.; Sacchi, A. Biomass Production and Studies on Rhodospseudomonas Palustris Grown in an Outdoor, Temperature Controlled, Underwater Tubular Photobioreactor. *J. Biotechnol.* **2001**, *88* (3), 239–249. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00280-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00280-2).
- (106) Molina, E.; Fernández, J.; Acién, F. G.; Chisti, Y. Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures. *J. Biotechnol.* **2001**, *92* (2), 113–131. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00353-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00353-4).
- (107) Slegers, P. M.; van Beveren, P. J. M.; Wijffels, R. H.; van Straten, G.; van Boxtel, A. J. B. Scenario Analysis of Large Scale Algae Production in Tubular Photobioreactors. *Appl. Energy* **2013**, *105*, 395–406. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.068>.
- (108) Richmond, A.; Boussiba, S.; Vonshak, A.; Kopel, R. A New Tubular Reactor for Mass Production of Microalgae Outdoors. *J. Appl. Phycol.* **1993**, *5* (3), 327–332. <https://doi.org/10.1007/BF02186235>.
- (109) Hall, D. O.; Fernández, F. G. A.; Guerrero, E. C.; Rao, K. K.; Grima, E. M. Outdoor Helical Tubular Photobioreactors for Microalgal Production: Modeling of Fluid-Dynamics and Mass Transfer and Assessment of Biomass Productivity. *Biotechnol. Bioeng.* **2003**, *82* (1), 62–73. <https://doi.org/10.1002/bit.10543>.
- (110) Tredici, M. R.; Zittelli, G. C.; Rodolfi, L. Photobioreactors. In *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*; American Cancer Society, 2010; pp 1–15. <https://doi.org/10.1002/9780470054581.eib479>.
- (111) Lee, Y.-K.; Low, C.-S. Effect of Photobioreactor Inclination on the Biomass Productivity of an Outdoor Algal Culture. *Biotechnol. Bioeng.* **1991**, *38* (9), 995–1000. <https://doi.org/10.1002/bit.260380906>.
- (112) Díaz, J. P.; Inostroza, C.; Acién Fernández, F. G. Fibonacci-Type Tubular Photobioreactor for the Production of Microalgae. *Process Biochem.* **2019**, *86*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.08.008>.
- (113) Díaz, J. P.; Inostroza González, C.; Acién, F. Scale-up of a Fibonacci-Type Photobioreactor for the Production of *Dunaliella Salina*. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **2021**, *193*. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03410-x>.
- (114) Carlozzi, P.; Pinzani, E. Growth Characteristics of *Arthrospira Platensis* Cultured inside a New Close-Coil Photobioreactor Incorporating a Mandrel to Control Culture Temperature. *Biotechnol. Bioeng.* **2005**, *90* (6), 675–684. <https://doi.org/10.1002/bit.20425>.

- (115) Carlozzi, P. Hydrodynamic Aspects and Arthrospira Growth in Two Outdoor Tubular Undulating Row Photobioreactors. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2000**, *54* (1), 14–22. <https://doi.org/10.1007/s002530000355>.
- (116) Fernández, I.; Acién, F. G.; Fernández, J. M.; Guzmán, J. L.; Magán, J. J.; Berenguel, M. Dynamic Model of Microalgal Production in Tubular Photobioreactors. *Bioresour. Technol.* **2012**, *126*, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.087>.
- (117) Chisti, Y. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnol. Adv.* **2007**, *25* (3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>.
- (118) Zittelli, G. C.; Tomasello, V.; Pinzani, E.; Tredici, M. R. Outdoor Cultivation of Arthrospira Platensis during Autumn and Winter in Temperate Climates. *J. Appl. Phycol.* **1996**, *8* (4–5), 293–301. <https://doi.org/10.1007/BF02178572>.
- (119) Carlozzi, P.; Torzillo, G. Productivity of Spirulina in a Strongly Curved Outdoor Tubular Photobioreactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **1996**, *45* (1), 18–23. <https://doi.org/10.1007/s002530050642>.
- (120) Pérez-López, P.; de Vree, J. H.; Feijoo, G.; Bosma, R.; Barbosa, M. J.; Moreira, M. T.; Wijffels, R. H.; van Boxtel, A. J. B.; Kleinegriss, D. M. M. Comparative Life Cycle Assessment of Real Pilot Reactors for Microalgae Cultivation in Different Seasons. *Appl. Energy* **2017**, *205*, 1151–1164. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.102>.
- (121) Norsker, N.-H.; Barbosa, M. J.; Vermuë, M. H.; Wijffels, R. H. Microalgal Production — A Close Look at the Economics. *Biotechnol. Adv.* **2011**, *29* (1), 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005>.
- (122) Acién, F. G.; Fernández, J. M.; Magán, J. J.; Molina, E. Production Cost of a Real Microalgae Production Plant and Strategies to Reduce It. *Biotechnol. Adv.* **2012**, *30* (6), 1344–1353. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>.
- (123) Grima, E. M.; Chisti, Y. *Airlift-Driven External-Loop Tubular Photobioreactors for Outdoor Production of Microalgae: Assessment of Design and Performance*; 2000.
- (124) Kawase, Y.; Moo-Young, M. Mathematical Models for Design of Bioreactors: Applications of: Kolmogoroff's Theory of Isotropic Turbulence. *Chem. Eng. J.* **1990**, *43* (1), B19–B41. [https://doi.org/10.1016/0300-9467\(90\)80048-H](https://doi.org/10.1016/0300-9467(90)80048-H).
- (125) Loubière, K.; Olivo, E.; Bougaran, G.; Pruvost, J.; Robert, R.; Legrand, J. A New Photobioreactor for Continuous Microalgal Production in Hatcheries Based on External-Loop Airlift and Swirling Flow. *Biotechnol. Bioeng.* **2009**, *102* (1), 132–147. <https://doi.org/10.1002/bit.22035>.
- (126) Cornet, J.-F. Calculation of Optimal Design and Ideal Productivities of Volumetrically Lightened Photobioreactors Using the Constructal Approach. *Chem. Eng. Sci.* **2010**, *65* (2), 985–998. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.052>.
- (127) Rochatte, V. Développement et Modélisation d'un Photobioréacteur Solaire à Dilution Interne Du Rayonnement. PhD Thesis, UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II, 2016.
- (128) *algaeplanet.com*. [algaeplanet.com](https://algaeplanet.com/). <https://algaeplanet.com/> (accessed 2021-12-01).
- (129) Huang, Q.; Jiang, F.; Wang, L.; Yang, C. Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. *Engineering* **2017**, *3*, 318–329. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>.
- (130) Solimeno, A.; Acién, F. G.; García, J. Mechanistic Model for Design, Analysis, Operation and Control of Microalgae Cultures: Calibration and Application to Tubular Photobioreactors. *Algal Res.* **2017**, *21*, 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.023>.
- (131) *www.algomed.de*. [www.algomed.de](https://www.algomed.de/fr/home-2/). <https://www.algomed.de/fr/home-2/> (accessed 2021-12-02).

- (132) Pulz, O.; Broneske, J.; Waldeck, P. IGV GmbH Experience Report, Industrial Production of Microalgae Under Controlled Conditions: Innovative Prospects. In *Handbook of Microalgal Culture*; Richmond, A., Hu, Q., Eds.; John Wiley & Sons, Ltd: Oxford, UK, 2013; pp 445–460. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch24>.
- (133) *AstaPure Astaxanthin and FucoVital from microalgae* | *Algatech*. Algatech - Natural Astaxanthin. <https://www.algatech.com/> (accessed 2021-12-02).
- (134) *A4F, SA - Algae for Future*. <https://a4f.pt/pt> (accessed 2021-12-02).
- (135) *Microphyt - microalgae-based natural solutions for nutrition and well-being*. microphyt. <http://microphyt.eu> (accessed 2021-12-09).
- (136) Pires, J. C. M.; Alvim-Ferraz, M. C. M.; Martins, F. G.; Simões, M. Carbon Dioxide Capture from Flue Gases Using Microalgae: Engineering Aspects and Biorefinery Concept. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16* (5), 3043–3053. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.055>.
- (137) Cuaresma, M.; Janssen, M.; Vilchez, C.; Wijffels, R. H. Horizontal or Vertical Photobioreactors? How to Improve Microalgae Photosynthetic Efficiency. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102* (8), 5129–5137. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.078>.
- (138) Soni, R. A.; Sudhakar, K.; Rana, R. S. Spirulina – From Growth to Nutritional Product: A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *69*, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.09.010>.
- (139) Cornet, J.-F.; Dussap, C.-G. A Simple and Reliable Formula for Assessment of Maximum Volumetric Productivities in Photobioreactors. *Biotechnol. Prog.* **2009**, *25* (2), 424–435. <https://doi.org/10.1002/btpr.138>.
- (140) Pruvost, J.; Cornet, J.-F. 10 Knowledge Models for the Engineering and Optimization of Photobioreactors. **2012**.
- (141) Pruvost, J.; Cornet, J.-F.; Le Borgne, F.; Jenk, J. Production industrielle de microalgues et cyanobactéries. *Techniques de l'Ingénieur*; T.I., 2011; Vol. IN200.
- (142) Tredici, M. R.; Materassi, R. From Open Ponds to Vertical Alveolar Panels: The Italian Experience in the Development of Reactors for the Mass Cultivation of Phototrophic Microorganisms. *J. Appl. Phycol.* **1992**, *4* (3), 221–231. <https://doi.org/10.1007/BF02161208>.
- (143) Dauchet, J.; Cornet, J.-F.; Gros, F.; Roudet, M.; Dussap, C.-G. Photobioreactor Modeling and Radiative Transfer Analysis for Engineering Purposes. In *Photobioreaction Engineering*; Advances in chemical engineering; 2016; Vol. 48, pp 1–106. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.11.003>.
- (144) Cornet, J.-F.; Favier, L.; Dussap, C.-G. Modeling Stability of Photoheterotrophic Continuous Cultures in Photobioreactors. *Biotechnol. Prog.* **2003**, *19* (4), 1216–1227. <https://doi.org/10.1021/bp034041l>.
- (145) Cornet, J. F.; Dussap, C. G.; Gros, J. B. Conversion of Radiant Light Energy in Photobioreactors. *AIChE J.* **1994**, *40* (6), 1055–1066. <https://doi.org/10.1002/aic.690400616>.
- (146) Csogör, Z.; Herrenbauer, M.; Schmidt, K.; Posten, C. Light Distribution in a Novel Photobioreactor—Modelling for Optimization. *J. Appl. Phycol.* **2001**, *13* (4), 325–333.
- (147) Huang, Q.; Liu, T.; Yang, J.; Yao, L.; Gao, L. Evaluation of Radiative Transfer Using the Finite Volume Method in Cylindrical Photoreactors. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66* (17), 3930–3940. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.032>.
- (148) Pottier, L.; Pruvost, J.; Deremetz, J.; Cornet, J.-F.; Legrand, J.; Dussap, C. G. A Fully Predictive Model for One-Dimensional Light Attenuation by *Chlamydomonas Reinhardtii* in a Torus Photobioreactor. *Biotechnol. Bioeng.* **2005**, *91* (5), 569–582. <https://doi.org/10.1002/bit.20475>.
- (149) Pruvost, J.; Pottier, L.; Legrand, J. Numerical Investigation of Hydrodynamic and Mixing Conditions in a Torus Photobioreactor. *Chem. Eng. Sci.* **2006**, *61* (14), 4476–4489. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.027>.

- (150) Pruvost, J.; Cornet, J.-F.; Legrand, J. Hydrodynamics Influence on Light Conversion in Photobioreactors: An Energetically Consistent Analysis. *Chem. Eng. Sci.* **2008**, *63* (14), 3679–3694. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.026>.
- (151) Perner-Nochta, I.; Posten, C. Simulations of Light Intensity Variation in Photobioreactors. *J. Biotechnol.* **2007**, *131* (3), 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.05.024>.
- (152) Gómez-Pérez, C. A.; Espinosa, J.; Montenegro Ruiz, L. C.; van Boxtel, A. J. B. CFD Simulation for Reduced Energy Costs in Tubular Photobioreactors Using Wall Turbulence Promoters. *Algal Res.* **2015**, *12*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.07.011>.
- (153) Hreiz, R.; Sialve, B.; Morchain, J.; Escudié, R.; Steyer, J.-P.; Guiraud, P. Experimental and Numerical Investigation of Hydrodynamics in Raceway Reactors Used for Algal Culture. *Chem. Eng. J.* **2014**, *250*, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.027>.
- (154) Gao, X.; Kong, B.; Ramezani, M.; Olsen, M. G.; Vigil, R. D. An Adaptive Model for Gas–Liquid Mass Transfer in a Taylor Vortex Reactor. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2015**, *91*, 433–445. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.125>.
- (155) Gao, X.; Kong, B.; Vigil, R. D. Characteristic Time Scales of Mixing, Mass Transfer and Biomass Growth in a Taylor Vortex Algal Photobioreactor. *Bioresour. Technol.* **2015**, *198*, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.013>.
- (156) Eilers, P. H. C.; Peeters, J. C. H. A Model for the Relationship between Light Intensity and the Rate of Photosynthesis in Phytoplankton. *Ecol. Model.* **1988**, *42* (3–4), 199–215.
- (157) Cornet, J.-F.; Dussap, C. G.; Leclercq, J.-J. Simulation, Design and Model Based Predictive Control of Photobioreactors. In *Engineering and Manufacturing for Biotechnology*; Hofman, M., Thonart, P., Eds.; Focus on Biotechnology; Springer Netherlands: Dordrecht, 2002; pp 227–238. [https://doi.org/10.1007/0-306-46889-1\\_15](https://doi.org/10.1007/0-306-46889-1_15).
- (158) Pruvost, J.; Cornet, J. F.; Le Borgne, F.; Goetz, V.; Legrand, J. Theoretical Investigation of Microalgae Culture in the Light Changing Conditions of Solar Photobioreactor Production and Comparison with Cyanobacteria. *Algal Res.* **2015**, *10*, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.005>.
- (159) Pruvost, J.; Cornet, J. F.; Goetz, V.; Legrand, J. Theoretical Investigation of Biomass Productivities Achievable in Solar Rectangular Photobioreactors for the Cyanobacterium *Arthrospira Platensis*. *Biotechnol. Prog.* **2012**, *28* (3), 699–714. <https://doi.org/10.1002/btpr.1540>.
- (160) Takache, H.; Pruvost, J.; Cornet, J.-F. Kinetic Modeling of the Photosynthetic Growth of *Chlamydomonas Reinhardtii* in a Photobioreactor. *Biotechnol. Prog.* **2012**, *28* (3), 681–692. <https://doi.org/10.1002/btpr.1545>.
- (161) Janssen, M. Microalgal Photosynthesis and Growth in Mass Culture. In *Advances in Chemical Engineering*; Elsevier, 2016; Vol. 48, pp 185–256. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.11.001>.
- (162) Kok, B. Photosynthesis in Flashing Light. *Biochim. Biophys. Acta* **1956**, *21* (2), 245–258. [https://doi.org/10.1016/0006-3002\(56\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0006-3002(56)90004-X).
- (163) Laws, E. A.; Terry, K. L.; Wickman, J.; Chalup, M. S. A Simple Algal Production System Designed to Utilize the Flashing Light Effect. *Biotechnol. Bioeng.* **1983**, *25* (10), 2319–2335. <https://doi.org/10.1002/bit.260251004>.
- (164) Terry, K. L. Photosynthesis in Modulated Light: Quantitative Dependence of Photosynthetic Enhancement on Flashing Rate. *Biotechnol. Bioeng.* **1986**, *28* (7), 988–995. <https://doi.org/10.1002/bit.260280709>.

- (165) Abu-Ghosh, S.; Fixler, D.; Dubinsky, Z.; Iluz, D. Flashing Light in Microalgae Biotechnology. *Bioresour. Technol.* **2016**, *203*, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.057>.
- (166) Janssen, M.; Janssen, M.; de Winter, M.; Tramper, J.; Mur, L. R.; Snel, J.; Wijffels, R. H. Efficiency of Light Utilization of *Chlamydomonas Reinhardtii* under Medium-Duration Light/Dark Cycles. *J. Biotechnol.* **2000**, *78* (2), 123–137. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00233-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00233-3).
- (167) Béchet, Q.; Shilton, A.; Guieysse, B. Modeling the Effects of Light and Temperature on Algae Growth: State of the Art and Critical Assessment for Productivity Prediction during Outdoor Cultivation. *Biotechnol. Adv.* **2013**, *31* (8), 1648–1663. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.014>.
- (168) Wu, X.; Merchuk, J. C. Simulation of Algae Growth in a Bench-Scale Bubble Column Reactor. *Biotechnol. Bioeng.* **2002**, *80* (2), 156–168. <https://doi.org/10.1002/bit.10350>.
- (169) Wu, X.; Merchuk, J. C. Simulation of Algae Growth in a Bench Scale Internal Loop Airlift Reactor. *Chem. Eng. Sci.* **2004**, *59* (14), 2899–2912. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.02.019>.
- (170) Luo, H.-P.; Al-Dahhan, M. H. Analyzing and Modeling of Photobioreactors by Combining First Principles of Physiology and Hydrodynamics. *Biotechnol. Bioeng.* **2004**, *85* (4), 382–393. <https://doi.org/10.1002/bit.10831>.
- (171) Marshall, J. S.; Huang, Y. Simulation of Light-Limited Algae Growth in Homogeneous Turbulence. *Chem. Eng. Sci.* **2010**, *65* (12), 3865–3875. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.03.036>.
- (172) Gernigon, V.; Chekroun, M. A.; Cockx, A.; Guiraud, P.; Morchain, J. How Mixing and Light Heterogeneity Impact the Overall Growth Rate in Photobioreactors. *Chem. Eng. Technol.* **2019**, ceat.201900102. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900102>.
- (173) Tong, Z.-X.; Li, M.-J.; Yan, J.-J.; Gu, Z.-L. A Theoretical Analysis of the Hydrodynamic Influence on the Growth of Microalgae in the Photobioreactors with Simple Growth Kinetics. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2020**, *158*, 119986. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119986>.
- (174) Pruvost, J.; Legrand, J.; Legentilhomme, P.; Muller-Feuga, A. Simulation of Microalgae Growth in Limiting Light Conditions: Flow Effect. *AIChE J.* **2002**, *48* (5), 1109–1120. <https://doi.org/10.1002/aic.690480520>.
- (175) Huang, J.; Feng, F.; Wan, M.; Ying, J.; Li, Y.; Qu, X.; Pan, R.; Shen, G.; Li, W. Improving Performance of Flat-Plate Photobioreactors by Installation of Novel Internal Mixers Optimized with Computational Fluid Dynamics. *Bioresour. Technol.* **2015**, *182*, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.067>.
- (176) Bitog, J. P.; Lee, I.-B.; Lee, C.-G.; Kim, K.-S.; Hwang, H.-S.; Hong, S.-W.; Seo, I.-H.; Kwon, K.-S.; Mostafa, E. Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling and Designing Photobioreactors for Microalgae Production: A Review. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, *76* (2), 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.015>.
- (177) Marshall, J. S.; Sala, K. A Stochastic Lagrangian Approach for Simulating the Effect of Turbulent Mixing on Algae Growth Rate in a Photobioreactor. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66* (3), 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.10.043>.
- (178) Olivieri, G.; Gargiulo, L.; Lettieri, P.; Mazzei, L.; Salatino, P.; Marzocchella, A. Photobioreactors for Microalgal Cultures: A Lagrangian Model Coupling Hydrodynamics and Kinetics. *Biotechnol. Prog.* **2015**, *31* (5), 1259–1272. <https://doi.org/10.1002/btpr.2138>.
- (179) Gao, X.; Kong, B.; Vigil, R. D. Simulation of Algal Photobioreactors: Recent Developments and Challenges. *Biotechnol. Lett.* **2018**, *40* (9–10), 1311–1327. <https://doi.org/10.1007/s10529-018-2595-3>.

- (180) Takache, H.; Pruvost, J.; Marec, H. Investigation of Light/Dark Cycles Effects on the Photosynthetic Growth of *Chlamydomonas Reinhardtii* in Conditions Representative of Photobioreactor Cultivation. *Algal Res.* **2015**, *8*, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.02.009>.
- (181) Merchuk, J. C.; Ronen, M.; Giris, S.; Arad, S. (Malis). Light/Dark Cycles in the Growth of the Red Microalga *Porphyridium Sp.* *Biotechnol. Bioeng.* **1998**, *59* (6), 705–713. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980920\)59:6<705::AID-BIT7>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980920)59:6<705::AID-BIT7>3.0.CO;2-J).
- (182) Ugwu, C. U.; Ogbonna, J. C.; Tanaka, H. Light/Dark Cyclic Movement of Algal Culture (*Synechocystis Aquatilis*) in Outdoor Inclined Tubular Photobioreactor Equipped with Static Mixers for Efficient Production of Biomass. *Biotechnol. Lett.* **2005**, *27* (2), 75–78. <https://doi.org/10.1007/s10529-004-6931-4>.
- (183) Grobbelaar, J. U. Turbulence in Mass Algal Cultures and the Role of Light/Dark Fluctuations. *J. Appl. Phycol.* **1994**, *6* (3), 331–335. <https://doi.org/10.1007/BF02181947>.
- (184) Laifa, R.; Morchain, J.; Barna, L.; Guiraud, P. A Numerical Framework to Predict the Performances of a Tubular Photobioreactor from Operating and Sunlight Conditions. *Algal Res.* **2021**, *60*, 102550. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102550>.
- (185) Xu, L.; Liu, R.; Wang, F.; Liu, C.-Z. Development of a Draft-Tube Airlift Bioreactor for *Botryococcus Braunii* with an Optimized Inner Structure Using Computational Fluid Dynamics. *Bioresour. Technol.* **2012**, *119*, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.123>.
- (186) Cheng, W.; Huang, J.; Chen, J. Computational Fluid Dynamics Simulation of Mixing Characteristics and Light Regime in Tubular Photobioreactors with Novel Static Mixers. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2016**, *91* (2), 327–335. <https://doi.org/10.1002/jctb.4560>.
- (187) Bitog, J. P. P.; Lee, I.-B.; Oh, H.-M.; Hong, S.-W.; Seo, I.-H.; Kwon, K.-S. Optimised Hydrodynamic Parameters for the Design of Photobioreactors Using Computational Fluid Dynamics and Experimental Validation. *Biosyst. Eng.* **2014**, *122*, 42–61. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.006>.
- (188) Pruvost, J.; Legrand, J.; Legentilhomme, P.; Rosant, J. M. Numerical Investigation of Bend and Torus Flows—Part II : Flow Simulation in Torus Reactor. *Chem. Eng. Sci.* **2004**, *59* (16), 3359–3370. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.03.041>.
- (189) Visser, A. Using Random Walk Models to Simulate the Vertical Distribution of Particles in a Turbulent Water Column. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1997**, *158*, 275–281. <https://doi.org/10.3354/meps158275>.
- (190) Ross, O. N.; Sharples, J. Recipe for 1-D Lagrangian Particle Tracking Models in Space-Varying Diffusivity. *Limnol. Oceanogr. Methods* **2004**, *2* (9), 289–302. <https://doi.org/10.4319/lom.2004.2.289>.
- (191) Toschi, F.; Bodenschatz, E. Lagrangian Properties of Particles in Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **2009**, *41* (1), 375–404. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165210>.
- (192) Hunter, J. R. On the Use of Random Walk Models with Spatially Variable Diffusivity. *J. Comput. Phys.* **1992**.
- (193) Modest, M. F. The Radiative Transfer Equation in Participating Media (RTE). In *Radiative Heat Transfer*; Elsevier, 2013; pp 279–302. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386944-9.50010-8>.
- (194) CORNET, J.-F. Procédés Limités Par Le Transfert de Rayonnement En Milieu Hétérogène. Habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2007.

- (195) Aiba, S. Growth Kinetics of Photosynthetic Microorganisms. In *Microbial Reactions; Advances in Biochemical Engineering*; Springer: Berlin, Heidelberg, 1982; pp 85–156. [https://doi.org/10.1007/3540116982\\_3](https://doi.org/10.1007/3540116982_3).
- (196) Lee, H. Y.; Erickson, L. E.; Yang, S. S. Kinetics and Bioenergetics of Light-Limited Photoautotrophic Growth of *Spirulina Platensis*. *Biotechnol. Bioeng.* **1987**, *29* (7), 832–843. <https://doi.org/10.1002/bit.260290705>.
- (197) Rorrer, G. L.; Mullikin, R. K. Modeling and Simulation of a Tubular Recycle Photobioreactor for Macroalgal Cell Suspension Cultures. *Chem. Eng. Sci.* **1999**, *54* (15), 3153–3162. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00296-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00296-6).
- (198) Marotta, G.; Pruvost, J.; Scargiali, F.; Caputo, G.; Brucato, A. Reflection-Refraction Effects on Light Distribution inside Tubular Photobioreactors. *Can. J. Chem. Eng.* **2017**, *95* (9), 1646–1651. <https://doi.org/10.1002/cjce.22811>.
- (199) Fernández, F. G. A.; Camacho, F. G.; Pérez, J. A. S.; Sevilla, J. M. F.; Grima, E. M. A model for light distribution and average solar irradiance inside outdoor tubular photobioreactors for the microalgal mass culture. *Biotechnol. Bioeng.* **1997**, *55* (5), 701–714. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19970905\)55:5<701::AID-BIT1>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19970905)55:5<701::AID-BIT1>3.0.CO;2-F).
- (200) Arancibia-Bulnes, C. A.; Jiménez, A. E.; Estrada, C. A. Development and Modeling of Solar Photocatalytic Reactors. In *Advances in Chemical Engineering*; Elsevier, 2009; Vol. 36, pp 185–227. [https://doi.org/10.1016/S0065-2377\(09\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2377(09)00406-2).
- (201) Cornet, J.-F.; Dussap, C. G.; Gros, J.-B.; Binois, C.; Lasseur, C. A Simplified Monodimensional Approach for Modeling Coupling between Radiant Light Transfer and Growth Kinetics in Photobioreactors. *Chem. Eng. Sci.* **1995**, *50* (9), 1489–1500. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00022-W](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00022-W).
- (202) Pruvost, J.; Cornet, J. F.; Le Borgne, F.; Goetz, V.; Legrand, J. Theoretical Investigation of Microalgae Culture in the Light Changing Conditions of Solar Photobioreactor Production and Comparison with Cyanobacteria. *Algal Res.* **2015**, *10*, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.005>.
- (203) Wheaton, Z. C.; Krishnamoorthy, G. Modeling Radiative Transfer in Photobioreactors for Algal Growth. *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *87*, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.05.002>.
- (204) Lee, E.; Pruvost, J.; He, X.; Munipalli, R.; Pilon, L. Design Tool and Guidelines for Outdoor Photobioreactors. *Chem. Eng. Sci.* **2014**, *106*, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.11.014>.
- (205) Brucato, A.; Cassano, A. E.; Grisafi, F.; Montante, G.; Rizzuti, L.; Vella, G. Estimating Radiant Fields in Flat Heterogeneous Photoreactors by the Six-Flux Model. *AIChE J.* **2006**, *52* (11), 3882–3890. <https://doi.org/10.1002/aic.10984>.
- (206) Charon, J.; Blanco, S.; Cornet, J.-F.; Dauchet, J.; El Hafi, M.; Fournier, R.; Abboud, M. K.; Weitz, S. Monte Carlo Implementation of Schiff's Approximation for Estimating Radiative Properties of Homogeneous, Simple-Shaped and Optically Soft Particles: Application to Photosynthetic Micro-Organisms. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **2016**, *172*, 3–23. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.10.020>.
- (207) Dauchet, J.; Blanco, S.; Cornet, J.-F.; El Hafi, M.; Eymet, V.; Fournier, R. The Practice of Recent Radiative Transfer Monte Carlo Advances and Its Contribution to the Field of Microorganisms Cultivation in Photobioreactors. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **2013**, *128*, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.07.004>.
- (208) Hammersley, J. *Monte Carlo Methods*; Springer Science & Business Media, 2013.
- (209) Nikolaou, A.; Hartmann, P.; Sciandra, A.; Chachuat, B.; Bernard, O. Dynamic Coupling of Photoacclimation and Photoinhibition in a Model of Microalgae Growth. *J. Theor. Biol.* **2016**, *390*, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.11.004>.
- (210) Hartmann, P.; Demory, D.; Combe, C.; Hamouda, R.; Boulanger, A.-C.; Bristeau, M.-O.; Sainte-Marie, J.; Sialve, B.; Steyer, J.-P.; Rabouille, S. Growth Rate Estimation of

- Algae in Raceway Ponds: A Novel Approach. *IFAC Proc. Vol.* **2014**, 47 (3), 6216–6221.
- (211) Han, B.-P. Photosynthesis–Irradiance Response at Physiological Level: A Mechanistic Model. *J. Theor. Biol.* **2001**, 213 (2), 121–127. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2001.2413>.
- (212) Rubio, F. C.; Camacho, F. G.; Sevilla, J. M. F.; Chisti, Y.; Grima, E. M. A Mechanistic Model of Photosynthesis in Microalgae. *Biotechnol. Bioeng.* **2003**, 81 (4), 459–473. <https://doi.org/10.1002/bit.10492>.
- (213) Bernardi, A.; Perin, G.; Sforza, E.; Galvanin, F.; Morosinotto, T.; Bezzo, F. An Identifiable State Model To Describe Light Intensity Influence on Microalgae Growth. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2014**, 53 (16), 6738–6749. <https://doi.org/10.1021/ie500523z>.
- (214) García-Camacho, F.; Sánchez-Mirón, A.; Molina-Grima, E.; Camacho-Rubio, F.; Merchuck, J. C. A Mechanistic Model of Photosynthesis in Microalgae Including Photoacclimation Dynamics. *J. Theor. Biol.* **2012**, 304, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.03.021>.
- (215) Bernardi, A.; Nikolaou, A.; Meneghesso, A.; Morosinotto, T.; Chachuat, B.; Bezzo, F. Correction: High-Fidelity Modelling Methodology of Light-Limited Photosynthetic Production in Microalgae. *PLOS ONE* **2016**, 11 (6), e0156922. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156922>.
- (216) Bernardi, A.; Nikolaou, A.; Meneghesso, A.; Chachuat, B.; Morosinotto, T.; Bezzo, F. A Framework for the Dynamic Modelling of PI Curves in Microalgae. In *Computer Aided Chemical Engineering*; Elsevier, 2015; Vol. 37, pp 2483–2488. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63576-1.50108-4>.
- (217) Nikolaou, A.; Hartmann, P.; Sciandra, A.; Chachuat, B.; Bernard, O. Dynamic Coupling of Photoacclimation and Photoinhibition in a Model of Microalgae Growth. *J. Theor. Biol.* **2016**, 390, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2015.11.004>.
- (218) Papadakis, I. A.; Kotzabasis, K.; Lika, K. Modeling the Dynamic Modulation of Light Energy in Photosynthetic Algae. *J. Theor. Biol.* **2012**, 300, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.01.040>.
- (219) Marshall, H. L.; Geider, R. J.; Flynn, K. J. A Mechanistic Model of Photoinhibition. *New Phytol.* **2000**, 145 (2), 347–359. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00575.x>.
- (220) Ross, O. N.; Geider, R. J. New Cell-Based Model of Photosynthesis and Photo-Acclimation: Accumulation and Mobilisation of Energy Reserves in Phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **2009**, 383, 53–71. <https://doi.org/10.3354/meps07961>.
- (221) Graham, P. J.; Nguyen, B.; Burdyny, T.; Sinton, D. A Penalty on Photosynthetic Growth in Fluctuating Light. *Sci. Rep.* **2017**, 7 (1), 12513. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12923-1>.
- (222) Cornet, J.-F. Kinetic and Energetic Modelling of Photobioreactors. Biochemically Structured Model. Applications to a Closed Ecological Life Support System. Theses, Université Paris XI Orsay, 1992.
- (223) Morchain, J. *Modélisation des bioréacteurs*; ISTE Editions, 2018.
- (224) Goldman, J. C. Outdoor Algal Mass Cultures—II. Photosynthetic Yield Limitations. *Water Res.* **1979**, 13 (2), 119–136. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90083-6](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90083-6).
- (225) Torzillo, G.; Vonshak, A. Effect of Light and Temperature on the Photosynthetic Activity of the Cyanobacterium *Spirulina Platensis*. *Biomass Bioenergy* **1994**, 6 (5), 399–403. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(94\)00076-6](https://doi.org/10.1016/0961-9534(94)00076-6).
- (226) Bekirogullari, M.; Figueroa-Torres, G. M.; Pittman, J. K.; Theodoropoulos, C. Models of Microalgal Cultivation for Added-Value Products - A Review. *Biotechnol. Adv.* **2020**, 44, 107609. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107609>.

- (227) Darvehei, P.; Bahri, P. A.; Moheimani, N. R. Model Development for the Growth of Microalgae: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *97*, 233–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.027>.
- (228) Belay, A. Biology and Industrial Production of *Arthrospira* (Spirulina). In *Handbook of Microalgal Culture*; John Wiley & Sons, Ltd, 2013; pp 339–358. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch17>.
- (229) Torzillo, G.; Zittelli, G. C.; Silva Benavides, A. M.; Ranglova, K.; Masojidek, J. Culturing of Microalgae for Food Applications. In *Cultured Microalgae for the Food Industry*; Elsevier, 2021; pp 1–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821080-2.00002-2>.
- (230) Olaizola, M.; Duerr, E. Effect of Light Intensity and Quality on the Growth Rate and Photosynthetic Pigment Content of *Spirulina Platensis*. *J. Appl. Phycol.* **1990**, *2*, 97–104. <https://doi.org/10.1007/BF00023370>.
- (231) Manuel de la chambre de croissance – NCERA-101.
- (232) Martínez, C.; Mairet, F.; Bernard, O. Theory of Turbid Microalgae Cultures. *J. Theor. Biol.* **2018**, *456*, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.07.016>.
- (233) Park, K.-H.; Lee, C.-G. Effectiveness of Flashing Light for Increasing Photosynthetic Efficiency of Microalgal Cultures over a Critical Cell Density. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **2001**, *6* (3), 189. <https://doi.org/10.1007/BF02932549>.
- (234) Li, M.; Hu, D.; Liu, H. Photobioreactor with Ideal Light–Dark Cycle Designed and Built from Mathematical Modeling and CFD Simulation. *Ecol. Eng.* **2014**, *73*, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.010>.
- (235) Baroukh, C.; Steyer, J. P.; Bernard, O.; Chachuat, B. Dynamic Flux Balance Analysis of the Metabolism of Microalgae under a Diurnal Light Cycle. *IFAC-Pap.* **2016**, *49* (7), 791–796. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.285>.
- (236) Pahlow, M. Linking chlorophyll–nutrient dynamics to the Redfield N:C ratio with a model of optimal phytoplankton growth. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **2005**, *287*, 33–43. <https://doi.org/10.3354/meps287033>.
- (237) Rj, G.; Hl, M.; Tm, K. Dynamic Model of Phytoplankton Growth and Acclimation: Responses of the Balanced Growth Rate and the Chlorophyll a:Carbon Ratio to Light, Nutrient-Limitation and Temperature. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1997**, *148*, 187–200. <https://doi.org/10.3354/meps148187>.
- (238) Geider, R. J.; MacIntyre, H. L.; Kana, T. M. A Dynamic Regulatory Model of Phytoplanktonic Acclimation to Light, Nutrients, and Temperature. *Limnol. Oceanogr.* **1998**, *43* (4), 679–694. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.4.0679>.
- (239) Ras, M.; Steyer, J.-P.; Bernard, O. Temperature Effect on Microalgae: A Crucial Factor for Outdoor Production. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* **2013**, *12* (2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9310-6>.
- (240) *Spirulina Platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology, and Biotechnology*; Vonshak, A., Ed.; Taylor & Francis: London, 1997.
- (241) Tomaselli, L.; Giovannetti, L.; Sacchi, A.; Bocci, F. Effects of Temperature on Growth and Biochemical Composition in *Spirulina Platensis* Strain M2. *Algal Biotechnol. Ed. T Stadler Al* **1988**.
- (242) Ahlgren, G. Temperature Functions in Biology and Their Application to Algal Growth Constants. *Oikos* **1987**, *49* (2), 177–190. <https://doi.org/10.2307/3566025>.
- (243) Bernard, O.; Rémond, B. Validation of a Simple Model Accounting for Light and Temperature Effect on Microalgal Growth. *Bioresour. Technol.* **2012**, *123*, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.022>.
- (244) Liere, L. V.; Mur, L. R. Growth Kinetics of *Oscillatoria Agardhii* Gomont in Continuous Culture, Limited in Its Growth by the Light Energy Supply. **1979**. <https://doi.org/10.1099/00221287-115-1-153>.

- (245) Torzillo, G.; Sacchi, A.; Materassi, R. Temperature as an Important Factor Affecting Productivity and Night Biomass Loss in *Spirulina Platensis* Grown Outdoors in Tubular Photobioreactors. *Bioresour. Technol.* **1991**, *38* (2), 95–100. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90137-9](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90137-9).
- (246) Cornet, J.-F. Étude Cinétique et Énergétique d'un Photobioréacteur., 1992.
- (247) Le Borgne, F.; Pruvost, J. Investigation and Modeling of Biomass Decay Rate in the Dark and Its Potential Influence on Net Productivity of Solar Photobioreactors for Microalga *Chlamydomonas Reinhardtii* and *Cyanobacterium Arthrospira Platensis*. *Bioresour. Technol.* **2013**, *138*, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.056>.
- (248) Weissman, J. C.; Goebel, R. P.; Benemann, J. R. Photobioreactor Design: Mixing, Carbon Utilization, and Oxygen Accumulation. *Biotechnol. Bioeng.* **1988**, *31* (4), 336–344. <https://doi.org/10.1002/bit.260310409>.
- (249) Raso, S.; van Genugten, B.; Vermuë, M.; Wijffels, R. H. Effect of Oxygen Concentration on the Growth of *Nannochloropsis* Sp. at Low Light Intensity. *J. Appl. Phycol.* **2012**, *24* (4), 863–871. <https://doi.org/10.1007/s10811-011-9706-z>.
- (250) Marquez, F. J.; Sasaki, K.; Nishio, N.; Nagai, S. Inhibitory Effect of Oxygen Accumulation on the Growth of *Spirulina Platensis*. *Biotechnol. Lett.* **1995**, *17* (2), 225–228. <https://doi.org/10.1007/BF00127993>.
- (251) Beaumont, J. A. G. Impact of Oxygen on *Cyanobacterium Arthrospira* Sp. PCC 8005. **2015**, 39.
- (252) Torzillo, G.; Giovannetti, L.; Bocci, F.; Materassi, R. Effect of Oxygen Concentration on the Protein Content of *Spirulina* Biomass. *Biotechnol. Bioeng.* **1984**, *26* (9), 1134–1135. <https://doi.org/10.1002/bit.260260920>.
- (253) Hartig, P.; Grobbelaar, J. U.; Soeder, C. J.; Groeneweg, J. On the Mass Culture of Microalgae: Areal Density as an Important Factor for Achieving Maximal Productivity. *Biomass* **1988**, *15* (4), 211–221. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90057-1).
- (254) Turner, J.; Todd, M.; Brittain, E. The Inhibition of Photosynthesis by Oxygen I. Comparative Physiology of the Effect. **1956**.
- (255) Kazbar, A.; Cogne, G.; Urbain, B.; Marec, H.; Le-Gouic, B.; Tallec, J.; Takache, H.; Ismail, A.; Pruvost, J. Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Microalgal Culture in Photobioreactors. *Algal Res. - Biomass Biofuels Bioprod.* **2019**, *39*, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101432>.
- (256) Costache, T. A.; Acién Fernández, F. G.; Morales, M. M.; Fernández-Sevilla, J. M.; Stamatin, I.; Molina, E. Comprehensive Model of Microalgae Photosynthesis Rate as a Function of Culture Conditions in Photobioreactors. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2013**, *97* (17), 7627–7637. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5035-2>.
- (257) Concas, A.; Pisu, M.; Cao, G. Novel Simulation Model of the Solar Collector of BIOCOIL Photobioreactors for CO<sub>2</sub> Sequestration with Microalgae. *Chem. Eng. J.* **2010**, *157* (2), 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.059>.
- (258) Miyachi, S.; Izawa, S.; Tamiya, H. Effect of Oxygen on the Capacity of Carbon Dioxide-Fixation by Green Algae. *J. Biochem. (Tokyo)* **1955**, *42* (3), 221–244.
- (259) Rubio, F. C.; Fernández, F. G. A.; Pérez, J. A. S.; Camacho, F. G.; Grima, E. M. Prediction of Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide Concentration Profiles in Tubular Photobioreactors for Microalgal Culture. *Biotechnol. Bioeng.* **1999**, *62* (1), 71–86. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990105\)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990105)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T).
- (260) Acién Fernández, F. G.; Fernández Sevilla, J. M.; Sánchez Pérez, J. A.; Molina Grima, E.; Chisti, Y. Airlift-Driven External-Loop Tubular Photobioreactors for Outdoor Production of Microalgae: Assessment of Design and Performance. *Chem. Eng. Sci.* **2001**, *56* (8), 2721–2732. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00521-2).

- (261) Grima, E. M.; Fernández, F. A.; Camacho, F. G.; Chisti, Y. Photobioreactors: Light Regime, Mass Transfer, and Scaleup. *J. Biotechnol.* **1999**, *70* (1–3), 231–247.
- (262) Soni, R. A.; Sudhakar, K.; Rana, R. S. Comparative Study on the Growth Performance of *Spirulina Platensis* on Modifying Culture Media. *Energy Rep.* **2019**, *5*, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.02.009>.
- (263) Vergnes, J. B.; Gernigon, V.; Guiraud, P.; Formosa-Dague, C. Bicarbonate Concentration Induces Production of Exopolysaccharides by *Arthrospira Platensis* That Mediate Bioflocculation and Enhance Flotation Harvesting Efficiency. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2019**, *7* (16), 13796–13804. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01591>.
- (264) Monod, J. The Growth of Bacterial Cultures. *Annu. Rev. Microbiol.* **1949**, *3* (1), 371–394. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>.
- (265) Droop, M. R. The nutrient status of algal cells in continuous culture. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* **1974**, *54* (4), 825–855. <https://doi.org/10.1017/S002531540005760X>.
- (266) Pruvost, J.; Legouic, B.; Cornet, J.-F.; Lombard, C. Biofixation du CO<sub>2</sub> par microalgues. *technique de l'ingénieur*; T.I., 2017; Vol. CH7005 V1.
- (267) Manuel de culture artisanale de spiruline J.P. Jourdan. 234.
- (268) Rodrigues, M. S.; Ferreira, L. S.; Converti, A.; Sato, S.; de Carvalho, J. C. M. Influence of Ammonium Sulphate Feeding Time on Fed-Batch *Arthrospira* (*Spirulina*) *Platensis* Cultivation and Biomass Composition with and without PH Control. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102* (11), 6587–6592. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.088>.
- (269) Silva, H. J.; Pirt, S. J. Carbon Dioxide Inhibition of Photosynthetic Growth of *Chlorella*. *Microbiology* **1984**, *130* (11), 2833–2838. <https://doi.org/10.1099/00221287-130-11-2833>.
- (270) Zhang, X.-W.; Chen, F.; Johns, M. R. Kinetic Models for Heterotrophic Growth of *Chlamydomonas Reinhardtii* in Batch and Fed-Batch Cultures. *Process Biochem.* **1999**, *35* (3), 385–389. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00082-5).
- (271) Filali, R.; Tebbani, S.; Dumur, D.; Isambert, A.; Pareau, D.; Lopes, F. Growth Modeling of the Green Microalga *Chlorella Vulgaris* in an Air-Lift Photobioreactor. *IFAC Proc. Vol.* **2011**, *44* (1), 10603–10608. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01955>.
- (272) Pegallapati, A. K.; Nirmalakhandan, N. Modeling Algal Growth in Bubble Columns under Sparging with CO<sub>2</sub>-Enriched Air. *Bioresour. Technol.* **2012**, *124*, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.026>.
- (273) Danckwerts, P. V. Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas Absorption. *Ind. Eng. Chem.* **1951**, *43* (6), 1460–1467. <https://doi.org/10.1021/ie50498a055>.
- (274) Lamont, J. C.; Scott, D. S. An Eddy Cell Model of Mass Transfer into the Surface of a Turbulent Liquid. *AIChE J.* **1970**, *16* (4), 513–519. <https://doi.org/10.1002/aic.690160403>.
- (275) Terry, K. L. Photosynthesis in Modulated Light: Quantitative Dependence of Photosynthetic Enhancement on Flashing Rate. *Biotechnol. Bioeng.* **1986**, *28* (7), 988–995. <https://doi.org/10.1002/bit.260280709>.
- (276) Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes / John A. Duffie, William A. Beckman*, 4th ed.; John Wiley: Hoboken, 2013.
- (277) Prahl, S. A. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue. In *Dosimetry of laser radiation in medicine and biology*; International Society for Optics and Photonics, 1989; Vol. 10305, p 1030509.
- (278) Dauchet, J. Analyse Radiative Des Photobioréacteurs. PhD Thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 2012.

- (279) Toonder, J. M. J.; Nieuwstadt, F. T. M. Reynolds Number Effects in a Turbulent Pipe Flow for Low to Moderate Re. *Phys. Fluids* **1997**, *9* (11), 3398–3409. <https://doi.org/10.1063/1.869451>.
- (280) Wu, X.; Moin, P. A Direct Numerical Simulation Study on the Mean Velocity Characteristics in Turbulent Pipe Flow. *J. Fluid Mech.* **2008**, *608*, 81–112. <https://doi.org/10.1017/S0022112008002085>.
- (281) Eggels, J. G. M.; Unger, F.; Weiss, M. H.; Westerweel, J.; Adrian, R. J.; Friedrich, R.; Nieuwstadt, F. T. M. Fully Developed Turbulent Pipe Flow: A Comparison between Direct Numerical Simulation and Experiment. *J. Fluid Mech.* **1994**, *268*, 175–210. <https://doi.org/10.1017/S002211209400131X>.
- (282) Furuichi, N.; Terao, Y.; Wada, Y.; Tsuji, Y. Friction Factor and Mean Velocity Profile for Pipe Flow at High Reynolds Numbers. *Phys. Fluids* **2015**, *27* (9), 095108. <https://doi.org/10.1063/1.4930987>.
- (283) Laufer, j. The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow. *NACA Rep.* **1174**. 1954.
- (284) Lawn, C. J. The determination of the rate of dissipation in turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* **1971**, *48* (3), 477–505. <https://doi.org/10.1017/S002211207100171X>.
- (285) Taylor, G. I. DIFFUSION BY CONTINUOUS MOVEMENTS. **1920**, 17.
- (286) Hutchinson, P.; Hewitt, G. F.; Dukler, A. E. Deposition of Liquid or Solid Dispersions from Turbulent Gas Streams: A Stochastic Model. *Chem. Eng. Sci.* **1971**, *26* (3), 419–439. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(71\)83016-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(71)83016-6).
- (287) Luo, H.-P.; Al-Dahhan, M. H. Verification and Validation of CFD Simulations for Local Flow Dynamics in a Draft Tube Airlift Bioreactor. *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66* (5), 907–923. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.038>.
- (288) Gao, X.; Kong, B.; Dennis Vigil, R. Comprehensive Computational Model for Combining Fluid Hydrodynamics, Light Transport and Biomass Growth in a Taylor Vortex Algal Photobioreactor: Eulerian Approach. *Algal Res.* **2017**, *24*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.03.009>.
- (289) Cattaneo, B. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. EU Science Hub - European Commission. <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> (accessed 2020-10-01).
- (290) Cornet, J.-F.; Dussap, C.-G. A Simple and Reliable Formula for Assessment of Maximum Volumetric Productivities in Photobioreactors. *Biotechnol. Prog.* **2009**, *25* (2), 424–435.
- (291) Weber, M. J. *Handbook of Optical Materials*; The CRC Press laser and optical science and technology series; CRC Press: Boca Raton, 2003.
- (292) *PVGIS: logiciel en ligne de simulation*. <https://photovoltaique-energie.fr/pvgis-logiciel-en-ligne-de-simulation.html> (accessed 2020-10-01).
- (293) Loubiere, K.; Pruvost, J.; Aloui, F.; Legrand, J. Investigations in an External-Loop Airlift Photobioreactor with Annular Light Chambers and Swirling Flow. *Chem. Eng. Res. Des.* **2011**, *89* (2), 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.06.001>.
- (294) Hindersin, S.; Leupold, M.; Kerner, M.; Hanelt, D. Key Parameters for Outdoor Biomass Production of *Scenedesmus Obliquus* in Solar Tracked Photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* **2014**, *26* (6), 2315–2325. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0261-2>.
- (295) Cornet, J.-F. Calculation of Optimal Design and Ideal Productivities of Volumetrically-Lightened Photobioreactors Using the Constructal Approach. *Chem. Eng. Sci.* **2010**, *65*, 985–998. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.052>.
- (296) Hindersin, S.; Leupold, M.; Kerner, M.; Hanelt, D. Irradiance Optimization of Outdoor Microalgal Cultures Using Solar Tracked Photobioreactors. *Bioprocess Biosyst. Eng.* **2013**, *36* (3), 345–355. <https://doi.org/10.1007/s00449-012-0790-5>.

- (297) Lundquist, T. J. A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel. *XRDS Crossroads ACM Mag. Stud.* **2010**, *17* (4), 58–59. <https://doi.org/10.1145/1961678.1961690>.
- (298) Pruvost, J.; Goetz, V.; Artu, A.; Das, P.; Al Jabri, H. Thermal Modeling and Optimization of Microalgal Biomass Production in the Harsh Desert Conditions of State of Qatar. *Algal Res.* **2019**, *38*, 101381. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.12.006>.
- (299) Béchet, Q.; Shilton, A.; Park, J. B. K.; Craggs, R. J.; Guieysse, B. Universal Temperature Model for Shallow Algal Ponds Provides Improved Accuracy. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45* (8), 3702–3709. <https://doi.org/10.1021/es1040706>.
- (300) Greene, J. M.; Quiroz, D.; Compton, S.; Lammers, P. J.; Quinn, J. C. A Validated Thermal and Biological Model for Predicting Algal Productivity in Large Scale Outdoor Cultivation Systems. *Algal Res.* **2021**, *54*, 102224. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102224>.
- (301) Huesemann, M.; Crowe, B.; Waller, P.; Chavis, A.; Hobbs, S.; Edmundson, S.; Wigmosta, M. A Validated Model to Predict Microalgae Growth in Outdoor Pond Cultures Subjected to Fluctuating Light Intensities and Water Temperatures. *Algal Res.* **2016**, *13*, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.11.008>.
- (302) Quiroz-Arita, C.; Blaylock, M. L.; Gharagozloo, P. E.; Bradley, T. H.; Dempster, T.; McGowen, J.; Davis, R. W. A Dynamic Thermal Algal Growth Model for Pilot-Scale Open-Channel Raceways. *Bioresour. Technol. Rep.* **2020**, *10*, 100405. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100405>.
- (303) Rodríguez-Miranda, E.; Acién, F. G.; Guzmán, J. L.; Berenguel, M.; Visioli, A. A New Model to Analyze the Temperature Effect on the Microalgae Performance at Large Scale Raceway Reactors. *Biotechnol. Bioeng.* **2021**, *118* (2), 877–889. <https://doi.org/10.1002/bit.27617>.
- (304) Slegers, P. M.; Lösing, M. B.; Wijffels, R. H.; van Straten, G.; van Boxtel, A. J. B. Scenario Evaluation of Open Pond Microalgae Production. *Algal Res.* **2013**, *2* (4), 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.05.001>.
- (305) Béchet, Q.; Shilton, A.; Fringer, O. B.; Muñoz, R.; Guieysse, B. Mechanistic Modeling of Broth Temperature in Outdoor Photobioreactors. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44* (6), 2197–2203. <https://doi.org/10.1021/es903214u>.
- (306) Goetz, V.; Le Borgne, F.; Pruvost, J.; Plantard, G.; Legrand, J. A Generic Temperature Model for Solar Photobioreactors. *Chem. Eng. J.* **2011**, *175*, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.052>.
- (307) Endres, C. H.; Roth, A.; Brück, T. B. Thermal Reactor Model for Large-Scale Algae Cultivation in Vertical Flat Panel Photobioreactors. *Environ. Sci. Technol.* **2016**, *50* (7), 3920–3927. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05414>.
- (308) Androga, D. D.; Uyar, B.; Koku, H.; Eroglu, I. Dynamic Modeling of Temperature Change in Outdoor Operated Tubular Photobioreactors. *Bioprocess Biosyst. Eng.* **2017**, *40* (7), 1017–1031. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1765-3>.
- (309) Muller-Feuga, A.; Lemar, M.; Vermel, E.; Pradelles, R.; Rimbaud, L.; Valiorgue, P. Appraisal of a Horizontal Two-Phase Flow Photobioreactor for Industrial Production of Delicate Microalgae Species. *J. Appl. Phycol.* **2012**, *24* (3), 349–355. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9820-6>.
- (310) *NSRDB Data Viewer*. NSRDB Data Viewer. [https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=Jea8x6%255Bv%255D%3Dt%26VRLt\\_G%255Bv%255D%3Dt%26VRLt\\_G%255Bd%255D%3D1%26HS-TY6%255Bv%255D%3Dt%26HS-TY6%255Bd%255D%3D2%26mcQtmw%255Bv%255D%3Dt%26mcQtmw%255Bd%255D%3D3&bL=H7Qphn&cE=0&lR=0&mC=43.644025847699496%2C1.8951416015625002&zL=7](https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=Jea8x6%255Bv%255D%3Dt%26VRLt_G%255Bv%255D%3Dt%26VRLt_G%255Bd%255D%3D1%26HS-TY6%255Bv%255D%3Dt%26HS-TY6%255Bd%255D%3D2%26mcQtmw%255Bv%255D%3Dt%26mcQtmw%255Bd%255D%3D3&bL=H7Qphn&cE=0&lR=0&mC=43.644025847699496%2C1.8951416015625002&zL=7) (accessed 2021-11-01).

- (311) *NASA POWER | Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accessed 2021-06-21).
- (312) *Infoclimat, la météo en France en temps réel - Weather in realtime Europe, France*. <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/30/juillet/2020/toulouse-blagnac/07630.html> (accessed 2021-06-20).
- (313) Newton, I. *Principes Mathematiques de la Philosophie Naturelle [French] (Gabay,1990)*; 1759.
- (314) *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed.; Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I., Eds.; McGraw-Hill handbooks; McGraw-Hill: New York, 1998.
- (315) *Principles of Heat and Mass Transfer*, 7. ed., international student version.; Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., Eds.; Wiley: Singapore, 2013.
- (316) Jiji, L. M. *Heat Convection*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02971-4>.
- (317) Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes / John A. Duffie, William A. Beckman*, 4th ed.; John Wiley: Hoboken, 2013.
- (318) Sartori, E. Convection Coefficient Equations for Forced Air Flow over Flat Surfaces. *Sol. Energy* **2006**, *80* (9), 1063–1071. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.001>.
- (319) McAdams, W. H. *Heat Transmission*, 3rd Edition.; 1985.
- (320) Goswami, D. Y. *Principles of Solar Engineering*, Third Edition. **2000**, 790.
- (321) Lunde, T. *SOLAR THERMAL ENGINEERING-SPACE: Space Heating and Hot Water Systems*; 1980.
- (322) Onur, N. Forced Convection Heat Transfer from a Flat-Plate Model Collector on Roof of a Model House. *Wärme - Stoffübertrag.* **1993**, *28* (3), 141–145. <https://doi.org/10.1007/BF01541111>.
- (323) Mahboub, C.; Moumami, N.; Moumami, A.; Youcef-Ali, S. Effect of the Angle of Attack on the Wind Convection Coefficient. *Sol. Energy* **2011**, *85* (5), 776–780. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.01.008>.
- (324) Emmel, M. G.; Abadie, M. O.; Mendes, N. New External Convective Heat Transfer Coefficient Correlations for Isolated Low-Rise Buildings. *Energy Build.* **2007**, *39* (3), 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.001>.
- (325) Palyvos, J. A. A Survey of Wind Convection Coefficient Correlations for Building Envelope Energy Systems' Modeling. *Appl. Therm. Eng.* **2008**, *28* (8), 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005>.
- (326) Churchill, S. W.; Bernstein, M. A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow. *J. Heat Transf.* **1977**, *99* (2), 300–306. <https://doi.org/10.1115/1.3450685>.
- (327) Sparrow, E. M.; Moreno, A. A. Y. Effect of Yaw on Forced Convection Heat Transfer from a Circular Cylinder. *Int. J. Heat Mass Transf.* **1987**, *30* (3), 427–435. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90258-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90258-4).
- (328) ARTU, A. *Etude et Optimisation de La Culture de Microalgues En Photobioréacteurs Solaires*, Université de Nantes, 2016.
- (329) Miller, D. H. *Energy at the Surface of the Earth: An Introduction to the Energetics of Ecosystems*; International geophysics series; Acad. Press: New York, NY, 1981.
- (330) Belloufi, Y. *refroidissement d'un fluide caloporteur utilisé pour le confort thermique de l'habitat.*, 2017.
- (331) Schmidt, W. L.; Gosnold, W. D.; Enz, J. W. A Decade of Air–Ground Temperature Exchange from Fargo, North Dakota. *Glob. Planet. Change* **2001**, *29* (3), 311–325. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00097-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00097-2).
- (332) Sassi, M. Z.; Fourrié, N.; Guidard, V.; Birman, C. Use of Infrared Satellite Observations for the Surface Temperature Retrieval over Land in a NWP Context. *Remote Sens.* **2019**, *11* (20), 2371. <https://doi.org/10.3390/rs11202371>.

- (333) Hase, R.; Oikawa, H.; Sasao, C.; Morita, M.; Watanabe, Y. Photosynthetic Production of Microalgal Biomass in a Raceway System under Greenhouse Conditions in Sendai City. *J. Biosci. Bioeng.* **2000**, *89* (2), 157–163. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(00\)88730-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(00)88730-7).
- (334) Octavian, S. K. *Plant Energetics*; 1998.
- (335) Bastien, D. Methodology for Enhancing Solar Energy Utilization in Soloria and Greenhouses, Concordia University, Building, Civil, and Environmental Engineering, Montréal, Québec, Canada, 2015.
- (336) Montero, J. I.; Munoz, P.; Baeza, E.; Stanghellini, C. Ongoing Developments in Greenhouse Climate Control. *Acta Hort.* **2017**, No. 1182, 1–14. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.1>.
- (337) Srinivasan, G.; Muthukumar, P. A Review on Solar Greenhouse Dryer: Design, Thermal Modelling, Energy, Economic and Environmental Aspects. *Sol. Energy* **2021**. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>.
- (338) Mahmoudi, H.; Spahis, N.; Goosen, Mattheus. F.; Sablani, S.; Abdul-wahab, Sabah. A.; Ghaffour, N.; Drouiche, N. Assessment of Wind Energy to Power Solar Brackish Water Greenhouse Desalination Units: A Case Study from Algeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13* (8), 2149–2155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.001>.
- (339) Choab, N.; Allouhi, A.; El Maakoul, A.; Kousksou, T.; Saadeddine, S.; Jamil, A. Review on Greenhouse Microclimate and Application: Design Parameters, Thermal Modeling and Simulation, Climate Controlling Technologies. *Sol. Energy* **2019**, *191*, 109–137. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>.
- (340) Mesmoudi, K.; Soudani, A. Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal. **2008**, 14.
- (341) Singh, G.; Singh, P. P.; Lubana, P. P. S.; Singh, K. G. Formulation and Validation of a Mathematical Model of the Microclimate of a Greenhouse. *Renew. Energy* **2006**, *31* (10), 1541–1560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.07.011>.
- (342) Jadallah, A. A.; Alsaadi, M. K.; Hafidh, Z. A. Innovative Design of a Ventilated Modern Greenhouse Powered by PV/T Solar System. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *765*, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/765/1/012040>.
- (343) Kittas, C. Détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi d'une serre. *Agric. For. Meteorol.* **1994**, *69* (3), 205–221. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90026-4).
- (344) Sethi, V. P. On the Selection of Shape and Orientation of a Greenhouse: Thermal Modeling and Experimental Validation. *Sol. Energy* **2009**, *83* (1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>.
- (345) Zhang, G.; Ding, X.; Li, T.; Pu, W.; Lou, W.; Hou, J. Dynamic Energy Balance Model of a Glass Greenhouse: An Experimental Validation and Solar Energy Analysis. *Energy* **2020**, *198*, 117281. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117281>.
- (346) Monteil, C.; Amouroux, M. Analyse Du Comportement Thermique Du Sol d'une Serre Agricole Par Simulation Dynamique. *J. Phys. III* **1997**, *7* (2), 405–440. <https://doi.org/10.1051/jp3:1997130>.
- (347) Taki, M.; Ajabshirchi, Y.; Ranjbar, S. F.; Rohani, A.; Matloobi, M. Modeling and Experimental Validation of Heat Transfer and Energy Consumption in an Innovative Greenhouse Structure. *Inf. Process. Agric.* **2016**, *3* (3), 157–174. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.06.002>.
- (348) M. Kindelan. Dynamic Modeling of Greenhouse Environment. *Trans. ASAE* **1980**, *23* (5), 1232–1239. <https://doi.org/10.13031/2013.34752>.
- (349) Joudi, K. A.; Farhan, A. A. A Dynamic Model and an Experimental Study for the Internal Air and Soil Temperatures in an Innovative Greenhouse. *Energy Convers. Manag.* **2015**, *91*, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.052>.

- (350) Feingold, A.; Gupta, K. G. New Analytical Approach to the Evaluation of Configuration Factors in Radiation From Spheres and Infinitely Long Cylinders. *J. Heat Transf.* **1970**, *92* (1), 69–76. <https://doi.org/10.1115/1.3449647>.
- (351) Howell, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 5th Edition.; 2010.
- (352) Vigon, B. W.; Tolle, D. A.; Cornaby, B. W.; Latham, H. C.; Harrison, C. L.; Boguski, T. L.; Hunt, R. G.; Sellers, J. D. *Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*, 1st ed.; CRC Press, 2020. <https://doi.org/10.1201/9781003075554>.
- (353) Soratana, K.; Landis, A. E. Evaluating Industrial Symbiosis and Algae Cultivation from a Life Cycle Perspective. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102* (13), 6892–6901. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.018>.
- (354) Béchet, Q.; Plouviez, M.; Chambonnière, P.; Guieysse, B. Environmental Impacts of Full-Scale Algae Cultivation. In *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*; Elsevier, 2017; pp 505–525. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101023-5.00021-2>.
- (355) Lardon, L.; Hélias, A.; Sialve, B.; Steyer, J.-P.; Bernard, O. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43* (17), 6475–6481. <https://doi.org/10.1021/es900705j>.
- (356) Collet, P.; Hélias, A.; Lardon, L.; Ras, M.; Goy, R.-A.; Steyer, J.-P. Life-Cycle Assessment of Microalgae Culture Coupled to Biogas Production. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102* (1), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.154>.
- (357) Rodríguez, R.; Espada, J. J.; Moreno, J.; Vicente, G.; Bautista, L. F.; Morales, V.; Sánchez-Bayo, A.; Dufour, J. Environmental Analysis of Spirulina Cultivation and Biogas Production Using Experimental and Simulation Approach. *Renew. Energy* **2018**, *129*, 724–732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.076>.
- (358) Ye, C.; Mu, D.; Horowitz, N.; Xue, Z.; Chen, J.; Xue, M.; Zhou, Y.; Klutts, M.; Zhou, W. Life Cycle Assessment of Industrial Scale Production of Spirulina Tablets. *Algal Res.* **2018**, *34*, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.013>.
- (359) Smetana, S.; Sandmann, M.; Rohn, S.; Pleissner, D.; Heinz, V. Autotrophic and Heterotrophic Microalgae and Cyanobacteria Cultivation for Food and Feed: Life Cycle Assessment. *Bioresour. Technol.* **2017**, *245*, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.113>.
- (360) Sandmann, M.; Smetana, S.; Heinz, V.; Rohn, S. Comparative Life Cycle Assessment of a Mesh Ultra-Thin Layer Photobioreactor and a Tubular Glass Photobioreactor for the Production of Bioactive Algae Extracts. *Bioresour. Technol.* **2021**, *340*, 125657. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125657>.
- (361) Guieysse, B.; Plouviez, M.; Coilhac, M.; Cazali, L. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) Production in Axenic *Chlorella Vulgaris* Microalgae Cultures: Evidence, Putative Pathways, and Potential Environmental Impacts. *Biogeosciences* **2013**, *10* (10), 6737–6746. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6737-2013>.
- (362) 14:00–17:00. *ISO 14040:2006*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html> (accessed 2022-05-11).
- (363) Home. *ecoinvent*. <https://ecoinvent.org/> (accessed 2021-10-25).
- (364) Loubiere, K. Croissance et Détachement de Bulles Générées Par Des Orifices Rigides et Flexibles Dans Des Phases Liquides Newtoniennes : Étude Expérimentale et Modélisation, S.l. : s.n., S.l., 2002.
- (365) Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M. Report I: Characterisation. **2008**, 132.
- (366) Stephenson, A. L.; Kazamia, E.; Dennis, J. S.; Howe, C. J.; Scott, S. A.; Smith, A. G. Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy Fuels* **2010**, *24* (7), 4062–4077. <https://doi.org/10.1021/ef1003123>.

- (367) Lorfing, D.; Ahmadi, A.; Laborie, S.; Olives, R.; Falcoz, Q.; Py, X.; Tiruta-Barna, L. Energy and Environmental Performance of a New Solar Boiler with Heat Recovery for Seawater Desalination. *Sustain. Prod. Consum.* **2022**, *32*, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.001>.
- (368) Duffie, J. A.; Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes 3rd Edition (2006)*; 2006.
- (369) E. A. Arinze; G. J. Schoenau; R. W. Besant. A Dynamic Thermal Performance Simulation Model of an Energy Conserving Greenhouse With Thermal Storage. *Trans. ASAE* **1984**, *27* (2), 508–519. <https://doi.org/10.13031/2013.32819>.



# Glossaire

## Étude de cinétiques et évolution du milieu de culture

Symbole	Définition	Unité	Valeur	Références
<b>Alphabet latin</b>				
<i>D</i>	Taux de dilution	(T <sup>-1</sup> )	<b>0</b>	
<i>D<sub>O<sub>2</sub></sub></i>	Coefficient de diffusivité d'O <sub>2</sub> (25°C)	(m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	<b>2,10.10<sup>-9</sup></b>	39
<i>D<sub>CO<sub>2</sub></sub></i>	Coefficient de diffusivité de CO <sub>2</sub> (25°C)	(m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	<b>1,92.10<sup>-9</sup></b>	39
<i>dt</i>	Temps de pas de simulation	(min)	<b>4,5</b>	
<i>dx</i>	Volume élémentaire	(m <sup>3</sup> )		
<i>f</i>	Fonction	(-)		
<i>g</i>	Coefficient de fonction de phase	(-)	<b>0,97</b>	
<i>H<sub>CO<sub>2</sub></sub></i>	Constante d'Henry pour le CO <sub>2</sub> (35°C)	(mol.L <sup>-1</sup> .atm <sup>-1</sup> )	<b>3,4.10<sup>-2</sup></b>	39
<i>i</i>	Propriété interne de la cellule	(-)	*	
<i>L</i>	Longueur du tube	(m)	<b>120</b>	
<i>m<sub>V</sub></i>	Gain de masse par unité de temps sur l'ensemble du volume	(kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	*	
<i>m<sub>V</sub></i>	Masse sur l'ensemble du volume	(kg.m <sup>-3</sup> )	*	
<i>P<sub>CO<sub>2</sub></sub></i>	Pression partielle de CO <sub>2</sub>	(atm)	<b>4,08.10<sup>-4</sup></b>	39
<b>PDF</b>	Densité de flux de photons	(μmol.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	*	
<b>PBR</b>	Photobioréacteur			
<i>Q<sub>l</sub></i>	Débit volumique de la culture	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
<i>r</i>	Rayon du tube	(m)	<b>0,05</b>	
<i>r<sub>O<sub>2</sub></sub></i>	le taux volumique de génération d'oxygène par photosynthèse	(kg.m <sup>-3</sup> .s <sup>-1</sup> )	*	
<i>R</i>	Taux de consommation d'O <sub>2</sub>	(μmol O <sub>2</sub> .mg de Ch <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	*	
<i>t</i>	Temps	(s)	*	
<i>p</i>	Densité de probabilité massique	(-)	*	
<i>p<sub>V</sub></i>	Densité de probabilité volumique	(-)	*	
<i>V<sub>R</sub></i>	Volume du photobioréacteur	(m <sup>3</sup> )	<b>0,235</b>	
<i>V<sub>C</sub></i>	Volume du réservoir	(m <sup>3</sup> )	<b>0,1</b>	
<i>X</i>	Concentration de la biomasse	(g.L <sup>-1</sup> )	*	
<i>y<sub>CO<sub>2</sub></sub></i>	Fraction du CO <sub>2</sub> dans la phase gazeuse	(ppm)	<b>408</b>	39

$Y_{C/X}$	Le rendement massique de consommation de bicarbonate	g de bicarbonate/g de biomasse	<b>2,571</b>	246
$Y_{N/X}$	Le rendement massique de consommation de nitrate	g de nitrate/g de biomasse	<b>0,452</b>	246
$Y_{O_2/X}$	Le rendement massique de consommation d'oxygène	g d'O <sub>2</sub> /g de biomasse	<b>1,428</b>	246
$Y_{X/O_2}$	Le rendement massique de production d'oxygène	g d'O <sub>2</sub> /g de biomasse	<b>1,362</b>	246

### Alphabet Grecs

$\mu$	Taux de croissance	(j <sup>-1</sup> )	*	
$\alpha$	Coefficient du rayonnement diffus	(-)	*	
$\tau$	Temps de relaxation de la microalgue	(s)	<b>0,3</b>	39
$\Gamma$	Taux d'intégration des fluctuations de lumière vues	(-)	*	
$\delta$	Fonction Dirac	(-)	(-)	

### Indices & Exposants

<b>a</b>	Réel (actuel)
<b>aq</b>	Aqueuse
<b>ins</b>	Intégration instantané
<b>full</b>	Intégration complète
<b>k</b>	Évènement
<b>p</b>	Particule
<b>N</b>	Nitrate
<b>C</b>	Carbone
<b>crit</b>	Critique
<b>V</b>	Volumique
<b>T</b>	Température

## Étude de transfert radiatif

Symbole	Définition	Unité	Valeur	Références
<b>Alphabet latin</b>				
$a_z$	Azimut angle solaire	(°)	*	
$d$	Longueur parcourue par les photons avant d'atteindre la cellule	(m)	*	
$E_s$	Coefficient massique de diffusion	(m <sup>2</sup> .kg-1)	640	290
$E_a$	Coefficient massique d'absorption	(m <sup>2</sup> .kg-1)	162	290

$I$	Champ d'irradiance globale		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$I_b$	Champ d'irradiance directe		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$I_d$	Champ d'irradiance diffuse		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$I_0$	Valeur de l'irradiance incidente globale		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$I_p$	Signal ressenti par une cellule		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$I_0$	Valeur de l'irradiance incidente globale		$(\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1})$	*
$n_{air}$	Indice de réfraction de l'air		(-)	<b>1</b>
$n_{culture}$	Indice de réfraction de culture		(-)	<b>1</b>
$n_{PMMA}$	Indice de réfraction de PMMA		(-)	<b>1,34</b>
$N$	Nombre de jour		(-)	*
<b>PAR</b>	Photosynthetic Active Radiation		(nm)	<b>0.4-0.7</b>
$P_v$	Productivité annuelle		$(\text{g.L}^{-1}.\text{j}^{-1})/$ $(\text{kg.m}^{-3}.\text{an}^{-1})$	*
$t_{solaire}$	Heure solaire		(h)	*
$(r,\theta,z)$	Coordonnées spatiales cylindriques		(m)	
$(x,y,z)$	Coordonnées spatiales cartésiennes		(m)	
$x$	Emplacement spatial		(-)	
<b>Alphabet Grecs</b>				
$\varphi$	Angle du zénith solaire		(°)	*
$\alpha$	Coefficient du rayonnement diffus		(-)	*
$\Phi$	La latitude de la localisation		(°)	$43^{\circ}35'59\text{ N}$
$\delta$	La déclinaison solaire		(°)	*
$\omega$	L'heure angulaire		(°)	*
$\Psi$	Angle rayon non-normal-plan vertical OXY		(°)	*
$\theta$	Angle entre la projection du rayon sur le plan OXY et l'axe OX		(°)	*
<b>Indices &amp; Exposants</b>				
$c$	Cinétique			
$PMMA$	Poly méthacrylate de méthyle acrylique			
$t$	Temps			

# Étude de l'écoulement et les trajectoires des cellules

Symbole	Définition	Unité	Valeur	Références
<b>Alphabet latin</b>				
$d_g$	Débit d'injection de l'air	(L.min <sup>-1</sup> )	<b>32,3</b>	
$k$	Énergie cinétique turbulente	(m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> )	*	
$K_L a_{CO_2}$	Coefficient de transfert volumique de CO <sub>2</sub>	(s <sup>-1</sup> )	<b>1,61·10<sup>-3</sup></b>	39
$K_L a_{O_2}$	Coefficient de transfert volumique d'O <sub>2</sub>	(s <sup>-1</sup> )	<b>0,0055</b>	39
<b>Rans</b>	Simulation en moyenne de Reynolds			
$Re$	Nombre de Reynolds	(-)	*	
$t$	Temps	(s)	*	
$t_f$	Temps d'intégration	(s)	*	
$T$	Température	(°C)	*	
$T_L$	Temps d'intégration du lagrangien du fluide	(s)	*	
$U_b$	Vitesse de l'écoulement	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$U_g$	Vitesse superficielle du gaz		*	
$\bar{u}$	Vitesse longitudinale moyenne	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$\acute{u}$	Fluctuation turbulente longitudinale	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$\acute{v}$	Fluctuation radiale de la turbulence	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$\acute{w}$	Fluctuation turbulente tangentielle	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$\acute{v}$	Fluctuation radiale de la turbulence	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
$\acute{w}$	Fluctuation turbulente tangentielle	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
<b>Alphabet Grecs</b>				
$\mu_r$	Vitesse de frottement	(m.s <sup>-1</sup> )	*	
<b>Indices &amp; Exposants</b>				
$L$	Lagrangien			
$Rms$	La variance			

# Étude de la dynamique thermique du PBR solaire

Symbole	Définition	Unité	Valeur	Références
<b>Alphabet latin</b>				
<i>alb</i>	L'albédo du sol	(-)	*	
<i>C<sub>p</sub></i>	Capacité calorifique massique	(J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	<b>Tableau 17</b>	
<i>D<sub>h</sub></i>	Diamètre hydraulique	(m)	<b>0,05</b>	
<i>DHI</i>	Diffuse Horizontal Irradiance	(μmol.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	*	
<i>DNI</i>	Direct Normal Irradiance	(μmol.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	*	
<i>e</i>	Épaisseur de la surface	(m)	<b>0,04</b>	
<i>Es</i>	Épaisseur du sol	(m)	*	
<i>f<sub>a</sub></i>	Fraction de lumière qui contribue à la photosynthèse	(-)	<b>0,3</b>	
<i>Fo</i>	Le nombre de Fourier	(-)	*	
<i>G<sub>i</sub></i>	La radiation solaire reçue par la surface i	(μmol.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	*	
<i>GHI</i>	Global Horizontal Irradiance	(μmol.m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	*	
<i>Gr</i>	Le nombre de Grashof	(-)	*	
<i>h</i>	Coefficient de convection thermique	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	*	
$\bar{h}$	Coefficient de convection thermique moyen	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	*	
<i>H<sub>p</sub></i>	Hauteur du PBR par rapport au sol	(m)	<b>0,05</b>	
<i>J</i>	Radiosité			
<i>ls</i>	Largeur du sol	(m)	*	
<i>L</i>	Longueur de la surface	(m)	*	
<i>LST</i>	Land Surface Températures	(-)		
$\overline{Nu}_L$	Le nombre de Nusselt moyen	(-)	*	
<i>N</i>	Fréquence de brassage et échange de l'air intérieur	(h <sup>-1</sup> )	<b>1</b>	349
<i>Neb</i>	La nébulosité du ciel	(octa)	*	
<i>PAC</i>	Pompe à Chaleur			
<i>Pr</i>	Le nombre de Prandtl	(-)	*	
<i>Q</i>	Flux de chaleur	(W.m <sup>-2</sup> )	*	
<i>r<sub>cv</sub></i>	Résistance thermique surfacique convective	(K.m <sup>2</sup> . W <sup>-1</sup> )	*	
<i>r<sub>th</sub></i>	Résistance thermique surfacique	(K.m <sup>2</sup> . W <sup>-1</sup> )	*	

$R_1 / R_2$	Rayon interne/externe du cylindre	(m)	*
$R_{cv}$	Résistance thermique convective	(K.W <sup>-1</sup> )	*
$R_{th}$	Résistance thermique	(K.W <sup>-1</sup> )	*
$Ra$	Le nombre de Rayleigh	(-)	*
$Re$	Le nombre de Reynolds	(-)	*
$S$	L'air de la surface	(m <sup>2</sup> )	*
$SCOP$	Coefficient de Performance Saisonnier	(-)	<b>3</b>
$SEER$	Ratio de l'efficacité énergétique saisonnier	(-)	<b>5,6</b>
$T$	Température	(K)	*
$U_m$	Vitesse moyenne du mouvement de l'air intérieur	(m.s <sup>-1</sup> )	*
$UTC$	Temps Universel Coordonné	(h)	*
$V_s$	Le volume de la serre	(m <sup>3</sup> )	*
$W$	Le travail fournit	(kWh)	*
$Z_0$	L'épaisseur de la première couche	(m)	<b>0,002</b>

### Alphabet Grecs

$\alpha$	Diffusivité thermique de la surface	(m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	<i>Tableau 17</i>
$g$	Accélération due à la pesanteur	(m.s <sup>-1</sup> )	<b>9,8</b>
$\rho$	Masse volumique	(kg.m <sup>-3</sup> )	<i>Tableau 17</i>
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )	<b>5,57.10<sup>-8</sup></b>
$\theta_w$	Direction du vent	(°)	*
$\tau$	Coefficient de transmission de la couverture	(-)	<i>Tableau 17</i>
$\epsilon$	Coefficient d'émissivité	(-)	<i>Tableau 17</i>
$\lambda$	Conductivité thermique	(W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	<i>Tableau 17</i>
$\mu$	Viscosité dynamique	(Pa. s)	<i>Tableau 17</i>

### Indices & Exposants

<b>Ai</b>	Intérieur de la serre
<b>Ae</b>	Extérieur de la serre
<b>amb</b>	Ambiante
<b>c</b>	Couverture
<b>ch</b>	Chauffage
<b>cond</b>	Conduction
<b>cv</b>	Convectif
<b>dp</b>	Point de rosée

<b>e</b>	Eau
<b>ext</b>	Extérieur
<b>IR</b>	Infrarouge
<b>p</b>	Paroi du réacteur
<b><math>P_v</math></b>	Parois verticales
<b>ref</b>	Référence
<b>rf</b>	Refroidissement
<b>s</b>	Sol
<b><math>s_0</math></b>	Première sous-couche du sol
<b>sky</b>	Ciel
<b>sun</b>	Soleil
<b>th</b>	Thermique
<b>w</b>	Vent
<b><math>\infty</math></b>	Fluide

---



# ANNEXES

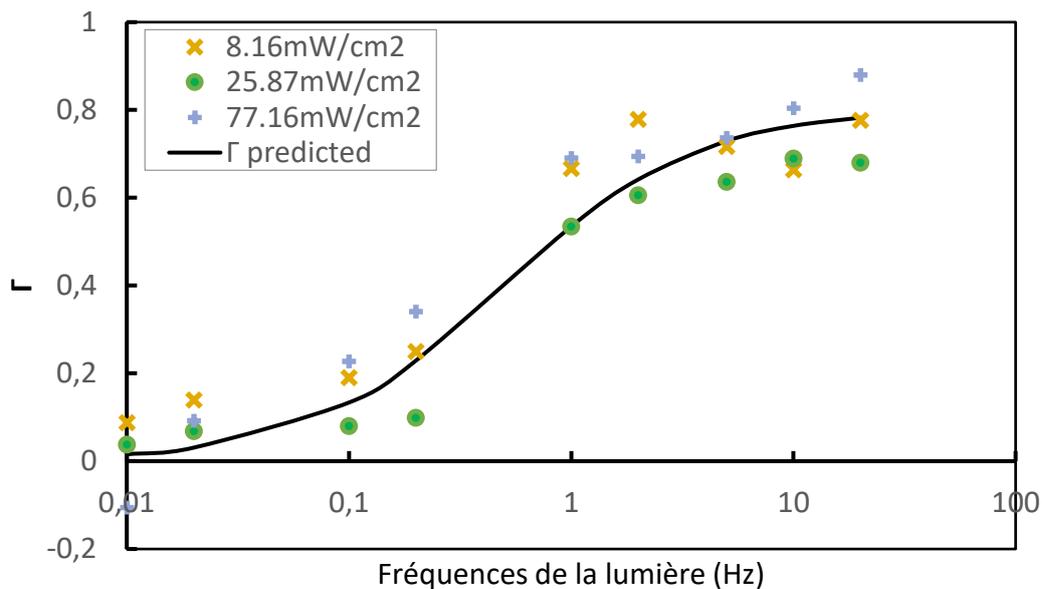
## Annexe 1

### Analyse de l'effet de la fréquence et de l'intensité de la lumière sur la valeur de $\Gamma$

Il est déjà connu que la valeur de  $\Gamma$  dépend de la fréquence de l'intermittence de la lumière, qui est régie par la turbulence de l'écoulement (induite par la vitesse du liquide dans notre cas). La relation entre la fréquence de la lumière et  $\Gamma$  a été décrite par *Terry*<sup>275</sup> avec un modèle empirique hyperbolique Eq (A.1) Ce modèle a été conçu sur la base de données expérimentales de la réponse de la microalgue *Phaeodactylum tricornutum* à un signal carré (on/off) de lumière clignotante, reproduisant des cycles lumière-obscurité où la fréquence et la portion de lumière sont modulées. Cependant, ceci n'est pas représentatif des cas habituels où les microalgues sont exposées à des signaux lumineux intermittents de fréquence et de magnitude très variables, du fait de leur déplacement dans le champ d'irradiation.

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{max} \nu}{K_{\nu} + \nu} \quad \text{Eq. (A.1)}$$

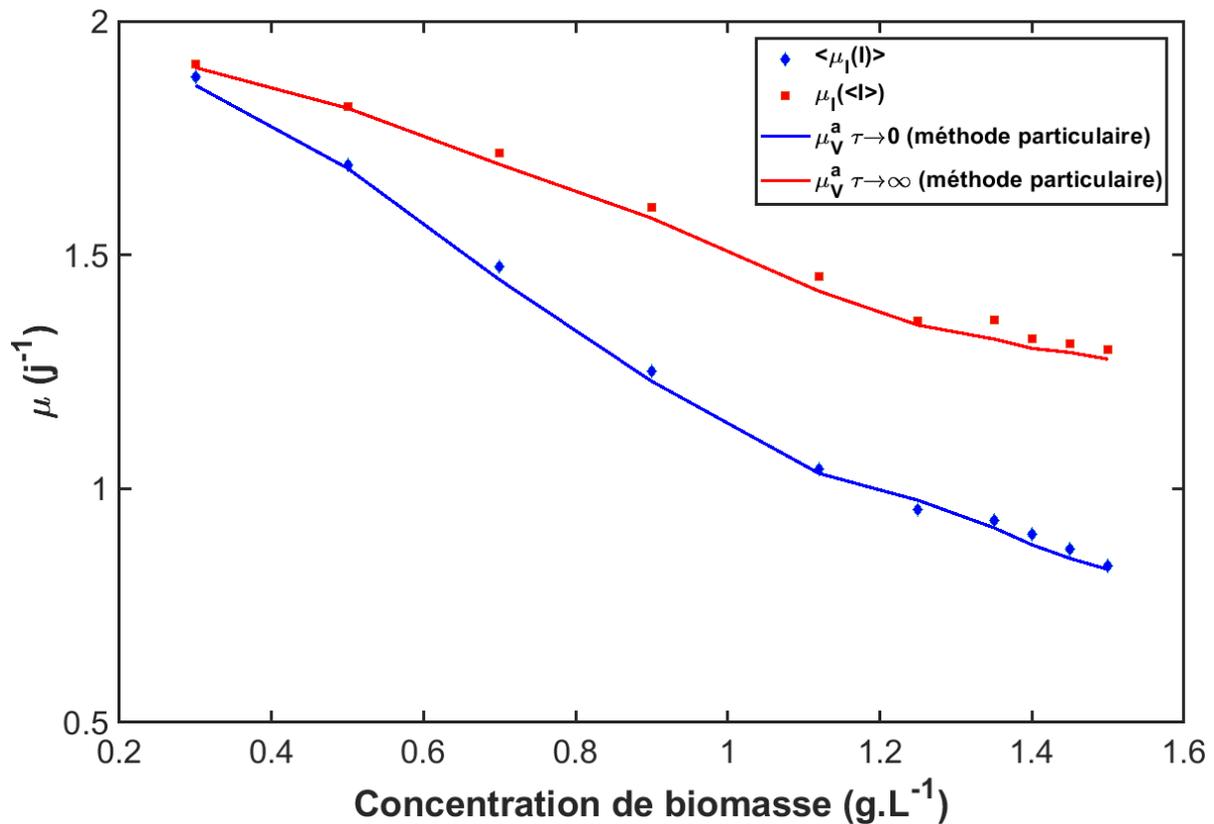
Dans une deuxième approche, qui s'étend à l'échelle de la réponse de la cellule aux fluctuations perçues, nous avons utilisé les résultats expérimentaux de croissance de spiruline fournis dans la Fig. 6 (b,c,d) de l'étude de *Xue et al.*,<sup>62</sup> pour étudier l'effet de la variation des intensités lumineuses vues par la cellule sur son taux d'utilisation  $\Gamma$ . En effet, les résultats présentés dans la figure montrent d'une part la dépendance de la valeur du gamma à la fréquence lumineuse reçue et d'autre part le modèle proposé par *Terry*<sup>275</sup>, qui est basé sur l'indépendance de  $I_0$  dans le calcul du gamma, s'est adapté avec succès aux données expérimentales recueillies.



**Figure A 1** : Influence de l'intensité et de la fréquence de la lumière sur le taux d'utilisation biologique de la lumière perçue. Marques :  $\Gamma$  calculé à partir des données expérimentales de (Xue et al.,<sup>62</sup> voir Fig. 6. b, c, d). Ligne pleine :  $\Gamma$  calculé à partir du modèle de Terry<sup>275</sup>.

## Annexe 2

Cinétiques asymptotiques de croissance relative à la lumière calculés avec deux méthodes numériques différentes



**Figure A 2 :** Comparaison des résultats des taux de croissance pour les deux réponses limites avec deux méthodes de calcul : à partir des données d'irradiance échantillonnées par les particules ; à partir de la moyenne d'irradiance.

## Annexe 3

### Méthode de calcul du coefficient volumique du transfert gaz-liquide $K_L a$ en fonction du débit d'aération

Comme déjà mentionné, nous considérons que le contacteur gaz-liquide est un réservoir à aération similaire à une colonne à bulle. Dans le but d'alimenter ultérieurement les données de l'étude d'analyse du cycle de vie du procédé, il va falloir estimer le débit d'aération nécessaire pour les conditions de transfert prédéfinies, et d'en déduire l'énergie consommée correspondante. Pour ce faire, nous aurons besoin des dimensions de la colonne utilisée ainsi que la vitesse superficielle du gaz  $U_g$ . Cette dernière n'étant pas facilement disponible, nous nous basons sur une corrélation empirique linéaire entre la valeur du coefficient de transfert volumique  $K_L a$  en ( $s^{-1}$ ) et le débit d'injection de l'air  $d_g$  en ( $L \cdot \text{min}^{-1}$ ). Cette corrélation a été établie pour la même colonne évaluée <sup>39</sup> à l'appui d'une compagne de mesure du  $K_L a$ , en suivant la concentration d' $O_2$  dans la phase liquide via la méthode de désoxygénation/réoxygénation, pour plusieurs débit d'air injecté.

$$K_L a_{O_2} = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot d_g \quad \text{Eq. (A.2)}$$

Donc, pour une valeur de  $K_L a$  de  $0,0055 \text{ s}^{-1}$ , la plage débit d'aération se situent aux environs de  $32,3 \text{ L/min}$ . Ainsi, nous pouvons considérer que notre système de dégazage est analogue à une colonne à bulle de diamètre de  $40 \text{ cm}$  et  $85 \text{ cm}$  de fonctionnant à un débit d'air de  $32,3 \text{ L/min}$  et elle est caractérisée par des bulles ellipsoïdales de  $6,7 \text{ mm}$  de diamètre équivalent.

## Annexe 4

### Modélisation des flux de chaleur dans le sol

#### a) Résolution numérique du modèle

Les formules de bilan d'énergie, de chaque élément, exprimées par les Eq(105) et Eq(106) constituent un système de plus de 11 équations différentielles non linéaires où les variables d'état sont les températures de chaque élément considéré. Un solveur standard Matlab© *ode45* a été utilisé dans notre programme de calcul pour résoudre les équations de bilans par la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre. La fonction du solveur est transcrite dans notre algorithme comme suit :

$$[t, y] = ode45('f', tspan, y0) \quad \text{Eq.(A.3)}$$

$t, y$  sont les vecteurs colonne du temps discrétisé et la matrice des solutions (i.e. la températures), ' $f$ ' est la fonction contenant les bilans d'énergie de chaque élément considéré et toutes les équations différentielles à résoudre,  $tspan$  est l'intervalle de temps de résolution et  $y0$  est la matrice des valeurs initiales. L'ensemble des équations ont été résolues à un pas de temps  $dt=1$  s ainsi que des valeurs appropriées pour les paramètres d'entrée. L'intervalle de convergence de ce solveur est de  $10^{-5}$ . Un descriptif détaillé de ce solveur peut être trouvé dans la documentation de Matlab©. À la fin de chaque heure, quand la solution a convergé, nous l'utilisons comme condition initiale de la résolution suivante.

Cette méthode de résolution en régime dynamique est appliquée à l'étude du comportement thermique du PBR extérieur et sous serre, abordée ultérieurement, en utilisant dans l'Eq. (A.3) des fonctions  $f$  contenant les équations bilans adéquates pour chaque cas de figure.

À priori, l'objectif de cette méthode est d'accéder aux données de température de la surface du sol qui contribueront au bilan énergétique du PBR pour les deux configurations envisagées et qui ne sont pas disponibles dans les entrées des conditions extérieures réelles utilisées dans cette étude.

Cette technique est réalisée pour les deux scénarii traités dans cette étude avec une adaptation de la formule de l'Eq(106) en fonction des flux externes correspondants.

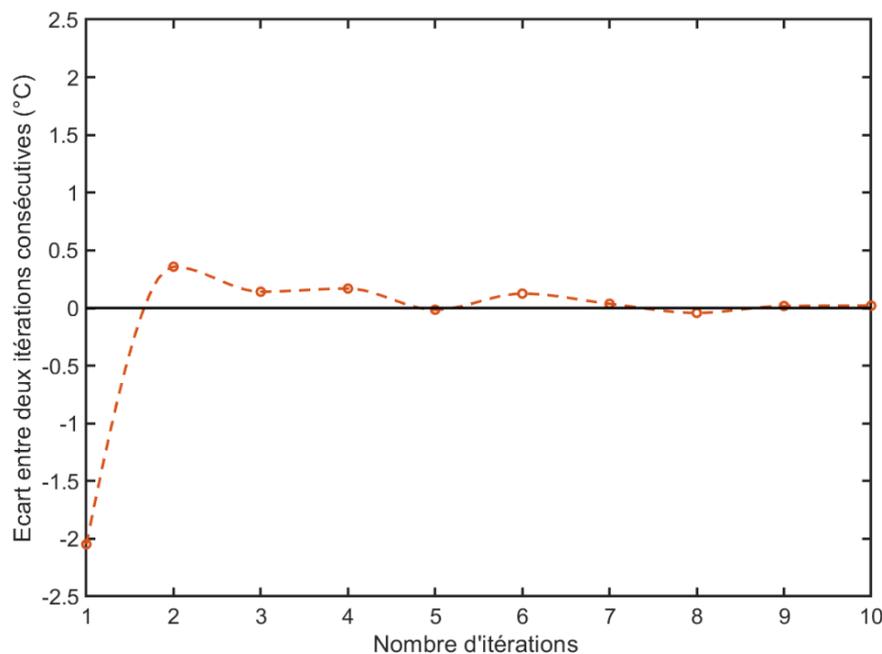
#### b) Initialisation des températures

La condition initiale d'une simulation dynamique est d'une importance capitale car son influence sur le résultat souhaité, ne s'atténue qu'à partir d'un certain nombre d'itérations. Dans le cas du sol, cet effet affecte le flux d'énergie échangé et donc le comportement

thermique dans les différentes sous-couches considérées. Habituellement, les températures initiales sont mesurées expérimentalement et les modèles sont initiés empiriquement ce qui n'est pas le cas pour notre étude. Cela nous contraint à le faire numériquement par un bouclage de plusieurs itérations sur une journée donnée « de référence », qui correspond généralement au jour du départ de la simulation, afin d'amortir cet effet sur la température des premières couches du sol et de stabiliser le cycle de cette journée.

Cette procédure a été réalisée, pour une journée type où le sol est exposé à l'atmosphère et en échange thermique avec (1) l'air ambiant par convection, (2) le ciel par rayonnement infrarouge et (3) les différentes sous-couches par conduction. Dans cette première approche, aucun système voisin n'est pris en compte. À titre d'exemple, nous avons considéré les données de l'année 2020. La température moyenne annuelle selon Météo France à Toulouse est de  $T_{ref}=15,4$  °C. Nous avons initié la simulation par des températures de sous-couches égales à la température de l'air ambiant.

Pour un jour donné de référence où les conditions initiales coïncident à 0h, un total de 10 itérations a été suffisant pour amortir l'écart de la température de la surface  $T_{s_0}$  à ce même moment. Les résultats présentés dans la **Figure A 3** montrent qu'il serait nécessaire de boucler la journée de référence au moins une dizaine de fois pour observer la stabilité du cycle périodique de la première couche avec  $0,02$ °C près. Autrement dit, après avoir intégré les équations avec les mêmes conditions externes pendant dix périodes de jours identiques, on obtient une solution périodique qui est indépendante de la condition initiale et qui représente donc la solution appropriée.

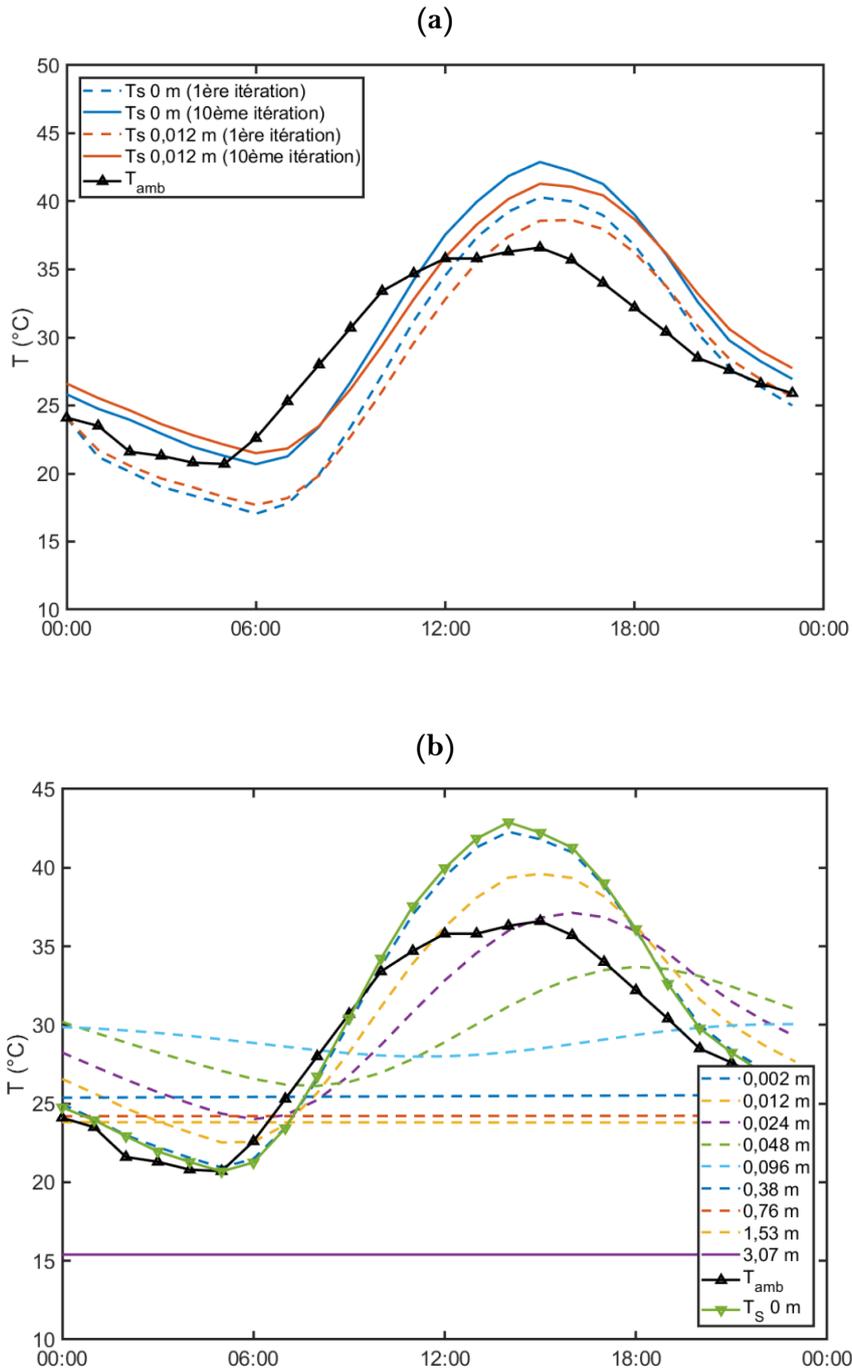


**Figure A 3 :** Évolution de la stabilité de la température de la surface du sol  $T_{s_0}$  en fonction du nombre d'itérations.

De cette façon, nous avons testé la tendance des équations différentielles considérées à « oublier » leurs conditions initiales arbitraires. Dans ce cas, les résultats de la simulation

pour les 10 premiers jours dépendront de la condition initiale utilisée et ne seront donc pas assez précis. Après cette période, la solution obtenue représentera avec précision le comportement du sol. Nous avons pu constater que le régime établi sera atteint pour la surface du sol et la sous-couche à 12 mm de la surface après la même période, leurs profils journaliers sont présentés sur la **Figure A 4 -(a)** qui souligne l'effet perceptible des conditions initiales sur les cycles de température sur une période de 24 heures. Cet effet consiste en l'écart enregistré entre la première et la 10<sup>ème</sup> itération pour chaque profil. Ces résultats sont en accord avec ce qui est discuté dans le paragraphe précédent, et valident l'importance des valeurs initiales dans l'investigation de la dynamique de réponse d'un système à des fluctuations extérieures. Nous ajoutons qu'à titre comparatif, la température moyenne de la surface, résultant de nos simulations, est égale d'environ 0,9 °C à celle fournie pour ce jour par ("NASA POWER | Data Access Viewer,") baptisée sur le site « **Earth skin temperature** » (à savoir 31,4 °C vs 30,5°C).

Le profil de la température dans les différentes sous-couches du sol est représenté dans la **Figure A 4-(b)**, nous observons que pour les sous-couches profondes, l'effet des conditions initiales n'est pas oublié au même rythme que pour les sous-couches proches de la surface. En outre, Quand la température de l'air fluctue, la température du sol à environ 40 cm de profondeur reste quasiment constante. En effet, sa variation est si lente que les fluctuations journalières sont négligeables, par contre ce sont les variations saisonnières qui ont plus d'influence sur la température en cette profondeur. Par conséquent, une période de simulation suffisamment longue est nécessaire pour atteindre le régime établi et la température exacte. En revanche, même sur une journée de simulation, on retrouve bien l'inertie du sol dans nos résultats, par exemple en ce jour d'été quand la température ambiante maximale est d'environ 35 °C, le sol à une profondeur de 38 cm ne dépasse pas les 27 °C. À contrario pendant l'hivers, le sol demeure plus chaud en profondeur, que l'air extérieur. Quel que soit le jour ou la saison, l'amplitude des fluctuations de la température extérieures décroît avec la profondeur jusqu'à une profondeur de 3 m environ, pour notre cas d'étude, où la température se stabilise autour de la moyenne annuelle des températures de l'air qui est entre 14°C et 16°C. Il est donc facile de comprendre le rôle de la climatisation naturelle de la terre par le phénomène d'amortissement et de déphasage de la température à travers les sous-couches du sol.



**Figure A 4 :** Profils temporels de la température du sol à Toulouse en été simulées avec le modèle multicouche **(a)** Mise en place de la température périodiques de la surface du sol par une procédure itérative. **(b)** Régime stabilisé du profil des températures à différentes profondeurs du sol. (Heure en UTC)

## Annexe 5

### Formules pour le calcul du $T_{sky}$

on trouve généralement deux expressions communément utilisées, la première est en fonction de la température ambiante  $T_{amb}$ (K) mesurée, donnée par <sup>368</sup> :

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_{amb}^{1,5} \quad \text{Eq. (A.4)}$$

La seconde relie la température ambiante  $T_{amb}$ (K) à d'autres paramètres notamment la température de point de rosée  $T_{dp}$  (°C), et l'heure à partir de minuit  $t_s$  (h) , dans l'équation suivante <sup>317</sup> :

$$T_{sky} = T_{amb} \cdot \left[ 0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,000073 \cdot T_{dp}^2 + 0,013_{bullet} \cos(15t_s) \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{Eq. (A.5)}$$

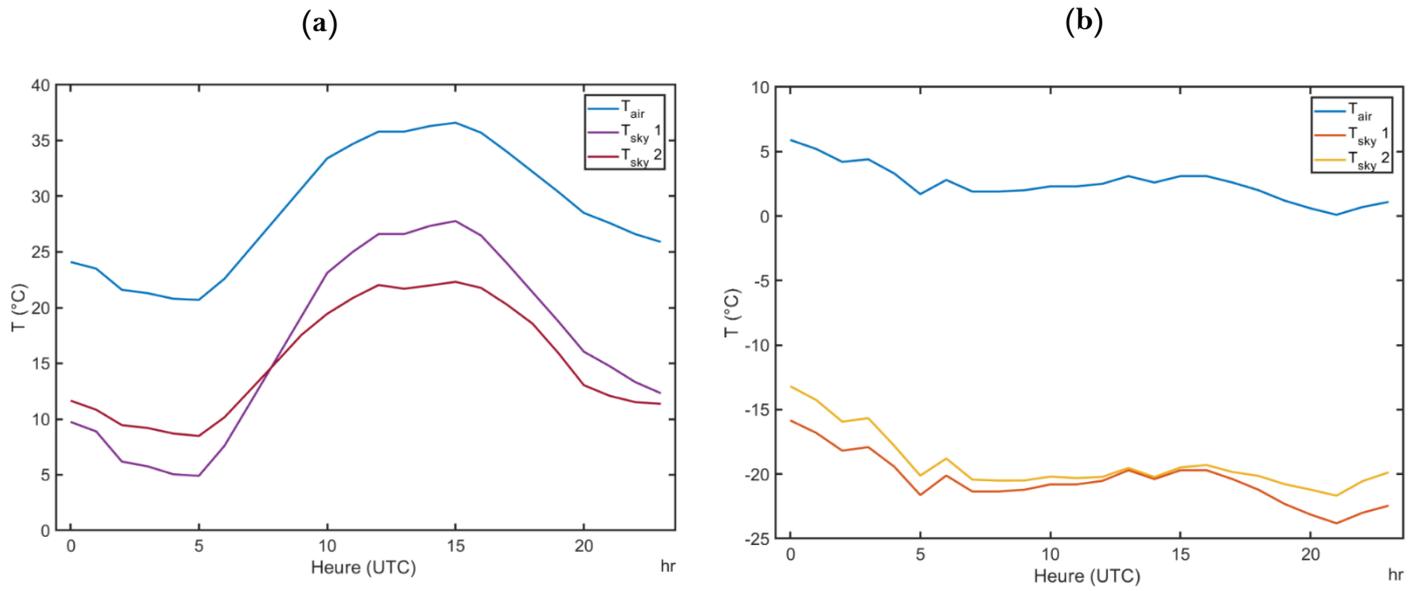
En se basant sur ces deux expressions, nous avons fait les calculs du  $T_{sky}$ , pour deux jours typiques de l'année à Toulouse, présentés dans la **Figure A 5**. Tout d'abord, nous percevons que l'effet de l'humidité se manifeste clairement dans la journée chaude où les valeurs du  $T_{sky}$  calculées par Eq(A.4) sont différentes de celle de l'Eq (A.5) de 2 à 5 °C. Cet écart s'atténue dans la journée froide où l'humidité est plus faible. D'autre part, nous constatons que l'écart entre la température du ciel et la température ambiante dans une journée d'été humide est d'une marge de 10 à 15 °C. Par contre, cette différence est plus importante le jour d'hiver où on enregistre plus de 20 °C d'écart en particulier la nuit. Ce phénomène joue un rôle conséquent dans le refroidissement des surfaces la nuit.

Dans les travaux de *Béchet et al.*, <sup>299,305</sup>, les échanges par radiation avec l'atmosphère sont considérés entre l'air ambiant et les surfaces rayonnantes, par conséquent, c'est la température ambiante qui est utilisée. *Endres et al.*, <sup>307</sup> utilisent également la température de l'air, cependant, ils considèrent l'effet de la présence de nuages et la pression de vapeur d'eau dans leur calcul de l'émissivité de l'air.

Dans des études un peu moins récentes sur les modèles énergétiques dans les serres <sup>340,346</sup>, nous avons constaté que les auteurs ont utilisé la nébulosité du ciel et la température ambiante pour le calcul de la température du ciel en se basant sur une combinaison de la formule de Swinbank pour un ciel clair <sup>369</sup> et celle pour un ciel couvert Eq (A.6):

$$T_{sky} = (-6 + T_{amb}) \cdot \frac{Neb}{8} + 0,0552 \cdot T_{amb}^{1,5} \cdot \left( 1 - \frac{Neb}{8} \right) \quad \text{Eq. (A.6)}$$

$Neb$  est la nébulosité du ciel en (octa).



**Figure A 5 :** Évolution de  $T_{sky}$  calculée par les expressions Eq(A.4) et Eq (A.5) pour deux jours représentatifs de l'année à Toulouse. **(a)** Un jour chaud et humide. **(b)** Un jour froid et sec.

## Annexe 6

### Implémentation du modèle dans le programme de calcul

Afin de simuler le comportement thermique dynamique du PBR dans les deux configurations étudiées, un algorithme a été construit dans lequel, la méthode de résolution présentée dans [Annexe 4](#) a été ré-exploitée pour analyser la réponse de ce système lorsque nous disposons des données sur les conditions ambiantes réelles à un endroit donné pendant une période donnée.

Ce programme est constitué d'un script principal qui fait appel à différentes sous-fonctions imbriquées. Il permet, à la fin du calcul, d'afficher l'évolution temporelle de la température du milieu de culture dans notre PBR tubulaire extérieur avec/sans serre sur la période de fonctionnement souhaitée. Ce script est écrit sous Matlab© il permet de résoudre numériquement et simultanément le système d'équations différentielles constituant les bilans en question (selon la configuration choisie), à l'aide d'un Solver proposé par ce logiciel utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Les paramètres d'entrée nécessaires pour cette simulation sont des paramètres statiques :

- Toutes les propriétés thermo-physiques et radiatives du milieu de culture, de la paroi de la serre et du PBR ainsi que celles du sol ;
- Les caractéristiques générales du PBR et de la serre souhaitées (dimensions préliminaires, hauteur du PBR par rapport au sol, etc.) ;
- Température initiale du milieu de culture et la gamme optimale opérationnelle pour notre souche d'intérêt.

Ainsi que des paramètres dynamiques :

- Données sur les conditions climatologiques extérieures à l'endroit souhaité (radiation solaire, température ambiante, vitesse et direction du vent) issues de la base de données météorologiques ("NSRDB Data Viewer,"2020 ).

La **Figure A 6** représente schématiquement l'algorithme implémenté. Les compartiments principaux composant le script sont les suivants :

- Entrées du modèle (Fichier contenant toutes les constantes du modèle *constantes.m*) ;
- Choix des paramètres de simulation (dimensions du système, la période de simulation, chargement des données météo) ;
- Évaluation des coefficients de convection thermiques apparaissant dans les équations de flux thermiques ;
- Résolution numérique en dynamique (itérations temporelles) en faisant appel à des fonctions imbriquées ;
- Affichage des résultats.

Comme la solution des équations différentielles dépendra de ces paramètres d'entrée, en particulier les données météorologiques, l'aspect dynamique du modèle a été traité à travers une structure de contrôle avec compteur "boucle *for*". Dans ce dernier, le nombre d'itérations correspond au nombre d'heures de la période de simulation. En d'autres termes, le temps a été discrétisé par heure suivant le pas de variation des données météorologiques dont nous disposons. Cette procédure de résolution discontinue d'un système dynamique consiste en une segmentation de l'échelle temporelle de résolution en intervalles de temps où le régime permanent est considéré comme établi. Ainsi, nous considérons des conditions extérieures constantes pendant une heure pour la résolution des équations différentielles. Cependant, pour chaque itération/heure, les résolutions pour les températures des éléments considérés (milieu de culture, serre, air intérieur et sol) sont générées toutes les secondes.

Les fonctions appelées par ce programme, pour les configurations sans et avec serre respectivement, sont les suivantes :

- Fonction pour le chargement des données météorologiques "*source*"

Cette fonction permet de récupérer les données météorologiques telles que le *GHI*, le coefficient de la radiation solaire diffuse, la température ambiante, la vitesse du vent et sa direction, fournies à une fréquence d'une heure (selon le Temps Universel Coordonné *UTC*) dans un fichier Excel *.xlsx* que nous avons traité préalablement.

- Fonction de coefficients de convection "*calcul\_coefs\_SS*" ou "*calcul\_coefs\_AS*"

Tous les coefficients de convections nécessaires au calcul des flux de chaleur convectifs sont évalués à l'aide de ces deux fonctions qui utilisent en argument la vitesse du vent, sa direction ainsi que la température des différents composants du système à étudier. Ces coefficients sont ensuite calculés pour toutes les conditions météorologiques disponibles et servent de paramètres pour les fonctions subséquentes.

- Fonctions des bilans d'énergie "*bilanSansSerre*" ou "*bilanAvecSerre*"

Chacune des deux fonctions contient l'ensemble des équations différentielles à résoudre pour chaque cas étudié. Dans le programme principal, ces équations sont intégrées par le solveur *ode45* de  $t_0 = 0$  à  $t_f = 3600s$  avec le vecteur des conditions initiales  $X_0$  où chaque colonne représente une température initiale d'un constituant donné. Le résultat est une matrice  $y$  de 3600 lignes et  $n$  colonnes variant selon le nombre de variables (températures). Cette matrice décrit l'évolution des températures des éléments du système considéré. Chaque ligne de la matrice des solutions  $y$  correspond à une valeur renvoyée dans le vecteur colonne  $t$ . La dernière ligne de cette matrice est utilisée comme condition initiale pour la résolution dans l'itération suivante. Ainsi, nous définissons une matrice de résultats *Sserre* ou *Aserre* qui sera incrémentée toutes les heures, et qui est utilisée pour stocker uniquement les valeurs de l'ensemble des températures des constituants après une heure de résolution, afin de réduire la taille de la matrice de résultats et les ressources en calcul.

Ces fonctions, elles-mêmes, font appel à des fonctions intermédiaires :

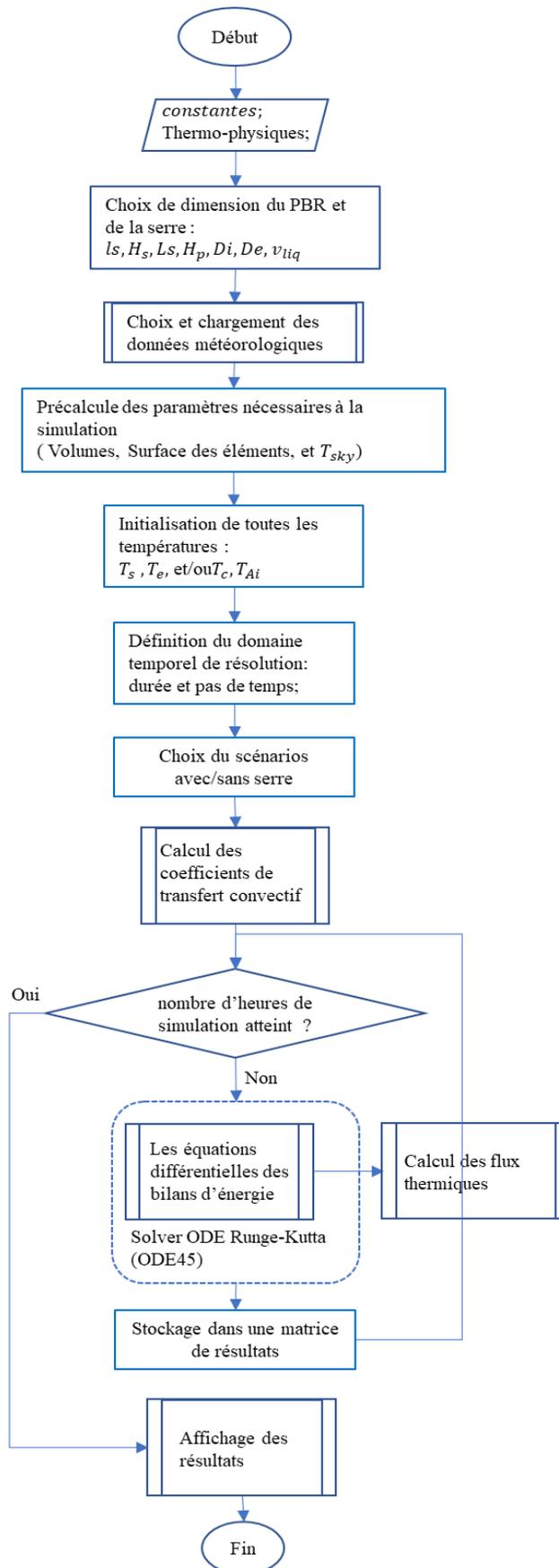
- Fonctions des flux thermiques "*flux\_SS*" ou "*flux\_AS*"

Ces fonctions permettent de calculer les différents flux thermiques. En effet, les expressions des flux intervenant dans chaque scénario (toutes les équations citées dans les sections 2.4 et 2.5) ont été évaluées pour chaque pas de temps de résolution. Les arguments de ces fonctions sont les températures de chaque élément, les coefficients de convection préalablement calculés et les données climatiques extérieures. En utilisant ces fonctions, nous sommes en mesure de suivre l'évolution de ces puissances ou flux thermiques échangés entre les différents composants de notre système, compte tenu de leur importance dans la progression des températures.

- Fonction d'affichage "*affichage*"

Cette fonction permet de visualiser graphiquement les résultats d'évolution temporelle des températures et des différents coefficients d'échange estimés, avec la variation dynamique des conditions météorologiques extérieures pour les deux cas examinés, mais aussi la contribution des différents flux thermiques impliqués pour chaque configuration. Ce qui permet ainsi l'analyse du comportement thermique de notre système.

Nous rappelons qu'avant de lancer la simulation dynamique, il fallait d'abord déterminer les valeurs initiales de la température du sol, de la couverture et de l'air intérieur de la serre. Suivant la même approche d'initialisation itérative que celle expliquée précédemment, cet algorithme a été utilisé pour simuler le cas d'une serre vide (sans PBR). Dès que le régime établi fut atteint, les résultats ont été enregistrés pour être utilisés comme valeurs initiales pour notre simulation principale. Pour le milieu de culture dans le PBR, sa température initiale est la même quel que soit le cas simulé, une valeur de 25 °C a été sélectionnée, depuis la gamme optimale, pour débiter toute simulation.



**Figure A 6 :** Algorigamme du programme informatique pour la simulation du comportement thermique en dynamique.

