



HAL
open science

Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié

Julien Louveau

► **To cite this version:**

Julien Louveau. Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié. Autre. Nantes Université, 2023. Français. NNT : 2023NANU4022 . tel-04318044

HAL Id: tel-04318044

<https://theses.hal.science/tel-04318044>

Submitted on 1 Dec 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 DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences de l'ingénierie et des systèmes
Spécialité : Génie des procédés

Par

Julien LOUVEAU

Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié

Modélisation, validation et dimensionnement d'Algofilm

Thèse présentée et soutenue à Saint-Nazaire, le 15 mars 2023
Unité de recherche : Laboratoire GEPEA, UMR-CNRS 6144

Composition du Jury :

Rapporteurs :	Laurent PILON Olivier SCHOEFS (Président du jury)	Professeur, University of California, Los Angeles, États-Unis Professeur, Université de Technologie de Compiègne, France
Examineurs :	Jean-François CORNET Vincent GOETZ Sandy MOISAN	Professeur, Institut Pascal de Clermont-Ferand, France Directeur de recherche, PROMES, Perpignan, France Ingénieur docteur, ASCA - groupe ARMOR, Nantes, France
Invité :	Olivier LEPINE	Directeur technique et scientifique, Algosource Technologies, Saint-Nazaire, France
Directeur de thèse :	Jeremy PRUVOST	Professeur, Nantes Université, France
Co-encadrante de thèse :	Mariana TITICA	Maître de conférences, Nantes Université, France

REMERCIEMENTS

Avant de présenter mes travaux de doctorat, je voudrais profiter de ces quelques lignes écrites peu après ma soutenance pour remercier celles et ceux qui m'ont aidé pendant ces quatre années de thèse, et sans qui ce manuscrit n'existerait pas.

Je commence par remercier Jeremy, mon directeur de thèse. Merci pour ton soutien scientifique qui m'a permis de pleinement prendre en main ce sujet complexe. Je te remercie également de m'avoir fait confiance et de m'avoir laissé explorer tous ces problèmes, très différents les uns des autres, qui n'avaient pas du tout été anticipés. C'est cette diversité de sujets abordés que j'ai le plus apprécié dans ma thèse. Merci enfin pour tes corrections et ton aide à la préparation de la soutenance, je suis très content et fier du résultat final! J'ai beaucoup aimé travailler avec toi, et j'espère que nos chemins se croiseront de nouveau!

Je tiens également à remercier l'autre encadrante de ma thèse, Mariana. C'est par le stage de fin d'étude que tu m'as proposé que toute cette aventure a commencé! Sans ça, je serais sans doute parti dans une toute autre direction. Dès ce stage tu as toujours été là pour me soutenir dans tous les aspects de mes travaux que ce soit scientifiquement ou en m'aidant à préparer les publis et les présentations aux congrès. Merci pour ta bienveillance, c'est toujours un plaisir de discuter et travailler avec toi!

Je poursuis en remerciant Jean-François Cornet et Vincent Goetz pour leurs conseils, leurs encouragements et les discussions que nous avons eues lors des CSI. Cela m'a permis de prendre le recul nécessaire pour mieux maturer mes réflexions, et d'aboutir aux résultats présentés ici. Je remercie également les autres membres du jury : Laurent Pilon, Olivier Schoefs, Sandy Moisan et Olivier Lepine pour avoir accepté de lire ma thèse et de participer à ma soutenance. La diversité de vos profils est le reflet de la pluridisciplinarité de cette thèse, l'aspect que j'aime le plus dans mes travaux. Je ne pouvais espérer meilleur jury! Enfin, je remercie chacun d'entre vous pour les discussions très intéressantes que nous avons eues lors de la soutenance.

Cette thèse ne serait pas la même sans sa partie expérimentale qui n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide de l'équipe d'Algosolis. Merci à Manu sans qui aucune manip

n'aurait pu être faite, c'est grâce à toi qu'Algofilm est aujourd'hui fonctionnel. Je ne compte pas le nombre d'heures que nous avons passé à bricoler ce PBR pour le rendre opérationnel et l'instrumenter. J'ai toujours apprécié ces moments avec toi, merci pour ta bonne humeur constante. J'espère que tu pourras poursuivre le projet Pynalgodata et le déployer! Puisque je parle de la partie expérimentale, je remercie Jean-Luc pour toutes les pièces sur-mesure qu'il a faites pour moi, elles m'ont vraiment simplifié la tâche! Je remercie également les autres membres d'Algosolis : Benjamin, Jordan et Laura pour m'avoir formé à toutes les manip que j'ai faites et pour leurs précieux conseils sur la culture de microalgues. C'était un vrai plaisir de discuter, travailler et d'aller courir avec vous! J'en profite pour remercier les autres membres de la running team Arnaud, Delphine, Margaux et Sébastien!

Pendant ma thèse, j'ai également passé beaucoup de temps au CRTT et je remercie toutes les personnes qui m'ont accueilli, aidé, conseillé et avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger au cours de ces quatre années.

Ces années de thèse sont surtout des années passées avec les doctorants du laboratoire que je veux remercier ici. Je commence par Églantine, c'est pendant le stage que j'ai fait avec toi que j'ai eu envie, moi aussi, de faire une thèse. Merci de m'avoir permis de mettre un premier pied dans le monde académique. Je pense aussi aux autres anciens doctorants du labo, ce sont tous les moments que nous avons passés ensemble qui m'ont motivé à me lancer. Merci à tous de m'avoir accueilli et intégré au laboratoire!

Joris, on a commencé le même jour et on va finir presque en même temps. Ma thèse aurait été complètement différente sans toi, merci pour tous les moments qu'on a passé ensemble. Bon courage pour la fin de ta rédaction et ta soutenance, on se revoit bientôt!

Flora, tu es la prochaine à soutenir, bon courage pour la dernière ligne droite! Gardes ton sourire et ta bonne humeur, c'est toujours un plaisir de passer du temps avec toi. On aura l'occasion de se revoir à Aix!

Plus généralement, je remercie tous les doctorants du labo, j'ai beaucoup aimé le temps que j'ai passé avec vous, au labo et en dehors. Je pense aussi aux doctorants des autres sites du GEPEA que j'ai eu l'occasion de rencontrer grâce au Doc'GEPEA. J'ai beaucoup aimé les visites et les sorties que nous avons faites ensemble et j'espère que cette initiative va perdurer! Je sort du cadre du GEPEA pour également remercier tous les doctorants et anciens doctorants de l'IREENA avec qui j'ai passé beaucoup de temps en dehors de la thèse.

Merci à tous de m'avoir accompagné pendant mon doctorat, je vous souhaite bon

courage pour la fin de vos thèses respectives et plein de bonnes choses pour la suite !

Je termine en remerciant ma famille à qui je dédie ce travail. Merci Maman, Papa, Oriane et Mamie José, c'est parce-que je vous savais derrière moi que j'ai pu sereinement m'engager dans cette aventure. Merci infiniment pour votre soutien indéfectible. J'ai aussi une pensée particulière pour Mamie Pierrette et Grand-Père qui m'ont toujours poussé vers les études. Je suis certain qu'ils auraient aimé savoir que je suis allé jusqu'au doctorat.

Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié

LISTE DES COMMUNICATIONS

Posters

Louveau, J., Pruvost, J., Titica, M., et Moheimani, N.R. 2019. « Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié ». Journées Nationales de l'Énergie Solaire (JNES) (juin 2019).

1^{er} prix du concours « Ma thèse en trois minutes » organisé lors de la CLEANTECH WEEK 2019 en parallèle des JNES.

Communications orales

Louveau, J., Pruvost, J., Titica, M., et Moheimani, N.R. 2019. « A simulation study to evaluate the potential of semi-transparent solar panels coupled with an intensified photobioreactor ». European Congress for Applied Biotechnology (ECAB). (août).

Louveau, J., Pruvost, J., Titica, M., et Moheimani, N.R. 2019. « Optimisation thermique et utilisation combinée du spectre solaire pour le développement rationnel d'un photobioréacteur intensifié à très faible consommation énergétique ». Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP). (août).

Publications

Louveau, J., Pruvost, J., Titica, M., et Moheimani, N.R. « Coupling semi-transparent PV panels with thin-film PBRs for sustainable microalgal biomass production ». (article soumis).

Nwoba, Emeka G., David A. Parlevliet, Damian W. Laird, Kamal Alameh, Julien Louveau, Jeremy Pruvost, et Navid R. Moheimani. 2020. « Energy Efficiency Analysis of Outdoor Standalone Photovoltaic-Powered Photobioreactors Coproducing Lipid-Rich Algal Biomass and Electricity ». Applied Energy 275 (octobre) : 115403. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115403>.

CHAPITRE 0. LISTE DES COMMUNICATIONS

Todisco, E., J. Louveau, C. Thobie, E. Dechandol, L. Hervé, S. Durécu, M. Titica, et J. Pruvost. 2022. « A Dynamic Model for Temperature Prediction in a Façade-Integrated Photobioreactor ». *Chemical Engineering Research and Design* 181 (mai) : 37183. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.017>.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
1 État de l'art de la culture de microalgues	5
Introduction	5
1.1 Intérêt industriel de la culture de microalgues	6
1.1.1 L'alimentation humaine	6
1.1.2 L'alimentation animale	7
1.1.3 La cosmétique et la pharmaceutique	7
1.1.4 Le traitement des eaux usées	8
1.1.5 La production de biocarburants	8
1.2 Principes généraux de la culture de microalgues en photobioréacteur	9
1.2.1 Absorption et pénétration de la lumière dans le volume de culture .	9
1.2.2 Mélange du volume de culture	12
1.2.3 Conditions de culture	13
1.2.4 Productivité des photobioréacteurs	15
1.3 Les systèmes de culture de microalgues	16
1.3.1 Les systèmes de culture ouverts	17
1.3.2 Les systèmes de culture fermés	19
1.3.3 Les systèmes de culture en couche mince	23
Conclusion	32
Bibliographie	34
2 Développement théorique pour la modélisation d'Algofilm	39
Introduction	39
2.1 Prévisions météorologiques	40
2.2 Calcul de la position du soleil dans le ciel	41
2.3 Approche simplifiée de la modélisation de la transmittance d'un vitrage . .	42
2.3.1 Absorbance d'un matériau transparent	42
2.3.2 Transmittance d'un dioptre	45

TABLE DES MATIÈRES

2.3.3	Impact des gouttelettes de condensation sur la transmittance d'un vitrage	50
2.3.4	Calcul de la transmittance d'un vitrage alvéolaire	58
2.3.5	Calcul de la transmittance de différents types de vitrages	59
2.4	Modèle de croissance	61
2.4.1	Distribution de la lumière dans le volume du réacteur : modèle de transfert radiatif à deux flux	61
2.4.2	Lois cinétiques de croissance microalgale	64
2.4.3	Paramètres cinétiques de <i>Chlorella vulgaris</i>	66
2.4.4	Modélisation de la concentration en oxygène dissous	68
2.5	Modèle thermique d'Algofilm	70
2.5.1	Modèle du prototype Algofilm 0.33 m ²	71
2.5.2	Modèle du pilote Algofilm 10 m ²	74
2.6	Modèle de production photovoltaïque	92
2.6.1	Équations	93
2.6.2	Spectre solaire	93
2.6.3	Dépendance à la température	94
2.6.4	Caractéristiques du panneau photovoltaïque	95
	Conclusion	96
	Bibliographie	98

3 Études expérimentales de la culture solaire dans le photobioréacteur

	Algofilm	105
	Introduction	105
3.1	Étude qualitative en maquette froide de l'écoulement sur le plan incliné	106
3.1.1	Répartition du milieu de culture sur le plan aller	106
3.1.2	Répartition du milieu de culture sur le plan retour	107
3.1.3	Pente, vitesse d'écoulement et épaisseur de culture	110
3.1.4	Conclusion	111
3.2	Étude expérimentale de la productivité d'Algofilm en condition solaire	112
3.2.1	Matériels et méthodes	112
3.2.2	Résultats	123
3.2.3	Conclusion sur les essais de culture solaire	131
3.3	Étude du comportement thermique du pilote Algofilm 10 m ²	132

3.3.1	Matériels et méthodes	132
3.3.2	Résultats	135
3.3.3	Protection temporaire de la culture	144
3.3.4	Conclusion sur les essais thermiques	145
	Conclusion	146
	Bibliographie	147
4	Conception raisonnée d'un photobioréacteur performant à faible consommation énergétique	151
	Introduction	151
4.1	Coproduction de microalgues et d'électricité par un système hybride couplant photobioréacteur et panneau photovoltaïque semi-transparent	152
4.1.1	Modélisation	153
4.1.2	Données de simulation	155
4.1.3	Résultats	157
4.1.4	Conclusion sur le couplage d'un panneau photovoltaïque semi-transparent et du prototype Algofilm 0.33 m ²	169
4.2	Inclusion de matériaux à changement de phase dans le support d'Algofilm .	170
4.2.1	Données d'entrée des simulations	172
4.2.2	Étude de l'impact de l'épaisseur de béton incluant des MCP sur la température du milieu de culture	173
4.2.3	Étude de l'impact de la fraction volumique de matériaux à changement de phase sur la température du milieu de culture	174
4.2.4	Étude de la répartition de MCP sous la surface du plan d'écoulement	176
4.2.5	Conclusion sur l'inclusion de matériaux à changement de phase dans le support du photobioréacteur	182
4.3	Utilisation combinée de panneaux photovoltaïques semi-transparentes et de matériaux à changement de phase pour la conception d'un photobioréacteur thermiquement passif	183
4.3.1	Méthode	183
4.3.2	Résultats	184
4.3.3	Conclusion sur la conception d'un système hybride à très basse consommation énergétique	188
4.4	Conception d'un réacteur intensifié à faible concentration en oxygène . . .	189

TABLE DES MATIÈRES

4.4.1	Paramètres de l'étude	190
4.4.2	Dimensionnement du réacteur Algofilm idéal	193
4.4.3	Simulation de la concentration en oxygène	198
4.4.4	Conclusion sur la conception d'un système à faible concentration en oxygène dissous	204
	Conclusion	205
	Bibliographie	207
	Conclusion générale et perspectives	211
	A Démonstration d'optique géométrique	217

TABLE DES FIGURES

1.1	Schéma de l'atténuation de la lumière dans le volume de culture en fonction de la valeur de γ	11
1.2	Photographie d'un raceway ouvert installé sous la serre de la plateforme Algosolis.	19
1.3	Photographie du pilote SymbiO ₂ Box implanté sur la plateforme Algosolis. Deux réacteurs airlift plans sont installés plein sud sur la façade. La partie se trouvant derrière permet de simuler la présence d'un bâtiment et d'étudier le couplage PBR - bâtiment.	22
1.4	Photographie d'un photobioréacteur tubulaire installé sur la plateforme Algosolis. Les microalgues sont ici mise en circulation grâce à un système airlift.	23
1.5	Schéma de principe du photobioréacteur cascade Tchèque (Doucha et Lívanský 1995).	24
1.6	Schéma de principe du photobioréacteur cascade Tchèque (Doucha et Lívanský 2006).	25
1.7	Photographie du prototype Algofilm 0.33 m ² (Le Borgne 2011).	27
1.8	Photographie du pilote Algofilm 10 m ²	29
1.9	Photographie des utilitaires du pilote Algofilm 10 m ²	30
2.1	Exemple de carte téléchargée depuis les services INSPIRE de Météofrance. Il s'agit de la température de l'air à 2m du sol prévue pour le 2022-05-01 15:00 par la simulation en date du 2022-05-01 12:00 (horizon h+3). La zone représente une surface d'environ 100 km ² centrée sur la plateforme Algosolis (47.252 N -2.250 W).	41
2.2	Coefficient d'absorption du PMMA en fonction de la longueur d'onde (Boulet et al. 2014).	44
2.3	Coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde (Hale et Querry 1973).	45

TABLE DES FIGURES

2.4	Réflexion et réfraction d'un rayon à l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction différents.	46
2.5	Exemple de réflexions multiples internes au sein d'un simple vitrage.	48
2.6	Illustration des rayons pris en compte ou ignorés par la méthode de calcul de la transmittance des gouttes (Hypothèse 3).	52
2.7	Schéma de la goutte simulée.	53
2.8	(A) maillage de l'interface verre / eau. (B) points obtenus après projection du maillage par des rayons ayant un angle d'incidence de 45° sur une goutte avec un angle de contact de 60°	54
2.9	Comparaison des prédictions de la méthode proposée et des résultats présentés par Zhu et al. (2017) pour différents angles d'incidence et angles de contact.	57
2.10	Schémas d'une plaque de PMMA alvéolaire.	58
2.11	Transmittance des différents types de vitrages en fonction de l'angle d'incidence.	60
2.12	Exemple d'atténuation de la lumière dans un photobioréacteur (vue de côté d'un photobioréacteur airlift).	62
2.13	Propriétés radiatives de <i>Chlorella vulgaris</i> en fonction de la longueur d'onde pour une pigmentation totale équivalente à 4% de la biomasse sèche.	67
2.14	Schéma des différents flux de chaleur pris en compte par le modèle de Goetz et al. (2011).	72
2.15	Schéma des différents flux de chaleur pris en compte par le modèle de température de l'Algofilm 10 m ²	76
2.16	Schéma du système simulé.	81
2.17	Profils de lumière et de température utilisés pour l'analyse de sensibilité.	86
2.18	Spectre lumineux solaire de référence de référence ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012).	94
2.19	Courbe EQE d'un panneau photovoltaïque monocristallin.	95
3.1	Photographie des vagues créées par les pulsations de la pompe, observables en tête du plan aller.	107
3.2	Schéma de l'écoulement obtenu sur le plan retour.	108
3.3	Schéma de l'écoulement dans la sousverse du plan aller.	108
3.4	Schémas de l'écoulement du milieu de culture au niveau de la sousverse du plan retour avant et après optimisation.	109

3.5	Photographie du plan d'écoulement d'Algofilm 10 m ² après installation des optimisations.	110
3.6	Concentration minimale nécessaire pour inoculer le pilote Algofilm 10 m ² en fonction du flux incident et de la pigmentation des microalgues.	120
3.7	Fraction du réacteur à ombrer en fonction du flux incident et de la concentration en biomasse.	121
3.8	Exemple de productivité volumique prédite par les modèles en fonction du volume de culture renouvelé.	122
3.9	Concentration en biomasse sèche et productivité volumique journalière obtenues lors de la campagne de 2020.	124
3.10	Contenu et profil pigmentaire des microalgues lors de la campagne expérimentale de 2020.	125
3.11	Concentration en biomasse sèche et productivité volumique journalière obtenues lors de la campagne de 2021.	127
3.12	Contenu et profil pigmentaire des microalgues lors de la campagne expérimentale de 2021.	128
3.13	Concentration en oxygène dissous lors de la journée du 2020-08-28.	129
3.14	Schéma de la répartition des points de mesure de la température dans le photobioréacteur.	133
3.15	Mesures expérimentales de température aux points (3), (4) et (9) lors la journée du 2020-09-27.	136
3.16	Comparaison des températures mesurées dans la phase gaz et le milieu de culture lors de la journée du 2020-09-27.	137
3.17	Comparaison de la température du milieu de culture mesurée et calculée entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.	138
3.18	Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.	139
3.19	Comparaison des température de la phase gaz et du milieu de culture (mesurées et calculées) entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.	140
3.20	Comparaison des températures de la vitre mesurées et calculées entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.	141
3.21	Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.	142
3.22	Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.	143
4.1	Schéma des deux configurations étudiées "couplé" et "découplé".	154
4.2	Schéma logique du couplage des modèles.	155

TABLE DES FIGURES

4.3 Exemple d'évolution de la température du PBR prédite par le modèle thermique pour une semaine estivale (1ère semaine de septembre). La régulation thermique est désactivée et le panneau photovoltaïque absent. 158

4.4 Exemple d'évolution de la température du PBR prédite par le modèle thermique dans les mêmes conditions que la Figure 4.3. Trois conditions sont testées : sans filtre (scénario #0) et avec le PV du scénario #1 couplé ou découplé. 159

4.5 Evolution de la température du milieu de culture pendant la première semaine de septembre. La régulation thermique maintien cette variable entre 15 °C et 35 °C. 162

4.6 Énergie annuellement retirée au PBR par le groupe froid pour maintenir la température de la culture en dessous de 35 °C. 163

4.7 Énergie apportée par le chauffage pour maintenir la température du milieu de culture au dessus de 15 °C. 164

4.8 Énergie annuellement apportée par le chauffage pour maintenir la température du milieu de culture au dessus de 10 °C. 166

4.9 Production annuelle de biomasse et d'électricité en fonction du scénario. . . 167

4.10 Analyse de la production et consommation en fonction de la période de l'année. Pour améliorer la lisibilité du graphique, l'axe des abscisses commence à la semaine 12 (i.e. à la fin de l'hiver, la période la moins productive). . . 168

4.11 Température du milieu de culture lors des deux derniers jours de la simulation en fonction de l'épaisseur de béton incluant des matériaux à changement de phase. 173

4.12 Température du milieu de culture lors des deux derniers jours de la simulation en fonction de la fraction volumique de matériaux à changement de phase inclus dans le béton. 175

4.13 Représentation en vue de dessus de la répartition des matériaux à changement de phase sous la surface du plan d'écoulement. 177

4.14 Profil de température du milieu de culture en fonction de la fraction de surface équipée de matériaux à changement de phase. 177

4.15 Vue du dessus de la température du plan d'écoulement le dernier jour de la simulation à 14h. Le réacteur simulé n'est pas équipé de matériaux à changement de phase. 178

4.16	Vue du dessus de la température de l'interface liquide - béton lors du dernier jour de simulation à 14h. Le rectangle en pointillés rouges note la surface équipée de matériaux à changement de phase (14.3% de la surface).	179
4.17	Vue du dessus de la température de l'interface liquide - béton lors du dernier jour de simulation à 14h. Le rectangle en pointillés rouges note la surface équipée de matériaux à changement de phase (14.3% de la surface).	181
4.18	Consommation énergétique annuelle du chauffage des photobioréacteurs Algofilm (prototype 0.33 m ² et pilote 10 m ²) en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support.	184
4.19	Consommation énergétique annuelle du groupe froid des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support.	185
4.20	Consommation énergétique annuelle totale des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support. Le milieu de culture est ici régulé entre 15 °C et 35 °C. La production électrique produite en fonction du PV utilisé est également donnée (en pointillés).	186
4.21	Consommation énergétique annuelle totale des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support. Le milieu de culture est ici régulé entre 10 °C et 35 °C. La production électrique produite en fonction du PV utilisé est également donnée (en pointillés).	188
4.22	Distribution de la lumière mesurée sur la plateforme Algosolis entre janvier 2016 et juin 2021. Les conditions de lumière nocturnes ont été exclues des données analysées.	190
4.23	Évolution de la concentration en oxygène dans le milieu de culture en fonction du temps passé sur le plan.	196
4.24	Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm pour différents $k_l a_{tank}$	199
4.25	Évolution de la concentration en oxygène dissous dans le milieu de culture en fonction du $k_l a_{tank}$. La fraction sombre est de 10% et le τ_{plane} de 750 s.	200
4.26	Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm en fonction de la longueur du plan. La fraction sombre est de 10% et le $k_l a_{tank}$ de 1.3×10^{-2}	201

TABLE DES FIGURES

4.27 Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm en fonction de la fraction sombre. Le τ_{plane} est ici de 606 s et le k_{latank} de $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 203

A.1 Exemple de configuration où deux dioptrés perpendiculaires séparent trois milieux d'indice de réfraction différents. 217

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Mesure des différences de prédiction entre la méthode proposée et celle de Zhu et al. (2017) pour les différents angles de contact testés.	58
2.2	Paramètres utilisés pour le calcul de la transmittance des différents vitrages	60
2.3	Paramètres cinétiques de <i>Chlorella vulgaris</i> (culture sur ammonium).	67
2.4	Propriétés physiques du prototype Algofilm 0.33 m ²	74
2.5	Paramètres du modèle thermique de l'Algofilm 10 m ²	84
2.6	Résultats de l'analyse de sensibilité sur les paramètres du photobioréacteur	87
2.7	Résultats de l'analyse de sensibilité sur les paramètres météorologiques . . .	89
3.1	Composition du milieu BBM concentré.	116
3.2	Composition des additifs 1 et 2 du milieu BBM.	116
3.3	Indicateurs de performance du modèle.	141
4.1	Résumé de la fraction lumineuse absorbée par le photobioréacteur en fonction de la gamme de longueurs d'onde et du scénario. La fraction complémentaire est captée par le panneau photovoltaïque semi-transparent.	157
4.2	Réduction moyenne de la température par rapport au scénario de référence (sans filtre) en fonction du scénario étudié.	160
4.3	Propriétés physiques des matériaux à changement de phase inclus dans le béton.	172
4.4	Valeurs minimales, maximales et moyennes de la concentration en oxygène dissous dans le PBR en fonction du $k_{la_{tank}}$. Seules les oscillations à l'équilibre sont prises en compte.	199

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La révolution industrielle du XVIII^{ème} siècle a profondément bouleversé les sociétés européennes. Elles ont basculé d'une économie basée sur l'agriculture (secteur primaire) à une économie basée sur le commerce et l'industrie (secteur secondaire). Cette transition s'explique par de multiples facteurs parmi lesquels figure l'essor de la machine à vapeur. Le travail de ces machines a notamment permis le développement de réseaux de transport (chemin de fer et bateau à vapeur) et d'importants gains en productivité pour l'industrie.

Cette période marque aussi le début de la consommation à large échelle de ressources fossiles (charbon notamment) dont la combustion relâche de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère. Ces rejets, qui perdurent encore aujourd'hui, ont significativement modifié la composition de l'atmosphère terrestre. Selon le Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), la concentration en CO₂ y a augmenté de 46% depuis 1750. À cause de l'effet de serre provoqué par ces gaz, la température moyenne de la surface de la terre a augmenté de 0.6 °C depuis 1850. Ce réchauffement a de nombreuses conséquences observables aujourd'hui, et notamment, la multiplication d'événements météorologiques extrêmes tels que des vagues de chaleur, des tempêtes ou des inondations. Les émissions croissantes de gaz à effet de serre par les activités humaines accélèrent le réchauffement climatique et aggravent ses conséquences. Plusieurs scénarios ont été développés par le GIEC en fonction de la température atteinte en 2050. Par exemple, un réchauffement de 2 °C conduirait à une extinction massive d'espèces à travers le monde, notamment au niveau de la mer et des récifs coralliens. Si le réchauffement se poursuit et atteint les 4 °C, la fonte des glaces aux pôles ferait monter le niveau de la mer de plusieurs mètres, submergeant ainsi de nombreuses îles et côtes. La lutte contre ce dérèglement climatique est donc l'enjeu majeur de ce XXI^{ème} siècle.

Les accords de Paris, signés en 2015 par 195 pays, visent à limiter le réchauffement climatique mondial à 1.5 °C en réduisant significativement les émissions de gaz à effet de serre. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de grandement diminuer la consommation d'énergies fossiles. Pour cela, il est possible de réduire les besoins ou de remplacer les carburants fossiles par des vecteurs énergétiques alternatifs en utilisant, par exemple, des biocarburants issus de la transformation de biomasse végétale.

Pour la production de cette biomasse, les microorganismes photosynthétiques sont particulièrement intéressants, notamment parce qu'ils ne requièrent pas de terres arables pour être cultivés (leur production ne rentre donc pas en conflit avec la production de nourriture). De plus, leur vitesse de croissance et leur efficacité de conversion de l'énergie lumineuse sont plus importantes que celles des plantes supérieures. Enfin, au delà de la production de biocarburants, ces microorganismes ont aussi des applications dans divers secteurs industriels tels que la nutrition, la cosmétique, la pharmaceutique ou le traitement des eaux. Les microorganismes photosynthétiques peuvent également se positionner en tant que substitut pour des procédés pétrosourcés, par exemple, la production de fertilisants ou de matériaux. La production de ces microorganismes a donc connu un regain d'intérêt au cours des dernières décennies.

La culture des microorganismes photosynthétiques requiert la conception et le développement de procédés et de systèmes de culture spécifiques. Aujourd'hui, la plupart des productions industrielles utilisent des systèmes simples, extensifs et peu productifs de type bassins ouverts. Bien qu'ils soient peu cher à construire, leur faibles productivités et concentrations induisent des coûts énergétiques importants pour les procédés de bioraffinage. Ces consommations sont incompatibles avec les objectifs de réduction des besoins énergétiques. En particulier, dans le cas de la production de vecteurs énergétiques, le procédé se doit de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme pour être viable. Les systèmes de culture actuellement industrialisés ne sont donc pas adaptés à la production de biocarburants.

L'optimisation et l'intensification de la culture de microorganismes photosynthétique et de leur bioraffinage présentent donc de nombreux verrous scientifiques et technologiques. L'équipe Bioprocédés Appliqués aux Microalgues (BAM) du laboratoire GÉnie des Procédés Environnement Agroalimentaire (GEPEA) est l'un des acteurs majeurs de la recherche sur le sujet. Ses activités couvrent de nombreux champs disciplinaires allant de la microbiologie, à l'hydrodynamique en milieu confiné en passant par la filtration membranaire.

Les travaux de cette équipe de recherche ont notamment débouché sur le développement d'une technologie de culture intensifiée nommée Algofilm. Par sa conception, cette technologie promet d'offrir de très hautes performances en volume permettant des économies significatives en ressources (eau et énergie notamment) tout en restant extrapolable à large échelle. Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit sont dédiés à l'étude et à l'optimisation de cette technologie. L'objectif est de développer un ensemble d'outils et

de solutions pour concevoir le procédé le plus performant et le plus sobre possible.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres. Le premier est une revue bibliographique de la culture des microorganismes photosynthétiques. La première section est un panorama général des applications de leur biomasse dans l'industrie. La conception d'un système de culture requiert la prise en compte de nombreux paramètres. Les principes généraux de l'ingénierie de ces systèmes sont donc l'objet de la seconde section de ce chapitre. Enfin, les principaux systèmes de culture actuellement utilisés dans l'industrie sont présentés. Un point particulier est fait sur l'historique des systèmes de culture en couche mince ainsi que sur la technologie Algofilm.

Pour rationaliser les choix de conception, ces travaux de thèse s'appuient sur un ensemble d'outils mathématiques présentés dans le second chapitre. En premier, un modèle permettant de calculer la transmittance d'un vitrage (élément essentiel de la technologie Algofilm) est décrit. Afin d'évaluer, par simulation, les performances du procédé, un modèle de transfert radiatif couplé à un modèle de croissance ont été utilisés et sont également présentés dans ce chapitre. Enfin, un modèle thermique a spécialement été développé pour le pilote étudié dans cette thèse et est décrit dans ce second chapitre.

Le troisième chapitre de ce manuscrit est dédié à la validation expérimentale des performances du procédé en conditions solaire réelles. Une étude en maquette froide caractérise l'hydrodynamique de l'écoulement liquide dans le système de culture, un point essentiel à l'obtention des hautes performances recherchées. Ensuite, les productivités atteintes lors de deux campagnes de culture s'appuyant sur des outils de contrôle dérivés des modèles du Chapitre 2 sont décrites. La dernière section de ce chapitre présente une validation expérimentale du modèle thermique développé au Chapitre 2.

Le quatrième et dernier chapitre de ce manuscrit est dédié à l'étude, par simulation, de plusieurs solutions technologiques permettant d'optimiser le système de culture Algofilm. Trois sections sont consacrées à des technologies permettant de contrôler passivement la température du milieu de culture, un paramètre important en vue de la conception à terme d'un système énergétiquement économe, voire à production positive. Enfin, la dernière étude évalue l'impact des choix de conception sur la concentration en oxygène dissous, issus de la photosynthèse, dans le milieu liquide des microorganismes.

ÉTAT DE L'ART DE LA CULTURE DE MICROALGUES

Introduction

Le terme de microalgues désigne des microorganismes, apparentés au règne végétal, généralement retrouvés dans les milieux aqueux, et capables de faire de la photosynthèse. Cela inclut donc des organismes eucaryotes et procaryotes (cyanobactéries). Comme pour les plantes supérieures, il en existe une très vaste diversité d'espèces à travers le monde. Leur biomasse a de nombreuses applications industrielles et des procédés spécifiques ont été développés au cours des dernières décennies pour la produire.

L'étude et l'optimisation de ces procédés s'appuie sur une connaissance du métabolisme des microalgues. C'est une machinerie complexe qui fait l'objet de travaux à part entière, une revue exhaustive de la littérature sur le sujet est donnée par Bonnanfant (2020), Decamp (2020), Kazbar (2018) et Todisco (2019). En première approche, le métabolisme des microalgues peut être simplifié en deux modes : la photosynthèse et la respiration. La photosynthèse est la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique par une série de réactions initiées lorsque les antennes collectrices des microalgues (leurs pigments) sont suffisamment excitées par l'absorption de photons. Grâce à cette énergie chimique, les cellules de microalgues peuvent synthétiser une multitude de molécules nécessaires à leur développement, ou à la préparation de réserves énergétiques (glucose, amidon). Ces réserves sont ensuite consommées, par respiration, pour assurer un fonctionnement constant des réactions vitales de la cellule, par exemple, lorsqu'elle ne reçoit plus suffisamment de lumière (obscurité, nuit). Dans le cas de microalgues eucaryotes telles que *Chlorella vulgaris*, ces deux métabolismes peuvent avoir cours en même temps, car localisés dans des organelles différenciées.

Comme tous les procédés industriels, la culture et le bioraffinage des microalgues consomme des ressources (énergie et eau notamment). Cependant, le réchauffement cli-

matique impose de réduire drastiquement l’empreinte des activités humaines sur l’environnement, cela nécessite une diminution importante de la consommation de ces mêmes ressources (IPCC 2022). La production de microalgues doit donc elle aussi participer à cet effort et des technologies de culture optimisées sont développées.

Ce chapitre présente brièvement les applications industrielles de la biomasse microalgale, les principes généraux de l’ingénierie des systèmes de culture, et les technologies couramment utilisées dans l’industrie. Le système Algofilm étudié dans cette thèse est l’objet d’une présentation particulière.

1.1 Intérêt industriel de la culture de microalgues

La biomasse microalgale a de nombreuses applications dans divers secteurs industriels. La demande mondiale est croissante : elle était de l’ordre de 5 000 tonnes en 2004 (Spolaore et al. 2006) et est aujourd’hui de 30 000 à 50 000 tonnes (Legrand et al. 2021). Cette section présente succinctement différents domaines d’application de la biomasse microalgale.

1.1.1 L’alimentation humaine

L’alimentation humaine est historiquement la première application de la biomasse microalgale. Des traces de consommation d’*Arthrospira* ou d’*Aphanizomenon* remontant à plusieurs milliers d’années ont été retrouvées (Milledge 2011 ; Singh et al. 2005 ; Spolaore et al. 2006). Ces cyanobactéries n’étaient cependant pas cultivées mais directement récoltées dans des étangs où elles poussent naturellement.

Les microorganismes photosynthétiques (microalgues et cyanobactéries, regroupées ci-après sous le terme de « microalgues ») présentent des valeurs nutritionnelles intéressantes, notamment grâce à leur forte teneur en protéines (Milledge 2011 ; Spolaore et al. 2006). Ils sont également riches en acides gras insaturés ω_3 et ω_6 . Enfin, ils peuvent être une source de vitamines essentielles (A, B₁, B₂, B₆, B₁₂, C, E, *etc.*). Leur utilisation comme compléments alimentaires est donc tout indiquée pour la santé humaine.

Les microalgues sont commercialisées entières (sous forme de poudre ou de gélules) ou sous forme d’extrait (huile, pigments, *etc.*). Elles peuvent être consommées directement ou incorporées à d’autres préparations (pain, pâtes, boissons, *etc.*) pour servir de colorant (extraits de pigments) ou compléter leurs apports nutritionnels. La majorité des microalgues trouvées sur le marché de la nutrition humaine est composée de quatre espèces :

Arthrospira platensis, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* et *Aphanizomenon flos-aquae* (Milledge 2011 ; Spolaore et al. 2006).

1.1.2 L'alimentation animale

La biomasse microalgale est également utilisée comme nourriture pour l'élevage, et notamment pour l'aquaculture (les microalgues étant l'aliment naturel de nombreux poissons et mollusques). Ce marché représente environ 30% de la production totale de microalgues (Milledge 2011 ; Spolaore et al. 2006). Les bénéfices recherchés sont les mêmes que pour l'alimentation humaine.

Comme pour la nutrition humaine, les microalgues peuvent être apportées entières ou sous forme d'extrait. Dans le cas de l'aquaculture, l'utilisation de microalgues entières et vivantes améliore la qualité de l'élevage, notamment grâce à leur production d'oxygène et à la dégradation des déjections des poissons et mollusques (l'eau est ainsi purifiée) (Spolaore et al. 2006). Puisque les microalgues représentent l'essentiel du régime des poissons, il est recommandé de leur apporter une certaine diversité d'espèces. Les plus utilisées incluent *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Nannochloropsis*, et *Phaeodactylum* (Spolaore et al. 2006).

Apporter des microalgues vivantes nécessite cependant de les concentrer et leur stockage est difficile. Cela induit des coûts supplémentaires (Milledge 2011 ; Spolaore et al. 2006). Des extraits de microalgues peuvent donc être utilisés à la place. Par exemple, l'astaxantine, le pigment responsable de la couleur rosée des saumons, extraite d'*Haematococcus pluvialis*, est communément ajoutée en supplément alimentaire à des élevages de saumon (Todisco 2019).

1.1.3 La cosmétique et la pharmaceutique

Au-delà de leurs valeurs nutritives intéressantes, les microalgues sont capables de produire une large variété de molécules d'intérêt dans le domaine de la cosmétique et de la pharmaceutique. Notamment, les polysaccharides sécrétés par certaines microalgues ont des propriétés rhéologiques recherchées pour servir de texturant dans des crèmes et des pommades (Decamp 2020). Certains de ces polysaccharides ont par ailleurs une activité anti-tumorale et immunomodulatoire (Decamp 2020). Enfin, les pigments des microalgues sont utilisés comme traceurs fluorescents pour des recherches cliniques en immunologie (Spolaore et al. 2006).

De nombreuses contraintes réglementaires s'appliquent à ces produits de santé. Leur

qualité en particulier est très surveillée et de hauts niveaux de pureté sont attendus. Ces contraintes augmentent significativement les coûts de production qui sont cependant compensés par une très forte valeur ajoutée. Certains de ces produits sont vendus à plus de 1 000 US\$.mg⁻¹ (Spolaore et al. 2006).

1.1.4 Le traitement des eaux usées

La réglementation française impose aux communes de traiter les eaux usées collectées avant de les rejeter. Notamment, des seuils maximum d'azote et de phosphore ont été fixés pour éviter une eutrophisation du milieu où ces eaux sont rejetées (mer, rivière, lac). Ces composés sont nécessaires à la croissance microalgale. Aussi, des procédés utilisant des microalgues ont été développés pour traiter les eaux usées (Wollmann et al. 2019). L'intérêt des microalgues est double : elles abattent la concentration de certains composés (nitrates et phosphates notamment) et leur production d'oxygène aide les bactéries à dégrader la matière organique à éliminer (Wollmann et al. 2019).

Cette approche permet donc de recycler et valoriser les déchets présents dans les eaux usées. Cependant, à cause de la nature du substrat utilisé, pour des raisons sanitaires, seules certaines voies de valorisation sont possibles (fertilisants et énergie notamment).

1.1.5 La production de biocarburants

Malgré l'aggravation du réchauffement climatique et la raréfaction des ressources fossiles, la demande mondiale en carburants demeure croissante. Des sources alternatives d'énergie sont donc développées et la biomasse est une des solutions envisagées (Razzak et al. 2013).

Au cours des dernières décennies, trois sources de biomasse ont été transformées en biocarburants (bioéthanol, biodiesel). En premier lieu, des cultures sur champs ont été utilisées (biocarburants de première génération). Cependant, une culture à très large échelle de plantes supérieures à des fins de production de carburant entrerait inévitablement en compétition avec la production de nourriture. Cette solution a donc été abandonnée (Naik et al. 2010). Les biocarburants de seconde génération sont produits à partir de déchets lignocellulosiques. Le développement de ces procédés de transformation est toujours actif (Naik et al. 2010). Cette solution a cependant l'inconvénient de reposer sur une ressource dont le stock exploitable est limité. La production de déchets de bois dépend de l'industrie qui exploite cette matière première. Les biocarburants de troisième génération quant à eux

sont produits à partir de microalgues. Celles-ci ont l'avantage de ne pas requérir de terres arables pour être produites et n'entrent donc pas en compétition avec la production de nourriture. De plus, leur productivité surfacique est plus importante que celle des plantes supérieures (Razzak et al. 2013).

De nombreux verrous scientifiques doivent cependant être levés. Notamment, pour que le procédé soit viable, il est nécessaire que la culture de microalgues et le bioraffinage consomment moins d'énergie qu'ils n'en produisent. Comme il sera démontré par la suite, la plupart des consommations énergétiques sont étroitement liées au volume de la culture (régulation thermique, mélange, déplacement, concentration, extraction, *etc.*). Ainsi, pour rendre le procédé viable, il faut intensifier le procédé en volume. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans cette logique en cherchant à concevoir un procédé solaire de culture de microalgues en photobioréacteur intensifié qui consomme le moins de ressources possible (eau et énergie en particulier).

1.2 Principes généraux de la culture de microalgues en photobioréacteur

La production de biomasse microalgale à l'échelle industrielle nécessite le développement et la construction de systèmes de culture dédiés. Ils peuvent être de type bassin ouverts ou des systèmes clos appelés « photobioréacteurs » (PBR). Ces systèmes doivent permettre de combler les besoins physiologiques des microalgues afin qu'elles puissent se développer. Au cours des dernières décennies, sur la base des connaissances acquises sur le métabolisme des microalgues, de nombreuses règles d'ingénierie permettant d'optimiser les performances des procédés de culture ont été définies. Les principes généraux de conception des systèmes de culture sont présentés dans cette section.

1.2.1 Absorption et pénétration de la lumière dans le volume de culture

Pour maximiser la productivité en biomasse d'un système de culture de microalgues, il est nécessaire que chaque cellule puisse faire de la photosynthèse. Or, pour leur croissance photosynthétique, les microalgues ont besoin d'absorber de la lumière. Ainsi, la première fonction des systèmes de culture est de capter cette lumière pour la transmettre aux microalgues.

La plupart des systèmes de culture sont à captation directe. Cela signifie que la source lumineuse est extérieure au volume de culture et que la lumière doit y pénétrer par une surface : la surface éclairée. Cependant, à cause de l'absorption du flux lumineux par les cellules proches de la source lumineuse, celles situées en profondeur du volume de culture sont à l'ombre des premières et reçoivent moins de photons. Le flux lumineux n'est donc pas réparti de façon homogène dans le volume de culture. Cette répartition hétérogène et la gestion de la lumière disponible pour les microalgues est le point central de la conception des systèmes de culture. C'est d'ailleurs un des aspects majeurs qui les différencie des autres bioréacteurs tels que les fermenteurs (Le Borgne 2011).

Lorsque l'atténuation de lumière au sein d'un système de culture est suffisamment forte, une fraction de son volume ne reçoit plus suffisamment de lumière et a une contribution négative à la productivité du système. En effet, ce sous-volume appelé « fraction sombre » ne permet pas aux cellules de pleinement faire de la photosynthèse où qu'elles soient dans le réacteur. La part que représente la respiration dans leur métabolisme est donc augmentée, les cellules de microalgues consomment donc une part plus importante de leurs réserves. La productivité du système de culture étant le bilan entre la production de biomasse par photosynthèse et sa consommation par respiration, elle est impactée par la présence de ce volume.

Par opposition à la fraction sombre, Pruvost et Cornet (2012) définissent une fraction éclairée (notée γ) qui est définie par la fraction de volume qui contribue positivement à la productivité du système de culture. En fonction de la valeur de γ , trois régimes de fonctionnement sont distingués.

- Si γ est inférieur à 1, il existe dans le réacteur une fraction sombre. Une partie du volume de la culture contribue donc négativement à la productivité du système. La croissance microalgale est limitée par la lumière.
- Si γ est exactement égal à 1, la lumière est alors utilisée de façon optimale par les cellules de microalgues et la productivité du système de culture est optimale pour un flux donné. C'est le régime dit de luminostat. Cependant, bien qu'il soit optimal, ce régime est complexe à garantir en pratique, en conditions solaires (lorsque le flux lumineux varie constamment). En effet, pour atteindre ce régime à un flux donné, une concentration en biomasse précise est nécessaire. Puisqu'en conditions solaires ce flux varie constamment, il est donc nécessaire d'avoir un contrôle avancé et réactif de la concentration en biomasse (complexe à mettre en œuvre, en particulier à grande échelle).

- Si γ est supérieur à 1, l'atténuation de lumière n'est pas assez forte. Une concentration en biomasse plus élevée est nécessaire pour atteindre le luminostat. Une partie du flux lumineux récolté par le photobioréacteur est donc perdu. Pour un flux donné, cela amène donc à des productivités moindre que dans le cas du luminostat. De plus, si le flux lumineux est trop important, ce régime peut amener à une sursaturation des systèmes photosynthétiques des cellules, ce qui accentue la baisse de rendement de conversion photosynthétique, voire les endommagement et peut s'avérer létal pour la culture.

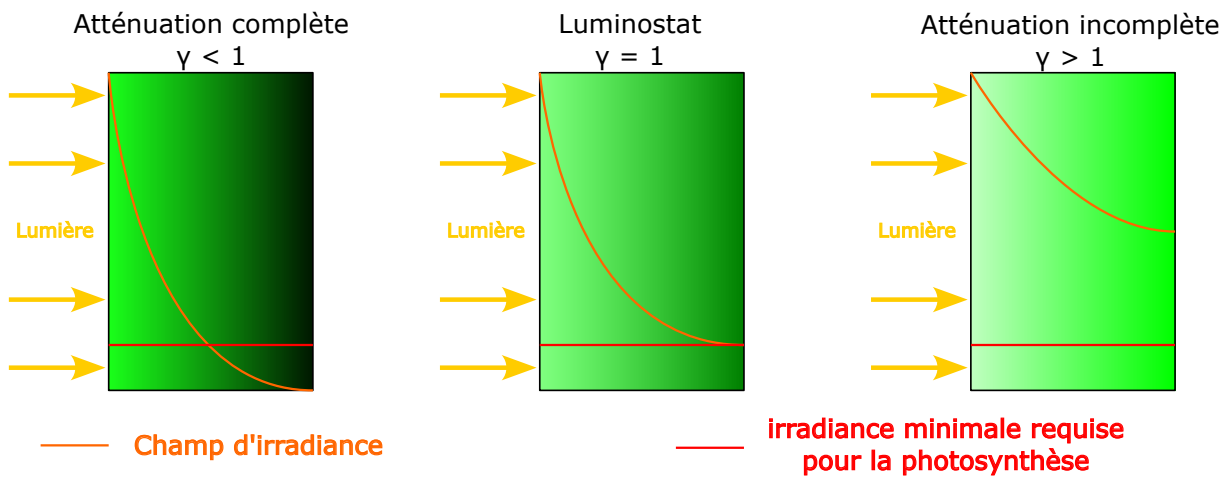


FIGURE 1.1 – Schéma de l'atténuation de la lumière dans le volume de culture en fonction de la valeur de γ .

La fraction sombre présente dans le photobioréacteur est notamment fonction de la concentration en pigments (liée à la concentration en biomasse). Lorsque l'épaisseur de culture diminue, le chemin optique est plus court, une concentration en biomasse plus importante est donc nécessaire pour atteindre une atténuation complète de la lumière. Or, une culture de microalgues plus concentrée est un atout du point de vue industriel, car cela réduit le volume nécessaire à l'obtention d'une masse donnée de microalgues. Cela amène à une réduction des coûts, notamment énergétiques, liés au volume (régulation thermique, extraction des microalgues, *etc.*). Ainsi, une réduction de l'épaisseur de culture devient un objectif de conception d'un système de culture optimisé.

Cette notion d'atténuation de lumière montre qu'il existe une relation entre la surface éclairée du réacteur et son volume de culture. La conception d'un photobioréacteur cherche à maximiser la surface de captation lumineuse pour récolter le plus de photons possible afin de maximiser la croissance photosynthétique. Dans le même temps, la minimisation

de l’épaisseur de culture (à surface éclairée constante) amène à une réduction du volume du photobioréacteur. Ainsi, pour caractériser un PBR, une grandeur nommée « surface spécifique éclairée » (exprimée en m^{-1}) est utilisée. Elle est définie comme le rapport entre la surface éclairée et le volume de culture :

$$a_{light} = \frac{S_{light}}{V_{culture}} \quad (1.1)$$

Afin de maximiser la concentration en biomasse, il est nécessaire d’avoir la surface spécifique éclairée la plus importante possible, ce qui revient à réduire l’épaisseur de culture.

1.2.2 Mélange du volume de culture

Le mélange hydrodynamique a pour première fonction d’homogénéiser les paramètres physico-chimiques du milieu de culture tels que la température, la salinité, le pH *etc.* Il permet donc d’assurer, à toutes les cellules de microalgues, des conditions de culture et un accès aux nutriments adéquats pour leur croissance (voir Section 1.2.3.1). Il promeut également les échanges gaz-liquide (voir Section 1.2.3.1) et empêche la sédimentation des cellules. Cela permet au final d’améliorer la production de biomasse (Richmond 2008).

En particulier, le mélange permet aux cellules de se déplacer dans le sens de la profondeur. Ainsi, une cellule n’est pas en permanence soumise au même flux lumineux selon qu’elle se trouve en surface ou en profondeur. Elle alterne entre des passages à la lumière et des passages à l’obscurité. Cette circulation a l’avantage de permettre à toutes les cellules de recevoir périodiquement les photons nécessaires à leur photosynthèse. De plus, lorsque le réacteur est soumis à un flux lumineux très important (stressant pour les microalgues) le mélange permet un passage régulier des cellules dans la zone sombre, limitant ainsi les effets de stress lumineux. Cette circulation des cellules est donc désirable.

Le génie chimique propose un ensemble de méthodes permettant d’agiter efficacement un volume liquide, elles ne sont cependant pas toutes applicables aux géométries des systèmes de culture. Différentes méthodes (mécanique ou bullage) sont donc utilisées en fonction du système choisi (voir Section 1.3). Enfin, la fragilité cellulaire de certaines microalgues empêche l’utilisation de méthodes entraînant un cisaillement trop important : cela aurait pour effet de détruire les cellules en cours de culture. Obtenir une agitation efficace et inoffensive pour la culture de microalgues n’est donc pas triviale, notamment pour des systèmes qui s’étendent sur de très larges surfaces.

1.2.3 Conditions de culture

Pour produire de la biomasse microalgale, l'exposition à la lumière seule ne suffit pas, certaines conditions (composition et paramètres physico-chimiques du milieu de culture) doivent être respectées.

Pour chaque souche il existe des conditions optimales de croissance qui permettent de maximiser la production de biomasse. Il est cependant souvent difficile de les maintenir, notamment dans le cas de cultures solaires où les paramètres extérieurs changent constamment. Afin de maximiser ses performances, un procédé de culture doit donc chercher à maintenir les microalgues dans les meilleures conditions possibles.

1.2.3.1 Composition du milieu de culture

La synthèse de molécules organiques par les microalgues nécessite un ensemble d'éléments chimiques trouvés sous forme dissoute dans le milieu de culture. Parmi eux, le plus important est le carbone, les microalgues en étant composées pour moitié (Souliès 2014). Cet élément peut provenir de différentes sources : inorganique (culture autotrophe), organique (culture hétérotrophe) ou les deux (culture mixotrophe). Seule la culture autotrophe est étudiée ici, le carbone utilisé est donc inorganique.

Dans les eaux naturelles et certains systèmes de culture, ce carbone provient de la dissolution du CO₂ atmosphérique. Cependant, la concentration en CO₂ de l'air est faible (< 400 ppm) et les transferts gaz-liquide en jeu sont très peu efficaces. La concentration en carbone obtenue dans le liquide est alors généralement trop faible et limitante pour la croissance microalgale (Le Gouic 2013). Certains procédés de culture ajoutent donc du carbone au milieu de culture. Cela se fait généralement en y bullant un gaz enrichi en CO₂ ou en y ajoutant des carbonates.

Les autres principaux constituants de la biomasse microalgale sont l'azote, le soufre et le phosphore. Ils sont apportés par ajout d'ammonium ou de nitrates pour l'azote et par dissolution de sulfates et de phosphates pour le soufre et le phosphore. D'autres nutriments tels que le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium, le fer, le bore *etc.* sont également nécessaires mais en plus petites quantités. Ils sont également apportés par la formulation du milieu de culture.

L'absence comme l'excès d'un ou de plusieurs nutriments dans le milieu de culture nuit à la croissance microalgale (Chen et al. 2011). Ainsi, le milieu de culture est formulé pour que les microalgues ne soient ni carencées ni inhibées par les concentrations présentes.

Puisque le milieu de culture optimal dépend de la souche cultivée, il en existe un grand nombre dans la littérature.

Bien que la limitation de la croissance par le manque de sels minéraux soit relativement facile à éviter, certains procédés privent délibérément les microalgues d’un nutriment pour les forcer à emprunter des voies métaboliques spécifiques (forçage physiologique). La production d’une molécule recherchée peut ainsi être favorisée. Par exemple, une carence en azote couplée à un flux lumineux important favorise la production de lipides (Breuer et al. 2012).

Enfin, la photolyse de l’eau par la photosynthèse produit de l’oxygène qui se retrouve sous forme dissoute dans le milieu de culture. Une surabondance de cet oxygène peut amener à une inhibition de la croissance microalgale (Bonnafant 2020 ; Fonseca e Sousa 2013 ; Kazbar et al. 2019 ; Lívanský et Doucha 2003 ; Rearte et al. 2021). Ce produit de la photosynthèse doit donc être évacué pour maximiser les performances du système de culture. Cela souligne l’importance des transferts gaz-liquide dans les procédés de culture de microalgues : ils doivent apporter le carbone (CO_2) nécessaire et évacuer l’oxygène produit.

1.2.3.2 Paramètres physico-chimiques du milieu de culture

Les paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH ou la salinité du milieu de culture influent sur le métabolisme des microalgues (Torzillo et Vonshak 2013).

La salinité du milieu de culture définit les pressions osmotiques subies par les cellules. Celles-ci peuvent éclater si la différence de salinité entre l’intérieur et l’extérieur devient trop importante.

Le pH du milieu de culture dépend de sa composition et notamment des équilibres carbonatés (Le Gouic 2013). Ce paramètre évolue constamment lorsque les microalgues consomment les espèces dissoutes et est donc difficile à contrôler à très large échelle. En laboratoire, une mesure en ligne du pH sert couramment à contrôler l’apport de CO_2 au milieu de culture. En effet, dans une culture sur nitrates, lorsque les microalgues consomment le carbone dissous, le pH augmente, du CO_2 est alors ajouté afin d’alimenter les microalgues et acidifier le milieu de culture.

Enfin, la température influence très fortement l’activité enzymatique des microalgues (Raven et Geider 1988) et donc leur croissance. Bien qu’il existe, pour chaque microalgue, une valeur optimale de ce paramètre, elles supportent généralement une gamme de températures située autour de l’optimum. Par exemple, *Chlorella vulgaris* a une température

optimale de croissance située entre 20 °C et 30 °C, elle peut néanmoins supporter des températures comprises entre 15 °C et 35 °C sans impacter significativement la productivité du photobioréacteur (Todisco 2019). Des températures supérieures à 40 °C sont cependant souvent synonyme de mort cellulaire. Le contrôle de la température du photobioréacteur est donc un aspect important du procédé de culture qui permet d'assurer la viabilité des microalgues et de maximiser la production de biomasse.

1.2.3.3 Axenie

Un milieu de culture de microalgues peut contenir une multitude de microorganismes différents : bactéries, champignons, protozoaires, mais également d'autres microalgues que celle recherchée. Cela peut affecter la productivité en biomasse si cela occasionne une prédation des microalgues cultivées ou une mise en concurrence pour les nutriments nécessaires à leur croissance. La sensibilité à la contamination dépend de la souche cultivée.

Les souches extrémophiles sont intéressantes car les conditions de culture qu'elles nécessitent ne sont supportées que par elle et un ensemble restreint de microorganismes. Le problème de la contamination est alors (partiellement) écarté. Les exemples d'espèces extrémophiles cultivées les plus cités sont *Arthrospira platensis* qui se développe à pH très élevé (> 9) ou *Dunaliella salina* qui croit dans des milieux très salins ($> 100 \text{ g.L}^{-1}$).

1.2.4 Productivité des photobioréacteurs

1.2.4.1 La productivité surfacique

La productivité surfacique d'un photobioréacteur correspond à la quantité de biomasse produite par unité de surface et par unité de temps. Cette donnée est essentielle car, comme tous les procédés solaires, la culture de microalgues nécessite une surface de captation qui se traduit, la plupart du temps, par une emprise au sol. La construction d'un photobioréacteur nécessite donc des investissements fonciers dont une rentabilité est attendue. Une étude de la productivité surfacique permet alors d'évaluer ces investissements.

Pour un photobioréacteur à captation directe, dans des conditions de culture optimales, la productivité surfacique maximale atteignable est indépendante de la technologie utilisée : elle ne dépend que du nombre de photons absorbés. En effet, si tous les besoins des microalgues sont comblés et la culture contrôlée pour maintenir le régime de luminostat, la productivité du système ne dépend plus que de l'efficacité thermodynamique

de conversion de l’énergie lumineuse par la photosynthèse. Cornet (2010) estime que la productivité surfacique maximale atteignable à l’équateur (latitude la mieux ensoleillée de la terre) est de l’ordre de $30 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ($100 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

Cependant, les photobioréacteurs solaires, notamment à très large échelle, ne sont pas parfaitement contrôlés et de multiples limitations peuvent impacter la production de biomasse. La conception de réacteurs capables d’être contrôlés à moindre coût, et capables de proposer des productivités surfaciques importantes reste donc un enjeu.

1.2.4.2 La productivité volumique

La plupart des opérations unitaires liées à la culture de microalgues et à leur traitement ont un coût lié au volume de culture (régulation de la température, mélange, concentration, extraction, *etc.*). Réduire ce volume permet de faire des économies significatives et donc d’améliorer la rentabilité du procédé. Ainsi, la productivité volumique (la quantité de biomasse produite par unité de volume et de temps) est une donnée intéressante pour estimer le coût de production d’une masse donnée de microalgues. Cette productivité est directement liée à la concentration en biomasse, afin de la maximiser, le procédé de culture doit donc être intensifié en volume (i.e. le photobioréacteur utilisé doit avoir la surface spécifique éclairée la plus grande possible).

Comme démontré dans la Section 1.2.1, la concentration atteignable par un photobioréacteur est lié à la surface spécifique éclairée (qui est une caractéristique géométrique du système de culture utilisé). Ainsi, contrairement à la productivité surfacique, la productivité volumique est très dépendante de la technologie de culture utilisée.

La surface spécifique éclairée permet de lier les deux productivités :

$$P_X = a_{light} \cdot S_X \quad (1.2)$$

avec P_X [$\text{kg.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$] la productivité volumique, S_X [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$] la productivité surfacique et a_{light} [m^{-1}] la surface spécifique éclairée.

1.3 Les systèmes de culture de microalgues

La conception et la construction d’un système de culture de microalgues ne sont pas triviales. Elles doivent satisfaire aux besoins des microalgues mais aussi à des contraintes techniques et économiques. Par exemple, un photobioréacteur développé pour le domaine

pharmaceutique devra garantir une qualité stricte du produit, il devra donc permettre de finement contrôler la culture. Cela augmente le coût d'investissement et d'opération du système, mais en retour, un produit à très forte valeur ajoutée est obtenu. Au contraire, si l'application visée est la production d'énergie, une culture massive et à bas coût de microalgues est recherchée. Le réacteur conçu pour la pharmaceutique n'est alors pas adapté. Ces travaux de thèse visent à concevoir un photobioréacteur solaire, intensifié, économe en ressources et extrapolable à large échelle.

Pour répondre à ces différents besoins, il existe une large variété de photobioréacteurs allant du PBR de paillasse retrouvé en laboratoire (avec un volume de quelques millilitres à quelques litres) jusqu'à la culture extensive à très large échelle (plusieurs dizaines d'hectares et de mètres cubes). Ils sont généralement regroupés en catégories en fonction de leur source lumineuse (artificielle ou naturelle) et leur isolation de l'environnement extérieur (réacteur ouvert ou fermé). Cette section présente brièvement des systèmes de culture à captation directe couramment utilisés dans l'industrie, et en particulier, le photobioréacteur Algofilm. Une revue exhaustive des systèmes existants est donnée par Acien et al. (2017), Le Borgne (2011) et Legrand et al. (2021)

1.3.1 Les systèmes de culture ouverts

Les systèmes de culture les plus courants à l'échelle industrielle sont les photobioréacteurs ouverts. Ils ne sont pas séparés de l'environnement extérieur et soumettent donc la culture à de potentielles contaminations par d'autres microorganismes. De plus, en pratique, les conditions de culture sont rarement contrôlées puisque les intrants (notamment chaleur et CO₂) peuvent rapidement être perdus, cédés à l'environnement extérieur. Les performances de ces systèmes sont donc généralement limitées par de nombreux facteurs. Ils sont cependant peu chers à construire et à opérer.

1.3.1.1 Les bassins ouverts

Les bassins ouverts (de type lagunes) sont les systèmes de culture de microalgues les plus simples. Ils ont une épaisseur généralement comprise entre 30 cm et 50 cm. Leur très faible coût de construction leur permet de s'étendre sur plusieurs dizaines d'hectares. Ils ne sont cependant pas contrôlés et leur mélange est très faible (perturbations en surface causées par le vent) ou inexistant. Leur productivité surfacique est donc très faible (inférieure à 1 g.m⁻².jour⁻¹). De même, à cause de leur épaisseur importante, les concentrations

en microalgues obtenues sont également très faibles (inférieures à 0.2 g.L^{-1}).

L’exemple le plus cité dans la littérature est celui de la culture de *Dunaliella salina* pour la production de β -carotène en Australie. Les bassins utilisés couvrent plusieurs centaines d’hectares (Le Borgne 2011).

1.3.1.2 Les raceways

Le mélange hydrodynamique permet d’améliorer les performances d’un système de culture (voir Section 1.2.2). Afin d’améliorer les productivités des simples bassins, les raceways sont communément utilisés en industrie, parfois à très large échelle (Chisti 2016 ; Le Borgne 2011). Ils sont conçus sur le même modèle que les chenaux d’aération des stations d’épuration : ce sont des bassins en boucle dont la circulation est assurée par une roue à aube. L’épaisseur de culture est généralement comprise entre 15 cm et 30 cm. Bien que la construction de ce type de réacteur soit plus onéreuse que celle d’un bassin, elle reste simple et abordable.

L’épaisseur de culture des raceways, plus faible que celle des bassins, permet d’atteindre des concentrations en microalgues allant jusqu’à 1 g.L^{-1} . De plus, grâce au mélange, une augmentation significative de la productivité surfacique (d’un facteur de 10 à 20 par rapport à un bassin) est obtenue (Le Borgne 2011 ; Razzak et al. 2013). Enfin, bien qu’il existe des raceways couverts, la majorité sont ouverts.



FIGURE 1.2 – Photographie d'un raceway ouvert installé sous la serre de la plateforme Algosolis.

1.3.1.3 Les bassins circulaires

Les photobioréacteurs circulaires sont également inspirés des bassins d'aération utilisés dans les procédés de traitement des eaux. Il s'agit d'un bassin de diamètre allant jusqu'à 45 m, généralement construits en béton, permettant de cultiver les microalgues sur une épaisseur de 20 cm à 30 cm de profondeur. Un bras mécanique en rotation constante assure le mélange de la culture. Les concentrations obtenues sont comparables à celles d'un raceway. Ces systèmes souffrent cependant d'une utilisation sous optimale de la surface au sol et sont difficilement extrapolable à de grandes échelles (Le Borgne 2011 ; Legrand et al. 2021 ; Razzak et al. 2013).

1.3.2 Les systèmes de culture fermés

Le réchauffement climatique et la raréfaction de certaines ressources (eau douce et énergie notamment) imposent le développement de procédés industriels sobres. La culture et le bioraffinage de microalgues n'échappent pas à ce principe. Les consommations en ressources de ces procédés augmentent avec le volume de culture (volume d'eau nécessaire, énergie consommée par le pompage, la régulation thermique, le séchage, la centrifugation,

l'extraction, *etc.*). Pour qu'un procédé de culture et de bioraffinage soit sobre, il est donc nécessaire de réduire ce volume ce qui, mécaniquement, augmente la concentration en microalgues (i.e. il faut intensifier le procédé).

Bien qu'ils soient peu chers à construire, les systèmes ouverts offrent peu de leviers d'intensification de la culture. Leur principe même empêche une réduction significative de l'épaisseur de culture nécessaire à l'intensification du procédé. Par exemple, si une épaisseur inférieure au centimètre est utilisée, un bassin finirait par s'assécher et la roue à aube d'un raceway serait inefficace. De plus, les conditions de culture y sont difficilement contrôlables et les intrants utilisés (eau douce, chaleur, CO₂, *etc.*) sont majoritairement perdus, cédés à l'environnement extérieur.

Pour intensifier le procédé de culture, les photobioréacteurs clos (systèmes isolés de l'environnement extérieur) sont donc les technologies à privilégier. Ils permettent notamment de contrôler les entrées et sorties de matière et donc la culture. Si ce contrôle est suffisant, une culture peut être uniquement limitée par la quantité de lumière reçue, et des performances bien supérieures aux systèmes ouverts sont ainsi obtenues. Enfin, en théorie, les photobioréacteurs clos permettent de cultiver les microalgues en axénie. Cela élargit donc le spectre de souches cultivables à celles sensibles à la contamination. En pratique cependant, à grande échelle, un maintien rigoureux de l'axénie est complexe à mettre en œuvre (Le Borgne 2011 ; Legrand et al. 2021 ; Razzak et al. 2013).

La conception et la réalisation de ces photobioréacteurs sont cependant plus complexes et donc plus onéreuses que celles des systèmes ouverts. De plus, ces PBR ont des coûts d'opération supplémentaires par rapport aux réacteurs ouverts. Par exemple, le confinement du milieu de culture réduit très fortement son évaporation (effet recherché pour faire des économies d'eau). Cependant, dans le cas des systèmes ouverts, cette évaporation permet de drainer une grande quantité de chaleur et compense donc le surplus reçu par absorption du flux lumineux solaire : la température est donc passivement contrôlée. Sans cette évaporation, la puissance lumineuse absorbée et transformée en chaleur n'est pas évacuée, les systèmes fermés ont donc tendance à surchauffer, notamment lorsqu'ils utilisent la lumière solaire. La régulation de la température devient donc non seulement possible mais nécessaire pour assurer la survie de la culture. Cela induit des coûts opératoires supplémentaires (Carvalho et al. 2006). Ainsi, pour que le procédé soit rentable, les gains de productivité des photobioréacteurs clos doivent être plus importants que les coûts supplémentaires engendrés. Une ingénierie fine de ces réacteurs est donc nécessaire.

Il existe plusieurs types de photobioréacteurs clos. Les principales technologies utilisées

dans l'industrie sont présentées ici.

1.3.2.1 Les photobioréacteur plans

Puisque le rôle principal des photobioréacteurs est d'offrir une surface de captation lumineuse, la géométrie plane, similaire à celle des panneaux photovoltaïques, apparaît comme évidente. Ici, le milieu de culture est confiné entre deux plaques dont au moins une est transparente pour laisser passer la lumière. L'épaisseur de culture est donc définie par la distance entre les deux plaques, elle est généralement comprise entre 1 cm et 10 cm (Le Borgne 2011). L'agitation du milieu de culture est souvent assurée par un bullage continu à la base du PBR (système airlift).

Ces réacteurs ont l'avantage de ne pas être contraints à une inclinaison particulière, des photobioréacteurs verticaux horizontaux et inclinés sont ainsi décrits dans la littérature (Le Borgne 2011). À noter que, similairement aux panneaux photovoltaïques, pour des cultures solaires, le cas incliné permet une captation optimale de la lumière et amène donc à des productivités surfaciques plus importantes (l'inclinaison optimale dépend de la latitude où le réacteur est installé).

La possibilité de disposer verticalement le réacteur a l'avantage de permettre de l'accoler à d'autres constructions. Par exemple, le projet SymbiO₂Box vise à intégrer un photobioréacteur plan à un bâtiment pour créer une symbiose (Pruvost et al. 2016). Cela permet de profiter de larges surfaces éclairées sans grande emprise au sol. La symbiose permet, dans un objectif d'écologie industrielle, d'utiliser les effluents du bâtiment (urine, CO₂, etc.) pour la production de microalgues. Enfin, la présence du photobioréacteur sur la façade permet de réduire la consommation énergétique liée au contrôle de la température du bâtiment et du PBR (Pruvost et al. 2016 ; Todisco et al. 2022).



FIGURE 1.3 – Photographie du pilote SymbiO₂Box implanté sur la plateforme Algosolis. Deux réacteurs airlift plans sont installés plein sud sur la façade. La partie se trouvant derrière permet de simuler la présence d'un bâtiment et d'étudier le couplage PBR - bâtiment.

L'intensification de ces réacteurs est possible en réduisant l'espace entre les deux plaques à quelques millimètres (Thobie et al. 2017). Cela engendre cependant de nombreuses difficultés liées à l'hydrodynamique (transfert de gaz notamment) (Almani 2021). L'extrapolation de ce type de réacteur à large échelle et en conditions solaire est donc complexe.

1.3.2.2 Les photobioréacteurs tubulaires

Les photobioréacteurs tubulaires sont un circuit fermé de tubes transparents généralement disposés en serpentins. Comme les photobioréacteurs plans, leur disposition n'est pas contrainte, elle peut être horizontale ou verticale. La circulation du milieu de culture peut être assurée par une pompe ou un système airlift. Le système est divisé en deux parties : la partie tubulaire qui collecte la lumière nécessaire à la croissance photosynthétique des microalgues, et la partie recirculation qui permet la mise en mouvement et les transferts de gaz (notamment l'apport en CO₂ et l'évacuation de l'oxygène dissous).

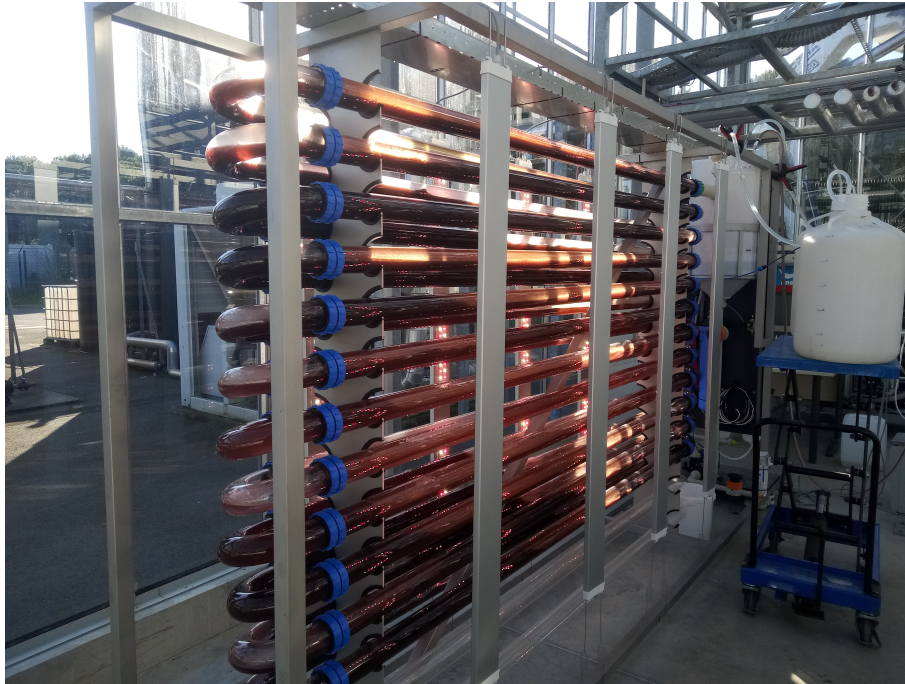


FIGURE 1.4 – Photographie d'un photobioréacteur tubulaire installé sur la plateforme Algosolis. Les microalgues sont ici mise en circulation grâce à un système airlift.

L'intensification de la culture dans ce type de photobioréacteurs se fait en réduisant le diamètre des tuyaux utilisés. Bien que des tubes de toutes tailles soient disponibles sur le marché, la réduction du diamètre induit cependant une augmentation des pertes de charges générées. Ainsi, pour des tubes très fins (nécessaires pour intensifier le procédé) des pertes de charge importantes doivent être compensées par un système de mise en circulation puissant. Cela engendre des forces de cisaillement importantes, qui sont néfastes voire létales pour les microalgues. Pour ces raisons, la conception d'un photobioréacteur tubulaire intensifié et à large échelle est complexe.

1.3.3 Les systèmes de culture en couche mince

Les photobioréacteurs précédemment présentés sont utilisés à l'échelle industrielle. Cependant, il est difficile de réduire leur épaisseur de culture en dessous du centimètre tout en restant à grande échelle. Afin d'obtenir la haute surface spécifique éclairée nécessaire pour atteindre des concentrations et productivités volumiques importantes, un type de système de culture est développé : les systèmes cascade. L'historique du développement de ces réacteurs est rapporté par Grivalský et al. (2019) et Masojídek et Práil (2010) et

est résumé ici.

Leurs origines remontent aux années 1960 à Třeboň, en République Tchèque (Doucha et Lívanský 1995 ; Grivalský et al. 2019 ; Setlk et al. 1970). Dans ces systèmes ouverts, le milieu de culture est dispersé et ruisselle sur un plan incliné. Une épaisseur de 1 cm à 5 cm, bien inférieure à celle d'un raceway, est ainsi obtenue. La conception originale fait aussi apparaître des marches régulièrement espacées qui donnent à ces système leur nom de « réacteur cascade ». Ces marches permettent de créer des turbulences et assurent ainsi un mélange hydrodynamique efficace de la culture. Une fois que la culture a atteint la base du plan incliné, elle est collectée par un bac et une pompe permet de la réintroduire en haut du plan. Lors de son passage dans le bac, du CO₂ est dissous dans le milieu de culture afin d'éviter une limitation de la croissance par le carbone.

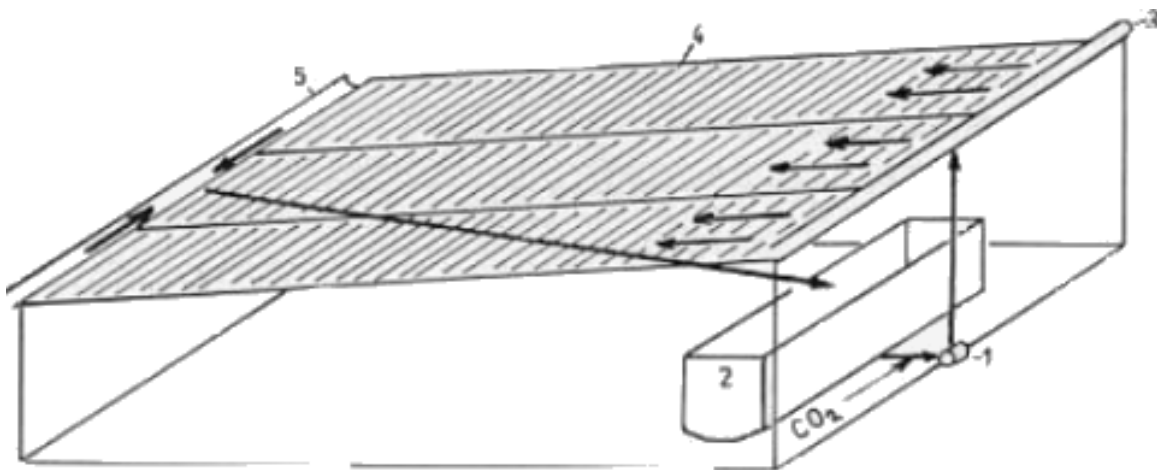


FIGURE 1.5 – Schéma de principe du photobioréacteur cascade Tchéco (Doucha et Lívanský 1995).

Ce simple principe de fonctionnement a permis de construire des réacteurs utilisant de grandes surfaces de captation (jusqu'à 900 m²). Avec ce système, des concentrations en biomasse allant jusqu'à 15 g.L⁻¹ ont été atteintes. Afin de tester cette technologie sous différents climats, des systèmes similaires ont été construits en Pologne, Bulgarie, Italie, et plus récemment au Portugal (Acién et al. 2017 ; Grivalský et al. 2019 ; Rearte et al. 2021).

Contrairement aux autres technologies présentées, le fonctionnement du réacteur cascade n'est pas continu. Le système est arrêté la nuit ou lorsque les conditions météorologiques sont défavorables (par exemple, par temps de pluie pour éviter une dilution de la culture). Les microalgues sont alors récupérées dans le réservoir et agitées par bullage en

attendant des conditions plus favorables. Ce mode de fonctionnement est encore utilisé aujourd'hui.

Durant les décennies suivantes, plusieurs améliorations successives ont été apportées au principe de base. Premièrement, au lieu d'avoir un plan unique, les nouvelles générations de systèmes cascade sont composées de deux plans inclinés en sens inverse. Désormais, lorsque la culture a fini son parcours sur le premier plan, elle est redirigée vers le second et ce n'est qu'à la fin de ce second plan qu'elle est récupérée par le bac de collecte pour être pompée et réintroduite en tête du premier plan. Cela permet de réduire le volume non éclairé du réacteur qui a une influence négative sur la productivité (voir Section 2.4.2.2). Deuxièmement, l'inclinaison du plan a été réduite de 3% à 1.7%, et les marches sur les plans ont été successivement remplacés par des déflecteurs puis par des tubes disposés perpendiculairement à l'écoulement de la culture. Cela a permis de réduire d'avantage l'épaisseur de culture (< 1 cm) et de faciliter la maintenance. Finalement des expériences ont montré que les microalgues pouvaient être cultivées sur des plan lisses et le retrait des tubes a permis de réduire encore l'épaisseur de culture à environ 6 mm ou 8 mm. Cette faible épaisseur a permis d'atteindre de très hautes concentrations en biomasses (jusqu'à 40 g.L^{-1} pour une culture en batch dans le sud de la Grèce) (Lívanský et Doucha 2000).

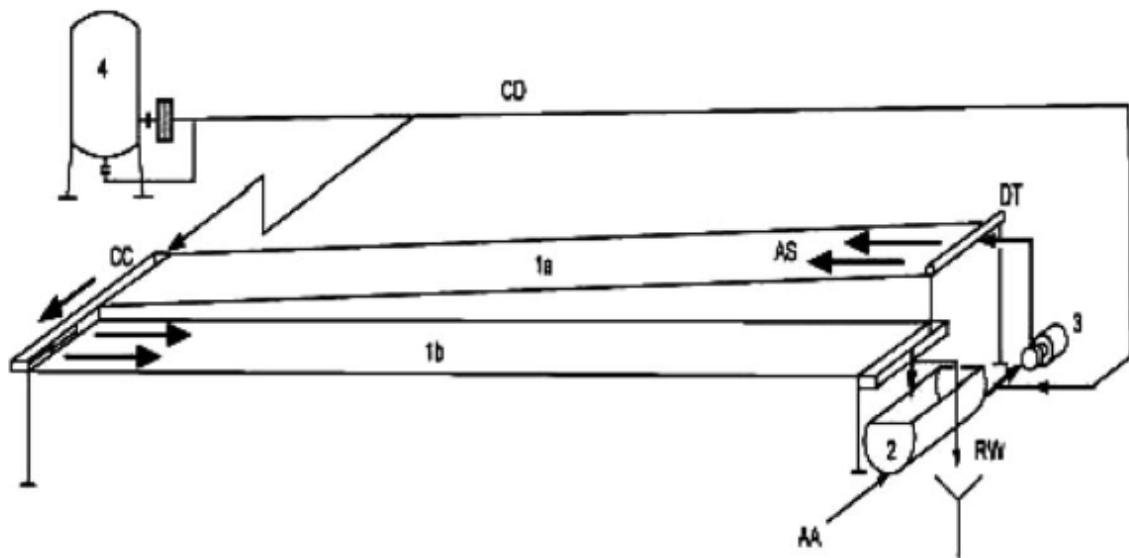


FIGURE 1.6 – Schéma de principe du photobioréacteur cascade Tchèque (Doucha et Lívanský 2006).

Les productivités surfaciques annoncées par la plupart des études pour ce type de systèmes se situent entre $20 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ et $30 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$. Lors de journées ensoleillées

d’été, des productivités surfaciques pouvant atteindre $55 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ ont été mesurées (Masojídek et al. 2015).

Le système cascade présente donc de nombreux avantages, notamment celui de cultiver, en extérieur, des microalgues fortement concentrées. Les économies d’énergie recherchées pour les procédés de bioraffinage peuvent donc être réalisées. Cependant, bien que la culture ait été densifiée, le besoin en eau douce n’a pas été réduit. En effet, les souches cultivées sur ce réacteur sont principalement *Chlorella* et *Scenedesmus*, deux microalgues d’eau douce. Par ailleurs, la température du milieu de culture est régulée, en journée, par évaporation. Ce mode de régulation est présenté comme un avantage par la littérature (ce mode de contrôle est « passif ») (Acién et al. 2017; Grivalský et al. 2019; Masojídek et al. 2015), mais cela cache en réalité une consommation importante en eau douce. Or, l’actualité de l’été 2022 rappelle qu’à cause du réchauffement climatique, des sécheresses toujours plus fréquentes et plus intenses sont attendues pour les prochaines années (Pörtner et Roberts 2022). L’eau douce est alors une ressource rare à économiser. Si elle vient à manquer, son accès peut être restreint à quelques secteurs d’activités tels que l’agriculture. Ainsi, les cultures de microalgues ne pourrait être menées en période de sécheresse. Puisque cela risque principalement de survenir en été, lorsque l’ensoleillement et la productivité du système de culture sont maximaux, l’arrêt de la culture pendant ces périodes impacte très fortement la production annuelle de biomasse. Une telle perte en eau douce n’est donc pas acceptable pour la conception d’un procédé économe en ressources recherchée dans ces travaux de thèse.

Pour limiter cette perte en eau, une solution simple consiste à couvrir le système de culture par une vitre transparente. Cependant, comme il sera démontré dans les chapitres suivants, cela a une incidence majeure sur le fonctionnement du procédé. Cette influence doit être soigneusement étudiée afin de pouvoir optimiser le photobioréacteur.

1.3.3.1 Le prototype Algofilm 0.33 m²

Au cours de ses travaux de thèse, Le Borgne (2011) s’est employé à concevoir, développer et caractériser un photobioréacteur intensifié en volume reposant sur le même principe que les systèmes cascade. L’objectif était de créer un réacteur permettant la production de vecteurs énergétiques à partir de microalgues. Le PBR construit a été nommé Algofilm. Un résumé des principaux résultats de cette thèse est présenté ici.

En premier lieu, une modélisation de l’hydrodynamique du réacteur a été faite pour permettre une conception et un dimensionnement rationnel du réacteur. Cette modélisa-

tion a été épaulée par une pré-étude en maquette froide de l'établissement du film liquide sur différents matériaux. Les propriétés des matériaux à utiliser (hydrophilie, énergie de surface, aspérités, *etc.*) ainsi que des critères de dimensionnement ont ainsi pu être définis.

Suite à cette première étude, un prototype de 0.33 m² a été construit. Ici, la culture de microalgues s'écoule sur une plaque en acier inoxydable pliée dont l'inclinaison est réglable. Une vitre en verre, placée de façon étanche au dessus de cette plaque, permet d'isoler la culture de l'environnement extérieur. La circulation du liquide est assurée par une pompe et un tube de remontée qui le prélèvent depuis un bac de collecte situé à la base de la plaque inclinée. Ce réservoir permet également de placer les sondes nécessaires au contrôle de la culture ainsi que les entrées et sorties pour l'alimentation et le soutirage de la culture. En haut du plan, l'homogénéité du film liquide est assurée par un tube percé qui répartit le liquide sur toute la largeur de la plaque inox.

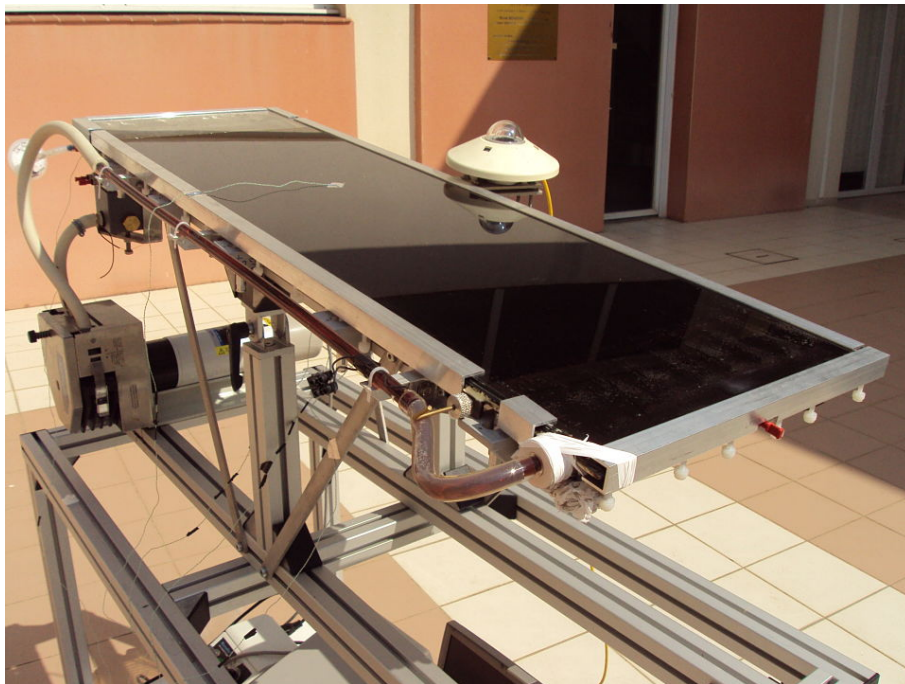


FIGURE 1.7 – Photographie du prototype Algofilm 0.33 m² (Le Borgne 2011).

Une fois la conception et la construction du photobioréacteur finies, des travaux ont permis de le caractériser. Sur ce photobioréacteur, une épaisseur comprise entre 1 mm et 2 mm a été mesurée, des concentrations élevées en biomasse étaient donc attendues. Plusieurs campagnes expérimentales menées avec un flux lumineux contrôlé ont permis de valider cette affirmation.

Tout d'abord, deux cultures ont été faites avec un flux lumineux constant de $120 \mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui correspond au flux moyen (sur 24 heures) d'une journée d'hiver (mois de janvier à Saint-Nazaire). La première des deux cultures était en mode batch, et malgré un flux lumineux faible, une concentration élevée ($30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) a été atteinte. La culture a cependant été arrêtée avant d'avoir atteint la photolimitation, cela laisse présager que des concentrations supérieures peuvent être obtenues si le batch est prolongé. La seconde culture a été menée en mode semi-continu (taux de dilution de 0.01 h^{-1}). Une concentration élevée (stabilisée à $13.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) et une productivité volumique importante ($3.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$) ont été obtenues.

Enfin, deux cultures ont été menées avec un flux solaire simulé. Le profil de lumière utilisé est représentatif d'une journée d'hiver (mois de janvier à Saint-Nazaire) et le flux moyen est le même que pour les cultures sous flux lumineux constant ($120 \mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). De nouveau, en mode batch, une concentration élevée ($21.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) a été atteinte. Comme pour la culture batch sous flux continu, l'expérience a été arrêtée avant d'avoir atteint la photolimitation. La périodicité du flux lumineux a cependant significativement impacté la croissance microalgale et donc la concentration maximale atteinte. En culture continue (même taux de dilution que précédemment : 0.01 h^{-1}), la culture s'est stabilisée à $12.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (productivité volumique de $3.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$). De nouveau, la périodicité du flux lumineux a eu un effet néfaste sur la concentration et la productivité volumique. À noter cependant que dans le cas d'une culture solaire réelle, cette alternance jour / nuit est subie.

Ces résultats démontrent que les performances élevées attendues du prototype 0.33 m^2 se vérifient expérimentalement. Une culture intensifiée de microalgues est donc possible avec cette technologie. Les résultats expérimentaux de Le Borgne (2011) sont cependant difficilement comparables à ceux annoncés pour les systèmes cascade tant les conditions de culture (et notamment d'éclairement) sont différentes. Ils sont néanmoins du même ordre de grandeur (concentration atteinte proche de $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ dans les deux cas).

Les travaux de Le Borgne (2011) ont également permis de déterminer, par la modélisation et l'expérience, plusieurs autres paramètres importants pour le procédé de culture. Le temps de séjour dans chacune des parties du réacteur a été mesuré et est conforme à ce qui a été défini au moment du dimensionnement. Les coefficients d'échange gazeux entre la culture et la phase gaz qui se trouve entre le liquide et la vitre ont également été mesurés et modélisés.

Enfin, des expériences ont montré que sous flux solaire réel, le réacteur tend à surchauffer et à atteindre des températures létales pour les microalgues ($> 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Pour

résoudre ce problème, un modèle thermique du photobioréacteur a été établi et validé expérimentalement. Il permet notamment de tester, par simulation, différentes solutions de contrôle passif de la température qui permettent de réduire la consommation énergétique du système de régulation thermique. Plusieurs ont été expérimentalement testées, notamment l'utilisation de verres fonctionnels (vitrage dont la transmittance UV/IR est réduite) et l'utilisation de matériaux à changement de phase.

L'ensemble des résultats de Le Borgne (2011) permettent de mieux comprendre les enjeux de la technologie et ouvrent la voie à de nouvelles optimisations. De plus, les modèles créés spécialement pour Algofilm sont des outils précieux pour l'optimiser et procéder à une montée en échelle. Des travaux restent cependant nécessaires. Notamment, comme évoqué par Le Borgne (2011), l'utilisation de cette technologie en conditions solaires réelles amène à de nouvelles problématiques liées aux variations de l'intensité lumineuse au cours de la journée.

1.3.3.2 Le pilote Algofilm 10 m²

Suite aux travaux de Le Borgne (2011), un autre photobioréacteur, basé sur la même technologie, a été construit sur la plateforme Algosolis (Saint Nazaire, France).

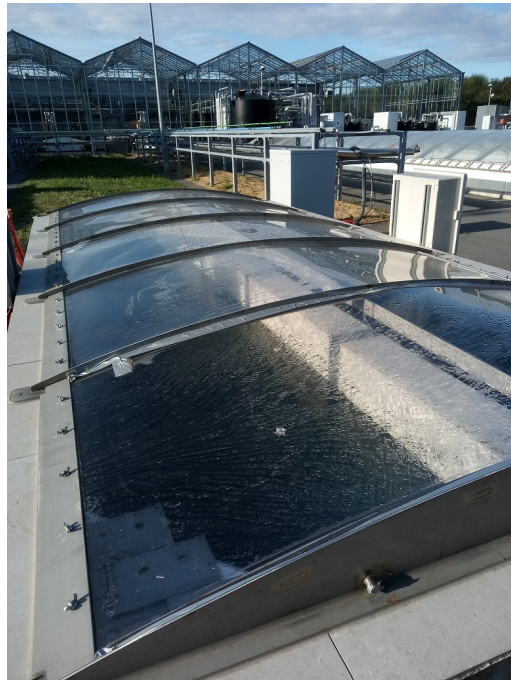


FIGURE 1.8 – Photographie du pilote Algofilm 10 m².

Bien qu'il repose sur le même principe, des différences notables existent. Tout d'abord, le réacteur est installé en extérieur. Il utilise donc la lumière solaire contrairement au prototype 0.33 m² qui était utilisé sous lumière contrôlée. Ensuite, l'hydrodynamique a été modifiée. Le plan d'écoulement n'est plus en acier inoxydable mais en céramique. Les propriétés de ce nouveau support d'écoulement ont été choisies à partir des critères de mouillabilité définis par Le Borgne (2011) pour permettre une répartition adéquate du film liquide. De plus, le PBR est désormais composé de deux plans inclinés fonctionnant en sens inverse. Leur pente est de 0.7%. La justification est la même que pour les réacteurs cascade, cela permet de réduire le volume sombre du réacteur. Le réacteur est placé sur une dalle de béton de 45 cm d'épaisseur, elle même posée sur le sol. Cette dalle a une influence majeure sur le comportement thermique du réacteur qui sera discutée dans les Chapitres 2 et 4. Des échangeurs ont été installés dans cette dalle (plancher chauffant / refroidissant) pour pouvoir, si besoin, réguler activement la température du milieu de culture. Enfin, le PBR n'est pas couvert d'une vitre en verre mais par un ensemble de plaques en PMMA.



FIGURE 1.9 – Photographie des utilitaires du pilote Algofilm 10 m².

Similairement au prototype 0.33 m², l'instrumentation ainsi que les entrées et sorties se trouvent au niveau du bac de collecte et se font via deux canules coudées (à l'intérieur

du bac). Elles définissent un niveau haut et un niveau bas de liquide dans le réacteur, ce qui permet de contrôler le volume en circulation dans le PBR.

Des piquages ont été installés dans le tuyau reliant le bac de collecte à la pompe péristaltique. Ils permettent l'installation de deux sondes pour le suivi en ligne du procédé (oxygène dissous et pH).

L'arrivée de gaz chargé en CO₂ se trouve dans la partie verticale du tuyau reliant la pompe et le bac de collecte. Le bullage ne se fait donc que sur une toute petite partie de la surface du bac et ne permet pas un mélange efficace de la culture si la pompe est arrêtée. Ainsi, contrairement aux photobioréacteurs cascade, pour éviter une sédimentation des microalgues dans le bac de collecte, le pilote Algofilm 10 m² fonctionne en continu, jour et nuit.

Bien que similaire au prototype Algofilm 0.33 m², le pilote 10 m² présente des spécificités qui lui sont propres. Une nouvelle caractérisation ainsi qu'une modélisation spécifique de ce PBR sont donc nécessaires et sont l'objet de ce manuscrit.

Conclusion

La biomasse microalgale a de nombreuses applications en industrie (alimentation, pharmacie, énergie, *etc.*), et sa production nécessite le développement de procédés de culture spécifiques. Le contexte du réchauffement climatique impose à ces procédés d'être le plus sobre possible pour être viables. Ils doivent donc consommer le moins de ressources possible (notamment eau et énergie).

Afin de réduire ces consommations, l'augmentation de la concentration en biomasse est un vecteur d'optimisation intéressant. Cela permet de diminuer le volume de culture à traiter pour obtenir une masse de microalgues donnée. Le besoin en eau et la consommation énergétique de la plupart des opérations unitaires (régulation thermique, pompage, concentration, séchage, *etc.*) sont ainsi réduits. Pour augmenter la concentration en biomasse, le système de culture utilisé doit être intensifié : il doit proposer une très grande surface spécifique éclairée. Du point de vue géométrique, cela revient à réduire l'épaisseur de la culture.

De nombreux systèmes de culture ont été décrits par la littérature. Ceux industrialisés à grande échelle sont, pour la plupart, ouverts, extensifs et n'offrent pas les leviers d'optimisation nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. Une technologie ouverte cependant se démarque des autres : le système cascade. Grâce à un principe simple reposant sur l'établissement d'un film ruisselant, ces systèmes permettent, à grande échelle, d'obtenir de très faibles épaisseurs (< 1 cm). Ils ouvrent donc la voie à de très hautes concentrations en biomasse (> 10 g.L⁻¹). Cependant, en exposant la culture à l'environnement extérieur, ils limitent la variété de souches cultivables à celles qui sont résistantes à la contamination. De plus, son importante surface spécifique exposée à l'air induit d'importantes pertes en eau par évaporation, ce qui est incompatible avec les objectifs poursuivis.

Sur le même principe, Le Borgne (2011) a développé un prototype clos nommé Algo-film. En plus de corriger les problèmes de contamination et d'évaporation des systèmes cascade, sa conception permet de réduire l'épaisseur de culture à 1 mm ou 2 mm. Cela a permis d'expérimentalement atteindre de très hautes performances (concentration en biomasse et productivité volumique élevées) en photoautotrophie. Les travaux de Le Borgne (2011) ont également permis de modéliser et caractériser ce PBR.

Sur la base de ces travaux, un second photobioréacteur de 10 m² a été construit sur la plateforme Algosolis. Bien que le principe de fonctionnement soit similaire, ce PBR possède des spécificités qui imposent une nouvelle caractérisation, une modélisation

dédiée et une validation expérimentale. Ces travaux ont été entrepris dans cette thèse et les résultats sont décrits dans ce manuscrit.

Cette thèse a pour but d'étudier, modéliser, valider et optimiser le fonctionnement solaire de la technologie intensifiée Algofilm. L'ensemble des outils de modélisation qui ont permis d'optimiser la conception et la conduite du procédé sont développés au Chapitre 2. Le Chapitre 3 présente les campagnes expérimentales qui ont permis de valider les modèles et les performances du pilote 10 m² construit sur la plateforme Algosolis. Enfin, le Chapitre 4 montre comment l'utilisation des modèles décrits au Chapitre 2 permet, grâce à des simulations, d'optimiser la conception de la technologie Algofilm.

BIBLIOGRAPHIE

- Acién, F. et al. (2017), « Photobioreactors for the Production of Microalgae », in : *Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts*, Elsevier, p. 1-44, ISBN : 978-0-08-101023-5, DOI : 10.1016/B978-0-08-101023-5.00001-7.
- Almani, S. (2021), « Experimental and Numerical Study of the Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer in a Thin Gap Bubble Column in Presence of Newtonian or Non-Newtonian Liquid Phase », URL : <http://www.theses.fr/2021NANT4086/document>.
- Bonnanfant, M. (2020), « Étude Des Mécanismes de Conversion Photosynthétique de l'énergie Lumineuse Par *Chlorella Vulgaris* En Photobioréacteur Solaire », URL : <http://www.theses.fr/2020LEMA1015/document>.
- Breuer, G. et al. (1^{er} nov. 2012), « The Impact of Nitrogen Starvation on the Dynamics of Triacylglycerol Accumulation in Nine Microalgae Strains », in : *Bioresource Technology* 124, p. 217-226, ISSN : 0960-8524, DOI : 10.1016/j.biortech.2012.08.003.
- Carvalho, A. P., L. A. Meireles et F. X. Malcata (2006), « Microalgal Reactors : A Review of Enclosed System Designs and Performances », in : *Biotechnology Progress* 22.6, p. 1490-1506, ISSN : 87567938, 15206033, DOI : 10.1002/bp060065r.
- Chen, C.-Y. et al. (jan. 2011), « Cultivation, Photobioreactor Design and Harvesting of Microalgae for Biodiesel Production : A Critical Review », in : *Bioresource Technology* 102.1, p. 71-81, ISSN : 09608524, DOI : 10.1016/j.biortech.2010.06.159.
- Chisti, Y. (2016), « Large-Scale Production of Algal Biomass : Raceway Ponds », in : *Algae biotechnology : Products and processes*, p. 21-40.
- Cornet, J.-F. (jan. 2010), « Calculation of Optimal Design and Ideal Productivities of Volumetrically Lightened Photobioreactors Using the Constructal Approach », in : *Chemical Engineering Science* 65.2, p. 985-998, ISSN : 00092509, DOI : 10.1016/j.ces.2009.09.052.
- Decamp, A. (2020), « Etude Des Conditions d'accumulation et de Production de Polysaccharides Solubles (Ou Exopolysaccharides - EPS) Chez Des Microalgues Marines Cultivées En Photobioréacteur », URL : <http://www.theses.fr/2020NANT4035/document>.
- Doucha, J. et K. Lívanský (22 nov. 2006), « Productivity, CO₂/O₂ Exchange and Hydraulics in Outdoor Open High Density Microalgal (*Chlorella* Sp.) Photobioreactors

- Operated in a Middle and Southern European Climate », in : *Journal of Applied Phycology* 18.6, p. 811-826, ISSN : 0921-8971, 1573-5176, DOI : 10.1007/s10811-006-9100-4.
- Doucha, J. et K. A. R. E. L. Lívanský (1995), « Novel Outdoor Thin-Layer High Density Microalgal Culture System : Productivity and Operational Parameters », in : p. 19.
- Fonseca e Sousa, C. A. da (2013), *Oxygen Accumulation in Photobioreactors*, 121 p., ISBN : 978-94-6173-554-6.
- Grivalský, T. et al. (sept. 2019), « Development of Thin-Layer Cascades for Microalgae Cultivation : Milestones (Review) », in : *Folia Microbiologica* 64.5, p. 603-614, ISSN : 0015-5632, 1874-9356, DOI : 10.1007/s12223-019-00739-7.
- IPCC (2022), *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers*, Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press, p. 3-33, ISBN : 978-1-00-932584-4.
- Kazbar, A. et al. (mai 2019), « Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Microalgal Culture in Photobioreactors », in : *Algal Research* 39, p. 101432, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2019.101432.
- Kazbar, A. (2018), « Etude de l'impact de La Concentration En Oxygène Dissous et La Présence d'une Fraction Sombre Sur La Performance Des Photobioréacteurs », URL : <http://www.theses.fr/2018NANT4007/document>.
- Le Borgne, F. (2011), « Développement d'un photobioréacteur solaire intensifié en vue de la production à grande échelle de biomasse microalgale », Université de Nantes, 1 vol. (291 f.)
- Le Gouic, B. (2013), « Analyse et Optimisation de l'apport de Carbone En Photobioréacteur », 1 vol. (229 p.)
- Legrand, J., A. Artu et J. Pruvost (2021), « A Review on Photobioreactor Design and Modelling for Microalgae Production », in : *Reaction Chemistry & Engineering* 6.7, p. 1134-1151, ISSN : 2058-9883, DOI : 10.1039/D0RE00450B.
- Lívanský, K. et J. Doucha (9 mars 2000), « Productivity of the Microalga *Chlorella Kessleri* in Outdoor Open Thin-Layer Batch Cultures », in : *Algological Studies/Archiv für Hydrobiologie, Supplement Volumes* 97, p. 103-122, ISSN : 0342-1120, DOI : 10.1127/algol_stud/97/2000/103.
- (1^{er} nov. 2003), « Evaluation of Dissolved Oxygen (DO) Profiles in Microalgal Suspension on Outdoor Thin-Layer Cultivation Surface », in : *Algological Studies/Ar-*

BIBLIOGRAPHIE

- chiv für Hydrobiologie, Supplement Volumes* 110, p. 151-165, ISSN : 0342-1120, DOI : 10.1127/1864-1318/2003/0110-0151.
- Masojídek, J. et O. Práil (déc. 2010), « The Development of Microalgal Biotechnology in the Czech Republic », in : *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 37.12, p. 1307-1317, ISSN : 1367-5435, 1476-5535, DOI : 10.1007/s10295-010-0802-x.
- Masojídek, J. et al. (2015), « Thin-Layer Systems for Mass Cultivation of Microalgae : Flat Panels and Sloping Cascades », in : *Algal Biorefineries : Volume 2 : Products and Refinery Design*, sous la dir. d'A. Prokop, R. K. Bajpai et M. E. Zappi, Cham : Springer International Publishing, p. 237-261, ISBN : 978-3-319-20200-6, DOI : 10.1007/978-3-319-20200-6_7.
- Milledge, J. J. (mars 2011), « Commercial Application of Microalgae Other than as Biofuels : A Brief Review », in : *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 10.1, p. 31-41, ISSN : 1569-1705, 1572-9826, DOI : 10.1007/s11157-010-9214-7.
- Naik, S. et al. (fév. 2010), « Production of First and Second Generation Biofuels : A Comprehensive Review », in : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.2, p. 578-597, ISSN : 13640321, DOI : 10.1016/j.rser.2009.10.003.
- Pörtner, H.-O. et D. C. Roberts (2022), « Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability », in.
- Pruvost, J. et al. (jan. 2016), « Microalgae Culture in Building-Integrated Photobioreactors : Biomass Production Modelling and Energetic Analysis », in : *Chemical Engineering Journal* 284, p. 850-861, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2015.08.118.
- Pruvost, J. et J.-F. Cornet (14 nov. 2012), « 10 Knowledge Models for the Engineering and Optimization of Photobioreactors », in : *Microalgal Biotechnology : Potential and Production*, sous la dir. de C. Posten et C. Walter, DE GRUYTER, p. 181-224, ISBN : 978-3-11-022501-3, DOI : 10.1515/9783110225020.181.
- Raven, J. A. et R. J. Geider (déc. 1988), « Temperature and Algal Growth », in : *New Phytologist* 110.4, p. 441-461, ISSN : 0028-646X, 1469-8137, DOI : 10.1111/j.1469-8137.1988.tb00282.x.
- Razzak, S. A. et al. (nov. 2013), « Integrated CO₂ Capture, Wastewater Treatment and Biofuel Production by Microalgae Culturing A Review », in : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, p. 622-653, ISSN : 13640321, DOI : 10.1016/j.rser.2013.05.063.
- Rearte, T. A. et al. (avr. 2021), « Photosynthetic Performance of *Chlorella Vulgaris* R117 Mass Culture Is Moderated by Diurnal Oxygen Gradients in an Outdoor Thin Layer

- Cascade », in : *Algal Research* 54, p. 102176, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2020.102176.
- Richmond, A. (2008), *Handbook of Microalgal Culture : Biotechnology and Applied Phycology*, John Wiley & Sons.
- Setlk, I., V. Sust et I. Malek (1970), « Dual Purpose Open Circulation Unit for Large Scale Production of Algae in Temperate Zones. I », in : *Basic design considerations and scheme of pilot plant. Algolog Stud (Trebon)* 1, p. 111-164.
- Singh, S., B. N. Kate et U. C. Banerjee (2005), « Bioactive Compounds from Cyanobacteria and Microalgae : An Overview », in : *Critical reviews in biotechnology* 25.3, p. 73-95.
- Souliès, A. (2014), « Contribution à l'étude hydrodynamique et à la modélisation des photobioréacteurs à haute productivité volumique », in : *r l*, p. 210.
- Spolaore, P. et al. (fév. 2006), « Commercial Applications of Microalgae », in : *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101.2, p. 87-96, ISSN : 13891723, DOI : 10.1263/jbb.101.87.
- Thobie, C. et al. (déc. 2017), « Global Characterization of Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer in a Thin-Gap Bubble Column Intended for Microalgae Cultivation », in : *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification* 122, p. 76-89, ISSN : 02552701, DOI : 10.1016/j.cep.2017.10.009.
- Todisco, E. et al. (mai 2022), « A Dynamic Model for Temperature Prediction in a Façade-Integrated Photobioreactor », in : *Chemical Engineering Research and Design* 181, p. 371-383, ISSN : 02638762, DOI : 10.1016/j.cherd.2022.03.017.
- Todisco, É. (2019), « Microalgae Growth Optimization in Biofaçade Photobioreactors ».
- Torzillo, G. et A. Vonshak (12 avr. 2013), « Environmental Stress Physiology with Reference to Mass Cultures », in : *Handbook of Microalgal Culture*, sous la dir. d'A. Richmond et Q. Hu, Oxford, UK : John Wiley & Sons, Ltd, p. 90-113, ISBN : 978-1-118-56716-6 978-0-470-67389-8, DOI : 10.1002/9781118567166.ch6.
- Wollmann, F. et al. (déc. 2019), « Microalgae Wastewater Treatment : Biological and Technological Approaches », in : *Engineering in Life Sciences* 19.12, p. 860-871, ISSN : 1618-0240, 1618-2863, DOI : 10.1002/elsc.201900071.

DÉVELOPPEMENT THÉORIQUE POUR LA MODÉLISATION D'ALGOFILM

Introduction

En génie chimique, la conception d'un nouveau réacteur doit répondre à des impératifs de productivité tout en respectant les moyens alloués (financier, énergétique, encombrement *etc.*). La prédiction des performances du système en fonction des choix technologiques faits est alors primordiale pour définir des critères de décision objectifs et guider le dimensionnement du réacteur. Ces prédictions se basent usuellement sur des modèles mathématiques formulés par la recherche. L'ingénierie des photobioréacteurs (PBR) n'échappe pas à cette logique et des modèles spécifiques sont donc développés pour ces systèmes.

Pour maximiser la productivité d'un PBR, il faut optimiser les conditions de culture des microalgues. De multiples facteurs influent sur la croissance microalgale et sont à prendre en compte (lumière, température, pH, concentration en biomasse et en oxygène dissous *etc.*). L'évolution de ces paramètres au cours du temps dépend des conditions auxquelles le système est soumis, de sa conception et de son pilotage. En faisant varier, par modélisation, les différentes variables contrôlables, il est possible de définir leur valeur optimale. Cependant, tous les paramètres ne sont pas contrôlables. Par exemple, un PBR installé en extérieur est soumis aux cycles jour / nuit et aux variations météorologiques journalières et saisonnières (incontrôlables par nature). Les méthodes de dimensionnement et de pilotage doivent prendre en compte cette variabilité pour que le procédé soit résilient et performant. L'utilisation de modèles de connaissance est alors nécessaire.

Au cours de la thèse, plusieurs modèles et outils mathématiques ont été développés et utilisés pour guider les campagnes expérimentales et dimensionner un nouveau réacteur. Ils sont présentés dans ce chapitre.

2.1 Prévisions météorologiques

Les modèles utilisés dans ces travaux de thèse reposent sur plusieurs variables météorologiques (lumière, température ambiante, vitesse du vent *etc.*). La prédiction de ces variables n'est pas triviale et est l'objet de modèles spécialisés complexes. La plupart des études présentées ici peuvent se contenter de données météorologiques réelles passées (mesurées) ou fictives pour être menées (validation de modèle, optimisation du design d'Algofilm *etc.*). Cependant, certaines campagnes expérimentales menées en conditions réelles (voir Section 3.2.1.11) cherchent à optimiser la conduite du pilote en se basant sur les prédictions des modèles : des prévisions météorologiques sont alors nécessaires.

Dans ce cas, les prévisions issues des modèles de prédictions de MétéoFrance sont récupérées via les services INSPIRE et utilisées comme entrées pour les modèles. Ces services permettent le téléchargement des données de prévisions jusqu'à une échéance de +42h par pas de 1h (suffisant pour l'application visée). Plusieurs modèles sont disponibles. Les modèles à haute résolution (0.01° ou 0.025° selon les variables) centrés sur la France métropolitaine et les outre-mer nommés AROME ont été utilisés. Les données téléchargées se présentent sous forme d'une image raster 2D géoréférencée (format geotiff). Un exemple est donné par la Figure 2.1.

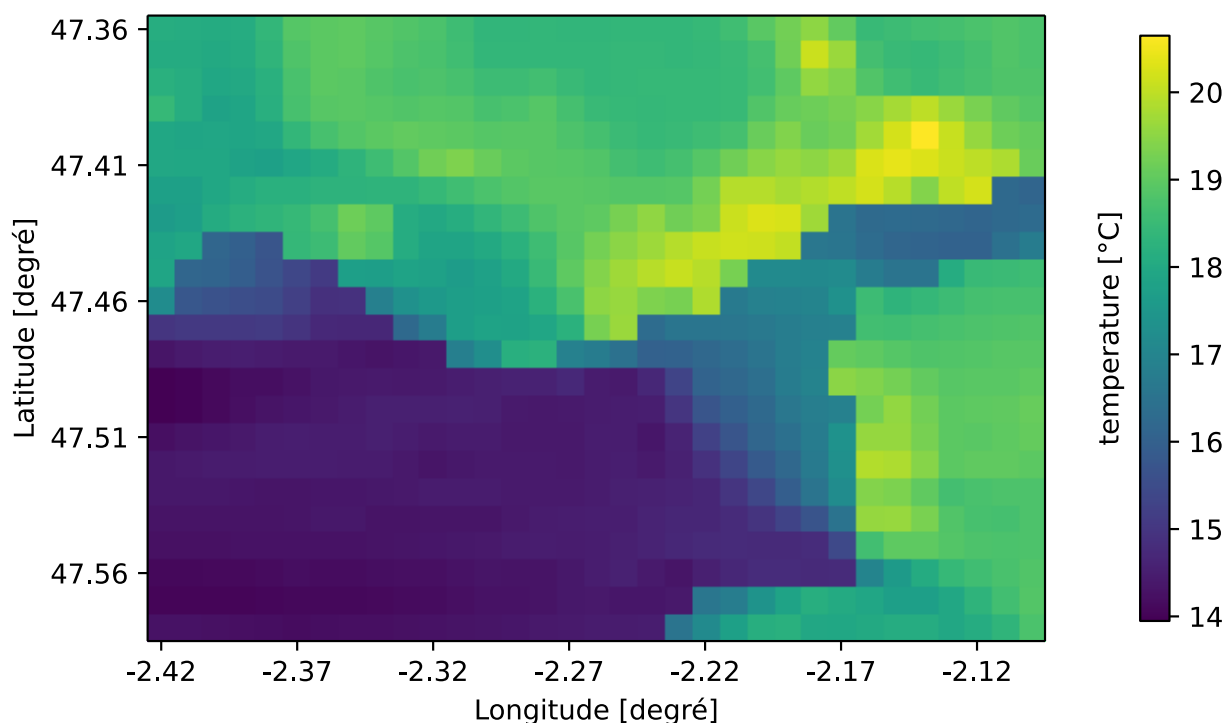


FIGURE 2.1 – Exemple de carte téléchargée depuis les services INSPIRE de Météofrance. Il s’agit de la température de l’air à 2m du sol prévue pour le 2022-05-01 15:00 par la simulation en date du 2022-05-01 12:00 (horizon h+3). La zone représente une surface d’environ 100 km² centrée sur la plateforme Algosolis (47.252 N -2.250 W).

Ces cartes doivent cependant être retravaillées pour pouvoir être utilisées par les modèles. Pour chacune des cartes téléchargées (une par simulation, par horizon de prédiction et par variable), la valeur du pixel aux coordonnées d’intérêt est récupérée. Avec l’ensemble des cartes, il est alors possible de recréer une série de données avec les différentes variables météorologiques (lumière, température ambiante, vent *etc.*) en fonction du temps. Météofrance recalcule ses prévisions toutes les trois heures. Lorsqu’il existe plusieurs prédictions pour une variable et un horizon de temps donnés, celle issue de la simulation la plus récente est utilisée.

2.2 Calcul de la position du soleil dans le ciel

L’angle d’incidence des rayons lumineux sur la surface de captation d’un procédé solaire a une grande influence sur ses performances (Reda et Andreas 2008). Dans le cas de la culture de microalgues, cela impacte la disponibilité de la lumière et sa pénétration

dans le volume de culture (voir Sections 2.3 et 2.4.1). Cela influe sur la conversion photosynthétique et donc sur la productivité du système. Même si cet angle d'incidence n'est pas contrôlable (pour un PBR tel que l'Algofilm 10 m²), cette donnée est nécessaire à la qualité des prédictions des modèles. Contrairement aux autres variables météorologiques (flux lumineux, température ambiante, vent *etc.*), cette donnée ne dépend que de la position du soleil dans le ciel. Des calculs astronomiques permettent d'obtenir cette variable à partir d'une date et d'une position GPS, pour des horizons de temps passés et futurs.

Dans ce manuscrit, l'algorithme "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications" (SPA) (Reda et Andreas 2008) est utilisé lorsque cette donnée est nécessaire aux calculs. Une précision de $\pm 0.0003^\circ$, largement suffisante pour les applications visées ici, est annoncée par les auteurs.

2.3 Approche simplifiée de la modélisation de la transmittance d'un vitrage

Le vitrage utilisé pour couvrir un photobioréacteur est un point clef de sa conception. Il doit répondre à plusieurs contraintes techniques (durabilité, résistance aux aléas climatiques, manipulable par un opérateur seul *etc.*). Sa transmittance, en particulier, est sa caractéristique clef : elle conditionne la quantité de lumière disponible pour le milieu de culture. Elle impacte donc la productivité du système mais également sa température (Masojídek et al. 2003 ; Nwoba et al. 2019, 2020).

Cette section propose des outils permettant de calculer la transmittance d'un vitrage en fonction de sa structure (simple ou double vitrage), du matériau utilisé et de la présence de gouttelettes de condensation sur sa surface interne. Même si le pilote Algofilm reste l'application visée, ces outils sont utilisables pour tous les photobioréacteurs couverts par un vitrage plan.

2.3.1 Absorbance d'un matériau transparent

Lorsqu'un flux lumineux traverse un milieu, une fraction de ce rayonnement peut être absorbée. Pour modéliser cette absorption, la loi de Beer-Lambert sera utilisée ici (Swinehart 1962) :

$$A = -\log(\tau_{b-l}) = C \cdot \epsilon \cdot L \quad (2.1)$$

avec A [-] l'absorbance, τ_{b-l} [-] la transmittance, C [mol.m⁻³] la concentration en espèces absorbantes, ϵ [m³.mol⁻¹.m⁻¹] le coefficient d'extinction molaire, et L [m] l'épaisseur de milieu traversé.

Dans le cas d'un vitrage, il n'y a pas de concentration en espèce absorbante à prendre en compte, l'équation peut alors être reformulée :

$$\tau_{b-l} = \exp(-kL) \quad (2.2)$$

avec k [m⁻¹] le coefficient d'absorption du matériau, un facteur dépendant de la longueur d'onde.

2.3.1.1 Coefficient d'absorption du PMMA

Le PMMA (polyméthacrylate de méthyle) est un polymère plastique couramment utilisé pour la construction de PBR (Artu 2016). C'est le matériau qui a été choisi pour la couverture d'Algofilm. Son coefficient d'absorption a été mesuré par Boulet et al. (2014) sur un large spectre (voir Figure 2.2). Les données présentées dans cette étude seront utilisées dans le reste du manuscrit. L'étude montre que le PMMA absorbe très peu de lumière entre 400 nm et 700 nm : le domaine de longueurs d'ondes nécessaires à la croissance microalgale. En revanche, le PMMA est très absorbant dans les infrarouges. Dans une application solaire, puisque ces longueurs d'onde représentent environ 50% de la puissance lumineuse reçue (ASTM 2012), une fraction importante de cette énergie sera absorbée et contribuera au réchauffement du vitrage.

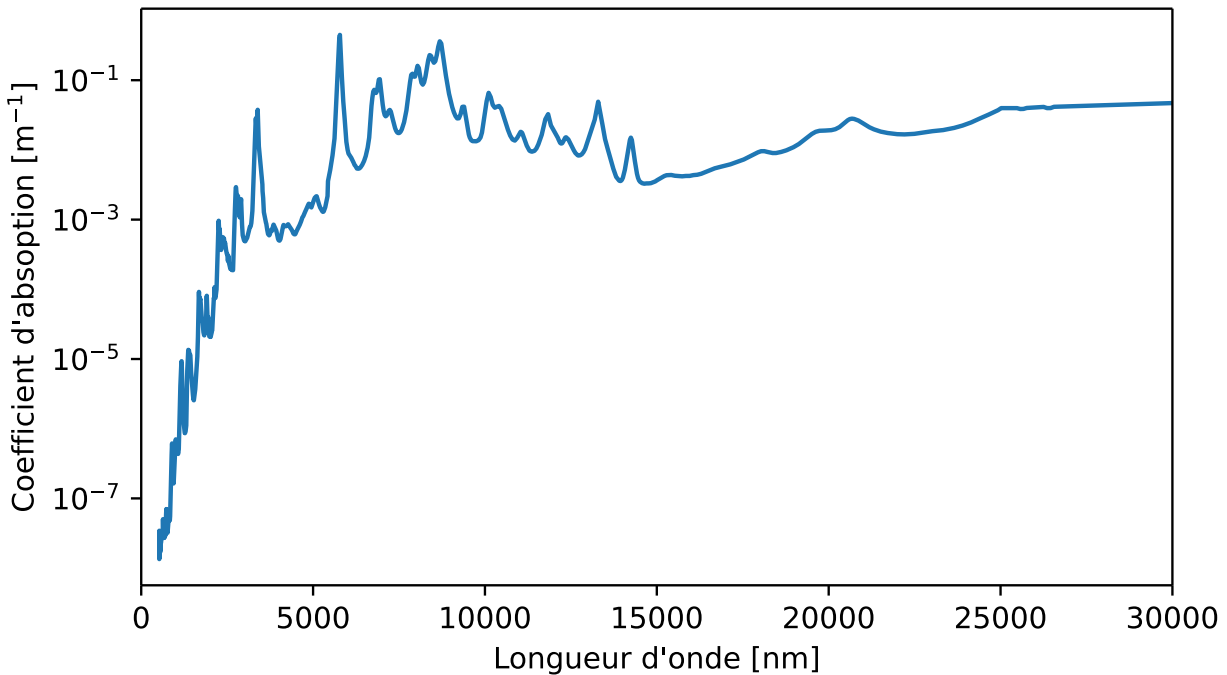


FIGURE 2.2 – Coefficient d'absorption du PMMA en fonction de la longueur d'onde (Boulet et al. 2014).

2.3.1.2 Coefficient d'absorption de l'eau

Lors du fonctionnement d'un photobioréacteur clos ayant une phase gazeuse (raceway clos, Algofilm *etc.*), une partie du milieu de culture s'évapore et se condense sous forme de gouttelettes sur la surface optique (Artu 2016 ; Mangi 2021). Ces gouttes, tout comme le vitrage, interagissent avec le flux lumineux et doivent être prises en compte dans la modélisation de la transmittance du vitrage (voir Section 2.3.3). Le coefficient d'absorption de l'eau a été mesuré par de multiples études et leurs résultats ont été recensés et compilés par Hale et Query (1973). Les données présentées dans cet article seront utilisées dans le reste du manuscrit, et sont représentées par la Figure 2.3.

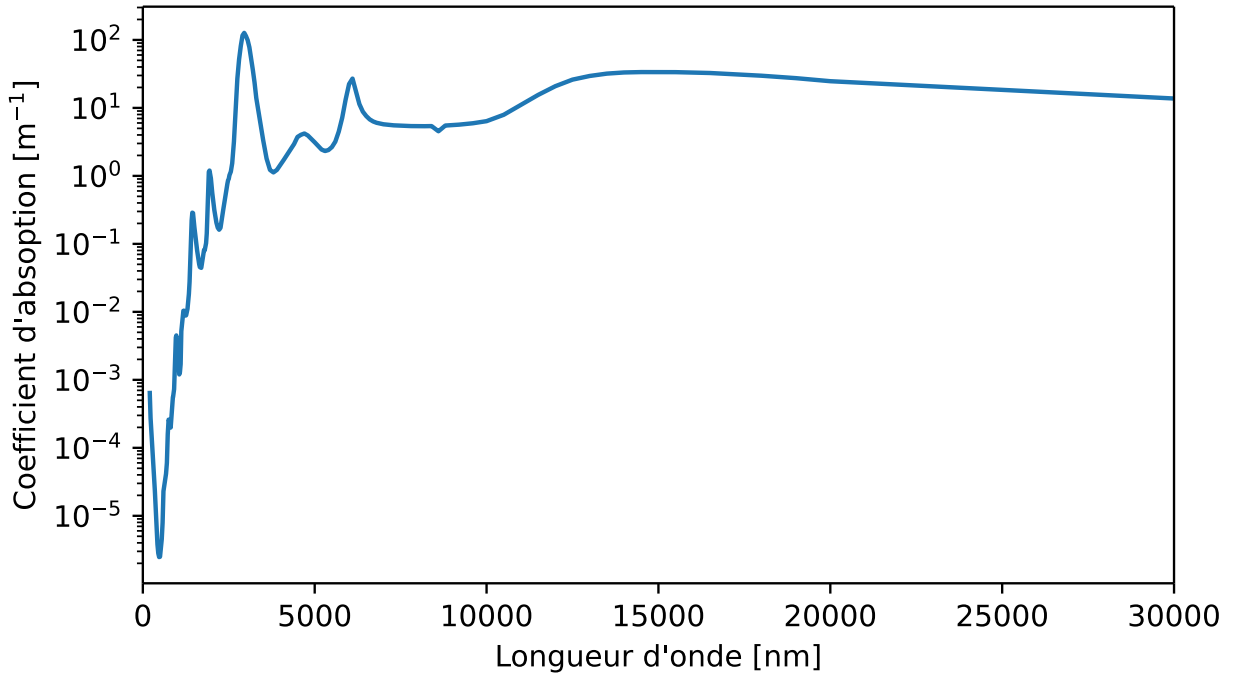


FIGURE 2.3 – Coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde (Hale et Querry 1973).

2.3.2 Transmittance d'un dioptre

Lorsqu'un flux lumineux atteint l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction différents (un dioptre), une partie de ce flux est transmise, l'autre est réfléchi. Ce phénomène peut être modélisé par des relations d'optique géométrique décrites dans cette section. Pour aider à la modélisation de la transmittance des objets étudiés ici, cette partie s'appuie sur le modèle du rayon lumineux qui est une abstraction du parcours de la lumière à travers une série de milieux et d'obstacles. Par soucis de simplicité, il sera par la suite implicitement supposé que les milieux traversés sont homogènes et isotropes. Les dimensions géométriques sont également beaucoup plus grandes que les longueurs d'onde : les interférences peuvent donc être négligées.

2.3.2.1 Équation de Snell-Descartes

Lorsqu'un rayon lumineux atteint un dioptre, une fraction de ce rayon est réfléchi et la fraction complémentaire est transmise et déviée (voir Figure 2.4). Cette déviation dépend des indices de réfraction des deux milieux et de l'angle d'incidence du rayon (l'angle θ_i formé entre le rayon incident et la normale du dioptre).

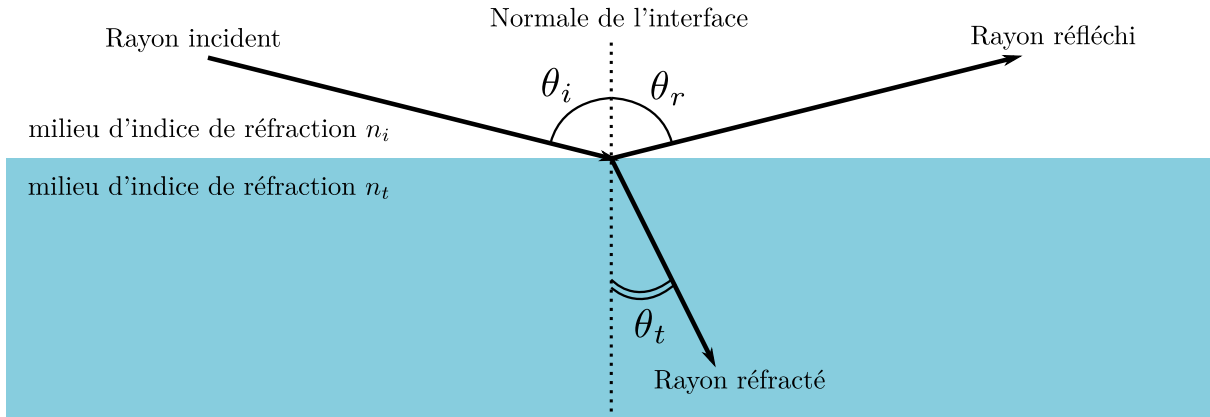


FIGURE 2.4 – Réflexion et réfraction d'un rayon à l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction différents.

La loi de Snell-Descartes relie ces angles par la relation suivante (Modest 2013) :

$$n_i \cdot \sin \theta_i = n_t \cdot \sin \theta_t \quad (2.3)$$

avec n_i et n_t [-] les indices de réfraction des milieux de part et d'autre du dioptre, θ_i et θ_t [rad] les angles formés entre la normale de l'interface et les rayons incidents et réfractés.

Cette loi stipule également que l'angle entre la normale au dioptre et le rayon réfléchi (angle de réflexion : θ_r) est égal à l'angle d'incidence :

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.4)$$

Ces quatre vecteurs (incident, réfléchi, réfracté et normale au dioptre) appartiennent au même plan : le plan d'incidence. Dans la plupart des cas, le problème se réduit donc à un problème à deux dimensions.

Il existe des cas où l'Équation 2.3 n'a pas de solution : si $n_i > n_t$ et si l'angle d'incidence est suffisamment grand ($\theta_i > \arcsin\left(\frac{n_t}{n_i}\right)$). Dans ce cas, le rayon ne traverse pas le dioptre et est totalement réfléchi (réflexion totale).

2.3.2.2 Les équations de Fresnel

L'objectif de cette partie n'est pas seulement de décrire le chemin parcouru par les rayons lumineux, mais aussi de calculer la fraction transmise. Pour cela, les équations de Fresnel sont utilisées. Elles relient la fraction du flux réfléchi à l'angle d'incidence, l'angle de réfraction, aux indices de réfraction des deux milieux et à la polarisation de la lumière.

Ici, \parallel et \perp désignent les deux composantes du champs électrique de la lumière (respectivement la composante parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence). Les coefficients de réflexion s'écrivent alors (Modest 2013) :

$$r_{\parallel} = \frac{n_r \cdot \cos \theta_i - n_i \cdot \cos \theta_t}{n_i \cdot \cos \theta_r + n_t \cdot \cos \theta_i} \quad (2.5)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cdot \cos \theta_i - n_t \cdot \cos \theta_t}{n_i \cdot \cos \theta_i + n_t \cdot \cos \theta_t} \quad (2.6)$$

avec r_{\parallel} et r_{\perp} les coefficients de réflexion pour les ondes \parallel et \perp respectivement.

Les réflectances ρ_{\parallel} et ρ_{\perp} du dioptre sont déduites des Équations 2.5 et 2.6 (Modest 2013) :

$$\rho_{\parallel} = r_{\parallel}^2 \quad (2.7)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp}^2 \quad (2.8)$$

Les sources lumineuses considérées dans ce manuscrit (soleil ou LEDs) ne sont pas polarisées. Plus exactement, elles sont constituées d'une superposition de polarisations aléatoires. La réflectance globale ρ du dioptre est alors la moyenne des réflectances pour les ondes \parallel et \perp :

$$\rho = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}) \quad (2.9)$$

La transmittance d'un dioptre est définie comme la fraction complémentaire à sa réflectance :

$$\tau = 1 - \rho \quad (2.10)$$

2.3.2.3 Transmittance d'un milieu et d'un dioptre

Lorsqu'un rayon traverse un milieu absorbant et dioptre, celui-ci a en partie été absorbé et en partie réfléchi. La fraction transmise du rayon est alors obtenue par le produit des Équations 2.2 et 2.10 :

$$\tau_{milieu+diopre} = \tau \cdot \tau_{b-l} = \tau \cdot \exp(-kL) \quad (2.11)$$

La fraction réfléchie traverse deux fois le milieu absorbant (à l'aller et au retour), ainsi la réflectance du système milieu + dioptre est :

$$\rho_{\text{milieu+dioptre}} = \rho \cdot \tau_{b-l}^2 = \rho \cdot \exp(-2kL) \quad (2.12)$$

2.3.2.4 Transmittance d'une série de dioptres parallèles

Un vitrage est constitué d'une série de dioptres, par exemple, un vitrage simple est composé de deux interfaces (air / vitre et vitre / air). Ces dioptres se renvoient mutuellement une fraction du flux incident (réflexions internes). La transmittance globale du vitrage est alors légèrement différente du simple produit des transmittances des dioptres (voir Figure 2.5).

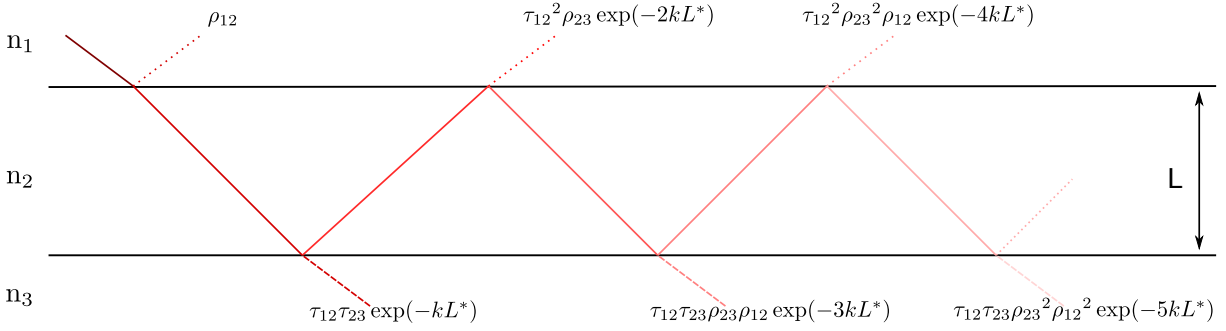


FIGURE 2.5 – Exemple de réflexions multiples internes au sein d'un simple vitrage.

En appliquant les équations 2.2, 2.9 et 2.10 au cas d'un simple vitrage, les relations suivantes sont obtenues :

$$\tau_{123} = \tau_{12} \cdot \tau_{23} \cdot \exp(-kL^*) \cdot \left(1 + \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) + \rho_{12}^2 \cdot \rho_{23}^2 \cdot \exp(-4kL^*) \dots \right) \quad (2.13)$$

$$\tau_{123} = \tau_{12} \cdot \tau_{23} \cdot \exp(-kL^*) \cdot \sum_{i=0}^{i=\infty} (\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*))^i \quad (2.14)$$

avec τ_{mn} [-] la transmittance du dioptre séparant les milieux m et n , ρ_{mn} [-] la réflectance du même dioptre. L [m] est l'épaisseur du vitrage et $L^* = \frac{L}{\cos\theta_t}$ [m] l'épaisseur de vitrage traversée.

La somme infinie de l'Équation 2.14 est une série géométrique de raison $\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot$

$\exp(-2kL^*)$. Or $\rho_{12} \leq 1$, $\rho_{23} \leq 1$ et $\exp(-2kL^*) \leq 1$ donc $\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) \leq 1$. La série converge donc vers $\frac{1}{1 - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*)}$. La transmittance globale du vitrage est donc :

$$\tau_{123} = \tau_{12} \cdot \tau_{23} \cdot \exp(-kL^*) \cdot \frac{1}{1 - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*)} \quad (2.15)$$

Dans le cas particulier où $\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) = 1$, la série diverge. Cependant, cela signifie que la lumière est totalement réfléchiée dès la première interface. La transmittance globale est donc nulle ($\tau_{123} = 0$).

La réflectance globale est calculée avec le même raisonnement :

$$\rho_{123} = \rho_{12} + \tau_{12}^2 \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) + \tau_{12}^2 \cdot \rho_{23}^2 \cdot \rho_{12} \cdot \exp(-4kL^*) \dots \quad (2.16)$$

$$\rho_{123} = \rho_{12} + \tau_{12}^2 \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) \cdot \sum_{i=0}^{i=\infty} (\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*))^i \quad (2.17)$$

$$\rho_{123} = \rho_{12} + \frac{\tau_{12}^2 \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*)}{1 - \rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*)} \quad (2.18)$$

De même, si $\rho_{12} \cdot \rho_{23} \cdot \exp(-2kL^*) = 1$, alors la série géométrique diverge. Mais puisque la totalité de la lumière est réfléchiée à la première interface : $\rho_{123} = 1$.

La fraction absorbée par le vitrage est déduite par bilan :

$$1 = \rho + \tau + \alpha \quad (2.19)$$

$$\alpha = 1 - \rho - \tau \quad (2.20)$$

Les Équations 2.15 et 2.18 permettent de calculer la transmittance et la réflectance de deux dioptries parallèles. Cependant, dans de nombreux cas, il y a plus de deux interfaces. Jaffrin et Makhlouf (1990) ont calculé la transmittance d'un vitrage couvert d'un film d'eau (dû à la condensation de vapeur à l'intérieur d'une serre). Cela revient à calculer la transmittance de trois dioptries parallèles (air / vitre, vitre / eau, eau / air). Pour résoudre ce problème, les auteurs ont procédé à un calcul récursif : ils ont tout d'abord calculé la transmittance et la réflectance globale des deux premières interfaces (air / vitre et vitre / eau) grâce aux Équations 2.15 et 2.18. Ces deux interfaces sont alors considérées comme un dioptrie unique dont la transmittance et la réflectance sont connues.

Le problème est ainsi ramené à une série de deux interfaces dont la solution est connue. Jaffrin et Makhoulouf (1990) donnent la solution analytique développée pour le cas des trois interfaces, le problème est cependant généralisable au cas de n interfaces avec les fonctions récursives suivantes :

$$R_{1 \rightarrow n} = \begin{cases} 0 & \text{si } n = 0 \\ R_{1 \rightarrow n-1} + \frac{(1-R_{1 \rightarrow n-1})^2 \rho_n \cdot \exp(-2kL_n^*)}{1-R_{1 \rightarrow n-1} \rho_n \cdot \exp(-2kL_n^*)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$T_{1 \rightarrow n} = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ T_{1 \rightarrow n-1} \cdot \frac{\tau_n \cdot \exp(-kL_n^*)}{1-(1-T_{1 \rightarrow n-1}) \cdot (1-\tau_n) \cdot \exp(-2kL_n^*)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.22)$$

avec ρ_n la réflectance du n -ième dioptre, $R_{1 \rightarrow n}$ la réflectance globale des n premiers dioptres. τ_n est la transmittance du n -ième dioptre et $T_{1 \rightarrow n}$ la transmittance globale des n premiers dioptres. L_n^* est la longueur du chemin optique parcouru par le rayon lors de son passage par le milieu séparant les dioptres $n - 1$ et n .

Comme précédemment, la fraction du rayonnement absorbée par le vitrage peut être déterminée par bilan :

$$A = 1 - R - T \quad (2.23)$$

2.3.3 Impact des gouttelettes de condensation sur la transmittance d'un vitrage

Lors de l'utilisation d'Algofilm (ou d'un raceway couvert), une partie du milieu de culture s'évapore et se condense sur la face interne du vitrage sous forme de gouttelettes (Hoeniges et al. 2021a ; Mangi 2021). Ces gouttelettes ont un impact non négligeable sur la transmittance de la vitre (Briscoe et Galvin 1991 ; Hoeniges et al. 2021a ; Huang et al. 2020 ; Zhu et al. 2018, 2017). Bien qu'une fraction importante du vitrage soit couverte de gouttes, leur influence ne peut être comparée à un film comme l'ont fait Jaffrin et Makhoulouf (1990). En effet, l'eau a un indice de réfraction compris entre celui de l'air et celui du PMMA. Sa présence réduit donc la différence d'indice de réfraction par laquelle passent les rayons lumineux. Ainsi, comme prévu par l'Équation 2.22, la transmittance d'une vitre mouillée serait supérieure à celle d'une vitre sèche. Or les observations expérimentales font état d'une diminution de la transmittance. Il apparaît alors que la forme des gouttes est un facteur important de la transmittance du vitrage qui les supporte.

Pour évaluer cette influence, le ray-tracing est une méthode couramment employée

(Pieters et Deltour 1997 ; Tow 2014 ; Zhu et al. 2018, 2017). Cette méthode stochastique consiste à lâcher un grand nombre M (statistiquement significatif) de rayons sur un vitrage couvert de gouttelettes et de suivre un à un tous leurs trajets (au gré de leurs différentes réflexions et réfractions). La transmittance de la vitre est alors le rapport entre le nombre de rayons transmis M_T sur le nombre de rayons lâchés $T_{dh} = \frac{M_T}{M}$. De même, la réflectance est la fraction de rayons réfléchis sur le nombre de rayons lâchés $R_{dh} = \frac{M_R}{M}$. Cette méthode a l'avantage de tester un grand nombre de chemins que peuvent emprunter les rayons. Par exemple, Hoeniges et al. (2021b) ont pu évaluer, dans le cas de photobioréacteurs couverts, l'impact de la forme de ces gouttes sur la transmittance du vitrage. Cependant, une implémentation permettant d'avoir des temps de calcul compatibles avec une utilisation dans les autres modèles présentés dans ce manuscrit est complexe à mettre en œuvre. Une méthode simple permettant de calculer à la volée la transmittance d'un vitrage recouvert de gouttelettes a donc été développée et est présentée dans cette section.

2.3.3.1 Hypothèses

La méthode présentée ici repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

1. La goutte est une calotte sphérique dont la base est l'interface vitre / eau. Cette hypothèse a déjà été énoncée (Tow 2014 ; Zhu et al. 2017) et elle permet de simplifier la modélisation de l'interface goutte / air. En réalité, la forme des gouttes est très irrégulière (Mangi 2021) et influencée par l'inclinaison du vitrage (Hoeniges et al. 2021b).
2. La transmittance de la vitre est indépendante de la distribution de taille et spatiale des gouttes. Cette hypothèse est corroborée par Zhu et al. (2017) qui ont testé différentes distributions et n'ont pas trouvé de différence de transmittance.
3. Tous les rayons interagissant avec l'interface eau / air de la goutte proviennent de son interface vitre / eau. Ceux provenant de la partie sèche de la vitre sont négligés (voir Figure 2.6). Pour que le nombre de rayons négligés reste raisonnable, il faut que la majorité des rayons passent par la zone de contact entre la vitre et la goutte. Cela implique que cette surface soit grande par rapport à la surface de projection de la goutte par les rayons lumineux ("l'ombre" de la goutte). Lorsque l'angle de contact θ_{ca} entre la goutte et la vitre excède 90° , la surface de contact diminue alors que sa surface projetée reste constante. Cette hypothèse devient alors de moins en

moins valide au fur et à mesure que θ_{ca}° augmente. La méthode présentée se limite donc aux angles de contact $\theta_{ca} \in]0^\circ 90^\circ]$. Cette hypothèse n'est pas contraignante car pour obtenir un angle de contact $\theta_{ca} > 90$ il faut un matériau très hydrophobe (non utilisé en pratique).

4. Une fraction du rayonnement qui atteint l'interface eau / air de la goutte est réfléchi, cette fraction peut elle aussi être réfléchi au gré des dioptries qu'elle rencontre. L'interface eau / air de la goutte n'étant pas plane et parallèle à l'interface vitre / eau, les Équations 2.21 et 2.22 ne s'appliquent pas. Les réflexions internes sont donc négligées.

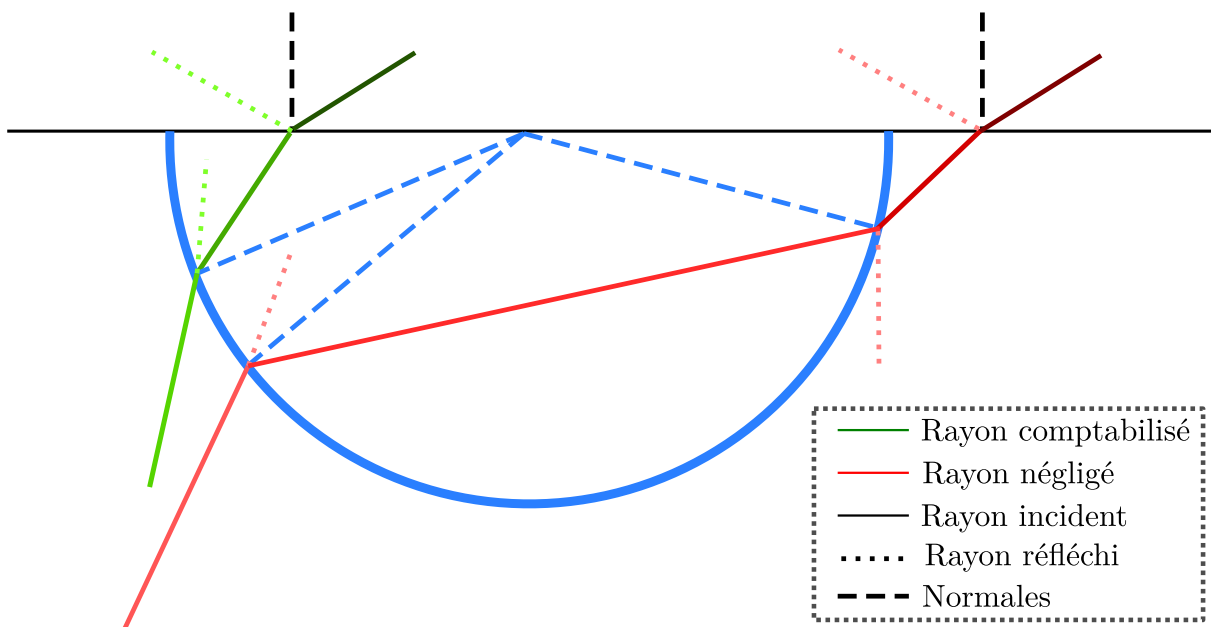


FIGURE 2.6 – Illustration des rayons pris en compte ou ignorés par la méthode de calcul de la transmittance des gouttes (Hypothèse 3).

2.3.3.2 Méthode

Soit une sphère de rayon r_s [m] ayant pour centre l'origine d'un repère orthonormé $C_s \{0, 0, 0\}$ dont la goutte est une fraction. L'interface vitre / eau est le cercle de rayon r_c [m] (connu, mesuré) et de centre $C_c \{0, 0, z_c\}$.

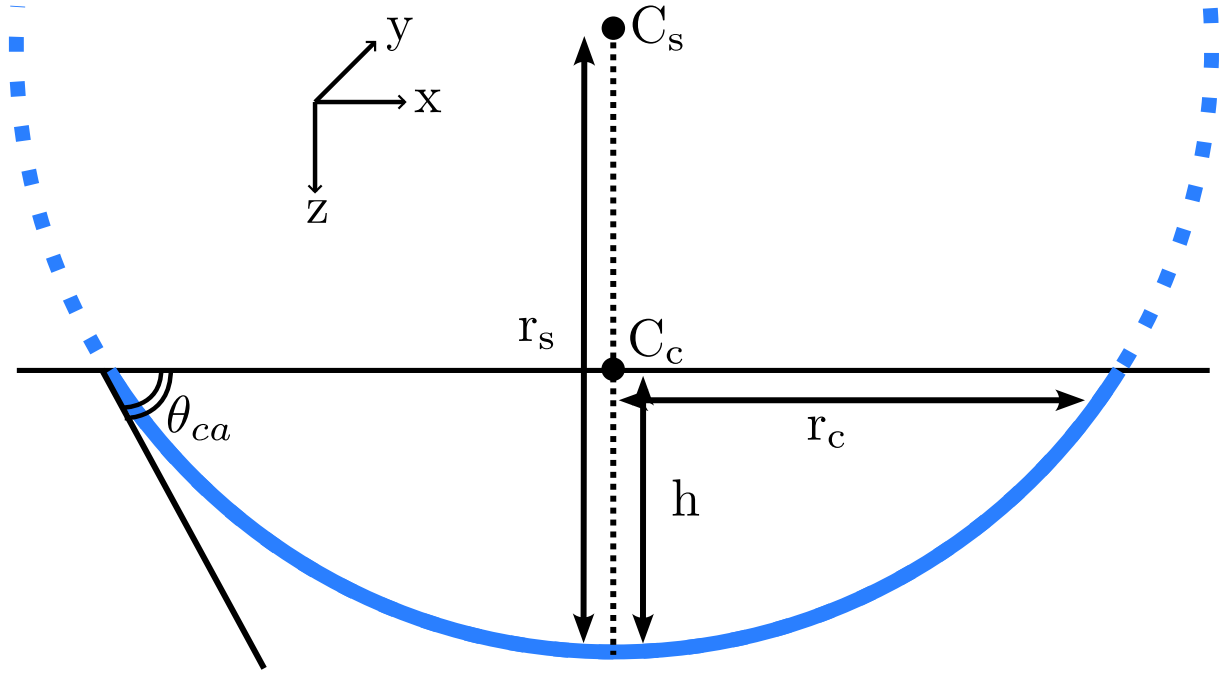


FIGURE 2.7 – Schéma de la goutte simulée.

Les données manquantes sont obtenues par les relations géométriques suivantes :

$$r_s = \frac{r_c}{\sin \theta_{ca}} \quad (2.24)$$

$$h = \frac{r_c \cdot (1 - \cos \theta_{ca})}{\sin \theta_{ca}} \quad (2.25)$$

$$z_c = r_s - h \quad (2.26)$$

avec h [m] la hauteur de la calotte sphérique et θ_{ca} [rad] l'angle de contact entre la goutte et la vitre (connu, mesuré).

Soit un ensemble de rayons traversant la goutte formant avec la normale à l'interface vitre / eau (après réfraction) un angle θ_{ray} . $\vec{V} \{ \sin(\theta_{ray}), 0, \cos(\theta_{ray}) \}$ est le vecteur directeur unitaire de ces rayons. Chaque rayon est identifié par un nombre i allant de 1 à N et associé à un point M_i : le point d'intersection entre le rayon et la base de la calotte sphérique (l'interface vitre / eau). Ces points doivent être uniformément répartis dans le cercle. Pour cela, la méthode présentée par Vogel (1979) est utilisée. Chaque point a alors pour coordonnées :

$$M_i = \begin{cases} x = r_c \cdot \frac{\sqrt{i}}{\sqrt{N}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\phi^2}\right) \\ y = r_c \cdot \frac{\sqrt{i}}{\sqrt{N}} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\phi^2}\right) \\ z = z_c \end{cases} \quad (2.27)$$

avec $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ le nombre d'or.

L'ensemble de ces points est projeté sur la surface de la sphère par le vecteur \vec{V} . La projection du point M_i sur la surface de la sphère est notée P_i (voir Figure 2.8).

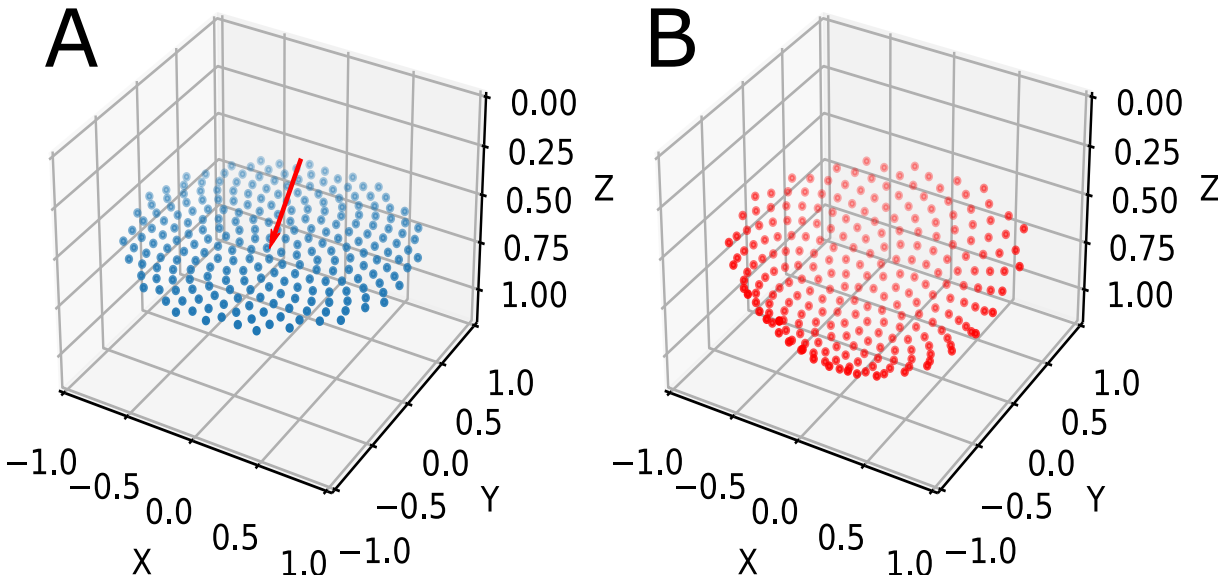


FIGURE 2.8 – (A) maillage de l'interface vitre / eau. (B) points obtenus après projection du maillage par des rayons ayant un angle d'incidence de 45° sur une goutte avec un angle de contact de 60° .

L'angle d'incidence θ_i du rayon i sur l'interface eau / air ainsi que la distance L_i parcourue par ce rayon dans la goutte sont calculés via les Équations 2.28 et 2.29 :

$$\theta_i = \arccos\left(C_s \vec{P}_i \cdot \vec{V}\right) \quad (2.28)$$

$$L_i = \sqrt{(M_{ix} - P_{ix})^2 + (M_{iy} - P_{iy})^2 + (M_{iz} - P_{iz})^2} \quad (2.29)$$

Les fractions transmises (τ_{ray-i}), réfléchies (ρ_{ray-i}) et absorbées (α_{ray-i}) de chaque rayon sont données par les Équations 2.30, 2.31 et 2.32.

$$\tau_{ray-i} = \tau_i \cdot \exp(-k_{water}L_i) \quad (2.30)$$

$$\rho_{ray-i} = \rho_i \cdot \exp(-2k_{water}L_i) \quad (2.31)$$

$$\alpha_{ray-i} = 1 - \tau_{ray-i} - \rho_{ray-i} \quad (2.32)$$

La transmittance, la réflectance et l'absorbance de la goutte est la moyenne des transmittances, réflectances et absorbances de l'ensemble des rayons :

$$T_{droplet} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \tau_{ray-i} \quad (2.33)$$

$$R_{droplet} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \rho_{ray-i} \quad (2.34)$$

$$A_{droplet} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_{ray-i} \quad (2.35)$$

La fraction transmise d'un rayon qui passe par la vitre et par la goutte est le produit de la transmittance de la vitre et de la goutte (les réflexions internes étant négligées : Hypothèse 4). De même, la fraction réfléchie de ce même rayon est la somme de la réflectance de la vitre et de la goutte.

Un vitrage dont une fraction $f_{droplet}$ de la surface est couverte de gouttelettes a deux transmittances : la transmittance de sa partie sèche et celle de sa partie mouillée. La transmittance globale de ce vitrage est donnée par la moyenne de ces deux transmittances pondérée par $f_{droplet}$. Le même raisonnement est fait pour déterminer la réflectance de ce vitrage. Enfin, l'absorbance est déterminée par bilan. Les caractéristiques de la vitre sont donc données par les Équations 2.36, 2.37 et 2.38 :

$$T_{glass+droplet} = T_{air-glass-water} \cdot T_{droplet} \cdot f_{droplet} + T_{air-glass-air} \cdot (1 - f_{droplet}) \quad (2.36)$$

$$R_{glass+droplet} = (R_{air-glass-water} + R_{droplet}) \cdot f_{droplet} + R_{air-glass-air} \cdot (1 - f_{droplet}) \quad (2.37)$$

$$A_{glass+droplet} = 1 - T_{glass+droplet} - R_{glass+droplet} \quad (2.38)$$

Les résultats de la méthode présentée convergent pour un nombre de points de discrétisation $N \geq 256$ quels que soient l'angle d'incidence et l'angle de contact. Ce petit

nombre de rayons à prendre en compte permet d'avoir des temps de calculs inférieurs à la milliseconde, compatibles avec une utilisation dans d'autres modèles (modèle thermique, modèle de croissance *etc.*). Cette rapidité de calcul est aussi due à l'absence du calcul récursif des trajectoires des rayons que la méthode de ray-tracing nécessite. Ici, la transmittance, la réflectance et l'absorbance sont directement approchées en chaque point de discrétisation.

2.3.3.3 Comparaison avec Zhu et al. (2017)

Afin de valider la méthode décrite ici, ses prédictions sont comparées avec celles de Zhu et al. (2017). Comme dans cette publication, la vitre et la goutte sont supposées non-absorbantes ($k = 0$). Les auteurs de la publication ont étudié, avec la méthode de ray-tracing, la transmittance de gouttelettes avec des angles de contact allant de 15° à 180° . Cependant, seuls les angles de contact $\leq 90^\circ$ (ceux pour lesquels la méthode proposée est valide) sont comparés ici. Les résultats sont présentés par la Figure 2.9.

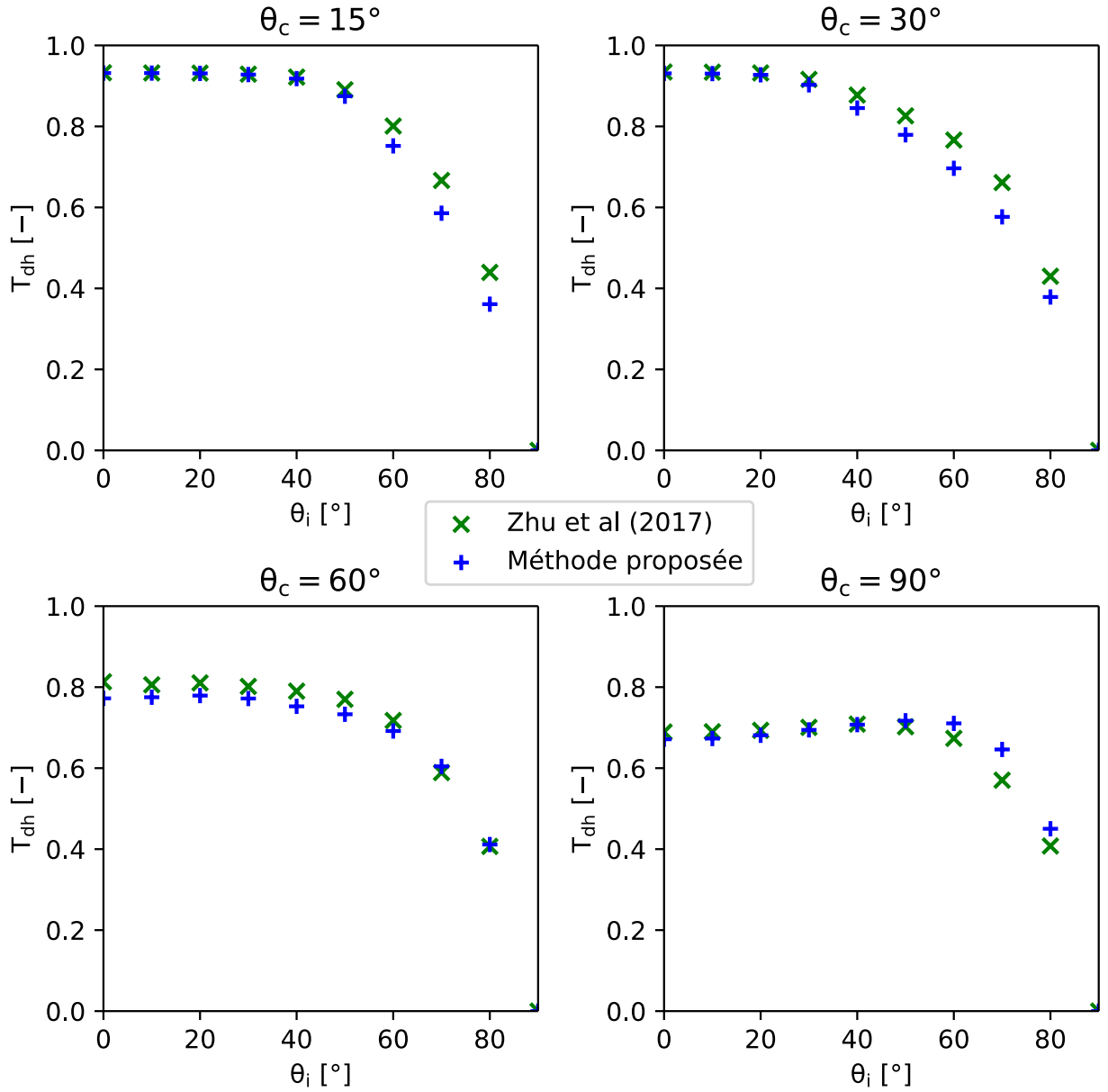


FIGURE 2.9 – Comparaison des prédictions de la méthode proposée et des résultats présentés par Zhu et al. (2017) pour différents angles d'incidence et angles de contact.

Pour mesurer l'écart entre les prédictions des deux méthodes, trois indicateurs sont utilisés : la différence absolue maximale, la moyenne de la valeur absolue des différences (MAE), et la moyenne de la valeur absolue exprimée en pourcentage de la référence (MAPE). Ces indicateurs sont reportés dans la Table 2.1.

Angle de contact	15°	30°	60°	90°
max [-]	0.080	0.082	0.038	0.077
MAE [-]	0.023	0.030	0.024	0.023
MAPE [%]	4.22	4.97	3.46	4.42

TABLE 2.1 – Mesure des différences de prédiction entre la méthode proposée et celle de Zhu et al. (2017) pour les différents angles de contact testés.

La Table 2.1 montre que la transmittance prédite par la méthode proposée diffère de moins de 5% de la référence. Ces différences sont jugées acceptables pour les applications visées dans ces travaux de thèse.

2.3.4 Calcul de la transmittance d'un vitrage alvéolaire

Au cours de la thèse, le vitrage du pilote Algofilm a dû être remplacé car endommagé. Le mode de fixation et les aléas climatiques ont engendré des contraintes mécaniques que la couverture en PMMA "simple vitrage" n'a pas supportées. Parmi les propositions faites pour ce changement, l'une prévoyait l'utilisation d'un vitrage en PMMA avec une structure alvéolaire. Cette couverture est composée de deux plaques horizontales solidarifiées par un ensemble de séparations verticales (voir Figure 2.10). Cet ensemble permet de grandement améliorer la résistance mécanique du vitrage tout en restant léger. Avant son installation, la transmittance de ce nouveau vitrage (et donc son impact sur les performances du système) devait être évaluée. Une méthode simple de calcul de cette transmittance basée sur l'approche précédente est proposée dans cette section.

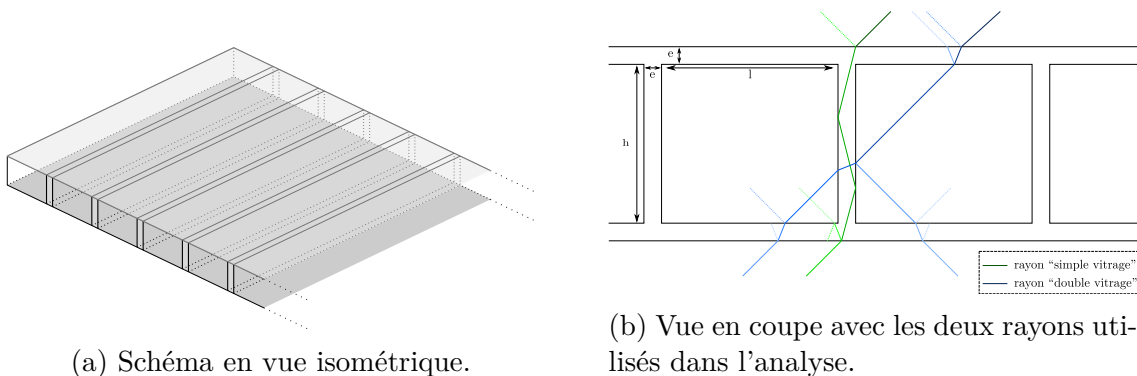


FIGURE 2.10 – Schémas d'une plaque de PMMA alvéolaire.

Le vitrage alvéolaire peut être divisé en deux parties en fonction du point d'impact

des rayons sur la première plaque horizontale.

Si le rayon arrive à l'intérieur d'une séparation, puisque $\frac{n_{air}}{n_{PMMA}} = \frac{1}{1.5} < \sqrt{\frac{1}{2}}$, alors le rayon est totalement réfléchi par les interfaces PMMA / air de la séparation jusqu'à atteindre l'interface PMMA / air de la seconde plaque horizontale (voir Annexe A). Pour ces rayons, le vitrage se comporte alors comme un simple vitrage (les rayons ne traversant que deux interfaces) d'épaisseur $L = 2 \cdot e + h$.

Si le rayon sort par une interface PMMA / air de la première plaque horizontale, alors le vitrage se comporte presque comme un double vitrage. En effet, lorsque ce rayon atteint une séparation verticale, les fractions transmises et réfléchies sont toutes deux redirigées vers la seconde plaque horizontale avec le même angle d'incidence que sur la première plaque (voir la Figure 2.10 et les Équations 2.3 et 2.4). La difficulté réside ici dans le calcul de l'épaisseur de PMMA traversée pour déterminer la fraction absorbée. Cela dépend du nombre de séparations verticales traversées, or tous les rayons ne traversent pas le même nombre de séparations. De plus le calcul étant tridimensionnel, il fait intervenir un angle supplémentaire : la longitude (en coordonnées polaires). Pour simplifier la modélisation de la transmittance, il est supposé que ces rayons traversent tous une épaisseur équivalente à une largeur de séparation lorsqu'ils passent par l'alvéole (cette partie a alors le même coefficient d'extinction que le PMMA et l'indice de réfraction de l'air).

Ainsi, la transmittance d'un vitrage alvéolaire est alors la moyenne entre celle d'un simple vitrage et celle d'un double vitrage (avec alvéole) pondérée par l'épaisseur des séparations verticales :

$$T_{alveolar} = \frac{e}{l+e} \cdot T_{air-glass-air} + \frac{l}{l+e} \cdot T_{air-double-glass-air} \quad (2.39)$$

avec e [m] l'épaisseur d'une séparation et l [m] la largeur d'une alvéole

Si le vitrage est recouvert de gouttelettes de condensation, les Équations 2.36, 2.37 et 2.38 permettent de prendre en compte leur influence. Dans ce cas, la transmittance de la vitre simple est remplacée par la transmittance de la vitre alvéolaire.

2.3.5 Calcul de la transmittance de différents types de vitrages

En utilisant les équations présentées dans cette section, la transmittance de vitrages simples, doubles et alvéolaires en fonction de l'angle d'incidence est calculée. Les paramètres géométriques des différents vitrages sont donnés dans la Table 2.2. L'absorbance du PMMA étant une fonction de la longueur d'onde, un spectre lumineux doit être utilisé.

Une application solaire est visée ici, l'ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012) donnant le spectre solaire standard pour la caractérisation des procédés solaires est donc utilisé (voir Section 2.6). Enfin, puisque la présence de gouttes de condensation affecte tous les vitrages de la même façon, la comparaison ne concerne que des vitrages secs.

n_{air}	n_{PMMA}	k_{air}	simple vitrage	double vitrage	vitrage alvéolaire		
			L [m]	L [m]	e [m]	l [m]	h [m]
1	1.5	0	0.005	0.003	0.001	0.009	0.008

TABLE 2.2 – Paramètres utilisés pour le calcul de la transmittance des différents vitrages

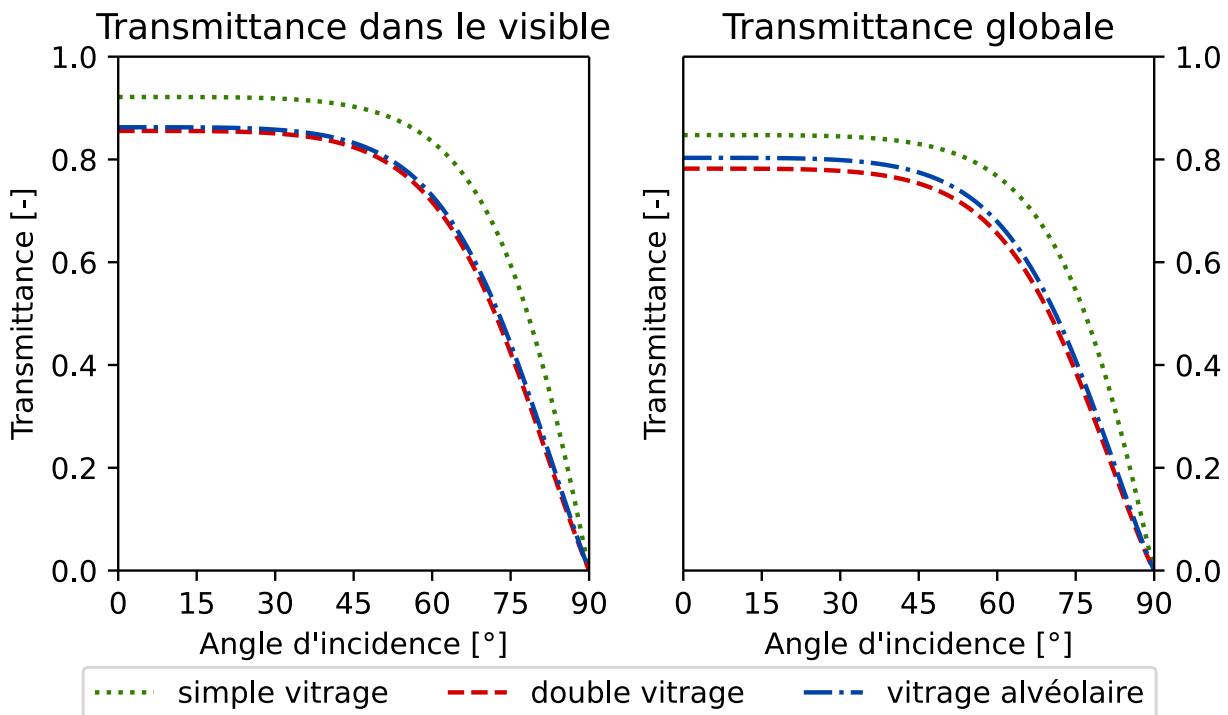


FIGURE 2.11 – Transmittance des différents types de vitrages en fonction de l'angle d'incidence.

La Figure 2.11 montre que tous les vitrages ont une transmittance plus grande si seule la partie visible du spectre solaire est prise en compte. Dans cette gamme de longueur d'onde, la fraction absorbée par le PMMA est négligeable (Boulet et al. 2014), la fraction non transmise est alors principalement due aux phénomènes de réflexion. Par contre, si tout le spectre solaire est pris en compte, la fraction absorbée devient importante et la

transmittance est réduite d'environ 10%. Dans tous les cas, le simple vitrage est celui qui transmet le plus de lumière. Les doubles vitrages et les vitrages alvéolaires se comportent sensiblement de la même façon, notamment dans le visible où leurs transmittances sont quasiment identiques. Assimiler un vitrage alvéolaire à un double vitrage est donc une approximation acceptable. Les équations du vitrage alvéolaire ont néanmoins été utilisées dans le reste du manuscrit.

2.4 **Modèle de croissance**

Lors du dimensionnement d'un PBR, avant d'arrêter les choix technologiques, et notamment celui du vitrage, l'impact de ces décisions sur la productivité du réacteur doit être évalué. Cette étude se fait grâce à la modélisation de la croissance microalgale dans le réacteur. Les modèles apportent également une assistance précieuse pour le pilotage d'un PBR type Algofilm. L'intensification du procédé le rend très dynamique et sensible. Il est alors nécessaire d'anticiper l'évolution de la croissance de la culture pour assurer sa viabilité.

La littérature fait état de nombreux modèles proposant différentes approches (Blanken et al. 2016; Grima et al. 1994; Mairet et al. 2010; Pruvost et al. 2016b; Rodríguez-Miranda et al. 2021; Souliès et al. 2016). Cette section présente le travail de modélisation fait autour du modèle de Pruvost et al. (2016b).

2.4.1 **Distribution de la lumière dans le volume du réacteur : modèle de transfert radiatif à deux flux**

Le modèle de croissance présenté dans cette section relie la vitesse d'absorption de la lumière par les microalgues à leur vitesse de croissance. Dans un photobioréacteur avec un éclairage externe, l'énergie lumineuse n'est pas uniformément répartie dans le volume de culture : elle diminue avec l'épaisseur de culture traversée (du fait, notamment, de la présence des microalgues). Ce phénomène est illustré par la Figure 2.12.

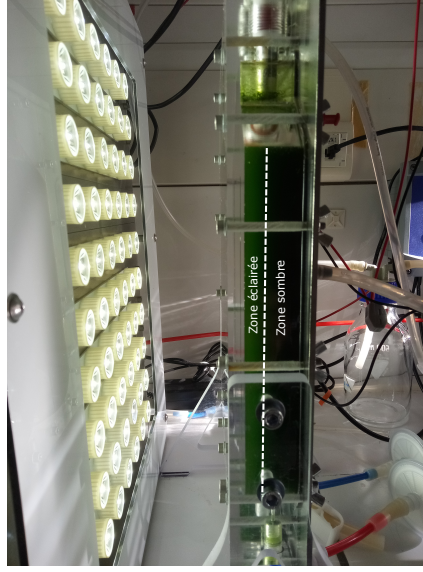


FIGURE 2.12 – Exemple d'atténuation de la lumière dans un photobioréacteur (vue de côté d'un photobioréacteur airlift).

Les équations qui permettent de décrire le champs d'irradiance présent dans le volume de culture sont très dépendantes de la géométrie du réacteur. Algofilm, avec son film ruisselant, peut être considéré comme une géométrie plane (Pruvost et al. 2017). Seules les équations permettant de décrire l'atténuation de lumière dans ce type de réacteur sont décrites ici. Dans ce cas, lorsqu'il n'y a qu'une seule source de lumière, le champs d'irradiance ne varie que dans le sens de la profondeur. L'atténuation de lumière peut alors être modélisée comme une fonction de l'épaisseur de culture traversée (z [m]) via le modèle de transfert radiatif à deux flux (Pottier et al. 2005).

Ce modèle définit l'irradiance locale $G(z)$ [$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] comme la somme des contributions des irradiances locales issues des rayonnements directs ($G_c(z)$ [$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], Équation 2.41) et diffus ($G_d(z)$ [$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], Équation 2.42) :

$$G(z) = G_c(z) + G_d(z) \quad (2.40)$$

$$G_c(z) = \frac{2 \cdot q_{0c}}{\cos(\theta)} \cdot \frac{(1 + \alpha) \cdot \exp(-\delta_c \cdot (z - L)) - (1 - \alpha) \cdot \exp(\delta_c \cdot (z - L))}{(1 + \alpha)^2 \cdot \exp(\delta_c \cdot L) - (1 - \alpha)^2 \cdot \exp(-\delta_c \cdot L)} \quad (2.41)$$

$$G_d(z) = 4 \cdot q_{0d} \cdot \frac{(1 + \alpha) \cdot \exp(-\delta_d \cdot (z - L)) - (1 - \alpha) \cdot \exp(\delta_d \cdot (z - L))}{(1 + \alpha)^2 \cdot \exp(\delta_d \cdot L) - (1 - \alpha)^2 \cdot \exp(-\delta_d \cdot L)} \quad (2.42)$$

avec θ [rad] l'angle d'incidence de la lumière dans le milieu de culture, L [m] l'épaisseur

du réacteur, z [m] la profondeur. q_{0c} [$\mu\text{mol}_{\text{hv}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] désigne la densité de flux de photons (PFD : Photon Flux Density) de la lumière colimatée et q_{0d} [$\mu\text{mol}_{\text{hv}}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] désigne celle de la lumière diffuse. α [-] est le module de diffusion linéaire, δ_c et δ_d [m^{-1}] sont les coefficients d'extinction pour la lumière colimatée et diffuse respectivement.

Les coefficients α , δ_c et δ_d sont calculés via les Équations 2.43, 2.44 et 2.45 :

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{E_a + 2 \cdot E_s \cdot b}} \quad (2.43)$$

$$\delta_c = \frac{\alpha \cdot C_x}{\cos \theta} (E_a + 2 \cdot E_s \cdot b) \quad (2.44)$$

$$\delta_d = 2 \cdot \alpha \cdot C_x (E_a + 2 \cdot E_s \cdot b) \quad (2.45)$$

avec C_x [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] la concentration en biomasse sèche, E_a [$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$] la section efficace d'absorption massique, E_s [$\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$] la section efficace de diffusion massique et b [-] la fraction rétrodiffusée par la culture.

Cette irradiance locale permet de calculer la vitesse locale spécifique d'absorption de photons (LRPA : Local Rate of Photons Absorption) [$\mu\text{mol}_{\text{hv}}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] :

$$\text{LRPA}(z) = E_a \cdot G(z) \quad (2.46)$$

Tout comme le champs d'irradiance $G(z)$, le LRPA est une fonction de la profondeur. La vitesse moyenne d'absorption de photons (MRPA : Mean Rate of Photons Absorption) [$\mu\text{mol}_{\text{hv}}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$], est définie comme la moyenne du LRPA sur l'épaisseur du PBR :

$$\text{MRPA} = \frac{1}{L} \cdot \int_{z=0}^{z=L} \text{LRPA}(z) dz \quad (2.47)$$

Dans les équation précédentes, les propriétés radiatives de la microalgue (E_a , E_s et b) sont des fonctions de la longueur d'onde. Le flux incident (q_{0c} et q_{0d}) doit alors aussi être une fonction de la longueur d'onde (un spectre lumineux). Le LRPA et le MRPA le sont alors également. Pour revenir à une simple fonction de la profondeur (pour le LRPA) ou une valeur scalaire (pour le MRPA) utilisable dans les modèles de croissance, ces grandeurs doivent être intégrées sur le PAR :

$$\text{LRPA} = \int_{400}^{700} \text{LRPA}_\lambda d\lambda \quad (2.48)$$

$$\text{MRPA} = \int_{400}^{700} \text{MRPA}_\lambda d\lambda \quad (2.49)$$

avec LRPA_λ et MRPA_λ les valeurs spectrales du LRPA et du MRPA pour chaque longueur d'onde

2.4.2 Lois cinétiques de croissance microalgale

2.4.2.1 Calcul de la concentration en biomasse

En connaissant le champs d'irradiance présent dans le volume de culture, il est possible de calculer l'activité photosynthétique des microalgues et d'en déduire leur croissance résultante. Pour cela, Pruvost et al. (2016b) propose de relier le LRPA à la vitesse locale de production d'oxygène ($J_{O_2}(z)$ [$\text{mol}_{O_2} \cdot \text{kg}_x^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]), un co-produit de la photosynthèse. La formulation prend la forme générale d'un modèle de Monod où la lumière est le substrat. Ici, les autres nutriments requis par les microalgues (carbone, azote, phosphore *etc.*) n'apparaissent pas : il sont supposés non-limitants. En pratique, ces nutriments sont ajoutés en excès dans le milieu de culture pour que seule la lumière soit limitante.

La lumière apparait dans les équations au travers du LRPA. De ce fait, le modèle de croissance est, comme le modèle de transfert radiatif, un modèle à une dimension dépendant de la profondeur de culture.

$$J_{O_2}(z) = \rho_M \cdot \frac{K_a}{K_a + \text{LRPA}(z)} \cdot \phi_{O_2} \text{LRPA}(z) - \frac{J_{NADH_2-O_2}}{\nu_{NADH_2-O_2}} \cdot \frac{K_r}{K_r + \text{LRPA}(z)} \quad (2.50)$$

avec ρ_M [-] le rendement photochimique maximum et ϕ_{O_2} [$\text{kg}_x \mu\text{mol}_{\text{hv}}^{-1}$] le rendement quantique massique de la photosynthèse. K_a [$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] est la constante de demi-saturation de la photosynthèse, K_r [$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] est la constante d'inhibition de la respiration. $J_{NADH_2-O_2}$ [$\text{mol}_{NADH_2} \cdot \text{kg}_x^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] et $\nu_{NADH_2-O_2}$ [-] sont la vitesse spécifique et le coefficient stœchiométrique de régénération des cofacteurs via la respiration.

Le membre de droite de cette équation a deux termes : le premier représente la production d'oxygène par la photosynthèse et le second la consommation par la respiration des microalgues.

La vitesse locale de production de biomasse ($r_x(z)$ [$\text{kg}_x \cdot \text{s}^{-1}$]) est déduite de $J_{O_2}(z)$ grâce au coefficient stoechiométrique ν_{O_2-x} [-] :

$$r_x(z) = \frac{J_{O_2}(z) \cdot C_x \cdot M_x}{\nu_{O_2-x}} \quad (2.51)$$

L'évolution de la concentration en biomasse dans le PBR est le résultat de l'intégration sur le temps de la vitesse moyenne de croissance de la biomasse $\langle r_x \rangle$. Celle-ci est définie comme la moyenne sur le volume de r_x . Le modèle de croissance n'ayant qu'une dimension, l'intégration sur le volume revient à intégrer sur l'épaisseur L de la culture :

$$\langle r_x \rangle = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} r_x(z) dz \quad (2.52)$$

La vitesse de production de biomasse est obtenue en intégrant, au travers d'une équation bilan sur la biomasse, la dilution du milieu de culture à l'Équation 2.52 :

$$\frac{dC_x}{dt} = \langle r_x \rangle - D \cdot C_x \quad (2.53)$$

avec D [s^{-1}] le taux de renouvellement de la culture par l'apport de milieu frais. Il s'agit de l'inverse du temps de passage des microalgues dans le PBR ($\tau_p = \frac{1}{D}$).

La concentration en biomasse à un instant t est obtenue en intégrant l'Équation 2.53 sur le temps.

2.4.2.2 Prise en compte de la respiration des microalgues dans la fraction sombre du réacteur

Lorsque les microalgues sont à l'obscurité (ou lorsque la lumière est insuffisante), la respiration devient plus importante que la photosynthèse. Il en résulte une production nette d'oxygène négative et donc une diminution de la concentration en biomasse.

Par conception, le photobioréacteur Algofilm comporte une zone non éclairée par laquelle passent les microalgues (le bac de collecte, la pompe et le tube reliant les deux). Cette partie du réacteur est nommée "zone sombre" par la suite. Lorsqu'elles y passent, les microalgues ne peuvent plus faire de photosynthèse et leur respiration devient leur seul métabolisme (Kazbar 2018). J_{O_2-dark} [$\text{mol}_{O_2} \cdot \text{kg}_x^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] est alors leur vitesse de consommation d'oxygène et $\langle r_{x-dark} \rangle$ la vitesse de consommation de biomasse à l'obscurité :

$$J_{O_2-dark} = \frac{J_{NADH_2-O_2}}{\nu_{NADH_2-O_2}} \quad (2.54)$$

$$\langle r_{x-dark} \rangle = \frac{J_{O_2-dark} \cdot C_x \cdot M_x}{\nu_{O_2-x}} \quad (2.55)$$

La zone sombre impacte donc négativement la productivité du réacteur. L'intégration des vitesses locales se faisant sur le volume (Équation 2.52), la contribution de cette partie du réacteur à sa croissance globale est donc calculée au prorata de la fraction de volume qu'elle représente :

$$\langle r_x \rangle = f_{dark} \cdot r_{x-dark} + (1 - f_{dark}) \cdot \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} r_x(z) dz \quad (2.56)$$

avec f_{dark} [-] la fraction de volume du réacteur occupée par la zone sombre.

2.4.2.3 Prise en compte de la respiration des microalgues la nuit

Comme les autres procédés solaires, la productivité d'un système de culture de microalgues varie au gré des cycles jour / nuit. Dans le cas d'un PBR, la nuit, les microalgues métabolisent les sucres qu'elles ont produits durant la journée. Cependant, les équations précédentes ne permettent pas de représenter cette respiration. En effet, lorsqu'elles sont à l'obscurité pour de longues périodes, les microalgues modifient leur activité métabolique. La vitesse de consommation de la biomasse est alors calculée via l'Équation 2.57 (Le Borgne et Pruvost 2013) :

$$\langle r_x \rangle_{night} = -C_x \mu_{night} \quad (2.57)$$

avec μ_{night} [s⁻¹] la vitesse spécifique de consommation de biomasse durant la nuit.

2.4.3 Paramètres cinétiques de *Chlorella vulgaris*

La microalgue modèle étudiée durant cette thèse est *Chlorella vulgaris*. Les propriétés radiatives de la souche en fonction de la longueur d'onde et de la pigmentation sont issues de Kandilian et al. (2016). Un exemple de propriétés radiatives utilisées est donné dans la Figure 2.13.

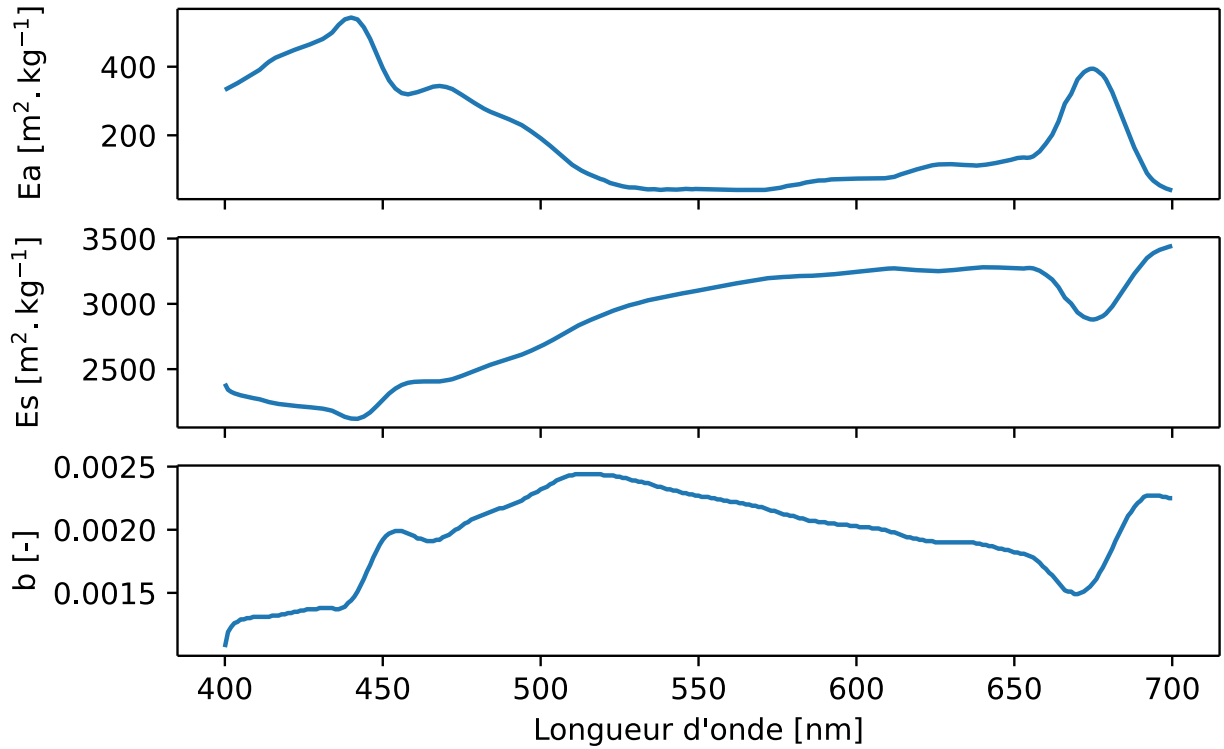


FIGURE 2.13 – Propriétés radiatives de *Chlorella vulgaris* en fonction de la longueur d'onde pour une pigmentation totale équivalente à 4% de la biomasse sèche.

L'ensemble des paramètres cinétiques de la souche utiles au modèle de croissance sont reportés dans la Table 2.3 (Artu 2016).

Paramètre	Valeur	Unité
$J_{\text{NADH}_2-\text{O}_2}$	1.84×10^{-3}	$\text{mol}_{\text{NADH}_2} \cdot \text{kg}_x^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
K_a	40000	$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
K_r	556.52	$\mu\text{mol}_{\text{hv}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
M_x	0.024	$\text{kg}_x \cdot \text{mol}_x^{-1}$
$\nu_{\text{NADH}_2-\text{O}_2}$	2×10^{-7}	$\text{mol}_{\text{NADH}_2} \cdot \text{mol}_{\text{O}_2}^{-1}$
ν_{O_2-x}	1.13	$\text{mol}_{\text{O}_2} \cdot \text{mol}_x^{-1}$
ρ_M	0.8	-
μ_{night}	1.1×10^{-6}	s^{-1}

TABLE 2.3 – Paramètres cinétiques de *Chlorella vulgaris* (culture sur ammonium).

2.4.4 Modélisation de la concentration en oxygène dissous

L'oxygène produit par les microalgues n'est pas directement libéré dans la phase gazeuse du réacteur, il se trouve d'abord sous forme dissoute dans le milieu de culture. Si la production d'oxygène par la photosynthèse est plus importante que la capacité du réacteur à le dégazer, il s'accumule dans le milieu de culture et la concentration augmente. D'après la littérature, la présence d'une forte concentration en oxygène dissous nuit à la croissance microalgale et donc aux performances du système de culture (Bonnafant 2020; Kazbar 2018; Shelp et Canvin 1980; Todisco 2019; Weissman et al. 1988).

Rearte et al. (2021) rapportent, pour un système analogue à Algofilm, que la productivité est telle qu'un gradient de concentration en oxygène est observable le long du réacteur. Ce gradient s'explique, en partie, par la présence du bac de collecte où l'oxygène est dégazé et consommé par les microalgues alors à l'obscurité. La culture réintroduite en tête de plan est alors appauvrie en oxygène. La concentration remonte au fur et à mesure que le milieu ruisselle sur le plan éclairé induisant alors le gradient observé.

La zone sombre joue donc un rôle sur la concentration en oxygène dans le réacteur. Afin de dimensionner cette partie du réacteur, une modélisation du gradient de concentration en oxygène dissous observé par Rearte et al. (2021) est proposée.

2.4.4.1 Modélisation des transferts de gaz

Pour déterminer la quantité d'oxygène présente dans le milieu de culture, les transferts de gaz entre la phase liquide et la phase gazeuse du PBR doivent être modélisés. Ici, le modèle du double film est utilisé (Lewis et Whitman 1924). Dans un liquide sans microalgues (sans source d'oxygène), un bilan de matière amène à l'Équation 2.58 (Le Borgne 2011) :

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = k_l a \cdot (C_{O_2-eg} - C_{O_2}) \quad (2.58)$$

avec $k_l a$ [s^{-1}] le coefficient de transfert entre la phase liquide et la phase gaz et C_{O_2-eg} la concentration d'oxygène lorsque les deux phases sont à l'équilibre.

La zone sombre d'Algofilm se distingue aussi du plan par le mode de transfert liquide-gaz qui y a lieu. Sur le plan, les échanges se font à travers la surface libre du liquide, tandis que dans le bac ils se font grâce au bullage. Deux coefficients de transfert de gaz sont donc introduits selon la partie du PBR considérée ($k_l a_{plan}$ et $k_l a_{tank}$).

2.4.4.2 Modélisation générale de l'évolution de la concentration en oxygène

La vitesse moyenne de production d'oxygène $\langle r_{O_2} \rangle$ [$\text{kg}_{O_2} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$] est déduite des équations cinétiques de croissance (Équations 2.51, 2.52, 2.55 et 2.57) :

$$\langle r_{O_2-light} \rangle = \langle J_{O_2} \rangle \cdot C_x \cdot M_{O_2} \quad (\text{à la lumière}) \quad (2.59)$$

$$\langle r_{O_2-dark} \rangle = J_{O_2-dark} \cdot C_x \cdot M_{O_2} \quad (\text{à l'obscurité}) \quad (2.60)$$

$$\langle r_{O_2-night} \rangle = \mu_{night} \cdot C_x \cdot \frac{M_{O_2}}{M_x} \cdot \nu_{O_2-x} \quad (\text{la nuit}) \quad (2.61)$$

avec M_{O_2} [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$] la masse molaire de l'oxygène.

La vitesse d'accumulation de l'oxygène dans la phase liquide est donnée par le bilan entre la production / consommation par les microalgues et les transferts de gaz :

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = \langle r_{O_2} \rangle + k_l a \cdot (C_{O_2-eg} - C_{O_2}) \quad (2.62)$$

avec $\langle r_{O_2} \rangle$ choisie selon les conditions d'éclairement subies par la culture (Équation 2.59, 2.60 ou 2.61).

2.4.4.3 Modélisation du gradient en oxygène dans la phase liquide dans Algofilm

Dimensionner la zone sombre d'un réacteur Algofilm (notamment son échangeur de gaz) requiert un modèle décrivant son influence sur la concentration en oxygène. Ici, le PBR est assimilé à une série de deux réacteurs pistons (le plan et le bac de collecte) ayant chacun leur cinétique d'accumulation d'oxygène. Chacune de ces parties est caractérisée par un temps de passage (τ_{plan} ou τ_{tank}), un coefficient d'échange ($k_{l a_{plan}}$ ou $k_{l a_{tank}}$) et d'une concentration à l'équilibre ($C_{O_2-eg-plan}$ ou $C_{O_2-eg-tank}$). De là découlent deux cinétiques différentes :

$$\frac{dC_{O_2-plane}}{dt} = \langle r_{O_2-plan} \rangle + k_{l a_{plan}} \cdot (C_{O_2-eg-plan} - C_{O_2}) \quad (2.63)$$

$$\frac{dC_{O_2-tank}}{dt} = \langle r_{O_2-tank} \rangle + k_{l a_{tank}} \cdot (C_{O_2-eg-tank} - C_{O_2}) \quad (2.64)$$

Ici, la valeur du $k_{l a_{tank}}$ dépend de la finesse des bulles et de l'intensité du bullage.

Cette variable peut donc être choisie lors du dimensionnement du PBR. En revanche, les échanges de gaz de la culture sur le plan ayant lieu à travers une surface libre, la valeur de $k_{l}a_{plane}$ est difficilement contrôlable car déterminée par l'écoulement liquide sur le plan. L'étude de la modification de cet écoulement et des implications sur les paramètres du procédé sort du cadre de ces travaux de thèse et n'a donc pas été réalisée. Dans ce modèle, le $k_{l}a_{plane}$ est donc une constante. L'écoulement du pilote 10 m² est comparable à celui prototype 0.33 m², ainsi, la valeur de $k_{l-plane}$ mesurée par Le Borgne (2011) est utilisée. La valeur de $k_{l}a_{plane}$ est alors le produit de ce coefficient d'échange et de la surface spécifique d'échange sur le plan :

$$k_{l}a_{plane} = k_{l-plane} \cdot \frac{1}{L} \quad (2.65)$$

Enfin, la concentration à l'équilibre dans le bac dépend du gaz injecté (de l'air, du CO₂, de l'azote ou un mélange) et est donc contrôlable. Celle du plan, en revanche, dépend de la pression partielle de l'oxygène dans la phase gazeuse. Or, dans le cas présent celle-ci est toujours celle de l'atmosphère ($\approx 21\%$) : la couverture n'étant pas étanche, l'accumulation d'oxygène dans cette phase est négligeable.

Au final, la concentration en oxygène dans le milieu de culture est obtenue en intégrant les Équations 2.63 et 2.64 sur le temps.

2.5 Modèle thermique d'Algofilm

Les microalgues ne peuvent se développer que dans un intervalle restreint de températures en dehors duquel la survie de la culture peut être compromise (Converti et al. 2009 ; Pruvost et al. 2016a ; Torzillo et al. 1986, 1991). Bien que la température optimale de croissance soit dépendante de l'espèce étudiée, une température comprise entre 10 °C et 30 °C est viable pour la plupart des espèces (Ras et al. 2013). Cette gamme de température peut facilement être dépassée lorsque la culture est menée en extérieur où elle est soumise aux cycles jour-nuit et aux variations météorologiques. C'est particulièrement le cas pour les PBR fermés tels qu'Algofilm. Par leur conception, ces PBR empêchent l'évaporation d'eau qui permet d'évacuer l'excédent de chaleur reçu et de prévenir l'échauffement du système. Des températures supérieures à 50 °C, incompatibles avec la survie des microalgues, peuvent alors être observées au zénith des journées ensoleillées. La présence d'un système efficace de régulation de la température apparaît alors comme indispensable.

Il existe diverses solutions techniques pour contrôler la température d'un PBR (immer-

sion dans un bassin, aspersion d'eau, échangeur de chaleur *etc.*). Cela représente cependant un coût très important en énergie et en ressources (Mehlitz 2009 ; Torzillo et al. 1986). Dans le contexte du réchauffement climatique où économiser l'énergie et les ressources devient un impératif, ce besoin impacte la viabilité du procédé. Il est donc nécessaire de concevoir un système de culture qui, par sa conception, garantit des conditions de température compatibles avec la culture de microalgues tout en consommant le moins de ressources possible. Pour cela, l'utilisation de technologie de régulation passive de la température est à privilégier.

L'évaluation du potentiel de chaque solution, ainsi que le dimensionnement d'un nouveau système s'appuie sur la modélisation du comportement thermique du PBR. Dans cette section, deux modèles sont présentés. Le premier est issu de la thèse de Le Borgne (2011) et concerne le prototype de 0.33 m² (Goetz et al. 2011). Le second, établi au cours de cette thèse, permet de simuler la température du pilote 10 m² implanté sur la plateforme Algosolis. Il a également été utilisé pour concevoir une nouvelle version du PBR maximisant le recours à des technologies passives de régulation de la température (voir Sections 4.2 et 4.3).

2.5.1 Modèle du prototype Algofilm 0.33 m²

Le modèle présenté par Goetz et al. (2011) décrit le comportement thermique du prototype Algofilm de 0.33 m² en fonction des conditions météorologiques. Ce modèle divise le système en trois parties qui échangent de la chaleur entre elles et avec l'environnement : la vitre, le milieu de culture, et la plaque d'inox à l'arrière du PBR. Il est repris succinctement ici.

2.5.1.1 Hypothèses

Pour simplifier le bilan thermique, cinq hypothèses ont été formulées (Le Borgne 2011) :

1. Les pertes thermiques liées au passage des microalgues par le tube de remontée sont négligeables (la surface d'échange du tube étant très petite par rapport à la surface d'échange totale du PBR).
2. Il en découle que la différence de température entre le début et la fin du plan est également négligeable.
3. La conduction au sein du vitrage et de la plaque d'inox n'est pas limitante : ces deux parties ont donc une température homogène.

4. La totalité du flux solaire reçu par le milieu de culture (flux transmis par la couverture) est absorbée.
5. L'échange par convection entre le milieu de culture et la plaque inox est non limitant par rapport à l'échange par convection entre la plaque et l'air ambiant. La température du milieu de culture et de la plaque inox tendent donc vers la même valeur. Ces deux composants du système sont donc considérés comme une seule partie. Au final, seules deux parties sont modélisées : la vitre et le milieu de culture.

2.5.1.2 Bilan de chaleur

Le modèle prend en compte six flux de chaleurs résumés par la Figure 2.14.

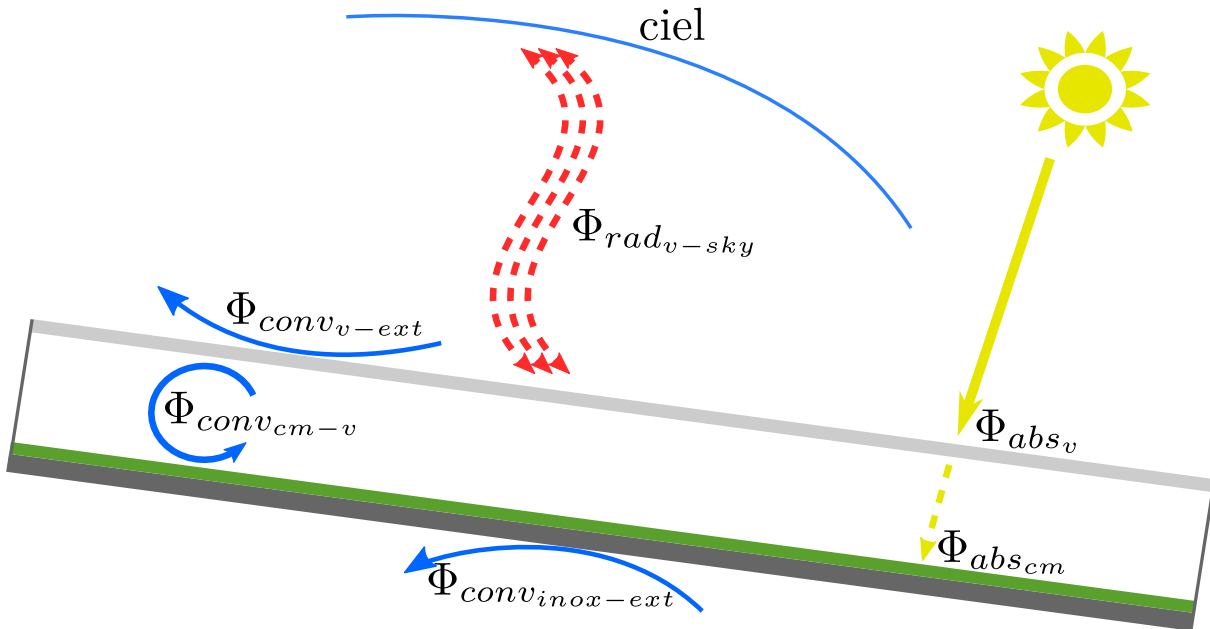


FIGURE 2.14 – Schéma des différents flux de chaleur pris en compte par le modèle de Goetz et al. (2011).

Il y a donc :

- la puissance lumineuse absorbée par la vitre :

$$\Phi_{abs_g} = S_g \cdot \alpha_g \cdot q \quad (2.66)$$

— la puissance lumineuse absorbée par le milieu de culture :

$$\Phi_{abs_{cm}} = S_{cm} \cdot \alpha_{cm} \cdot \tau_g \cdot q \quad (2.67)$$

— la puissance échangée par radiation entre la vitre et le ciel :

$$\Phi_{rad_{g-sky}} = \sigma \cdot S_g \cdot \epsilon_g \cdot (T_{sky}^4 - T_g^4) \quad (2.68)$$

— la puissance échangée par convection entre la vitre et l'air ambiant :

$$\Phi_{conv_{v-amb}} = S_g \cdot h_{v-amb} \cdot (T_{ext} - T_g) \quad (2.69)$$

— la puissance échangée par convection entre la vitre et le milieu de culture :

$$\Phi_{conv_{g-cm}} = S_g \cdot h_{g-cm} \cdot (T_{cm} - T_g) = -\Phi_{conv_{cm-v}} \quad (2.70)$$

— la puissance échangée par convection entre la plaque en inox et l'air ambiant :

$$\Phi_{conv_{cm-amb}} = S_{cm} \cdot h_{cm-amb} \cdot (T_{ext} - T_{cm}) \quad (2.71)$$

avec T_x [K] la température du sous-système x et S_x [m²] sa surface d'échange. α_x [-] correspond à l'absorptivité de x , τ_x [-] sa transmittance et ϵ_x [-] son émissivité. Dans ce modèle α et τ sont des constantes données, elles ne dépendent pas des équations présentées dans la Section 2.3. h_{x-y} [W.m⁻².K⁻¹] est le coefficient d'échange par convection entre les sous-systèmes x et y . σ [W.m⁻².K⁻⁴] est la constante de Stefan-Boltzmann. q [W.m⁻²] est la puissance lumineuse reçue par le système. L'indice *amb* désigne l'air ambiant, *g* la vitre et *cm* le sous-système milieu de culture + plaque inox (Hypothèse 5).

La température du ciel qui apparaît dans l'Équation 2.68 est une température équivalente calculée via l'Équation 2.72 (Duffie et Beckman 2013) :

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{ext}^4 \quad (2.72)$$

Les échanges par convection entre le PBR et l'air ambiant font apparaître des coefficients de convection obtenus via une relation empirique (Welty 2000) :

$$h_{x-amb} = 5.7 + 3.8 \cdot u_{wind} \quad (2.73)$$

avec u_{wind} [m.s⁻¹] la vitesse du vent.

Enfin, les échanges par convection entre la vitre et le milieu de culture font intervenir un coefficient h_{g-cm} valant 290 W.K⁻¹.m⁻² (Goetz et al. 2011).

En posant un bilan thermique sur chacune des parties, les équations différentielles suivantes sont obtenues :

$$m_g \cdot Cp_g \cdot \frac{dT_g}{dt} = \Phi_{abs_g} + \Phi_{rad_{g-sky}} + \Phi_{conv_{v-amb}} + \Phi_{conv_{v-cm}} \quad (2.74)$$

$$(m_{cm} \cdot Cp_{cm} + m_{inox} \cdot Cp_{inox}) \cdot \frac{dT_{cm}}{dt} = \Phi_{abs_{cm}} + \Phi_{conv_{cm-v}} + \Phi_{conv_{cm-amb}} \quad (2.75)$$

avec m_x [kg] la masse du sous système x et Cp_x [J.kg⁻¹.K⁻¹] sa capacité thermique massique.

Les conditions météorologiques étant constamment changeantes, ces équations sont résolues en régime transitoire en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4(5) (Dormand et Prince 1980 ; Shampine 1986 ; Virtanen et al. 2020).

2.5.1.3 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du prototype Algofilm 0.33 m² sont issues de Goetz et al. (2011) et reprises dans la Table 2.4

	m [kg]	Cp [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	S [m ²]	α [-]	ϵ [-]	τ [-]
vitre	2.6	720	0.33	0.05	0.92	0.90
milieu de culture	0.65	4180	0.33	1	1	0
plaque inox	12	500	0.50	0.5	0.58	0

TABLE 2.4 – Propriétés physiques du prototype Algofilm 0.33 m²

2.5.2 Modèle du pilote Algofilm 10 m²

Bien que le pilote Algofilm 10 m² repose sur les mêmes principes d'intensification que le prototype 0.33 m², sa conception est différente. En particulier, l'utilisation d'une dalle de béton comme support pour le plan d'écoulement modifie les échanges de chaleur entre le milieu de culture et l'environnement extérieur. Le modèle présenté par Goetz et al. (2011) ne permettant pas de prendre en compte ces spécificités, un nouveau modèle a

donc spécialement été développé pour ce pilote et est présenté dans cette section. La validation expérimentale de ce modèle est présentée dans la Section 3.3.

Ce modèle utilise la même méthode que le précédent, avec notamment une division du système en trois parties : le vitrage, le milieu de culture, et la dalle de béton.

2.5.2.1 Hypothèses

Afin de simplifier le modèle, plusieurs hypothèses sont formulées :

1. Le milieu de culture se comporte comme un corps noir.
2. La température du milieu de culture est homogène en tout point du réacteur. Cela suppose, comme précédemment, que la chaleur échangée entre le milieu de culture et l'environnement extérieur lors de son passage par le bac de collecte et la pompe est négligeable.
3. La pression de la phase gaz est constante et égale à la pression atmosphérique standard (101325 Pa).
4. La température de la phase gaz du réacteur est homogène et égale à celle du milieu de culture.
5. L'air de la phase gaz du réacteur est toujours saturé en eau. Cette hypothèse ne se vérifie en pratique qu'après quelques heures de culture, le temps que le milieu de culture évapore suffisamment d'eau. Le modèle ne représentant pas formellement cet état transitoire, il n'est donc représentatif que d'un réacteur en culture depuis au moins une journée.
6. Il en découle, par bilan, que toute l'eau qui s'évapore du milieu de culture se retrouve condensée sur le vitrage. Le comportement thermique de cette masse d'eau n'est pas formellement décrit. Le modèle suppose que les gouttes sont à la même température que la vitre : ces deux parties forment un seul sous-système homogène.
7. La quantité d'eau évaporée par le milieu de culture n'induit pas de variation significative de sa masse. Cette hypothèse se justifie par le fait que l'eau condensée sur la vitre retombe dans le milieu de culture lors de la chute des gouttes de condensation (Mangi et al. 2021).
8. La température du sol à côté d'Algofilm ne dépend que de la profondeur.

9. La température du sol en profondeur (5m) est constante et égale à la moyenne annuelle des températures ambiantes rencontrées (Florides et Kalogirou 2005).

2.5.2.2 Bilan de chaleur

Le modèle du pilote 10 m² est le résultat d'un bilan sur les flux de chaleur applicable à chacun des sous-systèmes qui composent Algofilm. Ces flux sont schématisés dans la Figure 2.15.

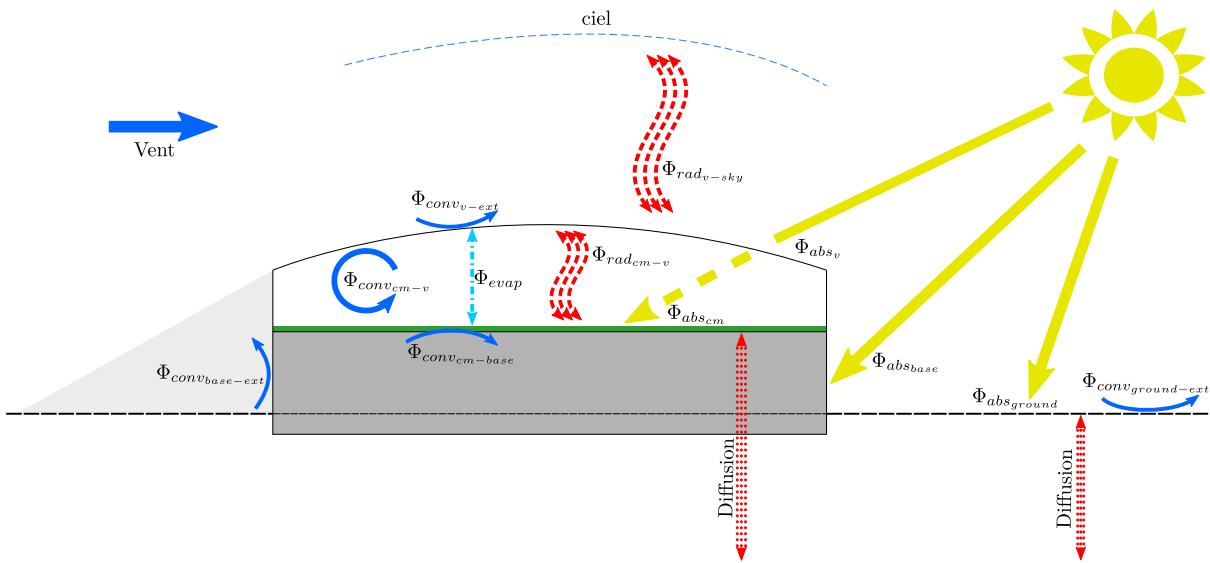


FIGURE 2.15 – Schéma des différents flux de chaleur pris en compte par le modèle de température de l'Algofilm 10 m².

Le PBR étant modélisé en trois dimensions, par la suite, les notations suivantes seront utilisées :

- \vec{x} est l'axe selon la largeur (notée l) du PBR, positif vers l'est.
- \vec{y} est l'axe selon la longueur (notée L) du PBR, positif vers le sud.
- \vec{z} est l'axe selon la profondeur, positif vers le bas. Ici, trois hauteurs sont prises en compte : h_{ext} la hauteur de la dalle de béton exposée à l'air ambiant, h_{base} la hauteur de la dalle de béton (partie enterrée comprise) et H la hauteur totale du domaine simulé.

2.5.2.3 Modélisation de la température de la vitre et du milieu de culture

Les équations utilisées pour décrire les sous-systèmes sont très similaires à celles du modèle de Goetz et al. (2011). Pour modéliser le transfert de chaleur de la culture vers la vitre par évaporation, Algofilm est comparé à un distillateur solaire (Équations 2.81 et 2.83). Dans les deux cas, de l'eau est chauffée par le soleil à travers un vitrage, cette eau s'évapore et se condense sur la couverture. Dans le cas d'Algofilm cependant, le condensat n'est pas récupéré et finit par retomber dans la culture (Hypothèse 7) : le rendement de production d'eau douce est donc nul.

Les équations des flux de chaleur relatifs à la vitre et au milieu de culture sont :

— La puissance lumineuse absorbée par la vitre

$$\Phi_{abs_g} = S_g \cdot \alpha_g \cdot q \quad (2.76)$$

— La puissance lumineuse absorbée par le milieu de culture

$$\Phi_{abs_{cm}} = S_{cm} \cdot \alpha_{cm} \cdot \tau_g \cdot q \quad (2.77)$$

— La puissance échangée par rayonnement entre la vitre et le ciel

$$\Phi_{rad_{g-sky}} = S_g \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_{sky}^4 - T_g^4) \quad (2.78)$$

— La puissance échangée par rayonnement entre la vitre et le milieu de culture

$$\Phi_{rad_{g-cm}} = S_g \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_{cm}^4 - T_g^4) = -\Phi_{rad_{cm-v}} \quad (2.79)$$

— La puissance échangée par convection entre la vitre et l'extérieur

$$\Phi_{conv_{g-ext}} = S_g \cdot h_{v-ext} \cdot (T_{ext} - T_g) \quad (2.80)$$

— La puissance échangée par convection entre la vitre et le milieu de culture

$$\Phi_{conv_{g-cm}} = S_g \cdot h_{g-cm} \cdot (T_{cm} - T_g) = -\Phi_{conv_{cm-g}} \quad (2.81)$$

— La puissance échangée par convection entre le milieu de culture et le haut du

support

$$\Phi_{conv_{cm-base}} = S_{cm} \cdot h_{cm-base} \cdot (\overline{T_{base}|_{z=0}} - T_{cm}) = -\Phi_{conv_{base-cm}} \quad (2.82)$$

— La puissance échangée par l'évaporation / condensation d'eau

$$\Phi_{cond} = S_g \cdot h_{evap} \cdot L_{evap} \cdot (Pw_{cm} - Pw_g) = -\Phi_{evap} \quad (2.83)$$

avec α_x [-] l'absorptivité du sous-système x et τ_x [-] sa transmittance. Ici, contrairement au modèle de Goetz et al. (2011), ces variables utilisent les fonctions présentées dans la Section 2.3. L'angle d'incidence des rayons lumineux sur le vitrage est calculé avec l'algorithme SPA (voir Section 2.2). Puisque le milieu de culture circule sur la dalle de béton, la moyenne des températures de la surface de la dalle en contact avec le milieu de culture (notée $\overline{T_{base}|_{z=0}}$) est utilisée pour calculer la chaleur échangée. L_{evap} [J.kg⁻¹] est la chaleur latente d'évaporation de l'eau. Pw_x [Pa] est la pression de vapeur saturante d'un air à la même température que le sous-système x .

La pression de vapeur saturante est calculée avec l'Équation 2.84 (American Society of Heating 2017) :

$$\begin{aligned} \ln Pw_x = & \frac{-5.8002206 \cdot 10^3}{T_x} + 1.3914993 - 4.8640239 \cdot 10^{-2} \cdot T_x \\ & + 4.1764768 \cdot 10^{-5} \cdot T_x^2 - 1.4452093 \cdot 10^{-8} \cdot T_x^3 \\ & + 6.5459673 \cdot \ln T_x \end{aligned} \quad (2.84)$$

Pour calculer les coefficients de transfert de chaleur entre la culture et la vitre, les relations applicables aux distillateurs solaires présentées par Duffie et Beckman (2013) sont utilisées :

$$h_{g-cm} = 0.884 \cdot \left((T_{cm} - T_g) + \left(\frac{Pw_{cm} - Pw_g}{2.689 \cdot 10^5 - Pw_{cm}} \right) \cdot T_{cm} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.85)$$

Le coefficient d'évaporation h_{evap} [kg.m².Pa⁻¹] est défini comme une fonction de h_{g-cm} (Duffie et Beckman 2013) :

$$h_{evap} = 9.15 \cdot 10^{-7} \cdot h_{g-cm} \quad (2.86)$$

Le coefficient de convection entre l'air ambiant et la vitre est donné par l'Équation 2.73. Enfin, le coefficient d'échange entre le milieu de culture et la dalle ($h_{cm-base}$) est de $200 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Ce paramètre a été identifié numériquement sur des données expérimentales récoltée et présentées dans la Section 3.3.2.1.

Les équations différentielles de la vitre et du milieu de culture sont finalement obtenues en établissant un bilan thermique sur chacun de ces sous-systèmes :

$$m_g \cdot Cp_g \cdot \frac{dT_g}{dt} = \Phi_{abs-g} + \Phi_{rad-sky} + \Phi_{rad-g-cm} + \Phi_{conv-g-ext} + \Phi_{conv-g-cm} + \Phi_{cond} \quad (2.87)$$

$$m_{cm} \cdot Cp_{cm} \cdot \frac{dT_{cm}}{dt} = \Phi_{abs-cm} + \Phi_{rad-g} + \Phi_{conv-cm-g} + \Phi_{conv-cm-base} + \Phi_{evap} \quad (2.88)$$

2.5.2.4 Modélisation de la température du sol

La dalle de béton sur laquelle repose Algofilm est directement posée sur le sol et échange de la chaleur avec lui. Pour dimensionner un nouveau réacteur, et particulièrement une nouvelle dalle, ces échanges de chaleur doivent être décrits par le modèle. Pour cela, la température du sol autour d'Algofilm (qui n'est pas directement sous le PBR) doit être calculée pour définir les conditions aux limites du sol sous la dalle. Le sol est modélisé comme un milieu homogène au sein duquel l'équation de la chaleur s'applique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left(\frac{\lambda}{\rho \cdot Cp} \cdot \nabla T \right) + S \quad (2.89)$$

avec T [K] une fonction qui donne en tout point la température du sol. λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] est sa conductivité thermique, ρ [kg.m^{-3}] sa densité et Cp [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] sa capacité thermique massique. S [K.s^{-1}] est une fonction qui donne en tout point du domaine le terme source.

Puisque la température du sol ne dépend que de la profondeur (Hypothèse 8), le problème est réduit à une dimension. Deux conditions aux limites doivent donc être définies :

- En profondeur, la température du sol est constante (Hypothèse 9). Une condition de Dirichlet peut donc être appliquée à cette frontière du domaine :

$$T_{ground}|_{z=H} = T_{ground-const} \quad (2.90)$$

avec $T_{ground-const}$ la température constante en profondeur. La moyenne annuelle des températures de l'air ambiant est utilisée ($12.3 \text{ }^\circ\text{C}$ à Saint-Nazaire, 47.252 N - 2.250

W, France)

- À la surface, le sol échange de la chaleur avec l'environnement, la température de cette frontière du domaine simulé est donc inconnue a priori. Une condition de Dirichlet ne peut donc pas être appliquée. Afin de faire apparaître les flux de chaleur entrants et sortants du sol, une condition de Neumann est nécessaire. Puisque les flux de chaleur à cette frontière du domaine varient au cours de la journée (au gré des variations météorologiques journalières), ils ont été introduits dans le terme de source. Une condition de Neumann homogène est donc appliquée à ce bord. Appliquer une condition de Neumann homogène revient à faire un bilan de chaleur sur la première cellule de discrétisation du domaine et permet donc de faire apparaître les mêmes bilans de chaleur que pour les équations de la vitre et du milieu de culture.

$$\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0 \quad (2.91)$$

Le terme de source de l'Équation 2.89 permet de faire apparaître les échanges de chaleur entre la surface du sol et l'environnement. Trois modes d'échanges sont modélisés : la puissance lumineuse absorbée, la puissance rayonnée, et la puissance échangée par convection. Cela donne :

$$\begin{aligned} S(0) = & (\alpha_{ground} \cdot q \\ & + \sigma \cdot \epsilon_{ground} \cdot (T_{sky}^4 - T_{ground}(0)^4) \\ & + h_{conv-sol} \cdot (T_{ext} - T_{ground}(0))) \\ & \cdot \frac{1}{\Delta x \cdot \rho_{ground} \cdot Cp_{ground}} \end{aligned} \quad (2.92)$$

avec $h_{conv-sol}$ [W.K⁻¹] le coefficient d'échange entre le sol et l'air ambiant calculé avec l'Équation 2.73 et Δx le pas de discrétisation de la profondeur.

L'équation est résolue en utilisant la méthode des différences finies sous sa forme implicite (Öziik et al. 2017).

2.5.2.5 Modélisation de la température de la dalle de béton

Contrairement à la plaque inox qui servait de support pour l'Algofilm 0.33 m², la dalle de béton a une inertie thermique importante. Sa température ne peut donc être considérée

comme homogène et égale à celle du milieu de culture. La température du support sera donc calculée en résolvant l'équation de la chaleur (Équation 2.89). La dalle de béton est simulée en trois dimensions.

Pour prendre en compte les échanges entre le sol et la dalle dans le modèle, cette équation s'applique à la température de la dalle et à une profondeur de sol de 5 m (sous la dalle). λ , ρ et Cp sont donc des fonctions de l'espace (des fonctions échelon). Enfin, pour simplifier les calculs, la pente du plan incliné n'est pas formellement modélisée : le système dalle + sol est assimilé à un bloc parallélépipédique (en trois dimensions). Cette simplification est raisonnable car le pilote étant relativement court, la différence de hauteur due à la pente représente environ 1% de la hauteur totale simulée.

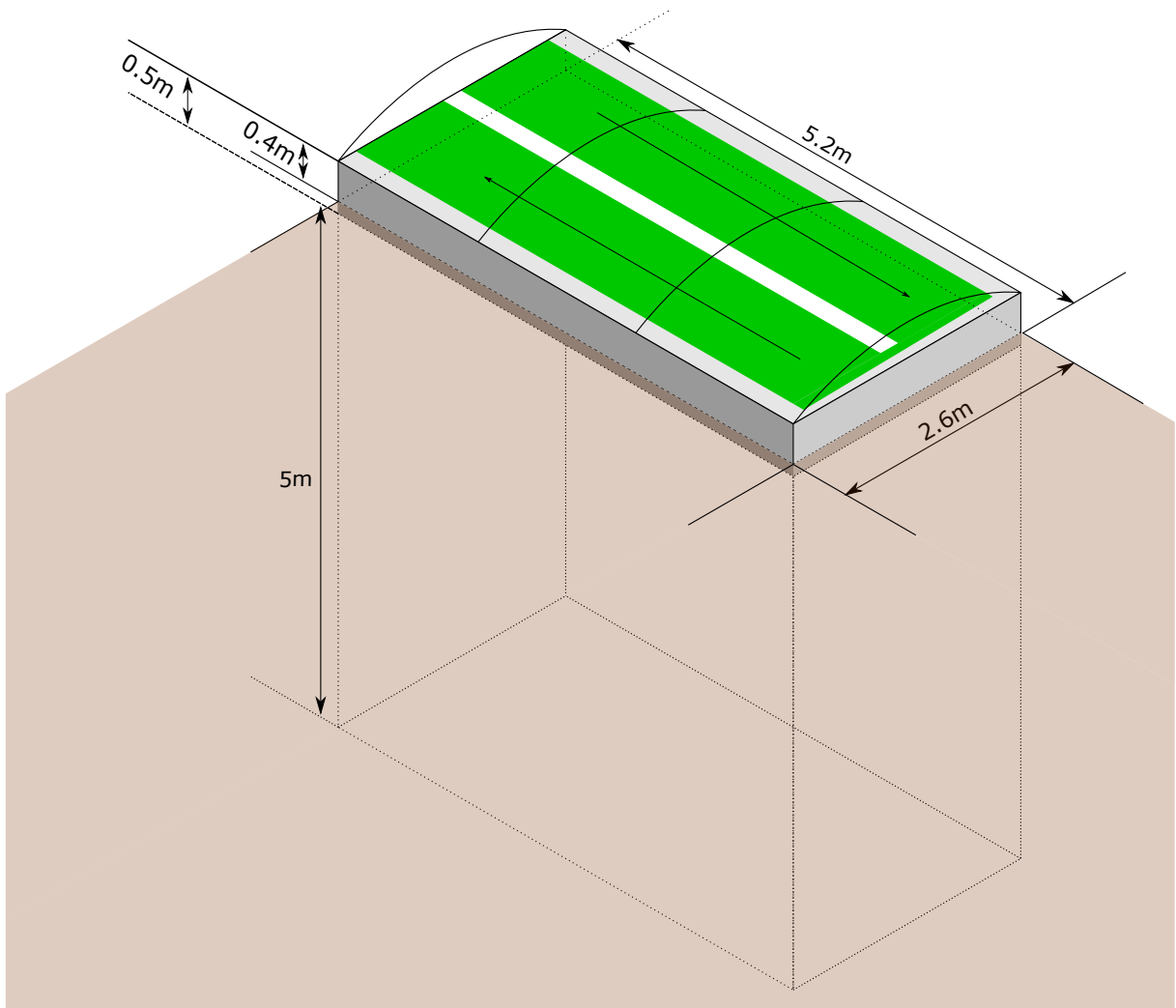


FIGURE 2.16 – Schéma du système simulé.

Pour résoudre l'équation de la chaleur, une condition aux limites est définie pour chacune de faces du bloc :

- Pour la face inférieure, la même condition de Dirichlet que pour le sol nu est appliquée (Hypothèse 9) :

$$T_{base}|_{z=H} = T_{ground-const} \quad (2.93)$$

- Pour la face qui échange de la chaleur avec le milieu de culture (Équation 2.82), comme pour la surface du sol, une condition de Neumann homogène est appliquée et la puissance échangée est ajoutée à la fonction source (S) :

$$\frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{z}}|_{z=0} = 0 \quad (2.94)$$

$$S(x, y, 0) = \frac{S_{cell} \cdot h_{cm-base} \cdot (T_{cm} - T_{base}(x, y, 0))}{V_{cell} \cdot \rho(x, y, 0) \cdot Cp(x, y, 0)} \quad (2.95)$$

avec S_{cell} [m²] la surface de contact d'une cellule de la discrétisation du domaine et V_{cell} [m³] son volume.

- De même, une condition de Neumann homogène est appliquée à la partie à l'air libre des autres faces ($0 \leq z \leq h$).

$$\frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{y}}|_{\forall x, y=0, 0 \leq z \leq h_{ext}} = 0 \quad (\text{face nord}) \quad (2.96)$$

$$\frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{y}}|_{\forall x, y=L, 0 \leq z \leq h_{ext}} = 0 \quad (\text{face sud}) \quad (2.97)$$

$$\frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{x}}|_{x=0, \forall y, 0 \leq z \leq h_{ext}} = 0 \quad (\text{face ouest}) \quad (2.98)$$

$$\frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{x}}|_{x=l, \forall y, 0 \leq z \leq h_{ext}} = 0 \quad (\text{face est}) \quad (2.99)$$

La fonction de source appliquée à chaque face de la dalle à l'air libre comprend trois modes d'échange avec l'environnement extérieur : la puissance lumineuse absorbée ($\Phi_{abs-base}$), la puissance rayonnée ($\Phi_{rad-base}$) et la puissance échangée par convection ($\Phi_{conv-base}$) :

$$\Phi_{abs-base} = \begin{cases} S_{face} \cdot \alpha_{base} \cdot q_{face} & \text{si la face est éclairée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.100)$$

$$\Phi_{rad-base} = S_{face} \cdot \sigma \cdot \epsilon_{base} \cdot (T_{ext}^4 - T_{face}^4) \quad (2.101)$$

$$\Phi_{conv-base} = S_{face} \cdot h_{conv-face} \cdot (T_{ext} - T_{face}) \quad (2.102)$$

avec q_{face} [W.m^2] la puissance lumineuse reçue par la face considérée. Une face est considérée éclairée si l'angle entre les rayons du soleil et la normale à la face est inférieur à 90° . $h_{conv-face}$ [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] est le coefficient d'échange entre la face considérée et l'extérieur. Il est calculée avec l'Équation 2.73 où la vitesse du vent vaut u_{wind} pour les faces au vent et 0 m.s^{-1} pour les faces sous le vent.

- Une condition de Neumann hétérogène est appliquée à la partie enterrée des faces verticales ($h_{ext} \leq z \leq H$) :

$$\left. \frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{x}} \right|_{h_{ext} < z \leq H} = \frac{\Delta(T_{ground} - T_{base})}{\Delta x} \quad (\text{faces est et ouest}) \quad (2.103)$$

$$\left. \frac{\partial T_{base}}{\partial \vec{y}} \right|_{h_{ext} < z \leq H} = \frac{\Delta(T_{ground} - T_{base})}{\Delta y} \quad (\text{faces nord et sud}) \quad (2.104)$$

L'équation de chaleur appliquée à la dalle est résolue en utilisant la méthode des différences finies sous sa forme implicite.

2.5.2.6 Paramètres du modèle

Les paramètres utilisés par le modèle sont listés dans la Table 2.5

Paramètre		Valeur	Unité
Vitrage simple (PMMA)	L	0.004	m
	m	100	kg
Vitrage alvéolaire (PMMA)	L	0.005	m
	l	0.009	m
	e	0.001	m
	h	0.01	m
	m	70	kg
Gouttelettes	$f_{droplet}$	0.95	-
	θ_{ca}	71 (Mangi et al. 2021)	°
	r_c	0.005 (Mangi et al. 2021)	m
l		2.6	m
L		5.2	m
h_{ext}		0.4	m
h_{base}		0.5	m
λ_{base}		1.4	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
λ_{ground}		0.52	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
ρ_{base}		1800	kg.m ⁻³
ρ_{ground}		2050	kg.m ⁻³
Cp_g		2100	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Cp_{water}		4185	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Cp_{base}		880	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Cp_{ground}		1850	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
L_{evap}		2.257×10 ⁶	J.kg ⁻¹

 TABLE 2.5 – Paramètres du modèle thermique de l'Algofilm 10 m²

2.5.2.7 Analyse de sensibilité

Une étude exhaustive optimisant chaque paramètre du réacteur est longue et complexe à mener, le choix d'un paramètre ayant souvent des répercussions sur les autres. Il est donc préférable se concentrer sur les paramètre les plus influents du système. L'étude de sensibilité d'un modèle donne, pour chacune de ses variables, son influence sur les sorties

du modèle (Urbain 2017). Cette analyse a été conduite sur le modèle thermique d'Algofilm et est présentée dans cette section.

De façon générale, ce modèle est dépendant des conditions météorologiques. Pour mener l'étude de sensibilité, des conditions fictives ont été utilisées pour simplifier l'analyse. La direction du vent a été fixée au nord-est et sa vitesse à 6 m.s^{-1} . Cette vitesse et cette direction sont les moyennes observées sur la plateforme Algosolis en septembre 2020 (voir Section 3.2.1). La puissance lumineuse reçue et la température ambiante sont des fonctions du temps données par les Équations 2.105 et 2.106. Elles permettent de créer des profils types qui suivent une loi sinusoïdale :

$$q_0(t) = \begin{cases} q_{0-max} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{t-SR}{SS-SR}\right) & \text{si } SR < t < SS \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.105)$$

$$T_{ext}(t) = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cdot \sin\left(\pi \cdot \left(\frac{t - \frac{SR+SS}{2} - 7200}{43200} + \frac{1}{2}\right)\right) \quad (2.106)$$

avec t [s] le nombre de secondes écoulées depuis minuit, q_{0-max} [W.m^{-1}] la puissance lumineuse au zénith, SR [s] l'heure de lever du soleil et SS [s] l'heure de coucher du soleil. T_{min} et T_{max} [$^{\circ}\text{C}$] sont les températures min et max de la journée.

Les deux équations sont périodiques et se basent sur la fonction sinus, elles comprennent deux termes. Le premier est la valeur autour de laquelle la fonction oscille (0 pour $q_0(t)$), la moyenne entre T_{min} et T_{max} pour $T_{ext}(t)$). Le second détermine l'amplitude (le terme devant le sinus) et la période (le terme dans le sinus) des oscillations.

Dans l'expression de $q_0(t)$, la condition sur t permet d'assurer qu'aucune lumière n'apparaît la nuit quelque soit la durée de la demi-oscillation obtenue lorsque t est compris dans l'intervalle $[SR \ SS]$. Dans l'expression de $T_{ext}(t)$, la constante 43200 correspond à 12 heures (exprimées en secondes), la période d'oscillation est donc de 24 heures. La constante 7200 (deux heures en secondes) permet d'avoir la température maximale deux heures après le zénith. Enfin, la constante $+\frac{1}{2}$ permet de définir la phase de la fonction (i.e. la température augmente durant la matinée et diminue durant l'après midi).

Pour l'étude, q_{0-max} a été fixé à 750 W, T_{min} et T_{max} à $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ce sont des valeurs couramment observées pendant le mois de septembre 2020. Pour le calcul des angles d'incidence et des éphémérides, la date du 1^{er} septembre 2020 (UTC+2) a été retenue.

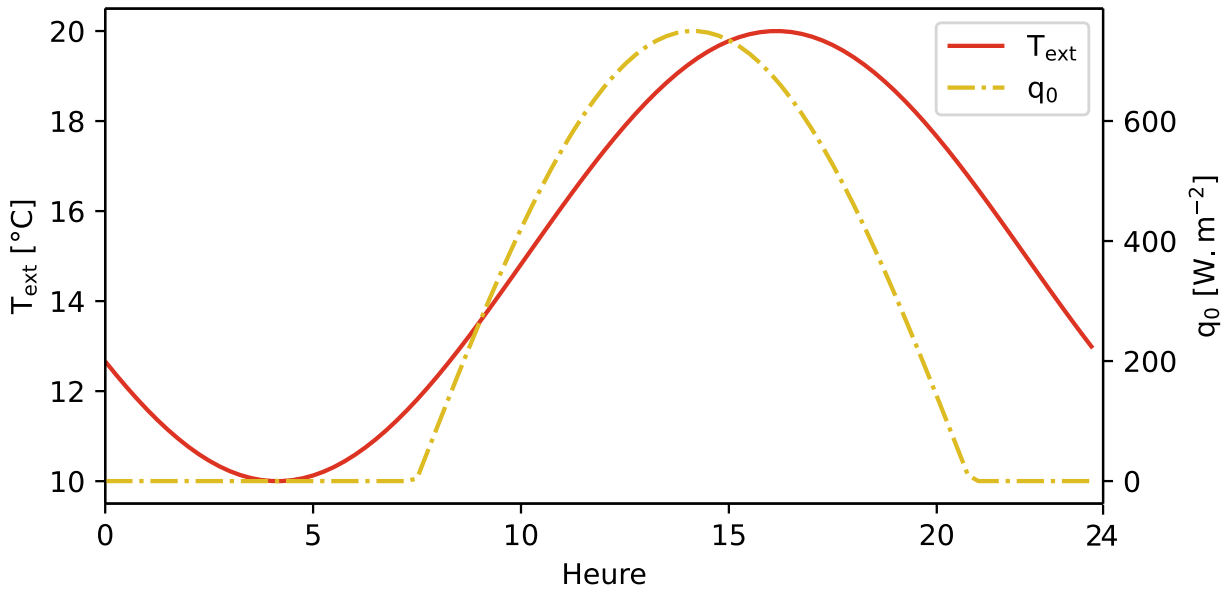


FIGURE 2.17 – Profils de lumière et de température utilisés pour l’analyse de sensibilité.

Les équations du modèle d’Algofilm 10 m² requierent une température initiale pour pouvoir être résolues. Les températures du milieu de culture et de la vitre sont fixées à 15 °C. La température de la dalle est une fonction linéaire de la profondeur avec une température de 15 °C à la surface en contact avec le milieu de culture et de 12.3 °C ($T_{\text{ground-const}}$) en profondeur. La dalle de béton ayant une inertie thermique importante, l’historique de ses températures joue un rôle sur la température du PBR. Ainsi, son initialisation en début de simulation a un impact sur les résultats du modèle. Pour corriger cela, le scénario météorologique est répété plusieurs fois avant que les résultats de sensibilité ne soient collectés. Cela mime donc une dalle de béton dont la température a évolué librement pendant plusieurs jours. Une étude des sorties du modèle en fonction du nombre de jours répétés a montré qu’au delà de 14 jours la température du système suit un cycle reproductible (régime périodique). Il est alors garanti que la température initiale n’a plus d’influence et seuls les paramètres étudiés en ont. La simulation est donc répétée 14 fois, puis une 15^{ème} journée est simulée. Les températures minimales et maximales du milieu de culture obtenues lors de cette journée additionnelle (identique aux précédentes) sont alors enregistrées.

Pour chaque paramètre du réacteur, une simulation est menée selon cette méthode en faisant varier la valeur indiquée dans la Table 2.5. Les valeurs des paramètres, les températures obtenues et les variations par rapport à la référence sont compilées dans la Table 2.6.

Paramètre modifié	Valeur	T _{min} [°C]	T _{max} [°C]
référence	-	18.72	40.42
Vitrage alvéolaire	-	18.35 (-0.38)	38.78 (-1.64)
$f_{droplet}$	0.855	18.83 (+0.11)	41.13 (+0.70)
	1	18.67 (-0.06)	40.05 (-0.37)
θ_c	63.9 °	18.74 (+0.01)	40.65 (+0.23)
	78.1 °	18.71 (-0.02)	40.17 (-0.26)
r_c	0.04 m	18.72 (-0.00)	40.42 (-0.00)
	0.06 m	18.72 (+0.00)	40.42 (+0.00)
m_g	90 kg	18.72 (-0.01)	40.43 (+0.01)
	110 kg	18.73 (+0.01)	40.42 (-0.01)
m_{cm}	36 kg	18.72 (-0.00)	40.43 (+0.00)
	44 kg	18.73 (+0.01)	40.42 (-0.01)
α_{base}	0.81	18.54 (-0.18)	40.12 (-0.31)
	0.99	18.90 (+0.18)	40.73 (+0.30)
ϵ_g	0.77	19.12 (+0.39)	40.90 (+0.48)
	0.95	18.34 (-0.38)	39.96 (-0.47)
h_{ext}	0.20 m	18.63 (-0.09)	40.18 (-0.24)
	0.30 m	18.60 (-0.12)	40.31 (-0.12)
h_{base}	0.30 m	18.36 (-0.36)	40.29 (-0.13)
	0.50 m	19.04 (+0.31)	40.60 (+0.18)
k_{base}	1.26 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	18.70 (-0.02)	41.04 (+0.61)
	1.54 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	18.72 (+0.02)	39.86 (-0.56)
ρ_{base}	1620 kg.m ⁻³	18.29 (-0.44)	40.84 (+0.42)
	1980 kg.m ⁻³	19.11 (+0.39)	40.06 (-0.37)
Cp_{base}	792 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	18.29 (-0.44)	40.84 (+0.42)
	968 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	19.11 (+0.39)	40.06 (-0.37)

TABLE 2.6 – Résultats de l'analyse de sensibilité sur les paramètres du photobioréacteur

L'analyse de sensibilité révèle que les paramètres les plus influents sur la température du système sont ceux liés au vitrage utilisé. L'utilisation d'un vitrage alvéolaire à la place d'un vitrage simple réduit de 1.64 °C la température maximale atteinte par le milieu de culture. Cela s'explique notamment par la plus faible transmittance d'un vitrage alvéolaire

par rapport à un vitrage simple (voir Figure 2.11). En réduisant la quantité de lumière qui atteint le milieu de culture, le vitrage réduit la quantité de chaleur qu'il absorbe et donc sa température.

De même, les gouttelettes de condensation qui se forment sur la face interne de la vitre réduisent elles aussi la transmittance du vitrage et par le même mécanisme, la température maximale du milieu de culture. Cependant, les trois paramètres qui caractérisent ces gouttelettes n'ont pas la même importance. Ici, la fraction de la surface recouverte de gouttes est le paramètre le plus influent : plus il y a de gouttelettes, moins le vitrage transmet de lumière. L'angle de contact entre la vitre et la goutte a une influence moindre. Cela suggère que l'emploi d'un matériau modifiant à la marge cet angle de contact n'est pas justifié. Enfin, la taille des gouttelettes a un impact négligeable sur la température du milieu de culture. Cela rejoint les conclusions de Zhu et al. (2017) qui ont démontré que la distribution spatiale et la distribution de taille des gouttelettes n'influent pas sur la transmittance du vitrage. À noter que cette étude ne prend cependant pas en compte l'absorption lumineuse des gouttes. Cette analyse de sensibilité montre que l'élongation du chemin optique des gouttes par l'augmentation de leur rayon est trop marginale pour induire une augmentation significative de l'absorption lumineuse des gouttes.

Ces paramètres qui touchent à la transmittance du vitrage sont plus impactants le jour que la nuit, mais la chaleur qui n'a pas été absorbée le jour fait défaut la nuit. La température minimale atteinte est donc légèrement abaissée.

La température d'un système ne dépend pas que de l'énergie qu'il reçoit mais aussi de sa capacité à stocker cette énergie. Cette faculté est notamment fonction de sa masse et de sa capacité thermique spécifique. L'analyse de sensibilité montre que la masse de la vitre n'influe presque pas sur les résultats obtenus. De même, celle du milieu de culture a une influence négligeable. Ici, la dalle de béton dont la masse thermique (ρ_{base} et Cp_{base}) est beaucoup plus importante et avec qui le milieu de culture échange beaucoup de chaleur pilote la température de la culture. Il apparaît alors que l'essentiel de la chaleur stockée par le réacteur l'est dans son support. Choisir ses propriétés thermiques sera donc un important levier d'optimisation.

Enfin, l'analyse de sensibilité montre que réduire la hauteur de la dalle exposée à l'extérieur (enterrer le réacteur) permet aussi de diminuer la température maximale atteinte. En effet, cette partie est exposée au soleil, et comme le montre la sensibilité du paramètre α_{base} . Cela contribue fortement au réchauffement de la dalle et donc à celui du milieu de culture. Les échanges par convection entre l'extérieur et la dalle ne sont en revanche pas

suffisants pour contrebalancer la chaleur captée par absorption lumineuse. Enterrer complètement le réacteur apparaît alors comme une solution potentielle, cependant, cela rend le réacteur peu pratique à manipuler. Une alternative possible consisterait à appliquer un traitement de surface réduisant la quantité de lumière absorbée par la dalle (avec une peinture blanche par exemple).

Todisco et al. (2022) ont montré que le facteur le plus influent sur la température de leur système était les conditions météorologiques. En suivant la même méthodologie que précédemment, une étude de sensibilité a été menée sur les paramètres météorologiques. Les résultats de cette analyse sont regroupés dans la Table 2.7.

Paramètre modifié	Valeur	T_{\min}	T_{\max}
référence	-	18.90	40.72
q_{0-max}	675W	18.32 (-0.58)	38.23 (-2.49)
	825W	19.47 (+0.57)	43.16 (+2.44)
T_{ext}	11-19 °C	19.11 (+0.21)	40.64 (-0.08)
	9-21 °C	18.69 (-0.21)	40.81 (+0.08)
u_{wind}	5.4 m.s ⁻¹	18.69 (+0.13)	40.80 (+0.27)
	6.6 m.s ⁻¹	18.78 (-0.12)	40.47 (-0.26)

TABLE 2.7 – Résultats de l'analyse de sensibilité sur les paramètres météorologiques

Les résultats de cette analyse rejoignent les conclusions de Todisco et al. (2022). La lumière reçue, en particulier, est très influente sur la température de culture obtenue. C'est concordant avec l'influence observée des paramètres liés à la transmittance du vitrage sur la température du milieu de culture. Il ressort de cette analyse que pour optimiser la conception du PBR du point de vue thermique, une connaissance précise des conditions climatiques du lieu où le réacteur va être implanté est nécessaire. De même, une stratégie de pilotage intelligente de la température du PBR requiert une prédiction fiable des conditions météorologiques à venir.

2.5.2.8 Balayage de la phase gaz par de l'air sec

Dans la configuration actuelle du pilote 10 m² d'Algofilm, la phase gaz est isolée de l'extérieur : il n'y a pas d'autres entrées / sorties que les éventuelles fuites (négligées par le modèle thermique). Cependant, afin de contrôler la température du milieu de culture, il

est possible de mettre en place un balayage d'air. Ce gaz va alors chasser l'air humide déjà présent et se charger lui même en humidité. Cette eau provient de l'évaporation du milieu de culture, ce qui constitue une perte de chaleur pour le système. Afin de simuler cet effet, la perte en eau peut être calculée via l'Équation 2.110 et la chaleur perdue ajoutée au bilan de chaleur de la culture :

$$\dot{m}_{water} = \dot{Q}_{air} \cdot (Sh_{out} - Sh_{in}) \quad (2.107)$$

avec \dot{m}_{water} [$\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{s}^{-1}$] le débit d'eau évaporé par la culture, \dot{Q}_{air} [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] le débit d'air, Sh_{in} et Sh_{out} [$\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{air}}^{-1}$] représentent l'humidité spécifique de l'air en entrée et en sortie respectivement.

L'humidité spécifique est calculée via les Équations 2.108 et 2.109 (American Society of Heating 2017) :

$$Sh = \frac{Wr}{1 + Wr} \quad (2.108)$$

$$Wr = 0.621945 \cdot \frac{P_w}{P - P_w} \quad (2.109)$$

avec Wr [$\text{kg}_{\text{eau}} \cdot \text{kg}_{\text{air}}^{-1}$] le ratio d'humidité dans l'air et P [Pa] la pression atmosphérique.

La chaleur perdue par évaporation peut être déduite de l'Équation 2.107. Cette équation doit être ajoutée au bilan de chaleur du milieu de culture.

$$\Phi_{evap-cm} = \dot{m}_{water} \cdot L_{evap} \quad (2.110)$$

Estimer l'humidité spécifique de l'air en sortie peut être difficile si la couverture n'est pas étanche et qu'il y a des fuites. Cependant, si le rapport entre le débit d'air et le volume de la phase gaz (le taux de renouvellement) est suffisamment faible, l'évaporation d'eau du milieu de culture peut être suffisamment rapide pour que l'air en sortie soit considéré comme saturé en eau. Seule la teneur en eau de l'air en entrée doit alors être mesurée.

Contrôler la température du milieu de culture par balayage d'air est donc théoriquement possible. Cela nécessite cependant une stratégie avancée pour piloter le débit d'air envoyé. Le modèle thermique d'Algofilm couplé à ces équations et aux prévisions météorologiques de Météofrance sont des briques élémentaires nécessaires à l'élaboration d'une telle stratégie.

2.5.2.9 Inclusion de matériaux à changement de phase

Parmi les pistes envisagées pour réguler passivement la température d'un photobio-réacteur solaire, l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) apparaît comme prometteuse (Le Borgne 2011). Les MCP sont des matériaux dont la température de fusion / solidification est relativement basse (généralement entre 10 °C et 80 °C). En fondant, ils peuvent stocker une grande quantité de chaleur sous forme de chaleur latente. Celle-ci est ensuite restituée lorsqu'ils se resolidifient. Ainsi, lorsque les MCP chauffent et se mettent à fondre, leur température est bloquée à leur température de fusion tant que tout le MCP n'a pas fondu : un plateau dans l'évolution des températures apparaît. Une fois que tout le MCP a fondu, la température peut de nouveau augmenter.

Lorsqu'un PBR est opéré en conditions solaires, la lumière solaire reçue par le système joue directement sur sa température (Todisco et al. 2022). Lors d'une belle journée sans évènement météorologique perturbateur (pluie, nuages *etc.*), sa température va augmenter jusqu'à atteindre un maximum aux alentours du zénith. C'est pendant cette phase que des températures incompatibles avec la culture de microalgues peuvent être atteintes. Au delà, la température va diminuer jusqu'à atteindre un minima pendant la nuit. Le principe de l'utilisation de MCP inclus dans un PBR est donc d'utiliser leur capacité à stocker de la chaleur sous forme latente pour retarder la montée en température du milieu de culture, idéalement au delà de l'heure où le maximum devrait être atteint. Les MCP agissent ici comme une unité qui augmente la densité de stockage de la dalle. Or, d'après l'analyse de sensibilité, ce paramètre a aussi une grande influence sur la température du milieu de culture. À noter que cette idée a été testée avec succès sur le prototype Algofilm 0.33 m² (Le Borgne 2011) et est aujourd'hui intégrée à un brevet de régulation thermique passive de la technologie.

La Section 4.2 présente la conception d'un grand Algofilm qui inclut des matériaux à changement de phase comme stratégie de contrôle passif de la température. Cette étude se base sur des calculs issus du modèle thermique du système Algofilm 10 m² actuellement implanté sur la plateforme Algosolis et sur les équations développées dans cette section.

La disposition des MCP dans un PBR a déjà été discutée par Le Borgne (2011). Il a été retenu ici que les MCP seraient directement inclus dans la dalle de béton (comme Young et al. (2017)) pour bénéficier des échanges thermiques entre le milieu de culture et la dalle. Les MCP sont inclus sous forme de billes microencapsulées avec une enveloppe et un cœur. Connaissant les propriétés thermiques du béton et de ces deux composants, il est possible de calculer les propriétés globales de la dalle. Sa masse volumique et sa

capacité calorifique sont calculées comme la moyenne pondérée par le volume des masses volumiques du béton, de l'enveloppe et du cœur des MCP (Young et al. 2017) :

$$\rho_{base} = \phi_e \cdot \rho_e + \phi_c \cdot \rho_c + (1 - \phi_e - \phi_c) \cdot \rho_b \quad (2.111)$$

$$Cp_{base} = \phi_e \cdot Cp_e + \phi_c \cdot Cp_c(T) + (1 - \phi_e - \phi_c) \cdot \rho_b \quad (2.112)$$

avec ϕ_x [-] la fraction volumique occupée par le composant x . L'indice e désigne l'enveloppe des MCP, c le cœur et b le béton.

La capacité calorifique du cœur des billes (le MCP) est une fonction de la température. C'est une fonction échelon avec trois paliers : avant, pendant, et après fusion du MCP.

$$Cp_c(T) = \begin{cases} Cp_{c-solide} & \text{si } T_{base} < T_f - \frac{\Delta T_f}{2} \\ Cp_{c-solide} + \frac{h_f}{\Delta T_f} & \text{si } T_f - \frac{\Delta T_f}{2} \leq T_{base} \leq T_f + \frac{\Delta T_f}{2} \\ Cp_{c-liquide} & \text{si } T_f + \frac{\Delta T_f}{2} < T_{base} \end{cases} \quad (2.113)$$

avec h_f [J.kg⁻¹] l'enthalpie de fusion du MCP, T_f [K] est la température de fusion et ΔT_f [K] est l'intervalle dans lequel la fusion se produit.

La conductivité thermique est donnée par le modèle de Felske (Young et al. 2017).

$$k_{base} = \frac{k_b \cdot (1 - \phi_s - \phi_c) \cdot \left(6 + 4 \frac{\phi_s}{\phi_c} + 2 \frac{\phi_s \cdot k_c}{\phi_c \cdot k_e}\right) + (1 + 2 \cdot \phi_c + 2 \cdot \phi_s) \cdot \left(3 + \frac{\phi_s}{\phi_c} k_c + 2 \frac{\phi_s}{\phi_c} k_e\right)}{(2 + \phi_c + \phi_s) \cdot \left(3 + 2 \frac{\phi_s}{\phi_c} + 2 \frac{\phi_s \cdot k_c}{\phi_c \cdot k_e}\right) + (1 - \phi_c - \phi_s) \cdot \left(\left(3 + \frac{\phi_s}{\phi_c}\right) \cdot \frac{k_c}{k_b} + 2 \frac{\phi_s \cdot k_e}{\phi_c \cdot k_b}\right)} \quad (2.114)$$

Lorsqu'un système Algofilm incluant des MCP est simulé, ces propriétés sont constamment recalculées au cours du temps.

2.6 Modèle de production photovoltaïque

Au cours de la thèse, une étude en simulation du potentiel d'un couplage entre un panneau photovoltaïque semi-transparent et un photobioréacteur a été menée (voir Section 4.1). Cette étude prévoit notamment le calcul de la production électrique d'un panneau photovoltaïque en fonction du spectre lumineux qu'il reçoit. Pour cela, le modèle de Parlevliet et Moheimani (2014), présenté dans cette section, est utilisé.

2.6.1 Équations

La puissance électrique délivrée par le panneau photovoltaïque est une fonction du spectre lumineux reçu et est calculée par les équations suivantes :

$$P = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (2.115)$$

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} EQE_{\lambda} \cdot AF_{\lambda} \cdot q_{\lambda} d\lambda \quad (2.116)$$

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T_{stc}}{e} \cdot \ln \left(\frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \right) \quad (2.117)$$

avec P [W] la puissance fournie par le panneau photovoltaïque, I_{sc} [A] le courant de court circuit, et V_{oc} [V] la tension de circuit ouvert. k [$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] est la constante de Boltzmann, e [A.s] la charge élémentaire et T_{stc} [K] la température standard de test (25°C). La puissance lumineuse reçue par le panneau (q_{λ} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$]) et la fraction de lumière absorbée par le panneau (AF_{λ} [-]) sont fonction de la longueur d'onde λ . Le "fill factor" (FF [-]), l'"external quantum efficiency" (EQE_{λ} [-], fonction de la longueur d'onde) et le courant de saturation à l'obscurité (I_0 [A]) sont des données fournies par le constructeur.

2.6.2 Spectre solaire

Dans l'Équation 2.116 les termes de l'intégrale, notamment q_{λ} , sont fonction de la longueur d'onde. Cependant, lors de l'implémentation du modèle, il est courant d'avoir en donnée d'entrée une puissance lumineuse scalaire (notée q_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]) plutôt qu'une donnée spectrale. Pour convertir cette donnée, le spectre lumineux standard de test pour mesurer les performances des panneaux photovoltaïques (ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012)) sera utilisé comme référence (voir Figure 2.18).

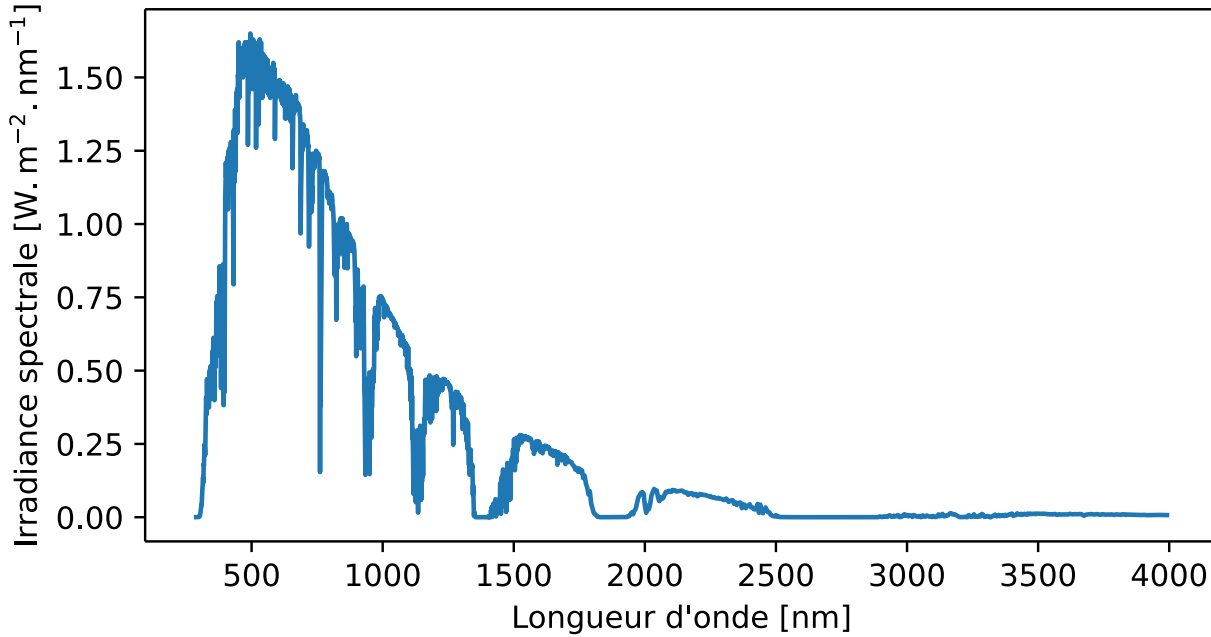


FIGURE 2.18 – Spectre lumineux solaire de référence ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012).

La puissance lumineuse à une longueur d'onde λ donnée est alors donnée par l'Équation 2.118 :

$$q_{\lambda} = q_{\lambda-ref} \cdot \frac{q_0}{\int_0^{\infty} q_{\lambda-ref} d\lambda} \quad (2.118)$$

avec $q_{\lambda-ref}$ [$\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$] la puissance lumineuse du spectre de référence à la longueur d'onde λ

2.6.3 Dépendance à la température

Lorsque les panneaux photovoltaïques sont exposés à la lumière solaire, leur température augmente et cela impacte négativement leur efficacité. Pour modéliser cette influence, une correction linéairement dépendante de la température est appliquée (Skoplaki et Palyvos 2009) :

$$\eta_{real} = \eta_{stc} \cdot (1 - \beta \cdot (T - T_{stc})) \quad (2.119)$$

avec η_{real} [-] le rendement de conversion réel du panneau photovoltaïque, η_{stc} [-] le rendement de conversion dans les conditions standard de test (à 25°C), T [K] la température

actuelle et T_{stc} [K] la température de conditions standard de test (25°C). β [K⁻¹] est le coefficient de corrélation du panneau photovoltaïque.

La valeur de β est une donnée du constructeur et différentes valeurs sont affichées pour différents types de panneaux. Cependant, une valeur de 0.0045 K⁻¹ est couramment donnée (Skoplaki et Palyvos 2009).

2.6.4 Caractéristiques du panneau photovoltaïque

Les performances d'un panneau photovoltaïque sont dépendantes de sa technologie et de ses caractéristiques. Le module étudié dans la Section 4.1 est un panneau type monocristallin dont les caractéristiques sont issues de Parlevliet et Moheimani (2014). Le courant de saturation à l'obscurité est $I_0 = 5.29 \times 10^{-13}$ [A] et le "fill factor" vaut $FF = 0.6296$ [-]. La courbe EQE du panneau est donnée dans la Figure 2.19.

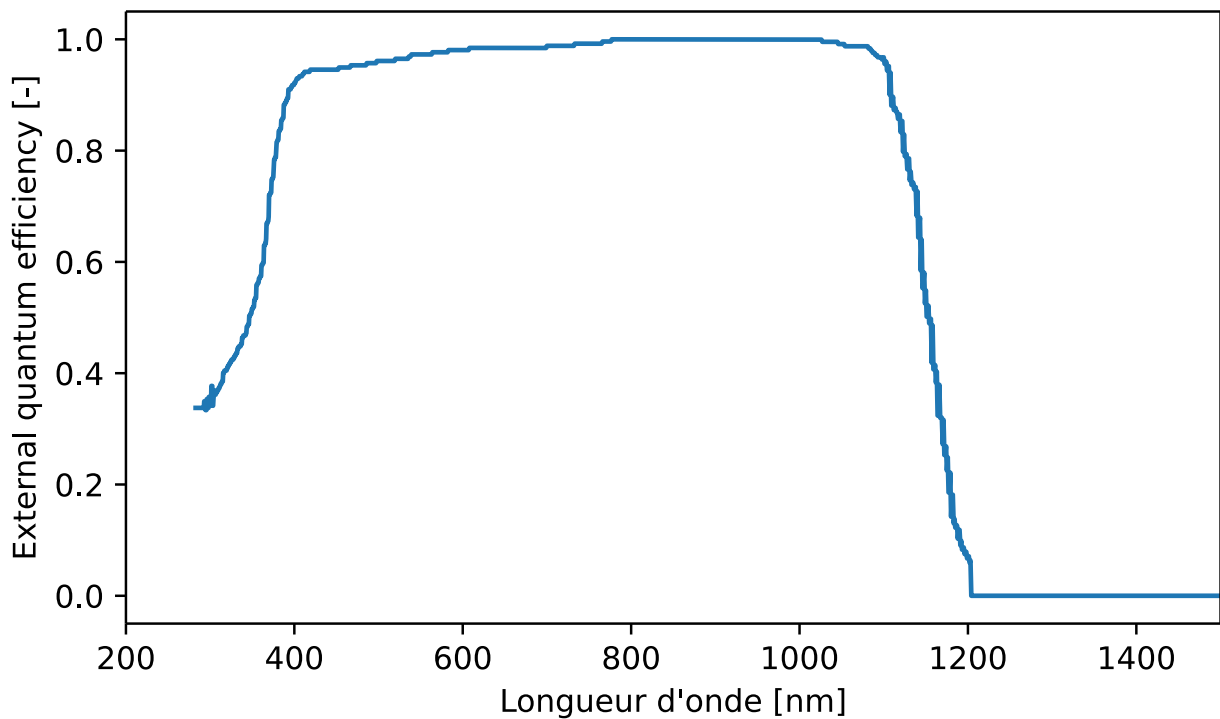


FIGURE 2.19 – Courbe EQE d'un panneau photovoltaïque monocristallin.

Conclusion

Choisir et dimensionner les différentes parties d'un réacteur de type Algofilm requiert une connaissance fine de leur influence sur le comportement et les performances du système. De même, le pilotage d'un tel PBR dont le comportement est fortement dynamique nécessite d'anticiper les évolutions des différents paramètres pour rechercher une réponse adéquate et optimale. Comme il sera illustré par la suite, les outils et modèles présentés dans ce chapitre sont une brique essentielle à ces fins. Par exemple, cela permet de proposer des solutions d'ingénierie originales comme l'inclusion de matériaux à changement de phase ou le couplage à un panneau photovoltaïque semi-transparent. Cela permet également la mise en place d'outils d'aide à l'opération solaire du système.

Le modèle thermique, couplé au modèle de transmittance, permet de choisir les matériaux et de tester, par simulation, les différentes stratégies de contrôle passif de la température. Dans un contexte où l'économie de ressources devient primordiale, cet outil est crucial pour développer un procédé sobre et performant. Le modèle de croissance, lui aussi couplé au modèle de transmittance, permet, par exemple, de prévoir la productivité du système en fonction du choix de vitrage. La couverture du réacteur étant un dénominateur commun entre ces deux modèles, c'est une première étape dans leur couplage. L'effet direct de la température sur la croissance microalgale reste néanmoins à formuler (ce point avait déjà été soulevé par Le Borgne (2011)). De même, quantifier et intégrer au modèle de croissance l'influence de la concentration de l'oxygène dissous sur les microalgues serait également un pas important vers un modèle de connaissance complet de la technologie Algofilm. Le couplage des modèles température, croissance et oxygène reste néanmoins une tâche ardue qui sera l'objet de futurs travaux.

Enfin, le client Météofrance et l'algorithme SPA intégrés aux autres modèles permettent de faire un premier pas vers un pilotage du réacteur basé sur des prédictions. A terme, un contrôle intelligent du réacteur peut permettre d'optimiser la culture et de faire d'importantes économies d'énergie par l'activation de la régulation thermique lorsqu'absolument nécessaire. L'objectif est le développement d'un procédé qui produise plus d'énergie qu'il n'en consomme. La viabilité à long terme de la technologie sera alors donnée par des analyses de cycle de vie (ACV), permises elles aussi par les modèles présentés.

L'exploration et l'exploitation de ces modèles n'est toutefois pas l'objet de ce chapitre. Le Chapitre 3 est dédié à l'ensemble des campagnes expérimentales menées au cours de la thèse. Une stratégie simple de contrôle d'Algofilm, la validation du modèle thermique

et un suivi de la concentration en oxygène y sont présentés. Le Chapitre 4 se focalise sur l'utilisation des modèles pour définir des règles de conception basées sur les résultats de simulations.

BIBLIOGRAPHIE

- American Society of Heating, R. a. A.-C. E. (2017), *2017 ASHRAE Handbook : Fundamentals : SI Edition*, Atlanta, GA : ASHRAE, 2017, 2017, ISBN : 978-1-939200-58-7 978-1-939200-57-0.
- Artu, A. (2016), « Etude et Optimisation de La Culture de Microalgues En Photobioréacteurs Solaires », URL : <http://www.theses.fr/2016NANT4019/document>.
- ASTM (2012), « Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 : Direct Normal and Hemispherical on 37 Degree Tilted Surface », in : American Society for Testing and Materials West Conshohocken, USA.
- Blanken, W. et al. (mars 2016), « Predicting Microalgae Growth », in : *Algal Research* 14, p. 28-38, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2015.12.020.
- Bonnanfant, M. (2020), « Étude Des Mécanismes de Conversion Photosynthétique de l'énergie Lumineuse Par Chlorella Vulgaris En Photobioréacteur Solaire », URL : <http://www.theses.fr/2020LEMA1015/document>.
- Boulet, P. et al. (août 2014), « Optical and Radiative Properties of Clear PMMA Samples Exposed to a Radiant Heat Flux », in : *International Journal of Thermal Sciences* 82, p. 1-8, ISSN : 12900729, DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2014.03.013.
- Briscoe, B. et K. Galvin (1991), « The Effect of Surface Fog on the Transmittance of Light », in : *Solar Energy* 46.4, p. 191-197, ISSN : 0038092X, DOI : 10.1016/0038-092X(91)90063-3.
- Converti, A. et al. (juin 2009), « Effect of Temperature and Nitrogen Concentration on the Growth and Lipid Content of Nannochloropsis Oculata and Chlorella Vulgaris for Biodiesel Production », in : *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification* 48.6, p. 1146-1151, ISSN : 02552701, DOI : 10.1016/j.cep.2009.03.006.
- Dormand, J. et P. Prince (mars 1980), « A Family of Embedded Runge-Kutta Formulae », in : *Journal of Computational and Applied Mathematics* 6.1, p. 19-26, ISSN : 03770427, DOI : 10.1016/0771-050X(80)90013-3.
- Duffie, J. A. et W. A. Beckman (10 avr. 2013), *Solar Engineering of Thermal Processes : Duffie/Solar Engineering 4e*, Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., ISBN : 978-1-118-67160-3 978-0-470-87366-3, DOI : 10.1002/9781118671603.

- Florides, G. et S. Kalogirou (2005), « Annual Ground Temperature Measurements at Various Depths », in : p. 6.
- Goetz, V. et al. (nov. 2011), « A Generic Temperature Model for Solar Photobioreactors », in : *Chemical Engineering Journal* 175, p. 443-449, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2011.09.052.
- Grima, E. M. et al. (oct. 1994), « A Mathematical Model of Microalgal Growth in Light-Limited Chemostat Culture », in : *Journal of Chemical Technology AND Biotechnology* 61.2, p. 167-173, ISSN : 0268-2575, 1097-4660, DOI : 10.1002/jctb.280610212.
- Hale, G. M. et M. R. Query (mars 1973), « Optical Constants of Water in the 200-Nm to 200-Mm Wavelength Region », in : p. 9.
- Hoeniges, J. et al. (6 jan. 2021a), « Impact of Dropwise Condensation on the Biomass Production Rate in Covered Raceway Ponds », in : *Energies* 14.2, p. 268, ISSN : 1996-1073, DOI : 10.3390/en14020268.
- Hoeniges, J. et al. (nov. 2021b), « Transmittance of Transparent Horizontal and Tilted Windows Supporting Large Non-Absorbing Pendant Droplets », in : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 275, p. 107876, ISSN : 00224073, DOI : 10.1016/j.jqsrt.2021.107876.
- Huang, Y. et al. (août 2020), « Bidirectional Transmittance of Transparent Windows with External or Backside Condensation of Nonabsorbing Cap-Shaped Droplets », in : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 251, p. 107039, ISSN : 00224073, DOI : 10.1016/j.jqsrt.2020.107039.
- Jaffrin, A. et S. Makhlof (juill. 1990), « MECHANISM OF LIGHT TRANSMISSION THROUGH WET POLYMER FILMS », in : *Acta Horticulturae* 281, p. 11-24, ISSN : 0567-7572, 2406-6168, DOI : 10.17660/ActaHortic.1990.281.1.
- Kandilian, R. et al. (juin 2016), « Simple Method for Measuring the Spectral Absorption Cross-Section of Microalgae », in : *Chemical Engineering Science* 146, p. 357-368, ISSN : 00092509, DOI : 10.1016/j.ces.2016.02.039.
- Kazbar, A. (2018), « Etude de l'impact de La Concentration En Oxygène Dissous et La Présence d'une Fraction Sombre Sur La Performance Des Photobioréacteurs », URL : <http://www.theses.fr/2018NANT4007/document>.
- Le Borgne, F. (2011), « Développement d'un photobioréacteur solaire intensifié en vue de la production à grande échelle de biomasse microalgale », Université de Nantes, 1 vol. (291 f.)

- Le Borgne, F. et J. Pruvost (juin 2013), « 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* », in : *Bioresource Technology* 138, p. 271-276, ISSN : 09608524, DOI : 10.1016/j.biortech.2013.03.056.
- Lewis, W. K. et W. G. Whitman (déc. 1924), « Principles of Gas Absorption. », in : *Industrial & Engineering Chemistry* 16.12, p. 1215-1220, ISSN : 0019-7866, 1541-5724, DOI : 10.1021/ie50180a002.
- Mairet, F. et al. (2010), « Coupling Biological and Radiative Models to Describe Microalgal Growth in a Photobioreactor », in : *IFAC Proceedings Volumes* 43.6, p. 168-173, ISSN : 14746670, DOI : 10.3182/20100707-3-BE-2012.0007.
- Mangi, K. H. (2021), « Study of Hydrodynamics and Heat Transfer in the AlgoFilm I Photobioreactor for Microalgae Production in Solar Conditions : Development of a Passive Thermal Regulation », URL : <http://www.theses.fr/2021NANT4088/document>.
- Mangi, K. H. et al. (avr. 2021), « Passive Thermal Regulation Approach for AlgoFilm I Photobioreactor through Phase Change », in : *Chemical Engineering Research and Design* 168, p. 411-425, ISSN : 02638762, DOI : 10.1016/j.cherd.2021.02.013.
- Masojídek, J. et al. (mars 2003), « A Closed Solar Photobioreactor for Cultivation of Microalgae under Supra-High Irradiance : Basic Design and Performance », in : *Journal of Applied Phycology* 15.2/3, p. 239-248, ISSN : 0921-8971, DOI : 10.1023/A:1023849117102.
- Mehlitz, T. H. (1^{er} fév. 2009), « Temperature Influence and Heat Management Requirements of Microalgae Cultivation in Photobioreactors », San Luis Obispo, California : California Polytechnic State University, DOI : 10.15368/theses.2009.15.
- Modest, M. F. (2013), *Radiative Heat Transfer*, 3d edition, New York : Academic Press, ISBN : 978-0-12-386944-9.
- Nwoba, E. G. et al. (jan. 2019), « Sustainable Phycocyanin Production from *Arthrospira Platensis* Using Solar-Control Thin Film Coated Photobioreactor », in : *Biochemical Engineering Journal* 141, p. 232-238, ISSN : 1369703X, DOI : 10.1016/j.bej.2018.10.024.
- (jan. 2020), « Pilot-Scale Self-Cooling Microalgal Closed Photobioreactor for Biomass Production and Electricity Generation », in : *Algal Research* 45, p. 101731, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2019.101731.

- Öziik, M. N. et al. (20 juill. 2017), *Finite Difference Methods in Heat Transfer, Second Edition*, CRC Press, ISBN : 978-1-315-12147-5, DOI : 10.1201/9781315121475.
- Parlevliet, D. et N. Moheimani (2014), « Efficient Conversion of Solar Energy to Biomass and Electricity », in : *Aquatic Biosystems* 10.1, p. 4, ISSN : 2046-9063, DOI : 10.1186/2046-9063-10-4.
- Pieters, J. G. et J. M. Deltour (1997), « Influence of Condensation and Evaporation on the Greenhouse Climate and Its Regulation », in : *proceedings of Clima2000. Bruxelles (Belgique)*.
- Pottier, L. et al. (5 sept. 2005), « A Fully Predictive Model for One-Dimensional Light Attenuation by *Chlamydomonas Reinhardtii* in a Torus Photobioreactor », in : *Biotechnology and Bioengineering* 91.5, p. 569-582, ISSN : 0006-3592, 1097-0290, DOI : 10.1002/bit.20475.
- Pruvost, J. et al. (jan. 2016a), « Microalgae Culture in Building-Integrated Photobioreactors : Biomass Production Modelling and Energetic Analysis », in : *Chemical Engineering Journal* 284, p. 850-861, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2015.08.118.
- Pruvost, J. et al. (jan. 2017), « Development of a Thin-Film Solar Photobioreactor with High Biomass Volumetric Productivity (AlgoFilm) Based on Process Intensification Principles », in : *Algal Research* 21, p. 120-137, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2016.10.012.
- Pruvost, J. et al. (2016b), « Industrial Photobioreactors and Scale-Up Concepts », in : *Advances in Chemical Engineering*, t. 48, Elsevier, p. 257-310, ISBN : 978-0-12-803661-7, DOI : 10.1016/bs.ache.2015.11.002.
- Ras, M., J.-P. Steyer et O. Bernard (juin 2013), « Temperature Effect on Microalgae : A Crucial Factor for Outdoor Production », in : *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 12.2, p. 153-164, ISSN : 1569-1705, 1572-9826, DOI : 10.1007/s11157-013-9310-6.
- Rearte, T. A. et al. (avr. 2021), « Photosynthetic Performance of *Chlorella Vulgaris* R117 Mass Culture Is Moderated by Diurnal Oxygen Gradients in an Outdoor Thin Layer Cascade », in : *Algal Research* 54, p. 102176, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2020.102176.
- Reda, I. et A. Andreas (1^{er} jan. 2008), *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised)*, NREL/TP-560-34302, 15003974, NREL/TP-560-34302, 15003974, DOI : 10.2172/15003974.

- Rodríguez-Miranda, E. et al. (fév. 2021), « A New Model to Analyze the Temperature Effect on the Microalgae Performance at Large Scale Raceway Reactors », in : *Biotechnology and Bioengineering* 118.2, p. 877-889, ISSN : 0006-3592, 1097-0290, DOI : 10.1002/bit.27617.
- Shampine, L. F. (1986), « Some Practical Runge-Kutta Formulas », in : p. 17.
- Shelp, B. J. et D. T. Canvin (1^{er} mai 1980), « Photorespiration and Oxygen Inhibition of Photosynthesis in *Chlorella Pyrenoidosa* », in : *Plant Physiology* 65.5, p. 780-784, ISSN : 0032-0889, 1532-2548, DOI : 10.1104/pp.65.5.780.
- Skoplaki, E. et J. Palyvos (jan. 2009), « Operating Temperature of Photovoltaic Modules : A Survey of Pertinent Correlations », in : *Renewable Energy* 34.1, p. 23-29, ISSN : 09601481, DOI : 10.1016/j.renene.2008.04.009.
- Souliès, A. et al. (mars 2016), « Investigation and Modeling of the Effects of Light Spectrum and Incident Angle on the Growth of *Chlorella Vulgaris* in Photobioreactors », in : *Biotechnology Progress* 32.2, p. 247-261, ISSN : 87567938, DOI : 10.1002/btpr.2244.
- Swinehart, D. F. (juill. 1962), « The Beer-Lambert Law », in : p. 3.
- Todisco, E. et al. (mai 2022), « A Dynamic Model for Temperature Prediction in a Façade-Integrated Photobioreactor », in : *Chemical Engineering Research and Design* 181, p. 371-383, ISSN : 02638762, DOI : 10.1016/j.cherd.2022.03.017.
- Todisco, É. (2019), « Microalgae Growth Optimization in Biofaçade Photobioreactors ».
- Torzillo, G. et al. (jan. 1986), « Production of Spirulina Biomass in Closed Photobioreactors », in : *Biomass* 11.1, p. 61-74, ISSN : 01444565, DOI : 10.1016/0144-4565(86)90021-1.
- Torzillo, G. et al. (juin 1991), « Effect of Temperature on Yield and Night Biomass Loss in Spirulina Platensis Grown Outdoors in Tubular Photobioreactors », in : *Journal of Applied Phycology* 3.2, p. 103-109, ISSN : 0921-8971, 1573-5176, DOI : 10.1007/BF00003691.
- Tow, E. W. (1^{er} mars 2014), « The Antireflective Potential of Dropwise Condensation », in : *Journal of the Optical Society of America A* 31.3, p. 493, ISSN : 1084-7529, 1520-8532, DOI : 10.1364/JOSAA.31.000493.
- Urbain, B. (2017), « Elaboration of a Biochemically-Based Structured Model for the Growth of Eukaryotic Microalgae in Photobioreactors : Application to the Unicellular Green Algae *Chlamydomonas Reinhardtii* », URL : <http://www.theses.fr/2017NANT4096/document>.

- Virtanen, P. et al. (2 mars 2020), « SciPy 1.0 : Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python », in : *Nature Methods* 17.3, p. 261-272, ISSN : 1548-7091, 1548-7105, DOI : 10.1038/s41592-019-0686-2.
- Vogel, H. (juin 1979), « A Better Way to Construct the Sunflower Head », in : *Mathematical Biosciences* 44.3-4, p. 179-189, ISSN : 00255564, DOI : 10.1016/0025-5564(79)90080-4.
- Weissman, J. C., R. P. Goebel et J. R. Benemann (mars 1988), « Photobioreactor Design : Mixing, Carbon Utilization, and Oxygen Accumulation », in : *Biotechnology and Bioengineering* 31.4, p. 336-344, ISSN : 0006-3592, 1097-0290, DOI : 10.1002/bit.260310409.
- Welty, J. (2000), « Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, 5th Edition », in : p. 729.
- Young, B. A. et al. (août 2017), « Early-Age Temperature Evolutions in Concrete Pavements Containing Microencapsulated Phase Change Materials », in : *Construction and Building Materials* 147, p. 466-477, ISSN : 09500618, DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.150.
- Zhu, K., S. Li et L. Pilon (mars 2018), « Light Transfer through Windows with External Condensation », in : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 208, p. 164-171, ISSN : 00224073, DOI : 10.1016/j.jqsrt.2018.01.019.
- Zhu, K. et al. (juin 2017), « Transmittance of Transparent Windows with Non-Absorbing Cap-Shaped Droplets Condensed on Their Backside », in : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 194, p. 98-107, ISSN : 00224073, DOI : 10.1016/j.jqsrt.2017.03.012.

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DE LA CULTURE SOLAIRE DANS LE PHOTOBIOREACTEUR ALGOFILM

Introduction

La littérature rapporte que des systèmes de culture en couche mince tels que les photobioréacteurs cascade ont permis d'obtenir de très hautes concentrations en biomasse sèche et des productivités volumiques très élevées (Grivalský et al. 2019). Bien que similaire, Algofilm se distingue de ces systèmes notamment par la présence d'un vitrage qui sépare le milieu de culture de l'environnement. Son influence sur les conditions de culture est majeure et est discutée dans les Chapitres 2 et 4. Des performances comparables aux technologies cascade de la littérature sont attendues (idéalement supérieures du fait d'une épaisseur de culture légèrement plus faible).

Des campagnes expérimentales ont été menées, en mode continu et lumière contrôlée, sur le prototype Algofilm 0.33 m², par Le Borgne (2011). Les hautes concentrations en microalgues (12 g.L⁻¹ à 16 g.L⁻¹) et les productivités volumiques élevées (3.1 g.L⁻¹.jour⁻¹ à 3.3 g.L⁻¹.jour⁻¹) obtenues ont permis de valider les performances de ce photobioréacteur. Le pilote 10 m², bien que similaire au prototype 0.33 m², possède plusieurs spécificités. Notamment, il a été construit en extérieur et utilise la lumière solaire. Les conditions de culture ne peuvent donc pas être aussi finement contrôlées qu'en laboratoire. Une nouvelle validation expérimentale des performances du système est donc nécessaire, et est présentée dans ce chapitre.

Premièrement, une étude qualitative en maquette froide de l'écoulement du milieu de culture sur le plan incliné a été menée. Ensuite, des essais de culture de microalgues ont validé la productivité volumique du réacteur. Afin de maximiser les performances du PBR, ces campagnes expérimentales se sont appuyées sur les modèles théoriques présentés au

chapitre précédent. Deux stratégies permettant de rationaliser le lancement et le pilotage de la culture ont été développées et testées. Enfin, ce chapitre apporte une validation expérimentale du modèle thermique développé dans la Section 2.5.2.

3.1 Étude qualitative en maquette froide de l'écoulement sur le plan incliné

L'intensification du procédé de culture par la technologie Algofilm repose sur la faible épaisseur de milieu qui circule sur le plan incliné. Ce paramètre est étroitement lié à la qualité de l'écoulement liquide. Une attention particulière a donc été portée sur ce point (Doucha et Lívanský 1995 ; Le Borgne 2011).

Puisque la construction du pilote étudié est antérieure à ces travaux de thèse, cette première partie se consacre à l'étude et à l'amélioration de cet écoulement dans l'Algofilm 10 m². Deux objectifs sont poursuivis : minimiser l'épaisseur de culture et répartir le liquide de façon homogène sur l'ensemble du plan (pour maximiser la surface de captation lumineuse).

Les essais de cette étude ont été réalisés en maquette froide (i.e. sans culture de microalgues). Pour mettre l'écoulement en évidence, de l'eau munie d'un traceur (des particules en suspension) a été utilisée. La qualité de l'écoulement est évaluée via une analyse visuelle.

3.1.1 Répartition du milieu de culture sur le plan aller

Le plan aller est alimenté en milieu de culture grâce à une pompe péristaltique ALH 40 (Albin Pump, France). Une sousverse positionnée à sa sortie permet de répartir le liquide sur toute la largeur du plan. Cette répartition a été jugée acceptable pourvu que la vitesse de la pompe soit suffisante. En effet, lorsque le débit est trop faible (inférieur à 10 L.min⁻¹), le liquide forme un filet d'eau qui s'écoule lentement au centre du plan, et ce, même si le plan a préalablement été mouillé. Une vitesse de pompe minimale est donc requise. Le réglage choisi pour le reste des travaux de thèse est discuté dans la Section 3.1.3.

La pompe péristaltique utilisée ne possède que deux galets, le débit fourni n'est donc pas continu. Les pulsations de la pompe font apparaître des vagues en tête du plan aller (voir Figure 3.1). L'épaisseur de culture n'est alors pas régulière. Néanmoins, ces irrégularités se résorbent rapidement lorsque le liquide progresse sur le plan incliné. Elles

deviennent négligeables environ 60 cm après la sortie de la pompe. Puisque cela ne représente qu'une petite fraction de la surface totale du photobioréacteur (6%), l'écoulement du milieu de culture sur le plan aller a été jugé acceptable.

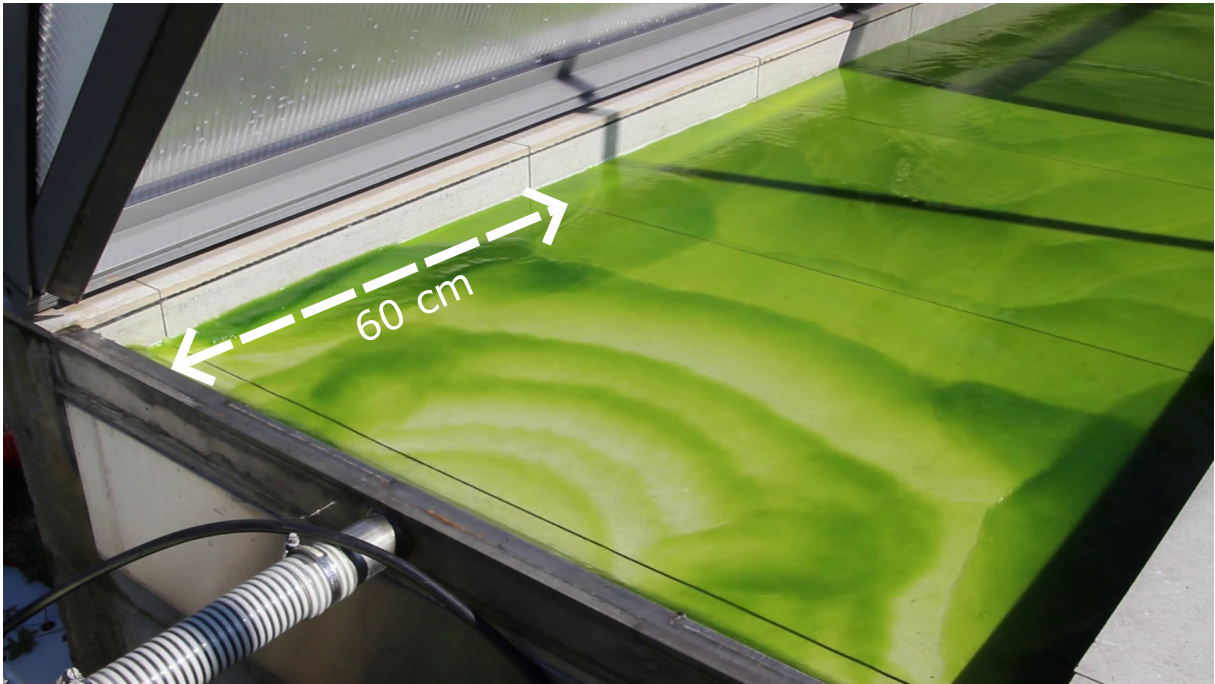


FIGURE 3.1 – Photographie des vagues créées par les pulsations de la pompe, observables en tête du plan aller.

3.1.2 Répartition du milieu de culture sur le plan retour

Lorsque le milieu de culture achève sa course sur le plan aller, il est récupéré par une rigole qui le redirige vers le plan retour. Comme pour le premier plan, le liquide doit être réparti sur l'ensemble de la surface grâce à une sousverse. Cependant, contrairement à celle du premier plan, cette sousverse ne parvient pas à répartir le milieu de culture. Ici, le liquide s'écoule préférentiellement au niveau de la paroi extérieure du plan (à l'extérieur du virage). Une large zone morte (environ la moitié de la surface du plan retour) est alors observable au niveau de la paroi intérieure. De plus une zone de recirculation est visible dans le coin du réacteur, juste après la sousverse. La Figure 3.2 schématise l'écoulement obtenu.

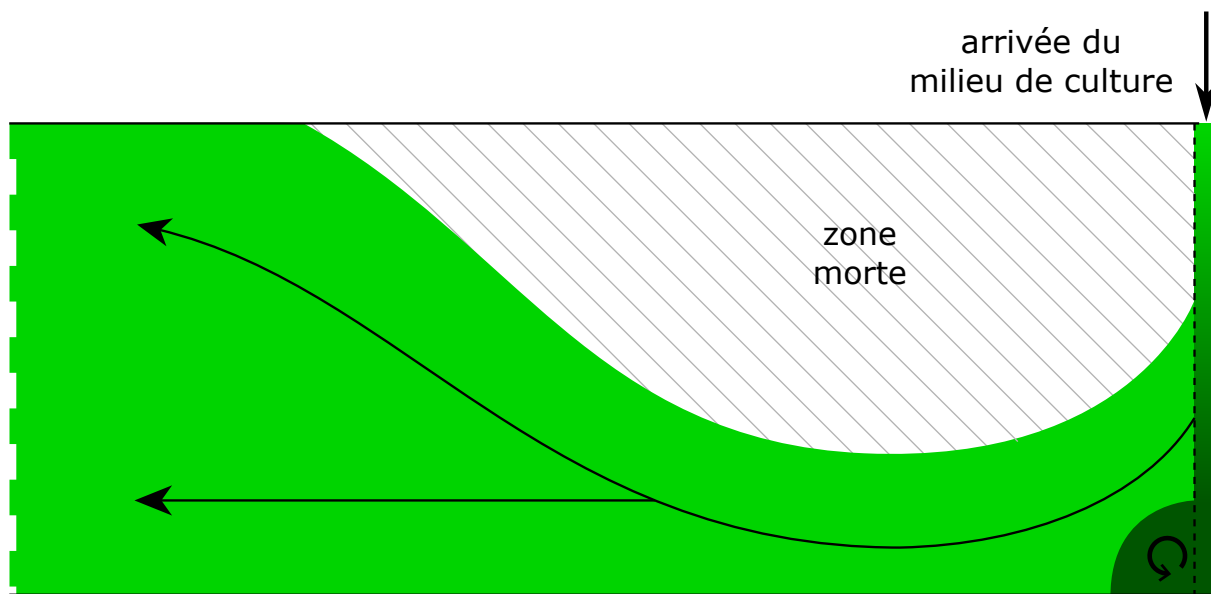


FIGURE 3.2 – Schéma de l'écoulement obtenu sur le plan retour.

La différence d'efficacité entre les deux sousverses s'explique par la différence de trajectoire du flux de liquide qui les alimente. Dans le cas du plan aller, ce flux est perpendiculaire et centré par rapport à l'obstacle de la sousverse (voir Figure 3.3). Ainsi, à chaque pulsation de la pompe, le milieu de culture s'accumule au centre de l'obstacle, puis se répartit, par gravité, sur la largeur du plan.

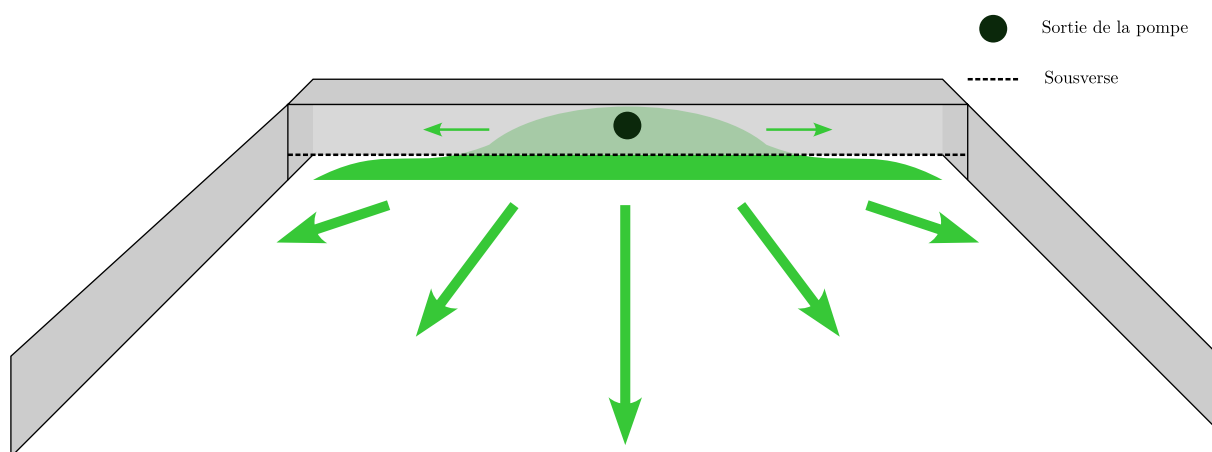


FIGURE 3.3 – Schéma de l'écoulement dans la sousverse du plan aller.

Au contraire, dans le cas de la sousverse du plan retour, le flux provient de la rigole qui récupère le milieu après le plan aller. Le liquide a donc une trajectoire tangentielle à

l'obstacle de la sousverse. Par inertie, il s'accumule entre l'obstacle et la paroi extérieure du plan (voir Figure 3.4a). Le liquide s'écoule alors préférentiellement de ce côté, et est donc mal réparti sur le plan retour.

Pour résoudre ce problème, il a été choisi d'ajouter un obstacle permettant de recentrer l'accumulation du milieu de culture (voir Figure 3.4b). L'objectif est de se rapprocher du cas de la sousverse du plan aller.

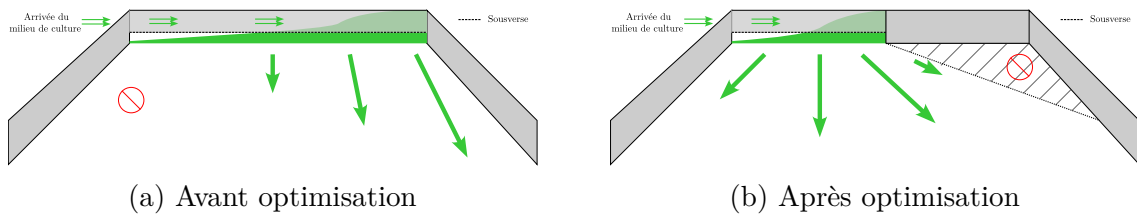


FIGURE 3.4 – Schémas de l'écoulement du milieu de culture au niveau de la sousverse du plan retour avant et après optimisation.

Cette solution s'est avérée efficace et permet au milieu de culture de s'écouler sur toute la largeur du plan. Cependant, une petite zone de faible circulation est apparue entre le nouvel obstacle et la paroi extérieure du plan (partie hachurée de la Figure 3.4b). Cela induit une sédimentation rapide et indésirable du traceur utilisé. Un essai fait avec une culture concentrée confirme que c'est également le cas avec des microalgues. Pour éviter cela, un second obstacle a été placé dans cette zone, il y interdit tout écoulement. Une surface de 0.125 m^2 est ainsi retirée au plan retour. Puisque cela ne représente qu'une petite fraction de la surface totale du PBR (1.25%), cette solution a été jugée acceptable.

Grâce aux différentes optimisations, une répartition homogène a été obtenue sur l'ensemble de la surface d'Algofilm (voir Figure 3.5).

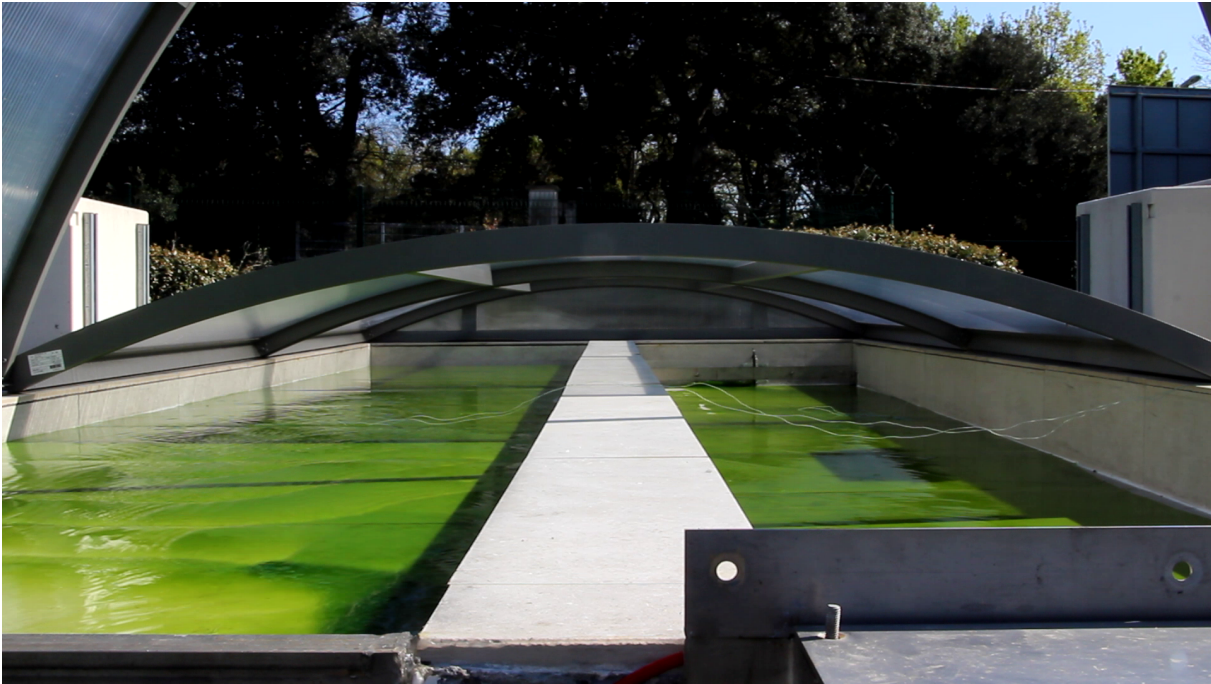


FIGURE 3.5 – Photographie du plan d'écoulement d'Algofilm 10 m² après installation des optimisations.

3.1.3 Pente, vitesse d'écoulement et épaisseur de culture

L'épaisseur de milieu de culture sur le plan incliné est notamment influencée par deux paramètres : la pente du plan et le débit de pompe (Le Borgne 2011). Dans le cas du pilote étudié, la pente a été choisie à partir des travaux de Le Borgne (2011) et fixée lors de la construction (elle ne peut pas être modifiée). Elle est ici de 0.7%.

La circulation du milieu de culture sur le plan est permise grâce à la pompe péristaltique dont la vitesse de rotation est contrôlée par un variateur de fréquence. Une calibration par empotage a permis de relier la fréquence affichée au débit fourni.

Les travaux de Le Borgne (2011) ont confirmé les modèles théoriques qui prédisent que l'épaisseur de milieu de culture augmente avec le débit de pompe. Pour minimiser cette épaisseur et maximiser la productivité volumique du réacteur, il est donc nécessaire de réduire autant que possible le débit. La Section 3.1.1 montre qu'une vitesse de pompe minimale est cependant requise pour obtenir une répartition satisfaisante du milieu de culture sur le plan aller. Des essais ont montré que le débit minimal nécessaire est de 20 L.min⁻¹. C'est par ailleurs le débit maximal recommandé par la documentation technique de la pompe pour une utilisation continue (comme ce sera la cas par la suite).

Ce réglage a donc été retenu.

Enfin, la vitesse de circulation du milieu de culture sur le plan a pu être estimée par suivi des particules du traceur. Elle est ici d'environ 10 cm.s^{-1} . Les systèmes présentés dans la littérature ont une vitesse d'écoulement plus importante (40 cm.s^{-1} à 60 cm.s^{-1}) (Grivalský et al. 2019). De plus, dans certains cas, des dispositifs présents sur le plan incliné permettent d'obtenir un écoulement turbulent. Cela permet notamment de mieux mélanger le milieu de culture lors de son passage sur le plan. Dans le cas du pilote étudié ici, puisque le plan est lisse et la vitesse de circulation faible, l'écoulement obtenu est laminaire ($Re = 350$). Il est donc peu perturbé et suit majoritairement l'axe du plan. Il y a alors peu de mélange du milieu de culture lors de son passage sur le plan. La culture n'est mélangée qu'en deux endroits du réacteur : dans la rigole reliant le plan aller au plan retour et dans le bac de collecte. Bien que le mélange soit moins efficace à cause de l'utilisation d'un plan lisse, des concentrations et des productivités volumiques élevées peuvent être atteintes, comme démontré avec la technologie cascade (Doucha et Lívanský 1995).

Lors de l'opération d'Algofilm, un volume minimal de liquide est nécessaire pour qu'à tout moment, du milieu de culture soit présent dans le bac de collecte. Cela permet aux sondes utilisées d'être constamment immergées et de dissoudre, par bullage, le CO_2 nécessaire à la croissance microalgale. Pour que cette contrainte soit respectée, le volume total minimal de liquide dans Algofilm augmente avec le débit de pompe. En effet, puisque cela épaissit la culture sur le plan, cela augmente le volume de culture qui y circule (puisé dans le bac de collecte). Pour maintenir un volume minimal dans le bac, il est nécessaire d'augmenter le volume total présent dans le réacteur.

Plusieurs essais ont montré que, dans la configuration retenue, environ 40 L de culture sont nécessaires. La hauteur d'eau présente dans le bac de collecte ainsi que le tuyau reliant le bac et la pompe représentent un volume de 5 L. Ainsi, 35 L sont répartis sur le plan incliné. L'épaisseur moyenne du milieu de culture est donc estimée à environ 3.5 mm. La fraction sombre géométrique (fraction de volume non éclairée) est de 12.5%.

3.1.4 Conclusion

L'écoulement du film liquide sur le plan incliné est un paramètre très important de la culture de microalgues dans Algofilm. Il détermine notamment l'épaisseur de culture et donc la productivité volumique du système. Cependant, bien que minimiser l'épaisseur de liquide augmente la productivité volumique, il est également nécessaire de garantir

une répartition homogène du liquide sur le plan pour maximiser la surface de captation solaire. Ainsi, les paramètres théoriques qui auraient permis une épaisseur minimale (par exemple, un très faible débit de pompe) n'ont pas pu être retenus. Une étude préalable à la culture dans le photobioréacteur était donc nécessaire, et a été présentée dans cette section.

Cette étude a permis de déterminer que la conception originelle du pilote Algofilm 10 m² ne permettait pas de répartir le liquide sur l'ensemble de sa surface. Une solution simple a donc été développée et mise en place pour corriger ce défaut. Cette étude a également permis de déterminer les réglages nécessaires au bon fonctionnement du réacteur (volume de culture et vitesse de pompe notamment). Enfin, l'épaisseur de culture (environ 3.5 mm) et la vitesse de circulation (environ 10 cm.s⁻¹), deux paramètres nécessaires à la modélisation du réacteur utilisée par la suite, ont pu être déterminées.

3.2 Étude expérimentale de la productivité d'Algofilm en condition solaire

La section précédente a montré que la conception du pilote Algofilm 10 m² offre une faible épaisseur (environ 3.5 mm) de culture et une faible fraction sombre (environ 12.5%). En théorie, ces caractéristiques permettent d'obtenir de hautes concentrations et productivités volumiques. Pour vérifier cela, des cultures de microalgues ont été menées, en conditions solaires, pour évaluer les performances du réacteur. Ces expériences sont présentées dans cette section.

Les essais ont été assistés par les modèles présentés au Chapitre 2. L'objectif était de rationaliser l'opération d'un photobioréacteur intensifié comme Algofilm. Grâce à ces modèles, une méthode de lancement et une stratégie de contrôle prédictif simple ont été développées et testées. Elles sont également présentées dans cette section.

3.2.1 Matériels et méthodes

3.2.1.1 Souche cultivée

Les essais présentés dans cette section se sont appuyés sur les calculs issus des modèles de transfert radiatifs et de croissance. Pour cela, les propriétés radiatives de la souche ainsi que ses paramètres cinétiques doivent être connus. De plus, les paramètres de culture dans Algofilm ne sont pas, pour le moment, parfaitement maîtrisés. Par exemple, malgré la

présence d'un plancher refroidissant, puisque le milieu de culture ne peut pas s'évaporer, de hautes températures peuvent être atteintes (voir Section 3.3). La microalgue choisie doit donc être résistante à ces conditions non-optimales. La souche *Chlorella vulgaris* (CCAP 211/19) remplit tous ces critères et a donc été retenue. En effet, Todisco (2019) a montré que cette microalgue pouvait être cultivée dans une large gamme de températures (de 15 °C à 35 °C) sans pertes notables de productivité.

3.2.1.2 Suivi de la concentration en biomasse

Lors des essais présentés ici, la concentration en biomasse a été régulièrement suivie. Pour ces mesures, des filtres en microfibre de verre avec des pores de 0.2 µm (Fisher Scientific, États-Unis) ont été utilisés. Ils étaient préalablement placés dans une étuve à 105 °C au moins 24 heures avant utilisation pour être séchés. Le jour du prélèvement, ils étaient placés, pendant environ 15 minutes, dans un dessiccateur afin de les ramener à température ambiante sans les humidifier. Ils étaient ensuite pesés une première fois. Un volume de culture compris entre 5 mL et 10 mL était ensuite pesé et filtré grâce à un filtre Buchner. Enfin, les filtres étaient replacés dans l'étuve pour 24 heures avant d'être pesés une seconde fois. La concentration en microalgues est alors donnée par l'Équation 3.1. Toutes les mesures étaient réalisées en tripliqua :

$$C_x = \frac{m_{filter+biomass} - m_{filter}}{V_{filtered}} \quad (3.1)$$

avec C_x [g.L⁻¹] la concentration en biomasse $V_{filtered}$ [L] le volume de culture filtré, m_{filter} et $m_{filter+biomass}$ [g] la masse du filtre avant et après filtration respectivement.

Lorsque la concentration en microalgues était trop élevée (> 5 g.L⁻¹), les filtres étaient colmatés avant d'avoir pu filtrer les 5 mL de culture. Pour éviter cela, l'échantillon prélevé était préalablement dilué trois à six fois.

Cette méthode de mesure a l'inconvénient majeur de ne donner de résultat que 24 heures après le prélèvement. Lorsqu'une estimation rapide était nécessaire (voir Section 3.2.1.11), une mesure était faite grâce à un dessiccateur MAC 50 (Radwag, Pologne).

La productivité journalière du réacteur est déduite de la concentration en biomasse sèche de la culture. Lors des essais présentés dans cette section, le réacteur était opéré en semi-continu (voir Section 3.2.1.11). La productivité du réacteur entre deux jours consécutifs est donc la différence de concentration entre ces deux journées :

$$P_x(j) = \frac{C_x(j) - C_x(j-1)}{t} \quad (3.2)$$

avec $P_x(j)$ [g.L⁻¹.jour⁻¹] la productivité volumique obtenue entre le jour $j - 1$ (après dilution) le jour j (avant dilution). t [jour] est le temps entre deux mesures et est donc ici égal à 1 jour.

3.2.1.3 Suivi de la concentration en pigments

La pigmentation des microalgues influence grandement leur capacité à absorber de la lumière et donc leur croissance. Cette donnée essentielle a donc été suivie au cours de la campagne expérimentale.

C'est également un indicateur de l'état de forme des microalgues : une concentration élevée de caroténoïdes par rapport à la chlorophylle_a dénote un stress subi (Heath et al. 1990). Si un tel déséquilibre était observé, les dispositions nécessaires (ombrage du réacteur, apport d'azote, *etc.*) pouvaient être prises.

Pour mesurer ces concentrations, un volume V_1 (0.5 mL à 1 mL) d'échantillon était centrifugé à 13 400 rpm pendant 10 minutes grâce à une centrifugeuse MiniSpin (Eppendorf, Allemagne). Le culot était récupéré et resuspendu dans un volume V_2 (1.5 mL) de méthanol analytique puis placé dans un bain sec à 45 °C pendant 45 minutes à 1 heure. Ensuite, une seconde centrifugation permettait de reséparer les débris de microalgues du liquide. Un culot blanc atteste alors d'une extraction complète des pigments. Dans le cas contraire, une nouvelle extraction (avec du méthanol frais) était nécessaire. Trois surnageants étaient ainsi préparés pour avoir une mesure en tripliquat.

L'absorbance à 480 nm, 652 nm, 665 nm et 750 nm de ces surnageants était mesurée par un spectrophotomètre V-630 (Jasco, Japon). Les Équations 3.3, 3.4 et 3.5 permettent enfin de relier ces mesures aux concentrations en chlorophylle-a, chlorophylle-b et caroténoïdes de la culture (Ritchie 2006) :

$$[\text{Chlorophyll}_a] = \frac{V_2}{V_1} \cdot (-8.0962 \cdot (A_{652} - A_{750}) + 16.5169 \cdot (A_{665} - A_{750})) \quad (3.3)$$

$$[\text{Chlorophyll}_b] = \frac{V_2}{V_1} \cdot (27.4405 \cdot (A_{652} - A_{750}) - 12.1688 \cdot (A_{665} - A_{750})) \quad (3.4)$$

$$[\text{Carotenoids}] = \frac{V_2}{V_1} \cdot (4 \cdot (A_{480} - A_{750})) \quad (3.5)$$

avec A_λ [-] l'absorbance mesurée à la longueur d'onde λ .

3.2.1.4 Suivi du rendement photosynthétique maximal

Les conditions non-optimales de culture auxquelles les microalgues sont exposées dans Algofilm peuvent induire un stress qui affecte l'activité photosynthétique des microalgues et donc les performances du réacteur. Si ce stress perdure trop longtemps, la survie de la culture est menacée.

Afin de détecter les stress des microalgues, le rendement photosynthétique maximal (F_v/F_m), obtenu par mesure de fluorescence modulée, est couramment utilisé (Bonnanfant 2020 ; Borowitzka et Vonshak 2017 ; Masojídek et al. 2013). Il a été ponctuellement mesuré lors des essais présentés ici. Pour cela, le protocole décrit par Bonnanfant (2020) a été suivi. Les échantillons de culture étaient dilués dans du milieu BBM et introduits dans un fluorimètre PAM (WaterPAM, Walz, Allemagne). La dilution est telle que le signal de fluorescence obtenu est de l'ordre de 200 unités. Après une période à l'obscurité de 10 à 15 minutes, l'échantillon était soumis à une succession rapide de niveaux croissants de lumière puis à un flash qui sature les systèmes photosynthétiques des cellules. Les paramètres permettant le calcul du rendement photosynthétique maximal étaient mesurés à chaque étape.

Par la suite, les microalgues sont considérées en bonne santé lorsqu'une valeur du rendement photosynthétique maximal supérieure à 0.6 est obtenue (Masojídek et al. 2011). Dans le cas contraire, les mesures nécessaires (ombrage du réacteur, apport d'azote, *etc.*) étaient prises pour sauver la culture.

3.2.1.5 Milieu de culture

Pour la culture de *Chlorella vulgaris*, le milieu BBM (Bold Basal Medium) (Bold 1949) est couramment utilisé. La formulation a été ajustée pour qu'une concentration de 5 g.L⁻¹ puisse être atteinte. La composition du milieu de culture est donnée par la Table 3.1

Composé	Formule	Concentration [g.L ⁻¹]
Nitrate de sodium	NaNO ₃	3.75
Sulfate de magnésium heptahydrate	MgSO ₄ , 7H ₂ O	1.125
Chlorure de calcium dihydrate	CaCl ₂ , 2H ₂ O	0.125
Additif 1	-	5 mL
Additif 2	-	5 mL
EDTA disodique dihydrate	EDTANa ₂ , 2H ₂ O	0.25
Sulfate de fer heptahydrate	FeSO ₄	0.07
Dipotassium phosphate	K ₂ HPO ₄	0.75
Potassium phosphate	KH ₂ PO ₄	0.615
Bicarbonate de sodium	NaHCO ₃	6.3

TABLE 3.1 – Composition du milieu BBM concentré.

Pour ce milieu de culture, deux solutions minérales sont utilisées (additif 1 et 2). Leur composition est donnée par la Table 3.2

Additif 1		
Composé	Formule	Concentration [g.L ⁻¹]
Sulfate de zinc heptahydrate	ZnSO ₄ , 7H ₂ O	0.222
Nitrate de cobalt hexahydrate	(NO ₃) ₂ Co, 6H ₂ O	0.044
Sulfate de cuivre	CuSO ₄	0.079
Acide Orthoborique	H ₃ BO ₃	2.86
Chlorure de manganèse tetrahydrate	MnCl ₂ , 4H ₂ O	1.81
Additif 2		
Composé	Formule	Concentration [g.L ⁻¹]
Molybdate de sodium dihydrate	Na ₂ MoO ₄ , 2H ₂ O	0.26

TABLE 3.2 – Composition des additifs 1 et 2 du milieu BBM.

3.2.1.6 Apport de carbone inorganique

Les microalgues sont composées pour moitié de carbone qu'elles trouvent dans leur milieu (Souliès 2014). Dans le cas présent, ce carbone est issu de la dissolution, par bullage, de CO₂ dans le milieu de culture.

Pour contrôler cet apport, une sonde pH InPro 4800i SG 120 (Mettler Toledo, Allemagne) reliée à un transmetteur M300 Process (Mettler Toledo, Allemagne) était placée dans le bac de collecte de sorte à ce qu'elle soit immergée en permanence. Lorsque les microalgues consomment le CO₂ dissous, le pH augmente. Lorsque celui-ci dépasse la consigne, le transmetteur commande à l'électrovanne responsable de l'arrivée de CO₂ de s'ouvrir. Le gaz arrive alors par un fritté placé dans le bac de collecte, et est dissous dans le milieu de culture acidifiant ainsi le liquide. L'arrivée de CO₂ était coupée dès que le pH mesuré redescend sous la consigne. Pour la culture de *Chlorella vulgaris*, la consigne était de réguler le pH autour de 7.5 (Todisco 2019).

Des mesures ponctuelles de la concentration en carbone inorganique dissous ont montré que ce mode de régulation permettait de dissoudre suffisamment de carbone pour que ce ne soit pas un facteur limitant de la croissance de *Chlorella vulgaris* (Le Gouic 2013).

3.2.1.7 Suivi de la concentration en espèces dissoutes

Pour maximiser la croissance des microalgues, une quantité suffisante de nutriments doit être en permanence disponible dans le milieu de culture. Afin de s'assurer que cette condition est toujours remplie, un suivi régulier des espèces dissoutes dans le milieu de culture a été réalisé pour détecter d'éventuelles carences. Pour cela, un échantillon de la culture était dilué 30 fois puis filtré sur des filtres en microfibrilles de verre de 0.2 µm de taille de pores (Fisher Scientific, États-Unis). Le filtrat était ensuite analysé par une chromatographie ionique DX-120 (Dionex, États-Unis). Un nutriment dont la concentration mesurée est inférieure au dixième de la concentration du milieu BBM (voir Table 3.1) est considéré limitant. Lorsque nécessaire, une solution concentrée contenant les nutriments manquants était préparée et ajoutée au milieu de culture.

L'analyse du milieu de culture par chromatographie ionique a l'avantage de mesurer exhaustivement les espèces dissoutes. Elle est cependant très longue à mettre en place. Plusieurs heures sont nécessaires pour préparer le système, passer les échantillons et nettoyer la colonne. L'expérience a montré que le milieu de culture ajouté chaque jour au réacteur (culture en mode semi-continu, voir Section 3.2.1.11) suffit à maintenir une concentration

convenable pour l'ensemble des nutriments à l'exception de l'azote. En effet, des carences azotées peuvent arriver au milieu de la journée, lorsque la croissance microalgale et donc la consommation de nutriments sont élevées. Pour éviter cela, une estimation rapide de la concentration en nitrates restante dans le milieu de culture était obtenue grâce à des bandelettes de test semi-quantitatif QuantoFix Nitrate (Macherey-Nagel, France). En cas d'absence, une solution concentrée de NaNO_3 était préparée et ajoutée dans le réacteur.

3.2.1.8 Suivi de la concentration en oxygène dissous

L'activité photosynthétique des microalgues produit de l'oxygène qui se retrouve sous forme dissoute dans le milieu de culture. La littérature montre que, dans des systèmes similaires à Algofilm, de hautes concentrations en oxygène dissous sont atteintes (Rearte et al. 2021). Elles sont supérieures à 30 mg.L^{-1} et donc bien au delà de la concentration d'équilibre avec l'air. À ces concentrations, l'oxygène dissous impacte négativement la croissance microalgale (Bonnafant 2020 ; Kazbar et al. 2019).

Afin de connaître la concentration en oxygène dans le PBR, une sonde InPro 6860i (Mettler Toledo, États-Unis) était placée dans le bac de collecte. Ses signaux étaient collectés et enregistrés par un logiciel LabVIEW© (National Instrument, États-Unis) spécialement développé.

3.2.1.9 Régulation de la température du milieu de culture

La température du milieu de culture est un paramètre important du procédé, les microalgues ne pouvant survivre à de trop hautes températures (Ras et al. 2013). Pour les essais présentés ici, le plancher refroidissant du réacteur a été utilisé afin de limiter sa montée en température. L'objectif était de maintenir une température inférieure à $35 \text{ }^\circ\text{C}$ pour que la productivité de *Chlorella vulgaris* ne soit pas significativement influencée par ce paramètre (Todisco 2019).

Lors des essais de culture, les électrovannes qui permettent ou non la circulation du fluide caloporteur étaient contrôlées par le transmetteur M300 Process de la sonde pH. Afin de prendre en compte le temps nécessaire à la diffusion de la chaleur du plan d'écoulement vers les échangeurs à travers le béton, les électrovannes étaient ouvertes dès que la sonde pH mesurait une température supérieure à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Malgré un fluide caloporteur à $13 \text{ }^\circ\text{C}$, ce mode de régulation n'a pas permis de maintenir la température en dessous de $35 \text{ }^\circ\text{C}$: cette consigne a ponctuellement été dépassée. La culture n'a cependant pas dépassé la température de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (létale pour *Chlorella vulgaris*),

le maximum mesuré au cours des campagnes expérimentales était de 38 °C. À noter que pour maintenir ces températures, les échangeurs étaient en fonctionnement quasi constant (généralement de 9h à 22h).

3.2.1.10 Lancement de la culture

Le lancement d'une culture de microalgues requiert la préparation d'un inoculum. Pour les essais sur le pilote Algofilm 10 m², en partant d'un erlenmeyer de quelques millilitres, une montée en échelle progressive a permis de produire suffisamment de microalgues pour inoculer le réacteur. A chaque étape, dès que la culture a atteint une concentration suffisante, elle était diluée et inoculée dans un volume plus grand jusqu'à être introduite dans une colonne à bulles de 100 L (Todisco 2019).

La faible épaisseur de culture d'Algofilm permet d'atteindre une vitesse d'absorption de photons (MRPA) de la culture élevée. Cependant, un MRPA trop important induit un stress potentiellement létal pour la culture (Artu 2016). La valeur de ce paramètre doit donc être maîtrisée. Puisque le MRPA diminue lorsque la concentration en microalgues augmente, pour éviter un stress lumineux trop important, une concentration minimale est nécessaire au lancement du réacteur.

Les modèles présentés au Chapitre 2 permettent de calculer cette concentration minimale. Soit $f_{\text{MRPA}}(C_x)$ une fonction qui donne le MRPA de la culture en fonction de la concentration en biomasse sèche. Tous les autres paramètres nécessaires à la résolution des équations du transfert radiatif à deux flux (lumière, épaisseur de culture, pigmentation) sont préalablement fixés. La concentration recherchée est obtenue en résolvant l'Équation 3.6 (Brent 2002) :

$$f_{\text{MRPA}}(C_x) - \text{MRPA}_{\text{target}} = 0 \quad (3.6)$$

avec $\text{MRPA}_{\text{target}}$ le MRPA maximal accepté.

Par la suite, le MRPA maximal accepté est fixé à 30 000 $\mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ (Artu 2016). À titre d'exemple, la Figure 3.6 donne la concentration minimale requise en fonction du flux lumineux incident reçu par le réacteur (avant prise en compte de la transmittance du vitrage) et de la pigmentation (ici exprimée en concentration totale ramenée à la matière sèche).

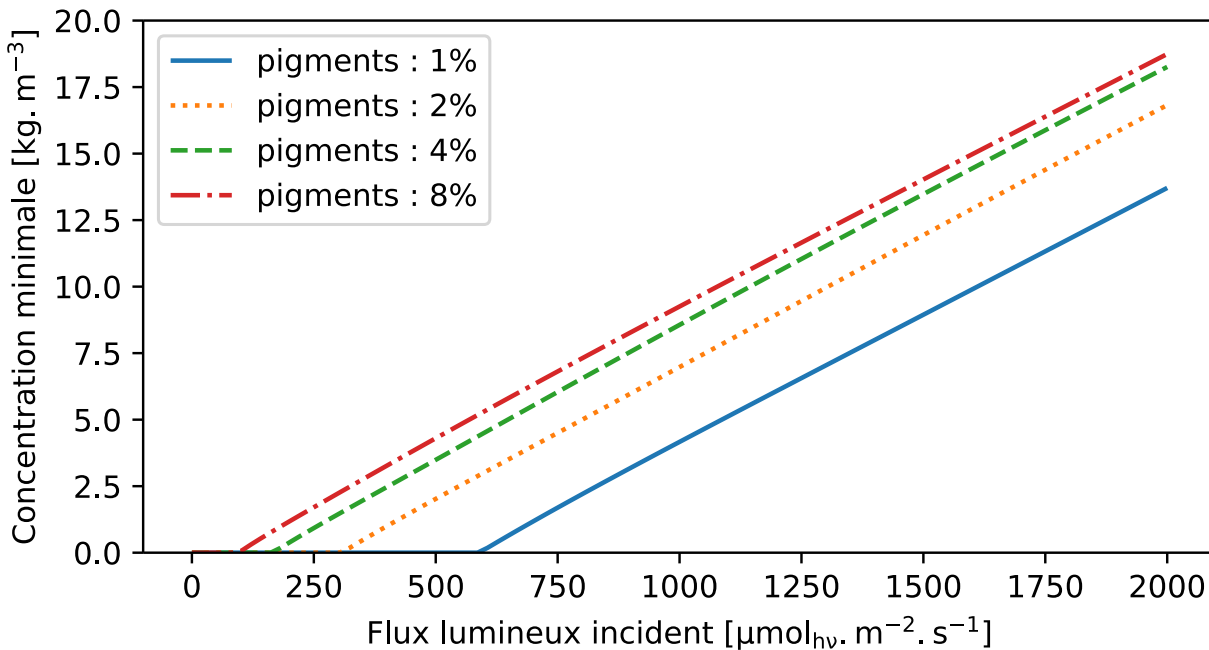


FIGURE 3.6 – Concentration minimale nécessaire pour inoculer le pilote Algofilm 10 m² en fonction du flux incident et de la pigmentation des microalgues.

La Figure 3.6 montre que la concentration minimale nécessaire pour lancer le réacteur augmente rapidement avec la lumière incidente et la pigmentation des microalgues. Par exemple, pour un flux incident de 1 000 $\mu\text{mol}_{\text{h}\nu} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (une belle journée d’été sur la plateforme Algosolis) et une pigmentation de 4% (pigmentation généralement obtenue dans la colonne à bulles), une concentration minimale de 8.7 g.L⁻¹ est nécessaire. Or, en fin de batch dans la colonne à bulles, la concentration en biomasse sèche atteinte est de 1.5 g.L⁻¹ à 2 g.L⁻¹. Ainsi, ce système de culture n’est pas capable de produire un inoculum suffisamment concentré pour lancer le pilote Algofilm 10 m².

Pour résoudre ce problème, deux mesures ont été prises. Premièrement, l’inoculum récolté depuis la colonne à bulles est introduit dans le pilote Algofilm sans dilution afin de commencer la culture avec la concentration en biomasse la plus élevée possible. Afin que la croissance microalgale ne soit pas limitée par une carence en nutriments, le milieu de culture était complété par une solution concentrée (voir Section 3.2.1.7). Deuxièmement, durant les premiers jours de culture, le flux lumineux reçu par les microalgues était maîtrisé en ombrant partiellement le réacteur via des bâches disposées sur la couverture. Pour déterminer la fraction de surface à couvrir, par soucis de simplicité, la méthode utilisée ici suppose que couvrir une fraction f_{cover} du PBR revient à réduire le flux incident de cette même fraction. Par exemple, un réacteur couvert à 25% voit son flux incident réduit de

25%. Ainsi, soit $f_{\text{MRPA}}(f_{\text{cover}})$ une fonction qui donne le MRPA de la culture en fonction de la fraction ombrée du réacteur, la fraction recherchée est alors obtenue par l'Équation 3.7 :

$$f_{\text{MRPA}}(f_{\text{cover}}) - \text{MRPA}_{\text{target}} = 0 \quad (3.7)$$

A titre d'exemple, la Figure 3.7 trace la fraction du réacteur qui doit être ombrée en fonction de la lumière incidente et de la concentration en biomasse sèche. Ici, la pigmentation est égale à 4% .

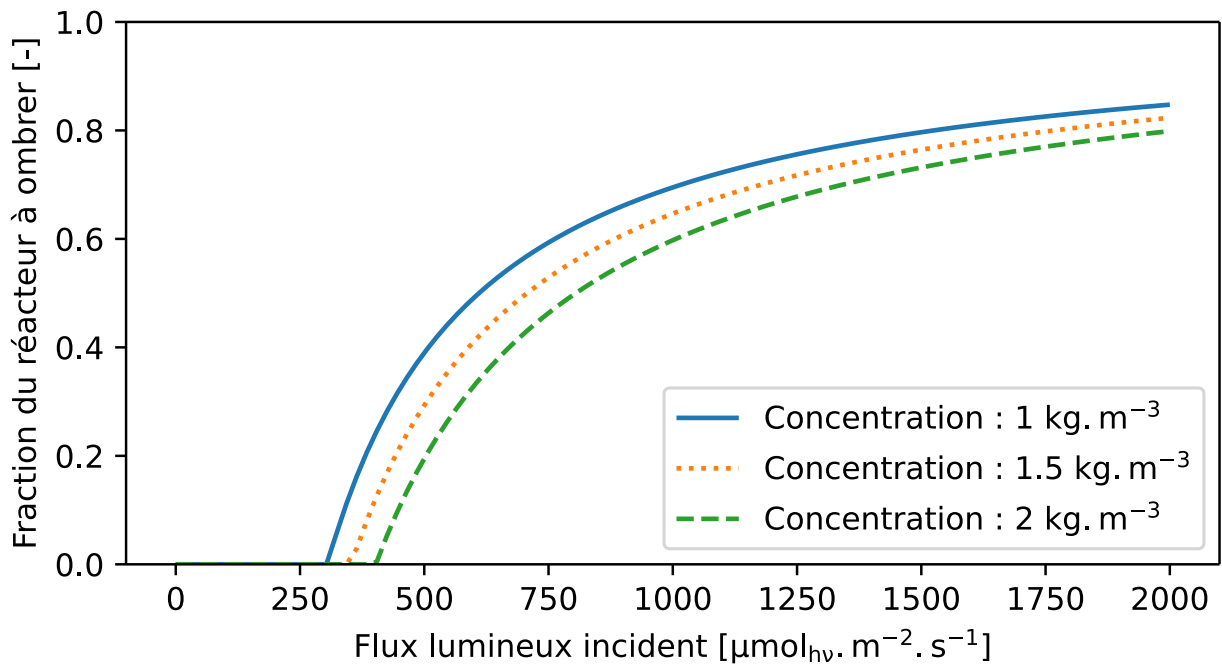


FIGURE 3.7 – Fraction du réacteur à ombrer en fonction du flux incident et de la concentration en biomasse.

Lors des essais, la fraction de réacteur ombré était ajustée tous les jours jusqu'à ce qu'une concentration en biomasse sèche suffisante soit atteinte. Le flux incident utilisée dans le calcul était la valeur maximale donnée par Météofrance pour la journée suivante.

3.2.1.11 Dilution de la culture et contrôle prédictif simple de la concentration en microalgues

Les essais de culture présentés dans cette section ont été menés en semi-continu, le réacteur était dilué tous les jours aux alentours de 16h. Pour cela, la pompe du réacteur

était arrêtée et le milieu de culture était récolté dans le bac. Grâce à un système de canules, un volume donné de la culture était d'abord récolté et constituait l'échantillon analysé. Du milieu de culture frais était ensuite ajouté. Le système de canules permettait de s'assurer que le bac de collecte contenait effectivement 40 L de culture. Les éventuelles pertes d'eau par évaporation étaient ainsi compensées. La pompe péristaltique était enfin redémarrée.

Pour déterminer le volume de culture à renouveler, la concentration en biomasse sèche était déterminée grâce à la méthode rapide (voir Section 3.2.1.2). Ensuite, grâce aux prédictions de Météofrance (voir Section 2.1) et au modèle de croissance (voir Section 2.4), la productivité volumique du jour est prédite en fonction du volume de culture renouvelé. La Figure 3.8 est un exemple de graphique ainsi obtenu et utilisé pour déterminer la dilution à faire.

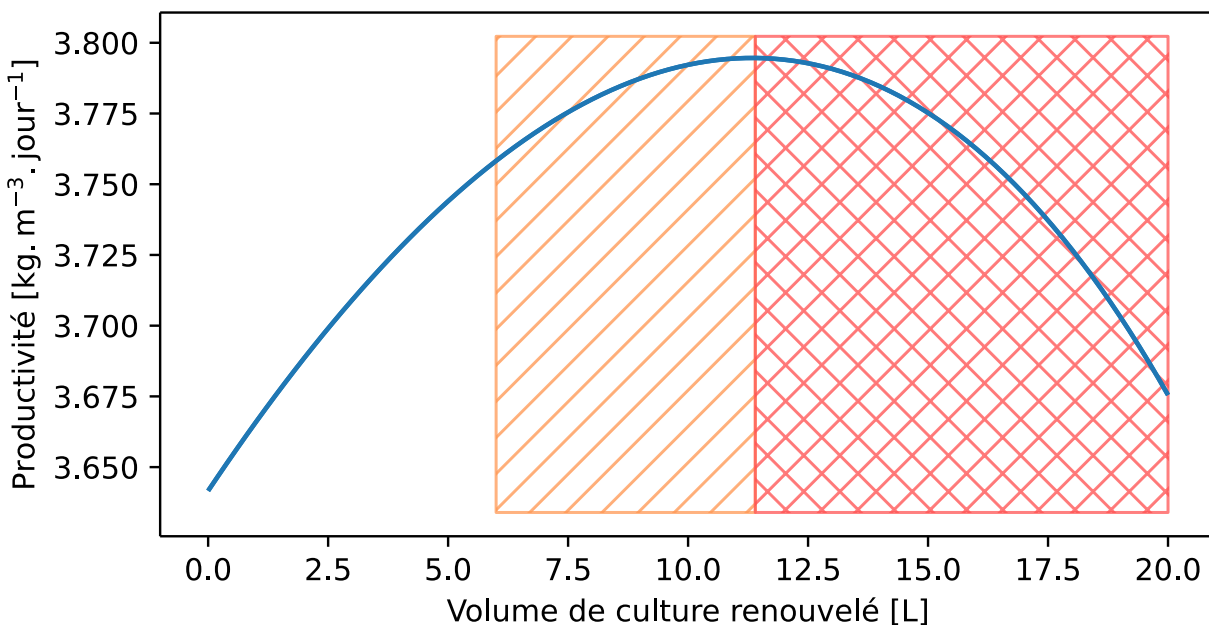


FIGURE 3.8 – Exemple de productivité volumique prédite par les modèles en fonction du volume de culture renouvelé.

En plus de la productivité volumique, la Figure 3.8 fait apparaître deux zones. La zone orange correspond aux dilutions à faire sous réserve d'une culture en bonne santé (tel que mesuré par le F_v/F_m par exemple), et la zone rouge aux dilutions trop élevées. En effet, renouveler un trop grand volume induit une baisse trop importante de concentration en biomasse. Au zénith du lendemain, les microalgues pourraient alors subir un stress lumineux (comme au moment du lancement du réacteur). Le réacteur devrait alors être

de nouveau ombré. Afin d'éviter cela, à chaque étape du calcul, le MRPA de la culture est évalué. Trois cas sont alors considérés :

- Soit le MRPA reste constamment en dessous de $30\,000\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, la dilution est alors considérée comme sûre (partie non hachurée de la Figure 3.8).
- Soit le MRPA dépasse $30\,000\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ sur une courte période de temps (moins d'une heure) et reste inférieur à $35\,000\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, les microalgues pourraient alors subir un stress passager qui ne met pas la culture en péril. La dilution est donc possible à condition que la culture soit en bonne santé (zone orange).
- Soit le MRPA dépasse $35\,000\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ou dépasse $30\,000\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ pendant plus d'une heure. La dilution est considérée comme dangereuse pour la culture (zone rouge).

À noter qu'en pratique, comme sur la Figure 3.8, le maximum de productivité se trouve souvent dans la zone orange ou dans la zone rouge. Cela signifie que, selon le modèle, maximiser les performances du réacteur revient à prendre des risques quant à la sécurité de la culture.

3.2.2 Résultats

3.2.2.1 Campagne expérimentale d'août 2020

Entre août et septembre 2020, un premier essai de culture a été mené sur une période d'un mois. Le réacteur était alors couvert par une couverture simple vitrage.

Cette campagne expérimentale a bénéficié d'une météo favorable. Durant les photopériodes, l'irradiance moyenne était de $350\ \text{W}.\text{m}^{-2}$ ($692\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et l'irradiance maximale moyenne était de $763\ \text{W}.\text{m}^{-2}$ ($1508\ \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Les évolutions de la concentration en biomasse sèche et la productivité volumique obtenues sont présentées par la Figure 3.9.

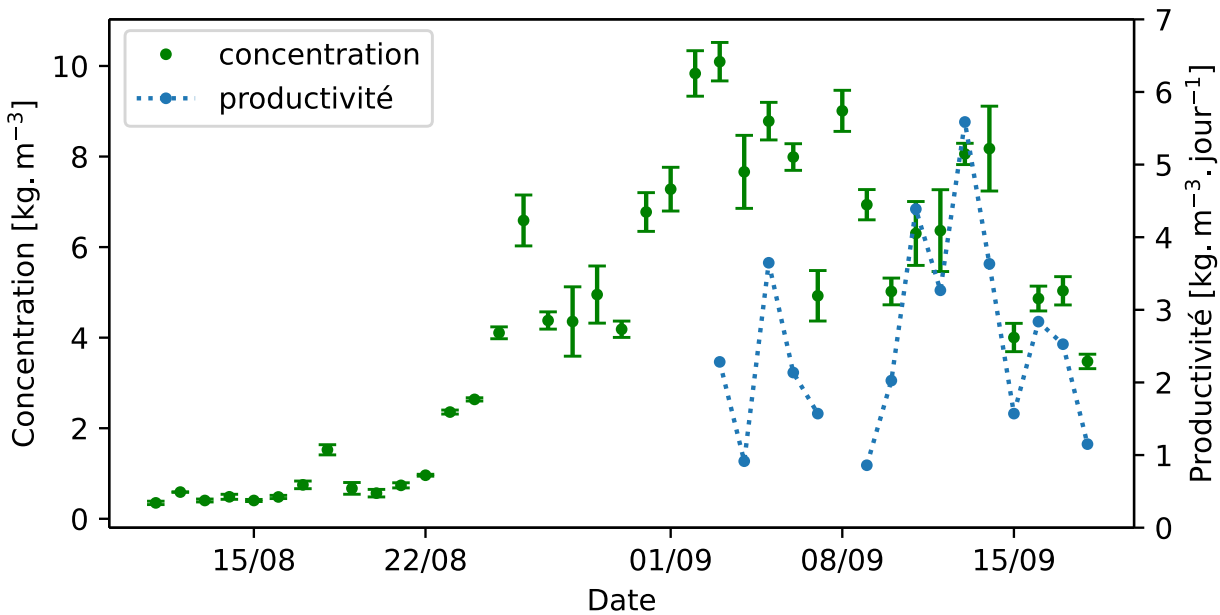


FIGURE 3.9 – Concentration en biomasse sèche et productivité volumique journalière obtenues lors de la campagne de 2020.

La Figure 3.9 montre que de hautes concentrations en biomasse (jusqu'à 10.1 g.L^{-1}) et des productivités volumiques élevées (jusqu'à $5.6 \text{ g.L}^{-1}.\text{jour}^{-1}$) ont été atteintes lors de cette campagne expérimentale. Cela a permis de valider la conception actuelle du pilote solaire *Algofilm*.

Pour la concentration en biomasse sèche, deux périodes sont visibles. Premièrement, une phase de latence s'étend sur les douze premiers jours, la concentration n'augmente pas ou peu. Au huitième jour, une augmentation notable de la concentration en biomasse est visible. Cependant, suite à une carence azotée au milieu de la journée et une dilution trop importante, la concentration en biomasse est redescendue ce qui a prolongé la phase de latence. Grâce aux différentes mesures mises en place (complétion du milieu de culture et ombrage du réacteur), la culture a néanmoins pu être restabilisée et la croissance a pu reprendre quelques jours plus tard. Cela met en évidence la fragilité de la culture lors des premiers jours, lorsque la culture est faiblement concentrée. Les marges de manœuvre sont faibles et les modèles (notamment, ici, la méthode d'ombrage) sont alors des outils précieux permettant de prendre des mesures proportionnées pour sauver la culture.

Au cours des semaines qui ont suivi, de hautes concentrations en biomasse allant jusqu'à 10.1 g.L^{-1} ont été obtenues. Pendant cette période, le réacteur était dilué en fonction des données présentées par la méthode de la Section 3.2.1.11. À noter que cette méthode a

amené à travailler entre 6.5 g.L^{-1} et 12.5 g.L^{-1} . Or, cette gamme de concentration permet, dans des systèmes similaires (photobioréacteurs cascade), d'obtenir une atténuation de lumière dans le volume de culture telle que l'activité photosynthétique des microalgues, et donc la productivité du réacteur sont maximales (Masojídek et al. 2011). Ce résultat tend donc à valider cette méthode de contrôle prédictif simple.

Enfin, grâce aux concentrations élevées en biomasse, une productivité volumique allant jusqu'à $5.6 \text{ g.L}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ ($19.6 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) a été obtenue. En moyenne, elle était de $2.6 \text{ g.L}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ ($9.1 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$). Ces productivités sont du même ordre de grandeur que celles annoncées dans la littérature pour des systèmes similaires (Grivalský et al. 2019). Pour comparaison, un raceway de 20 cm d'épaisseur produit environ $0.1 \text{ g.L}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ lors de périodes ensoleillées (Le Borgne 2011). La capacité du réacteur Algofilm 10 m^2 à intensifier en volume le procédé de culture de microalgues est donc démontrée ici.

Au cours de la culture, la pigmentation des microalgues a également été suivie (voir Figure 3.10).

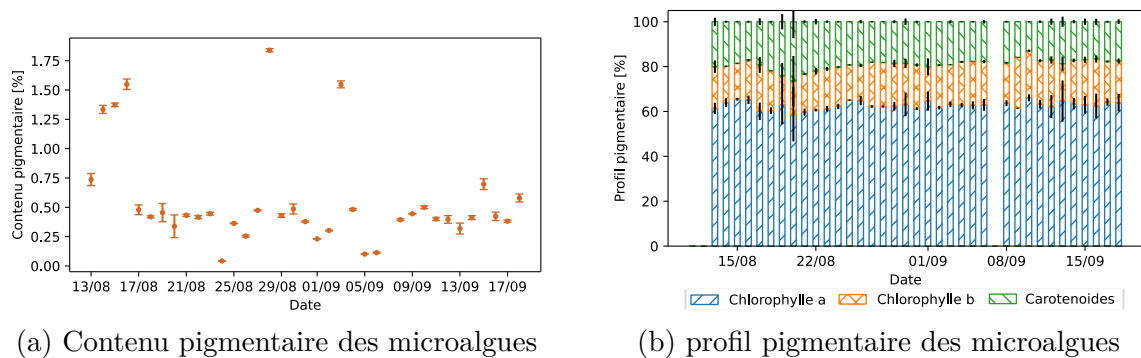


FIGURE 3.10 – Contenu et profil pigmentaire des microalgues lors de la campagne expérimentale de 2020.

La Figure 3.10a montre que la teneur en pigments des microalgues est restée faible (autour de 0.5%) durant toute la campagne expérimentale. Pour comparaison, dans un photobioréacteur de laboratoire, le contenu pigmentaire attendu est de l'ordre de 3% à 5% (Bonnanfant 2020 ; Todisco 2019).

Les microalgues ont tendance à augmenter leur teneur en pigments lorsqu'elles sont en compétition pour l'accès à la lumière (Bonnanfant 2020). Cela suggère que, pour cette campagne expérimentale, il y avait peu d'effet d'ombrage mutuel entre les microalgues. Le flux lumineux disponible était donc suffisant par rapport à la quantité de biomasse dans le réacteur. Les microalgues n'étaient cependant pas stressées. Le MRPA maximal

moyen était de $26\,741 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ entre le 2021-09-01 et le 2021-09-19 (période pendant laquelle le réacteur n'était plus ombré). Il était donc en deçà de la limite fixée ($30\,000 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$). De plus, au cours de l'expérience, le rapport F_v/F_m est resté stable et compris entre 0.55 et 0.65 (sur la même période).

Quelques stress passagers dus à un manque d'azote ont pu être détectés mais des corrections rapides de la concentration en nitrates ont permis de prévenir toute incidence sur la viabilité de la culture. Enfin, le contenu pigmentaire des microalgues est également resté stable et conforme à ce qui est attendu dans un photobioréacteur de laboratoire (Bonnanfant 2020 ; Todisco 2019). Les stress azotés étaient donc suffisamment courts pour qu'ils n'aient pas d'influence majeure sur la pigmentation des microalgues. La culture est donc restée viable durant toute l'expérience bien que des mesures correctives eurent besoin d'être appliquées.

3.2.2.2 Campagne expérimentale d'avril 2021

En avril 2021, suite au changement de couverture, une seconde campagne expérimentale a été conduite. La couverture alvéolaire utilisée avait l'avantage d'être plus fonctionnelle que la précédente mais laissait passer moins de lumière (voir Section 2.3.4).

De nouveau, une météo favorable s'est maintenue tout au long de la culture. Le flux incident moyen (pendant les photopériodes) était de 387 W.m^{-2} ($763 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et le maximum moyen était de 875 W.m^{-2} ($1730 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Bien que ce flux lumineux incident soit légèrement supérieur à celui de l'expérience précédente, la différence de transmittance entre les deux couvertures permet d'égaliser la lumière reçue par les microalgues. Dans les deux cas, le flux incident moyen reçu par la culture est de l'ordre de 310 W.m^{-2} ($613 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) et le maximum moyen reçu de l'ordre de 695 W.m^{-2} ($1374 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Les deux expériences sont donc comparables.

Les évolutions de la concentration en biomasse sèche et la productivité volumique journalière obtenues lors de cette campagne sont données par la Figure 3.11.

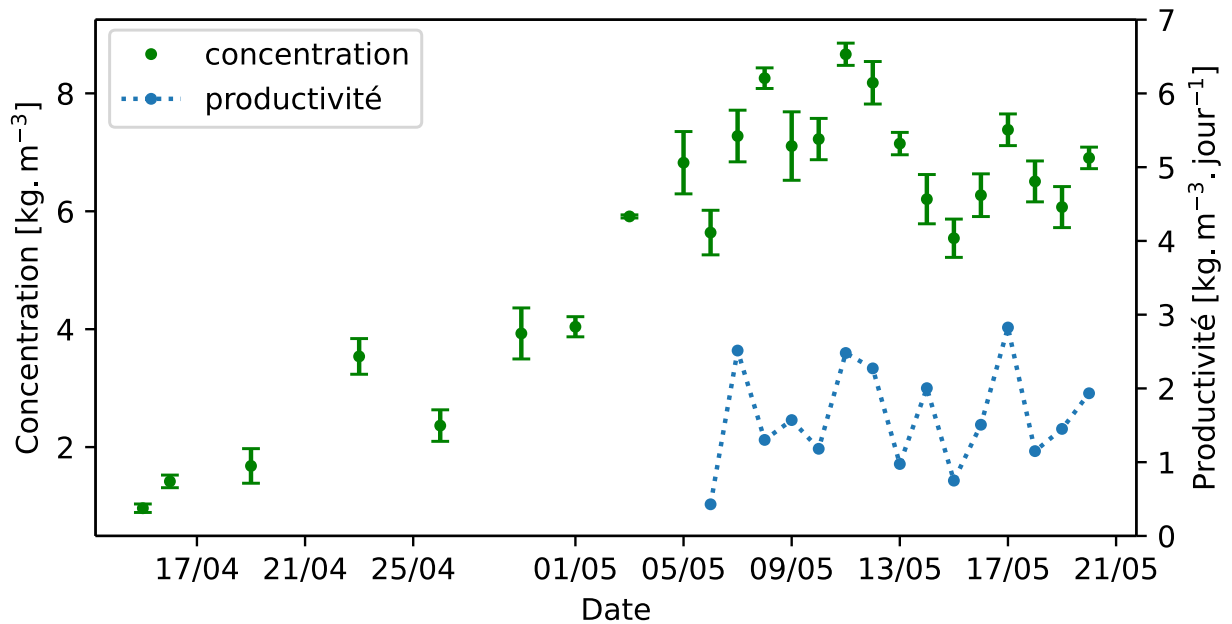


FIGURE 3.11 – Concentration en biomasse sèche et productivité volumique journalière obtenues lors de la campagne de 2021.

La Figure 3.11 montre que, malgré le changement de couverture, le réacteur est capable d'atteindre de hautes concentrations en biomasse sèche : elles sont proches de ce qui a été obtenu lors de la campagne de 2020. La concentration maximale mesurée est ici de 8.7 g.L^{-1} . Enfin, comme précédemment, lorsque le réacteur était productif, la méthode de détermination des dilutions a maintenu la concentration en biomasse sèche dans la gamme où l'activité photosynthétique des microalgues est maximale ($6.5 \text{ g.L}^{-1} - 12.5 \text{ g.L}^{-1}$).

À noter que grâce à une meilleure maîtrise du procédé en début de culture, la période de latence est moins visible que précédemment : la concentration augmente régulièrement dès les premiers jours. Dix jours ont été nécessaires pour enlever complètement l'ombrage du réacteur.

La productivité volumique de cette expérience est cependant inférieure à celle obtenue précédemment. En moyenne, elle était de $1.6 \text{ g.L.jour}^{-1}$ ($5.6 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) avec un maximum à $2.8 \text{ g.L.jour}^{-1}$ ($9.8 \text{ g.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$). Cette baisse peut être, en partie, attribuée au changement de couverture mais aussi à des dilutions moins importantes que précédemment. Pendant cette expérience, les dilutions appliquées étaient moins risquées : elles étaient choisies pour que les microalgues subissent le moins de stress possible (le volume renouvelé était à la limite de la zone orange de la Figure 3.8). Les productivités volumiques obtenues restent néanmoins 15 à 30 fois supérieures à ce qui est attendu d'un raceway.

Ces deux résultats montrent que les choix faits pour piloter le réacteur ont une grande influence sur les performances du procédé. Même si l'expérience de l'opérateur est importante, les outils développés à partir des équations du Chapitre 2 sont une aide précieuse pour rationaliser les décisions prises, et aider à optimiser la productivité du système.

Le contenu et le profil pigmentaire des microalgues mesurés au cours de la culture sont donnés par la Figure 3.12.

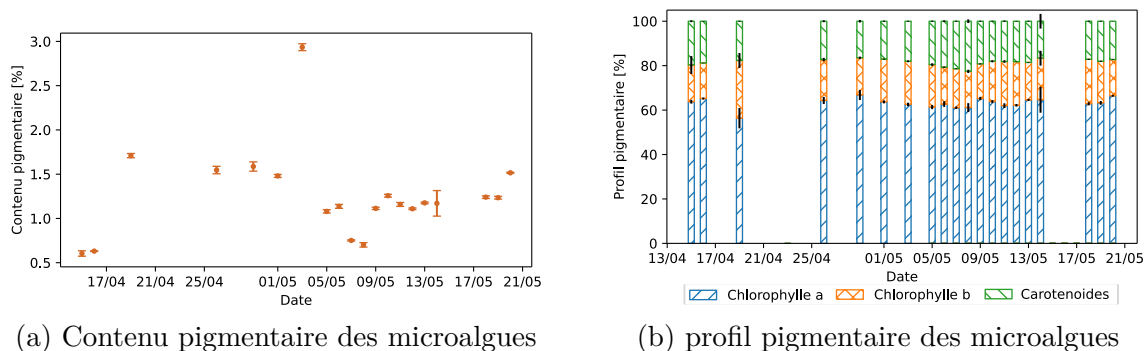


FIGURE 3.12 – Contenu et profil pigmentaire des microalgues lors de la campagne expérimentale de 2021.

La Figure 3.12a montre, de nouveau, que le contenu pigmentaire des microalgues est resté faible par rapport à ce qui est attendu d'un photobioréacteur de laboratoire. Il est ici autour de 1% : supérieur à ce qui a été obtenu lors de l'expérience précédente. Malgré cela, le MRPA maximal moyen est resté du même ordre de grandeur que précédemment ($24\,768 \mu\text{mol}_{\text{h}_v} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

La Figure 3.12b montre de nouveau que le profil pigmentaire est resté stable et proche de ce qui a été obtenu en 2020. Enfin, lors de cette expérience, aucun stress azoté n'a été détecté et le F_v/F_m est resté constamment au dessus de 0.6. Les microalgues étaient donc jugées en bonne santé.

3.2.2.3 Concentration en oxygène dissous

Au cours des essais présentés ici, la concentration en oxygène dissous dans le milieu de culture a été suivie. À titre d'exemple, la Figure 3.13 donne, pour la journée du 2020-08-28, l'évolution de cette concentration.

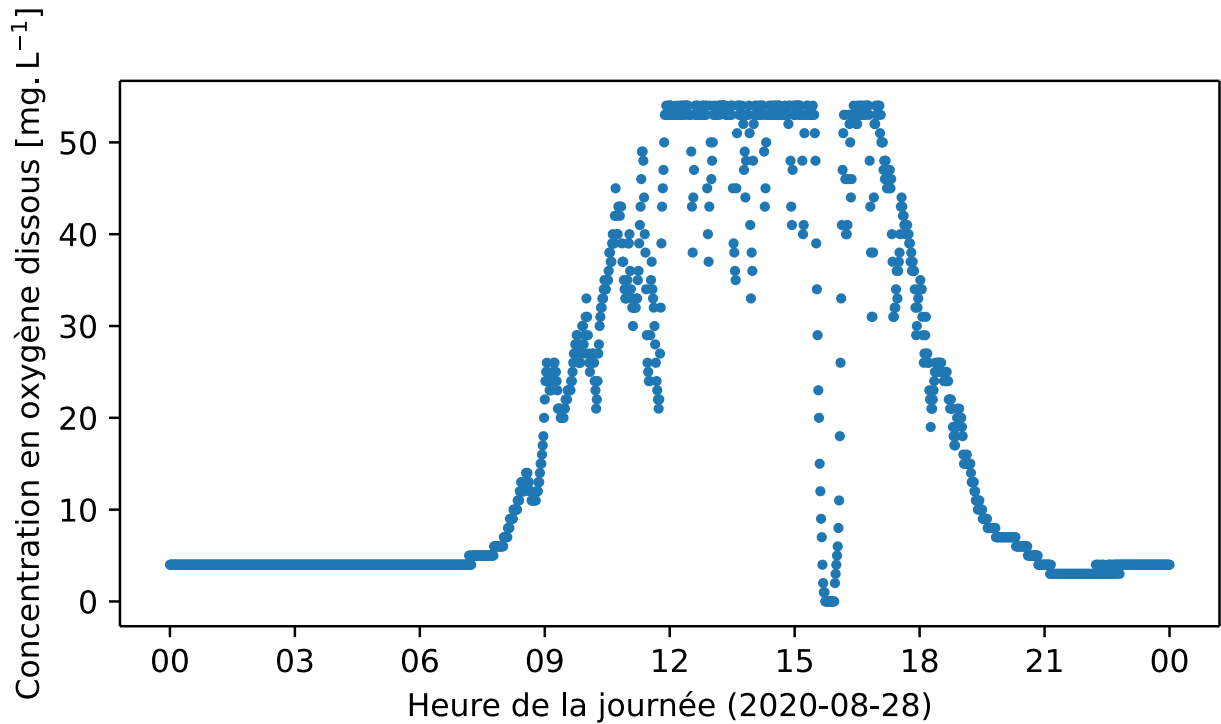


FIGURE 3.13 – Concentration en oxygène dissous lors de la journée du 2020-08-28.

La Figure 3.13 montre que l'activité photosynthétique des microalgues induit une forte accumulation d'oxygène au cours de la journée. Entre 11h et 17h, la concentration en oxygène dissous est telle que la sonde utilisée est saturée. La littérature montre que de telles valeurs sont susceptibles d'affecter négativement la croissance microalgale (Bonnafant 2020 ; Kazbar et al. 2019 ; Livansky et Doucha 1996). Ainsi, dans sa conception actuelle, Algofilm est, en partie, limité par sa capacité à dégazer l'oxygène produit par la photosynthèse. C'est également le cas pour les systèmes similaires de la littérature (Rearte et al. 2021).

À noter cependant que malgré cette forte concentration en oxygène dissous, le réacteur a atteint de hautes concentrations en biomasse sèche et des productivités volumiques élevées. Ainsi, cet oxygène, bien que néfaste, n'est pas létal pour les microalgues et ne met pas en péril le procédé de culture (au moins pour *Chlorella vulgaris*).

Enfin, la Figure 3.13 montre qu'aux alentours de 16h, la concentration en oxygène chute avant de rapidement revenir à son point précédent. Cela correspond au moment où la dilution est réalisée. Puisque toute la culture est retenue dans le bac de collecte (à l'obscurité), il n'y a plus de photosynthèse et la respiration des microalgues consomme tout l'oxygène présent. Cela démontre que les cinétiques de production et de consommation

d'oxygène par les microalgues répondent à des dynamiques très rapides : de l'ordre de la minute.

L'accumulation d'oxygène dissous dans le milieu de culture pourrait s'expliquer par une pression partielle élevée dans la phase gaz du réacteur (due au dégagement d'oxygène par le milieu de culture). Pour le vérifier, lors de la campagne d'avril 2021, une sonde a été placée dans la phase gaz du PBR. Au cours de l'expérience, aucune variation significative de la pression partielle en oxygène n'a été mesurée. Il n'y a donc pas d'accumulation d'oxygène dans la phase gaz. Cela peut s'expliquer par le grand volume de gaz (environ 4 m^3) : une quantité importante d'oxygène doit être dégagée pour faire varier significativement sa pression partielle. De plus, les couvertures utilisées ne sont pas étanches au gaz, l'oxygène dégagé finit donc par sortir du réacteur empêchant ainsi toute accumulation.

3.2.2.4 Évolution de l'épaisseur de culture

La Section 3.1.3 a permis d'estimer, en maquette froide, l'épaisseur de la culture en mesurant le volume de culture dispersé sur le plan incliné. Cependant, après les deux campagnes expérimentales, lorsque la pompe est arrêtée et l'ensemble de la culture récolté, un dépôt de microalgues restait sur le plan. Il a été récupéré et analysé.

Pour les deux campagnes expérimentales, le dépôt représente un volume d'environ 10 L. Au moment de l'arrêt du réacteur, les 40 L de culture ont cependant été récupérés. Cela signifie que le volume de liquide présent dans le réacteur a augmenté d'environ 10 L. Ce volume provient certainement du milieu de culture frais apporté par les dilutions. Chaque jour, lors de l'arrêt de la pompe, la culture qui s'est déposée ne revient pas dans le bac de collecte, le système de canules utilisé compense alors ce qui est perçu comme une perte. Ainsi, même si le volume de culture en circulation reste constant, celui présent dans le réacteur augmente.

En suivant le même raisonnement que la Section 3.1.3, cela signifie qu'au cours des expériences, l'épaisseur de culture est passée d'environ 3.5 mm à environ 4.5 mm. Les mesures collectées ne permettent cependant pas de déterminer à quelle vitesse ce dépôt se forme et s'il existe une limite d'épaisseur qu'il peut représenter.

Une analyse du dépôt a montré qu'il contient une concentration élevée en microalgues : 18.7 g.L^{-1} et 14.3 g.L^{-1} pour les campagnes de 2020 et 2021 respectivement. Ces concentrations sont supérieures aux maximales mesurées dans le liquide en circulation. La pigmentation des microalgues est également plus importante (2% de la biomasse sèche dans les deux cas). Enfin, le profil pigmentaire et la mesure de rendement photosynthétique

maximal montrent que les microalgues présentes dans le dépôt sont en bonne santé.

Ces observations ne remettent cependant pas en cause les conclusions précédentes où seule la culture en circulation était analysée. Elles démontrent cependant un biais du système qu'il pourrait être utile, à l'avenir, d'étudier et de corriger par un meilleur contrôle du mélange sur le plan.

3.2.3 Conclusion sur les essais de culture solaire

Au cours de la thèse, des essais de culture ont été menés afin de démontrer qu'une haute concentration en biomasse et une productivité volumique élevée peuvent être atteintes avec le pilote solaire Algofilm 10 m². Pour cela, sur la base des modèles présentés au chapitre précédent, des stratégies de lancement et de pilotage raisonnés du réacteur ont été développées et implémentées.

Premièrement, une méthode basée sur le calcul du MRPA permettant de déterminer quelle fraction du réacteur doit être ombrée a été développée et testée. Grâce à cette méthode, aucune culture lancée n'a été perdue dans les premiers jours de lancement, ce qui tend à valider cette procédure. Cette solution n'est cependant pas satisfaisante pour des systèmes à très grande échelle où plusieurs dizaines de mètres carrés devraient être couverts. Dans une optique de montée en échelle, il est donc intéressant d'avoir des réacteurs intensifiés de taille intermédiaire pour préparer des inoculum suffisamment concentrés.

Pour atteindre les hautes concentrations et productivités volumiques dans l'Algofilm 10 m², les modèles développés au Chapitre 2 se sont avérés utiles. Notamment, la stratégie de dilution a permis d'optimiser la productivité volumique. Cependant, puisque les modèles ne prennent pas en compte les stress que peuvent subir les microalgues, leur anticipation reste, en partie, de la responsabilité de l'opérateur. Ainsi, une prise en compte explicite des stress par les modèles serait une amélioration majeure et permettrait de mieux maîtriser les risques pris pour maximiser la productivité du réacteur.

Enfin, un suivi de la concentration en oxygène dissous a montré que, comme pour les autres systèmes de la littérature de ce type, une haute concentration peut être atteinte. Plusieurs travaux de la littérature tendent à montrer que cela affecte négativement la productivité du réacteur. Afin d'optimiser les conditions de culture pour maximiser la croissance microalgale, la Section 4.4 étudie, par simulation, l'impact de la conception d'Algofilm sur la concentration en oxygène atteinte dans le réacteur.

3.3 Étude du comportement thermique du pilote *Algofilm* 10 m²

Lors des essais de culture présentés dans la section précédente, le plancher refroidissant du photobioréacteur était en fonctionnement quasi continu afin de maintenir une température adéquate pour la croissance de *Chlorella vulgaris*. Cela représente une consommation énergétique importante qui est incompatible avec l'objectif poursuivi de conception d'un procédé sobre. Pour remédier à ce problème, des solutions sont étudiées par simulation dans le chapitre suivant. La Section 4.2, notamment, utilise le modèle thermique développé dans la Section 2.5.2. Les conclusions de cette étude ne peuvent être valides que si le modèle prédit correctement la température du réacteur. Une campagne expérimentale a donc été menée afin de s'assurer de la validité du modèle et de ses hypothèses. Cette validation est présentée ici.

3.3.1 Matériels et méthodes

3.3.1.1 Acquisition des données

Lors de cette campagne expérimentale, les températures des trois parties du réacteur définies par le modèle (la vitre, le milieu de culture et la dalle de béton) ont été mesurées par huit thermocouples type K de classe 1 (RS Components, Royaume Uni).

La Figure 3.14 schématise la disposition des thermocouples dans le réacteur. Le thermocouple (1) était collé sur la face externe de la vitre du photobioréacteur, le (2) était suspendu dans la phase gaz (validation de l'Hypothèse 4). Les thermocouples (3) et (4) étaient collés sur la surface du plan incliné pour mesurer la température du milieu de culture en différents endroits (validation de l'Hypothèse 2). La sonde pH (9) située dans le bac de collecte, donnait une mesure supplémentaire de cette température. Les thermocouples (5) et (6) mesuraient la température de la dalle de béton à 17 mm et 22 mm de profondeur respectivement. Enfin, la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du plancher chauffant / refroidissant était mesurée par les thermocouples (7) et (8).

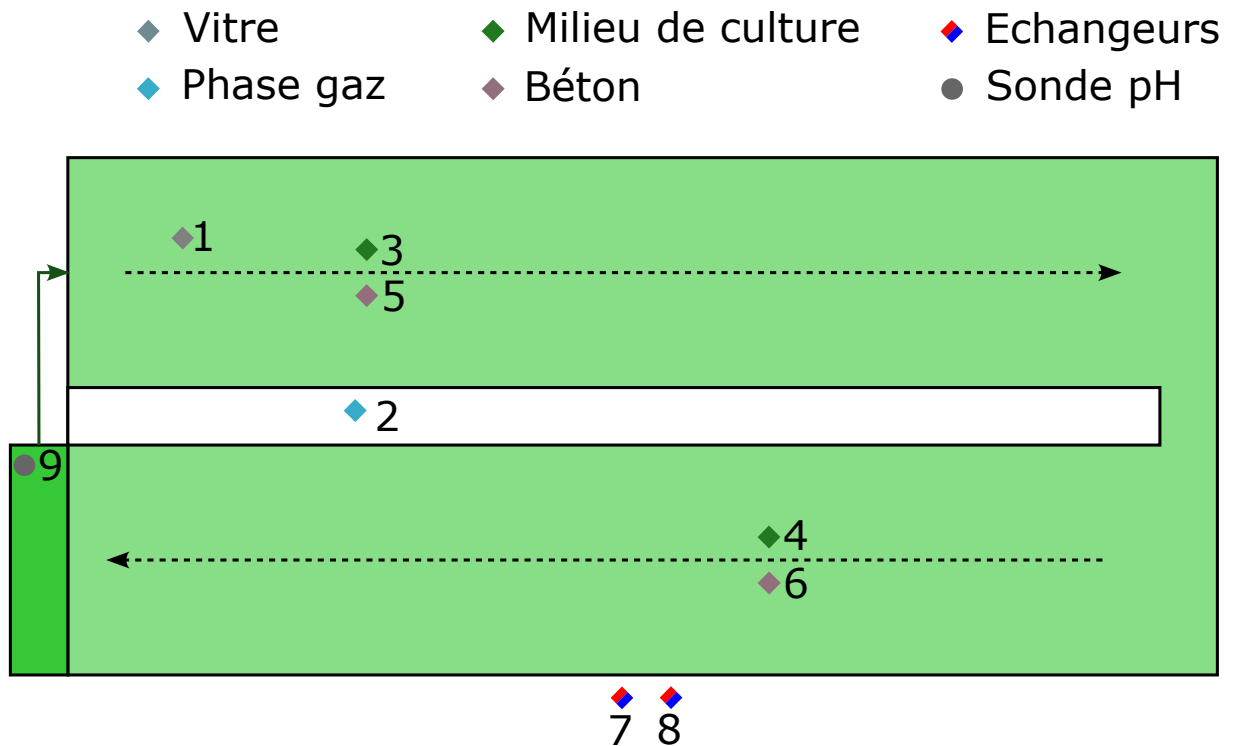


FIGURE 3.14 – Schéma de la répartition des points de mesure de la température dans le photobioréacteur.

Le voltage des thermocouples était mesuré toutes les 10 secondes par une carte d'acquisition ICPDAS I-7019 (ICP DAS, États-Unis) et transmis à un ordinateur où un programme LabVIEW© (National Instrument, États-Unis) spécialement développé enregistrerait les signaux.

Pour calculer l'évolution des températures, le modèle thermique requiert plusieurs variables météorologiques (lumière, température ambiante, vitesse et direction du vent). Pendant la campagne expérimentale, ces données étaient mesurées et enregistrées par une station météorologique Vantage Pro 2 (Davis, États-Unis) installée sur la plateforme Algosolis.

3.3.1.2 Initialisation de la température dans le modèle thermique

Pour déterminer l'évolution de la température du réacteur, le modèle requiert, en plus des données météorologiques, la température initiale de chacune des parties du système. Les températures du milieu de culture et de la vitre sont mesurées par les différents thermocouples installés. En revanche, l'instrumentation ne permet pas de connaître le

gradient de température du sol et de la dalle. Pour résoudre ce problème, la simulation de la température du réacteur a été initialisée 19 jours avant le début de la campagne expérimentale. Elle commence donc au 2020-09-01 et se termine au 2020-10-01 alors que la période de validation s'étend du 2020-09-19 au 2020-09-29. Les 19 premiers jours simulés permettent d'établir le gradient de température dans le sol et la dalle.

À l'initialisation, ces températures varient linéairement avec la profondeur. En surface, le sol est à la température de l'air ambiant, et la dalle à celle du milieu de culture. En profondeur, ces deux parties sont à la température constante du sol ($T_{ground-const}$). Une analyse en simulation a montré que les 19 jours de préparation suffisent pour que les résultats des calculs sur la période de validation (du 19 au 29 septembre) ne dépendent pas de T_{ext} et T_{cm} utilisés à l'initialisation.

3.3.1.3 Indicateurs de performance

Pour mesurer l'adéquation entre les mesures et les prédictions du modèle, trois indicateurs sont utilisés : l'erreur absolue moyenne (MAE), la moyenne des carrés des erreurs (MSE) et l'erreur relative moyenne (MAPE). La MAE donne une lecture facilement interprétable de la précision moyenne du modèle. Elle peut cependant cacher des écarts ponctuels importants. La MSE, plus sensible à ces différences, permet alors de détecter leur présence. Enfin, la MAPE permet de connaître l'erreur commise relativement à la mesure. Ces indicateurs sont calculés via les relations suivantes :

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |T_{measure-i} - T_{model-i}| \quad (3.8)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (T_{measure-i} - T_{model-i})^2 \quad (3.9)$$

$$MAPE = 100 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{T_{measure-i} - T_{model-i}}{T_{measure-i}} \quad (3.10)$$

Par la suite, les prédictions du modèles seront jugées satisfaisantes si, pour le milieu de culture, la MAE est inférieure à 2 °C, la MAPE inférieure à 10% et la MSE inférieure à 5 °C².

3.3.2 Résultats

3.3.2.1 Identification du coefficient d'échange entre la dalle et le milieu de culture

Le modèle thermique fait intervenir un coefficient d'échange de chaleur entre le milieu de culture et la dalle de béton (Équation 2.82). Celui-ci n'est pas obtenu par une relation mathématique mais a été identifié expérimentalement. Pour cela, la campagne expérimentale a été prolongée d'une journée (le 2020-09-30). Grâce aux données obtenues, différents coefficients ont été testés jusqu'à trouver celui qui minimise la MSE. Il a ainsi été déterminé qu'une valeur de $200 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ est optimale. Cette valeur est utilisée par la suite. Ce coefficient est cohérent avec ceux trouvés dans la littérature pour des problèmes similaires (Goetz et al. 2011 ; Markides et al. 2016).

Afin de qualifier l'influence de ce paramètre sur les prédictions du modèle, une analyse de sensibilité a été menée. Les différentes simulations ont montré qu'en deçà d'une valeur de $150 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ les mesures et les prédictions du modèle diffèrent fortement ($\text{MAE} > 5 \text{ }^\circ\text{C}$). Les résultats s'améliorent au fur et à mesure que $h_{cm-base}$ s'approche de $150 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. À partir de cette valeur, le modèle calcule correctement la température du milieu de culture ($\text{MAE} < 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Augmenter d'avantage la valeur de $h_{cm-base}$ n'améliore ni ne dégrade significativement les prédictions du modèle : il est alors très peu sensible à ce paramètre. Au delà d'une valeur de $950 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, le coefficient est si grand qu'une petite différence de température entre le milieu de culture et la dalle implique de très grands flux de chaleur. Le modèle devient alors numériquement instable.

3.3.2.2 Validation de l'Hypothèse 2

Le modèle thermique suppose que la température du milieu de culture est homogène en tout point du réacteur (Hypothèse 2). Cette hypothèse a été testée grâce aux mesures faites par les thermocouples (3) et (4) ainsi que par la sonde pH. La Figure 3.15 donne l'évolution de ces mesures pour la journée du 2020-09-27.

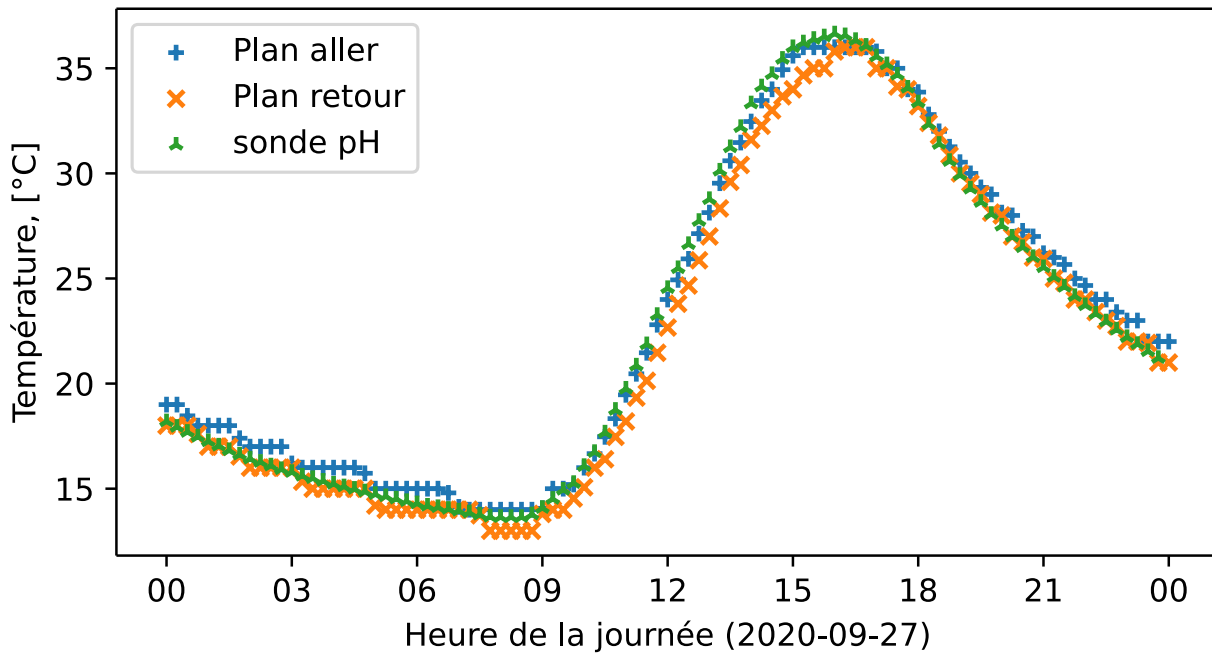


FIGURE 3.15 – Mesures expérimentales de température aux points (3), (4) et (9) lors la journée du 2020-09-27.

La Figure 3.15 montre que les mesures des thermocouples et de la sonde pH s'accordent malgré leurs différentes positions dans le réacteur. L'analyse des mesures obtenues lors des autres journées de la campagne expérimentale confirment cette observation (données non présentées). L'Hypothèse 2 est donc valide. Par la suite, la moyenne de ces trois mesures sera utilisée comme la température du milieu de culture.

3.3.2.3 Validation de l'Hypothèse 4

L'Hypothèse 4 du modèle suppose que la température de la phase gaz du réacteur est égale à celle du milieu de culture. Grâce aux mesures obtenues lors de la campagne expérimentale, cette hypothèse a pu être testée. La Figure 3.15 présente l'évolution de ces mesures pour la journée du 2020-09-27.

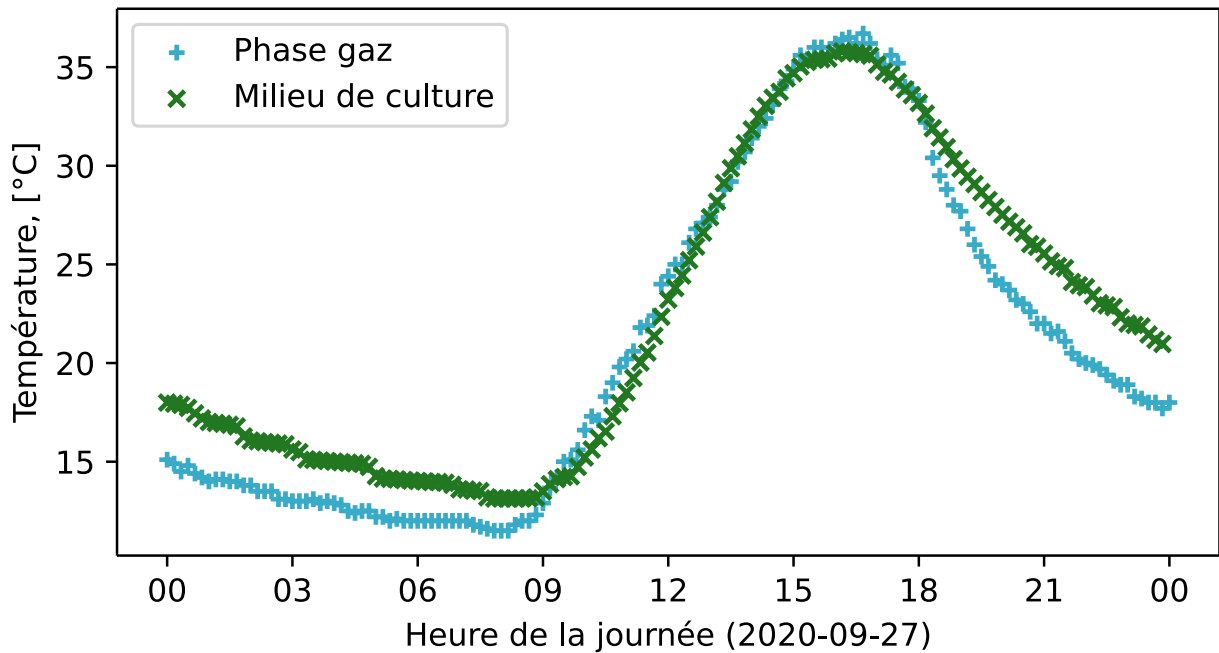


FIGURE 3.16 – Comparaison des températures mesurées dans la phase gaz et le milieu de culture lors de la journée du 2020-09-27.

La Figure 3.16 montre que tout au long de la journée, la température de la phase gaz est proche de celle du milieu de culture. En moyenne, sur l'ensemble de la journée, les deux températures ne diffèrent que de 1.6 °C. Des différences significatives sont cependant visibles la nuit (jusqu'à 3.6 °C). Ces observations sont confirmées par l'analyse des données obtenues lors des autres journées de la campagne expérimentale. La valeur de température du milieu de culture est donc considérée comme une approximation acceptable de celle de la phase gaz. L'Hypothèse 4 du modèle thermique est donc valide.

3.3.2.4 Validation du modèle thermique avec une couverture simple vitrage

À partir des données météorologiques mesurées lors du mois de septembre 2020, la température du pilote Algofilm 10 m² a été prédite avec le modèle. Le réacteur était alors équipé d'un simple vitrage. La Figure 3.17 compare, pour le milieu de culture, les résultats de ces prédictions aux mesures faites sur une période de dix jours consécutifs à la fin du mois.

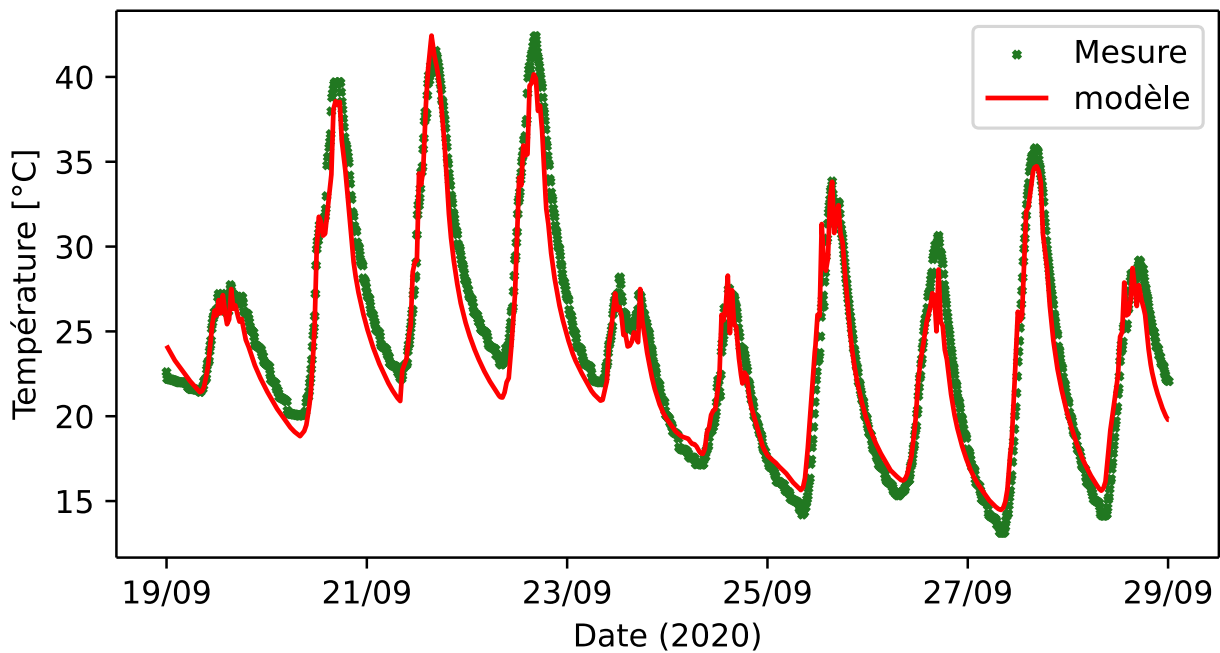


FIGURE 3.17 – Comparaison de la température du milieu de culture mesurée et calculée entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.

La Figure 3.17 montre que le modèle parvient à reproduire correctement les dynamiques de température du milieu de culture malgré des journées ayant des conditions météorologiques très différentes. Sur les dix journées de validation, la MAE obtenue est de 1.3 °C et la MAPE de 5.4%. Ces faibles valeurs démontrent qu'en moyenne, le modèle prédit correctement la température du milieu de culture. De plus, la faible MSE (2.5 °C²) montre que, sur l'ensemble des points, il n'y a pas d'erreur ponctuelle importante. Pour le milieu de culture, l'adéquation entre les prédictions du modèle et les mesures est donc jugée acceptable.

Afin de déterminer un éventuel biais du modèle, la Figure 3.18 représente la température calculée en fonction de la température mesurée. Ici, un point situé au dessus de la droite rouge (droite de pente 1 passant par l'origine) correspond à une température surestimée. À l'inverse, un point situé sous cette droite est une température sousestimée.

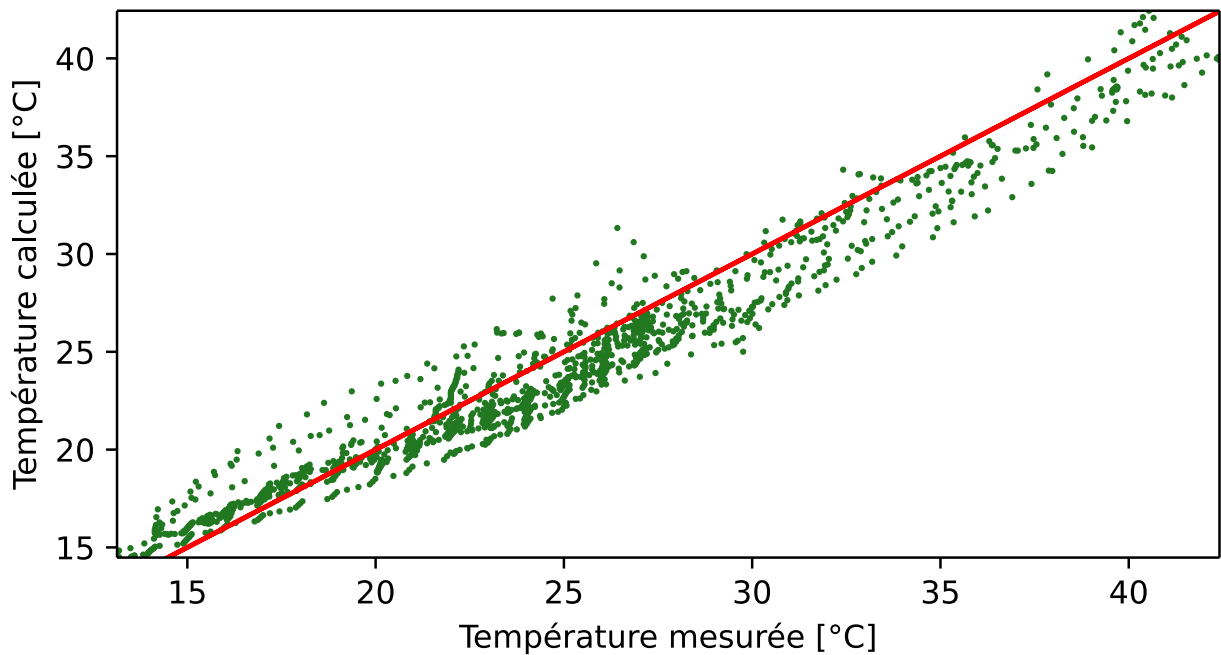


FIGURE 3.18 – Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.

La Figure 3.18 met en évidence que lorsque le modèle commet une erreur, il a tendance à sousestimer la température du milieu de culture. Des écarts sont notamment visibles lors de certaines nuits (voir les nuits des 2020-09-20 et 2020-09-21 de la Figure 3.17). Cela indique que le modèle tend à sousestimer certains gains de chaleur et / ou à surestimer certaines pertes. Les points restent cependant proches de la droite (écarts inférieurs à 1.3 °C en moyenne), ce qui dénote une précision acceptable des prédictions du modèle thermique.

Les mesures expérimentales montrent que la température du milieu de culture n'est pas exactement égale à celle de la phase gaz (voir Section 3.3.2.3). Afin de déterminer si la température du milieu de culture prédite par le modèle est un bon estimateur de la température de la phase gaz, la Figure 3.19 compare les mesures obtenues aux prédictions faites.

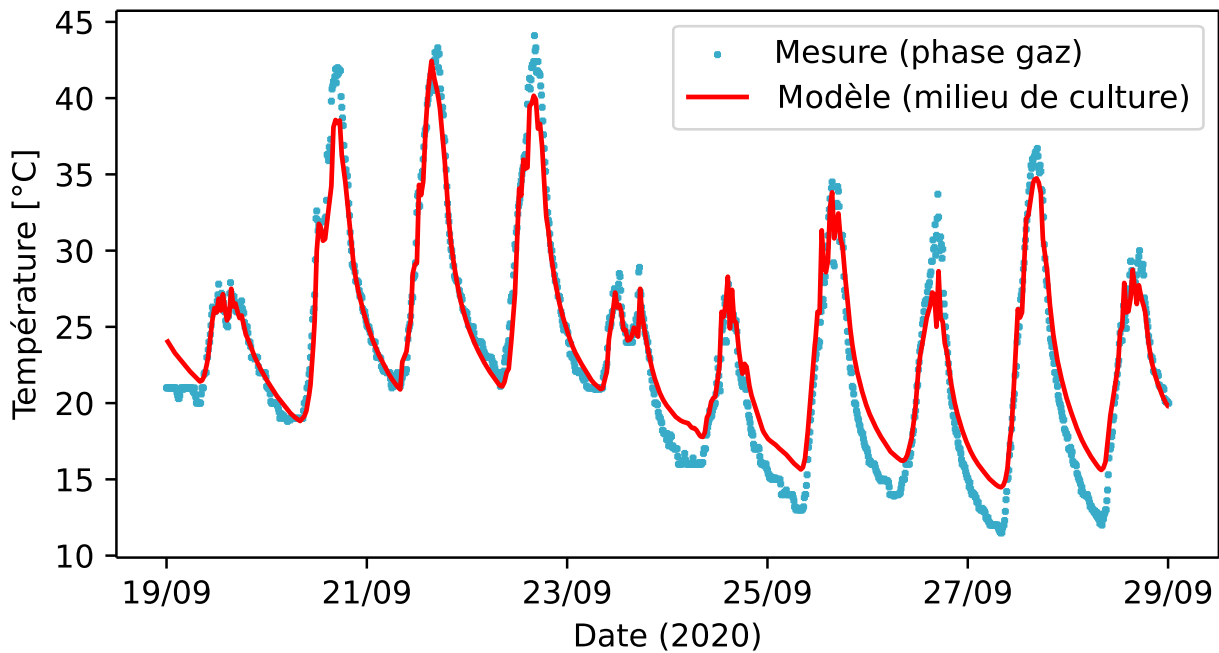


FIGURE 3.19 – Comparaison des températures de la phase gaz et du milieu de culture (mesurées et calculées) entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.

La Figure 3.19 montre que les dynamiques d'évolution de la température de la phase gaz sont respectées par les prédictions de la température du milieu de culture. Ici, la MAE (2.1 °C) et la MAPE (10.1%), sont légèrement supérieures à celles calculées pour le milieu de culture. Ces indicateurs restent dans le même ordre de grandeur que les objectifs fixés pour la température du milieu de culture. Des écarts significatifs sont cependant observables lors de certaines nuits (jusqu'à 5 °C de différence). Ils sont dénotés par une MSE également plus élevée (6.7 °C²). Ainsi, malgré l'absence d'une description formelle du comportement thermique de la phase gaz, le modèle parvient à approcher sa température avec une précision jugée satisfaisante.

Enfin, le modèle thermique calcule les échanges de chaleur entre la vitre et le milieu de culture. Puisque ces transferts sont fonction de la température de ces deux corps, celle de la vitre est également prédite par le modèle. Afin de valider ces prédictions, la Figure 3.20 les compare aux mesures obtenues.

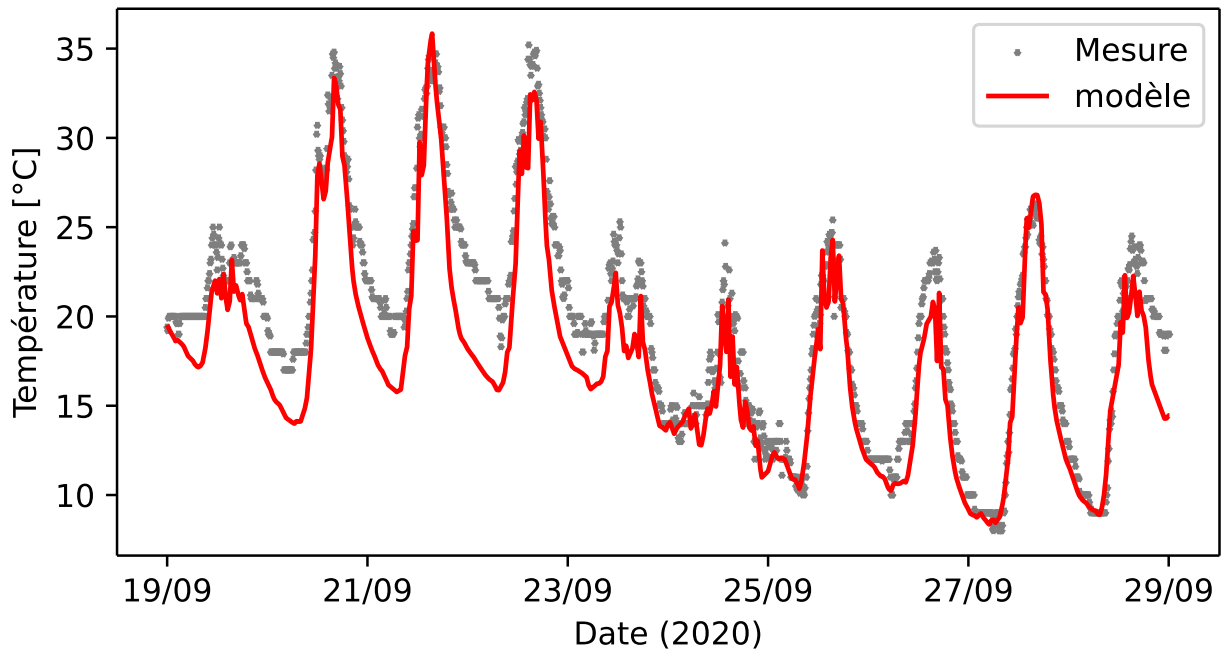


FIGURE 3.20 – Comparaison des températures de la vitre mesurées et calculées entre le 2020-09-19 et le 2020-09-29.

Comme pour le milieu de culture et la phase gaz, le modèle parvient à prédire correctement les dynamiques de température de la vitre. De nouveau, des écarts sont particulièrement visibles la nuit (jusqu'à -4 °C). Les indicateurs de performances sont similaires à ceux obtenus pour la phase gaz : la MAE est de 2.1 °C, la MAPE de 10.7% , et la MSE de 6.4 °C². Comme pour la phase gaz, la précision des prédictions du modèle pour la vitre du réacteur est donc considérée comme acceptable.

Les valeurs des différents indicateurs utilisés sont résumées par la Table 3.3.

	Vitre	Phase gaz	Milieu de culture
MAE [°C]	2.1	2.1	1.3
MSE [°C ²]	6.4	6.7	2.5
MAPE [%]	10.7	10.1	5.5

TABLE 3.3 – Indicateurs de performance du modèle.

L'ensemble de ces résultats montrent que le modèle est capable de prédire la température du photobioréacteur avec une précision jugée suffisante.

3.3.2.5 Validation du modèle thermique avec une couverture alvéolaire

Au cours de la thèse, la couverture simple vitrage du pilote Algofilm a été remplacée par une couverture alvéolaire. Par sa structure, ce nouveau vitrage réduit significativement la quantité de lumière transmise au milieu de culture. Or, comme démontré par l'analyse de sensibilité du modèle (voir Section 2.5.2.7), cela impacte fortement le comportement thermique du réacteur.

Le modèle thermique peut, grâce aux équations d'optique présentées dans la Section 2.3, prendre en compte ce changement sans autre information que celle de la structure de la nouvelle couverture. Pour le valider expérimentalement, une seconde validation du modèle thermique a été menée durant le mois de mai 2021 avec la même méthode que précédemment. Ici, seules la structure du vitrage et les données météorologiques mesurées et utilisées en entrée du modèle changent.

Pour initialiser le gradient de température dans la dalle et le sol, la même méthode que précédemment a été utilisée. La simulation commence donc au 2021-05-01 pour une période de validation débutant au 2021-05-20 (vingt jours de préparation).

La Figure 3.21 compare les températures du milieu de culture mesurées prédites.

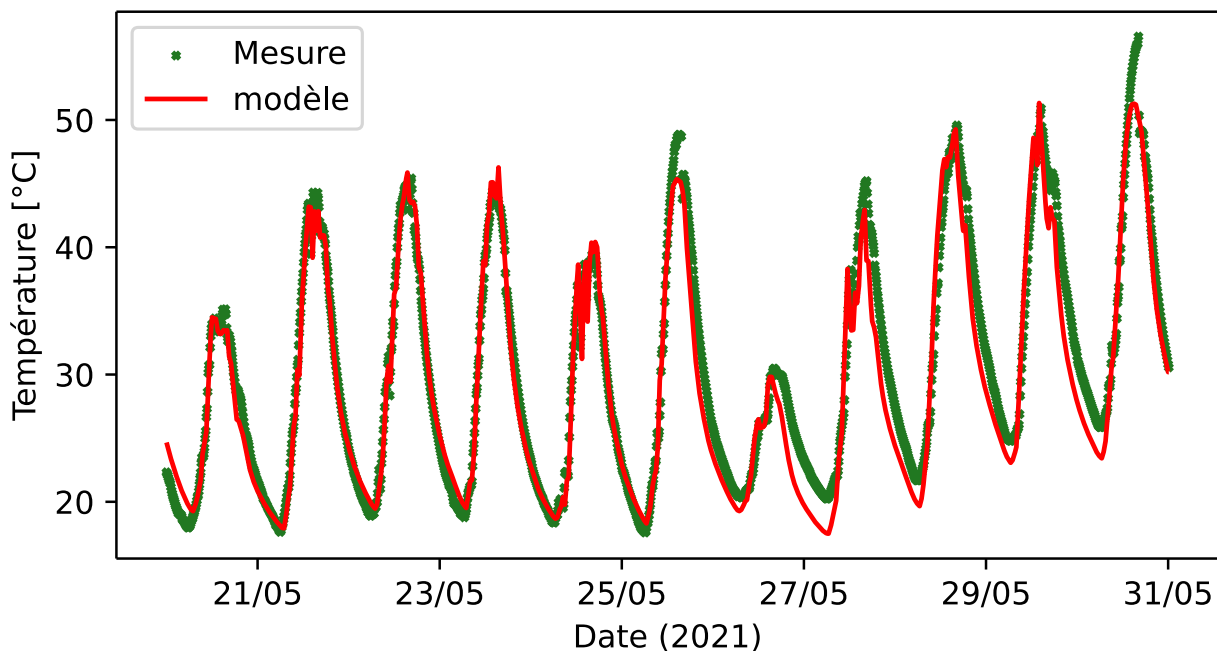


FIGURE 3.21 – Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.

La Figure 3.21 montre que malgré une saison, des conditions météorologiques, et une couverture différentes, le modèle thermique parvient à prédire correctement la température

du milieu de culture. La MAE est ici de 1.7 °C, légèrement supérieure à ce qui a été obtenu lors de la précédente validation. La MAPE (5.6%) reste cependant sensiblement identique. La précision moyenne obtenue reste donc très proche de celle observée précédemment. La MSE (4.8 °C²) montre cependant que des erreurs plus importantes sont parfois commises par le modèle : la température est significativement sousestimée au zénith de deux journées et lors de certaines nuits. La précision du modèle est néanmoins jugée suffisante pour une application en ingénierie.

La Figure 3.22 trace la température calculée en fonction de la température mesurée.

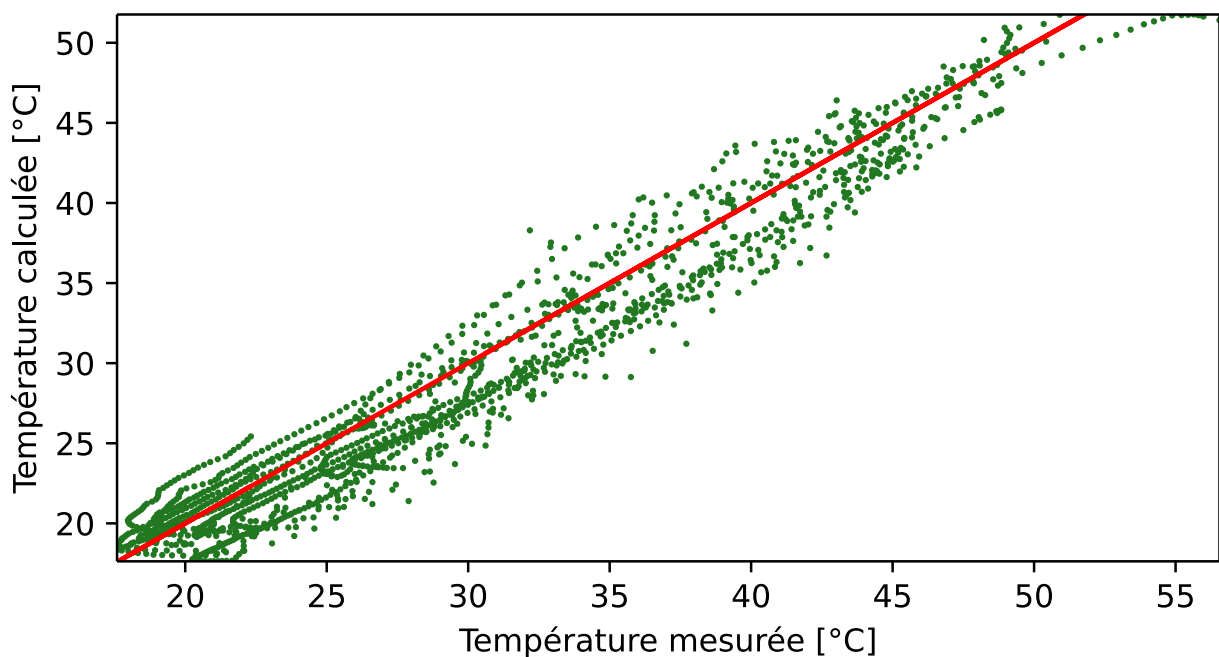


FIGURE 3.22 – Comparaison des températures du milieu de culture mesurées et calculées.

La Figure 3.22 montre que, de nouveau, le modèle a tendance à plutôt sousestimer la température du milieu de culture. Comme indiqué par la MSE, les points sont plus largement étalés autour de la droite rouge, des différences significatives (jusqu'à -5 °C) sont ainsi mises en évidence. La majorité des points restent cependant proches de la mesure.

Ainsi, malgré des conditions météorologiques différentes et un système modifié, le modèle est parvenu à prédire, avec une précision jugée suffisante, la température du milieu de culture. Ces nouveaux résultats confortent le modèle thermique et démontrent sa robustesse. Le modèle thermique développé dans la Section 2.5.2 est donc considéré valide et utilisable pour des applications d'ingénierie telle que celles présentées au chapitre suivant.

3.3.3 Protection temporaire de la culture

La Figure 3.21 montre que lorsque le système de régulation thermique est désactivé, des températures très élevées peuvent être obtenues (> 45 °C). Pour protéger la culture sans consommer d'énergie, il a été proposé de ne pas réguler la température du milieu de culture mais de temporairement arrêter la pompe lorsqu'une consigne est atteinte (ici 35 °C (Todisco 2019)). Ainsi, la culture retombe par gravité dans le bac de collecte et est alors à l'abri du soleil : sa température n'augmente donc plus. Les microalgues n'étant plus exposées à la lumière, cela impacte cependant la productivité du photobioréacteur. Un essai mené en juin 2021 a permis de tester cette solution.

Lorsqu'une température supérieure à 35 °C était mesurée par la sonde pH, son transmetteur signalait au variateur de fréquence d'arrêter la pompe. L'ensemble de la culture tombe alors dans le bac de collecte et refroidi rapidement. Pendant ce temps, la surface du plan d'écoulement continue d'absorber la puissance lumineuse solaire (notamment au travers du dépôt de microalgues, voir Section 3.2.2.4) : cette partie du réacteur continue donc de s'échauffer. En quelques minutes, la température mesurée par la sonde pH tombait sous la consigne : la pompe est redémarrée. Le milieu de culture circule alors sur un plan chaud ce qui le réchauffe rapidement. En revenant dans le bac, la culture est à la même température que la surface du plan incliné (au dessus de la consigne) : la pompe est donc de nouveau arrêtée. Ce cycle se répète jusqu'à ce que le soleil baisse et que la dalle refroidisse naturellement (comme lors des essais précédents). Malgré la consigne de protéger la culture au delà de 35 °C, une température supérieure à 40 °C a été mesurée par la sonde pH. La culture a été perdue dès la première journée de test.

Cette expérience montre avant tout que la mesure qui pilote cette stratégie doit se situer sur le plan incliné et non dans le bac de collecte qui n'est pas soumis aux mêmes échanges de chaleur (négligeables lorsque la pompe fonctionne en continu). Ainsi, la pompe est arrêtée tant que la dalle n'a pas refroidi : cela évite que la culture soit exposée à de hautes températures lors de sa remise en circulation sur le plan incliné.

Ces résultats réaffirment également que le comportement thermique du plan d'écoulement pilote celui du milieu de culture (tant que la pompe est en marche). Cela montre qu'une ingénierie fine du support permettant d'optimiser son comportement thermique peut avoir un effet bénéfique notable sur la température de la culture. En se basant sur ce principe, une étude d'optimisation du support est présentée dans la Section 4.2.

À noter également que la température de la dalle suit le cycle du soleil. Employer la stratégie de contrôle proposée signifie donc potentiellement mettre la culture à l'obscurité

pendant de longues périodes. Puisque cela correspond aux heures les plus lumineuses de la journée, cela impacte significativement la productivité du photobioréacteur. La solution proposée ne doit donc être utilisée qu'en dernier recours. Enfin, si les microalgues sont amenées à rester longtemps dans le bac de collecte, une agitation de ce volume (par bullage par exemple), devient nécessaire afin d'éviter la sédimentation des microalgues.

3.3.4 Conclusion sur les essais thermiques

Le modèle thermique présenté dans la Section 2.5.2 a été développé pour étudier, par simulation, plusieurs solutions permettant d'optimiser le comportement thermique du système. Afin de conforter les conclusions des études qui se basent sur ce modèle, une validation expérimentale a été menée et présentée dans cette section.

Deux campagnes de mesures ont été faites, et pour chacune d'entre elles, l'erreur commise par le modèle a été déterminée en comparant ses prédictions aux mesures obtenues. Dans les deux cas, les écarts se sont avérés faibles malgré des conditions météorologiques et un vitrage différents : cela démontre la validité et la robustesse du modèle. Il est ainsi considéré comme utilisable à des fins d'ingénierie. Un exemple d'utilisation du modèle est présenté dans la Section 4.2.

Des améliorations peuvent cependant être apportées au modèle. Par exemple, une description formelle de la température et de l'humidité de la phase gaz serait une avancée majeure. Cela permettrait de mieux décrire les échanges indirects de chaleur entre le milieu de culture et la vitre qui sont (partiellement) à l'origine des erreurs de prédiction de la température de la couverture. Cela permettrait aussi de mieux prendre en compte l'effet du balayage d'air sur la température du système. Des stratégies plus fines de contrôle de la température du système pourraient ainsi être développées. Cela implique cependant de changer plusieurs équations centrales du modèle (échanges de chaleur entre la vitre et le milieu de culture). Une nouvelle validation expérimentale serait alors nécessaire.

Enfin, les mesures des thermocouples (5) et (6) devaient permettre de valider le gradient de température dans la dalle. Cependant, suite à des difficultés techniques, ils n'ont pas pu être placés suffisamment profond pour mettre en évidence ce gradient de température. La validation de ce gradient n'a donc pas pu être réalisée. De futures implémentations de ce type de réacteur devraient être instrumentées à cette fin. Cela permettrait notamment de mieux caractériser les flux de chaleur qui passent par le support et qui ont une grande influence sur la température du milieu de culture.

Conclusion

Au cours de la thèse, des campagnes expérimentales ont permis de valider les performances théoriques du pilote solaire Algofilm 10 m² et on été présentés dans ce chapitre.

Une étude préliminaire a d'abord permis d'étudier l'écoulement liquide sur le plan incliné. Ce paramètre est central dans le procédé puisqu'il influence l'épaisseur de culture, et définit donc la concentration en biomasse et la productivité volumique atteignables. Des mesures simples ont permis d'optimiser la répartition du milieu de culture, de déterminer les réglages du réacteur et d'estimer l'épaisseur de culture. Elle est ici de 3.5 mm.

Grâce à cette faible épaisseur, selon le modèle de croissance, une haute concentration en biomasse sèche ainsi qu'une productivité volumique élevée sont atteignables. Cette affirmation a été testée et confirmée par deux campagnes expérimentales. Ces objectifs ont pu être atteints grâce à la rationalisation des protocoles de culture apportée par les modèles présentés au Chapitre 2. Les outils mis en place ont notamment permis d'éviter les stress lumineux qui auraient pu porter atteinte à la viabilité de la culture. Néanmoins, le modèle de croissance utilisé ne prend pas formellement en compte ces stress lumineux. Ainsi, selon la méthode développée et testée ici, maximiser la productivité du réacteur revient, la plupart du temps, à prendre le risque de soumettre les microalgues à des conditions stressantes. Ajouter l'influence de ces stress au modèle permettrait alors de mieux maîtriser ce risque et d'optimiser d'avantage la production de microalgues.

Lors de ces campagnes expérimentales, de hautes concentrations en oxygène dissous ont été observées. La littérature affirme que cela a un effet néfaste sur l'activité photosynthétique des microalgues, et donc sur les performances du système. Afin d'optimiser les conditions de culture, la Section 4.4 étudie, par simulation, l'impact de la conception du réacteur sur cette accumulation d'oxygène.

Enfin, le modèle thermique développé dans la Section 2.5.2 a été expérimentalement validé. Pour les deux campagnes de mesure, le modèle est parvenu à reproduire, avec une précision jugée satisfaisante, la température du milieu de culture. Grâce à ce modèle, des pistes d'optimisation du comportement thermique du réacteur peuvent être proposées. Par exemple, dans le chapitre suivant, la Section 4.2 étudie l'effet de l'incorporation de matériaux à changement de phase dans la dalle de béton. Des améliorations peuvent cependant être apportées au modèle, notamment, une description formelle de la température de la phase gaz permettrait de développer des stratégies de contrôle avancées et à faible coût de la température du milieu de culture (par évaporation maîtrisée).

BIBLIOGRAPHIE

- Artu, A. (2016), « Etude et Optimisation de La Culture de Microalgues En Photobioréacteurs Solaires », URL : <http://www.theses.fr/2016NANT4019/document>.
- Bold, H. C. (mars 1949), « The Morphology of Chlamydomonas Chlamydogama, Sp. Nov. », in : *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 76.2, p. 101, ISSN : 00409618, DOI : 10.2307/2482218.
- Bonnanfant, M. (2020), « Étude Des Mécanismes de Conversion Photosynthétique de l'énergie Lumineuse Par Chlorella Vulgaris En Photobioréacteur Solaire », URL : <http://www.theses.fr/2020LEMA1015/document>.
- Borowitzka, M. A. et A. Vonshak (2 oct. 2017), « Scaling up Microalgal Cultures to Commercial Scale », in : *European Journal of Phycology* 52.4, p. 407-418, ISSN : 0967-0262, 1469-4433, DOI : 10.1080/09670262.2017.1365177.
- Brent, R. (1^{er} jan. 2002), « Algorithms For Minimization Without Derivatives », in : *Englewood Cliffs, Prentice Hall* 19, DOI : 10.2307/2005713.
- Doucha, J. et K. A. R. E. L. Lívanský (1995), « Novel Outdoor Thin-layer High Density Microalgal Culture System : Productivity and Operational Parameters », in : p. 19.
- Goetz, V. et al. (nov. 2011), « A Generic Temperature Model for Solar Photobioreactors », in : *Chemical Engineering Journal* 175, p. 443-449, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2011.09.052.
- Grivalský, T. et al. (sept. 2019), « Development of Thin-Layer Cascades for Microalgae Cultivation : Milestones (Review) », in : *Folia Microbiologica* 64.5, p. 603-614, ISSN : 0015-5632, 1874-9356, DOI : 10.1007/s12223-019-00739-7.
- Heath, M., K. Richardson et T. Kirrboe (1990), « Optical Assessment of Phytoplankton Nutrient Depletion », in : *Journal of Plankton Research* 12.2, p. 381-396, ISSN : 0142-7873, 1464-3774, DOI : 10.1093/plankt/12.2.381.
- Kazbar, A. et al. (mai 2019), « Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Microalgal Culture in Photobioreactors », in : *Algal Research* 39, p. 101432, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2019.101432.

BIBLIOGRAPHIE

- Le Borgne, F. (2011), « Développement d'un photobioréacteur solaire intensifié en vue de la production à grande échelle de biomasse microalgale », Université de Nantes, 1 vol. (291 f.)
- Le Gouic, B. (2013), « Analyse et Optimisation de l'apport de Carbone En Photobioréacteur », 1 vol. (229 p.)
- Livansky, K. et J. Doucha (1996), « CO₂ and O₂ Gas Exchange in Outdoor Thin-Layer High Density Microalgal Cultures », in : p. 6.
- Markides, C. N., R. Mathie et A. Charogiannis (fév. 2016), « An Experimental Study of Spatiotemporally Resolved Heat Transfer in Thin Liquid-Film Flows Falling over an Inclined Heated Foil », in : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93, p. 872-888, ISSN : 00179310, DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.062.
- Masojídek, J., G. Torzillo et M. Koblíek (12 avr. 2013), « Photosynthesis in Microalgae », in : *Handbook of Microalgal Culture*, sous la dir. d'A. Richmond et Q. Hu, Oxford, UK : John Wiley & Sons, Ltd, p. 21-36, ISBN : 978-1-118-56716-6 978-0-470-67389-8, DOI : 10.1002/9781118567166.ch2.
- Masojídek, J. et al. (fév. 2011), « Productivity Correlated to Photobiochemical Performance of Chlorella Mass Cultures Grown Outdoors in Thin-Layer Cascades », in : *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 38.2, p. 307-317, ISSN : 1367-5435, 1476-5535, DOI : 10.1007/s10295-010-0774-x.
- Ras, M., J.-P. Steyer et O. Bernard (juin 2013), « Temperature Effect on Microalgae : A Crucial Factor for Outdoor Production », in : *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 12.2, p. 153-164, ISSN : 1569-1705, 1572-9826, DOI : 10.1007/s11157-013-9310-6.
- Rearte, T. A. et al. (avr. 2021), « Photosynthetic Performance of Chlorella Vulgaris R117 Mass Culture Is Moderated by Diurnal Oxygen Gradients in an Outdoor Thin Layer Cascade », in : *Algal Research* 54, p. 102176, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2020.102176.
- Ritchie, R. J. (juill. 2006), « Consistent Sets of Spectrophotometric Chlorophyll Equations for Acetone, Methanol and Ethanol Solvents », in : *Photosynthesis Research* 89.1, p. 27-41, ISSN : 0166-8595, 1573-5079, DOI : 10.1007/s11120-006-9065-9.
- Souliès, A. (2014), « Contribution à l'étude hydrodynamique et à la modélisation des photobioréacteurs à haute productivité volumique », in : *r l*, p. 210.
- Todisco, É. (2019), « Microalgae Growth Optimization in Biofaçade Photobioreactors ».

CONCEPTION RAISONNÉE D'UN PHOTOBIORÉACTEUR PERFORMANT À FAIBLE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Introduction

La Section 3.2 a montré que la conception actuelle de l'Algofilm 10 m² permet d'obtenir une haute productivité volumique en conditions solaires. Plusieurs points restent cependant à optimiser pour assurer la viabilité et les performances du procédé.

La température du PBR n'a pu être maintenue dans un intervalle compatible avec la culture de microalgues qu'au prix d'un fonctionnement quasi continu du système de régulation thermique (voir Section 3.3). Dans le contexte actuel où les économies d'énergie deviennent une nécessité, cette consommation importante nuit à la viabilité du procédé. Des solutions permettant de réduire cette consommation doivent donc être développées et implémentées. Dans ce chapitre, deux solutions potentielles sont étudiées : le couplage avec un panneau photovoltaïque semi-transparent et l'introduction de matériaux à changement de phase dans le support du PBR.

La maximisation de la productivité du PBR passe également par l'optimisation des conditions de culture. Dans le cas du pilote 10 m², il a notamment été observé une importante concentration en oxygène dissous (voir Section 3.2.2.3). Selon la littérature, cet oxygène a un impact négatif sur la croissance microalgale et donc sur les performances du système. La conception d'un nouveau PBR doit donc idéalement prévoir l'évacuation de ce produit de la photosynthèse pour atténuer son influence.

En se basant sur les équations établies par le Chapitre 2 et le retour d'expérience du Chapitre 3, ce quatrième et dernier chapitre se consacre au développement rationnel d'un photobioréacteur type Algofilm. L'objectif est d'étudier le potentiel de différentes solutions technologiques qui répondent aux problèmes identifiés, et de définir des règles

de conception permettant d'obtenir un procédé solaire, sobre et performant.

4.1 Coproduction de microalgues et d'électricité par un système hybride couplant photobioréacteur et panneau photovoltaïque semi-transparent

Pour leur croissance, les microalgues n'utilisent qu'une partie du rayonnement solaire reçu : le PAR ([400 - 700] nm). Les UV et les IR (~57% de l'énergie solaire) ne contribuent pas à la productivité du système mais augmentent sa température. Retirer spécifiquement ces longueurs d'onde de la lumière reçue par le PBR permet donc de prévenir sa surchauffe sans affecter sa productivité. Le choix du vitrage utilisé apparaît alors comme un levier d'optimisation intéressant. Il permet, via ses propriétés optiques ou en y appliquant un filtre, de sélectionner les longueurs d'onde réfléchies, transmises ou absorbées. L'analyse de sensibilité menée dans la Section 2.5.2.7 montre que les paramètres affectant la transmittance de la couverture ont un impact significatif sur le comportement thermique du PBR.

Le Borgne (2011) a étudié la température du prototype Algofilm 0.33 m² équipé de verres fonctionnels, dont la transmittance UV et IR est réduite. Deux vitrages différents ont été testés, mais un seul (caractérisé par un filtrage IR par réflexion) a présenté des résultats prometteurs. L'approche est donc valide, mais cette étude a souligné l'importance du choix des caractéristiques optiques des vitres utilisés.

Une telle solution aboutit cependant à un système avec un faible rendement de conversion de la lumière solaire captée, puisque 57% de l'énergie reçue n'est, au final, pas utilisée. Pour résoudre ce problème, Parlevliet et Moheimani (2014) proposent de placer des panneaux photovoltaïques semi-transparentes (PV) sur la couverture du PBR. Ces dispositifs sont capables d'absorber et convertir certaines longueurs d'onde spécifique en électricité, et de transmettre les autres. Pour l'usage visé, l'idée est de convertir les UV et IR en électricité et de transmettre le PAR pour la photosynthèse. Ce système hybride a pour objectif de coproduire des microalgues et de l'électricité, d'améliorer l'utilisation du spectre solaire et de réduire la consommation énergétique du procédé de culture liée à la régulation thermique.

Cette section présente une étude numérique sur le potentiel d'un tel couplage. Un modèle capable de prédire la productivité et la consommation énergétique de ce système

a été développé à partir de modèles validés de la littérature. Trois modèles sont couplés : un modèle de croissance (Pruvost et al. 2016), un modèle thermique (Goetz et al. 2011) et un modèle de production électrique (Parlevliet et Moheimani 2014). Ils sont présentés en détail dans les Sections 2.4, 2.5.1 et 2.6 respectivement. Seul leur couplage est décrit ici.

4.1.1 Modélisation

L'absorption de lumière par le PBR ou le PV s'accompagne d'une production de chaleur car aucun des deux systèmes n'est capable de convertir 100% de l'énergie lumineuse reçue.

Pour le photobioréacteur, cette chaleur doit être évacuée si cela induit une augmentation trop importante de la température (i.e. si elle dépasse le maximum accepté par la souche cultivée). Cela se fait grâce à un système de régulation actif qui consomme de l'énergie. De là découle le calcul de la consommation énergétique liée au contrôle de la température du PBR.

Lorsque la température du milieu de culture dépasse la consigne, la puissance (chaude ou froide) à fournir pour compenser le gain ou la perte de chaleur est calculée avec l'Équation 4.1 :

$$\Phi_{reg} = -\Phi_{abs_{cm}} - \Phi_{conv_{cm-v}} - \Phi_{conv_{cm-amb}} \quad (4.1)$$

Lorsque la régulation thermique est active, ce terme est ajouté au bilan de chaleur du milieu de culture (Équation 2.75). Ici, le système de régulation est supposé parfait et capable de produire instantanément la puissance nécessaire. La consommation énergétique du photobioréacteur est ensuite obtenue en intégrant cette puissance sur le temps.

Pour le panneau photovoltaïque, la chaleur produite n'est pas directement prise en compte par le modèle, les données disponibles au moment de l'étude ne permettant pas de modéliser la température de ce sous-système. La productivité du PV ne peut donc pas être corrigée en fonction de sa température (Équation 2.119). Le modèle utilisé ici néglige donc cette influence. Cette hypothèse est discutée par la suite (voir Section 4.1.3.2).

La chaleur produite par le panneau photovoltaïque est néanmoins calculable grâce au bilan entre la puissance lumineuse absorbée et la puissance électrique produite :

$$\Phi_{pv} = \int_0^{\infty} AF_{\lambda} \cdot q_{\lambda} d\lambda - P \quad (4.2)$$

Dans cette étude, deux cas sont considérés en fonction de ce que devient cette chaleur (voir Figure 4.1) :

- soit il y a un espace de ventilation entre le PV et le PBR, dans ce cas la chaleur produite par le panneau photovoltaïque est perdue (cédée à l'environnement extérieur). Le PV et le PBR sont "découplés".
- soit le panneau photovoltaïque est directement posé sur la couverture du PBR, la chaleur produite par le PV est alors majoritairement transférée à la vitre du photobioréacteur. Le terme Φ_{pv} (Équation 4.2) est ajouté au bilan de chaleur de la vitre du PBR (Équation 2.74). Les deux systèmes sont alors "couplés".

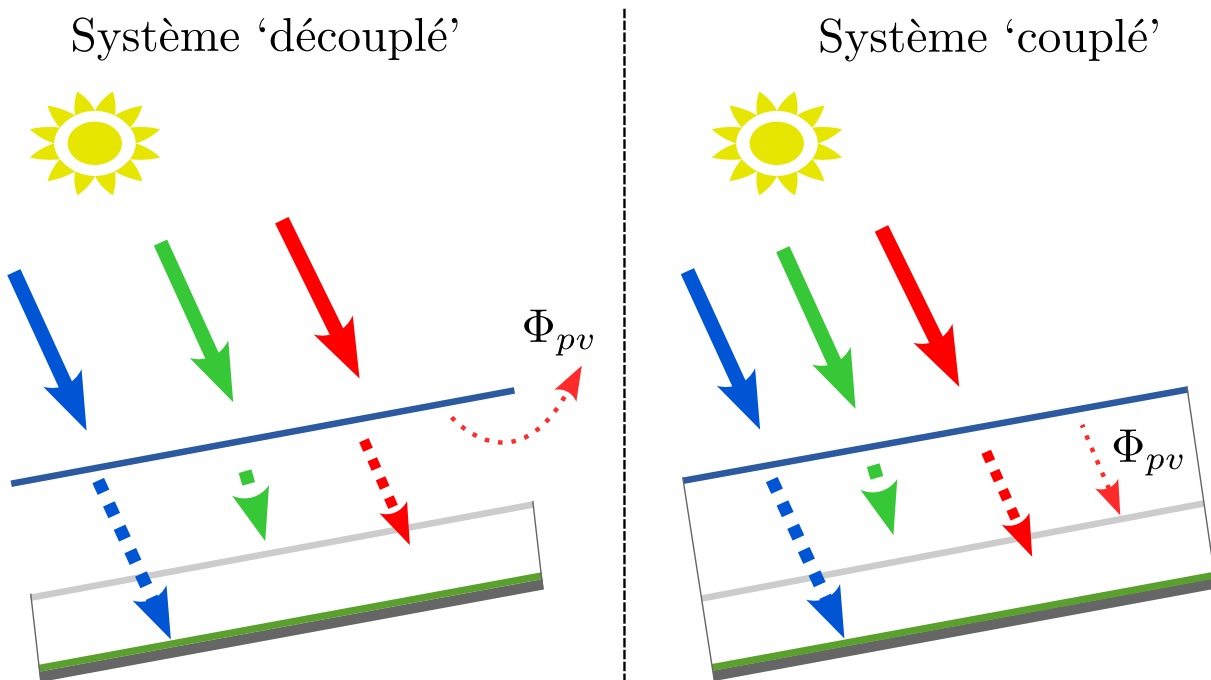


FIGURE 4.1 – Schéma des deux configurations étudiées "couplé" et "découplé".

Dans cette étude, le PBR et le PV sont tous deux en concurrence pour l'accès à la lumière, notamment pour les longueurs d'onde du PAR (ces deux systèmes étant capables de convertir cette gamme de longueurs d'onde). Cette compétition constitue le principal point de couplage entre les modèles utilisés. Les entrées et sorties des différents modèles ainsi que leur couplage sont résumés par la Figure 4.2.

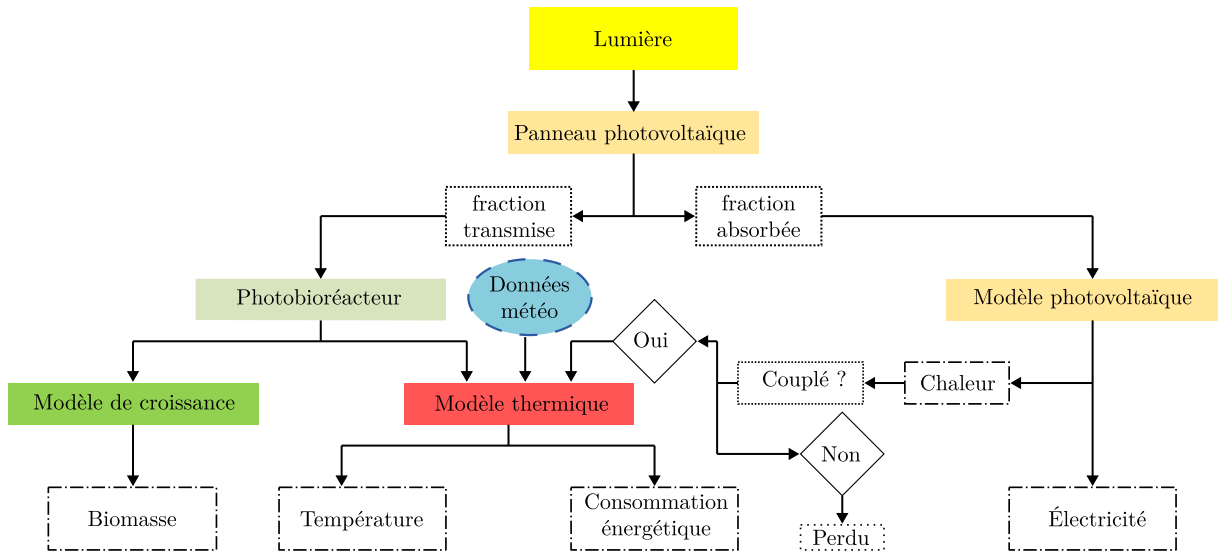


FIGURE 4.2 – Schéma logique du couplage des modèles.

4.1.2 Données de simulation

4.1.2.1 Données d'entrée des modèles

Les trois modèles couplés dépendent des variables météorologiques. L'objectif est d'étudier les entrées et sorties d'un système hybride s'il était implanté dans l'ouest de la France. Le set de données utilisé doit donc refléter la variabilité météorologique saisonnière observable dans cette région. Ce set est obtenu par la moyenne de dix années de mesures faites dans la ville de Nantes (France 47.13 N, 1.33 W) et issues de la base de données Meteonorm. Ces données horaires de lumière (collimatée et diffuse), de température ambiante et de vitesse du vent permettent de résoudre les équations des modèles en mode transitoire.

Le système étudié est destiné à être implanté en extérieur, un spectre lumineux représentatif de la lumière solaire est donc nécessaire. Le standard ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012) est utilisé (voir Figure 2.18). L'Équation 2.118 permet de passer de la valeur scalaire de la puissance lumineuse fournie par le set de données à un spectre lumineux.

La souche modélisée est *Chlorella vulgaris*. C'est une souche de référence dont les propriétés radiatives et cinétiques nécessaires au modèle de croissance sont connues et décrites dans la Section 2.4.3. Sa pigmentation est ici supposée constante et égale à 4% de la biomasse totale. Le temps de résidence appliqué à la culture est constant et égal

à $\tau_p = 25\text{h}$ (culture en mode continu). Cette valeur donne une haute productivité pour les conditions météorologiques de la région étudiée (Todisco 2019). Elle peut cependant largement être optimisée, par exemple, en variant le taux de dilution en fonction de la lumière captée et de l’heure de la journée. Une telle optimisation est complexe à mettre en œuvre et sort du cadre de l’étude. Elle n’a donc pas été mise en place.

Le photobioréacteur simulé est le prototype Algofilm 0.33 m^2 , ses propriétés physiques sont données dans par la Table 2.4. L’épaisseur de culture est de 2 mm. Lorsque la régulation thermique du PBR est active, elle a pour consigne de maintenir la température entre 15 °C et 35 °C . Selon Todisco (2019), la température influe de façon négligeable sur la croissance de *Chlorella vulgaris* tant qu’elle reste dans cet intervalle. Ainsi, l’influence de la température sur la productivité du PBR peut être négligée.

Enfin, les propriétés du panneau photovoltaïque (EQE , I_0 et FF) sont données dans la Section 2.6.4.

4.1.2.2 Scénarios étudiés

L’une des caractéristiques clefs d’un panneau photovoltaïque semi-transparent est son absorbance spectrale (AF_λ). Au moment de l’étude, cette donnée n’était pas disponible pour des PV réels. Pour évaluer l’impact de la fonction AF_λ sur la consommation énergétique et la productivité d’un système hybride, différents scénarios ont été testés :

- En premier, un scénario de référence (noté scénario #0) où le panneau photovoltaïque est absent (i.e. où toute la lumière est captée par le PBR) a été simulé.
- Un cas idéal, noté scénario #1, a ensuite été testé. Ici, seules les longueurs d’onde nécessaires à la croissance microalgale sont transmises au PBR. Les UV et les IR sont captés par le PV et convertis en électricité.
- Les microalgues absorbent principalement le bleu et le rouge, la lumière verte est en grande partie diffusée (voir Figure 2.13). Afin de davantage réduire l’énergie reçue par le PBR pour prévenir sa surchauffe, il est possible de filtrer cette gamme de longueurs d’ondes qui représente environ 15% de l’énergie solaire reçue. Par ailleurs, le PV étudié convertit efficacement les photons de cet intervalle de longueurs d’ondes (voir Figure 2.19), cela permet donc d’augmenter la production d’électricité en affectant marginalement la production de biomasse. Le troisième scénario étudié (noté scénario #2) alloue donc les UV, les IR et la lumière verte ([500 - 600] nm) au PV. Le reste (la lumière bleue et rouge) est transmis au PBR.
- Dans les scénarios précédents, une longueur d’onde est soit totalement captée

soit totalement transmise. En réalité, un panneau photovoltaïque semi-transparent n'absorbe et ne transmet qu'une fraction de la lumière incidente (Nwoba et al. 2019). Deux scénarios plus réalistes que les précédents ont donc été étudiés (scénarios #3 et #4). Ici, le PBR reçoit 10% des UV / IR et 75% (scénario #3) ou 50% (scénario #4) du PAR. Le panneau photovoltaïque capte la fraction complémentaire.

La Table 4.1 résume les différents scénarios.

Scénario \ Longueur d'onde	UV < 400 nm	Bleu [400-500[nm	Vert [500-600[nm	Rouge [600-700] nm	IR > 700 nm
#0	100%	100%	100%	100%	100%
#1	0%	100%	100%	100%	0%
#2	0%	100%	0%	100%	0%
#3	10%	75%	75%	75%	10%
#4	10%	50%	50%	50%	10%

TABLE 4.1 – Résumé de la fraction lumineuse absorbée par le photobioréacteur en fonction de la gamme de longueurs d'onde et du scénario. La fraction complémentaire est captée par le panneau photovoltaïque semi-transparent.

4.1.3 Résultats

4.1.3.1 Comportement thermique du système hybride

Le couplage d'un PBR et d'un PV ne peut amener à des économies d'énergie que si cela influence favorablement le comportement thermique du photobioréacteur. Cette influence est étudiée grâce à une première simulation où le panneau photovoltaïque est absent (scénario #0) et la régulation thermique désactivée. La température du milieu de culture peut donc évoluer librement (voir Figure 4.3).

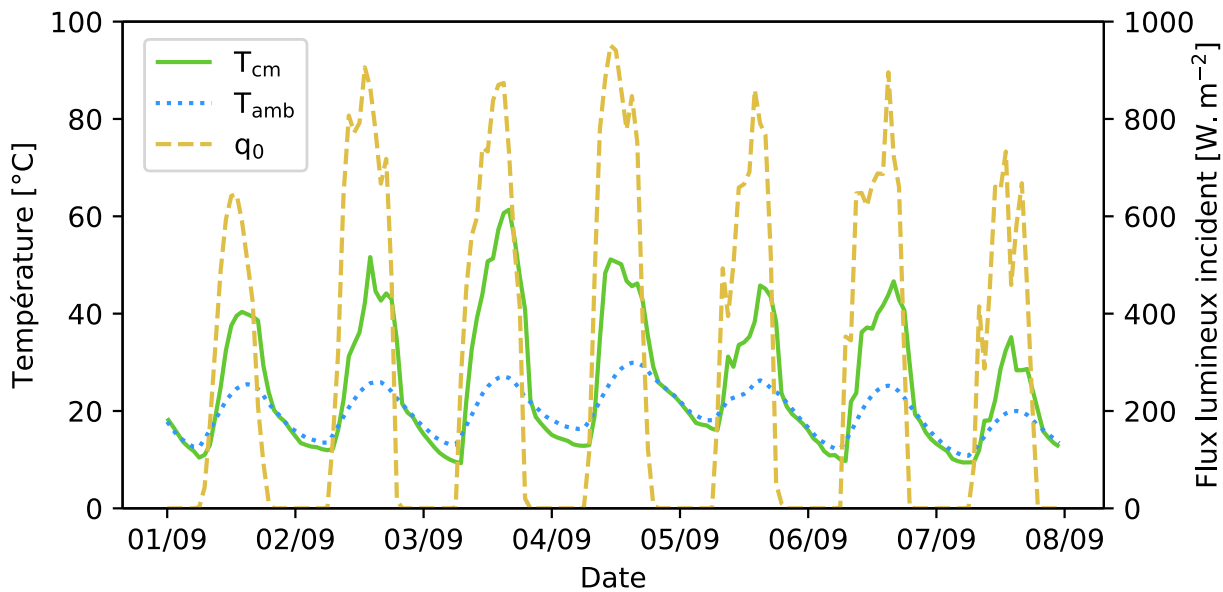


FIGURE 4.3 – Exemple d'évolution de la température du PBR prédite par le modèle thermique pour une semaine estivale (1ère semaine de septembre). La régulation thermique est désactivée et le panneau photovoltaïque absent.

Au cours de l'année simulée, le modèle thermique prédit une large gamme de températures pour le milieu de culture. Celle-ci varie entre -8 °C durant certaines nuits d'hiver et $+63\text{ °C}$ au zénith de journée d'été ensoleillées. Ces deux extrêmes sont incompatibles avec la culture de *Chlorella vulgaris*. Dans des conditions réelles, la culture doit, a minima, être maintenue hors-gel et en dessous de 40 °C .

La Figure 4.3 montre que la température du milieu de culture suit le profil lumineux de la journée. Cela souligne, une fois de plus, l'influence de la lumière sur la température du système. Le maximum de la journée est atteint peu après le zénith. Dès le coucher du soleil, la température du milieu de culture baisse rapidement et suit celle de l'air ambiant au cours de la nuit. Cela met en évidence la faible inertie thermique de ce type de PBR.

Pour évaluer l'influence de la présence d'un filtre de lumière sur la température du photobioréacteur, une seconde simulation a été menée avec le panneaux photovoltaïque du scénario #1. De nouveau, la régulation thermique est désactivée.

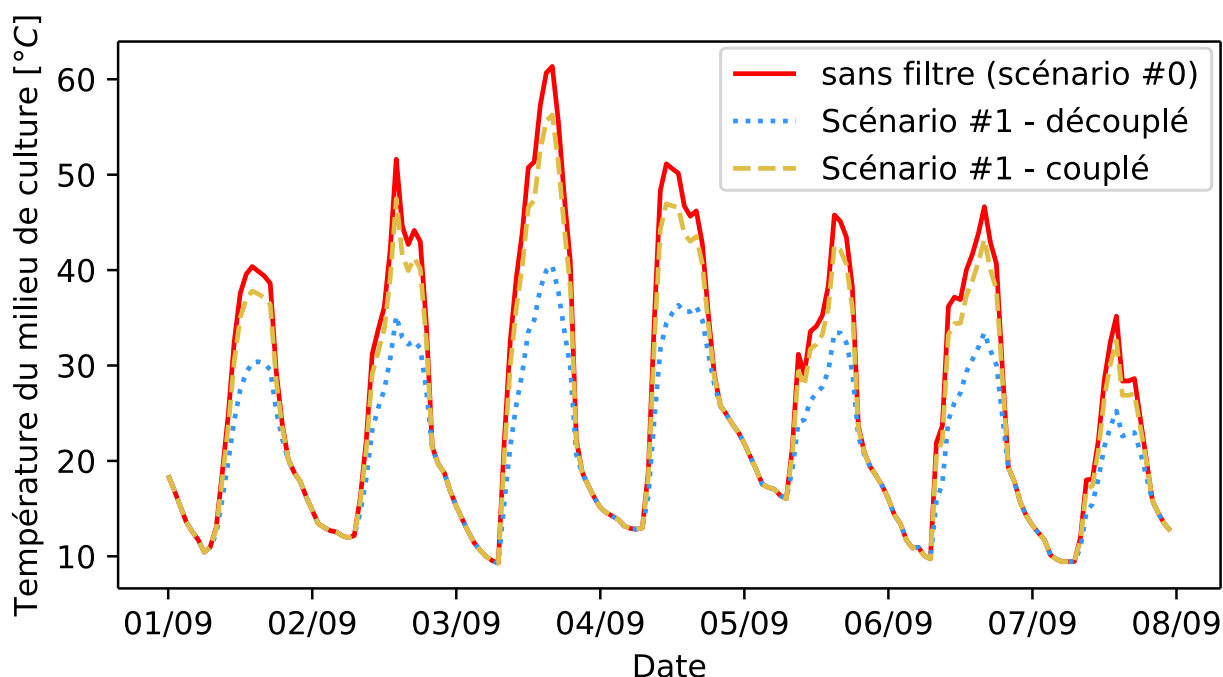


FIGURE 4.4 – Exemple d'évolution de la température du PBR prédite par le modèle thermique dans les mêmes conditions que la Figure 4.3. Trois conditions sont testées : sans filtre (scénario #0) et avec le PV du scénario #1 couplé ou découplé.

La Figure 4.4 montre qu'appliquer un filtre lumineux réduit significativement la température du photobioréacteur. Dans le cas où le PV et le PBR sont couplés, la température du milieu de culture est jusqu'à 5 °C plus basse. Ces quelques degrés d'écart peuvent faire la différence entre une culture qui dépasse ou non le maximum toléré par les microalgues. Lorsque les deux systèmes sont découplés, la différence de température est plus importante (jusqu'à -20 °C). Toutefois, dans les deux configurations, des températures supérieures à 40 °C sont atteintes. Bien qu'efficace, le filtre lumineux doit donc être utilisé en conjonction avec d'autres techniques (passives si possible) pour assurer des conditions de culture adéquates pour *Chlorella vulgaris*.

Comme attendu, filtrer la lumière n'a pas d'impact sur les températures nocturnes : avec ou sans filtre, la température du milieu de culture tend vers celle de l'air ambiant. Cependant, lorsqu'un PV est présent, la température minimale acceptée (15 °C) est atteinte plus tard le matin et plus tôt le soir. Ici, la chaleur apportée par le rayonnement solaire fait défaut et la régulation thermique doit être active plus longtemps pour maintenir la température de la culture. Cela induit une augmentation de la consommation énergétique : c'est un potentiel défaut du couplage PBR - PV.

De façon logique,, la baisse de température diffère selon le filtre appliqué. La Table 4.2 donne pour les scénarios #1 à #4 l'écart moyen de température par rapport au scénario #0. Deux moyennes sont présentées : une moyenne annuelle et une moyenne en ne prenant en compte que les températures survenant entre 10h et 16h (les heures les plus chaudes et lumineuses de la journée, là où les filtres sont les plus efficaces). Les conditions "systèmes couplés" et "systèmes découplés" sont toutes deux analysées.

		Scénario #1	Scénario #2	Scénario #3	Scénario #4
Découplé	Annuel	-2.6 °C	-3.3 °C	-2.9 °C	-3.4 °C
	10h - 16h	-6.6 °C	-8.3 °C	-7.2 °C	-8.4 °C
Couplé	Annuel	-0.7 °C	-0.9 °C	-0.7 °C	-0.9 °C
	10h -16h	-1.7 °C	-2.2 °C	-1.9 °C	-2.2 °C

TABLE 4.2 – Réduction moyenne de la température par rapport au scénario de référence (sans filtre) en fonction du scénario étudié.

De nouveau, la réduction de température la plus importante est obtenue dans les cas où le PV et le PBR sont découplés, la température y est alors en moyenne 6.6 à 8.9 °C plus basse pendant les heures chaudes de la journée. Lorsque les deux système sont couplés, la baisse de température est moindre (entre 1.7 °C et 2.2 °C en moyenne).

4.1.3.2 Évaluation de l'hypothèse d'indépendance des performances du panneau photovoltaïque à la température

La productivité d'un panneau photovoltaïque décroît lorsque sa température augmente (Skoplaki et Palyvos 2009). Cependant, le modèle de cette étude manque d'une description du comportement thermique du PV, son rendement de conversion n'est donc pas corrigé en fonction de sa température. Il a alors été supposé que la productivité électrique est indépendante de cette variable. Pour tester cette hypothèse, une analyse a été conduite sur la température de la vitre du photobioréacteur.

Le PV et la vitre du PBR échangent similairement leur chaleur avec l'environnement extérieur (i.e. ils absorbent de la lumière, rayonnent vers le ciel et échangent par convection avec l'air ambiant). Leur température doit donc tendre vers la même valeur. En utilisant l'Équation 2.119 et la température de la vitre, l'erreur due à l'hypothèse qui néglige l'impact de la température du PV sur ses performances peut être estimée. Ici, le coefficient de corrélation entre la température et l'efficacité du panneau photovoltaïque (β) est fixé

à 0.0045 °C^{-1} . C'est une valeur communément donnée par les constructeurs (Skoplaki et Palyvos 2009). Puisque le panneau photovoltaïque ne produit de l'énergie que pendant la journée, les températures nocturnes ne sont pas considérées dans cette analyse.

La moyenne des températures de la vitre est de 20.9 °C , les centiles 5%, et 95% valent 4.1 °C et 39.8 °C respectivement. La température standard de test étant de 25 °C , 90% du temps la précision de prédiction du modèle varie entre une sous-estimation de 9.4% et une surestimation de 6.7%. En moyenne, la productivité du PV est sous-estimée de 1.8%.

L'hypothèse de l'indépendance des performances du PV et de sa température est ici jugée acceptable car elle n'affecte pas les conclusions de l'étude. Cependant, une description du comportement thermique du PV et de ses échanges avec le PBR serait une amélioration pertinente du modèle. Cela permettrait, si un tel couplage est envisagé, de finement dimensionner le système.

4.1.3.3 Impact du couplage sur la consommation énergétique de la régulation thermique

Le modèle utilisé dans cette étude permet de simuler l'effet d'un système de régulation thermique sur la température du PBR. La Figure 4.5 donne un exemple d'évolution de la température de la culture lorsque la régulation a pour consigne de la maintenir entre 15 °C et 35 °C .

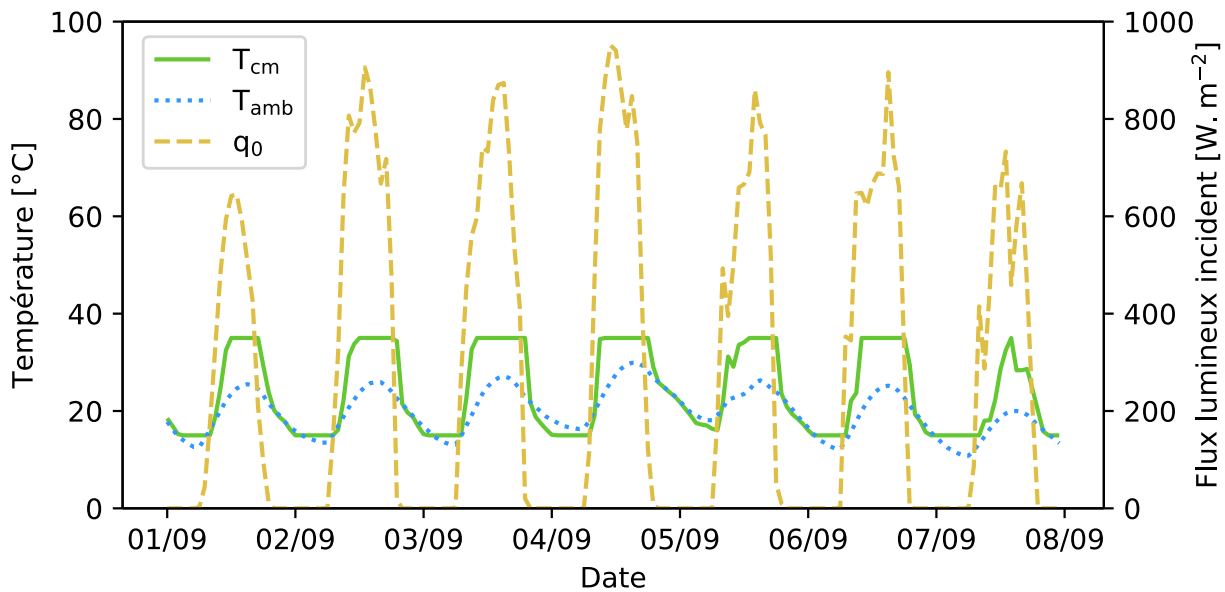


FIGURE 4.5 – Evolution de la température du milieu de culture pendant la première semaine de septembre. La régulation thermique maintient cette variable entre 15 °C et 35 °C.

La Figure 4.5 montre que la température du milieu de culture est écrêtée par la régulation thermique lorsqu'elle dépasse l'intervalle de consigne ($[15 - 35]$ °C). L'énergie apportée ou retirée au système est alors calculée. La Figure 4.6 donne, pour chaque scénarios, la quantité annuelle d'énergie à retirer au PBR pour maintenir sa température en dessous de 35 °C.

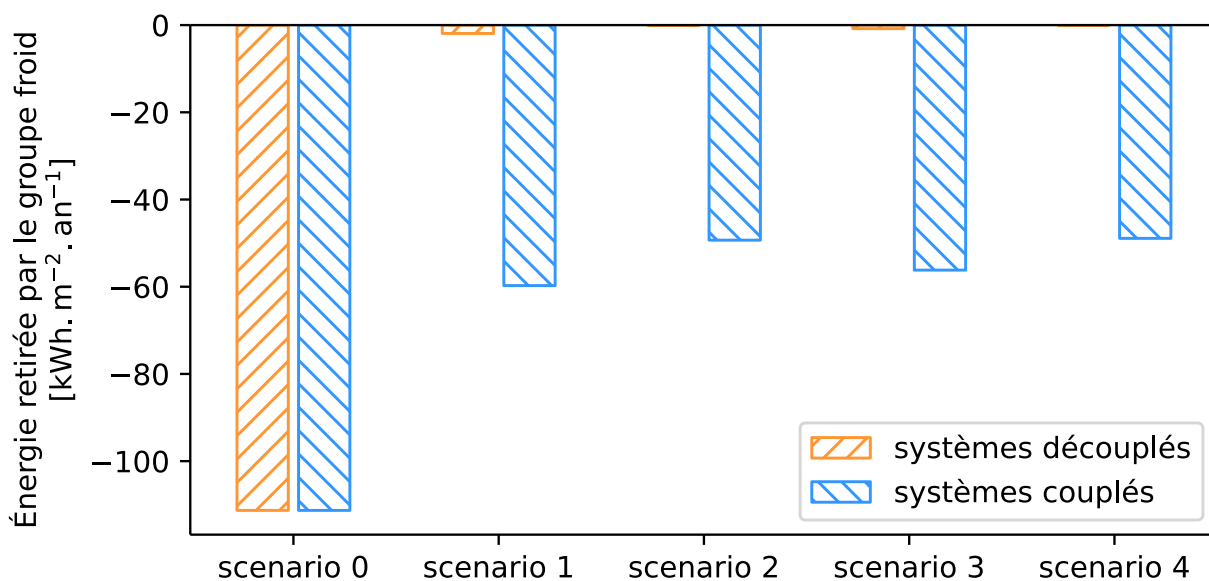


FIGURE 4.6 – Énergie annuellement retirée au PBR par le groupe froid pour maintenir la température de la culture en dessous de 35 °C.

La Figure 4.6 montre que la présence d'un filtre de lumière réduit le besoin de refroidissement du photobioréacteur. Lorsque le PBR et le PV sont couplés, ce besoin est divisé par deux pour tous les scénarios. Lorsqu'ils sont découplés, la température du milieu de culture ne dépasse que très rarement la consigne. La consommation énergétique est alors presque nulle.

La consommation énergétique liée au maintien de la température au dessus de 15 °C a également été calculée (voir Figure 4.7).

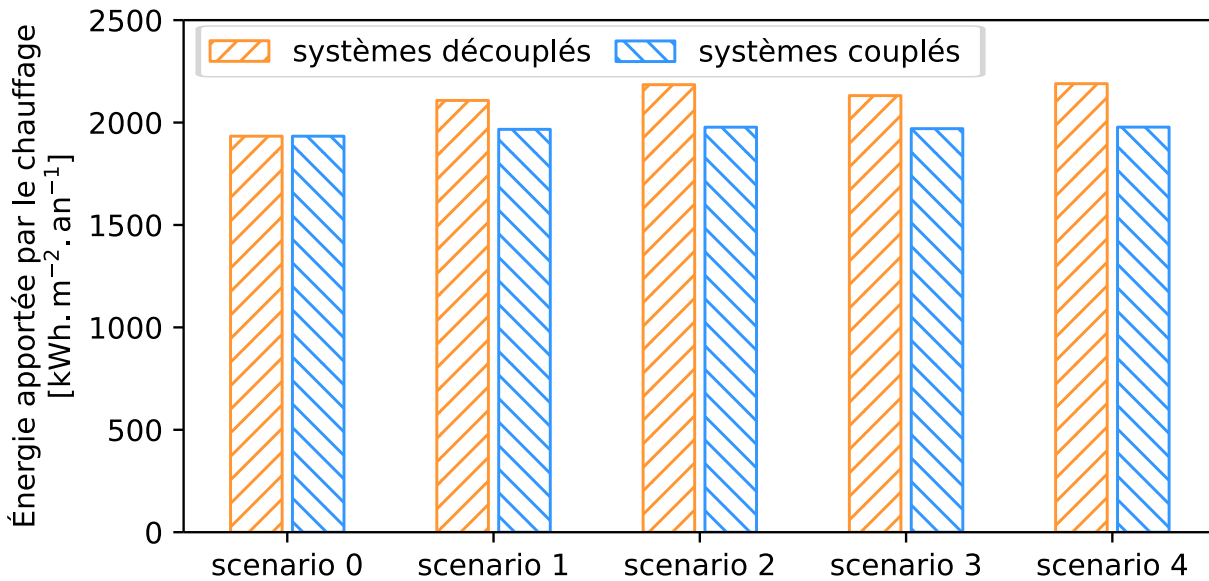


FIGURE 4.7 – Énergie apportée par le chauffage pour maintenir la température du milieu de culture au dessus de 15 °C.

La Figure 4.7 montre que la majorité de l'énergie consommée par le photobioréacteur au cours de l'année est liée au maintien de sa température au dessus de 15 °C. Pour le PBR étudié, quel que soit le scénario et le mode de couplage, il faut apporter environs 20 fois plus de chaleur qu'il ne faut en retirer.

Lorsque le PBR et le PV sont découplés, dans tous les scénarios, l'énergie supplémentaire consommée par le chauffage dépasse l'énergie économisée par le groupe froid. Il en résulte une augmentation nette de la demande globale en énergie. Lorsque les deux systèmes sont couplés, la chaleur issue du PV récupérée par la vitre du photobioréacteur permet d'amoinrir cet effet. La consommation totale d'énergie est alors inférieure à celle du scénario de référence. Cela ne représente cependant que quelques kilowattheures sur l'ensemble de l'année : le gain est négligeable.

Ces résultats peuvent s'expliquer grâce à l'analyse de la Section 4.1.3.1 qui montre que durant la nuit, la température du PBR suit celle de l'air ambiant. Or dans la région étudiée, les températures nocturnes peuvent être proches ou inférieures à 0 °C, alors que la régulation thermique a pour consigne de maintenir le milieu de culture à 15 °C. La différence de températures et la surface spécifique d'échange du PBR étant grandes, les flux de chaleur du photobioréacteur vers l'extérieur sont importants. Une grande quantité de chaleur doit donc être apportée par le système de régulation pour compenser ces flux. De plus, les nuits d'hiver étant longues, la température doit être activement maintenue

sur une longue période de temps. Il en résulte une consommation énergétique élevée sur laquelle un filtrage spectral du flux solaire a peu d'effet.

Pour améliorer ses performances thermiques, le pilote étudié doit principalement être isolé de l'environnement extérieur. Cela permettrait de réduire les pertes de chaleur la nuit et donc la consommation énergétique du chauffage. Cependant, ces pertes sont bénéfiques le jour : elles contribuent à évacuer le surplus de chaleur absorbée. Isoler le réacteur augmentera donc sa température le jour et donc la quantité de chaleur à retirer. Du fait de cet échauffement le couplage PBR - PV pourrait alors devenir intéressant pour ce système amélioré.

Une autre solution consiste à augmenter l'inertie thermique du réacteur pour le rendre moins sensible aux variations journalières des conditions météorologiques. La masse thermique du milieu de culture ne peut cependant pas être augmentée sans épaissir la culture, ce qui est contraire au principe d'intensification de la productivité volumique recherché. En revanche, le support du PBR peut être conçu pour qu'il puisse stocker la chaleur du milieu de culture (captée grâce aux échanges efficaces dus à l'écoulement liquide). Cette chaleur peut ensuite être restituée à la culture au cours de la nuit, lorsque sa température tend à baisser. Par exemple, la dalle de béton du pilote 10 m² est une première implémentation de ce principe. Une piste d'optimisation de ce design est étudié dans la Section 4.2.

Enfin, si la conception du réacteur n'est plus modifiable (PBR déjà construit), il est possible de changer la consigne de la régulation thermique. Les échanges de chaleur entre l'air ambiant et le PBR sont notamment déterminés par la différence de température. Réduire la valeur basse de la consigne permet donc de réduire les flux de chaleur du PBR vers l'air extérieur, et donc la consommation énergétique du chauffage. À titre d'exemple, la Figure 4.8 donne cette consommation lorsque la température du milieu de culture est régulée entre 10 °C et 35 °C au lieu de 15 °C - 35 °C.

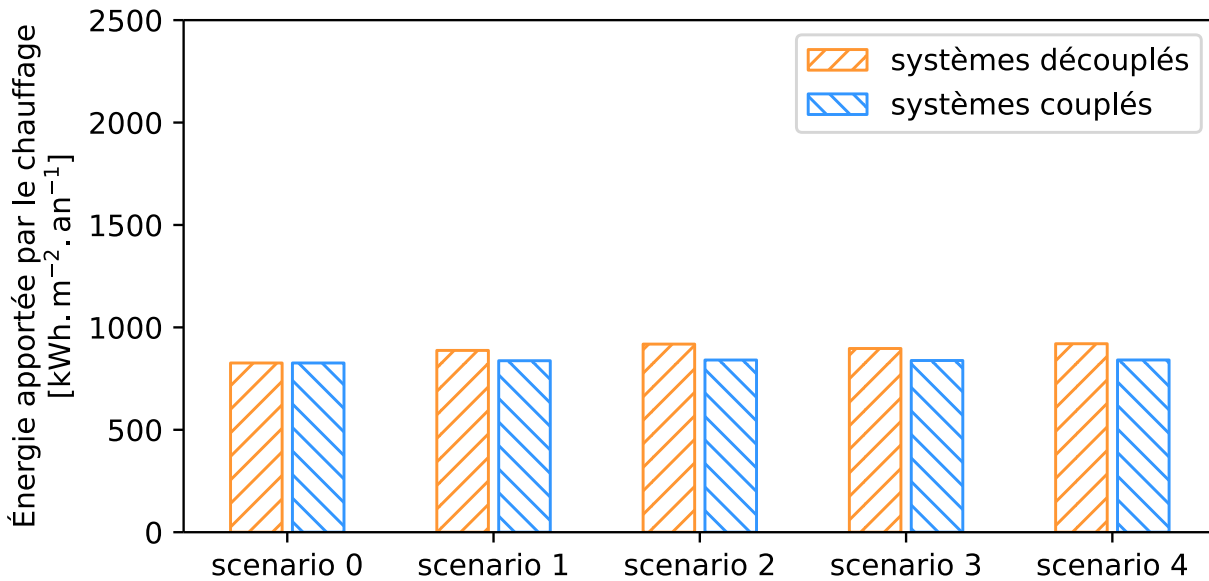


FIGURE 4.8 – Énergie annuellement apportée par le chauffage pour maintenir la température du milieu de culture au dessus de 10 °C.

La Figure 4.8 montre qu'en réduisant la température minimale acceptée de 15 °C à 10 °C, la consommation énergétique du chauffage est divisée par deux pour tous les scénarios. Elle reste cependant supérieure à la demande en refroidissement.

À noter que le modèle utilisé ici ne permet pas de prédire l'effet de cette mesure sur la productivité du système. L'intégration de cette influence serait une amélioration notable du modèle en vue de trouver un compromis entre productivité et consommation énergétique.

4.1.3.4 Analyse de la production annuelle de biomasse et d'électricité

Le modèle utilisé dans cet étude est également capable de calculer la productivité en microalgues et en électricité en fonction du scénario choisi. Dans certains cas, le PBR et le PV sont en concurrence pour les longueurs d'onde du PAR, cela permet alors de déterminer quel scénario est optimal. Les simulations menées ici illustrent alors comment il serait possible d'arbitrer le choix des caractéristiques du PV en fonction de la productivité électrique et microalgale (voir Figure 4.9).

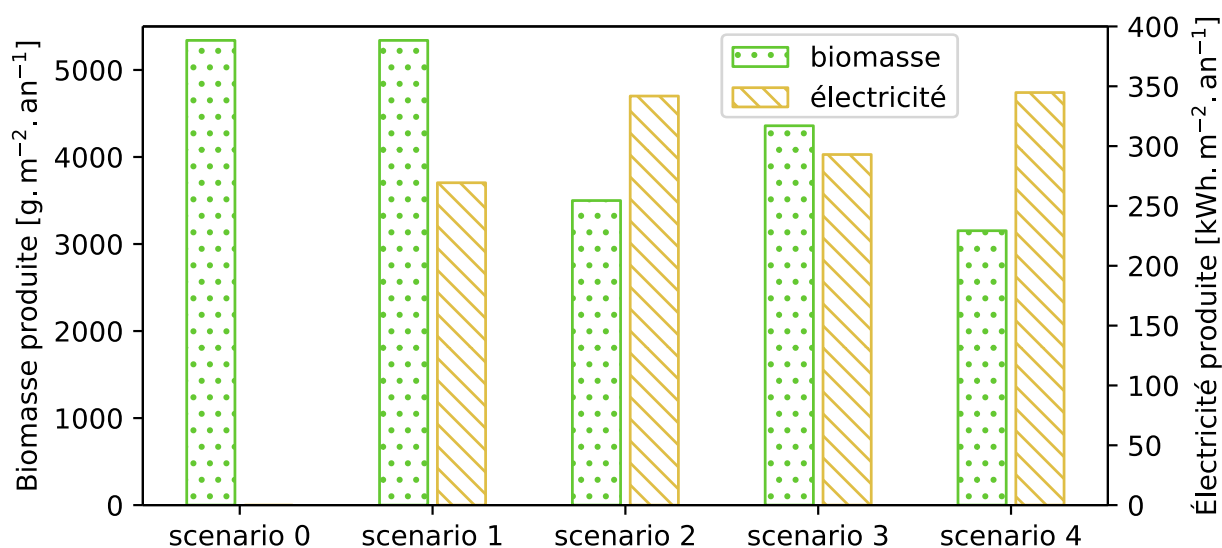


FIGURE 4.9 – Production annuelle de biomasse et d'électricité en fonction du scénario.

Comme attendu, retirer les UV et IR n'a pas d'influence sur la production de microalgues. Le scénario #1 peut donc être considéré comme idéal pour produire de l'électricité sans affecter la productivité du PBR.

Retirer la lumière verte ([500 - 600] nm) réduit la production de microalgues d'environ 30%. Comme démontré par Souliès et al. (2016), cela s'explique par le fait que la lumière bleue et rouge est rapidement absorbée par les microalgues, surtout si la concentration est élevée comme c'est le cas dans le PBR étudié. Ces longueurs d'onde ne contribuent donc pas à la croissance des microalgues situées en profondeur. Au contraire, la lumière verte pénètre plus profondément dans le milieu de culture et atténue l'effet de la fraction sombre. Il en résulte une augmentation de la croissance. Retirer la lumière verte a néanmoins permis d'augmenter substantiellement la productivité en électricité (+26.9%) et de réduire la température du PBR (voir Figure 4.6). La viabilité de cette option dépend donc d'un compromis entre production de biomasse, d'électricité et de consommation énergétique liée au refroidissement du système.

Enfin, bien que significative, la production électrique ne couvre pas les besoins énergétiques de la régulation thermique : elle ne représente environ que 14.5% de ces besoins. De plus, comme évoqué dans la Section 4.1.3.3, la majorité de l'énergie est consommée la nuit : lorsque le panneau photovoltaïque n'est pas productif. Il y a donc un déphasage entre le moment où l'énergie est produite et le moment où elle est nécessaire. Néanmoins, en journée, cette production compense largement la consommation énergétique du groupe froid. L'excédent d'électricité peut donc, par exemple, alimenter en partie les systèmes

annexes du photobioréacteur tels que la pompe de recirculation.

4.1.3.5 Analyse du choix de la période de production

Dans la région étudiée (ouest de la France), une forte variabilité météorologique est observable en fonction des saisons. Cela impacte les performances du réacteur mais aussi ses besoins énergétiques. Par exemple, en hiver, la faible lumière disponible induit une faible productivité microalgale et électrique alors, que le chauffage demande une quantité importante d'énergie. Le modèle de cette étude peut être utilisé comme outil de décision pour déterminer les périodes pendant lesquelles il est rentable d'utiliser le réacteur. La Figure 4.10 donne le pourcentage cumulé de biomasse et d'électricité produite et d'énergie consommée en fonction de la semaine de l'année. La régulation thermique régule la température du milieu de culture entre 15 °C et 35 °C. Seul le scénario #1 est étudié ici, tous les cas présentant des évolutions similaires.

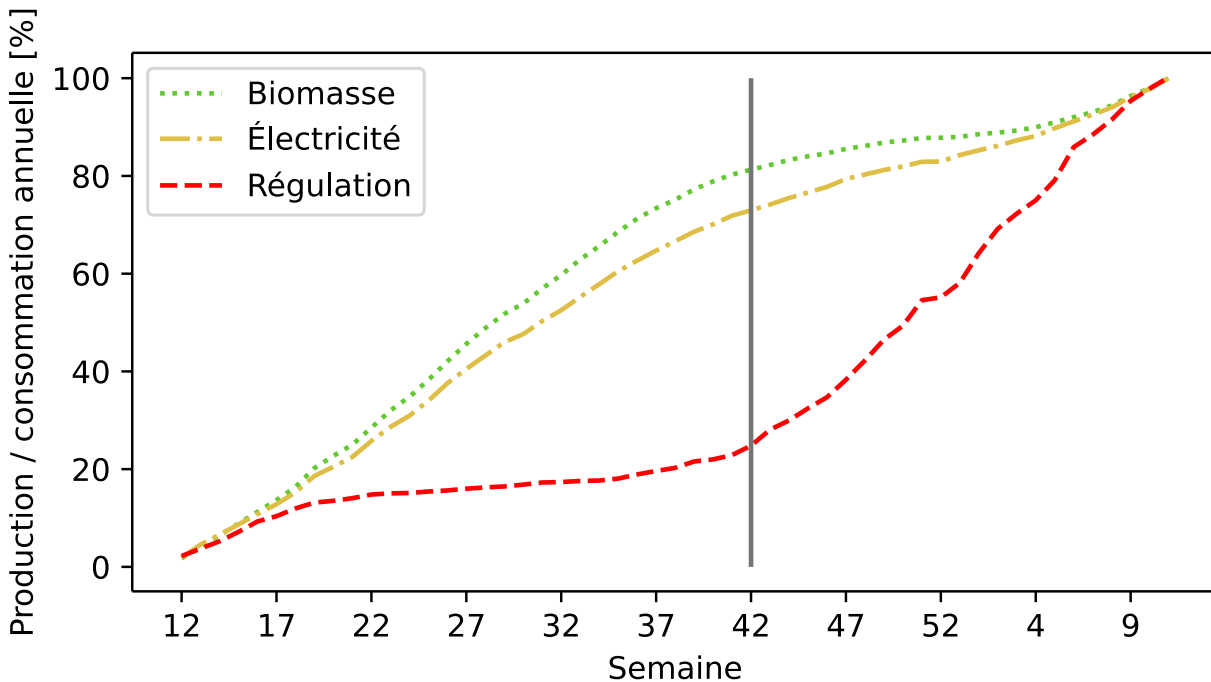


FIGURE 4.10 – Analyse de la production et consommation en fonction de la période de l'année. Pour améliorer la lisibilité du graphique, l'axe des abscisses commence à la semaine 12 (i.e. à la fin de l'hiver, la période la moins productive).

La Figure 4.10 met en évidence un déphasage entre la période où le système est productif (biomasse et électricité) et la période où il consomme le plus d'énergie (régulation

thermique). Deux périodes sont distinguées. Les semaines 12 à 42 (printemps - automne) cumulent environ 80% de la production annuelle de biomasse et d'électricité pour 20% de la consommation annuelle d'énergie. Afin de produire les 20% restants, les semaines 42 à 12 (hiver) nécessitent 80% de l'énergie annuellement consommée. Afin d'optimiser le rendement du réacteur, il est donc préférable de ne pas cultiver de microalgues en hiver.

Ici, les limites des deux périodes de production et consommation (12^{ème} et 42^{ème} semaine) ont arbitrairement été choisies. Ainsi, dans une optique de production sur un système réel, ces délimitations devraient être définies en fonction du prix de la production et du coût de l'énergie, via une analyse technico-économique. Le modèle de cette étude apparaît alors comme un outil permettant d'optimiser l'opération du système en choisissant les périodes de production.

4.1.4 Conclusion sur le couplage d'un panneau photovoltaïque semi-transparent et du prototype Algofilm 0.33 m²

Dans cette étude, trois modèles validés de la littérature ont été couplés pour évaluer le potentiel d'un système hybride alliant un photobioréacteur intensifié de type Algofilm et un panneau photovoltaïque semi-transparent. L'exploration du couplage montre que filtrer la lumière a un effet positif significatif sur la tendance du réacteur à surchauffer durant les journées ensoleillées. Dans certains cas, le recours à un groupe froid pour contrôler la température du milieu de culture n'est plus nécessaire. Cependant, en hiver, maintenir la température du PBR au dessus de 15 °C consomme une très grande quantité d'énergie. Le filtrage spectral du flux solaire a alors un effet négatif. L'optimisation du comportement thermique du réacteur étudié passe donc avant tout par une isolation thermique du réacteur.

Une autre solution consiste à augmenter l'inertie thermique du réacteur via l'ingénierie du support du PBR, en plaçant, par exemple, le réacteur sur un matériau avec une forte inertie thermique (du béton dans le cas du pilote 10 m²). Cependant cette solution seule ne suffit pas à contrôler passivement la température du milieu de culture (voir Section 3.3). La Section 4.2 présente donc une étude en simulation d'une piste potentielle d'amélioration de ce principe : l'inclusion de matériaux à changement de phase dans le support du réacteur.

Pour d'avantage réduire la consommation énergétique du chauffage, il est également possible d'adapter la température de consigne du système de régulation. Cette étude montre que réduire de 5 °C la température minimale acceptée a permis de diminuer de

moitié la consommation énergétique du chauffage. Le couplage des modèles ne permet cependant pas de prédire l'impact de cette mesure sur la productivité en microalgues du système. Modéliser cette influence serait une amélioration majeure du modèle développé ici.

Les outils présentés permettent néanmoins d'estimer la productivité du système en électricité et en biomasse en fonction de la période de l'année. Cela permettrait, en associant le modèle à une étude technico-économique, de déterminer quand la production de microalgues est la plus rentable.

Au final, la coproduction de biomasse et d'électricité par l'alliance d'un PBR intensifié et un panneau photovoltaïque semi-transparent apparaît comme une solution intéressante pour le développement d'un photobioréacteur à très faible consommation énergétique.

4.2 Inclusion de matériaux à changement de phase dans le support d'Algofilm

Dans le prototype 0.33 m², des températures incompatibles avec la culture de microalgues ($< 0\text{ °C}$ ou $> 40\text{ °C}$) ont été observées par Le Borgne (2011) et prédites par le modèle thermique. La Section 4.1 montre que la faible inertie thermique du prototype Algofilm 0.33 m² est en partie en cause. Pour résoudre ce problème, le pilote 10 m² a été installé sur une dalle de béton dont le rôle est de capter la chaleur du milieu de culture le jour pour la restituer la nuit. L'objectif est de réduire la variabilité de la température du réacteur pour qu'elle reste toujours dans un intervalle viable pour les microalgues. Cependant, la Section 3.3 montre expérimentalement que cette solution seule ne suffit pas à prévenir la surchauffe du milieu de culture puisque des températures supérieures à 50 °C ont été observées.

Pour réguler la température du milieu de culture, la dalle de béton doit échanger de la chaleur avec celui-ci. Sur le pilote 10 m², cela se fait à travers une seule interface : le plan d'écoulement. La chaleur captée doit ensuite être transportée à travers le volume de la dalle pour éviter une élévation de la température de cette interface et donc du milieu de culture. Dans le cas du pilote 10 m², cela se fait uniquement par conduction, or, le béton a une conductivité thermique trop faible pour que ce mode de transfert soit suffisant. Ainsi, lorsque le milieu de culture chauffe lors de journées ensoleillées, la chaleur captée par la dalle ne pénètre que les premiers centimètres de béton (voir Section 4.2.2). L'accumulation de chaleur augmente alors la température du support et in fine celle du milieu de culture.

Pour éviter que la dalle chauffe, il est possible d'améliorer sa conductivité thermique, par exemple, en ajoutant des tiges métalliques dans le béton (i.e. en utilisant un béton armé). Une autre solution consiste à augmenter la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter sa température (i.e. augmenter l'inertie thermique du béton). Pour cela, au cours de travaux de thèse, dans la même logique que ce qui a été fait par Le Borgne (2011) pour le prototype 0.33 m^2 , l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) a été proposée.

Pour une application en culture, les MCP recherchés ont une température de fusion comprise dans l'intervalle accepté par les microalgues (généralement autour de $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Ainsi, en journée, lorsque la température de la dalle augmente et atteint le point de fusion du matériau, le MCP fond et la chaleur qu'il absorbe lui permet de changer d'état. Sa température n'augmente alors plus tant qu'il n'a pas totalement fondu : la chaleur est stockée sous forme latente. Pendant cette transition de phase, la température de la dalle augmente moins vite. L'objectif est de retarder suffisamment la montée en température du réacteur pour qu'à l'heure la plus chaude de la journée (peu après le zénith), la température du milieu de culture reste acceptable. Au delà de cet instant, le flux solaire diminue, le réacteur reçoit donc moins de chaleur et ses échanges thermiques avec l'extérieur vont faire baisser sa température. Lorsque le MCP atteint son point de fusion, celui-ci va alors se resolidifier en libérant la chaleur latente qu'il a accumulé. Cela permet ainsi de maintenir la température du milieu de culture le soir et une partie de la nuit. Comme démontré dans la Section 4.1, cet effet est également bénéfique.

L'utilisation de MCP pour le prototype Algofilm 0.33 m^2 a été étudiée par Le Borgne (2011), l'efficacité de la solution y est expérimentalement démontrée. Le réacteur était équipé de blocs placés sous le plan d'écoulement. Ils comprennent une matrice support en graphite naturel expansé et les MCP.

Dans cette section, en utilisant les outils théoriques développés dans la Section 2.5.2, l'implémentation d'une solution similaire pour le pilote Algofilm 10 m^2 est étudiée par simulation. Ici, la dalle de béton en béton sert de matrice support pour les MCP. Ils y sont inclus sous forme de billes comme décrit par Young et al. (2017).

4.2.1 Données d’entrée des simulations

4.2.1.1 Conditions météorologiques

Les matériaux à changement de phase ne modifient pas les flux de chaleur qui entrent ou sortent du PBR, la température à l’équilibre du réacteur avec ou sans MCP est donc la même. L’intérêt de ces matériaux réside dans l’influence qu’ils ont sur la vitesse à laquelle la dalle chauffe et refroidit. Cette étude doit donc être faite avec un modèle en régime transitoire.

Les variations de température du PBR sont dues aux variations des conditions météorologiques journalières. Pour cette étude, ces variables doivent donc évoluer en fonction du temps. Ici, les conditions fictives présentées dans la Section 2.5.2.7 sont utilisées. Les paramètres des Équations 2.105 et 2.106 sont inchangés (voir Figure 2.17). De même, le vent a une vitesse de 6 m.s^{-1} et vient du Nord-Est. Pour le calcul de la position du soleil dans le ciel, la date du 21 juin 2020 (solstice d’été) a été retenue. Pour initialiser le gradient de température dans la dalle de béton, cette journée fictive est répétée seize fois et seuls les deux derniers jours sont analysés.

4.2.1.2 Propriétés du pilote et des matériaux à changement de phase

Le réacteur simulé est le pilote 10 m^2 (simple vitrage) dont la géométrie et les propriétés physiques sont décrites dans la Section 2.5.2.6. Le modèle thermique développé spécifiquement pour ce pilote est donc utilisé (voir Section 2.5.2). Les équations présentées dans la Section 2.5.2.9 permettent de prendre en compte l’influence des MCP sur la température du réacteur.

Les matériaux à changement de phase sont inclus dans le béton comme décrit par Young et al. (2017). Leur température de fusion est ici de 30 °C ($\delta T_f = 2 \text{ °C}$) et leur chaleur latente de fusion est de $1.8 \times 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$ (Young et al. 2017). Les autres propriétés de ces matériaux sont données dans la Table 4.3.

	$k \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	$\rho \text{ [kg.m}^{-3}]$	$C_p \text{ [J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$
enveloppe	0.49	930	2250
cœur	0.21	860	2590

TABLE 4.3 – Propriétés physiques des matériaux à changement de phase inclus dans le béton.

4.2.2 Étude de l'impact de l'épaisseur de béton incluant des MCP sur la température du milieu de culture

Les matériaux à changement de phase ne peuvent stocker de la chaleur que si elle parvient jusqu'à eux. Or, la conductivité thermique du béton est ici limitante : la chaleur du milieu de culture captée par la dalle ne pénètre que les premiers centimètres sous le plan d'écoulement. Il n'est donc pas nécessaire d'équiper l'ensemble du support d'Algofilm en MCP. Il suffit d'une petite épaisseur située juste sous l'interface liquide - béton.

Inclure des MCP dans le réacteur représente un investissement supplémentaire important. Afin d'optimiser l'utilisation des matériaux à changement de phase installés, l'épaisseur maximale de béton à équiper en MCP est donc étudiée.

Une première série de simulation a été menée où quatre épaisseurs ont été testées : 0 cm (sans MCP), 5 cm, 15 cm, et 30 cm. Ici, les MCP sont répartis sous toute la surface du PBR. Dans tous les cas, les fractions volumiques du cœur et de l'enveloppe des MCP sont $\Phi_e = \Phi_c = 0.05$ (voir Équations 2.111, 2.112 et 2.114). Les résultats des simulations sont présentés par la Figure 4.11.

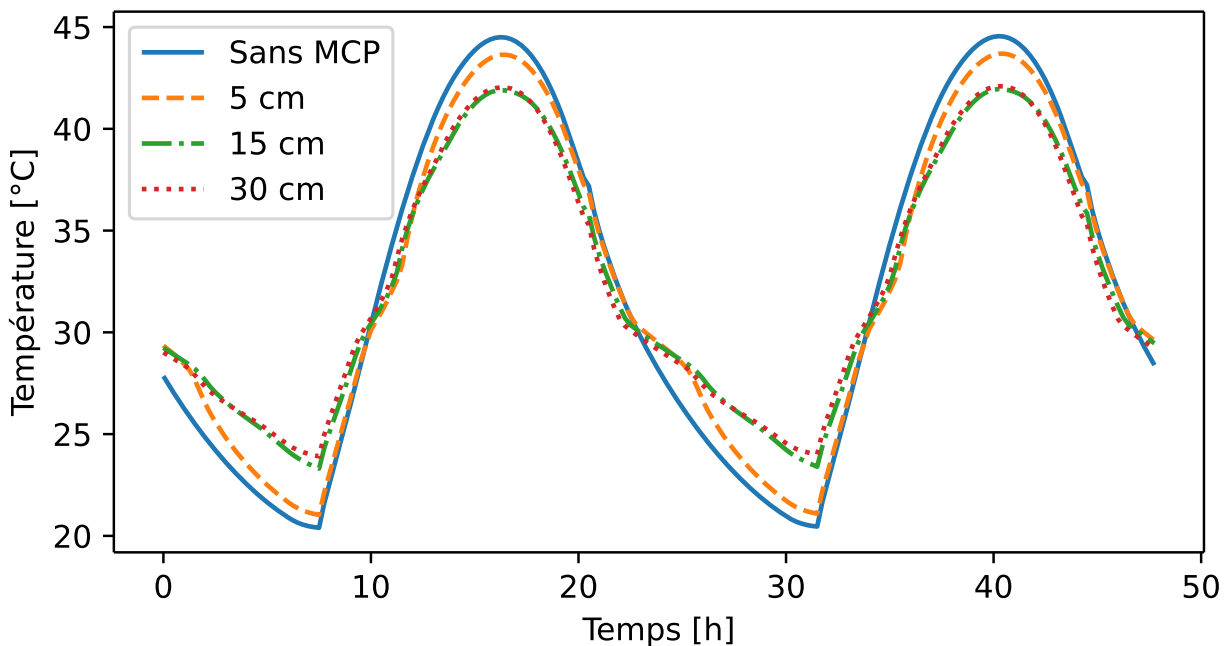


FIGURE 4.11 – Température du milieu de culture lors des deux derniers jours de la simulation en fonction de l'épaisseur de béton incluant des matériaux à changement de phase.

La Figure 4.11 montre que les matériaux à changement de phase influent favorablement

sur la température du milieu de culture. Leur présence réduit la température maximale atteinte au cours de la journée et augmente la température minimale nocturne. Cela rejoint les résultats expérimentaux de Le Borgne (2011) et démontre que l'utilisation de tels matériaux pour concevoir un PBR qui régule passivement sa température est une solution valide.

Cette simulation montre également qu'augmenter l'épaisseur du béton équipé de matériaux à changement de phase n'induit pas nécessairement une amélioration du profil de température du milieu de culture. Augmenter l'épaisseur de MCP de 5 cm à 15 cm a permis d'accentuer leur effet et de réduire davantage la variabilité de la température du milieu de culture. En revanche, la présence de MCP au delà de 15 cm sous le plan d'écoulement n'influe pas sur la température du milieu de culture. Lors de la construction d'un nouvel Algofilm, il n'est donc pas nécessaire de mettre plus de 15 cm de MCP dans le béton.

4.2.3 Étude de l'impact de la fraction volumique de matériaux à changement de phase sur la température du milieu de culture

La fraction volumique des MCP inclus dans le béton (Φ_{e+c}) influe aussi sur le profil de température du milieu de culture. Plus cette fraction est élevée (plus il y a de MCP dans le béton), plus la dalle peut absorber de chaleur sans augmenter sa température. Pour étudier l'influence de ce paramètre, une seconde série de simulations a été menée où plusieurs fractions sont testées (0, 0.05, 0.1, 0.25, et 0.5). Dans tous les cas, les fractions volumiques de l'enveloppe et du cœur sont égales ($\Phi_e = \Phi_c = \frac{1}{2} \cdot \Phi_{e+c}$). Ici, les matériaux à changement de phase ne se trouvent que dans les quinze premiers centimètres sous le plan d'écoulement et sont répartis sous l'ensemble de la surface du PBR. Les résultats des simulations sont présentés par la Figure 4.12.

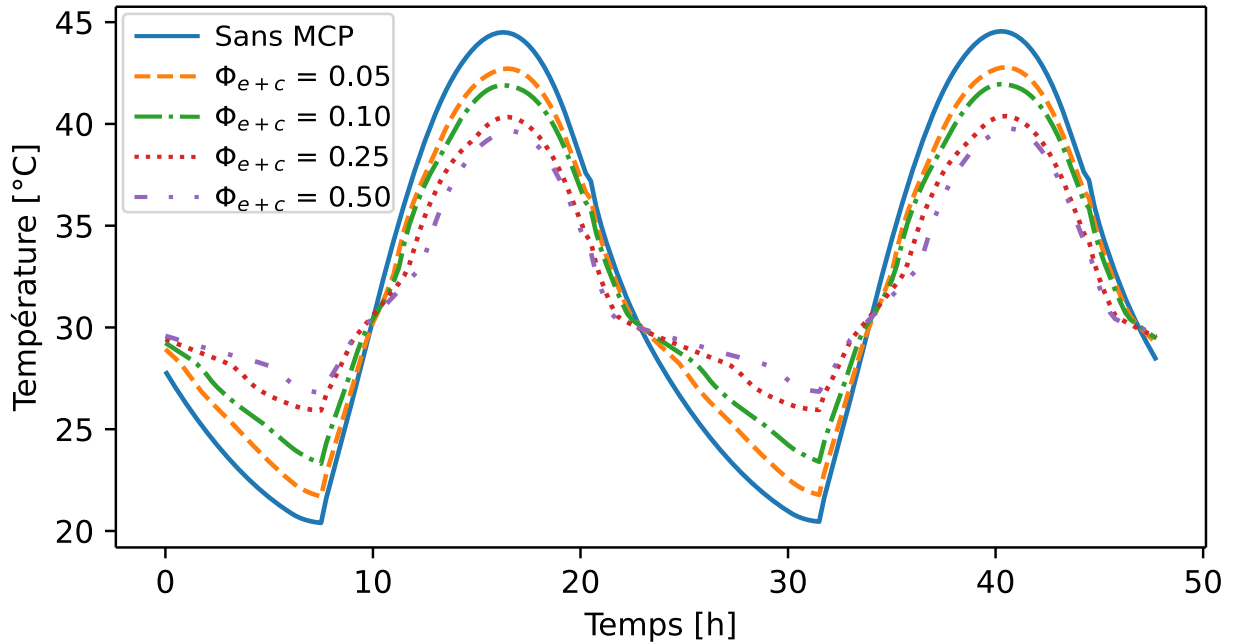


FIGURE 4.12 – Température du milieu de culture lors des deux derniers jours de la simulation en fonction de la fraction volumique de matériaux à changement de phase inclus dans le béton.

La Figure 4.12 montre qu’augmenter la fraction Φ_{e+c} permet d’élèver la température minimale atteinte par le milieu de culture au cours de la nuit. Jusqu’à $\Phi_{e+c} = 0.25$, la température maximale atteinte au cours de la journée est également réduite lorsque la quantité de MCP inclus dans le béton augmente. En revanche, pour $\Phi_{e+c} > 0.25$, ajouter plus de MCP ne permet pas réduire davantage cette température. Cela montre que la présence de matériaux à changement rapproche les températures extrêmes du milieu de culture de la température de fusion du MCP : celle à laquelle la densité de stockage de chaleur est la plus importante. Cette température de fusion a donc un impact significatif sur le comportement du réacteur et doit être choisie précautionneusement lors du dimensionnement.

En règle générale, pour la conception d’un réacteur thermiquement passif, augmenter la quantité de matériaux à changement de phase sera toujours bénéfique. Lors du dimensionnement d’un système de type Algofilm, cette conclusion simple implique donc de mettre autant de MCP que techniquement et financièrement possible.

4.2.4 Étude de la répartition de MCP sous la surface du plan d'écoulement

Dans les simulations précédentes, les matériaux à changement de phase sont répartis de façon homogène sous l'ensemble du plan incliné. Dans le cas d'un grand Algofilm, inclure 15 cm de MCP sous une grande surface peut représenter un investissement important. Pour limiter ce coût, il a été proposé que seule une fraction du photobioréacteur soit équipée de matériaux à changement de phase. Grâce à la modélisation en trois dimensions de la dalle de béton présentée dans la Section 2.5.2, cette proposition a pu être étudiée et est présentée ici.

Le modèle thermique utilisé suppose que la température du milieu de culture est homogène en tout point du réacteur. Le transport de chaleur par le liquide dans le PBR n'est donc pas formellement modélisé. Pour calculer les échanges de chaleur entre le liquide et la dalle de béton, la température moyenne de la surface est utilisée (voir Équation 2.82). Cela suppose que les disparités de températures à l'interface liquide-béton sont faibles (validé expérimentalement, voir Section 3.3).

Si les propriétés thermiques de la dalle ne sont pas les mêmes sur toute sa surface, des différences significatives de température sont attendues en fonction de la position sur le plan d'écoulement. Le transport de chaleur par le milieu de culture devient alors un moteur important de l'homogénéisation de ces températures. Ce phénomène doit donc être pris en compte pour estimer au mieux la température du plan d'écoulement et donc celle du milieu de culture. Puisque le modèle utilisé ne permet pas de représenter cela, les conclusions présentées ici sont à prendre avec précautions. Avant d'envisager une telle implémentation, une modélisation avec une approche locale des échanges de chaleur entre le liquide et le béton sera nécessaire.

Dans cette étude, cinq simulations ont été faites. Pour chacune d'entre elles, une fraction différente du plan d'écoulement était équipée de matériaux à changement de phase : 0% (sans MCP), 14.3%, 28.6%, 57.1% et 100%. Les MCP étaient répartis sur toute la largeur et une fraction de la longueur du PBR en partant du Nord (voir Figure 4.13). Dans toutes les simulations le béton équipé de MCP l'est sur une épaisseur de 15 cm avec une fraction volumique $\Phi_e = \Phi_c = 0.05$.

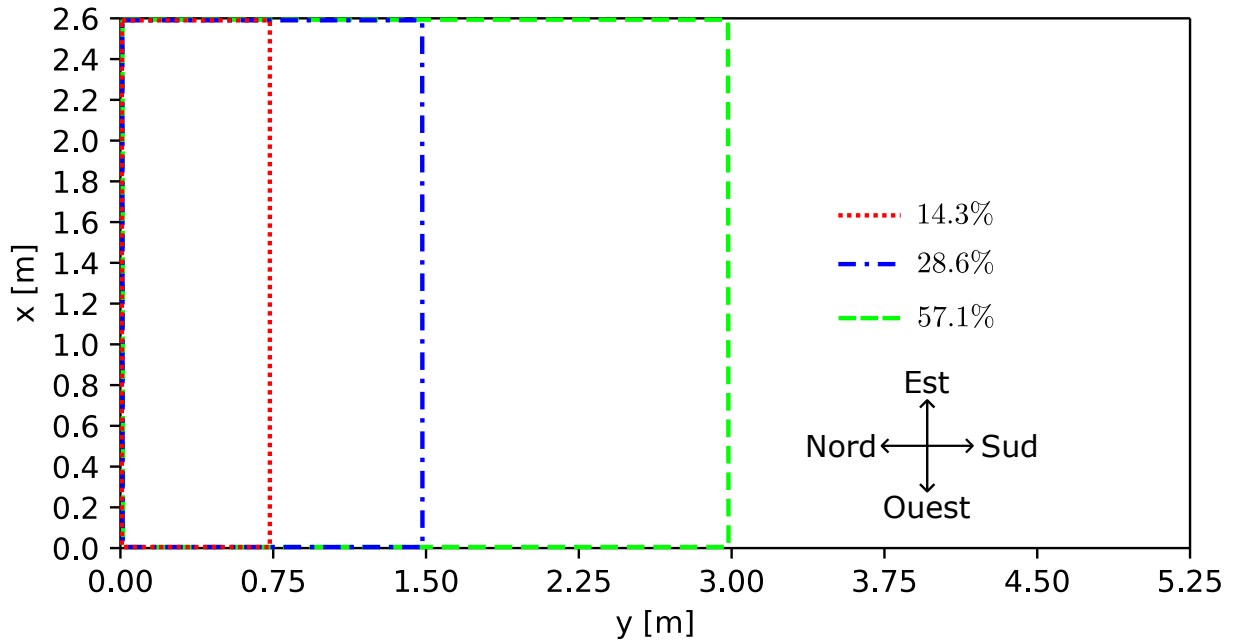


FIGURE 4.13 – Représentation en vue de dessus de la répartition des matériaux à changement de phase sous la surface du plan d'écoulement.

La Figure 4.14 donne les profils de température du milieu de culture obtenus en fonction de la fraction de surface équipée de matériau à changement de phase.

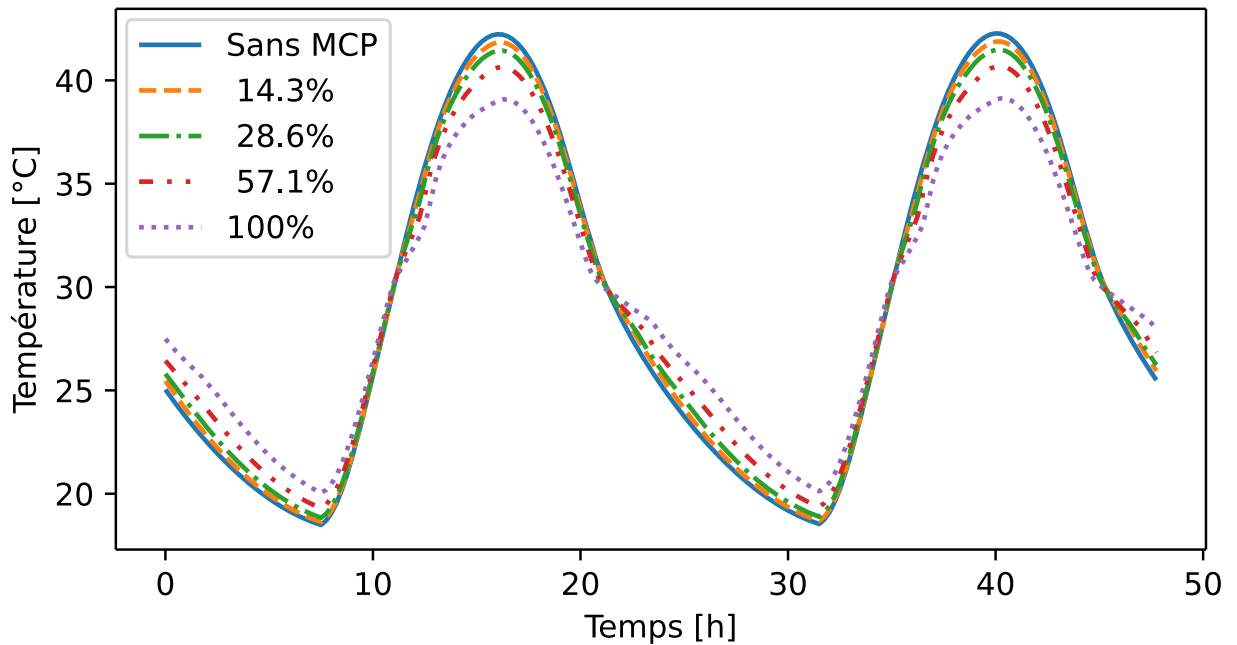


FIGURE 4.14 – Profil de température du milieu de culture en fonction de la fraction de surface équipée de matériaux à changement de phase.

Comme attendu, les simulations montrent que lorsque le réacteur est partiellement équipé de matériaux à changement de phase, le profil de température du milieu de culture se situe entre celui du cas 0% et celui du cas 100%. Plus la surface équipée de matériaux à changement de phase augmente, plus le profil de température se rapproche logiquement du cas où l'ensemble du PBR est équipé.

Cette présence partielle de MCP dans le réacteur a notamment modifié la répartition de température de l'interface liquide - béton. La Figure 4.15 donne la température du plan d'écoulement lors du dernier jour de simulation à 14h (l'heure la plus chaude de la journée) lorsque le réacteur n'est pas équipé de MCP.

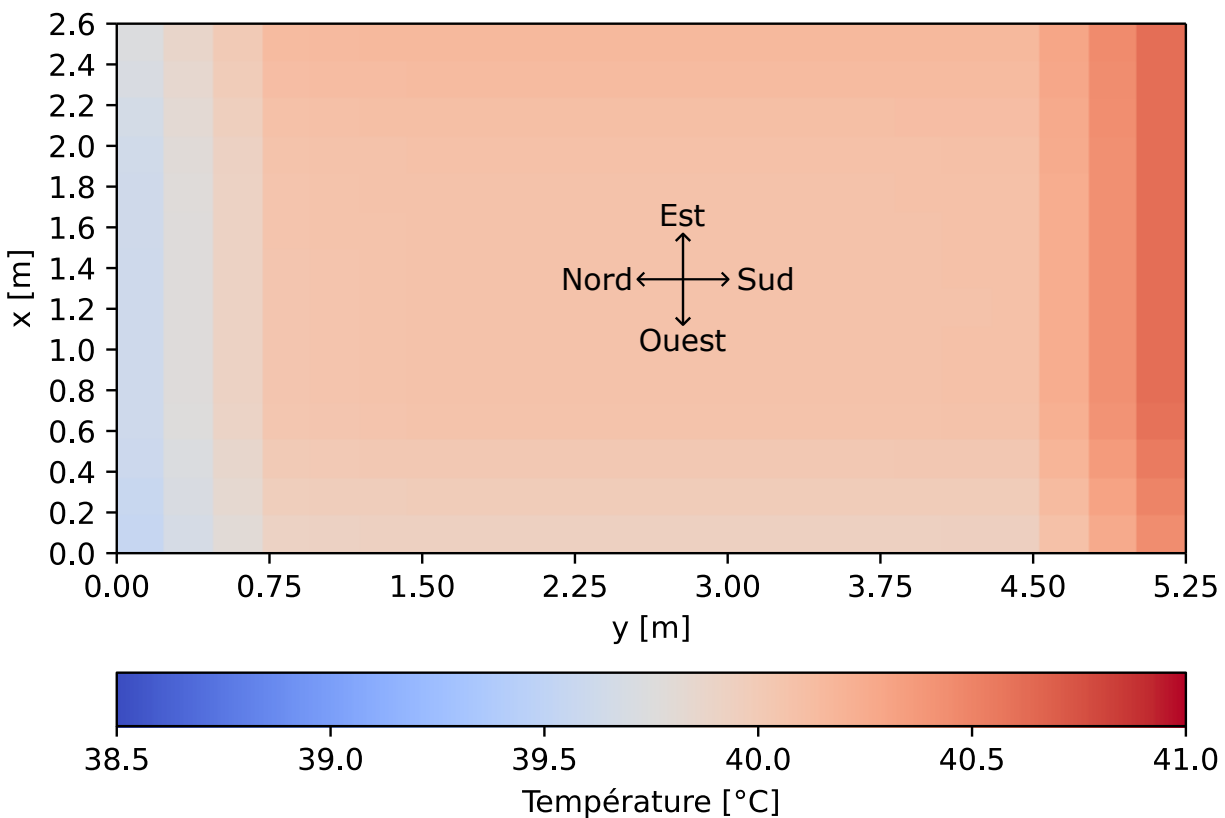


FIGURE 4.15 – Vue du dessus de la température du plan d'écoulement le dernier jour de la simulation à 14h. Le réacteur simulé n'est pas équipé de matériaux à changement de phase.

La Figure 4.15 montre que la température du plan d'écoulement varie peu en fonction de l'espace. La différence la plus importante se situe entre le coin Nord-Ouest et le coin Sud-Est : elle est de 1 °C. Cela s'explique par la course du soleil au cours de la journée. La face Nord n'est jamais éclairée par le soleil et ne bénéficie donc pas de son apport de

chaleur, elle apparait donc comme la face la plus froide. Au contraire, la face Sud absorbe la puissance lumineuse solaire tout au long de la journée : c'est la face la plus chaude. La face Est n'est éclairée que le matin (jusqu'à 14h08) et la face Ouest le soir (à partir de 14h08). A l'heure ou la température du plan d'écoulement est prise (14h), la face Ouest est donc plus froide que la face Est. Ainsi, le coin Nord-Ouest se trouve entre les deux faces froides du réacteur et est donc le point le plus froid. Réciproquement, le coin Sud-Est est le point le plus chaud car entre les deux faces chaudes.

Au centre de la dalle, la différence de température est très faible ($< 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$). C'est cohérent avec les observations expérimentales de la Section 3.3 : au niveau des points où étaient implantés les thermocouples, cette différence est inférieure à la précision de mesure.

La présence de matériaux à changement de phase sous une partie du plan d'écoulement accentue ces différences de température. La Figure 4.16 donne la température de la face supérieure de la dalle pour le cas avec 14.3% de la surface équipée de MCP.

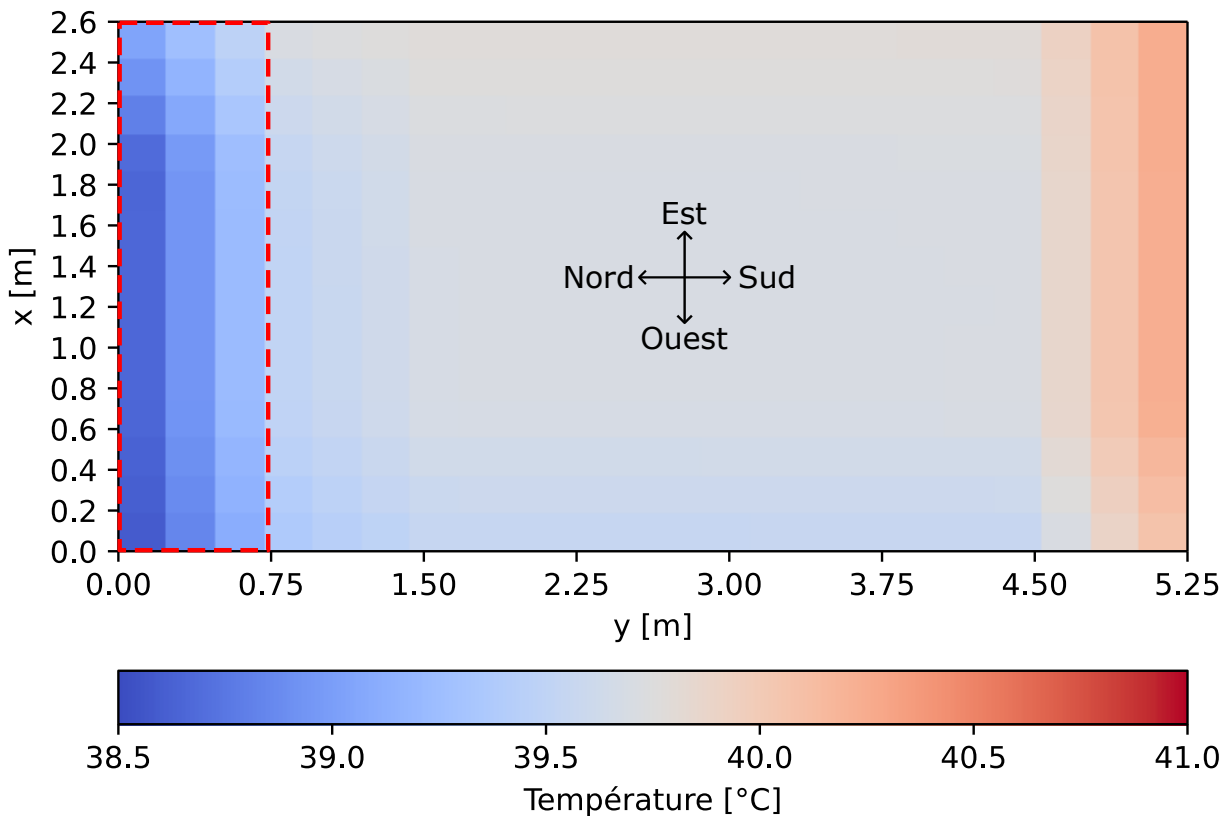


FIGURE 4.16 – Vue du dessus de la température de l'interface liquide - béton lors du dernier jour de simulation à 14h. Le rectangle en pointillés rouges note la surface équipée de matériaux à changement de phase (14.3% de la surface).

La Figure 4.16 montre que la présence de MCP, même sous une petite fraction de la surface, a permis de baisser légèrement la température moyenne du plan d'écoulement. Cependant, puisque le MCP était situé dans la partie Nord de la dalle, la différence de température entre le coin Nord-Ouest et le coin Sud-Ouest est augmentée. Elle est ici de 1.7 °C. La répartition de température au centre de la surface reste homogène, avec une différence maximale inférieure à 0.4 °C.

La température de la surface au Sud du réacteur est donc peu impactée par la présence au Nord de matériaux à changement de phase. Sur un Algofilm à grande échelle, il est attendu que les MCP aient peu ou pas d'influence sur la température d'une partie du réacteur suffisamment éloignée. Des points avec des températures très élevées peuvent donc apparaître à la surface de la dalle. Or, la Section 3.3.3 montre que faire circuler le milieu de culture sur une dalle chaude fait très rapidement augmenter sa température puisque le milieu de culture a une inertie thermique très faible. Ainsi, le milieu de culture peut localement dépasser la température maximale acceptée en passant dans cette partie du PBR : les MCP ne sont donc pas efficaces dans cette configuration. Lors du dimensionnement, il est donc préférable de chercher à équiper l'ensemble du réacteur de matériaux à changement de phase.

La Figure 4.15 montre que la partie Sud de la dalle est naturellement plus chaude (car soumise au rayonnement solaire). Ainsi, réduire la température de cette partie du réacteur permet donc d'efficacement réduire la moyenne des températures du plan d'écoulement et donc celle du milieu de culture. Une dernière simulation a été faite pour étudier la température de la dalle lorsque des matériaux à changement de phase sont placés sous la partie Sud du plan d'écoulement (voir Figure 4.17).

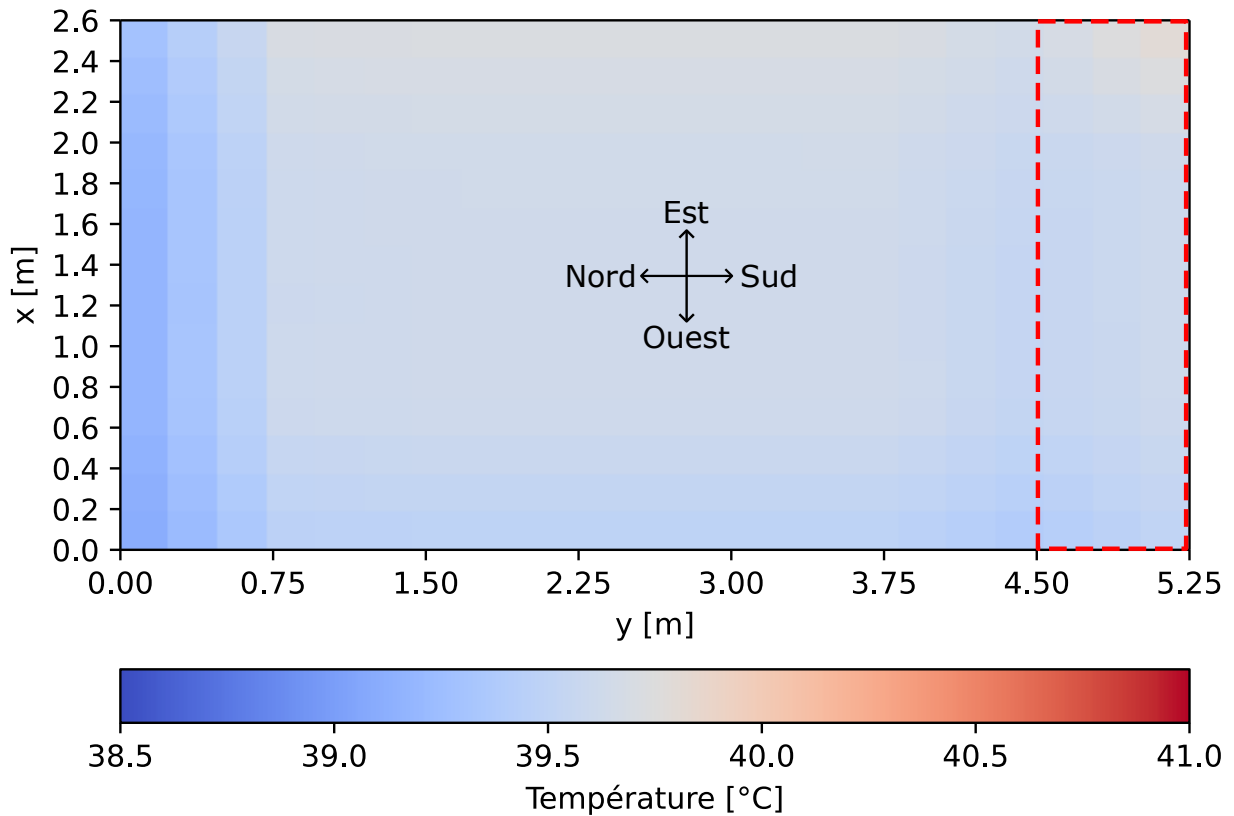


FIGURE 4.17 – Vue du dessus de la température de l'interface liquide - béton lors du dernier jour de simulation à 14h. Le rectangle en pointillés rouges note la surface équipée de matériaux à changement de phase (14.3% de la surface).

La Figure 4.17 montre qu'équiper en priorité la partie Sud du réacteur en MCP est plus efficace pour réduire la température moyenne de la surface de la dalle. Cette configuration permet, à fraction de surface équipée égale, de réduire davantage la température du milieu de culture le jour. De même, puisque plus de chaleur a été absorbée en journée, la température du milieu de culture est plus élevée la nuit. Ici, la différence de température entre le coin Nord-Ouest le coin Sud-Est est de 0.7 °C (plus faible que dans le cas sans MCP). La température au centre de la dalle est toujours homogène, avec une différence maximale inférieure à 0.2 °C. Ainsi, si des contraintes empêchent d'équiper totalement le PBR de matériaux à changement de phase, il est préférable de prioriser cette partie du réacteur.

4.2.5 Conclusion sur l'inclusion de matériaux à changement de phase dans le support du photobioréacteur

L'inclusion de matériaux à changement de phase dans le support du réacteur pour réguler passivement la température du milieu de culture est une solution validée par cette étude. La température maximale atteinte peut être réduite jusqu'à 4 °C selon les cas simulés. Ces quelques degrés de différence permettent d'éviter des températures létales pour les microalgues. La nuit, la température est significativement augmentée, la culture n'a alors plus besoin d'être chauffée.

Les simulations ont également montré qu'il n'est pas nécessaire d'inclure des MCP sur une épaisseur supérieure à 15 cm. Au delà, la conduction de la chaleur est limitante et la capacité de stockage des matériaux à changement de phase n'est pas utilisée. Par contre, augmenter la proportion de matériaux à changement de phase dans le support s'est avéré toujours bénéfique. Dans tous les cas simulés, la variabilité de la température du milieu de culture a été réduite. Choisir quelle quantité de MCP inclure dans le béton est donc principalement contraint par le budget disponible pour la construction du réacteur. Enfin, en règle générale, pour éviter l'apparition de zones à forte température sur la surface de la dalle, la conception du réacteur doit chercher à équiper l'ensemble de la surface en MCP. Cependant, si des contraintes empêchent cela, les résultats de cette étude montrent qu'il est préférable de prioriser la partie Sud du réacteur. Cette partie la plus susceptible de chauffer à cause de son exposition au rayonnement solaire.

L'utilisation seule de MCP peut cependant ne pas suffire à réguler totalement la température du PBR. Dans ce cas, cette solution doit être utilisée en conjonction avec d'autres techniques passives de régulation de la température. Les outils développés au cours de la thèse s'avèrent particulièrement utiles pour dimensionner les autres parties du système afin de concevoir un réacteur thermiquement passif. A titre d'exemple, la Section 4.3 étudie l'utilisation combinée de matériaux à changement de phase et de panneaux photovoltaïques semi-transparents.

4.3 Utilisation combinée de panneaux photovoltaïques semi-transparentes et de matériaux à changement de phase pour la conception d'un photobioréacteur thermiquement passif

L'étude présentée dans la Section 4.1 montre que, pour le prototype 0.33 m², le principal poste de consommation de la régulation thermique est dû au chauffage (à cause de pertes de chaleur importantes durant la nuit). Pour réduire cette consommation, il a été conclu qu'une isolation du réacteur permettant de diminuer ces pertes de chaleur est la première optimisation à mettre en place.

La dalle de béton présente sous le pilote Algofilm 10 m² permet une première forme d'isolation : la chaleur du milieu de culture doit désormais passer à travers le béton pour être cédée à l'environnement extérieur. Ainsi, bien que le béton soit considéré comme un mauvais isolant, il est attendu que cela réduise le besoin en chauffage du réacteur. Cependant, comme relevé dans la Section 4.1.3.3, cela implique également une réduction des pertes de chaleur qui sont utiles en journée. Le milieu de culture s'échauffe donc davantage et cela induit une augmentation de la consommation du groupe froid. Pour éviter cela, réduire l'absorption de chaleur grâce au filtrage spectral du rayonnement solaire par des panneaux photovoltaïques semi-transparent devient une solution intéressante.

La Section 4.2 a montré que l'inclusion de matériaux à changement de phase (MCP) dans le support du réacteur influence favorablement son comportement thermique. Cela peut donc amener à des économies d'énergie supplémentaires.

Cette section étudie, par simulation, l'effet combiné de l'utilisation de panneaux photovoltaïques semi-transparentes et de matériaux à changement de phase sur la consommation énergétique liée à la régulation thermique du photobioréacteur.

4.3.1 Méthode

Pour cette étude, la même méthodologie que la Section 4.1 a été utilisée (même données météorologiques, même scénarios, même calcul de la consommation énergétique, *etc.*). Seul le réacteur étudié change : il s'agit désormais du pilote Algofilm 10 m².

Pour évaluer l'influence des matériaux à changement de phase sur la consommation énergétique du réacteur, les mêmes MCP que la Section 4.2 ont été utilisés. Ici, seuls les

quinze premiers centimètres de béton sous le plan d'écoulement étaient équipés de MCP (voir Section 4.2.2). Trois cas ont été étudiés : $\Phi_{e+c} = 0$ (sans MCP), $\Phi_{e+c} = 0.1$ et $\Phi_{e+c} = 0.25$.

4.3.2 Résultats

Grâce aux modèles thermiques des deux réacteurs, la consommation énergétique liée au maintien de leur température a pu être calculée. La Figure 4.18 compare le besoin en chauffage des réacteurs en fonction du panneau photovoltaïque utilisé et de la présence ou non de matériaux à changement de phase. La régulation thermique maintient le milieu de culture à un minimum de 15 °C.

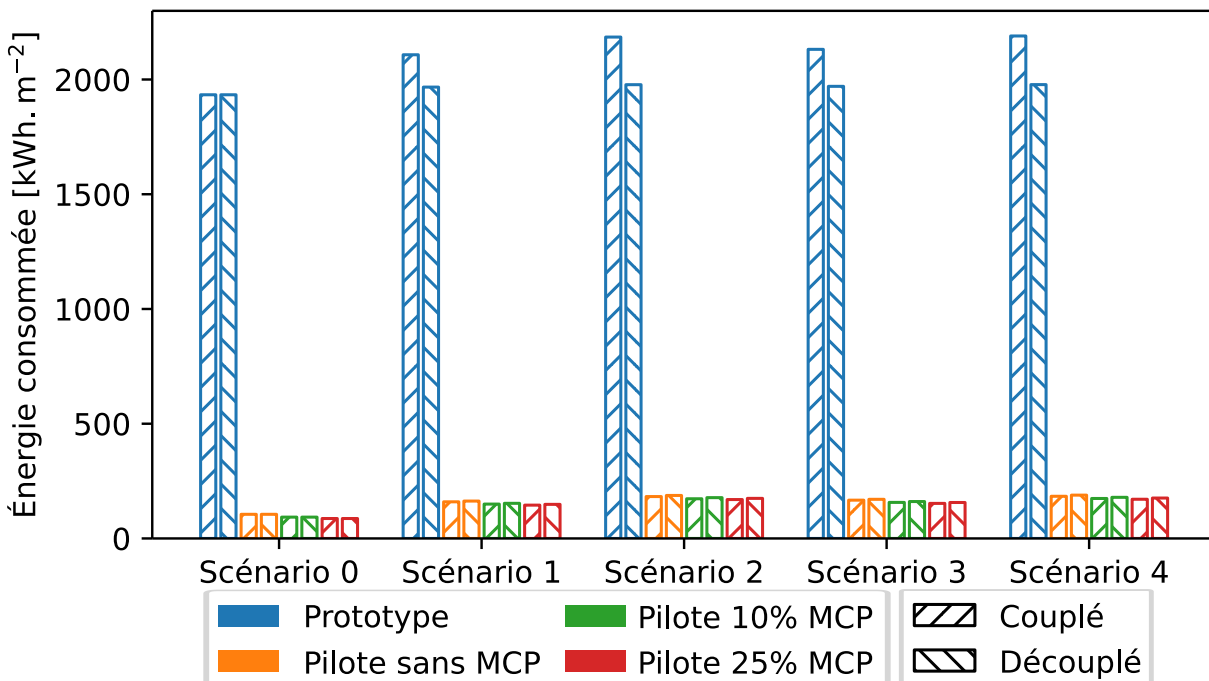


FIGURE 4.18 – Consommation énergétique annuelle du chauffage des photobioréacteurs Algofilm (prototype 0.33 m² et pilote 10 m²) en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support.

Comme attendu, la Figure 4.18 montre que la présence de la dalle de béton sous le pilote Algofilm 10 m² permet de significativement réduire son besoin en chauffage. Il est faible en comparaison de celui du prototype Algofilm 0.33 m² (environ 93% d'énergie économisée).

La Figure 4.18 montre également que, comme pour le prototype 0.33 m², la présence

4.3. Utilisation combinée de panneaux photovoltaïques semi-transparents et de matériaux à changement de phase pour la conception d'un photobioréacteur thermiquement passif

de filtres de lumière augmente légèrement la consommation énergétique de la régulation thermique. Cet effet néfaste est de nouveau accentué lorsque le PV et le PBR sont découplés. Cependant, la différence ne représente cependant que quelques kilowattheures par an : elle peut donc être considérée négligeable.

La Figure 4.18 montre enfin que les MCP ont une influence positive mais négligeable sur la consommation énergétique en chauffage. Dans tous les scénarios du pilote 10 m², augmenter la quantité de MCP inclus dans le support du réacteur a permis de légèrement réduire le besoin en chauffage.

Pour chaque cas étudié, la consommation énergétique du groupe froid a également été calculée et est donnée par la Figure 4.19. La régulation thermique a ici pour consigne de prévenir une augmentation de la température au delà de 35 °C.

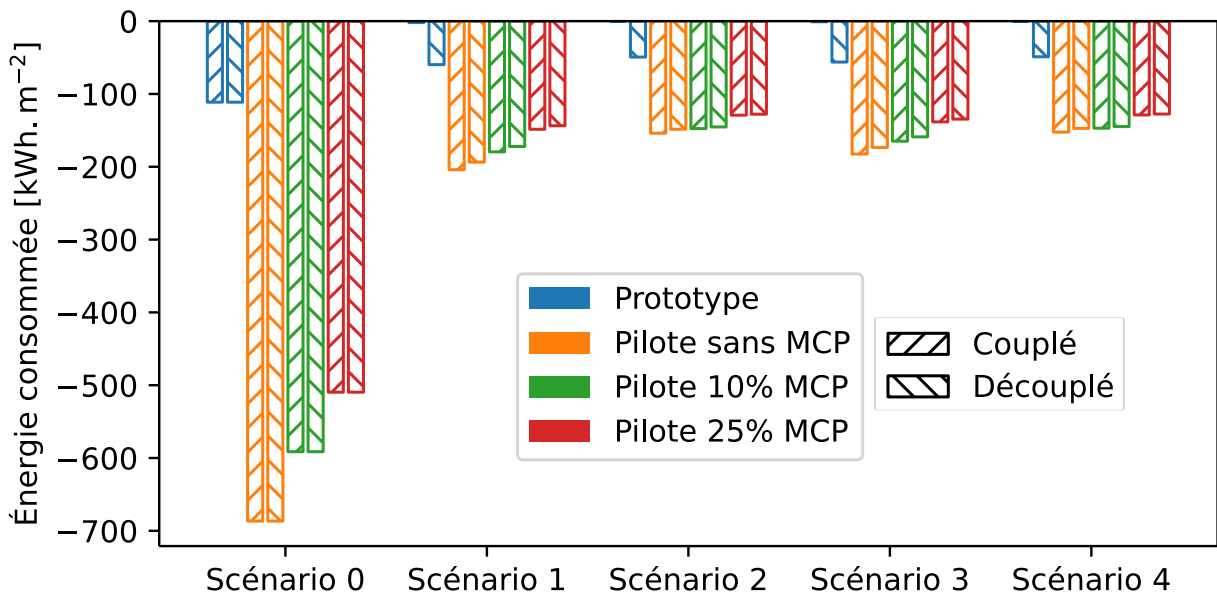


FIGURE 4.19 – Consommation énergétique annuelle du groupe froid des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support.

La Figure 4.19 montre que, comme attendu, l'isolation du milieu de culture de l'air extérieur par le béton induit une augmentation significative de la consommation énergétique du groupe froid. Elle est ici jusqu'à six fois supérieure à celle du prototype Algofilm 0.33 m². Pour le pilote 10 m², cette consommation est six fois plus élevée que celle liée au chauffage pour le scénario #0 et du même ordre de grandeur pour les autres.

Comme pour le prototype 0.33 m², la présence de panneaux photovoltaïques semi-transparents a une forte influence sur cette consommation. Elle est ici divisée par trois pour tous les cas. En revanche, contrairement au prototype 0.33 m², coupler ou découpler

le PV et le PBR a peu d'impact sur la consommation énergétique. En effet, coupler ou découpler les deux systèmes influence en premier lieu la température de la vitre (c'est elle qui reçoit la chaleur de la vitre). Or, dans le cas du pilote 10 m², cette température influe moins celle du milieu de culture que dans le cas du prototype 0.33 m². L'influence du mode de couplage est donc moindre.

Enfin, quel que soit le PV utilisé, la présence de MCP dans le support du pilote 10 m² a une influence significative sur la consommation énergétique du groupe froid. En particulier, dans le scénario #0 (sans PV), elle est réduite de 16.1% et 34.7% pour les cas 10% MCP et 25% MCP respectivement. Lorsque des PV sont ajoutés au système, cette influence est réduite. Les résultats présentés ici sont cohérents avec ceux de la Section 4.2 : plus la quantité de MCP dans le béton augmente, plus la température est passivement contrôlée, plus la consommation énergétique du groupe froid est faible.

La consommation énergétique totale du réacteur en fonction du cas étudié est donnée par la Figure 4.20.

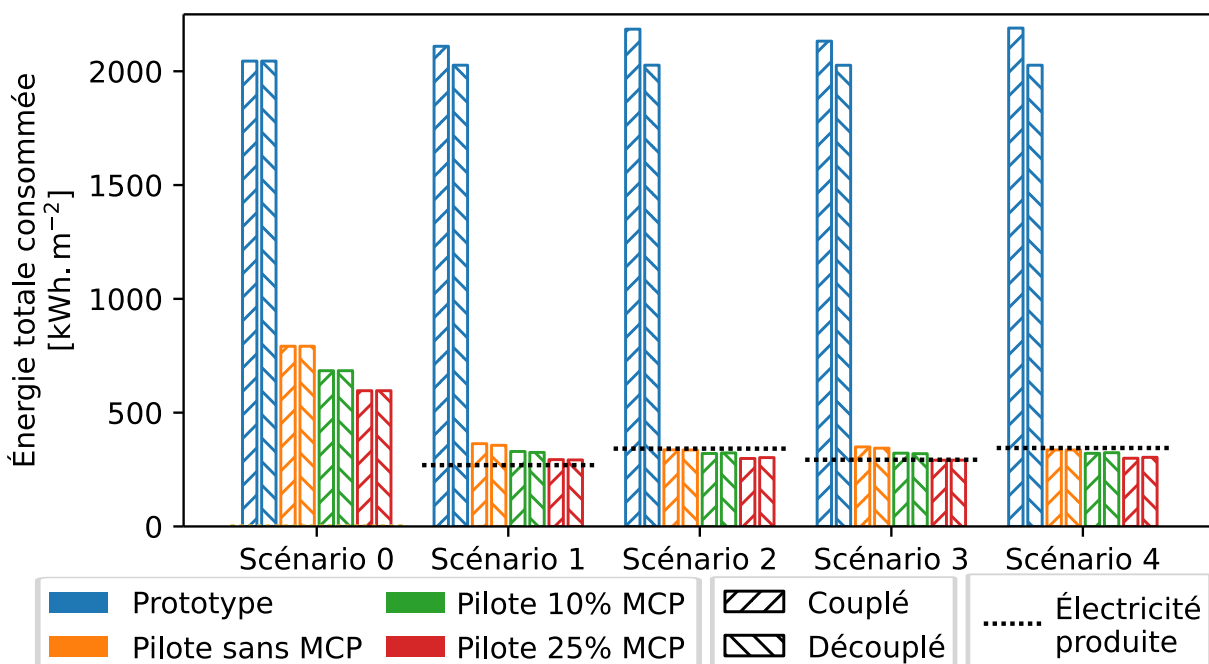


FIGURE 4.20 – Consommation énergétique annuelle totale des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support. Le milieu de culture est ici régulé entre 15 °C et 35 °C. La production électrique produite en fonction du PV utilisé est également donnée (en pointillés).

La Figure 4.20 montre que, contrairement au cas du prototype 0.33 m², pour le pilote

4.3. Utilisation combinée de panneaux photovoltaïques semi-transparentes et de matériaux à changement de phase pour la conception d'un photobioréacteur thermiquement passif

10 m², dans tous les cas testés, la présence de panneaux photovoltaïques semi-transparentes a un effet bénéfique sur la consommation totale d'énergie. Ici, l'augmentation du besoin en chauffage est bien inférieure aux économies permises par le filtrage spectral du flux solaire.

De nouveau, la présence de MCP permet de réduire davantage la consommation énergétique. Les principales baisses sont cependant dues à la présence de PV au dessus du PBR. Ainsi, le filtrage spectral du rayonnement solaire est la méthode à privilégier pour réduire la consommation énergétique. Bien qu'intéressante, l'ajout de MCP est une mesure complémentaire

Au final, malgré la présence de PV et de MCP, le réacteur n'est pas passif. Des températures en dehors de l'intervalle accepté peuvent être atteintes (consommation énergétique non nulle). Cependant, l'utilisation combinée de ces deux technologies permet d'obtenir un système qui est, ou est proche d'être, autosuffisant : la production électrique du PV (en pointillés sur la Figure 4.20) couvre presque toute la consommation énergétique de la régulation thermique.

Pour réduire davantage la consommation énergétique liée au chauffage du réacteur, la Section 4.1.3.3 propose de réduire la température minimale acceptée de 15 °C à 10 °C. Cette proposition a été testée avec le nouveau réacteur équipé ou non de MCP. La Figure 4.21 donne, pour chaque scénario étudié, la consommation énergétique totale du réacteur.

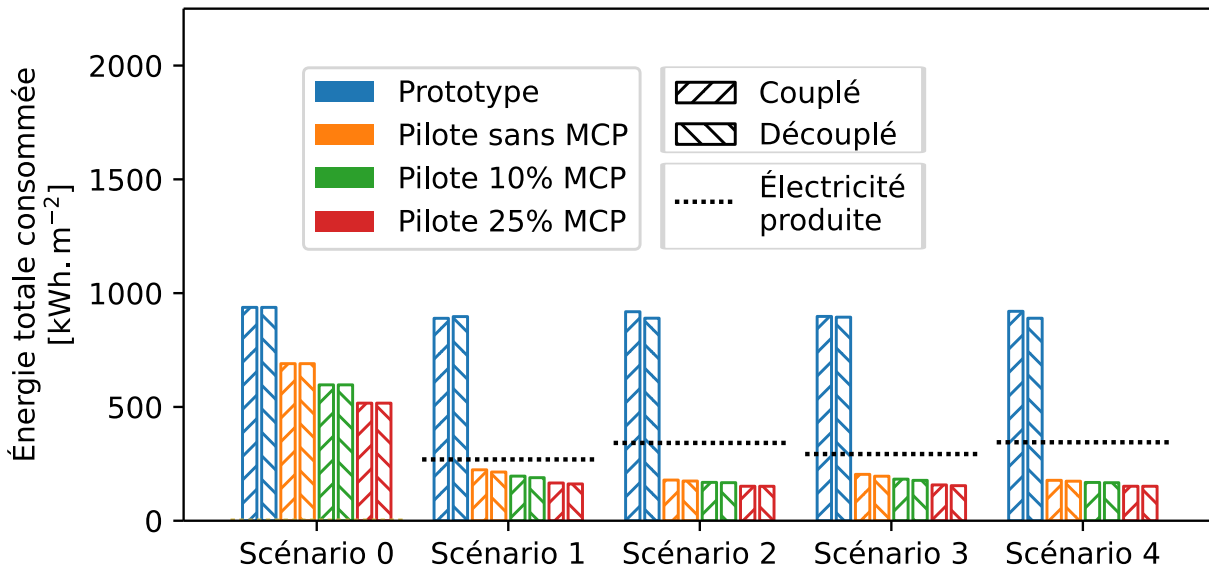


FIGURE 4.21 – Consommation énergétique annuelle totale des photobioréacteurs Algofilm en fonction du PV utilisé et de la quantité de MCP inclus dans le support. Le milieu de culture est ici régulé entre 10 °C et 35 °C. La production électrique produite en fonction du PV utilisé est également donnée (en pointillés).

La Figure 4.21 confirme que baisser la température minimale acceptée a permis de faire des économies d'énergie. Désormais, dans tous les cas où le pilote 10 m² est équipé de PV, la production électrique (en pointillés sur la Figure 4.21) dépasse nettement la consommation énergétique de la régulation thermique. Ces résultats montrent que ces technologies passives permettent, grâce à des compromis, de concevoir un système autosuffisant en énergie (pour la régulation thermique).

4.3.3 Conclusion sur la conception d'un système hybride à très base consommation énergétique

Afin de concevoir un réacteur qui régule passivement sa température, l'utilisation combinée de panneaux photovoltaïques semi-transparents et de matériaux à changement de phase a été étudiée dans cette section.

Grâce à la dalle de béton sous le plan d'écoulement, le besoin en chauffage du pilote 10 m² a été significativement réduit par rapport à celui du prototype 0.33 m². Cela a cependant induit une augmentation importante de la consommation énergétique du groupe froid. Cette augmentation étant inférieure à l'économie réalisée sur le chauffage, la consommation énergétique globale a été significativement réduite (-80.1% en moyenne).

Du fait de la présence de la dalle de béton sous le pilote 10 m², le surplus de chaleur absorbée devient la principale cause de consommation énergétique. La présence de panneaux photovoltaïques semi-transparents a permis de significativement réduire le besoin en énergie du groupe froid. La consommation énergétique globale a donc été nettement réduite.

L'inclusion de MCP dans le support a également permis de faire des économies d'énergies supplémentaires. Elles sont cependant moins importantes que celles permises par les PV. Pour réduire la consommation énergétique du réacteur, le filtrage sélectif des longueurs d'onde du rayonnement solaire est donc la mesure à privilégier. L'utilisation de matériaux à changement de phase, bien qu'efficace, est une mesure complémentaire.

L'utilisation combinée de ces deux technologies n'a cependant pas permis d'obtenir un système passif du point de vue de la régulation thermique. Néanmoins, en utilisant d'autres leviers efficaces tels que la plage de températures acceptées pour la culture, des économies significatives peuvent être réalisées. Cela implique cependant de mieux connaître la réponse biologique à ces conditions non optimales. Au final, grâce à la production électrique permise par les panneaux photovoltaïques, le réacteur ainsi obtenu s'approche d'un système autosuffisant en énergie (pour la régulation thermique).

L'ensemble de ces résultats illustre comment les outils théoriques développés au Chapitre 2 permettent de choisir les meilleurs compromis de conception. Au final, cela permet d'allier plusieurs solutions permettant de concevoir d'un photobioréacteur performant et économe en ressources.

4.4 Conception d'un réacteur intensifié à faible concentration en oxygène

La Section 3.2.2.3 a montré expérimentalement qu'une haute concentration en oxygène dissous (> 50 mg.L⁻¹) est atteinte dans le pilote Algofilm 10 m² lors de journées ensoleillées. Selon la littérature, cela impacte négativement l'activité photosynthétique des microalgues (Bonnanfant 2020 ; Kazbar 2018 ; Todisco 2019) et donc les performances du PBR. Afin de maximiser la productivité du photobioréacteur, cet oxygène doit être dégazé.

Cette dernière section présente une méthode permettant de rationnellement dimensionner un réacteur pour réduire, par conception, l'exposition des microalgues à l'oxygène dissous.

4.4.1 Paramètres de l'étude

Les équations utilisées dans cette section font intervenir un grand nombre de paramètres dépendants des variables météorologiques, des conditions de culture, ou encore des différents éléments qui composent le réacteur (vitrage, pompe, plan incliné, zone sombre *etc.*). Ces composants sont sélectionnés au moment de la conception du PBR où de multiples contraintes doivent être respectées (budget, espace dédié, performances attendues *etc.*). Le dimensionnement d'un PBR est donc un problème multi-contraint dont la résolution n'est pas triviale. Afin de limiter le nombre de variables à optimiser, l'étude présentée ici fixe plusieurs paramètres.

4.4.1.1 Lumière incidente

L'oxygène accumulé dans le milieu de culture est issu de la photosynthèse et dépend donc de la lumière qui irradie le réacteur. Pour déterminer la valeur de cette variable, une étude préliminaire est nécessaire. Ici, à titre d'exemple, le réacteur est conçu pour être implanté dans la région nazairienne. Les conditions de lumière mesurées sur la plateforme Algosolis (France 47.25 N -2.26 W) entre janvier 2016 et juin 2021 sont donc utilisées. Les quantiles 5% de l'ensemble des mesures ont été calculés (voir Figure 4.22).

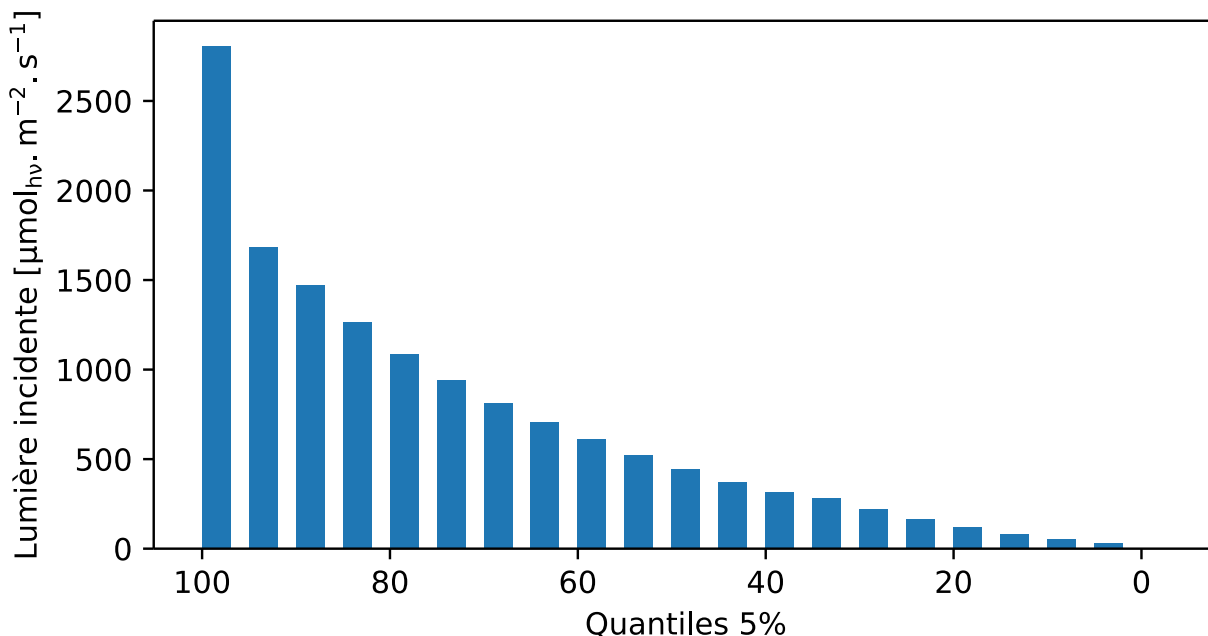


FIGURE 4.22 – Distribution de la lumière mesurée sur la plateforme Algosolis entre janvier 2016 et juin 2021. Les conditions de lumière nocturnes ont été exclues des données analysées.

Les expériences présentées dans la section 3.2.2.3 montrent que la cinétique de production / consommation d'oxygène est rapide à l'échelle d'une journée (de l'ordre de la minute, voir Section 3.2.2.3). Il est donc possible de restreindre l'étude à une petite période de temps durant laquelle les conditions lumineuses sont considérées constantes. Pour simplifier l'étude, une seule intensité lumineuse est testée ici.

En règle générale, pour dimensionner un réacteur, le pire scénario susceptible de se produire est défini et analysé, les différents composants du système doivent alors assurer le bon fonctionnement du procédé malgré les circonstances. Dans le cas du contrôle de la concentration en oxygène dissous, cette méthode implique de considérer la plus forte irradiance observée : la lumière pour laquelle la production et l'accumulation d'oxygène sont maximales. Cependant, la Section 3.2 montre que les hautes concentrations en oxygène ne portent pas atteinte à la viabilité de la culture : la productivité est impactée mais les microalgues survivent. Afin de réduire le coût d'investissement du réacteur, il est donc possible d'accepter que la concentration en oxygène dissous ne soit pas toujours optimale. Cette étude dimensionne donc un PBR tel que la concentration en oxygène dissous soit optimale 90% du temps. Cela implique que 90% du temps la lumière qui illumine le réacteur soit inférieure ou égale à l'irradiance choisie pour le dimensionnement. Selon la Figure 4.22, cela correspond à une irradiance globale horizontale (GHI) de $1470 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Le modèle de transfert radiatif utilisé dans ce manuscrit fait intervenir deux types de rayonnement incident (collimaté et diffus). Selon le pyranomètre de la plateforme Algosolis, en moyenne, la lumière diffuse représente 62.4% de l'irradiance reçue. Par la suite, la lumière collimatée et la lumière diffuse seront donc de $552.7 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et $917.3 \mu\text{mol}_{\text{hv}}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ respectivement.

Le réacteur est destiné à être construit en extérieur, le spectre de lumière standard ASTM G-173-03 (global tilt) (ASTM 2012) est donc utilisé (voir Figure 2.18). Enfin l'angle d'incidence de la lumière collimatée sur le PBR est celle du 2020-06-21 à 12:00 UTC sur la plateforme Algosolis (France 47.25 N -2.26 W). Il s'agit de la date du solstice d'été, là où le soleil est au plus haut dans le ciel. L'angle d'incidence vaut alors environ 24° .

4.4.1.2 Photobioréacteur, phase gaz et coefficient d'échange

La concentration en oxygène dissous dans le milieu de culture est le résultat du bilan entre la production d'oxygène par les microalgues et les échanges gazeux entre le liquide et son environnement. La conception du réacteur influence ces deux termes. Afin de réduire le nombre de paramètres à optimiser dans cette étude, plusieurs éléments du réacteur sont

prédéfinis :

- L'épaisseur de la culture joue un rôle central ici car elle détermine la productivité volumique en biomasse et donc en oxygène. La définition de ce paramètre est donc une contrainte majeure dans le processus de dimensionnement du réacteur. Pour cette étude, elle est fixée à 3.5 mm, comme pour le pilote 10 m². La Section 3.2 a montré que des concentrations en oxygène dissous importantes sont observables pour une telle épaisseur. Fixer ce paramètre suppose que la vitesse de la pompe et l'angle d'inclinaison du plan ont été déterminés en ce sens.
- Le vitrage utilisé pour le réacteur impacte la quantité de lumière captée par les microalgues et in-fine leur production d'oxygène. Afin de réduire le nombre d'entrées du modèle, le PBR étudié n'as pas de vitrage. Si une couverture a été choisie pendant la conception, les équations décrites dans la Section 2.3 permettront alors de prédire son influence et de refaire le dimensionnement en conséquence.
- Le coefficient d'échange gaz-liquide ($k_{l-plane}$) entre le milieu de culture sur le plan et la phase gaz est défini à partir des résultats expérimentaux de Le Borgne (2011). Cette partie du réacteur est très similaire d'un système Algofilm à l'autre. Dans tous les cas, c'est un film liquide qui s'écoule et seule l'épaisseur change. Le Borgne (2011) a mesuré le coefficient d'échange de gaz pour différentes conditions. Les valeurs de $k_{l-plane}$ se sont avérées proches pour toutes les conditions testées (entre $2.18 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ et $2.30 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$). Pour cette étude, la valeur basse a été retenue (estimation pessimiste). La valeur du $k_{l a_{plane}}$ est alors calculée à partir de k_l et de l'épaisseur de la culture :

$$k_{l a_{plane}} = k_{l-plane} \cdot \frac{1}{L} = 2.18 \times 10^{-5} \cdot \frac{1}{0.0035} = 6.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (4.3)$$

- La pression partielle d'oxygène dans la phase gaz du réacteur intervient également dans le calcul des échanges gazeux. Puisqu'ici le PBR n'a pas de vitrage, sur le plan, elle est égale à celle de l'air atmosphérique. La concentration en oxygène à l'équilibre de la phase liquide est donc $C_{O_2-eg} = 8 \text{ mg.L}^{-1}$. À noter qu'expérimentalement, la Section 3.2.2.3 n'a pas observé d'accumulation d'oxygène dans l'atmosphère gazeux du PBR malgré le confinement du milieu de culture. La concentration à l'équilibre reste donc inchangée avec ou sans couverture.
- L'aération du milieu de culture dans la boucle de recirculation se fait grâce à un bullage.

- En laboratoire, pour contrôler la concentration en oxygène dissous, il est commun de buller de l'azote dans le réacteur au lieu de l'air. Ainsi, les échanges de gaz sont améliorés car le potentiel d'échange gazeux (différence de concentration entre le gaz injecté et le liquide) est plus important : cela permet de dégazer plus d'oxygène. Dans le cas d'Algofilm, il est techniquement possible de buller de l'azote dans la boucle de recirculation pour rapidement réduire la concentration en oxygène dans cette partie du réacteur. Cette solution est cependant difficilement envisageable pour un PBR à grande échelle dont l'objectif est de consommer le moins de ressources possibles. Ici, le bullage dans la fraction sombre du réacteur se fera donc uniquement avec de l'air. La concentration en oxygène dissous à l'équilibre est alors également de 8 mg.L^{-1} dans cette partie du réacteur. Dans le cas d'un bullage à l'azote, celle-ci serait de 0 mg.L^{-1} .

4.4.1.3 Souche et conditions de culture

Pour cette étude, les paramètres cinétiques et les propriétés radiatives de *Chlorella vulgaris*, la souche étudiée tout au long de la thèse, sont utilisés. La Section 3.2.1.3 montre que la pigmentation des microalgues est restée très faible dans toutes les campagnes expérimentales : la pigmentation de la souche est donc ici fixée à 1%.

Le modèle de croissance utilisé pour calculer la productivité en oxygène fait aussi intervenir la concentration en biomasse. La Section 3.2 rapporte qu'un stress lumineux trop important peut tuer les microalgues. Pour contrôler cela, la concentration a été pilotée telle que le MRPA ne dépasse pas $30 \times 10^3 \text{ } \mu\text{mol}_{\text{h\nu}} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur cible a été retenue pour cette étude. En utilisant l'Équation 3.6 et tous les paramètres précédemment cités, la concentration en biomasse dans le réacteur a été calculée : elle est ici de 10.6 kg.m^{-3} .

4.4.2 Dimensionnement du réacteur Algofilm idéal

4.4.2.1 Objectif

L'ingénierie du réacteur ne permet pas d'améliorer les échanges de gaz au niveau du plan sans affecter l'écoulement du milieu de culture. Or la productivité du réacteur est fortement influencée par cet écoulement et les modèles utilisés ici ne permettent pas de prendre en compte l'effet d'une telle modification sur les performances du PBR. Cette solution a donc été exclue de cette étude. Un gradient d'oxygène le long du plan est donc attendu quel que soit la conception du PBR (Rearte et al. 2021). L'objectif du

dimensionnement n’est donc pas d’empêcher toute accumulation d’oxygène mais de faire en sorte qu’elle ne dépasse pas une valeur maximale donnée.

Kazbar et al. (2019) ont montré qu’une concentration en oxygène dissous de 30 mg.L⁻¹ induit une baisse de productivité surfacique de 30%. Ces valeurs sont utilisées comme référence dans cette étude : la concentration en oxygène dissous maximale acceptée est donc de 30 mg.L⁻¹. A noter toutefois que ces résultats ont été obtenus pour une concentration constante dans une culture en mode continu. Dans le cas d’un PBR solaire tel qu’Algofilm, des évolutions temporelles importantes de ce paramètre sont observables. Il est donc attendu que l’influence de l’oxygène dissous y soit différente de celle mesurée par Kazbar et al. (2019).

4.4.2.2 Contraintes

Trois paramètres influents sur la concentration en oxygène restent à définir : le temps de passage sur le plan (τ_{plane}), le coefficient d’échange dans la boucle de recirculation ($k_l a_{tank}$), et la fraction sombre du réacteur (f_{dark}). L’optimisation de ces paramètres est cependant soumise à deux contraintes :

1. La valeur du coefficient $k_l a_{tank}$ est influençable en choisissant les injecteurs, la taille des bulles, le débit d’air *etc.* Ce coefficient ne peut cependant pas être infiniment grand. Kazbar et al. (2019) donnent des valeurs de $k_l a$ mesurées ou issues de la littérature pour différents systèmes et différentes conditions opératoires. La plus grande valeur de $k_l a$ rapportée est de $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Cette valeur est utilisée comme référence, ainsi, un $k_l a_{tank}$ est considéré réaliste s’il est inférieur ou égal à $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.
2. Lorsqu’elles sont à l’obscurité, les microalgues respirent et consomment l’oxygène et leurs réserves pour assurer leur métabolisme (voir Section 2.4.2.2). En privant les microalgues de lumière, la fraction sombre d’un PBR réduit donc sa productivité nette (voir Équation 2.56). Dans le cas d’Algofilm, un volume sombre est cependant nécessaire à son fonctionnement hydraulique (boucle de recirculation). Pour maximiser les performances du réacteur, la fraction que représente ce volume doit donc être minimisée. Cependant, ici, cette partie du réacteur permet d’efficacement évacuer / consommer l’oxygène dissous, il peut donc être intéressant d’augmenter cette fraction pour réduire davantage la concentration en oxygène. Cela ne doit cependant pas induire une baisse de productivité supérieure à celle

due à la présence d'oxygène dissous. Au final, puisque la concentration en oxygène maximale admise (30 mg.L⁻¹) induit une baisse de productivité de 30%, il a été choisi que la fraction sombre ne doit pas réduire la productivité de plus de 30%. Soit une fonction $f_{\langle r_x \rangle}(f_{dark})$ qui donne la vitesse de croissance moyenne du réacteur en fonction de la fraction sombre (voir Équation 2.56), tous les autres paramètres nécessaires au calcul de $\langle r_x \rangle$ étant ceux définis précédemment, la fraction sombre maximale est alors donnée par l'Équation 4.4 :

$$\begin{aligned} f_{\langle r_x \rangle}(f_{dark-max}) - 0.7 \cdot f_{\langle r_x \rangle}(0) &= 0 \\ \Rightarrow f_{dark-max} &= 0.18 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Ainsi, la fraction sombre maximale acceptée est de 18%.

4.4.2.3 Calcul des paramètres optimaux

Dans le système Algofilm, l'oxygène n'est produit que sur le plan incliné, lorsque les microalgues sont à la lumière : la concentration maximale en oxygène dissous est donc atteinte en sortie du plan. La concentration minimale est atteinte en sortie de la boucle de recirculation, lorsque la respiration des microalgues et l'échangeur de gaz ont consommé ou évacué une partie de l'oxygène dissous. L'objectif du dimensionnement est donc de définir τ_{plane} , $k_l a_{tank}$ et f_{dark} tels que l'accumulation d'oxygène ne soit pas trop importante et que la boucle de recirculation élimine au mieux l'oxygène produit sur le plan.

Dans un premier temps, pour calculer le temps de passage maximal sur le plan, il est supposé que la fraction sombre du réacteur évacue suffisamment d'oxygène pour que le liquide introduit sur le plan soit en équilibre avec l'air atmosphérique (i.e. la concentration en oxygène dissous est de 8 mg.L⁻¹). L'évolution de la concentration en oxygène le long d'un plan infini est calculée avec l'Équation 2.62 et les paramètres précédemment définis (voir Figure 4.23).

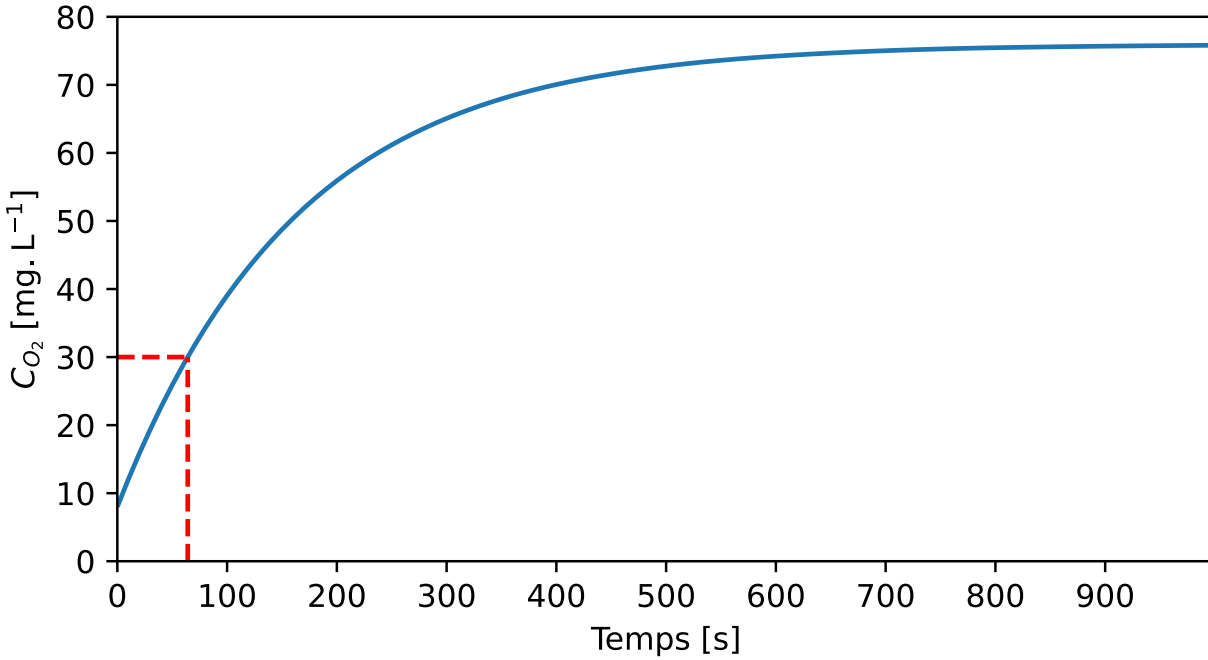


FIGURE 4.23 – Évolution de la concentration en oxygène dans le milieu de culture en fonction du temps passé sur le plan.

La Figure 4.23 montre que l'oxygène s'accumule dans le milieu de culture le long du plan incliné (comme observé par Rearte et al. (2021)). La concentration converge vers un équilibre calculé par l'Équation 2.62 :

$$\frac{dC_{O_2-plane}}{dt} = \langle r_{O_2-plane} \rangle + k_l a_{plane} \cdot (C_{O_2-eq} - C_{O_2}) = 0 \quad (4.5)$$

$$C_{O_2} = \frac{\langle r_{O_2-plane} \rangle}{k_l a_{plane}} + C_{O_2-eq} = 74.6 \text{ mg.L}^{-1} \quad (4.6)$$

D'après la Figure 4.23, la concentration maximale acceptée (30 mg.L^{-1}) est atteinte au bout de 64 s. Cela correspond à la valeur maximale de τ_{plane} d'un Algofilm idéal, puisque dépasser ce temps d'exposition à la lumière induit une suraccumulation d'oxygène dans le milieu de culture. La contrainte 2 impose que la fraction sombre du réacteur ne dépasse pas 18% du volume. Dans un premier temps, cette valeur est utilisée pour les calculs de $k_l a_{tank}$. Cela implique que les microalgues passent au maximum 18% du temps dans la boucle sombre du PBR. Le temps de passage maximal dans l'échangeur de gaz est donc de :

$$\tau_{tank} = \frac{f_{dark} \cdot \tau_{plane}}{1 - f_{dark}} = \frac{0.18 \cdot 64}{1 - 0.18} = 14 \text{ s} \quad (4.7)$$

L'échangeur de gaz doit donc réduire la concentration en oxygène de 30 mg.L⁻¹ (concentration en sortie du plan) à 8 mg.L⁻¹ (concentration en entrée du plan) en 14 s.

Soit une fonction $f_{C_{O_2}}(k_l a_{tank})$ qui donne la concentration en oxygène en sortie de la boucle de recirculation en fonction du $k_l a_{tank}$ (Équation 2.62). La valeur minimale de ce paramètre permettant de ne pas suraccumuler l'oxygène dans le milieu de culture est donné par l'Équation 4.8 :

$$\begin{aligned} f_{C_{O_2}}(k_l a_{tank}) - 8 \times 10^{-3} &= 0 \\ \Rightarrow k_l a_{tank} &= 0.19 \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Ce résultat montre que, même avec la fraction sombre maximale acceptée (i.e. avec le maximum de temps dans la zone sombre), le $k_l a_{tank}$ nécessaire pour réduire la concentration en oxygène au niveau voulu dans le temps imparti n'est pas réaliste (15 fois plus important que le $k_l a_{tank}$ maximal accepté).

Pour éliminer l'oxygène accumulé sur le plan avec un $k_l a_{tank}$ réaliste, il faut augmenter le temps de passage dans la boucle de recirculation pour dégazer plus d'oxygène. Deux solutions sont possibles. Soit le τ_{plane} est augmenté (fraction sombre constante), les microalgues sont cependant soumises à de hautes concentration en oxygène. Soit la fraction sombre est augmentée (longueur de plan inchangée) mais cela dégrade la productivité en microalgues du réacteur.

La première solution semble plus viable dans le cadre d'une montée en échelle car augmenter la longueur du plan (et donc le temps de passage sur celui-ci) permet de simplement augmenter la surface de captation du réacteur. En conclusion, l'exposition de la culture à de fortes concentrations en oxygène dissous est alors une caractéristique intrinsèque à la technologie Algofilm. Ces résultats montrent qu'il n'est pas possible, a priori, de concevoir un Algofilm performant qui, dans les conditions testées, n'ait pas une concentration en oxygène dissous qui dépasse 30 mg.L⁻¹. Les performances de la technologie Algofilm sont donc limitées par sa capacité à échanger des gaz.

4.4.3 Simulation de la concentration en oxygène

Comme montré précédemment, une conception réaliste d'Algofilm ne permet pas de contrôler la concentration en oxygène dissous tel que la productivité ne soit pas impactée. Elle permet néanmoins, via les paramètres τ_{plane} , $k_{l}a_{tank}$ et f_{dark} , d'influencer le profil de concentration auquel les microalgues sont exposées. L'évaluation de cette influence est l'objet de cette seconde partie de l'étude.

4.4.3.1 Influence du $k_{l}a_{tank}$ sur le profil de concentration en oxygène

Dans le cadre de la gestion de l'oxygène dissous, le rôle de la boucle de recirculation est d'évacuer le plus d'oxygène possible en un minimum de temps. La valeur du $k_{l}a_{tank}$ a ici un rôle central puisque les échanges de gaz nécessaires à l'évacuation de l'oxygène dissous dépendent de ce paramètre. Cependant, améliorer les échanges de gaz peut être complexe, surtout si le temps de passage dans la boucle de recirculation est court. Pour déterminer si un effort d'ingénierie permet une réduction significative de la concentration en oxygène, l'influence de la valeur du $k_{l}a_{tank}$ sur la concentration en oxygène est étudiée ici.

Une première simulation testant différents $k_{l}a_{tank}$ a été menée et est présentée par la Figure 4.24. Trois $k_{l}a$ sont testés : $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (la valeur maximale rapportée par Kazbar et al. (2019)), $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (un dixième de la valeur précédente) et $7.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (la moyenne des deux valeurs précédentes). Dans toutes les configurations, le τ_{plane} est fixé à 180 s, soit un plan plus long que le pilote 10 m^2 (avec une vitesse d'écoulement de référence de 10 cm.s^{-1} , cela correspond à un plan de 18 m). Le volume de la fraction sombre correspond à 10% du volume total, le temps de passage dans la boucle de recirculation est donc de 20 s. Au début de la simulation, l'oxygène est à l'équilibre avec l'air (la concentration est de 8 mg.L^{-1}).

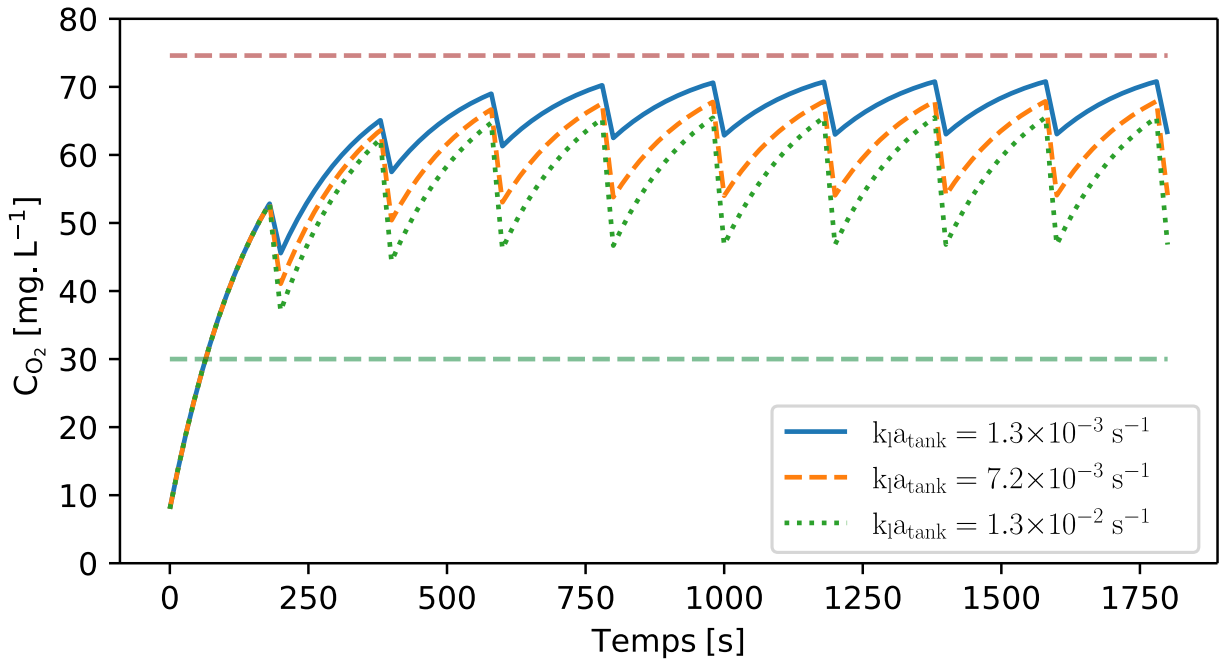


FIGURE 4.24 – Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm pour différents $k_l a_{\text{tank}}$.

La Figure 4.24 montre que dès le début de la simulation, la concentration en oxygène augmente rapidement puis se met à osciller autour d'une valeur moyenne au gré du passage des microalgues sur le plan ou dans la boucle de recirculation. Ici, augmenter le $k_l a_{\text{tank}}$ diminue la concentration moyenne en oxygène dissous et augmente l'amplitude des oscillations. Les concentrations minimales, maximales et moyennes atteintes par la culture (après stabilisation des oscillations) sont reportées dans la Table 4.4.

$k_l a_{\text{tank}}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$7.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	$1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$
minimum	62.9 mg.L^{-1}	54.0 mg.L^{-1}	46.8 mg.L^{-1}
maximum	70.8 mg.L^{-1}	67.9 mg.L^{-1}	65.5 mg.L^{-1}
moyenne	67.5 mg.L^{-1}	62.0 mg.L^{-1}	57.7 mg.L^{-1}

TABLE 4.4 – Valeurs minimales, maximales et moyennes de la concentration en oxygène dissous dans le PBR en fonction du $k_l a_{\text{tank}}$. Seules les oscillations à l'équilibre sont prises en compte.

La Table 4.4 montre qu'augmenter $k_l a_{\text{tank}}$ d'un facteur 10 réduit la concentration en oxygène dissous en sortie de la boucle de recirculation de 16.1 mg.L^{-1} . En revanche, sur le plan, la productivité en oxygène des microalgues est telle que cette baisse de la

concentration en entrée se répercute peu sur la concentration en sortie (-5.3 mg.L^{-1}). Cet effet s'accroît lorsque le plan est allongé, la Figure 4.25 donne l'évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm dans les mêmes conditions que précédemment mais avec une valeur de τ_{plane} de 750 s.

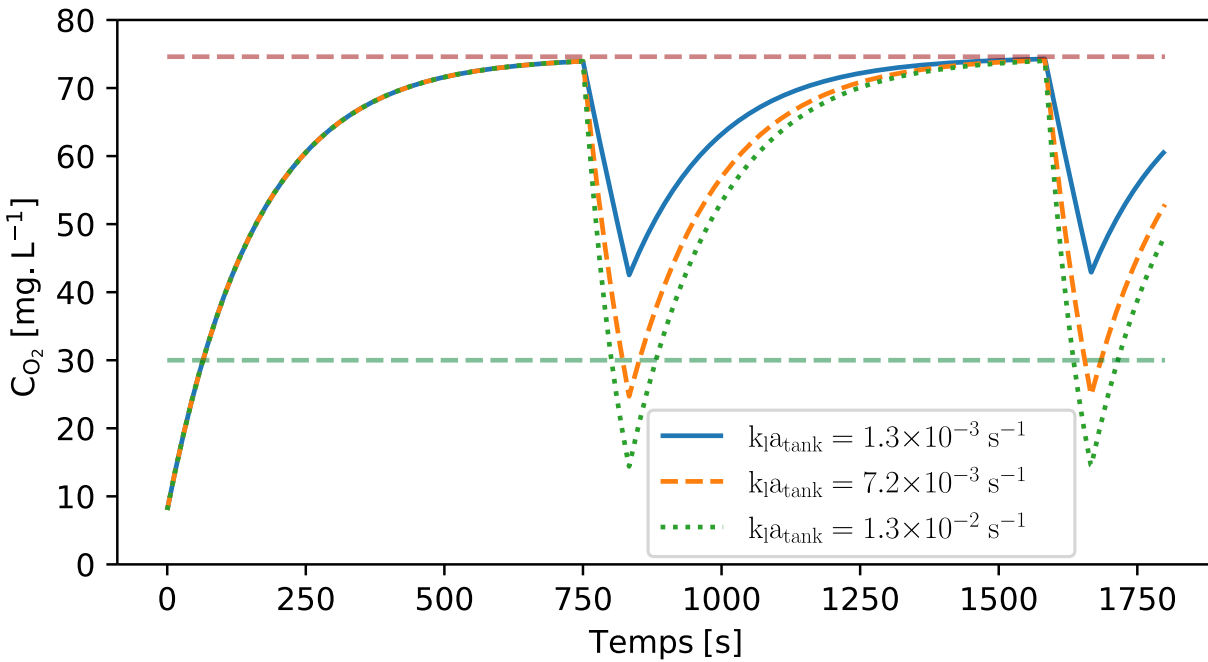


FIGURE 4.25 – Évolution de la concentration en oxygène dissous dans le milieu de culture en fonction du $k_l a_{tank}$. La fraction sombre est de 10% et le τ_{plane} de 750 s.

Dans cette nouvelle configuration, augmenter la valeur de τ_{plane} avec f_{dark} constant permet d'augmenter le temps de passage dans la zone sombre et de dégazer plus d'oxygène. Cependant, la Figure 4.25 montre qu'augmenter $k_l a_{tank}$ permet seulement de réduire la concentration minimale atteinte en sortie de la zone sombre. Dans tous les cas, la concentration en sortie du plan est proche de la concentration à l'équilibre (74.6 mg.L^{-1}).

Ainsi, lors de la conception d'un Algofilm à grande échelle, l'augmentation du temps de passage sur le plan implique que la concentration d'équilibre soit atteinte du fait de la productivité volumique importante (en biomasse et en oxygène). Des niveaux élevés d'oxygène dissous sont alors rapidement atteints sur le plan. Travailler sur l'augmentation du $k_l a_{tank}$ ne permet alors que réduire la concentration en sortie de la boucle de recirculation.

4.4.3.2 Influence de la longueur du plan

La montée en échelle du photobioréacteur Algofilm revient à une augmentation sa surface de captation. Un moyen simple d'y parvenir est l'élongation du plan incliné. Cela implique cependant une augmentation de la valeur τ_{plane} . Les Figures 4.24 et 4.25 montrent que ce paramètre a une influence significative sur le profil de concentration en oxygène dissous subit par la culture. Cette influence est étudiée par une nouvelle série de simulations. Ici, le $k_l a_{tank}$ et le f_{dark} sont fixés à $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ et 0.1 respectivement. Les résultats sont présentés par la Figure 4.26.

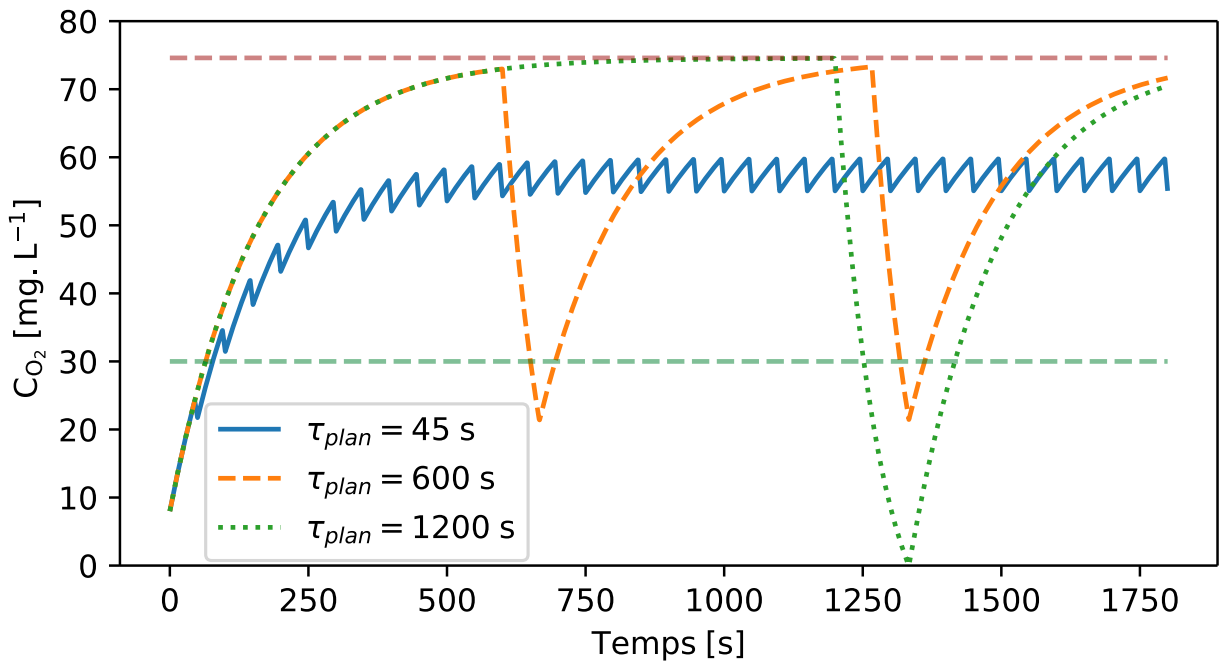


FIGURE 4.26 – Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm en fonction de la longueur du plan. La fraction sombre est de 10% et le $k_l a_{tank}$ de 1.3×10^{-2} .

La Figure 4.26 met en évidence l'influence du τ_{plane} sur l'accumulation d'oxygène dans le milieu de culture. Lorsque le temps de passage sur le plan est court, la concentration en oxygène dissous oscille rapidement autour d'une concentration moyenne. Une mesure locale de cette concentration est alors représentative de la concentration globale du réacteur. Ici, les microalgues sont en permanence exposées à des conditions stressantes. Allonger le plan d'écoulement augmente l'amplitude des oscillations, la concentration d'équilibre (74.6 mg.L^{-1}) est alors atteinte. Les microalgues sont donc exposées à de très hautes concentrations en oxygène dissous. En revanche, la boucle de recirculation permet

de retirer une grande partie de l'oxygène accumulé sur le plan. Les microalgues sont alors temporairement dans les conditions de culture ciblées.

Le modèle de croissance utilisé ne permet pas de discerner lequel de ces deux scénarios est le plus favorable à la croissance microalgale. Cependant, dans l'objectif de concevoir un Algofilm avec une grande surface de captation, avoir un τ_{plane} faible est techniquement compliqué à réaliser : cela implique d'avoir un plan très court et très large sur lequel la distribution du milieu de culture devient un défi technique. La seconde option semble donc plus réaliste. L'enjeu du dimensionnement n'est alors plus de prévenir l'apparition de très fortes concentrations en oxygène le long du plan mais de concevoir une boucle de recirculation qui puisse retirer tout cet oxygène accumulé. Cela permet ainsi d'assurer que les microalgues passent par une phase à faible concentration en oxygène et ne soient pas constamment soumises à des conditions stressantes.

Dans le cas $\tau_{plane} = 1200$ s, le milieu de culture introduit sur le plan est dépourvu d'oxygène. Cela met en évidence l'importance de la respiration microalgale sur la réduction de la concentration en oxygène dissous. Ici, l'aération de la fraction sombre se fait avec de l'air. Ainsi, lorsque la concentration en oxygène dans le liquide est inférieure à 8 mg.L^{-1} , ces échanges de gaz apportent de l'oxygène à la culture. Cependant, le $k_{l}a_{tank}$ étant faible, la consommation d'oxygène par la respiration microalgale est supérieure à l'apport : tout l'oxygène finit donc par être consommé. Ainsi, pour que la fraction sombre du réacteur puisse retirer l'oxygène du milieu de culture, puisque la valeur du $k_{l}a_{tank}$ est contrainte par la physique des échange de gaz, il faut utiliser au mieux la respiration microalgale. Puisque ce phénomène n'est pas dépendant de la conception de la boucle de recirculation, seul un temps de passage suffisamment long peut permettre de désoxygéner le milieu de culture.

Une analyse des données de simulation montre que dans les conditions étudiées, 133 secondes sont nécessaires pour retirer les 74.6 mg.L^{-1} d'oxygène accumulés sur le plan. Pour que la fraction sombre ne dépasse pas 18%, il est donc nécessaire que le temps de passage soit au minimum de $\tau_{plane} = \frac{\tau_{tank} - f_{dark} \cdot \tau_{tank}}{f_{dark}} = 606$ s.

4.4.3.3 Effet de la zone sombre sur la concentration en oxygène

Les simulations précédentes ont démontré qu'un temps de passage important dans la zone sombre est nécessaire pour permettre de désoxygéner le milieu de culture. Pour limiter la fraction de volume que représente la boucle de recirculation, il est donc nécessaire d'avoir un grand plan d'écoulement. Cependant, l'espace disponible pour l'implémentation

du réacteur peut être limité. Imposer un τ_{tank} suffisant induit alors une fraction sombre importante. Le paramètre f_{dark} permet donc de faire un compromis entre la perte de productivité, due à la fraction sombre, ou due à la présence d'oxygène dissous.

Une dernière série de simulations étudie le profil de concentration en oxygène dissous en fonction de la fraction sombre du réacteur. Ici, le cas de référence est la configuration minimale déterminée précédemment ($\tau_{plane} = 606$ s et $f_{dark} = 0.18$). Deux autres fractions sombres sont simulées ($f_{dark} = 0.1$ et $f_{dark} = 0.05$). Dans tous les cas, $k_l a_{tank}$ est fixé à $1.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Les résultats des simulations sont présentés par la Figure 4.27.

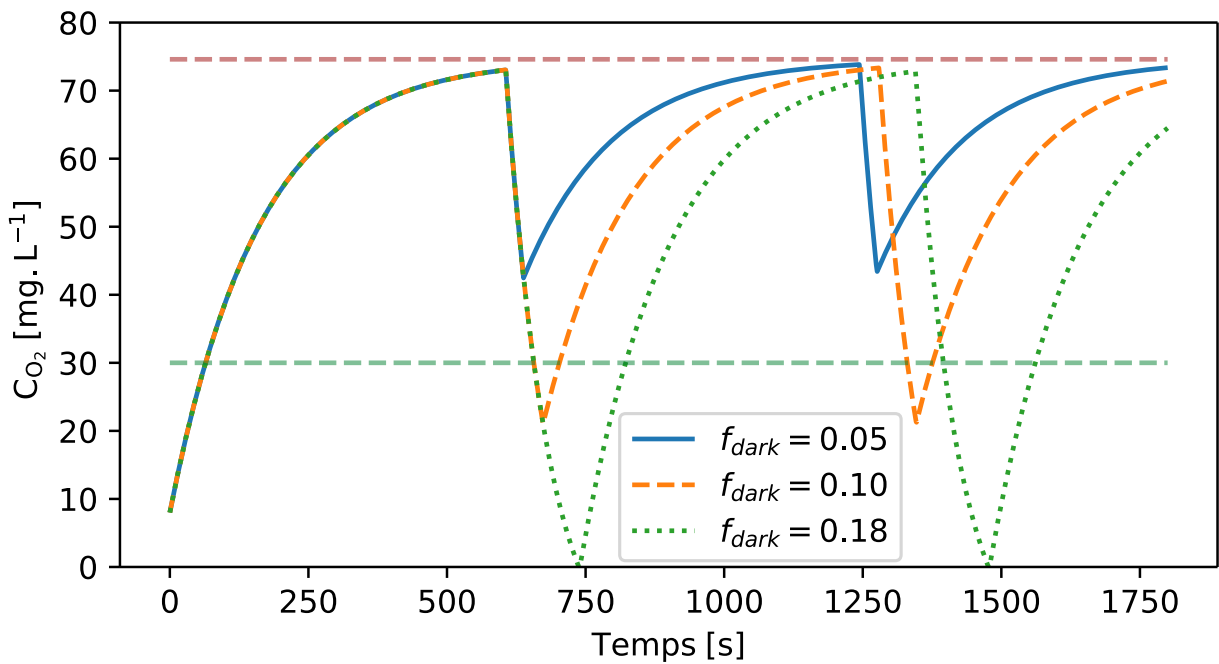


FIGURE 4.27 – Évolution de la concentration en oxygène dans Algofilm en fonction de la fraction sombre. Le τ_{plane} est ici de 606 s et le $k_l a_{tank}$ de $1.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

La Figure 4.27 montre qu'augmenter la fraction sombre du réacteur a un impact significatif sur le profil de concentration en oxygène dissous. Augmenter la valeur de ce paramètre permet de réduire davantage cette concentration en entrée du plan d'écoulement. Dans toutes les configurations testées, une concentration proche de la concentration d'équilibre est cependant atteinte.

Cela montre que le choix du paramètre f_{dark} est un point clef du dimensionnement d'un système Algofilm. Chercher à maximiser la productivité du réacteur impose de minimiser cette fraction, alors que la contrainte de l'espace disponible et la nécessité d'accorder un temps suffisant pour les échanges de gaz de la boucle de recirculation tendent à l'augmen-

ter. Un compromis est donc à nouveau nécessaire. Cependant, le modèle de croissance utilisé ici ne prend pas en compte l'impact de la concentration en oxygène dissous sur la croissance microalgale. Ainsi, tant que cette influence n'est pas intégrée au modèle, puisque la présence d'oxygène n'est pas létale pour les microalgues, il est préférable de chercher à minimiser la fraction sombre du réacteur dont les effets sur la croissance sont connus et prévus.

4.4.4 Conclusion sur la conception d'un système à faible concentration en oxygène dissous

Le modèle de croissance utilisé prédit une forte accumulation d'oxygène dans le milieu de culture au cours de son passage sur le plan d'Algofilm. Ce résultat est cohérent avec les mesures faites dans la Section 3.2.2.3 et la littérature. En variant trois paramètres (τ_{plan} , $k_{la_{tank}}$ et f_{dark}), cette étude s'est intéressée au dimensionnement d'un Algofilm qui maîtriserait la concentration en oxygène dissous. Cependant, cela aboutit à une conception incompatible avec un objectif de montée en échelle et une contrainte de performance : le réacteur a un plan très court et un f_{dark} très élevé. Le procédé de culture de microalgues en photobioréacteur intensifié type Algofilm est donc limité par sa capacité à échanger des gaz avec le milieu de culture.

L'impact des trois paramètres sur le profil d'oxygène dissous rencontré par les microalgues a ensuite été étudié. L'importance de la contribution de la respiration microalgale pour désoxygéner le milieu de culture a été démontrée. Pour réduire la concentration en oxygène dissous, il est donc avant tout nécessaire d'avoir un temps de passage suffisant dans la boucle de recirculation. Afin que le volume sombre ne représente pas une fraction sombre trop importante, une longueur de plan minimale est nécessaire. Cela permet aux microalgues de passer par une phase faiblement oxygénée et donc, a priori, de réduire les effets de l'oxygène dissous sur leur croissance. Cependant, puisque le temps de passage sur le plan est long, leur exposition régulière à de très hautes concentrations en oxygène dissous est inévitable.

Le modèle utilisé dans cette étude ne permet pas de prédire l'impact du profil de concentration en oxygène dissous sur la croissance des microalgues. Une telle modélisation serait une avancée majeure pour l'optimisation du fonctionnement du réacteur. Cela permettrait de rationnellement prendre en compte ce paramètre lors du dimensionnement du système.

Conclusion

Dans le contexte du réchauffement climatique, la conception de procédé à très faible consommation énergétique devient une nécessité. Dans le cas de la production de microalgues en photobioréacteur, l'un des principaux postes de consommation est la gestion de la température. Ce chapitre a donc étudié, par simulation, pour le système Algofilm, trois solutions potentielles permettant de passivement contrôler cette température. Tout d'abord, le couplage entre le photobioréacteur et un panneau photovoltaïque semi-transparent a été exploré. Cette solution cherche à coproduire de la biomasse et de l'électricité, tout en réduisant la consommation énergétique liée au refroidissement du PBR grâce au contrôle la puissance lumineuse qu'il absorbe. Les simulations montrent que ces objectifs sont atteints, mais également qu'il est nécessaire de davantage chauffer le réacteur que de le refroidir. Pour résoudre ce problème, il est pertinent que le PBR puisse stocker la chaleur captée le jour pour maintenir sa température la nuit. La seconde partie de ce chapitre s'est donc consacrée à l'étude par simulation du potentiel de l'inclusion de matériaux à changement de phase dans le support du réacteur. Les simulations montrent que ces matériaux permettent de réduire la variabilité de la température du milieu de culture au cours de la journée. Ainsi, le jour, le risque de surchauffe du réacteur est réduit, et la nuit, sa température est maintenue. Enfin, la troisième section de ce chapitre s'est intéressée à l'utilisation combinée des panneaux photovoltaïques semi-transparents et des matériaux à changement de phase. Le système obtenu n'est pas thermiquement passif mais est proche d'être autosuffisant. Cela démontre que la conception d'un PBR totalement passif nécessitera certainement l'intégration de plusieurs solutions. Les modèles développés au Chapitre 2 sont alors des outils précieux à cette fin.

Ce chapitre s'est également intéressé à l'optimisation des conditions de culture via le contrôle de la concentration en oxygène dissous (un autre paramètre important des photobioréacteurs intensifiés). Les simulations menées montrent que l'aération du milieu de culture dans la boucle sombre ne permet pas de compenser la forte productivité en oxygène de la partie éclairée du réacteur. L'exposition des microalgues à de hautes concentrations en oxygène dissous est donc une caractéristique intrinsèque de ce procédé. Si cet oxygène affecte l'activité photosynthétique, un réacteur de type Algofilm sera donc limité par sa capacité d'échange gaz-liquide.

Au final, ces trois études ont cherché à concevoir un réacteur qui garantit des conditions de culture adéquates pour les microalgues en limitant la consommation de ressources.

Cependant, il s'est avéré que la conception optimisée d'un système Algofilm, du fait de ses performances élevées, nécessite des compromis, que ce soit pour la gestion de la température ou de l'oxygène dissous. Le modèle de croissance utilisé ne prend pas en compte l'influence de ces paramètres sur la productivité du système. Une telle modélisation permettrait de proportionner les moyens mis en œuvre afin de trouver le meilleur compromis et serait donc une avancée majeure.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTM (2012), « Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 : Direct Normal and Hemispherical on 37 Degree Tilted Surface », in : American Society for Testing and Materials West Conshohocken, USA.
- Bonnanfant, M. (2020), « Étude Des Mécanismes de Conversion Photosynthétique de l'énergie Lumineuse Par *Chlorella Vulgaris* En Photobioréacteur Solaire », URL : <http://www.theses.fr/2020LEMA1015/document>.
- Goetz, V. et al. (nov. 2011), « A Generic Temperature Model for Solar Photobioreactors », in : *Chemical Engineering Journal* 175, p. 443-449, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2011.09.052.
- Kazbar, A. et al. (mai 2019), « Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Microalgal Culture in Photobioreactors », in : *Algal Research* 39, p. 101432, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2019.101432.
- Kazbar, A. (2018), « Etude de l'impact de La Concentration En Oxygène Dissous et La Présence d'une Fraction Sombre Sur La Performance Des Photobioréacteurs », URL : <http://www.theses.fr/2018NANT4007/document>.
- Le Borgne, F. (2011), « Développement d'un photobioréacteur solaire intensifié en vue de la production à grande échelle de biomasse microalgale », Université de Nantes, 1 vol. (291 f.)
- Nwoba, E. G. et al. (mai 2019), « Can Solar Control Infrared Blocking Films Be Used to Replace Evaporative Cooling for Growth of *Nannochloropsis* Sp. in Plate Photobioreactors? », in : *Algal Research* 39, p. 101441, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2019.101441.
- Parlevliet, D. et N. Moheimani (2014), « Efficient Conversion of Solar Energy to Biomass and Electricity », in : *Aquatic Biosystems* 10.1, p. 4, ISSN : 2046-9063, DOI : 10.1186/2046-9063-10-4.
- Pruvost, J. et al. (jan. 2016), « Microalgae Culture in Building-Integrated Photobioreactors : Biomass Production Modelling and Energetic Analysis », in : *Chemical Engineering Journal* 284, p. 850-861, ISSN : 13858947, DOI : 10.1016/j.cej.2015.08.118.

-
- Rearte, T. A. et al. (avr. 2021), « Photosynthetic Performance of *Chlorella Vulgaris* R117 Mass Culture Is Moderated by Diurnal Oxygen Gradients in an Outdoor Thin Layer Cascade », in : *Algal Research* 54, p. 102176, ISSN : 22119264, DOI : 10.1016/j.algal.2020.102176.
- Skoplaki, E. et J. Palyvos (jan. 2009), « Operating Temperature of Photovoltaic Modules : A Survey of Pertinent Correlations », in : *Renewable Energy* 34.1, p. 23-29, ISSN : 09601481, DOI : 10.1016/j.renene.2008.04.009.
- Souliès, A. et al. (mars 2016), « Investigation and Modeling of the Effects of Light Spectrum and Incident Angle on the Growth of *Chlorella Vulgaris* in Photobioreactors », in : *Biotechnology Progress* 32.2, p. 247-261, ISSN : 87567938, DOI : 10.1002/btpr.2244.
- Todisco, É. (2019), « Microalgae Growth Optimization in Biofaçade Photobioreactors ».
- Young, B. A. et al. (août 2017), « Early-Age Temperature Evolutions in Concrete Pavements Containing Microencapsulated Phase Change Materials », in : *Construction and Building Materials* 147, p. 466-477, ISSN : 09500618, DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.150.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le réchauffement climatique impose de réduire drastiquement l’empreinte des activités humaines sur l’environnement, et en particulier la consommation d’énergies fossiles qui émettent de grandes quantités de CO_2 . Pour les remplacer, des vecteurs énergétiques alternatifs sont développés et la transformation de biomasse microalgale en biocarburants est l’une des solutions envisagées.

La production à moindre coût et à grande échelle de cette biomasse requiert la conception, le développement et l’optimisation de procédés de culture spécifiques. Cependant, comme tous les procédés, la culture et le bioraffinage de microalgues consomme des ressources (eau et énergie notamment). Pour que la production de biocarburants à partir de microalgues soit viable, il est nécessaire d’intensifier le procédé de culture pour maximiser la productivité tout en minimisant les coûts.

Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit avaient donc pour objectif de modéliser, valider et optimiser un procédé de culture de microalgues solaire, intensifié en volume et sobre. Pour cela, la technologie Algofilm présente un intérêt majeur. Elle vise à cultiver des microalgues sur une très faible épaisseur (quelques millimètres) en faisant ruisseler le milieu de culture sur un plan incliné. La très grande surface spécifique éclairée ainsi obtenue permet, selon les principes fondamentaux de l’ingénierie des photobioréacteurs, d’obtenir un procédé intensifié en volume hautement performant. De plus, cela augmente mécaniquement la concentration en biomasse ce qui facilite les procédés de bioraffinage et réduit également leurs consommations énergétiques. Enfin, le principe de fonctionnement simple de la technologie permet d’envisager son déploiement à large échelle.

Ces travaux de thèse se sont appuyés sur un ensemble d’outils mathématiques. La culture circulant dans le photobioréacteur Algofilm est couverte d’un vitrage dont la transmittance conditionne la quantité de lumière reçue par les microalgues, et donc la productivité du système. Pour pouvoir rationnellement choisir ce composant essentiel, un modèle permettant de calculer cette transmittance en fonction de la structure du vitrage et de la présence de gouttelettes a été présenté. Une fois la lumière reçue par la culture

déterminée, un modèle de transfert radiatif couplé à un modèle de croissance permet de prédire l'évolution de la concentration en biomasse microalgale et les performances du réacteur.

Cette croissance est également influencée par des facteurs autres que la lumière qu'un procédé optimisé doit chercher à maîtriser. Dans le cas d'une culture intensifiée, la haute productivité volumique en biomasse induit une importante productivité en oxygène (issu de la photosynthèse) qui s'accumule dans le milieu de culture. Cet oxygène a un impact négatif sur l'activité photosynthétique des microalgues et donc sur leur croissance. L'évolution de cette concentration a donc été modélisée par des équations dérivées du modèle de croissance. De même, les microalgues ne se développent que dans un intervalle restreint de températures. Le comportement thermique du photobioréacteur Algofilm 10 m² a donc également été modélisé. Ce modèle est capable de prédire, en fonction des conditions météorologiques et de la conception du photobioréacteur, la température du milieu de culture. Enfin, un modèle de production photovoltaïque, nécessaire à deux études réalisées au cours de la thèse, a été présenté.

L'épaisseur de la culture, paramètre central du fonctionnement d'Algofilm, est fortement influencée par la qualité de l'écoulement liquide sur le plan incliné. Grâce à des solutions simples, cet écoulement liquide a pu être homogénéisé sur le pilote Algofilm de 10 m² implanté sur la plateforme Algosolis. L'épaisseur de culture a ensuite été estimée entre 3.5 mm et 4.5 mm, ce qui est compatible avec les hautes productivités volumiques recherchées.

Deux campagnes expérimentales visant à valider les hautes performances promises par la faible épaisseur de liquide ont été réalisées. Ces cultures se sont déroulées durant les périodes estivales de 2020 et 2021 et ont été assistées par les modèles du Chapitre 2. Grâce aux prédictions de Météofrance et au modèle de transfert radiatif, une stratégie de lancement maîtrisée a été développée et testée. Elle permet, en ombrant la culture de façon contrôlée, d'assurer sa viabilité même lorsque la concentration en biomasse est trop faible et induit un stress lumineux potentiellement létal pour les microalgues. Une stratégie simple de contrôle prédictif a également été développée et testée. Le taux de renouvellement de la culture était déterminé en fonction des prévisions de Météofrance et des prédictions du modèle de croissance. Au cours de ces campagnes expérimentales, de très hautes concentrations (jusqu'à 10.1 g.L⁻¹) et des productivités volumiques élevées (jusqu'à 5.6 g.L⁻¹.jour⁻¹) ont été atteintes. Cela démontre la capacité de la technologie Algofilm à délivrer de très hautes performances en conditions solaires. Cette section illustre

également comment les modèles développés permettent de rationaliser et d'optimiser le pilotage du procédé de culture.

Le modèle thermique développé a également pu être validé par deux campagnes expérimentales. Pour cela, les prédictions du modèle ont été comparées aux mesures réalisées sur le pilote. La concordance entre ces deux séries de données a permis de conforter les hypothèses simplificatrices du modèle ainsi que ses prédictions. Le modèle a donc été considéré valide ce qui a permis de rechercher rapidement, par simulation, des solutions originales d'optimisation du comportement thermique du réacteur.

Le couplage entre un panneau photovoltaïque semi-transparent et le prototype de 0.33 m^2 a été étudié. L'objectif était de prévenir la surchauffe du réacteur via le filtrage sélectif de certaines longueurs d'onde inutiles à la croissance microalgale. De plus, cela permet de coproduire de l'électricité grâce à la lumière absorbée par le panneau photovoltaïque. Cependant, cette étude démontre que, dans le cas de ce prototype, le principal poste de dépense énergétique est lié au chauffage du réacteur (notamment la nuit). Ainsi, le couplage entre les deux systèmes ne permet pas de réduire les consommations énergétiques de la régulation thermique comme souhaité. Pour limiter ce besoin, il est nécessaire de réduire les pertes thermiques en isolant le photobioréacteur de l'environnement extérieur.

Des campagnes expérimentales ont montré que la température du milieu de culture est principalement influencée par celle de la dalle de béton. L'optimisation de son comportement thermique est donc d'un intérêt majeur pour contrôler passivement la température de la culture. Pour cela, l'inclusion de matériaux à changement de phase a été proposée et simulée. L'intérêt de ces matériaux réside dans leur capacité à stocker de grandes quantités de chaleur sous forme latente. Cette chaleur est captée le jour pour limiter l'échauffement du photobioréacteur et relâchée la nuit pour maintenir sa température. Cette étude en simulation montre que ces matériaux influencent positivement la température du milieu de culture. Leur utilisation peut donc amener à des économies supplémentaires d'énergie.

La présence de la dalle de béton sous le milieu de culture du pilote 10 m^2 permet de réduire les pertes de chaleur vers l'environnement extérieur. De plus, l'inclusion de matériaux à changement de phase dans ce support permet de stocker de la chaleur qui a fait défaut lors de l'étude du prototype 0.33 m^2 . L'utilisation combinée de ces deux technologies est donc intéressante et a été étudiée. Le photobioréacteur ainsi obtenu n'est toujours pas passif : de l'énergie doit être apportée ou retirée au système pour le maintenir dans l'intervalle de consigne. Cependant, la production électrique permise par ce système

hybride est, dans certains cas, suffisante pour permettre la conception d'un système auto-suffisant. Ces résultats encourageants montrent que la conception d'un procédé de culture intensifié et sobre est possible grâce à la combinaison de technologies passives de régulation de la température. Les modèles mathématiques sont alors des outils précieux permettant de tester rapidement différentes combinaisons pour déterminer la meilleure configuration.

Enfin, pour optimiser les conditions de culture et la productivité du procédé, l'impact des différents choix de conception sur l'évolution de la concentration en oxygène au sein du réacteur a finalement été étudié. Il en a été conclu que la productivité volumique importante des microalgues due à l'intensification en volume amène nécessairement à de hautes concentrations en oxygène dissous.

L'ensemble des résultats des Chapitres 3 et 4 montrent que les modèles mathématiques développés au Chapitre 2 sont des outils puissants pour rationnellement concevoir et piloter un procédé de culture sobre et performant. De nombreux facteurs ne sont cependant pas pris en compte. Par exemple, le modèle de croissance n'intègre ni la température ni la concentration en oxygène dissous dans ses équations. Ainsi, bien que les études du Chapitre 4 appellent à faire des compromis sur la conception vis à vis de ces deux critères, les modèles ne permettent pas de pleinement mesurer l'impact des différentes décisions. L'intégration de ces différents facteurs serait donc une amélioration pertinente des modèles et permettrait d'affiner les compromis choisis.

La conception du pilote Algofilm 10 m² laisse présager de ce à quoi pourrait ressembler la technologie Algofilm à une plus grande échelle. Cependant, le passage d'une échelle à l'autre met souvent en lumière de nombreux verrous qu'il est nécessaire de lever. Par exemple, le passage de 0.33 m² à 10 m² a révélé de nombreuses difficultés techniques dont la répartition homogène du film liquide. Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts engagés dans la conception d'un Algofilm à très grande échelle. Cette réflexion est déjà en cours au laboratoire GEPEA, et la construction d'un nouveau pilote de 60 m² intégrant des optimisations présentées dans cette thèse est prévue.

La technologie Algofilm seule, bien que prometteuse, n'est qu'une solution partielle aux verrous scientifiques et technologiques posés par la production viable et à grande échelle de biocarburants. L'intégration fine entre le procédé de culture intensifié et les procédés de bioraffinage doit encore être étudiée.

Enfin, pour que ce procédé s'inscrive pleinement dans une démarche de sobriété, une Analyse de Cycle de Vie (ACV) doit être réalisée afin de caractériser la quantité de biomasse produite et les ressources consommées. Afin de rendre ces analyses favorables,

il serait également pertinent d'intégrer le procédé de culture dans une logique d'écologie industrielle où les déchets des autres procédés (CO₂ et chaleur fatale notamment) sont utilisés pour la croissance des microalgues. Une telle intégration est à l'étude au sein du projet Cimentalgue, où un système de type Algofilm va être construit et raccordé à une cimenterie.

DEMONSTRATION D'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

Considérons trois milieux d'indices de réfraction n_1 , n_2 et n_3 ainsi que deux dioptries les séparant, de vecteur normal unitaire \vec{n} et \vec{m} tels que $\vec{n} \perp \vec{m}$ (voir Figure A.1).

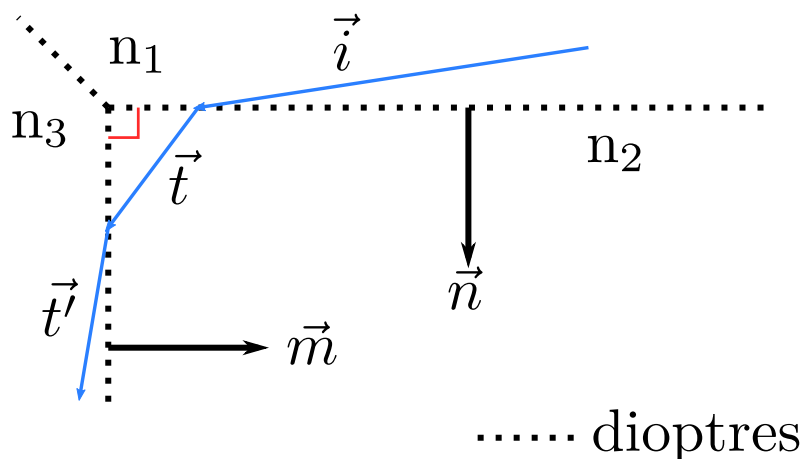


FIGURE A.1 – Exemple de configuration où deux dioptries perpendiculaires séparent trois milieux d'indice de réfraction différents.

Démontrons que l'existence de rayons traversant les deux dioptries nécessite $\frac{n_1^2 + n_3^2}{n_2^2} \geq 1$.

La loi de Snell-Descartes est décrite sous forme algébrique dans la section 2.3.2.1. Elle peut cependant également être exprimée sous forme vectorielle (Mik et Novák 2012) :

$$n_1(\vec{i} \times \vec{n}) = n_2(\vec{t} \times \vec{n}) \quad (\text{A.1})$$

avec \vec{t} le vecteur directeur unitaire du rayon réfracté issu de \vec{i} le vecteur directeur unitaire du rayon incident sur le dioptre de vecteur normal unitaire \vec{n} .

L'équation peut être réarrangée sous la forme (Mik et Novák 2012) :

$$\vec{t} = \vec{n} \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(1 - (\vec{i} \cdot \vec{n})^2\right)} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (\vec{i} - \vec{n} (\vec{i} \cdot \vec{n})) \quad (\text{A.2})$$

Cette équation est valide si et seulement si l'expression sous la racine est positive ou nulle. Dans le cas contraire, l'absence de solution signifie que le rayon incident est totalement réfléchi par le dioptre (il n'y a donc pas de rayon réfracté).

Le rayon de vecteur directeur unitaire \vec{t}' issu de la réfraction du rayon \vec{t} par le dioptre \vec{m} a pour expression :

$$\vec{t}' = \vec{m} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \left(1 - (\vec{t} \cdot \vec{m})^2\right)} - \left(\frac{n_2}{n_3}\right) (\vec{t} - \vec{m} (\vec{t} \cdot \vec{m})) \quad (\text{A.3})$$

Comme dit précédemment, ce rayon existe si et seulement si :

$$1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \left(1 - (\vec{t} \cdot \vec{m})^2\right) \geq 0 \quad (\text{A.4})$$

$$(\vec{m} \cdot \vec{t})^2 \geq 1 - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 \quad (\text{A.5})$$

Par ailleurs :

$$\vec{m} \cdot \vec{t} = \vec{m} \cdot \left(\vec{n} \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(1 - (\vec{i} \cdot \vec{n})^2\right)} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (\vec{i} - \vec{n} (\vec{i} \cdot \vec{n})) \right) \quad (\text{A.6})$$

Or $\vec{n} \perp \vec{m}$ donc $\vec{n} \cdot \vec{m} = 0$ ainsi :

$$\vec{m} \cdot \vec{t} = 0 + \frac{n_1}{n_2} (\vec{i} \cdot \vec{m} - 0) \quad (\text{A.7})$$

$$\vec{m} \cdot \vec{t} = \frac{n_1}{n_2} (\vec{i} \cdot \vec{m}) \quad (\text{A.8})$$

$$(\vec{m} \cdot \vec{t})^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\vec{i} \cdot \vec{m})^2 \quad (\text{A.9})$$

Les équations A.6 et A.9 donnent :

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (\vec{i} \cdot \vec{m})^2 = (\vec{m} \cdot \vec{t})^2 \geq 1 - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^2 \quad (\text{A.10})$$

L'existence de rayons incidents \vec{i} sur le dioptre \vec{n} qui permettent de vérifier cette inégalité nécessite :

$$\max \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (\vec{i} \cdot \vec{m})^2 \right) \geq \min \left(1 - \left(\frac{n_3}{n_2} \right)^2 \right) \quad (\text{A.11})$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \max \left((\vec{i} \cdot \vec{m})^2 \right) \geq 1 - \left(\frac{n_3}{n_2} \right)^2 \quad (\text{A.12})$$

Or puisque \vec{i} et \vec{m} sont des vecteurs unitaires :

$$\vec{i} \cdot \vec{m} = \|\vec{i}\| \|\vec{m}\| \cos(\vec{i}, \vec{m}) = \cos(\vec{i}, \vec{m}) \quad (\text{A.13})$$

Donc

$$\max(\vec{i} \cdot \vec{m}) = \max(\cos(\vec{i}, \vec{m})) = 1 \Rightarrow \max \left((\vec{i} \cdot \vec{m})^2 \right) = 1 \quad (\text{A.14})$$

Ainsi

$$\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \geq 1 - \left(\frac{n_3}{n_2} \right)^2 \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{n_1^2 + n_3^2}{n_2^2} \geq 1 \quad (\text{A.16})$$

A noter que dans le cas particulier où $n_1 = n_3$, l'inégalité A.16 devient :

$$\frac{n_1}{n_2} \geq \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.17})$$

En conclusion, l'existence de rayons transmis par deux dioptrés perpendiculaires séparant trois milieux d'indices de réfraction n_1 , n_2 et n_3 nécessite $\frac{n_1^2 + n_3^2}{n_2^2} \geq 1$.

BIBLIOGRAPHIE

Mik, A. et P. Novák (1^{er} juill. 2012), « Determination of Unit Normal Vectors of Aspherical Surfaces given Unit Directional Vectors of Incoming and Outgoing Rays : Comment », in : *Journal of the Optical Society of America A* 29.7, p. 1356, ISSN : 1084-7529, 1520-8532, DOI : 10.1364/JOSAA.29.001356.

Titre : Étude et optimisation de la culture solaire de microalgues en photobioréacteur intensifié

Mot clés : modélisation, microalgues, photobioréacteur, intensification, Algofilm

Résumé : La biomasse microalgale présente un intérêt pour divers secteurs de l'industrie tels que l'alimentation, l'énergie, la cosmétique ou encore la pharmaceutique. Des procédés spécifiques ont été développés et optimisés pour produire cette biomasse. Les systèmes de culture intensifiés en volume, tels que la technologie Algofilm étudiée dans cette thèse, permettent de produire efficacement cette biomasse tout en faisant d'importantes économies d'eau et d'énergie.

Ces travaux de thèse présentent une modélisation avancée de cette technologie. Notamment, un modèle thermique spécifique au pilote étudié a été développé et expérimentalement validé. Ce modèle a permis d'étudier des

solutions originales de régulation passives de la température telles que le couplage avec des panneaux photovoltaïques semi-transparents ou l'intégration de matériaux à changement de phase dans le support du photobioréacteur.

Les hautes performances annoncées par la technologie Algofilm ont aussi été validées expérimentalement en conditions solaires. Les protocoles de ces expériences ont été assistés par des modèles prédictifs qui ont permis d'assurer la viabilité de la culture et les performances du procédé. Les productivités et les concentrations obtenues étaient un ordre de grandeur supérieures à celles d'un système de culture conventionnel.

Title: Study and optimization of solar cultivation of microalgae in an intensified photobioreactor

Keywords: modeling, microalgae, photobioreactor, intensification, Algofilm

Abstract: Microalgal biomass is of interest to a wide range of industries including food, energy, cosmetics and pharmaceuticals. Specific processes have been developed and optimized to produce this biomass. Volume-intensified cultivation systems, such as the Algofilm technology studied in this thesis, make it possible to produce this biomass efficiently while making significant savings in water and energy consumption.

This thesis presents advanced modeling of this technology. In particular, a thermal model specific to the studied pilot was developed and experimentally validated. This model was used to study original solutions for passive

temperature control such as coupling with semi-transparent photovoltaic panels or integrating phase-change materials into the photobioreactor support.

The high performances claimed by the Algofilm technology were also validated experimentally under solar conditions. The protocols for these experiments were supported by predictive models to ensure the viability of the culture and the performance of the process. The productivities and concentrations obtained were an order of magnitude higher than those of a conventional cultivation system.