

Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes – Unité Littoral –  
Laboratoire Environnement Ressources d’Arcachon

Ganthy Florian, Le Pevedic Arnaud

Mai 2024

ODE/LITTORAL/LER-AR/24.012

ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement  
hydro-bio-sédimentaire du Bassin d’Arcachon :  
Dynamiques et Evolutions  
Rapport final 2020-2023, Tâche 3





## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport :</b> ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d’Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3	
<b>Référence interne :</b>	<b>Date de publication :</b> Mai 2024
<b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet)  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle)	<b>Langue(s) :</b> Français
<b>Résumé/ Abstract :</b> <p>Le projet ARCADE est un projet interdisciplinaire dont l’objectif est d’étudier l’hydrodynamique et les évolutions géomorphologiques et sédimentaires du Bassin d’Arcachon, à partir d’une vision intégrée, à l’échelle de l’ensemble du Bassin et de son ouvert. Ce rapport traite des avancées réalisées pour la Tâche 3 du projet (Impact de la couverture d’herbiers sur les processus hydro-sédimentaires à l’intérieur du Bassin d’Arcachon) au cours du projet (2020-2023).</p> <p>The ARCADE project is an interdisciplinary project whose aim is to study the hydrodynamics and geomorphological and sedimentary evolutions of the Arcachon Basin, from an integrated vision, on the scale of the entire Basin and its open area. This report covers the progress made on Task 3 of the project (Impact of seagrass cover on hydro-sedimentary processes in the interior of the Arcachon Basin) over the course of the project (2020-2023).</p>	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Dynamique sédimentaire, Interactions physique/biologie, herbiers de zostères, Bassin d’Arcachon	
<b>Comment citer ce document :</b> Ganthy F., Le Pevedic A. (2024). ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d’Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3. ODE/LITTORAL/LER-AR/24.012	
<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>	
<b>DOI :</b>	

<b>Commanditaire du rapport</b> : Agence de l'Eau Adour-Garonne	
<b>Nom / référence du contrat</b> : AID-2023-01743 – ARCADE Tâche 3 2023 <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> : Projet ARCADE	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
Florian Ganthy / <a href="mailto:florian.ganthy@ifremer.fr">florian.ganthy@ifremer.fr</a>	ODE/UL/LERAR
Arnaud Le Pevedic / <a href="mailto:Arnaud.Le.Pevedic@partenaire-exterieur.ifremer.fr">Arnaud.Le.Pevedic@partenaire-exterieur.ifremer.fr</a>	UMR CNRS EPOC – ODE/UL/LERAR
<b>Encadrement(s)</b> : Elvire Antajan	
<b>Destinataire</b> : Agence de l'Eau Adour-Garonne	
<b>Validé par</b> : Elvire Antajan	

## Sommaire

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Description de la Tâche 3 .....</b>	<b>15</b>
2.1	Objectifs.....	16
2.2	Stratégie et méthodologie envisagée.....	17
<b>3</b>	<b>Courants.....</b>	<b>20</b>
3.1	Avancement et réalisations de l'année 2020 .....	20
3.2	Avancement et réalisations de l'année 2021 .....	20
3.3	Avancement et réalisations de l'année 2022 .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>4</b>	<b>Vagues .....</b>	<b>22</b>
4.1	Avancement et réalisations de l'année 2020 .....	22
4.1.1	Quantification de la dissipation des vagues par les herbiers .....	22
4.1.1.1	Choix du site d'étude.....	22
4.1.1.2	Description des transects et des mesures réalisées.....	23
4.1.1.3	Tentative de traitement des données d'agitation.....	24
4.1.2	Implémentation du modèle WAVEWATCH-III® sur le Bassin d'Arcachon .....	25
4.2	Avancement et réalisations au terme de l'année 2021 .....	26
4.2.1	Résultats de la campagne de mesures .....	26
4.2.2	Implémentation des herbiers dans WW3 .....	30
4.2.3	Calibration du modèle .....	31
4.2.4	Couplage de WAVEWATCHIII avec le reste de la plateforme de modélisation.....	31
4.2.5	Détermination du coefficient de traînée.....	32
4.2.6	Régression des herbiers sur vagues .....	33
4.3	Avancement et réalisations au terme de l'année 2022 .....	36
4.3.1	Finalisation de la reconstruction du clapot .....	36
4.3.1.1	Détermination de la fréquence de coupure supérieure.....	36
4.3.1.2	Paramètres globaux et évaluation de la 'méthode des sécantes' .....	37
4.3.2	Détermination du coefficient de traînée empirique .....	38
4.3.3	Calibration finale et validation du modèle de vagues .....	39
4.3.4	Nouveaux résultats.....	42
<b>5</b>	<b>Sédiment.....</b>	<b>45</b>
5.1	Avancement et réalisations de l'année 2020 .....	45
5.1.1	Calibration préliminaire du modèle sédimentaire .....	45
5.1.1.1	Description du module MUSTANG .....	45

5.1.1.2	Méthodologie pour la calibration et validation du module de transport sédimentaire MUSTANG .....	47
5.1.1.3	Résultats de la validation du module de transport sédimentaire MUSTANG ...	51
5.1.2	Première analyse du rôle des herbiers et de leur régression sur les flux sédimentaires.....	53
5.1.3	Prise en compte de l'effet des herbiers sur les vitesses de chute des sédiments en suspension .....	55
5.1.4	Prise en compte de l'effet du système racinaire sur l'érosion des sédiments .....	57
5.2	Avancement et réalisations de l'année 2021.....	58
5.3	Avancement et réalisations au terme de l'année 2022.....	59
5.4	Avancement et réalisations de l'année 2023.....	65
5.4.1	Calibration et validation du modèle .....	65
5.4.1.1	Calibration pré-régression (2001-2001).....	65
5.4.1.2	Calibration post-régression (2019-2020).....	68
5.4.1.3	Validation du modèle .....	71
5.4.2	Effets de la régression des herbiers sur le sédiment en suspension .....	73
5.4.3	Effets de la régression des herbiers sur les flux d'import/export de sédiments ...	77
5.4.4	Effets de la régression des herbiers sur le niveau sédimentaire .....	79
5.4.5	Fiabilité du modèle à prédire les évolutions morphologiques .....	80
5.4.6	Boucles de rétroactions bio-hydro-sédimentaires .....	83
<b>6</b>	<b>Herbiers .....</b>	<b>85</b>
6.1	Avancement et réalisations de l'année 2020.....	85
6.2	Avancement et réalisations de l'année 2021.....	85
6.3	Avancement et réalisations de l'année 2023.....	87
<b>7</b>	<b>Potentiels scénarios d'évolution climatique.....</b>	<b>90</b>
7.1.1	Introduction .....	90
7.1.2	Choix des simulations à effectuer .....	93
7.1.3	Quantification de l'évolution .....	93
7.1.4	Génération des forçages .....	95
7.1.4.1	Élévation du niveau de la mer.....	95
7.1.4.2	Température de l'air .....	96
7.1.4.3	Température de l'eau .....	97
7.1.4.4	Température des rivières.....	99
7.2	Avancement et réalisations de l'année 2023.....	100
7.2.1	Définition des simulations .....	100
7.2.2	Résultats.....	103

7.2.2.1	Evolutions spatiales .....	103
7.2.2.2	Evolutions à l'échelle du Bassin .....	105
7.2.2.3	Prise en compte de réponses physiologiques supplémentaires .....	106
7.3	Impact de la hausse du niveau marin sur le développement des herbiers de <i>Z. noltei</i> 107	
7.3.1	Modélisation numérique .....	107
7.3.2	Scénarios simulés .....	107
7.3.3	Résultats .....	107
7.3.3.1	Evolutions spatiales .....	107
7.3.3.2	Evolutions à l'échelle du Bassin .....	110
7.3.3.3	Discussion and Conclusion.....	111
<b>8</b>	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>ANNEXE.....</b>	<b>122</b>
9.1	Notations préliminaires .....	122
9.1.1	Indices.....	122
9.1.2	Paramètres numériques liés au temps.....	122
9.1.3	Description des variables utilisées .....	124
9.1.3.1	Forçages.....	124
9.1.3.2	Forçages internes .....	126
9.1.3.3	Variables globales.....	128
9.1.3.4	Variables d'état totales.....	129
9.1.3.5	Taux d'évolution .....	129
9.1.3.6	Variables relatives à la reproduction sexuée et germination.....	131
9.1.3.7	Variables d'évolutions .....	133
9.1.3.8	Variables d'initialisation .....	134
9.1.3.9	Variables relatives à la spatialisation du modèle .....	134
9.2	Initialisation des variables du modèle .....	136
9.2.1	Paramètres d'initialisation généraux.....	136
9.2.2	Initialisation de l'intervalle plastochrone .....	136
9.2.3	Initialisation de la densité de pieds et feuilles par pieds .....	136
9.2.4	Initialisation de la densité de feuilles par pieds .....	137
9.2.5	Initialisation des paramètres morphologiques des feuilles .....	137
9.3	Variables de forçages externes .....	139
9.3.1	Description verticale dans la colonne d'eau.....	139
9.3.2	Calcul de la vitesse des courants dans la canopée .....	139
9.3.3	Forçage lié à la lumière.....	139

9.3.4	Forçage lié à la température .....	140
9.3.5	Forçage lié à l'évapotranspiration .....	140
9.4	Variables de forçages internes.....	142
9.4.1	Teneur en eau .....	142
9.4.2	Réduction photosynthétique liée à la dessiccation .....	142
9.4.3	Teneur en chlorophylle .....	143
9.4.4	Atténuation lumineuse par auto-ombrage.....	143
9.4.5	Atténuation lumineuse par les épiphytes.....	144
9.4.6	Intensité lumineuse de compensation et de saturation.....	144
9.4.7	Intervalle plastochrone .....	146
9.5	Production de biomasse .....	147
9.5.1	Production de biomasse liée à la température.....	147
9.5.2	Production de biomasse liée à la lumière .....	147
9.5.3	Production de biomasse liée à l'âge .....	148
9.6	Fonctions liées à la respiration .....	149
9.6.1	Respiration des feuilles et de racines due à la température .....	149
9.7	Mortalité .....	149
9.7.1	Mortalité liée à l'âge des pieds .....	149
9.7.2	Mortalité des feuilles et des racines liée à la température .....	150
9.7.3	Mortalité liée à l'hydrodynamique .....	150
9.7.4	Mortalité liée à la dessiccation .....	152
9.8	Évolution des pieds et de leurs feuilles.....	153
9.8.1	Calcul du taux de production de pieds en lien avec la biomasse racinaire .....	153
9.8.2	Calcul du taux de production de nouveaux pieds en lien avec la température ..	153
9.8.3	Calcul du taux de production de nouveaux pieds en lien avec la lumière.....	153
9.8.4	Production de feuilles liée à la lumière.....	153
9.8.5	Fonctions liées à la translocation de biomasse.....	154
9.8.5.1	Translocation des feuilles vers les racines (L2R) .....	154
9.8.5.2	Translocation des racines vers les feuilles (R2L) .....	154
9.8.5.3	Correction de la translocation de biomasse des racines vers les feuilles liée à l'âge des pieds.....	154
9.9	Production et germination de graines .....	155
9.9.1	Graines produites.....	155
9.9.1.1	Production de graines en lien avec l'hydrodynamique.....	155
9.9.1.2	Production de graines en lien avec la durée d'une journée .....	155
9.9.2	Libération de graines dans l'eau .....	156



9.9.3	Mortalité des graines dans l'eau .....	156
9.9.4	Mortalité des graines dans le sédiment .....	156
9.10	Évolution de la biomasse d'épiphytes .....	157
9.10.1	Production d'épiphytes liée à la température .....	157
9.10.2	Production d'épiphytes liée à la lumière.....	157
9.10.3	Respiration des épiphytes liée à la température .....	157
9.11	Principe de fonctionnement du modèle .....	158
9.11.1	Mise à jour des forçages.....	158
9.11.2	Calcul des variables du modèle .....	158
9.11.2.1	Calcul des variables intervenant à dt_model .....	158
9.11.2.1.1	Calcul des variables relatives à la teneur en eau .....	158
9.11.2.1.2	Calcul des variables relatives à la lumière.....	158
9.11.2.1.3	Calcul des paramètres d'évolution liés à la lumière.....	159
9.11.2.1.4	Calcul des paramètres d'évolution liés à la température .....	159
9.11.2.1.5	Calcul des paramètres d'évolution liés à l'âge .....	159
9.11.2.1.6	Calcul des paramètres d'évolution liée à l'hydrodynamique.....	159
9.11.2.1.7	Calcul des paramètres d'évolution liés à la dessiccation .....	159
9.11.2.1.8	Calcul des paramètres d'évolution liés à la biomasse racinaire.....	159
9.11.2.2	Calcul des variables à dt_biom .....	159
9.11.2.2.1	Calcul des termes de translocation .....	159
9.11.2.2.2	Calcul des taux de production de feuilles .....	160
9.11.2.2.3	Calcul des taux de pertes de feuilles .....	160
9.11.2.2.4	Calcul des taux de pertes de racines .....	160
9.11.2.2.5	Calcul du taux de production d'épiphytes.....	160
9.11.2.2.6	Calcul du taux de perte d'épiphytes.....	160
9.11.2.3	Calcul des variables à dt_shoot .....	160
9.11.2.3.1	Calcul de l'intervalle plastochrone .....	160
9.11.2.3.2	Production de nouveaux pieds.....	160
9.11.2.3.3	Taux de germination des graines .....	161
9.11.2.3.4	Retrait du sédiment des graines qui ont germées .....	162
9.11.3	Calcul de la variation de biomasse .....	162
9.11.3.1	Variation de la biomasse foliaire et racinaire.....	162
9.11.3.2	Variation de la biomasse épiphytique .....	163
9.11.4	Mise à jour des pieds et des feuilles.....	164
9.11.4.1	Mise à jour des feuilles et des pieds à dt_biom .....	164
9.11.4.1.1	Biomasse des pieds .....	164

9.11.4.1.2	Biomasse racinaire.....	164
9.11.4.1.3	Biomasse aérienne.....	164
9.11.4.1.4	Résistance à la mortalité.....	164
9.11.4.1.5	Réinitialisation de ce qui est mort.....	165
9.11.4.1.6	Age des feuilles.....	165
9.11.4.1.7	Biomasse épiphytique.....	165
9.11.4.2	Mise à jour des feuilles et des pieds à dt_shoot.....	166
9.11.4.2.1	Calcul des gains et pertes en terme d'élongation des feuilles.....	166
9.11.4.2.2	Conditions pour la création d'une nouvelle feuille.....	166
9.11.4.2.3	Gain et perte d'élongation liés à l'âge.....	167
9.11.4.2.4	Gains et pertes totales finales de la longueur de chaque feuilles.....	168
9.11.4.2.5	Mise à jour des longueurs de feuilles.....	168
9.11.4.2.6	Mise à jour finale de la création de feuille.....	169
9.11.4.2.7	Mise à jour finale de la biomasse de chaque feuille.....	169
9.11.4.2.8	Mise à jour de la biomasse totale d'épiphytes.....	170
9.11.4.3	Génération de nouveaux pieds à dt_shoot.....	171
9.11.4.3.1	Création de pieds par germination.....	171
9.11.4.4	Mise à jour finale des pieds et des feuilles à dtbiom.....	173
9.11.4.4.1	Biomasse aérienne totale.....	173
9.11.4.4.2	Densité totale de pieds.....	173
9.11.4.4.3	Hauteur moyenne de pieds.....	173
9.11.4.4.4	Nombre moyen de feuilles.....	173
9.11.4.4.5	Longueur moyenne de feuilles.....	173
9.11.4.4.6	Largeur moyenne de feuilles.....	173
9.11.4.4.7	Epaisseur moyenne de feuilles.....	173
9.11.4.4.8	Âge moyen de pieds.....	173
9.11.4.4.9	Âge moyen de feuilles.....	173
9.11.4.4.10	Âge maximal des feuilles.....	174
9.11.5	Décomposition des racines mortes.....	175
9.12	Spatialisation du modèle.....	177
9.12.1	Extension des rhizomes.....	177
9.12.1.1	Calcul de la fraction à allouer localement et à exporter.....	177
9.12.1.2	Allocation de la réception:.....	178
9.12.1.3	Mise à jour du nouveau taux d'occupation.....	178
9.12.2	Scouring.....	179
9.12.2.1	Calcul du taux d'occupation suit au scouring.....	179

9.12.2.2	Calcul de la vitesse de scouring et du coefficient de pondération.....	180
----------	--	-----



## 1 Contexte

Les embouchures tidales sont des zones de transition entre l'océan ouvert et un estuaire ou une lagune. Elles sont le plus souvent constituées d'un système de passes intégrant un delta de jusant se développant côté mer et un delta de flot, côté lagune ou estuaire. Les échanges d'eau, de sédiments, d'éléments nutritifs ou de communautés biologiques y sont très importants et complexes. Le fonctionnement hydraulique et sédimentaire des embouchures tidales est à la base de la structuration des habitats et du fonctionnement des écosystèmes sur l'ensemble des lagunes et estuaires associés. Ainsi, les évolutions morphologiques et hydrodynamiques peuvent avoir d'importantes répercussions écologiques (renouvellement de l'eau, échanges de matériaux entre la lagune et l'océan) et sont susceptibles de générer de forts impacts sur la qualité du milieu. Ces dynamiques ont également des répercussions socio-économiques importantes et peuvent par exemple affecter les activités humaines, la sécurité de la navigation et accentuer l'exposition aux processus d'érosion ou de submersion des littoraux internes et adjacents. En raison des interactions entre les marées, les vagues et les débits des rivières, comprendre les dynamiques hydro-bio-morpho-sédimentaires au sein de ces espaces est extrêmement complexe (Bertin et Olabarrieta, 2016). Ainsi, l'amélioration de la compréhension du fonctionnement de ces systèmes côtiers, permettant d'en optimiser la gestion, nécessite une connaissance fine des différents processus qui y interagissent.

Le Bassin d'Arcachon est un site unique et emblématique de la région Nouvelle-Aquitaine. Cette lagune et son embouchure tidale aux puissantes dynamiques réunit un nombre d'enjeux environnementaux, socio-économiques et scientifiques considérables. Le Bassin est souvent perçu comme un milieu naturel relativement stable sur le long terme (Cayocca, 1996). Il s'agit en réalité d'un espace à la morphologie éphémère, évoluant de manière sensible sur des échelles de temps variables, de l'instant à la saison (Cayocca, 2001). Du point de vue de ses dynamiques hydro-sédimentaires, écologiques ou environnementales, le Bassin fonctionne de manière systémique (Ifremer, 1997). Toutefois, il est traditionnellement subdivisé en cinq grands compartiments géographiques : le delta de l'Eyre, la lagune au sens strict, les passes, et le milieu océanique en différenciant les espaces situés au Nord et au Sud de l'embouchure. Cette subdivision pratique a servi de base à de nombreuses études sectorisées, et se justifie compte tenu des agents dynamiques dominants, des caractéristiques et des évolutions morpho-sédimentaires ou des caractéristiques hydrologiques très variées de ces différents secteurs. Cependant, ces différents compartiments fonctionnent de manière interdépendante du point de vue des dynamiques hydro-bio-sédimentaires, sans limites strictes mais plutôt constituées d'espaces de transition fluctuants, difficiles à définir et à appréhender.

Il apparaît ainsi que les questionnements autour des évolutions hydro-bio-morpho-sédimentaires sont interconnectées et doivent donc être appréhendées de manière intégrée. Une telle vision s'avère nécessaire pour répondre aux défis de société dans cet espace aux multiples enjeux et pour améliorer les capacités de réponses opérationnelles à ces problématiques. Cette approche est également incontournable dans le but d'anticiper les trajectoires d'évolution du Bassin dans un contexte de changement climatique.

Le projet ARCADE a pour objectif d'étudier l'hydrodynamique et les évolutions géomorphologiques et sédimentaires du Bassin d'Arcachon. Il ambitionne de constituer un nouvel état de l'art, non seulement du fonctionnement intrinsèque des différents sous-ensembles qui

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -  
31.05.2024

constituent le Bassin, mais aussi de leurs interactions. Les différentes actions qui seront menées au cours de ce projet permettront de construire les bases d'une vision globale systémique et adaptée, venant en appui aux politiques publiques, et permettant de répondre aux questions stratégiques et opérationnelles incombant aux gestionnaires locaux.

Le projet s'articule autour de trois tâches interconnectées thématiquement, géographiquement et en termes d'outils et méthodes employées :

- La **Tâche 1** vise à réaliser une analyse diachronique des évolutions géomorphologiques du Bassin d'Arcachon et de leurs relations avec les littoraux adjacents.
- La **Tâche 2** vise à caractériser les interactions entre la marée et l'agitation de surface en lien avec les évolutions morfo-sédimentaires et les aléas érosion et submersion.
- La **Tâche 3** (objet de ce document) vise à étudier et comprendre l'impact de la couverture des herbiers de zostères et de leur évolution sur les processus hydro-sédimentaires à l'intérieur du Bassin d'Arcachon.

## 2 Description de la Tâche 3

Le Bassin d’Arcachon est une zone de forte productivité écologique. Il est colonisé par le plus grand herbier de zostères naines (*Zostera noltei*) d’Europe, tandis que certains chenaux sont colonisés par des zostères marines (*Zostera. marina*). Les herbiers de phanérogames, telles que les zostères, jouent un rôle fondamental dans les écosystèmes côtiers (Orth *et al.*, 2006 ; Larkum *et al.*, 2007) en y fournissant de nombreux bénéfices physiques, biologiques, économiques et sociaux (Waycott *et al.*, 2009 ; Cullen-Unsworth *et al.*, 2013). Les services écosystémiques rendus par ces herbiers concernent la séquestration des nutriments et du carbone (Fourqurean *et al.*, 2012 ; Ribaud *et al.*, 2016), leur rôle de refuge, de nurserie et de zone de reproduction pour de nombreuses espèces (McDevitt-Irwin *et al.*, 2016 ; Unsworth *et al.*, 2018) et leur rôle sur l’atténuation des courants et des vagues (Fonseca *et al.*, 1986 ; Paul *et al.*, 2011 ; Ganthy *et al.*, 2015) favorisant ainsi la stabilisation des sédiments (van Keulen *et al.*, 2003 ; Ganthy *et al.*, 2013 ; Potouroglou *et al.*, 2017).

La diminution de la remise en suspension résultant de la stabilisation du fond sédimentaire, en favorisant la pénétration de la lumière dans la colonne d’eau et de ce fait la croissance des herbiers, constitue un processus de rétrocontrôle positif (Carr *et al.*, 2016 ; Suybuyk *et al.*, 2016) c’est-à-dire un processus d’auto-amplification. Ce rétrocontrôle entre l’état du système (e.g. l’extension d’un herbier) et une ressource limitée (e.g. la lumière) peut provoquer l’émergence d’états stables alternatifs dans la dynamique de l’écosystème (Scheffer *et al.*, 2001, 2009, van der Heide *et al.*, 2011). La transition d’un état stable à un autre intervient lorsque le système atteint un seuil critique, ce changement d’état pouvant être brusque et rapide (Carr *et al.*, 2016).

Bien que les conditions nécessaires à l’implantation et à la persistance de ces herbiers soient bien documentées, par exemple en termes de conditions lumineuses minimum (Dennison *et al.*, 1987 ; Duarte, 1991), de température optimale (Adams *et al.*, 2017), de vitesses de courant ou d’énergie des vagues maximum (Infantes *et al.*, 2009 ; Cabaço *et al.*, 2010), les connaissances sur la manière dont l’hydrodynamique et la dynamique sédimentaire modifiée par une évolution de l’extension spatiale d’herbiers peut affecter en retour leur évolution et leur persistance restent lacunaires (Suykerbuyk *et al.*, 2016). De même, la connaissance des trajectoires de ces écosystèmes en réponse à des modifications environnementales telles que le changement climatique, ou à des modifications d’origine anthropique demeure insuffisante (Best *et al.*, 2018 ; O’Brien *et al.*, 2018).

Au sein du Bassin d’Arcachon, entre 1988 et 2008, la surface totale des herbiers de zostères a drastiquement régressé : -33 % pour *Z. noltei* et -72 % pour *Z. marina* (Plus *et al.*, 2010). Dans le même temps, une augmentation des concentrations en sédiments en suspension a été observée (alors que l’énergie du vent a plutôt eu tendance à diminuer sur la même période). Par ailleurs, les gestionnaires et certaines associations locales s’inquiètent des phénomènes d’envasement qui touchent les chenaux d’accès aux ports dans la partie interne du Bassin, ainsi que certaines plages sableuses. Les herbiers de zostères jouant un rôle majeur dans le Bassin d’Arcachon pour le piégeage des sédiments (Ganthy *et al.*, 2013b ; Kombiadou *et al.*, 2014), ces modifications de la dynamique sédimentaire seraient une des conséquences directes de la régression des herbiers.

Bien que l’initiation de la régression de herbiers semblerait pouvoir être attribuée à des effets de synergies entre canicules et présence d’herbicides dans l’eau (Gamain *et al.*, 2018), les travaux récents menés dans le cadre du projet ZODARSED (Cognat, 2019) montrent que la régression a été entretenue et amplifiée par les mécanismes de rétrocontrôle mettant en jeu l’hydrodynamique et la dynamique sédimentaire. Ces travaux ont également montré que l’effet de la régression des

herbiers sur les courants de marée ne se limitait pas seulement aux zones où ils ont régressé, mais concernent l'intégralité du bassin et une partie de son embouchure.

## 2.1 Objectifs

L'objectif principal de la tâche 3 du projet ARCADE est d'étudier et de comprendre l'impact de la couverture des herbiers de zostères et de son évolution sur les processus hydro-sédimentaires à l'intérieur du Bassin d'Arcachon, ainsi que leurs interactions. Cet objectif se décompose en trois sous-objectifs :

- **1. Evaluation et quantification des relations entre conditions hydrodynamiques, flux sédimentaires et couverture des herbiers :**
  - 1.1. Il s'agit de quantifier le rôle des herbiers et l'effet de leur régression sur les conditions d'agitation (atténuation du clapot) dans le Bassin, ainsi que sur les flux sédimentaires dans l'ensemble du Bassin, depuis les zones internes jusqu'au niveau des Passes. Ceci permettra de quantifier le rôle de la régression des herbiers sur la hausse observée des concentrations en sédiments en suspension, sur le comblement des chenaux de fond de Bassin, mais également sur l'érosion des parties internes de la flèche du Cap Ferret.
  - 1.2. Il s'agit également d'étudier le rôle de la configuration des passes sur les conditions hydrodynamiques à l'intérieur du Bassin (pénétration de la houle résiduelle, courants de marée, et circulation des masses d'eau). Les résultats obtenus seront mis au regard de la dynamique temporelle des herbiers afin d'établir des liens éventuels.
  
- **2. Caractérisation des effets de seuil d'extension des herbiers :**
  - 2.1. Il s'agit d'estimer les modalités de transition d'un état d'équilibre à un autre (passage d'un herbier de grande emprise à un herbier de surface réduite, et inversement) à différentes échelles spatiales.
  - 2.2. Les résultats obtenus seront utilisés dans le but de réaliser des scénarios d'évolution des herbiers en réponse à des interventions de gestion, qu'il s'agisse de travaux maritimes ayant un rôle potentiellement négatif sur les herbiers, ou au contraire, d'opérations visant à la restauration des herbiers.
  
- **3. Estimation des conséquences du changement climatique sur les herbiers et la dynamique hydro-sédimentaire associées :**
  - 3.1. Il s'agit de définir des scénarios d'évolution des herbiers en réponse aux effets du changement climatique, tels que la hausse du niveau marin, la hausse des températures et de la modification de la fréquence et de l'intensité des tempêtes ;
  - 3.2. Et d'estimer les répercussions possibles de ces évolutions sur la dynamique sédimentaire et les évolutions morphologiques du Bassin d'Arcachon.



## 2.2 Stratégie et méthodologie envisagée

Le travail à réaliser pour répondre aux objectifs décrits précédemment repose sur un important effort de modélisation numérique couplant hydrodynamique, dynamique sédimentaire et croissance des herbiers (Figure 1). Le développement d'une telle plateforme de modélisation intégrée est actuellement en cours et sera poursuivi au cours du projet.

Plus spécifiquement, la plateforme repose principalement sur le modèle hydrodynamique MARS3D (Lazure et Dumas, 2008), dans lequel un module permettant de prendre en compte les effets des herbiers de zostères sur les courants et la contrainte sur le fond a été développé depuis plusieurs années (Ganthy *et al.*, 2013b). Bien que ce module permette une modélisation très fine des processus hydrodynamiques en présence de végétation, son exécution requiert des temps de calcul extrêmement importants. Aussi, dans l'optique de réaliser des simulations sur le long-terme, une simplification des processus pris en compte est envisagée. Une étude de sensibilité (rapport entre le gain de temps et la perte de précision) sera réalisée.

Le modèle hydrodynamique MARS3D est également couplé à un module de transport sédimentaire (MUSTANG) décrivant les principaux processus qui contrôlent la dynamique des sédiments vaseux, sableux et mixtes (Le Hir *et al.*, 2011 ; Mengual *et al.*, 2017). A l'heure actuelle, l'effet des herbiers sur la dynamique sédimentaire est seulement pris en compte à travers la modification de la contrainte sur le fond. Les résultats d'études récentes ont démontré l'importance de différents processus qui devront également être pris en compte. Il s'agit notamment de :

- l'augmentation de la vitesse de chute des sédiments en suspension en raison des collisions des particules sédimentaires avec le feuillage des herbiers (Ganthy *et al.*, 2015) ;
- la diminution de la vitesse de chute des sédiments en suspension au sommet de la canopée pour des herbiers fortement développés (Ganthy *et al.*, 2015) ;
- l'effet du système racinaire (rhizome + racines) sur les contraintes critiques d'érosion et les taux d'érosion (Ganthy *et al.*, 2011) ;
- l'accommodation du niveau racinaire en réponse à la sédimentation et à l'érosion (Brun *et al.*, 2005).

Afin de parfaire la modélisation de la dynamique sédimentaire, il s'agira également de prendre en compte l'effet des vagues sur les contraintes de cisaillement sur le fond. Pour cela, le modèle spectral de vagues WAVEWATCH-III® (WW3DG, 2019) sera implémenté sur le Bassin d'Arcachon. En parallèle de quoi, dans le but de prendre en compte l'effet des herbiers sur la dissipation des vagues, une expérimentation de terrain sera réalisée afin de quantifier ces processus.

Enfin, un modèle de croissance simplifié des herbiers de zostères sera élaboré, bien qu'un module existe d'ores et déjà dans le code MARS3D. En effet, le module actuel repose sur la modélisation des cycles géochimiques de l'azote, du phosphore et de la silice (Plus *et al.*, 2003 ; Huret *et al.*, 2013), ce qui rend son exécution extrêmement lente en raison du nombre de variables à transporter, et donc inadaptée pour des simulations sur le long terme. De plus, les travaux récents de Cognat *et al.* (2018) ont montré que les zostères naines du Bassin d'Arcachon n'étaient pas limitées par les nutriments. Aussi, seuls les effets de la lumière, de la température, de l'hydrodynamique et de la dynamique sédimentaire seront pris en compte dans un premier temps. Bien que complexe à paramétrer, le processus de progression horizontale des herbiers de proche en proche par élongation des rhizomes sera également implémenté. En effet, ce processus, qui n'est pas pris en compte dans le module biogéochimique de croissance de Plus *et al.* (2003) semble

particulièrement important pour une bonne simulation de la dynamique long-terme des herbiers de zostères du Bassin d’Arcachon.

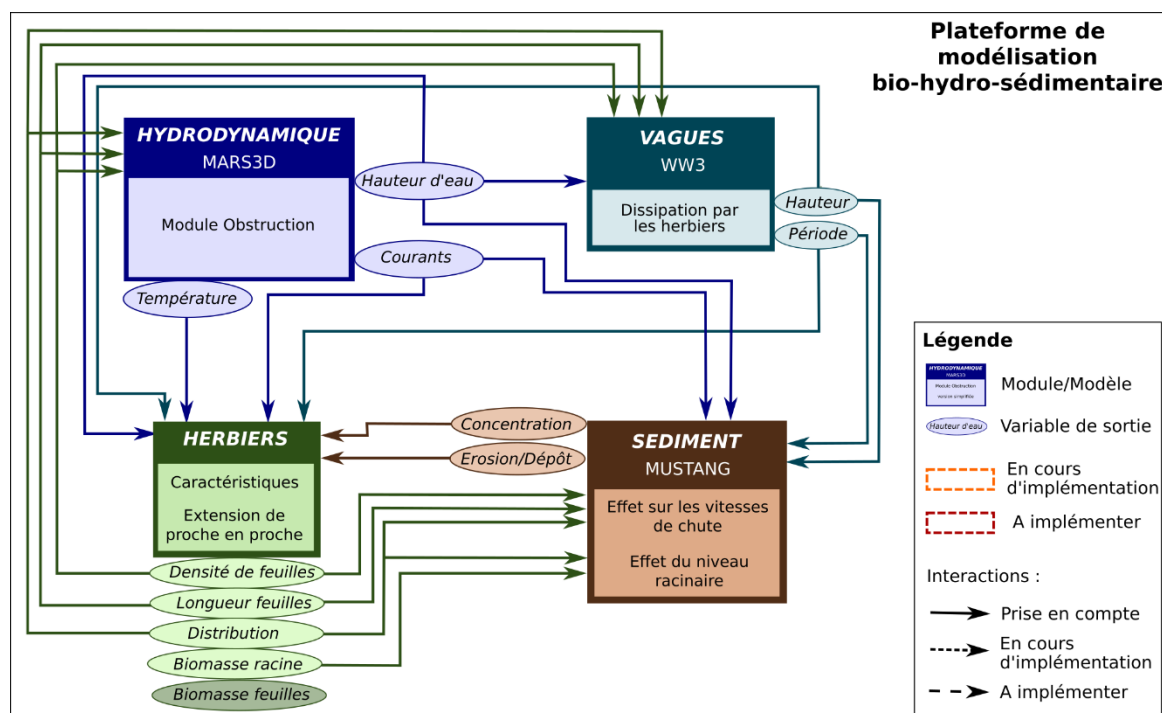


Figure 1 : Description de la plateforme de modélisation et de son état d’avancement.

Une fois que les différents composants de la plateforme de modélisation intégrée seront mis en place, leur validation sera réalisée de manière approfondie en termes d’hydrodynamique (hauteurs d’eau, vitesses de courants, température, salinité), de dynamique sédimentaire (concentrations de sédiments en suspension, caractéristiques du fond sédimentaire), de croissance des herbiers (extension, biomasse, densité de pieds, longueurs de feuilles) et de vagues (hauteurs significatives, périodes) à partir des nombreuses données issues de campagnes de terrain existantes ou acquises dans le cadre du projet. La plateforme de modélisation sera ensuite utilisée pour répondre aux différents objectifs scientifiques décrits précédemment, au moyen de :

- la simulation de scénarios court-terme (mois) afin d’évaluer et de quantifier les relations entre conditions hydrodynamiques, flux sédimentaire et couverture des herbiers (Objectif 1) ;
- la simulation de scénarios moyen-terme (année) afin de caractériser les effets de seuil d’extension des herbiers (Objectif 2) ;
- la simulation de scénarios long-terme (décennie) afin d’estimer les conséquences du changement climatique sur les herbiers et la dynamique hydro-sédimentaire associée (Objectif 3).

**Remarque : Certains des objectifs ne nécessitent pas nécessairement que la plateforme de modélisation soit développée/validée dans son intégralité pour pouvoir y répondre, au moins en partie.**

Il convient au préalable de rappeler qu'une grande partie de la Tâche 3 du projet ARCADE repose sur une thèse qui devait initialement débiter au printemps 2020. Cependant, pour diverses raisons, le recrutement du doctorant n'a pu être effectif qu'au 1<sup>er</sup> octobre 2020. Il en résulte que l'échéancier de réalisation initialement prévu a dû être revu dans sa totalité.

Dans les paragraphes suivants, sont présentées les réalisations au terme de l'année 2023. S'agissant, en grande partie, de réalisations techniques (implémentation de processus dans les modèles/modules) concernant la mise en place de la plateforme de modélisation intégrée, ainsi que les résultats de calibration et validation des différents modèles. Ces réalisations sont organisées par grandes catégories (*e.g.* Courants, Sédiment, Vagues, Herbiers) se référant aux différents modèle/modules auxquelles elles sont reliées.

## 3 Courants

### 3.1 Avancement et réalisations de l'année 2020

Le modèle hydrodynamique MARS3D ayant été calibré, en hauteurs d'eau et vitesses de courants, pour le bassin d'Arcachon dans le cadre du projet ZODARSED, aucune modification supplémentaire n'a été réalisée sur ce modèle.

### 3.2 Avancement et réalisations de l'année 2021

Bien que l'impact de la régression des herbiers sur les courants de marées ait déjà été étudiée dans le cadre du projet ZODARSED (Cognat, 2019), montrant des modifications sur les écoulements liés à la marée jusqu'à l'entrée du bassin, cette précédente étude se limite à l'intérieur du bassin. Toutefois, les précédents résultats laissent à penser que la régression des herbiers a entraîné des modifications sur l'hydrodynamique jusque dans l'embouchure du bassin d'Arcachon. Des efforts de modélisation supplémentaires quant à l'impact de la régression des herbiers sur les paramètres hydrodynamiques ont ainsi été entrepris.

Les résultats de cette étude montrent clairement que la régression des herbiers à l'intérieur du bassin (Figure 2a) a entraîné des modifications de l'hydrodynamique jusque dans les passes et l'embouchure du bassin (Figure 2b et 2c). L'énergie hydrodynamique (Figure 2c), définie par Cognat (2019), a fortement augmenté dans les passes externes, alors que les vitesses sur le fond (Figure 2c) ont connues une évolution plus modérées, caractérisée par une légère augmentation dans l'embouchure du bassin. Cependant, il apparaît que la régression des herbiers n'a pas eu d'influence significative sur l'asymétrie tidale (Figure 2d) au niveau de l'embouchure et n'est impactée par la régression des herbiers que de manière locale.

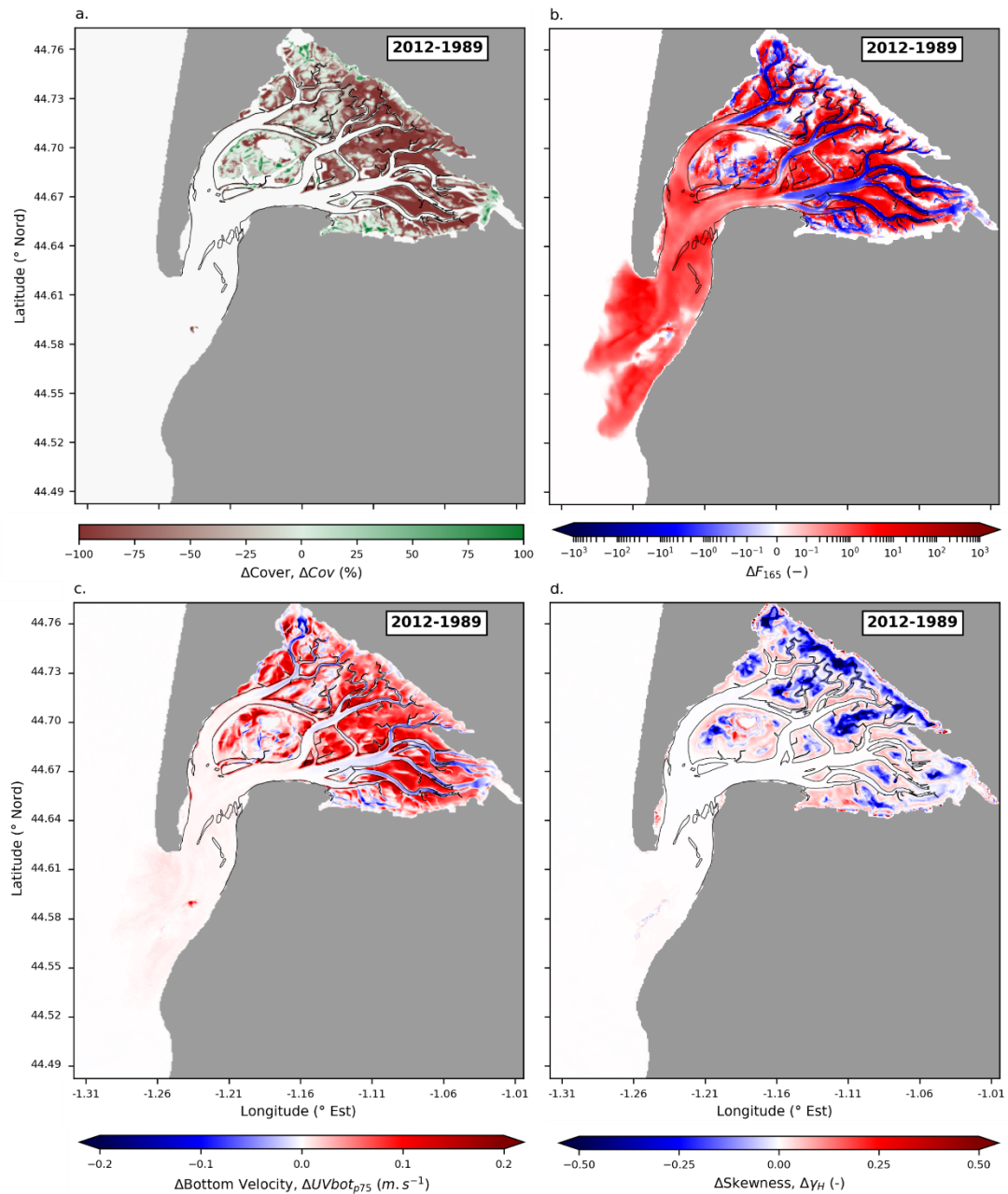


Figure 2 Impact de la régression des herbiers sur l'hydrodynamique pré- et post-régression entre 1989 et 2012. (a) Variation du recouvrement des herbiers, (b) Évolution de l'énergie hydrodynamique, (c) Évolution du percentile 75 des vitesses sur le fond, (d) Variation de l'asymétrie tidale

## 4 Vagues

### 4.1 Avancement et réalisations de l'année 2020

#### 4.1.1 Quantification de la dissipation des vagues par les herbiers

Dans le but de quantifier et de paramétrer la dissipation des vagues (clapot) par les herbiers, en fonction de leur stade de développement, une expérimentation de terrain a débuté en novembre 2020, et ce pour une durée de un an. Cette expérimentation consiste à mesurer à haute fréquence les caractéristiques des vagues le long de deux transects orientés dans la direction des vents dominants d'une part et, d'autre part, des vents les plus forts. En parallèle de ces mesures, des prélèvements de zostères sont réalisés mensuellement le long des transects afin de réaliser des analyses biométriques qui permettront d'établir les relations entre les caractéristiques des zostères (densité, longueur de feuilles, ...) et la dissipation du clapot.

##### 4.1.1.1 Choix du site d'étude

Le choix du site d'étude a reposé sur différents critères :

- Le site devait présenter des herbiers homogènes et le plus continus possible de manière à faciliter le traitement des données.
- Le site devait présenter de faibles gradients bathymétriques afin de limiter les effets des variations bathymétriques sur la propagation/dissipation des vagues le long des transects.
- En raison du temps nécessaire pour décharger les données des capteurs de vagues, et de leur nombre, le site devait également être facilement accessible.

Compte tenu de différents critères évoqués, le site retenu est l'estran de Bourrut (Figure 3), qui offrait également l'avantage pratique d'être un site déjà suivi dans le cadre d'un autre projet et permettant de ce fait du mutualiser les sorties sur le terrain.

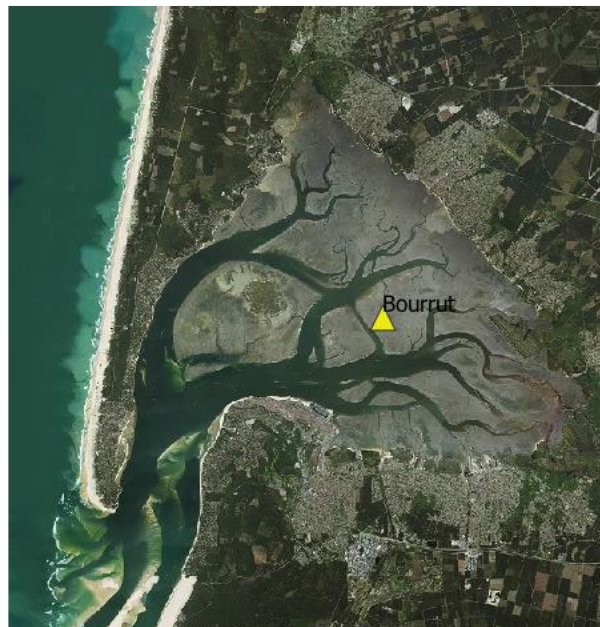


Figure 3 : Localisation du site de Bourrut, retenu pour l'expérimentation sur l'effet des herbiers de zostères sur la dissipation du clapot dans le Bassin d'Arcachon.

#### 4.1.1.2 Description des transects et des mesures réalisées

Compte tenu de la disponibilité de cinq capteurs de pression (permettant de mesurer les caractéristiques du clapot), le choix a été fait de les disposer le long de deux transects se recoupant en un point commun (Figure 4). L'orientation de ces transects a été prédéterminée en fonction des vents dominants et des vents les plus énergétiques, puis ajustée en fonction des caractéristiques du terrain (absence de chenaux) et de l'herbier (le plus continu possible).

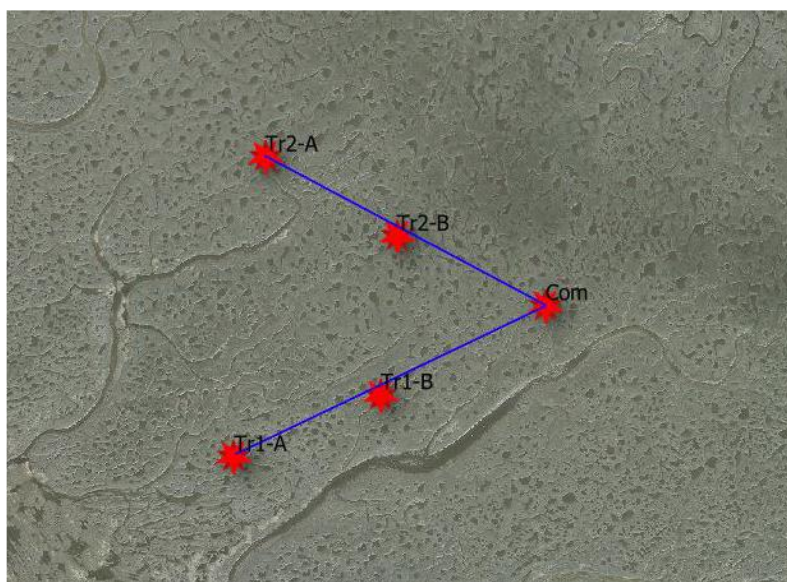


Figure 4 : Implantation des deux transects (bleu) et position des capteurs de pression (étoiles rouge).

Les capteurs de pression utilisés pour cette expérimentation sont des SP2T (NKE Instrumentation®, Figure 5a). Leur fréquence d'acquisition a été définie à 4 Hz en bursts (salves) de 3,5 minutes espacés de 16,5 minutes. Il s'agit en effet du meilleur compromis entre la quantité de données par burst (plus la fréquence d'acquisition est haute, meilleure sera la qualité du calcul des caractéristiques du clapot) et la quantité de mémoire utilisée entre deux déchargements des données (~mensuelle). Tous les capteurs sont synchronisés de manière à ce qu'ils enregistrent simultanément les variations de la hauteur d'eau liée aux vagues.

Les caractéristiques des herbiers sont obtenues à partir de prélèvements (carottes de 10 cm de diamètre) réalisés à chaque visite sur le site. Un total de neuf prélèvements est effectué : un à l'emplacement de chacun des capteurs et un supplémentaire entre deux capteurs (Figure 5b). Les prélèvements sont ensuite traités au laboratoire de manière à obtenir la biomasse foliaire, la densité de feuille, la longueur et la largeur des feuilles.

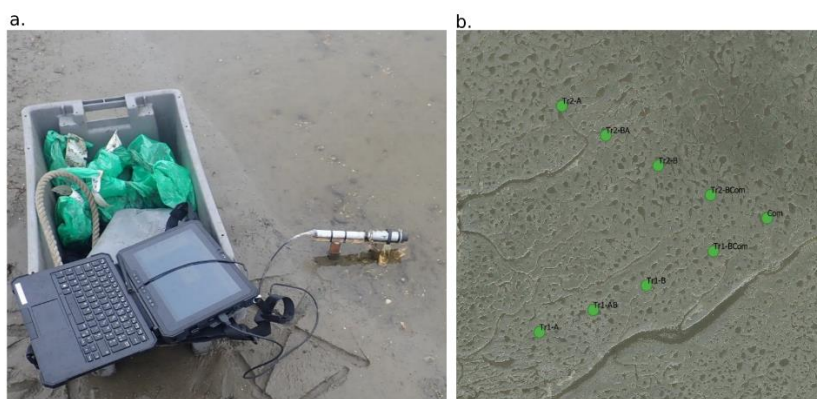


Figure 5 : Exemple d'un capteur de pression en cours de déchargement de ses données (a.) et localisation des neuf points de prélèvement de zostères le long des transects (b.).

#### 4.1.1.3 Tentative de traitement des données d'agitation

À partir des données issues des mesures d'agitation et des relevés biométriques, l'évolution de la hauteur de vagues et de leur énergie en fonction du développement des herbiers sera analysée. À cette fin, plusieurs hypothèses ont été faites, afin de décrire au mieux l'environnement dans lequel les mesures sont réalisées. Bien que cette analyse porte sur l'étude de vagues générées par des vents locaux, en présence de végétation, tous deux responsables de non linéarités, plusieurs études (e.g. [Bradley et Houser, 2009](#)) ont cependant montré que la théorie des ondes linéaires fournit généralement des résultats satisfaisants. Cette théorie a donc été adoptée dans un premier temps. Dans ce cadre, les phénomènes de shoaling (augmentation de la hauteur des vagues par faible hauteur d'eau) sont pris en compte, bien que le site choisi présente de faibles gradients bathymétriques. Par ailleurs, les faibles pentes, conjointement à la position des capteurs, situés au sein des herbiers de sorte à s'affranchir des effets de bords, permettent de négliger les différents phénomènes de réflexion. De plus, le déferlement et la dissipation par frottement sur le fond sont, dans un premier temps, négligés ; ils seront pris en compte par la suite afin d'affiner les résultats.

Sous ces hypothèses, l'atténuation de la hauteur de vague le long du transect est calculée comme :

$$H_2 = H_1 K_s K_v \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec  $K_s$  le coefficient de shoaling et  $K_v$  le coefficient de dissipation par la végétation.

Le coefficient de shoaling est déterminé par le paramétrage de [Dean et Darlymple \(1991\)](#) :

$$K_s = \sqrt{\frac{c_{g1}}{c_{g2}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Et le coefficient de dissipation par la végétation est calculé en utilisant la formulation de [Mendez et Losada \(2004\)](#) :

$$K_v = \frac{1}{1 + \beta x} \quad (\text{Eq. 3})$$



$$\beta = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} C_D b_v N H_{rms,0} k \frac{\sinh^3(kl) + 3 \sinh(kl)}{(\sinh(2kh) + 2kh) \sinh(kh)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec  $b_v$  la largeur de feuilles,  $N$  la densité de feuilles,  $H_{rms,0}$  la hauteur de vague en début de transect,  $k$  le nombre d'onde,  $l$  la hauteur de canopée et  $h$  la hauteur d'eau.

En plus de ces paramètres, le coefficient de dissipation par la végétation fait intervenir un coefficient de traînée ( $C_D$ ). Le coefficient de traînée induit par la végétation, qui est un paramètre qui a fait l'objet de multiples études, sera sujet à une analyse approfondie. En effet, malgré la quantité de travaux portant sur le paramétrage de cette grandeur, aucune formulation générale n'a été obtenue, ce paramètre est généralement déterminé de façon empirique. Afin de pouvoir calculer le coefficient de traînée pour ce site d'étude, il est nécessaire de collecter davantage de données biométriques et d'agitation, afin d'obtenir une expression valable pour l'intégralité du cycle de croissance des zostères. Ainsi, dans un premier temps, la formulation empirique de [Paul et Amos \(2011\)](#), pour les zostères naines de l'île de Wight, sera utilisée :

$$C_D = 0.06 + \left(\frac{153}{Re_v}\right)^{1.45} \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec  $Re_v = b_v u_b / \nu$ , où  $u_b$  est la vitesse orbitale et  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'eau.

La hauteur de vagues mesurées en fin de transect sera ensuite comparée à la hauteur théorique des vagues, calculée à partir des équations précédentes. Afin de ne considérer que les vagues ayant une direction de propagation parallèle au transect, seules les données pour lesquelles la direction du vent correspond, à plus ou moins 15°, à l'orientation du transect seront considérées. De plus, les vagues de moins de 0,1 m seront retirées de l'analyse, car elles correspondent vraisemblablement à des rides ou des ondes capillaires générées entre les deux points de mesure.

#### 4.1.2 Implémentation du modèle WAVEWATCH-III® sur le Bassin d'Arcachon

Le modèle spectral de vague WAVEWATCH-III® ([WW3DG, 2019](#)) a été implémenté sur le Bassin d'Arcachon. Pour ce faire, les grilles bathymétriques du modèle MARS-3D ont été adaptées et mises au format requis pour être lues par WAVEWATCH-III®. Afin de forcer le modèle à ces limites ouvertes, la base de données HOMERE ([Maisondieu et al., 2017](#)) est utilisée. Il a tout d'abord été nécessaire de sélectionner les points de la grille HOMERE se trouvant aux limites de la grille WAVEWATCH-III®, puis d'implémenter des routines permettant de générer les fichiers de conditions limites dans un format lisible par WAVEWATCH-III®, pour les périodes de simulation souhaitées. En ce qui concerne les forçages (vent, hauteur d'eau et courants), des routines ont également été implémentées afin de formater les sorties des modèles météorologiques (Arome et Arpège) de Météo France et les sorties du modèle MARS appliqué au Bassin d'Arcachon.

Quelques tests de simulation préliminaires ont ensuite été réalisés, notamment dans le but de définir la grille spectrale du modèle (Figure 6). Les résultats issus de ces tests apparaissent très prometteurs pour la suite, comme en témoigne la bonne adéquation entre les hauteurs de vagues simulées et celles mesurées, pour 3 points de mesures répartis dans le Bassin. Par ailleurs, il apparaît que les résultats sont très similaires entre la simulation réalisée sur une grille spectrale de 23 fréquences et 24 directions et celle réalisée sur une grille spectrale de seulement 11

fréquences et 15 directions. Si bien que pour la suite, cette seconde grille moins raffinée sera utilisée, permettant un gain significatif de temps de calcul.

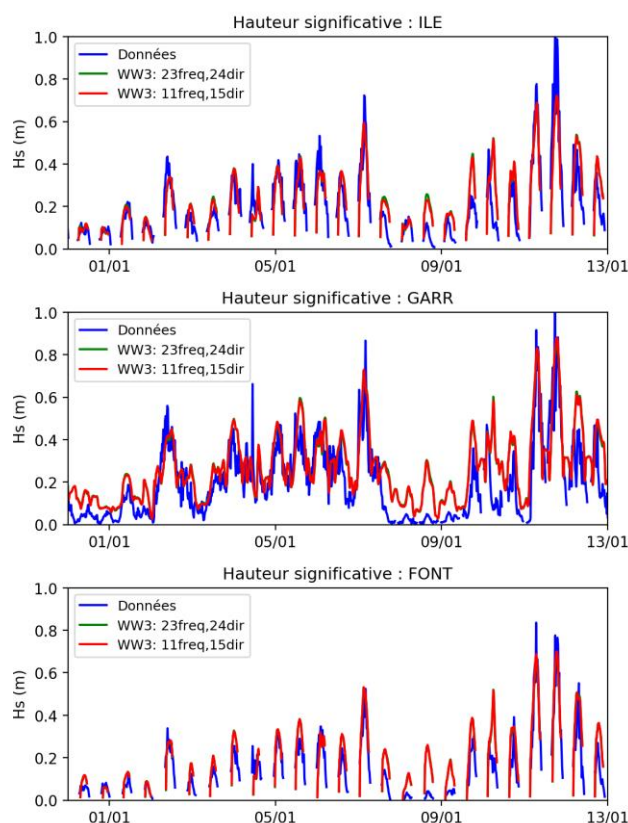


Figure 6 : Comparaison entre les premiers résultats issus du modèle WAVEWATCH-III® et les mesures de hauteur significative de vagues pour 3 points de suivi répartis dans le Bassin d’Arcachon. A noter que les résultats du modèle pour 23 fréquences et 24 directions (courbe verte) sont confondus avec ceux obtenus pour 11 fréquences et 15 directions (courbe rouge).

## 4.2 Avancement et réalisations au terme de l’année 2021

### 4.2.1 Résultats de la campagne de mesures

La campagne de mesures sur l’estrans de Bourrut a pris fin en Novembre 2021 et a permis d’obtenir un suivi d’un an (Nov. 2020 – Nov. 2021) des caractéristiques des herbiers et des vagues sur ce site.

Le prélèvement de carottes de zostères a été réalisé mensuellement sur toute la durée du suivi. Les neuf carottes, prélevées le long des deux transects de mesures, ont fait l’objet d’une analyse biométrique en laboratoire, afin de déterminer la biomasse foliaire et racinaire, la densité de

feuilles et de pieds, la longueur et la largeur des feuilles. Les résultats de cette étude sont présentés en figure 7.

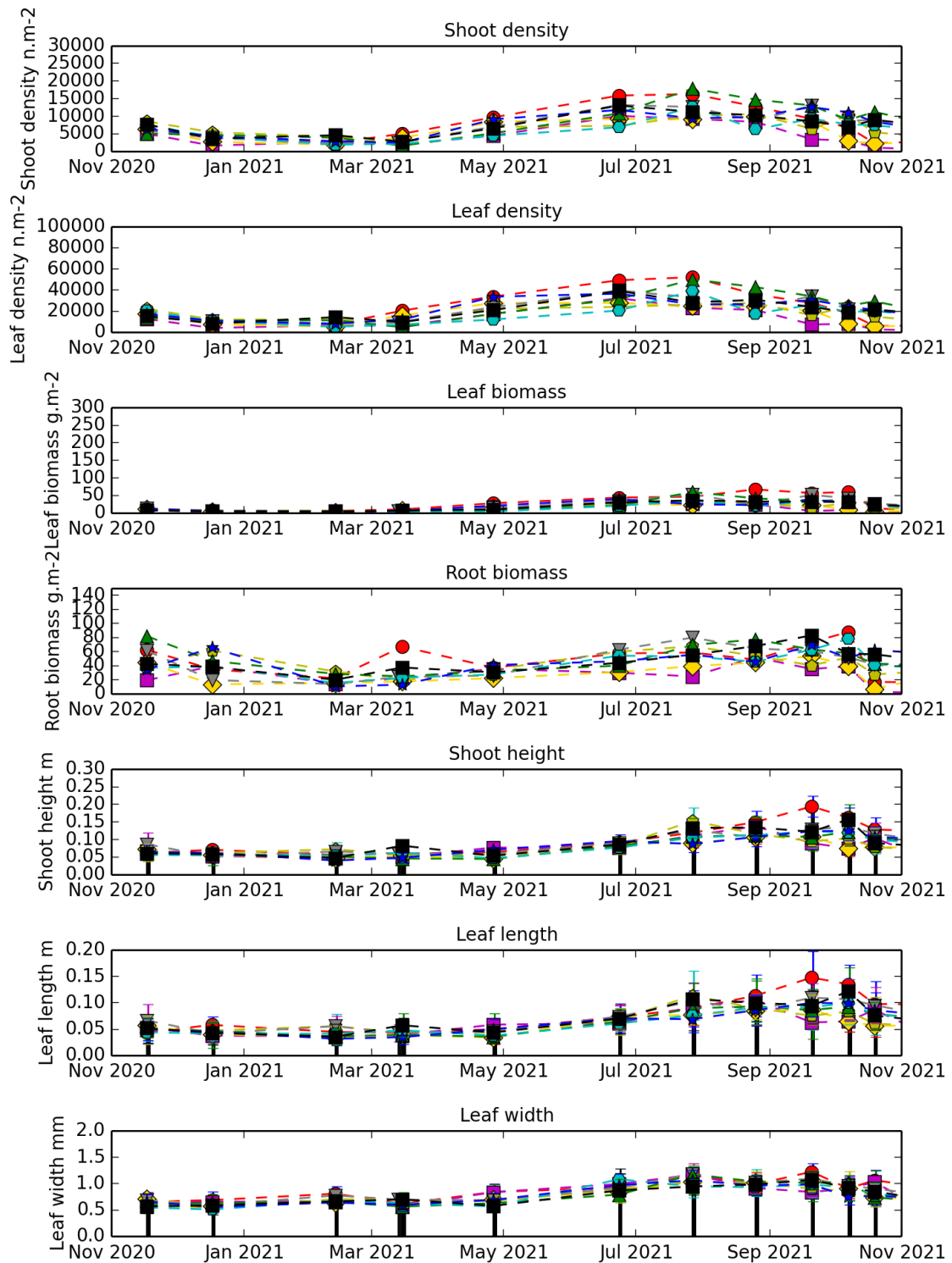


Figure 7 : Suivi de l'évolution des caractéristiques des herbiers de zostères naines sur l'estran de Bourrut. La densité de pieds (i) et de feuilles (ii), la biomasse de de feuilles (iii) et de racines (iv), la hauteur des pieds(v), la longueur des feuilles (vi) et la largeur des feuilles (vii) sont présentées pour les 9 points de suivi

Il est important de noter la tendance homogène de l'évolution des caractéristiques des herbiers aux 9 points de suivi. La tendance observée correspond bien à celle décrite par [Auby et Labourg \(1996\)](#), avec une densité de feuilles et une biomasse foliaire minimales en hiver et maximales en été.

Les caractéristiques de vagues ont été obtenues à partir des mesures des capteurs de pression. Cependant, leur calcul nécessite un post-traitement très spécifique. En effet, la reconstruction de la surface libre à partir de mesure de pression fait l'objet de plusieurs théories, qui ont pour la plupart été développées pour la houle. De ce fait, la question se pose sur la légitimité de l'utilisation de ces théories pour la reconstruction du clapot en milieu intertidal. Afin de sélectionner la méthode de reconstruction la plus appropriée, un AST (Acoustic Surface Tracking) a été déployé pendant quelques semaines sur l'estran de Bourrut, durant le suivi du site. La comparaison des différentes théories est présentée figure 8. Il apparaît que le spectre de densité d'énergie correspondant à la surface réellement mesurée ( $\zeta_{LE}$  ; courbe bleue) est le mieux représenté par la théorie linéaire ( $\zeta_L$  ; courbe verte).

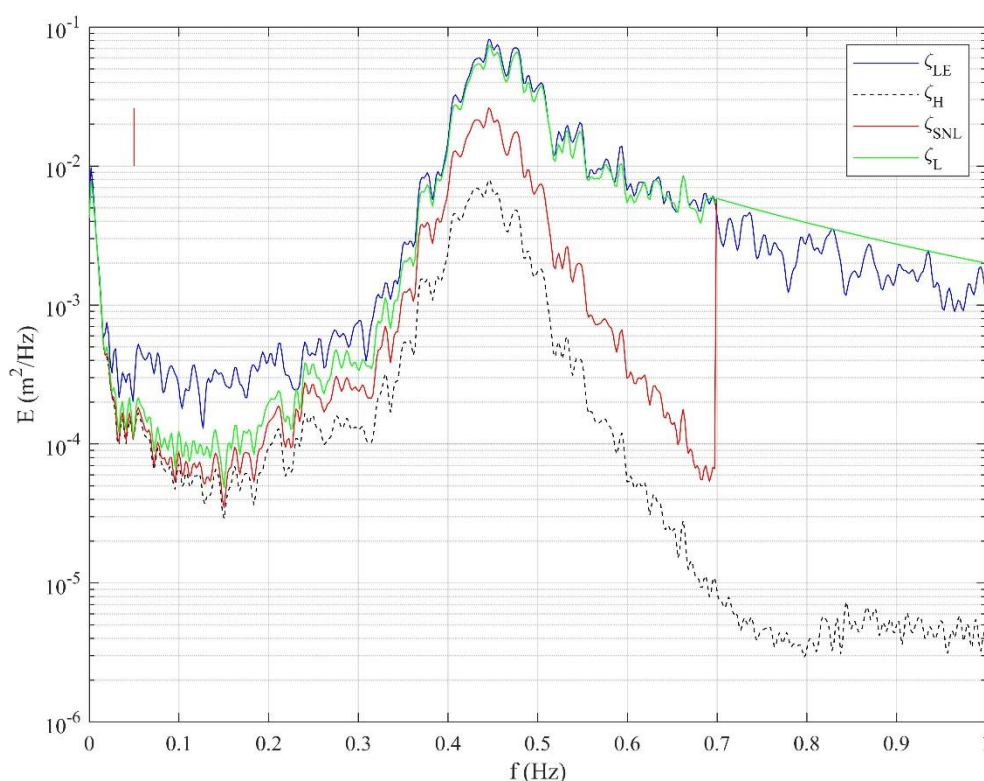


Figure 8 : Comparaison des théories de reconstruction appliquées au clapot en milieu intertidal. Le spectre de densité d'énergie  $E$  obtenu à partir des mesures de l'AST ( $\zeta_{LE}$ ) est comparé aux spectres obtenus à partir des données issues d'un capteur de pression, en utilisant la méthode hydrostatique ( $\zeta_H$ ), la théorie linéaire ( $\zeta_L$ ) et la théorie non-linéaire ( $\zeta_{SNL}$ )

Cette étude a donc permis de confirmer que l'utilisation de la théorie linéaire était la plus adaptée pour la reconstruction du clapot en milieu intertidal, mais surtout de définir la fréquence de coupure à utiliser dans le cas de notre étude. Au vue des comparaisons effectuées sur différents

spectres, une fréquence de coupure de 0.55 Hz a été sélectionnée pour effectuer la reconstruction de la surface libre à partir des données de pression.

La surface libre reconstruite à partir de la théorie linéaire ( $\zeta_L$ ) s'exprime :

$$\zeta_L = \zeta_H \cdot K_p \quad (\text{Eq. 6})$$

Avec  $\zeta_H$  la surface libre reconstruite avec la théorie hydrostatique et  $K_p$  une fonction de transfert calculée :

$$K_p = \frac{\cosh(kh_0)}{\cosh(k\delta_m)} \quad (\text{Eq. 7})$$

Où  $h_0$  est la hauteur d'eau moyenne,  $\delta_m$  la hauteur du capteur par rapport au fond et  $k$  le nombre d'onde obtenu à partir de la relation de dispersion intégrant l'effet des courants.

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kh_0) + (k \cdot U \cdot \cos(\alpha))^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

Avec  $\omega$  the fréquence angulaire,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $U$  la vitesse de courant moyenne et  $\alpha$  l'angle entre les vagues et les courants.

Ainsi, les caractéristiques de vagues, telles que la hauteur de vagues, les périodes et les vitesses orbitales peuvent être calculées. Les mesures de hauteur de vagues qui sont utilisées pour la calibration du modèle numérique sont présentées figure 9.

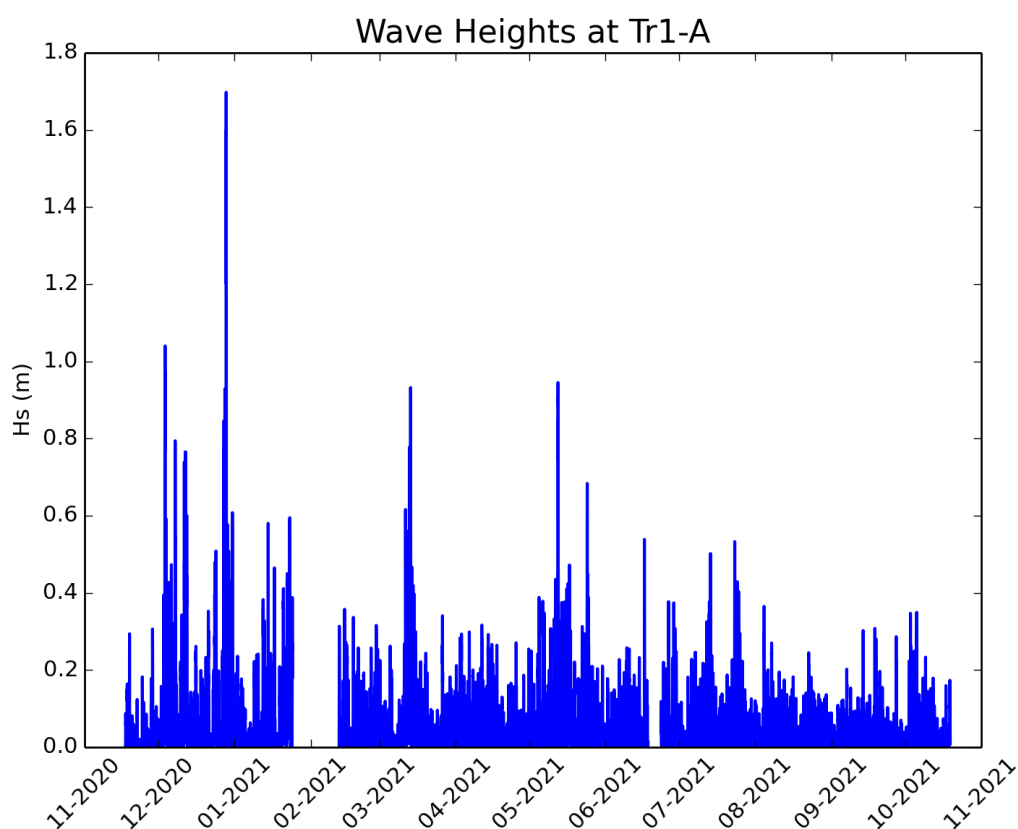


Figure 9 : Suivi de la hauteur de vagues au point Tr1-A de Nov.2021 à Nov. 2022

#### 4.2.2 Implémentation des herbiers dans WW3

Le modèle de vagues WAVEWATCH III, qui a été implémenté sur le bassin d’Arcachon, ne prend pas en compte l’effet des herbiers sur la dissipation des vagues dans sa version originale. Cependant, du fait de l’étendue des herbiers de zostères dans le bassin d’Arcachon, il ne semble pas pertinent de modéliser l’agitation de surface sans prendre en compte la dissipation induite par les herbiers. L’implémentation de WWIII dans le bassin a donc nécessité l’ajout de la dissipation d’énergie induite par les herbiers sur les vagues.

L’intégration de l’effet des herbiers dans le modèle WAVEWATCH III a nécessité l’ajout de la végétation parmi les forçages du modèle. C’est-à-dire, de lire un fichier F de forçage contenant les caractéristiques des herbiers afin d’être transformé en fichier de forçage lisible par WWIII. L’activation de l’effet des herbiers a également fait l’objet de modifications dans le fichier principal de simulation (*ww3.shel.inp*), afin de définir les variables à utiliser ou non, ainsi que la manière dont elles sont lues (constantes, par un fichier de forçage, couplées).

Une fois la définition des herbiers réalisée, le terme source permettant de prendre en compte la dissipation d’énergie induite par les herbiers sur les vagues a été ajouté (Eq. 9). Pour cela, un « switch » supplémentaire a été ajouté au modèle afin de prendre en compte, ou non, cet effet sur la modélisation des vagues. Le terme source sélectionné est celui implémenté dans SWAN par [Suzuki et al. \(2012\)](#). Il a cependant dû être adapté du modèle spectral en fréquence-direction SWAN au modèle spectral en nombre d’onde-direction WWIII. Le terme source implémenté dans WAVEWATCH III s’écrit ainsi :

$$\mathcal{S}_{veg}(k, \theta) = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} g^2 \widetilde{C}_D b_v D \left(\frac{\tilde{k}}{\tilde{\sigma}}\right)^3 \frac{\sinh^3(\tilde{k}l) \sinh(\tilde{k}l)}{3k \cosh^3(\tilde{k}d)} \sqrt{EN}(k, \theta) \quad (\text{Eq. 9})$$

Avec,  $b_v$  la largeur de feuilles,  $D$  la densité de feuilles,  $l$  la hauteur de canopée,  $\widetilde{C}_D$  le coefficient de trainée vague-végétation,  $\tilde{k}$  le nombre d’onde moyen,  $d$  la hauteur d’eau,  $\tilde{\sigma}$  la fréquence de vagues moyennes,  $E$  l’énergie totale de vagues et  $N$  l’action des vagues.

Le coefficient de trainée vague – végétation  $\widetilde{C}_D$ , est un coefficient pour lequel il n’existe pas de paramétrisation générale et qui est fortement dépendant des conditions de vagues et des caractéristiques des herbiers. Pour ces raisons, ce paramètre est généralement déterminé de manière empirique. Dans un premier temps, il a donc été décidé d’utiliser la paramétrisation de [Paul et Amos \(2011\)](#) déterminée empiriquement pour des herbiers de zostères de l’île de Wight, dans le sud de l’Angleterre :

$$C_D = 0.06 + \left(\frac{153}{Re_v}\right)^{1.45} \quad (\text{Eq. 10})$$

Avec  $Re_v$  le nombre de Reynolds calculé :  $Re_v = \frac{b_v u_b}{\nu}$ , où est  $\nu$  la viscosité cinématique et  $u_b$  la vitesse orbitale.

Pour la modélisation de vagues sur les estrans possédant une pente faible, le terme de déferlement de [Battjes and Janssen \(1978\)](#) qui est implémenté dans le modèle entraîne une sur-dissipation de l’énergie des vagues incidentes ([Pezerat et al., 2021](#)). Il a donc été corrigé en accord avec [Pezerat et al., \(2021\)](#). Le terme source de déferlement dû à la profondeur est exprimé dans WAVEWATCHIII :

$$S_{db}(k, \theta) = -\frac{\alpha}{4} Q_b f_m \frac{H_{max}^2}{E} F(k, \theta) \quad (\text{Eq. 11})$$

Avec,  $Q_b$  la fraction de vagues déferlantes,  $f_m$  la fréquence moyenne,  $H_{max}$  la hauteur de vagues maximale,  $E$  l'énergie totale et  $F$  la densité d'énergie.  $\alpha$  est un paramètre de calibration aussi communément appelé coefficient de déferlement et a été défini selon [Pezerat et al. \(2021\)](#) :

$$\alpha = 40 \tan \beta \quad (\text{Eq. 12})$$

Où  $\tan \beta$  correspond à la pente sur le fond rencontrée par les vagues incidentes. La pente sur le fond n'étant pas calculée dans WWIII, la lecture d'un fichier de grille supplémentaire a été implémenté dans le modèle de vagues, afin d'obtenir les pentes selon les directions  $\vec{X}$  et  $\vec{Y}$  et ainsi être en mesure de calculer ce paramètre.

En eau peu profonde  $H_{max}$  peut être calculé :

$$H_{max} = \gamma h \quad (\text{Eq. 13})$$

Où  $h$  est la hauteur d'eau et  $\gamma$  l'indice de déferlement usuellement pris constant et valant 0.73 ([Battjes et Janssen 1978](#)). L'indice de déferlement a toutefois été redéfini avec la formulation de [Ruessink et al. \(2003\)](#) :

$$\gamma = 0.76 k_p h + 0.29 \quad (\text{Eq. 14})$$

Avec  $k_p$  le nombre d'onde à la fréquence pic

#### 4.2.3 Calibration du modèle

Dans un premier temps, des tests ont été réalisés sur les différents switches à utiliser afin de choisir les termes sources les plus appropriés, permettant la prise en compte de certains effets et phénomènes qui régissent la dissipation et le comportement des vagues en milieu peu profond, tel que dans le Bassin.

Chaque switch utilisé repose sur un certain nombre de paramètres de calibration qu'il est nécessaire régler pour obtenir des résultats de modélisation les plus fidèles possibles aux mesures. Cependant, le doute émit quant à la reconstruction des vagues a grandement freiné la progression de la calibration du modèle de vagues, ne sachant jamais si les différences entre le modèle et les données provenaient d'une erreur du modèle ou bien de l'imprécision des données. Les résultats quant à la reconstruction des vagues ayant été obtenus en Avril 2022, la nouvelle phase de calibration vient à peine de reprendre.

#### 4.2.4 Couplage de WAVEWATCHIII avec le reste de la plateforme de modélisation

Le modèle de vagues, implémenté dans le Bassin, doit être couplé au reste de la plateforme de modélisation afin de pouvoir prendre en compte l'effet des vagues sur le transport sédimentaire et sur les herbiers. Le couplage entre MARS3D et WAVEWATCH III a déjà été réalisé par l'intermédiaire du coupleur OASIS, qui permet de lancer simultanément les modèles tout en leur permettant d'échanger des variables à intervalle de temps régulier.

Le couplage n'avait toutefois pas été réalisé pour le bassin d'Arcachon, ce qui a nécessité de refaire les grilles du bassin pour initialiser l'échange de variables entre les deux modèles. De plus, la végétation venant à peine d'être ajoutée dans WWIII, l'échange de ces variables n'était implémenté ni dans WAVEWATCHII ni dans MARS3D. De fait, une étape de développement

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 - 31.05.2024

supplémentaire a été requise pour permettre à MARS3D d'envoyer les caractéristiques des herbiers à OASIS et pour que WWIII puisse récupérer ces variables reçues du coupleur.

#### 4.2.5 Détermination du coefficient de trainée

Comme mentionné en 4.2.2, la paramétrisation de la dissipation par la végétation repose sur un coefficient de trainée qu'il est nécessaire de calibrer empiriquement. À cette fin, il avait été décidé, lors de l'année 2020, d'utiliser une méthode analytique, prenant en compte la dissipation d'énergie induite par la végétation et par le fond sur les vagues se propageant le long des transects de mesures. Cependant, le transect faisant partie intégrante du fetch sur lequel les vagues se développent sous l'effet du vent, on observe dans de nombreux cas de la génération de vagues le long des transects de mesure. La génération de vagues due au vent sur une courte distance étant difficile à calculer précisément de manière analytique, il a été jugé préférable de délaissier cette méthode dans le cadre de cette étude.

Il a donc été décidé de paramétrer le coefficient de trainée par de la modélisation numérique 1D avec WAVEWATCHIII. Une telle méthode d'analyse, en plus de permettre la paramétrisation du coefficient de trainée, permettra d'obtenir une meilleure calibration du modèle appliqué au Bassin.

En premier lieu, un relevé bathymétrique des transects de mesure a été effectué afin de générer les grilles WAVEWATCHIII 1D de chaque transect. Le choix des simulations à réaliser pour la calibration du coefficient de trainée a été basé sur deux hypothèses :

- Les vagues de clapot se propagent dans la même direction que le vent,
- Les spectres de densité d'énergie des vagues en début de transect présentent un seul pic d'énergie prédominant, afin d'éviter une dissipation d'énergie fréquentiellement non-uniforme (Bradley et Houser 2009). En effet, dans le modèle, la dissipation des vagues est considérée comme fréquentiellement uniforme, tandis que plusieurs études ont montré que la dissipation par les herbiers était variable en fonction de la fréquence des vagues.

Les forçages du modèle sont alors récupérés pour les dates de simulation sélectionnées. Le vent est forcé colinéairement au transect et une valeur constante est utilisée afin d'obtenir une convergence du spectre de densité d'énergie en fin de transect. Le niveau d'eau est également pris constant sur tout le transect à cause de sa faible longueur (100 m) et de la courte durée de la simulation. Les caractéristiques d'herbiers correspondant à la date des simulations proviennent des mesures réalisées mensuellement et interpolées temporellement pour correspondre au mieux à l'état de la végétation aux dates de simulation. Les caractéristiques des herbiers aux 5 points de prélèvement ont été interpolées spatialement sur la longueur du transect modélisé.

Bien que la procédure de calibration du coefficient de trainée lié aux herbiers ait été mise en place et les scripts d'analyse développés, celle-ci ne peut réellement débiter tant que les autres paramètres du modèle ne sont pas calibrés de manière satisfaisante. Pour cette raison, les simulations de vagues réalisées dans le cadre de la calibration du modèle sédimentaire et de la pré-analyse de l'effet de la régression des herbiers sur les vagues ont été effectuées en utilisant le coefficient de trainée déterminé par [Paul et Amos \(2011\)](#) et explicité en 4.2.2. .



#### 4.2.6 Régression des herbiers sur vagues

La version pré-calibrée de WAVEWATHCIII a été utilisée afin de réaliser une première estimation de l'impact de la régression des herbiers de zostères sur les caractéristiques des vagues dans le Bassin d'Arcachon.

Pour cela, des scénarios identiques à ceux modélisés pour les courants ont été simulés :

- pré-régression / caractéristiques hivernales
- pré-régression / caractéristiques estivales
- post-régression / caractéristiques hivernales
- post-régression / caractéristiques estivales

Pour chacun de ces scénarios, 3 conditions de vent ont été testées, à savoir :

- condition de tempête : vent d'Ouest à 22 m.s<sup>-1</sup>
- conditions de brise thermique estivale : vent de Nord-Ouest à 9 m.s<sup>-1</sup>
- conditions d'anticyclone hivernal : vent de Nord-Est 8 m.s<sup>-1</sup>

Ces scénarios ont été définis à partir d'une analyse statistique des données de vent issue de la station météorologique située au Cap Ferret, sur la période 1967-2020.

Une partie des résultats obtenus est présentée ci-après à titre d'exemple.

L'étude de l'évolution des hauteurs significatives (Figure 10) montre une nette tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues induite par la régression des herbiers. Bien que les trois scénarios de vent étudiés soient caractérisés par des directions et intensités de vent différentes, la régression des herbiers sur les platiers intertidaux résulte, pour ces trois scénarios, en l'augmentation de la hauteur des vagues à une échelle assez locale. Toutefois, il est à noter que dans le cas d'un événement de brise thermique (Figure 10b) ou d'anticyclone (Figure 10c), une faible augmentation de la hauteur de vagues (<10%) est présente jusque dans les chenaux secondaires et principaux. On remarque que les zones dans lesquelles les hauteurs significatives ont le plus augmenté correspondent aux zones desquelles les herbiers ont le plus régressé, témoignant ainsi d'une corrélation positive entre la régression des herbiers et l'augmentation des hauteurs significatives de vagues.

Il convient également de noter que l'augmentation des hauteurs de vagues est maximale dans la zone Sud-Est du bassin. Cela s'explique d'une part par la régression des herbiers, qui est la plus importante dans cette zone, mais également par le fait que lors d'une tempête d'Ouest et d'une brise thermique de Nord-Ouest, il y a génération de vagues sur toute la longueur du bassin (sur l'axe Ouest/Est pour la tempête et Nord-Ouest/Sud-Est pour la brise thermique), concentrant ainsi les vagues les plus énergétiques dans la partie Sud-Est du bassin. Les vagues les plus énergétiques étant davantage atténuées par la végétation (Anderson and Smith, 2014), la régression des herbiers dans cette zone se traduit donc par une augmentation plus importante des hauteurs de vagues. Dans cette zone, l'augmentation de la hauteur significative atteint alors 50% dans le cas d'une brise thermique et excède les 100% dans le cas d'une tempête, c'est-à-dire que la hauteur de vagues peut doubler dans certaines zones. Cela justifie également le fait que l'augmentation de la hauteur de vagues soit moins marquée dans le cas de l'anticyclone hivernal (Figure 10c) car par un vent d'Est, les vagues ont une longueur de fetch moins importantes sur lesquelles se développer avant d'atteindre la zone la plus touchée par la régression. Dans le cas d'un anticyclone, l'augmentation maximale a tout de même lieu dans la zone Sud-Est du bassin, où la régression est la plus importante, mais est nettement moindre que pour les autres scénarios avec

une augmentation de l'ordre de 30%. Les vasières sur lesquelles le recouvrement des herbiers n'a pas évolué ont tout de même été impactées par la régression des herbiers qui a eu lieu sur les autres estrans, et ce, dans les 3 scénarios simulés. Ces estrans accusent, pour la plupart, une augmentation de 10% des hauteurs significatives de vagues, notamment au niveau de l'Île aux oiseaux.

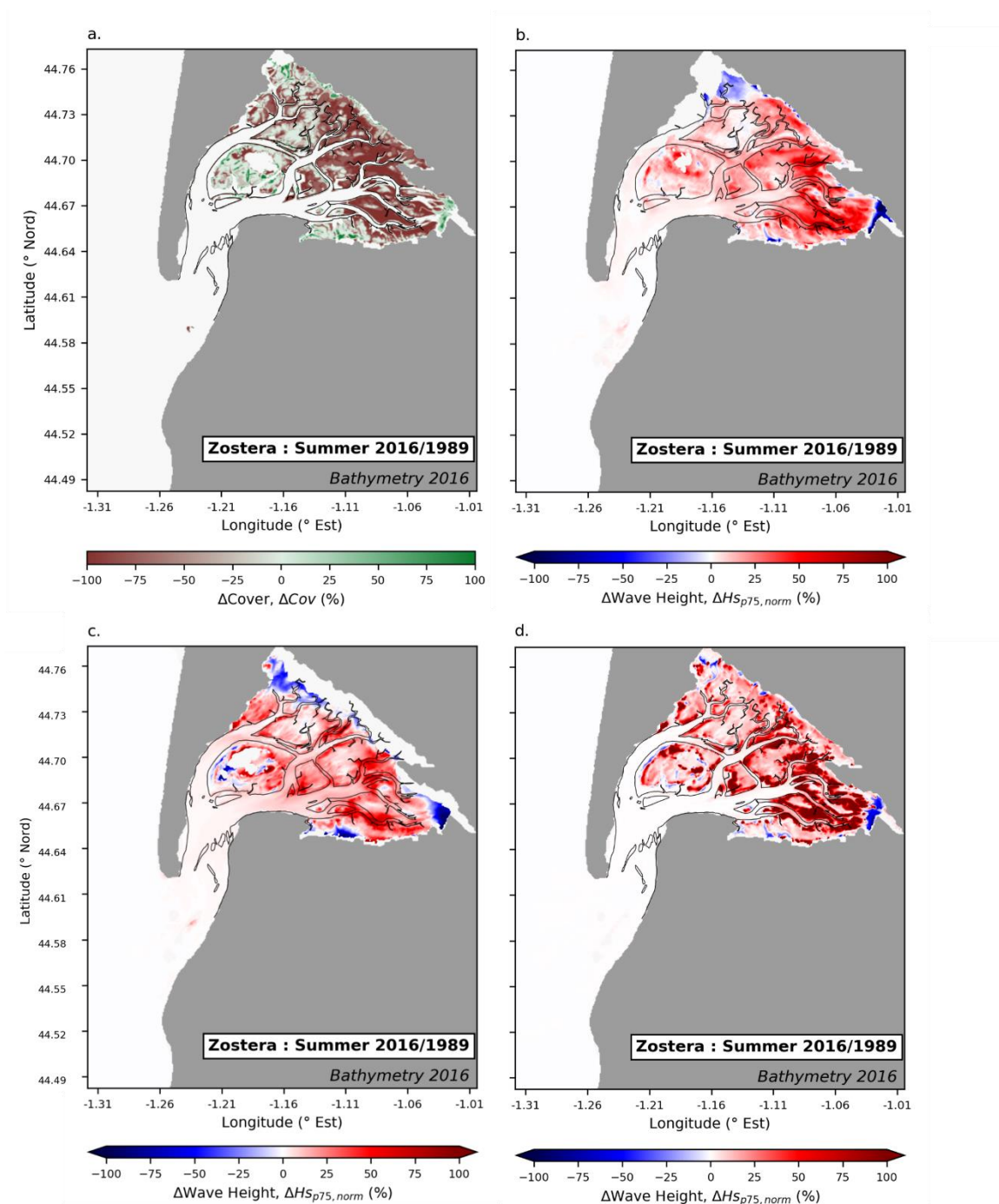


Figure 10 : Taux d'évolution des hauteurs de vagues résultant de la régression des herbiers de zostères entre 1989 et 2016. (a) Evolution du recouvrement des herbiers. Taux d'évolution des hauteurs de vagues dans le cas d'un évènement de brise thermique (b), d'anticyclone hivernal (c) et de tempête (d)

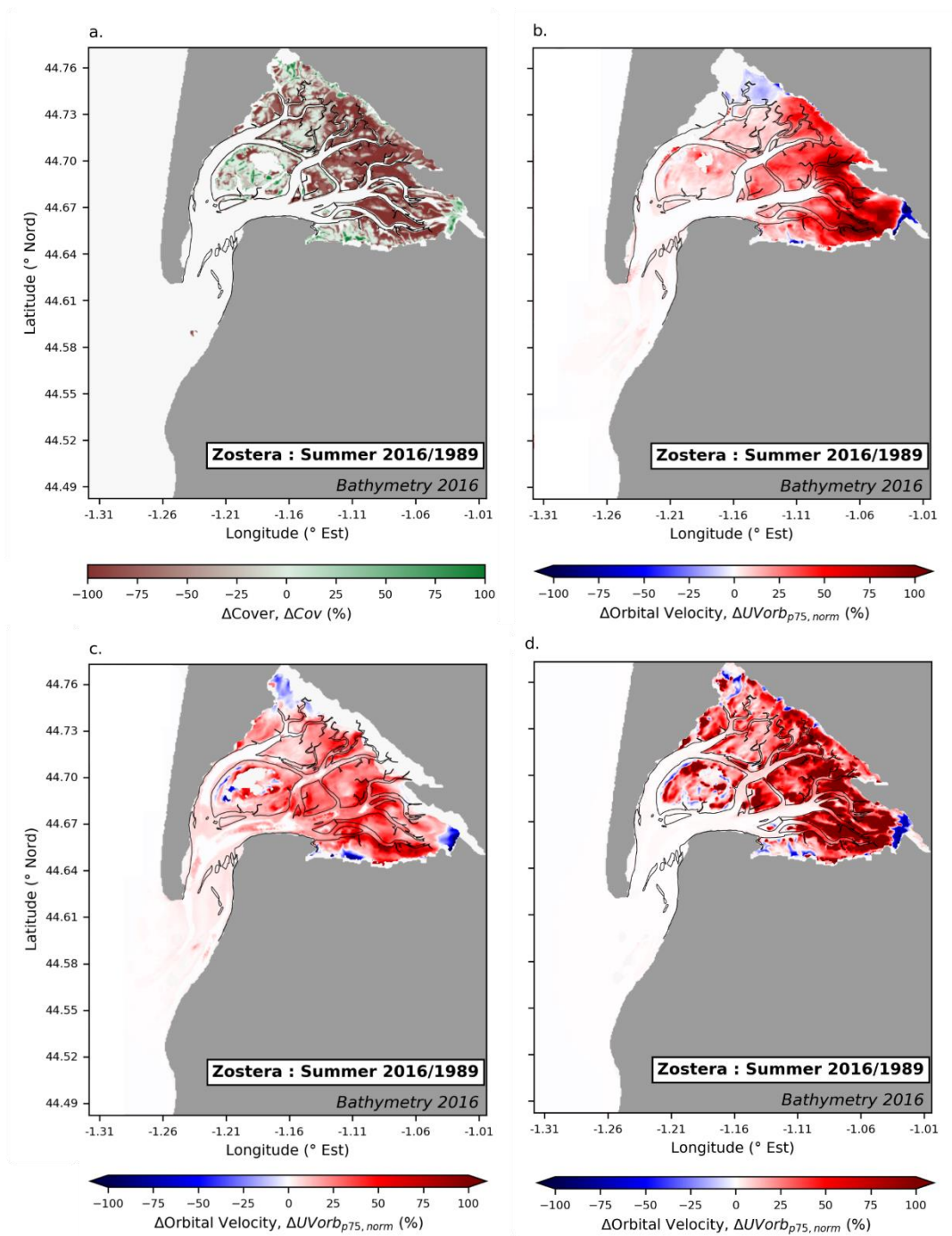


Figure 11 : Taux d'évolution des vitesses orbitales résultant de la régression des herbiers de zostères entre 1989 et 2016. (a) Evolution du recouvrement des herbiers. Taux d'évolution des vitesses orbitales dans le cas d'un évènement de brise thermique (b), d'anticyclone hivernal (c) et de tempête (d)

Une tendance similaire à ce qui a été observé pour les hauteurs de vagues est visible pour les vitesses orbitales (Figure 11), avec une augmentation de ces vitesses sur la grande majorité des estrans. L'augmentation la plus importante de ce paramètre a lieu dans la partie Sud du fond du bassin, où la régression des herbiers a été la plus importante, excédant par endroit les 80% de régression (Figure 11a). En effet, les vitesses orbitales vont jusqu'à doubler dans le cas d'une tempête types (Figure 11d), et peuvent augmenter de l'ordre de 75% dans le cas d'une brise thermique (Figure 11b). Pour ces deux scénarios, il est à noter que même les estrans qui ont subi une régression des herbiers bien moindre, sont marqués par une augmentation des vitesses orbitales allant de 10 à 30%. En revanche, dans le cas du scénario anticyclonique (Figure 11c), une tendance plus uniforme de l'augmentation des vitesses orbitales est constatable à l'échelle du bassin, avec une augmentation de l'ordre de 40% sur tous les estrans.

Alors que pour une brise thermique et une tempête typiques, aucun effet n'est visible dans les chenaux principaux et secondaires, dans le cas d'anticyclones hivernaux, la régression des herbiers sur les estrans a engendré des modifications dans tout le bassin et jusque dans les Passes. Bien que très légères dans les Passes (<10%), cette évolution est quelque peu plus marquée dans les chenaux principaux et secondaires (~10%), atteignant même 25% dans le chenal du Teychan.

## 4.3 Avancement et réalisations au terme de l'année 2022

### 4.3.1 Finalisation de la reconstruction du clapot

#### 4.3.1.1 Détermination de la fréquence de coupure supérieure

Bien qu'en 4.2.1 nous ayons montré que la méthode linéaire soit la méthode de reconstruction la plus appropriée pour le clapot dans le bassin d'Arcachon, des incertitudes subsistaient à cause de l'utilisation d'une fréquence de coupure constante. En effet, les vagues de clapot sont caractérisées par des périodes inférieures à 4 secondes (i.e., fréquence > 0.25 Hz), avec leur énergie spectrale qui est concentrée dans la bande haute fréquence (Jones and Monismith, 2007) et la fréquence pic généralement comprise entre 0.3 et 0.7Hz. En conséquence, il est important de reconstruire le signal jusqu'à une fréquence suffisamment élevée afin d'intégrer le pic d'énergie dans le calcul des paramètres de vagues. Jones et Monismith (2007) ont utilisé une fréquence de coupure à 0.6Hz, alors que Paul and Amos (2011) ont utilisé 1 Hz. Dans certains cas les fréquences ne sont pas suffisamment élevées et n'intègrent pas le pic d'énergie, alors que dans d'autres cas ces fréquences sont trop élevées et la théorie linéaire explose avant la fréquence de coupure. Dans ce dernier cas, l'explosion de la théorie linéaire entraîne une forte surestimation de l'énergie contenue dans le spectre.

Afin de choisir une fréquence de coupure suffisamment haute, un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, Signature 1000, Nortek) équipé d'un système AST (Acoustic Surface Tracking) a été déployé à Bourrut pendant 2 semaines. L'AST fournit une mesure directe de la surface libre qui peut ainsi être utilisée comme signal de référence pour la reconstruction. La figure 12 montre le spectre de densité des vagues de deux bursts, l'un enregistré durant des conditions énergétiques (forts clapot, Fig. 12.b) et l'autre durant des conditions faiblement à modérément énergétiques (faible clapot, Fig. 12a) et compare le spectre de l'AST (utilisé comme référence) avec les différentes reconstructions. En plus de montrer que la reconstruction hydrostatique, comme attendue, n'est pas performante, on montre aussi qu'une fréquence de coupure supérieure à 0.6Hz peut parfois être trop faible pour inclure le pic d'énergie (Fig 12.a). On note par exemple pour le burst présenté en figure 12.a que la hauteur significative ( $H_{m0}$ ) est sous-estimée d'environ

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du

Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -

31.05.2024

Page 36 sur 181

50%. Cette variation de la fréquence de coupure d'un burst à l'autre est le résultat de multiples facteurs (e.g. le bruit de l'instrument, la non-linéarité,...) qui ne peuvent pas être prédits.

Pour faire face à ce problème, une simple méthode permettant d'identifier automatiquement la fréquence de coupure supérieure la plus adaptée à partir de la queue de 'bruit' du signal hydrostatique ( $\zeta_H$ ) a été développée. Cette méthode consiste à trouver la rupture de pente entre le 'signal' et le 'bruit' (intersection entre les deux droites sécantes bleues, Fig 12.b). Il convient de noter que cette méthode est inspirée d'études pionnières qui utilisent un seuil de 'bruit' (Jones and Monismith, 2007). Cependant, le 'bruit' de l'instrument n'est pas toujours bien défini et peut varier dans le temps à cause de la présence de non-linéarités. Ainsi, cette méthode permet de prendre en compte la variabilité dans la queue du 'bruit' entre les différents bursts et est effectuée sur le signal hydrostatique qui, lui, peut toujours être obtenu. La Figure 12.b. présente un exemple de la 'méthode des sécantes'. Il faut noter que certains spectres peuvent être assez déformés, auquel cas cette méthode ne permet pas d'estimer la fréquence de coupure précisément. Pour éviter de choisir une fréquence de coupure non réaliste, la sélection est comprise entre 0.3Hz et 0.9Hz, avec une valeur par défaut de 0.6Hz si la fréquence obtenue est en dehors de ces bornes. Cette méthode est évaluée dans la prochaine section.

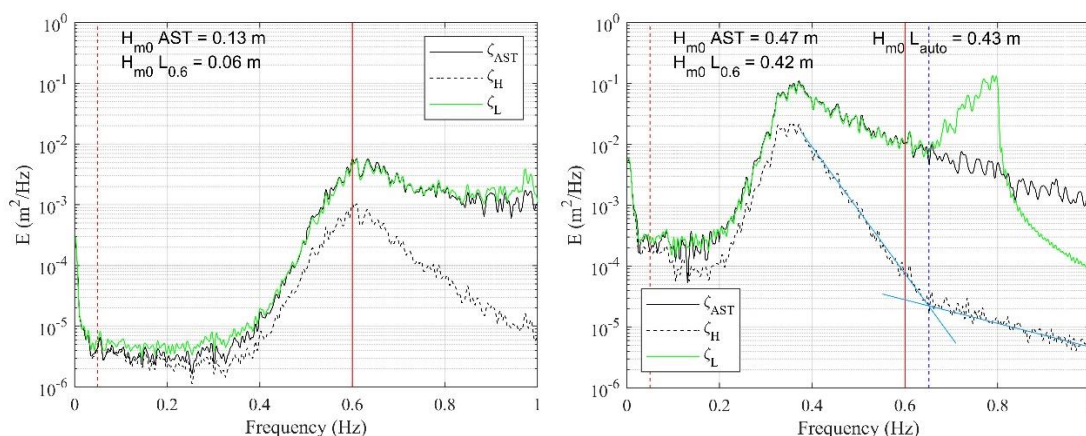


Figure 12: Spectre de densité d'énergie durant des conditions faibles-moérées (a) et des conditions fortement énergétiques (b), obtenue à partir d'un AST ( $\zeta_{AST}$ , ligne pleine noire), la reconstruction hydrostatique ( $\zeta_H$ , ligne pointillée noire), la reconstruction linéaire ( $\zeta_L$ , ligne pleine verte). La ligne pointillée verticale rouge marque la séparation entre la bande infragravitaire et gravitaire, et la ligne pleine rouge marque la fréquence de coupure à 0.6 Hz utilisée dans la littérature. Les lignes bleues en b) représentent la 'méthode des sécantes' utilisée pour déterminer la fréquence supérieure de coupure. On note que les autres méthodes non-linéaires (présentées en figure 8) dérivées pour des zones littorales ont également été testées, mais comme attendu, elles n'ont pas fournies de meilleures solutions que la théorie linéaire pour ce type d'environnement.

#### 4.3.1.2 Paramètres globaux et évaluation de la 'méthode des sécantes'

La figure 13 présente une comparaison entre le  $H_{m0}$  mesuré par l'AST et la théorie linéaire avec différentes fréquences de coupure. Cette figure montre que la majorité de l'énergie est contenue en dessous de 0.6Hz, principalement lors des événements énergétiques lors desquels le pic est situé vers 0.3-0.5Hz (Fig. 12.b), mais cette fréquence de coupure n'est pas suffisamment haute pour décrire l'énergie totale au cours des événements faiblement-moyennement énergétiques. Au contraire, la 'méthode des sécantes' témoigne d'une légère amélioration du calcul de l'énergie totale qui peut être importante pour certains événements faiblement-moyennement énergétiques. L'utilisation de la 'méthode des sécantes' permet de représenter en moyenne 60%

du signal de l'AST, contre 48% avec une fréquence de coupure supérieure fixée à 0.6Hz (Fig. 13). Ce pourcentage relativement faible est principalement lié à la présence de bursts très faiblement énergétiques (incluant le début et la fin de la marée, avec de très faibles profondeurs). Ainsi, bien que tous les événements de vagues soient importants pour la calibration du modèle, le biais restant pour les très petites vagues reste limité dans l'interprétation des résultats de cette étude.

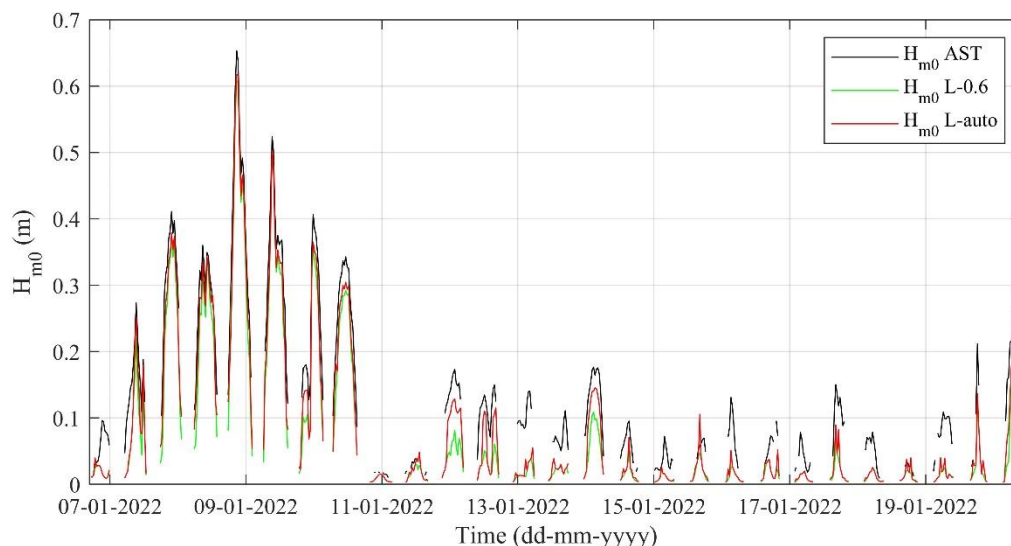


Figure 13: La hauteur de vagues significatives,  $H_{m0}$  obtenue avec l'AST (ligne noire), la reconstruction linéaire avec une fréquence de coupure à 0.6 Hz (ligne verte) et la fréquence de coupure adaptative obtenue par la 'méthode des sécantes' (ligne rouge), sont comparées aux mesures de l'ADCP sur deux semaines.

#### 4.3.2 Détermination du coefficient de trainée empirique

Une bonne reconstruction des vagues ayant été obtenue, les doutes majeurs qui étaient présents dans la calibration du modèle sont désormais attribués à des erreurs de calibration plutôt qu'à des incertitudes provenant des données. La phase de calibration du coefficient de trainée a ainsi pu reprendre, à partir de la méthode décrite dans la section 4.2.5. Le coefficient de trainée est un terme de calibration du modèle qui sert à décrire la résistance exercée par les herbiers sur l'écoulement et sert également de terme fourre-tout de tous les effets non pris en compte dans la paramétrisation, tel que le mouvement de la canopée. Ce coefficient est de la forme  $C_d = a + \left(\frac{b}{Q_{Re}}\right)^c$  et a été raffiné par Garzon et al. (2019), pour prendre en compte l'effet de la hauteur de canopée, à travers la profondeur relative ( $h_r$ ) :

$$C_d = a + \left(\frac{b}{Q_{Re}}\right)^c. \quad (\text{Eq. 15})$$

Avec,

$$Q_{Re} = \frac{Re}{(h_r^{-1})^d} \quad (\text{Eq. 16})$$

Où  $a, b, c, d$  sont des coefficients de calibration et  $R_e$  le nombre de Reynolds comme défini dans l'équation 10.

Les résultats obtenus (Fig. 14) montrent que la courbe de tendance est formulée à partir d'un nombre de points réduits (8 points), alors que les autres données sont, soit fortement sous-estimées ou surestimées par le modèle, se traduisant par des coefficients de trainées proche de 0 ou supérieurs à 2.5, respectivement.

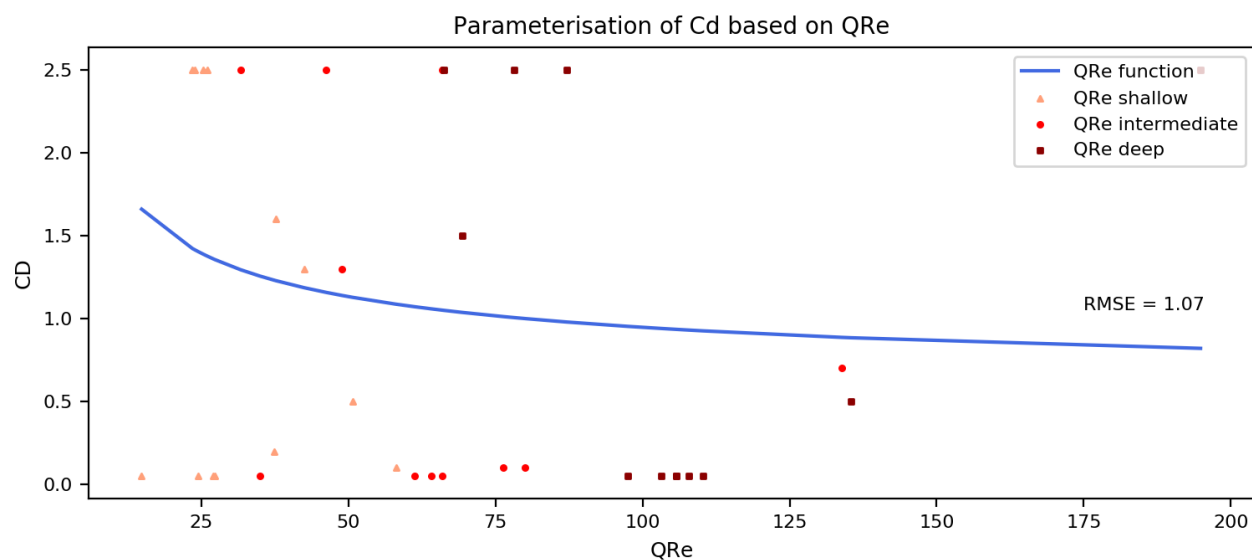


Figure 14: Paramétrisation du coefficient de trainée reposant sur l'équation 16 fournissant l'erreur la plus faible (courbe bleue) par rapport aux résultats issus de la modélisation (en eau peu profonde (triangle saumon), en eau intermédiaire (cercle rouge) et en eau profonde (carré bordeaux))

Ces résultats peuvent s'expliquer par la forte hétérogénéité spatiale du site d'étude (densité des herbiers très variable le long du transect, bathymétrie très changeante dans le temps). Du fait de cette variabilité, le modèle n'est pas capable de reproduire de manière suffisamment précise ce qui se passe sur un transect de 100m. Bien qu'une analyse en canal à vague pourrait permettre de s'affranchir de cette variabilité, elle ne serait pas représentative de toutes les non-linéarités observées dans le bassin, telles que les interactions courants-vagues, ou encore la variation du niveau d'eau.

Compte tenu du manque de précision de ces résultats, le coefficient de trainée défini par Paul et Amos, (2011) (Eq.10), paramétré pour des zostères naines sous des conditions de clapot, sera utilisé dans la suite de l'étude. Cette étude a été sélectionnée puisqu'elle est celle correspondant le plus aux conditions (conditions de vagues, espèce des herbiers) rencontrées dans le bassin d'Arcachon.

### 4.3.3 Calibration finale et validation du modèle de vagues

Le choix du coefficient de trainée ayant été validé et les données de vagues raffinées, la phase finale de calibration a pu être effectuée.

La calibration du modèle a été effectuée en 3 sites (ILE, GARR, FONT), plus ou moins profond dans le Bassin, avec ILE proche de l'entrée, GARR au milieu et FONT en fond de bassin, en utilisant les données du projet RezoENV (Cognat 2019). La calibration a été effectuée sur deux périodes (d'environ 10 jours) présentant des stades de développement des herbiers différents et au cours desquelles des conditions de vents énergétiques ont été enregistrées. Une période hivernale du 3

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -

Janvier 2016 au 13 Janvier 2015, caractérisée par une très faible couverture d’herbier et de forts évènements venteux, et une période estivale du 5 Juin 2016 au 15 Juin 2016 caractérisée par un développement des herbiers importants et des évènements moyennement énergétiques. Une telle calibration permet de prendre en compte le développement saisonnier de *Z.noltei* dans la calibration du modèle, pour des évènements énergétiques ayant une forte influence sur la dynamique sédimentaire.

Les hauteurs de vagues simulées représentent bien les hauteurs de vagues mesurées pour la période de calibration hivernale aux 3 sites (Fig. 15), avec une courbe de tendance comprise entre 1.08 et 0.91 et avec une RMSE de 0.112m et 0.147m respectivement à ILE (Fig. 15a) et GARR (Fig. 15b), où la hauteur de vagues excède les 0.75m et une RMSE de 0.104m à FONT (Fig. 15c). La calibration du modèle dans des conditions estivales (Fig. 16) est effectuée pour des hauteurs de vagues plus faibles, si bien que le site peu profond de fond de bassin (FONT) ne fournit pas de hauteurs de vagues assez importantes permettant d’effectuer la calibration (Fig. 16c). Pour cette période, les hauteurs de vagues simulées reproduisent correctement les tendances observées dans les données, avec des erreurs, exprimées en termes de RMSEs, de 0.047m à ILE (Fig. 16a) et 0.063m à GARR (Fig. 16b) et des tendances proches de la droite linéaire de référence avec une pente de 0.94 pour ILE et 0.8 pour GARR. Malgré la bonne valeur de ces indicateurs statistiques, les deux périodes étudiées possèdent des pics de hauteur de vagues mal reproduits par le modèle. Le 09/01 (Fig. 15a,b) à GARR et à ILE qui provient certainement de la discrétisation horaire des données de vents utilisées pour forcer le modèle, dans lesquelles les rafales de vent peuvent être omises. Par ailleurs, l’effet des courants n’étant pas pris en compte dans la paramétrisation des vagues, il se pourrait que le déferlement des vagues induit par la végétation ne soit pas bien représenté dans certains cas et c’est qu’on observe le 11/06 avec des pics de vagues fortement surestimés à GARR (Fig. 15b), un site en bord de chenal soumis où de forts courants peuvent être observés. L’été (Fig. 16), une alternance entre une faible sous-estimation et faible surestimation est visible, et peut certainement s’expliquer par les effets non-linéaires provoqués par la présence de végétation sur les vagues et qui ne sont pas représentés dans ce modèle

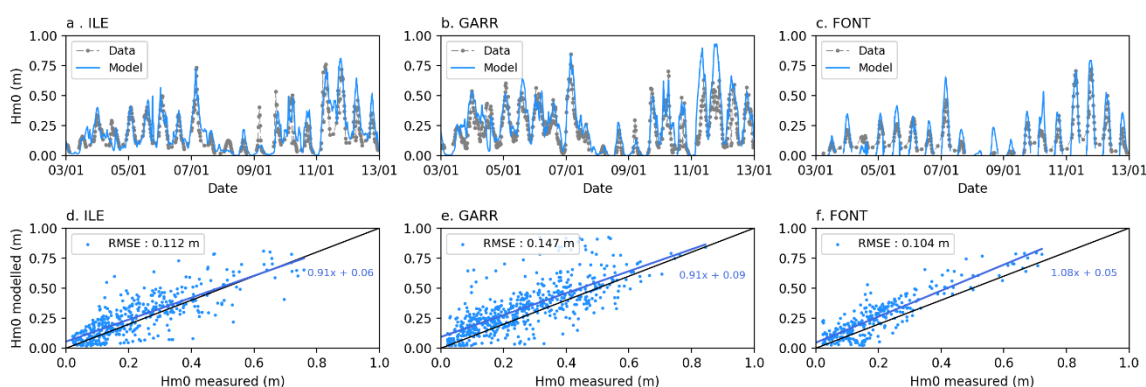


Figure 15 : Calibration du modèle en période hivernale (courbe bleue) par rapport aux mesures (lignes pointillées et point gris), sous forme série temporelle (a,b,c) et nuage de points (d,e,f) pour les trois sites d’étude Ile(a,d), Garrèche(b,e) et Fontaine(c,f).



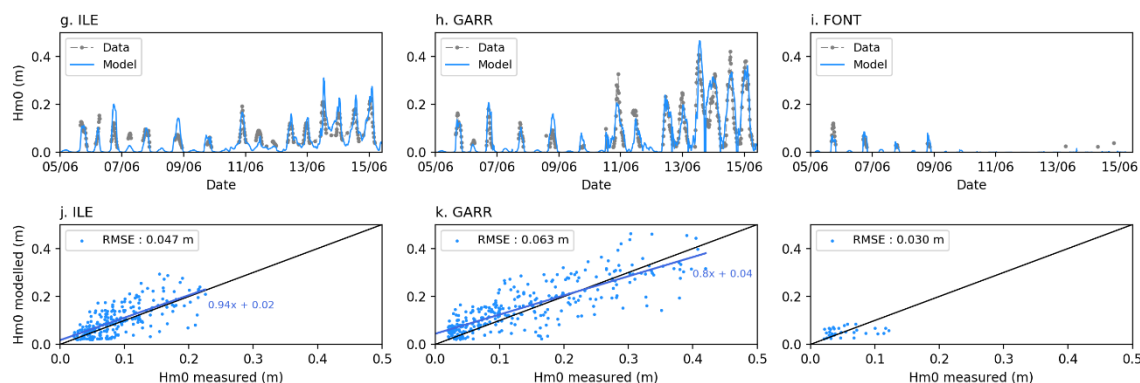


Figure 16 : Calibration du modèle en période estivale (courbe bleue) par rapport aux mesures (lignes pointillées et point gris), sous forme série temporelle (a,b,c) et nuage de points (d,e,f) pour les trois sites d'étude Ile(a,d), Garrèche(b,e) et Fontaine(c,f).

Le Bassin d'Arcachon, constitué à 70% de zones intertidales avec des forts courants dans les Passes et les chenaux, de fortes pentes sur les rebords de chenaux et de très faibles pentes sur les vasières, rend la modélisation numérique très complexe en ce site. Compte tenu de ces difficultés, cette calibration du modèle apparaît très satisfaisante pour les deux périodes.

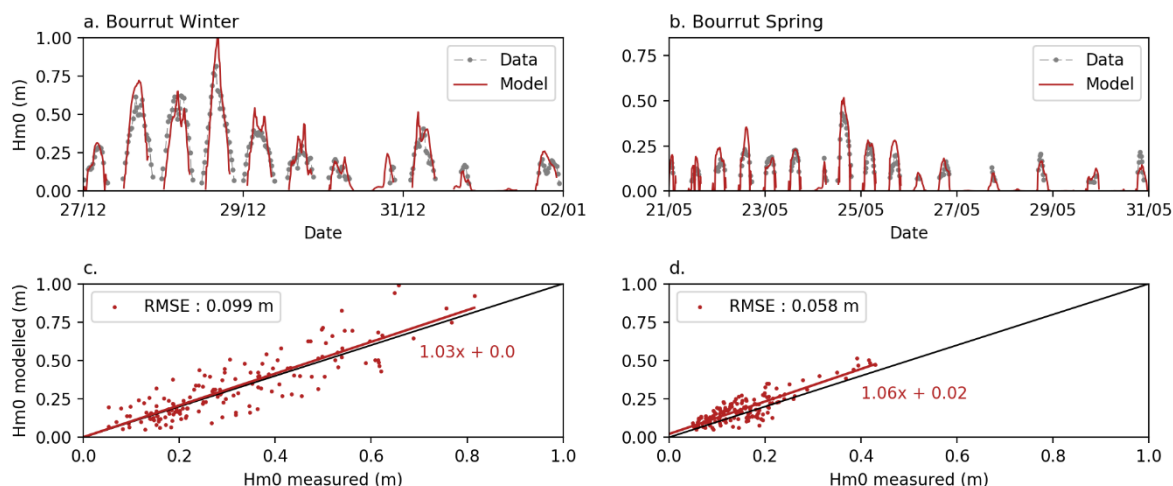


Figure 17 : Validation du modèle (courbe rouge) en période hivernale (a,c) et estivale (b,d) par rapport aux mesures (lignes pointillées et point gris), sous forme série temporelle (a,b) et nuage de points (c,d) à Bourrut.

La validation du modèle est effectuée à Bourrut sur les données ARCADE de 2020-2021, sur des périodes sélectionnées de la même manière que pour la calibration, c'est-à-dire des périodes énergétiques et possédant des développements d'herbiers contrastés. La période hivernale choisie s'étend du 27 Décembre 2020 au 2 Janvier 2021 et la période estivale du 21 Mai 2021 au 31 Mai 2021. La validation en conditions hivernales (Fig. 17a) et estivales (Fig. 17b) fournissent une bonne représentation des vagues mesurées avec une RMSE de 0.99m pour un coefficient directeur de 0.099 en hiver et une RMSE de 0.058 pour une courbe de tendance ayant un coefficient directeur de 0.058m en été. Les différences qui subsistent entre le modèle et les données peuvent une fois de plus s'expliquer par la présence de courants puisque ce site est situé à proximité de deux petits étiers qui peuvent influencer la chenalisation des courants et ainsi modifier localement la direction de propagation des courants. Toutefois ces phénomènes ne sont

pas pris en compte dans le modèle compte tenu sa discrétisation spatiale (100m) induisant des erreurs dans le calcul des interactions courants-vagues.

Globalement, ce modèle reproduit bien les tendances des données *in situ* et fournit une bonne représentation des hauteurs de vagues les plus importantes (>0.3m). Ce modèle a vocation à être employé au sein d'une plateforme de modélisation bio-hydro-sédimentaire afin d'étudier la dynamique sédimentaire dans le bassin d'Arcachon. De ce point de vue une certaine tolérance peut être acceptée dans sa calibration et le modèle apparaît calibré et validé de manière très satisfaisante.

#### 4.3.4 Nouveaux résultats

Les résultats en obtenus section 4.2.6 sont présentés suite à la nouvelle calibration du modèle. Ici, seuls les résultats de l'évolution de la hauteur de vagues et des vitesses orbitales sont présentés, obtenus dans le cas d'un scénario de brise thermique de Nord-Ouest de  $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La régression des herbiers a entraîné une augmentation des hauteurs de vagues sur la grande majorité des vasières, à l'échelle du bassin. La plus forte évolution est enregistrée dans la zone Est du bassin, où la régression est la plus importante, avec  $\Delta H_s$  dépassant les 10cm, ce qui correspond à une amplification des hauteurs significatives de l'ordre de 50%. Dans cette région les vitesses orbitales ont suivi la même tendance, avec des vitesses orbitales proche du fond qui vont jusqu'à doubler dans cette zone.

Dans la partie Nord du Bassin, une tendance plus contrastée est observée sur l'évolution des hauteurs de vagues et malgré la tendance globale à l'augmentation ( $\sim 10\%$ ), de nombreuses zones éparses semblent être marquées par des  $H_s$  légèrement plus faibles. En revanche les vitesses orbitales proches du fond sont amplifiées sur la majorité des estrans de cette zone.

A l'Ouest de l'Île aux Oiseaux, les herbiers ont légèrement progressé, mais à cause du très fort déclin qui a touché la zone Nord de l'Île aux Oiseaux et de la subséquente intensification des conditions de vagues dans cette zone, une amplification des hauteurs de vagues est observée dans la zone Ouest où les herbiers se sont développés. Cela témoigne de l'influence à grande échelle du déclin des herbiers sur les conditions de vagues, qui n'impacte pas seulement les zones où la régression s'est produite.

L'effet global de la régression est particulièrement visible dans les chenaux, des zones non-colonisées par les herbiers, qui témoignent d'un renforcement des hauteurs de vagues. Dans le fond du bassin, les hauteurs significatives ont augmenté d'environ 5cm dans les chenaux internes peu profonds et de quelques centimètres (<3 cm) dans les chenaux secondaires plus profonds. Cependant cette amplification apparaît de faible importance lorsqu'on s'intéresse au taux d'évolution dans cette région, puisque l'évolution relative n'est quasiment pas visible dans les chenaux secondaires et assez faibles dans les chenaux internes, où  $H_s$  a augmenté de 10% et  $U_{vorb}$  de 30%.

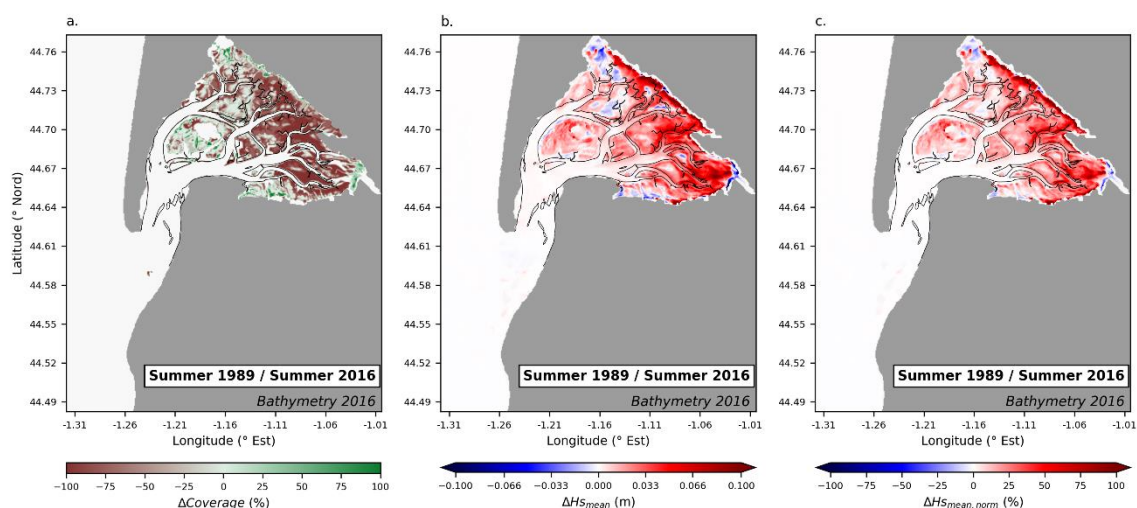


Figure 18: Régression des herbiers (a) et son impact sur l'évolution des hauteurs significatives en termes de différences brutes (b) et différences normalisées en % (c)

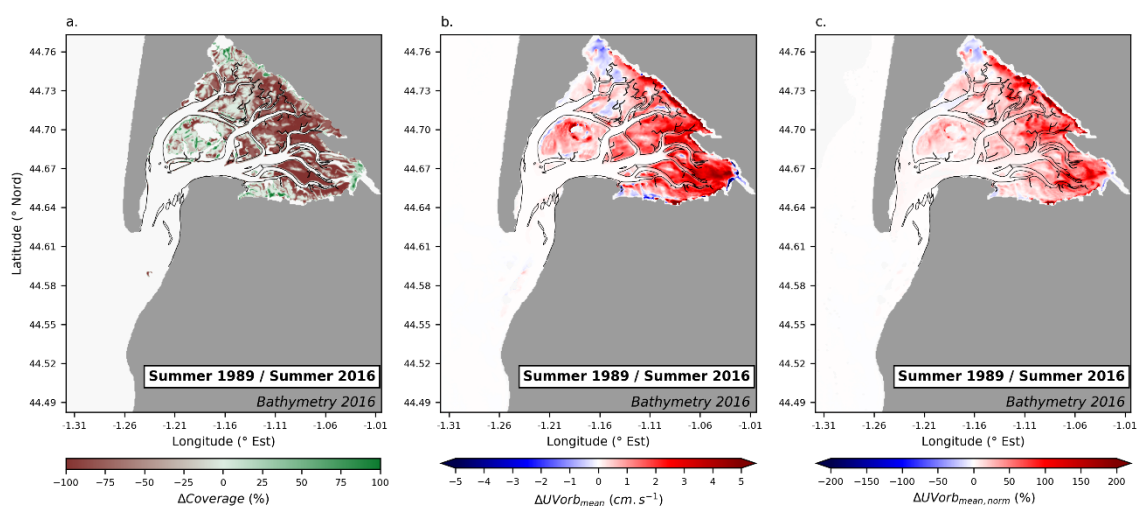


Figure 19: Régression des herbiers (a) et son impact sur l'évolution des vitesses orbitales sur le fond en termes de différences brutes (b) et différences normalisées en % (c)

Cette intensification des conditions de vagues s'est très certainement traduite par le renforcement de la remise en suspension de sédiments et des contraintes s'exerçant sur directement sur les herbiers. Même si dans certaines régions l'augmentation des vitesses orbitales sur le fond est faible, elle peut être suffisante pour franchir le seuil de contrainte à partir duquel la resuspension a lieu. L'évolution des conditions de vagues dans le Bassin d'Arcachon représente donc un stress supplémentaire pour les herbiers, que ce soit un stress direct induit sur les herbiers lié à l'intensification des conditions hydrodynamiques, ou indirect à travers la réduction de la lumière disponible suite à l'augmentation de la turbidité.

L'évolution des conditions de vagues suite au déclin des herbiers a également été étudiée à travers la série temporelle extraite à Passant (PASS), site situé dans la zone sud-Est du bassin où la régression a été la plus forte. Quasiment aucune évolution des hauteurs de vagues (fig. 20c) et vitesses orbitales (fig. 20d) ne peut être observé lors des marées de vives-eaux. Cela s'explique d'une part par la hauteur d'eau plus importante durant la marée haute, rendant l'effet du fond moins important, voir négligeable, sur l'énergie des vagues. De plus pour de telles conditions les

courants sont plus importants et la végétation davantage courbée, réduisant son effet sur les vagues et expliquant l'effet négligeable des herbiers sur les vagues dans ces conditions.

Cependant, lors de la marée de mortes-eaux, caractérisées par des hauteurs d'eau plus faible et des courants de marées moins forts. Une réduction des hauteurs significatives et vitesses orbitales est observées tout au long de la marée, avec ces paramètres pouvant être réduit de plus de moitié. A noter, le déferlement des vagues qui est favorisé sous ces conditions et qui se traduit par une forte réduction des hauteurs de vagues.

Dans le cas d'un scénario de brise thermique de Nord-Ouest, les vagues possèdent un long fetch (distance sur laquelle les vagues se développent sous l'effet du vent) le long duquel elles subissent des pertes d'énergie liée à la présence de végétation avant d'atteindre ce site localisé dans le Sud-Est du bassin. La modification des conditions de vagues en ce site, n'est donc pas seulement le résultat de la régression locale, mais de la régression qui a lieu à l'échelle du Bassin.

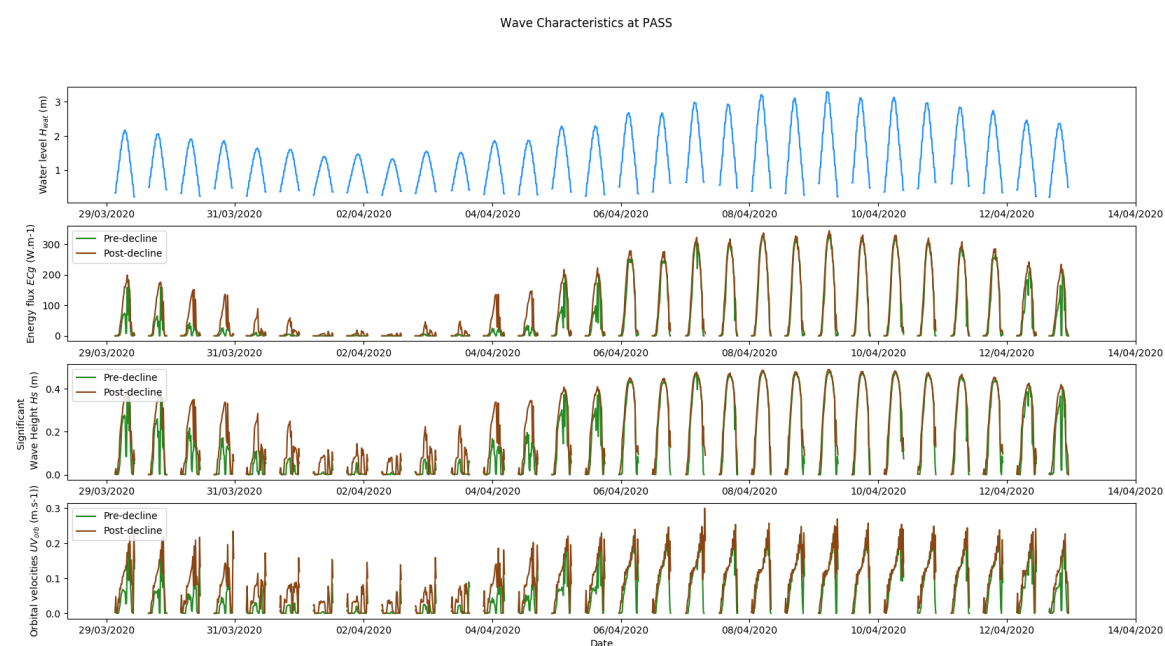


Figure 20 : La courbe bleue dans la figure du haut (a) représente le niveau d'eau, la courbe verte correspond aux paramètres dans le cas pré-régression et la courbe marron aux paramètres dans le scénario post-régression. Ces séries temporelles sont présentées pour le flux d'énergie (b), la hauteur significative (c) et les vitesses orbitales sur le fond (d) à Bourrut.

## 5 Sédiment

### 5.1 Avancement et réalisations de l'année 2020

#### 5.1.1 Calibration préliminaire du modèle sédimentaire

Bien que tous les processus relatifs aux effets des herbiers de zostères ne soient pas encore pris en compte dans le module de transport sédimentaire, une calibration préliminaire a été réalisée dans le but d'obtenir une première estimation des valeurs des coefficients de calibration et autres paramètres du module (24 paramètres au total). Ceci permettra d'affiner la valeur des paramètres au fur et à mesure que les différents processus relatifs aux herbiers seront implémentés.

##### 5.1.1.1 Description du module MUSTANG

Le module de dynamique sédimentaire MUSTANG (Le Hir *et al.*, 2011 ; Mengual *et al.*, 2017) résout les équations d'advection/diffusion des matières en suspension dans la colonne d'eau et permet de simuler l'évolution des concentrations en sédiment dans la colonne d'eau et les caractéristiques du fond sédimentaire, pour les sédiments mixtes (sables, vases et mélange des deux), sous l'effet des forçages hydrodynamiques. Le fond sédimentaire est défini par un maximum de 100 couches dont l'épaisseur varie entre 10  $\mu\text{m}$  et 5 cm. L'épaisseur et le contenu des couches varient spatialement et temporairement.

Les processus d'érosion sont définis selon la loi de Mehta et Partheniades (1979) tels que :

$$E = E_0 * \alpha * \left[ \frac{\tau - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right]^n \quad (\text{Eq. 17})$$

Où  $E$  est le flux d'érosion ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) du mélange sédimentaire,  $E_0$  est le coefficient d'érosion,  $\tau$  est la contrainte de cisaillement au fond (calculée à partir de la longueur de rugosité de Nikuradsze, telle que  $z_{0, \text{sed}} = D/12$  où  $D$  est le diamètre médian du sédiment dans la couche superficielle),  $\tau_{ce}$  est la contrainte critique d'érosion,  $n$  est l'exposant de l'excès de cisaillement et  $\alpha$  est un facteur de correction dépendant de la densité du sédiment dans la couche de surface :

$$\alpha = 1 + \text{corfluer1} \cdot \max(0, \text{corfluer2} - C_{\text{sed,tot}}) \quad (\text{Eq. 18})$$

Où  $\text{corfluer1}$  et  $\text{corfluer2}$  sont des paramètres de calibration et  $C_{\text{sed,tot}}$  est la concentration totale du sédiment dans la couche de surface.

Les valeurs de  $E_0$ ,  $\tau_{ce}$  et  $n$  sont calculées selon la formulation exponentielle proposée par Mengual *et al.* (2017) dépendant de la fraction de vase. Ainsi si la fraction vaseuse ( $f_m$ ) est inférieure à une fraction critique ( $f_{mcr1}$ , calculée telle que :  $f_{mcr1} = c f_{mcr1} \cdot D$ , où  $c f_{mcr1}$  est un paramètre de calibration), le comportement du sédiment est considéré comme un sable pur ;  $E_{0,\text{sand}}$ ,  $\tau_{ce,\text{sand}}$  et  $n_{\text{sand}}$  sont alors appliquées directement dans le calcul du flux d'érosion (Eq. 17), avec  $E_{0,\text{sand}}$  et  $n_{\text{sand}}$  définis par l'utilisateur (paramètres de calibration) et  $\tau_{ce,\text{sand}}$  calculé à partir du paramètre de mobilité critique de Shields (Soulsby, 1997). Si la fraction vaseuse est supérieure à une seconde fraction critique ( $f_{mcr2}$ ), le sédiment est considéré comme une vase pure ;  $E_{0,\text{mud}}$ ,  $\tau_{ce,\text{mud}}$  et  $n_{\text{mud}}$  sont alors appliquées directement dans le calcul du flux d'érosion (Eq. 17), avec  $E_{0,\text{mud}}$  et  $n_{\text{mud}}$  définis par l'utilisateur (paramètres de calibration) et  $\tau_{ce,\text{mud}}$  calculé en fonction de la concentration relative en vase ( $C_{\text{mud,rel}}$ ) tels que :

$$\tau_{ce,\text{mud}} = x1 \tau_{ce\_mud} \cdot C_{\text{mud,rel}}^{x2} \quad (\text{Eq. 19})$$

$$C_{mud,rel} = C_{mud}/(1 - \varphi_{sand}) \quad (\text{Eq. 20})$$

Où  $x1toce\_mud$  et  $x2toce\_mud$  sont des coefficients de calibration,  $C_{mud}$  est la concentration en vase dans la couche superficielle et  $\varphi_{sand}$  est la fraction de sable (et graviers) dans la couche superficielle.

Enfin, lorsque la fraction de vase est comprise entre  $f_{mcr1}$  et  $f_{mcr2}$ , le sédiment est considéré comme un mélange sable/vase et les valeurs de  $E_0$ ,  $\tau_{ce}$  et  $n$  sont calculées telles que :

$$E_0 = (E_{0,sand} - E_{0,mud}) \cdot \exp(C_{exp} \cdot P_{exp}) + E_{0,mud} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\tau_{ce} = (\tau_{ce,sand} - \tau_{ce,mud}) \cdot \exp(C_{exp} \cdot P_{exp}) + \tau_{ce,mud} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$n = (n_{sand} - n_{mud}) \cdot \exp(C_{exp} \cdot P_{exp}) + n_{mud} \quad (\text{Eq. 23})$$

Où,  $C_{exp}$  est un coefficient de calibration et  $P_{exp} = (f_{mcr1} - f_m)/(f_{mcr2} - f_{mcr1})$ .

Concernant les processus de dépôt, sont déposés d'abord les graviers, puis les sables et enfin les vases. Le flux de dépôt est fonction de la vitesse de chute des sédiments et de leur concentration dans la couche (d'eau) de fond. Pour les sédiments grossiers (sables), les vitesses de chutes sont calculées en fonction du diamètre des grains et de leur masse volumique (Soulsby, 1997), tandis que pour les sédiments fins (vases), 4 options sont disponibles pour le calcul de la vitesse de chute: une vitesse de chute constante, la formulation de Van Leussen (1994), la formulation de Winterwerp (1998), et la formulation de Wolanski *et al.* (1989). Dans cette étude, la formulation de Van Leussen (1994) a été utilisée, car étant la plus adaptée au cas du Bassin d'Arcachon :

$$W_s = k \cdot c^m \cdot \frac{1 + \alpha G}{1 + \beta G^2} \quad (\text{Eq. 24})$$

Avec  $W_s$  pour la vitesse de chute,  $c$  pour la concentration en matière en suspension,  $G$  pour le taux de cisaillement dont le calcul est détaillé par la suite (Eq. 25),  $k$ ,  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  les coefficients empiriques adaptés selon les caractéristiques du milieu étudié.

Le taux de cisaillement  $G$  se calcule ainsi :

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (\text{Eq. 25})$$

Où  $\varepsilon$  représente le taux de dissipation de l'énergie turbulente,  $\nu$  la viscosité cinématique de l'eau.

Dans le modèle, la vitesse de chute des vases est également bornée entre des valeurs définies par l'utilisateur :

$$w_{s,mud} = \max[w_{s,min}, \min(w_{s,max}, W^s)] \quad (\text{Eq. 26})$$

Où  $w_{s,min}$  est la vitesse de chute minimale et  $w_{s,max}$  est la vitesse de chute maximale des sédiments vaseux.

Lors du dépôt, une nouvelle couche peut être créée si l'épaisseur de la couche de surface dépasse l'épaisseur maximum définie par l'utilisateur (ici 5 mm). Ensuite, lorsque la concentration relative en vase du sédiment qui doit être déposé est inférieure à une concentration en vase critique ( $cmudcr$ ), il y a consolidation : le sédiment déposé se mélange avec le sédiment de la couche superficielle jusqu'à atteindre une porosité maximale de la couche ( $cvolmaxmel$ ). Ainsi la couche

s'épaissit. Au contraire, si la concentration relative de vase est supérieure à la concentration de vase critique, le modèle crée une nouvelle couche.

### 5.1.1.2 Méthodologie pour la calibration et validation du module de transport sédimentaire MUSTANG

La calibration et la validation du modèle sédimentaire ont été réalisées en comparant les concentrations en matière en suspension simulées aux données disponibles issues du réseau ARCHYD mis en œuvre depuis 1989 par l'Ifremer (Ifremer, 2018). Les mesures sont réalisées une fois par semaine à l'échelle de basse mer (en vive-eau) ou à l'échelle de haute-mer (en morte-eau) pour 7 stations réparties dans le Bassin d'Arcachon (Figure 21).

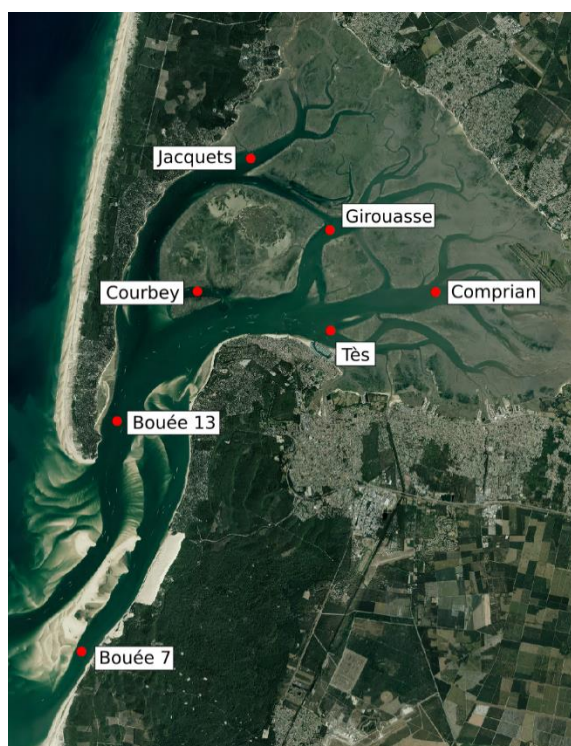


Figure 21 : Localisation des points de mesure du réseau ARCHYD (Fond de carte : Ortho-photo 2020, SIBA).

Le nombre de classes sédimentaires prises en compte dans le modèle a été fixé à 6 : gravier, sable grossier, sable moyen, sable fin, sable très fin et vase. Ces classes, ainsi que leurs diamètres (Table 1) ont été déterminées à partir de l'analyse de prélèvements (n=547) réalisés en juin 2018 dans l'ensemble du Bassin (Parc Naturel Marin du Bassin d'Arcachon – Ifremer – Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Elevages Marin de Gironde). L'analyse de ces données a également permis de définir la masse volumique des sables comme étant égale à  $2285 \text{ kg.m}^{-3}$  (Figure 22).

Type de sédiments	Diamètre des particules (m)
Graviers	0.01
Sables grossier	0.0015
Sables moyens	0.000365
Sables fins	0.000175
Sables très fins	0.000090
Vases	0.000030

Table 1 : Classes de sédiment prises en compte dans le modèle.

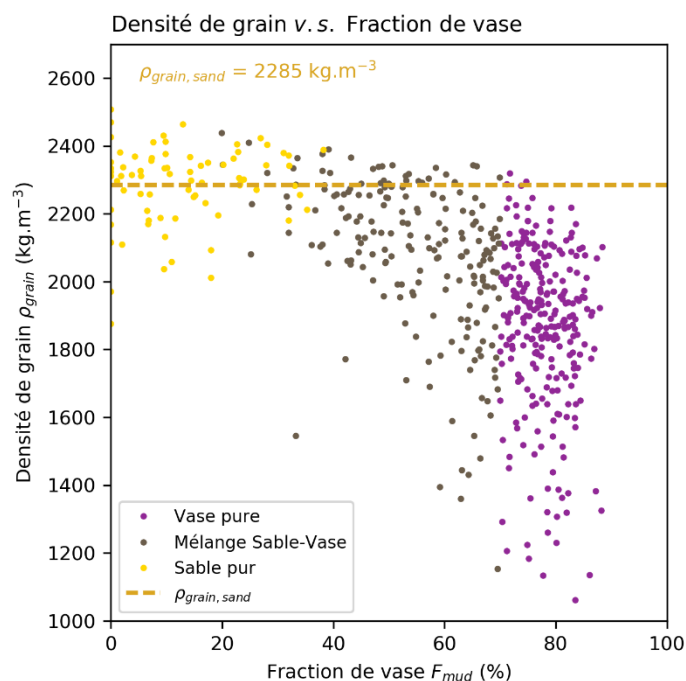


Figure 22 : Relation entre la fraction de vase et la densité de grain des sédiments superficiels du Bassin d'Arcachon.

En ce qui concerne l'initialisation du fond sédimentaire, la technique utilisée ici afin de limiter la durée de simulation, et de ce fait le temps de calcul, consiste à réaliser une première simulation hydrodynamique permettant de calculer des statistiques temporelles des contraintes de cisaillement sur le fond. Ensuite, en chaque maille, la fraction relative de chacune des classes sédimentaires est calculée en fonction des percentiles 20 et 80 des contraintes sur le fond. La concentration totale est ensuite calculée à partir d'une formule empirique obtenue à partir des données (Figure 23).



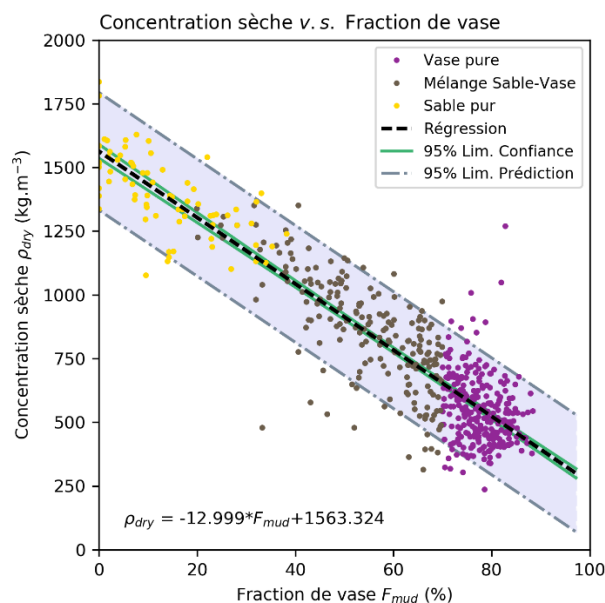


Figure 23 : Relation entre la fraction de vase et la concentration sèche des sédiments superficiels du Bassin d’Arcachon.

Afin de calibrer et valider le modèle sédimentaire, différents critères ont été définis pour déterminer la durée et les périodes temporelles des simulations. Tout d’abord, la durée de simulation a été définie à 6 mois (seuls les 3 derniers mois de simulation étant comparés aux données), meilleurs compromis entre temps de calcul (36 h) et nombre de données pouvant être comparées aux résultats du modèle. Par ailleurs, les périodes simulées devaient présenter des vitesses de vents faibles. En effet, dans son état actuel, le modèle n’est pas encore couplé avec le modèle de génération/propagation des vagues, si bien que l’effet du clapot sur les processus sédimentaires n’est pas pris en compte. Ainsi, seules ont été retenues pour l’exercice les périodes temporelles pendant lesquelles les vitesses de vent sont inférieures à  $6 \text{ m.s}^{-1}$  (vitesse considérée comme critique pour la génération du clapot) durant au moins 80 % du temps. A partir de ces critères, deux périodes ont été retenues : la première, de janvier 2016 à juin 2016, a permis la calibration du modèle tandis que la seconde, de juillet 2009 à janvier 2010, a été utilisée pour le valider.

Le processus de calibration a consisté à réaliser des simulations sur la première période (janvier 2016-juin 2016) en testant différentes valeurs pour les coefficients de calibration jusqu’à obtenir une bonne adéquation entre les concentrations mesurées et simulées (la synthèse des paramètres est présentée dans la table 2), tout en tenant compte des limitations du modèle actuel (pas de prise en compte des vagues, pas de prise en compte de l’effet des herbiers sur les vitesses de chute ni sur la contrainte critique d’érosion,  $\tau_{ce}$ , et coefficient d’érosion  $E_0$ ). Une fois que les meilleures valeurs des différents paramètres de calibration ont été retenues, le modèle a été lancé avec ces valeurs sur la seconde période (juillet 2009-janvier 2010) afin de le valider.

Catégorie	Description	Paramètre	Valeur retenue	Unité
Paramètres liés aux processus d'érosion	Coefficient d'érosion des vases	$E_{0,mud}$	2,5E-4	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
	Coefficient pour la contrainte critique d'érosion des vases	$x1toce\_mud$	1,0E-5	-
	Exposant pour la contrainte critique d'érosion des vases	$x2toce\_mud$	2,0	-
	Exposant de l'excès de contrainte pour les vases	$n_{mud}$	1,0	-
	Coefficient d'érosion des sables	$E_{0,sand}$	0.001	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
	Exposant de l'excès de contrainte pour les sables	$n_{sand}$	1.6	-
	Coefficient pour la fraction minimum de vase (comportement purement sableux)	$cf_{mcr1}$	1000.0	-
	Coefficient pour la fraction maximum de vase (comportement purement vaseux)	$f_{mcr2}$	0.7	-
	Coefficient pour la transition entre comportement sableux et comportement vaseux	$C_{exp}$	40.0	-
	Premier coefficient de correction du flux d'érosion	$corfluer1$	0.0	-
	Second coefficient de correction du flux d'érosion	$corfluer2$	350.0	-
Paramètres liés au dépôt des vases	Coefficient pour l'effet de la concentration sur les vitesses de chutes des vases	$k$	0.01	-
	Exposant pour l'effet de la concentration sur les vitesses de chute des vases	$m$	1.3	-
	Coefficient pour l'effet de la turbulence sur les vitesses de chute des vases	$\alpha$	0.3	-
	Exposant pour l'effet de la turbulence sur les vitesses de chute des vases	$\beta$	0.09	-
	Vitesse de chute minimum pour les vases	$w_{s,min}$	2.50E-5	$m.s^{-1}$
	Vitesse de chute maximum pour les vases	$w_{s,max}$	0.005	$m.s^{-1}$
Paramètres liés à la description du fond sédimentaire	Epaisseur de sédiment dans le domaine à l'initialisation	$hsed$	1.0	m
	Nombre de couches sédimentaires dans le domaine à l'initialisation	$ksmauni$	25	-
	Epaisseur minimum d'une couche sédimentaire	$dzsmin$	1.0E-5	m
	Epaisseur maximum d'une couche sédimentaire	$dzsmax$	0.005	m
	Concentration des dépôts frais vaseux	$cfreshmud$	100.0	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
	Concentration critique de la vase à déposer pour qu'il y ait consolidation	$cmudcr$	200	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
	Porosité maximum que peut atteindre une couche sédimentaire lors du processus de consolidation	$cvolmaxmel$	0.61	-

Table 2 : Valeurs des paramètres du module MUSTANG retenues après l'étape de calibration préliminaire.

### 5.1.1.3 Résultats de la validation du module de transport sédimentaire MUSTANG

La figure 24 présente les séries temporelles de concentrations en sédiments en suspension mesurées et simulées (pour la période de validation) pour trois stations localisées sur un gradient océan-continent. Rappelons que les mesures sont réalisées à l'étape de basse mer en période de vive-eau et à l'étape de pleine mer en période de morte-eau.

Les cycles morte-eau/vive-eau apparaissent clairement, tant pour les mesures que pour les résultats du modèle. Le modèle tend généralement à surestimer les concentrations en période de vive-eau (prélèvement de basse mer), tandis que les valeurs mesurées en période de morte-eau (pleine mer) sont bien mieux prédites par le modèle. Ceci traduit une érosion trop importante en période de vive-eau et/ou un dépôt trop faible, et peut être mis en relation avec le fait que l'effet de stabilisation du substrat sédimentaire joué par le niveau racinaire des herbiers, ainsi que l'augmentation des vitesses de chute des sédiments au sein de la canopée des herbiers, ne sont actuellement pas pris en compte dans le modèle. L'effet de la non prise en compte de ces processus sur les concentrations en sédiments en suspension serait plus marquée pour les basses mer de vive-eau que pour les pleines mer de morte-eau en raison du fait que les courants étant plus faible en morte-eau, l'érosion des sédiments des estrans y serait moins importante qu'en vive-eau.

Il s'avère également qu'en général, les basses mer de vive-eau sont mieux prédites à la station Bouée-13 (la plus océanique) qu'à la station Comprian (la plus interne), ce qui traduit qu'une part de la dynamique sédimentaire intra-Bassin n'est pas simulée convenablement, encore une fois, certainement en raison de l'absence de prise en compte des processus faisant intervenir la présence des herbiers.

D'autre part, pour les stations Tès et Comprian, il apparaît que les concentrations maximales simulées en période de vive-eau tendent à augmenter au cours de la simulation (depuis le mois d'août jusqu'au mois de décembre). Cette augmentation peut être reliée à la variation des caractéristiques des herbiers (densité de feuille, longueur) qui sont prises en compte dans le modèle hydrodynamique et modifient les courants de fond, la contrainte de cisaillement sur le fond et donc les processus d'érosion.

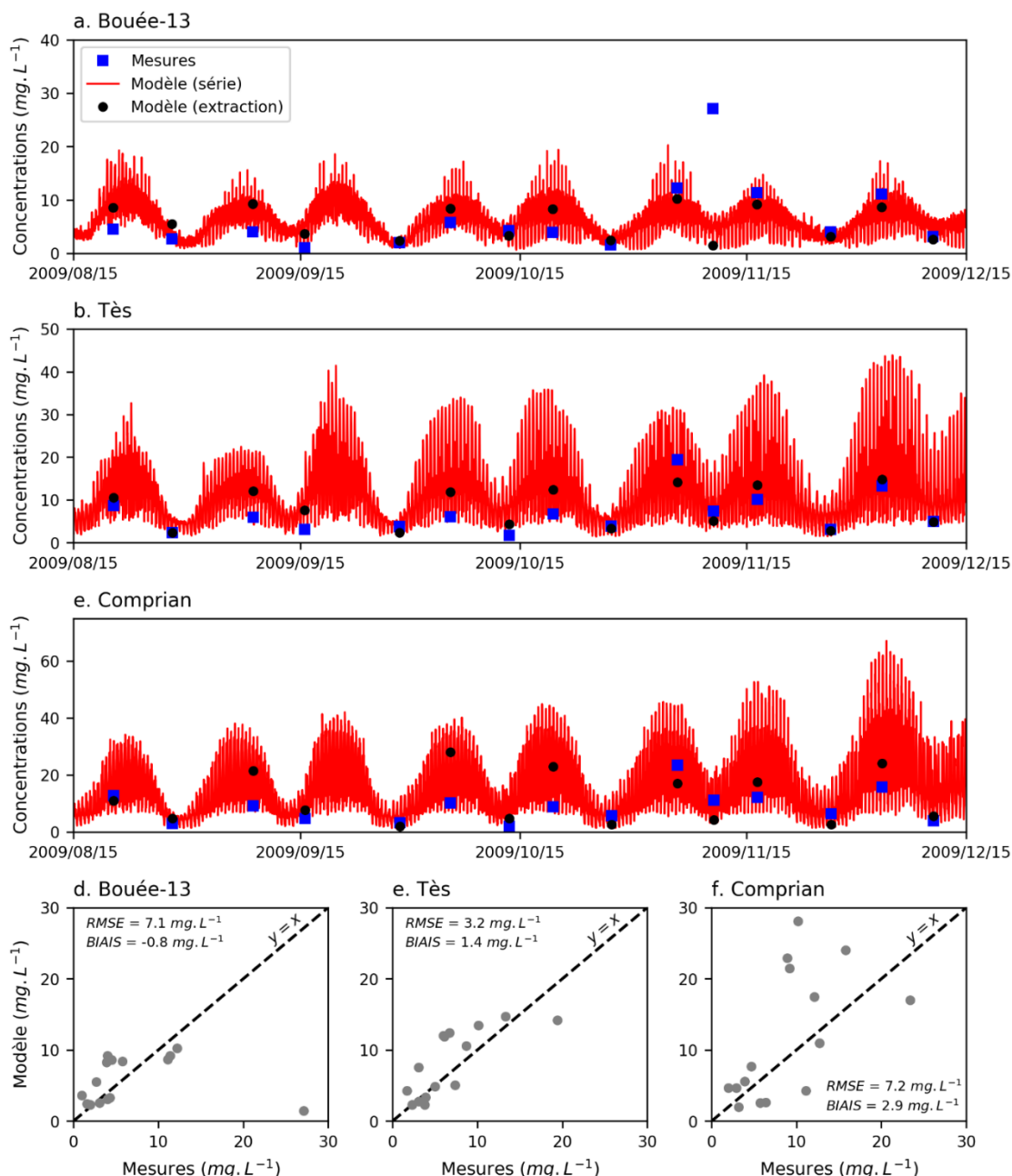


Figure 24 : Comparaison des concentrations en sédiments en suspension simulées par le modèle (MUSTANG) et mesurée in situ (ARCHYD) aux stations Bouée 13 (a.) à l'entrée du bassin, Tès (b.) au Sud, et Comprian (c.) à l'Est et à l'intérieur du Bassin ; et comparaisons mesures/modèles sous forme de nuage de points aux stations (d.) Bouée-13, (e.) Tès et (f.) Comprian.

Enfin, une remarque intéressante concerne l'amplitude de variation des concentrations en sédiments en suspension. En effet, même si le modèle n'est pas finement calibré, il apparaît que l'amplitude des concentrations simulées est bien plus importante que celle des concentrations mesurées, très certainement en raison du fait que les mesures ne sont réalisées qu'aux étales (de pleine/basse mer) qui correspondent aux moments de marée où les courants sont les plus faibles, donc où les sédiments sont le moins érodés et peuvent se déposer. Ceci implique que la stratégie

de mesure ne permet finalement pas de rendre compte de l'intégralité de la dynamique des sédiments en suspension.

### 5.1.2 Première analyse du rôle des herbiers et de leur régression sur les flux sédimentaires

Passé l'étape de pré-calibration du module sédimentaire MUSTANG, une première analyse des effets de la régression des herbiers de zostères dans le Bassin d'Arcachon a été réalisée. Rappelons que seul l'effet des herbiers sur les courants est ici pris en compte. Pour ce faire, cinq simulations d'une durée de 6 mois ont été réalisées (seuls les trois derniers mois de simulation ont été analysés) en prenant en compte différentes emprises spatiales des herbiers (emprise pré- et post-régression et absence totale d'herbier) et deux stades de développement des herbiers, caractérisés par deux paramètres, densité de feuilles et longueur de feuilles (développement estival et développement hivernal).

Les résultats de ces simulations ont ensuite été analysés en termes de :

- **taux d'augmentation des concentrations en sédiments en suspension** pour l'emprise des herbiers post-régression par rapport à leur emprise pré-régression (Figure 25);
- **stock sédimentaire en suspension**, soit la quantité totale de sédiments en suspension dans l'ensemble du Bassin (Figure 26).

Tout d'abord, les taux d'augmentation (en condition post-régression, par rapport aux conditions pré-régression des herbiers) des concentrations en sédiments en suspension apparaissent bien plus forts pour les herbiers en conditions estivales (Figure 25c et 25d) que pour les herbiers en conditions hivernales (Figure 25a et 25b) : les concentrations obtenues pour les herbiers post-régression sont entre 5 et 30 fois plus fortes que pour les herbiers pré-régression en conditions estivales, alors qu'elles sont entre 2 et 5 fois plus fortes en conditions hivernales. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en hiver, les herbiers sont faiblement développés et jouent un rôle de protection contre l'érosion et de piégeage moins important qu'en été. Ensuite, on remarque que l'augmentation des concentrations est également plus importante pour des marées de morte-eau (Figure 25a et 25c) que pour des marées de vive-eau (Figure 25b et 25d), ce qui de prime abord pourrait sembler contre-intuitif. Cependant, l'érosion des sédiments n'intervenant que lorsque la contrainte de cisaillement sur le fond dépasse une certaine valeur (dépendant, entre-autre, de la nature du fond sédimentaire), il apparaît qu'en période de vive-eau, cette valeur seuil soit dépassée (induisant de l'érosion) sur la majorité des estrans, qu'il y ait des herbiers ou non ; tandis qu'en période de morte-eau, la régression des herbiers semble avoir conduit à un dépassement de ce seuil. En d'autres termes :

- en vive-eau, la quantité de sédiments érodés sur les estrans est assez semblable que l'on soit en conditions pré- ou post-régression, car dans les deux cas, la contrainte de cisaillement sur le fond est supérieure à la contrainte critique d'érosion,
- en morte-eau, la quantité de sédiment érodés est faible en conditions pré-régression, car la contrainte de cisaillement est plus faible que la contrainte critique, alors qu'en conditions post-régression, là où les herbiers ont disparus, la contrainte de cisaillement est désormais plus forte que la contrainte critique, et induit donc de l'érosion là où il n'y en avait pas auparavant.

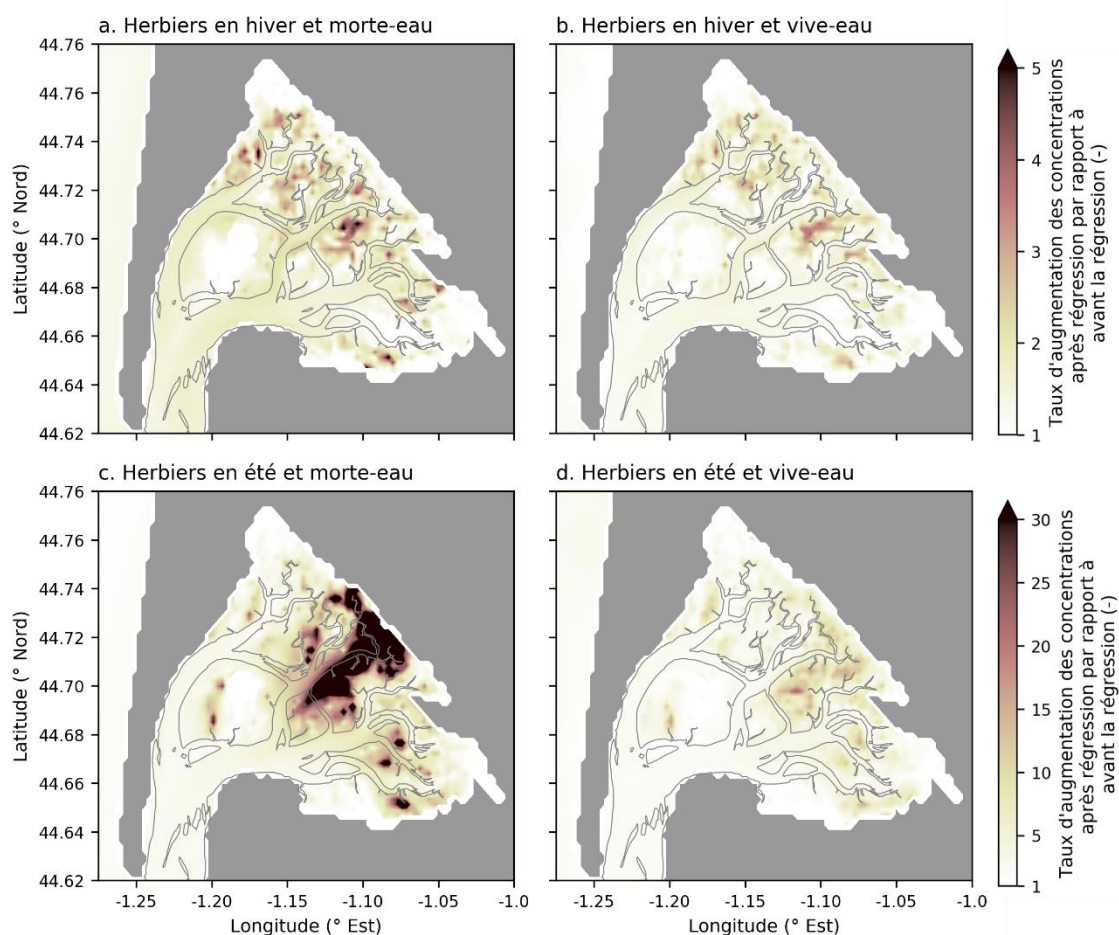


Figure 25 : Taux d'augmentation des concentrations en sédiments en suspension en conditions post-régression, par rapport aux conditions pré-régression, en fonction du stade de développement saisonnier des herbiers (développement hivernal : a. et b. ; développement estival : c. et d.) et des phases de marée (morte-eau : a. et c. ; vive-eau : b. et d.).

La comparaison des stocks de sédiments en suspension au cours d'un cycle morte-eau/vive-eau pour les différentes conditions testées (Figure 26) démontre une fois de plus le rôle joué par les herbiers de zostères et leur régression sur la dynamique sédimentaire du Bassin d'Arcachon. Il apparaît qu'en conditions actuelles (post-régression) et estivales, les stocks de sédiments en suspension sont du même ordre de grandeur que les stocks en conditions hivernales pré-régression. De même, il semblerait qu'actuellement, en conditions hivernales, il y ait quasiment autant de sédiments en suspension que si les herbiers avaient totalement disparu, soit une quantité environ 8 fois plus importante de sédiments en suspension qu'avant la régression en conditions de développement estival des herbiers.

Il convient toutefois de souligner que compte-tenu des processus relatifs à l'effet des herbiers sur la dynamique sédimentaire restant à prendre en compte dans le modèle (effets sur les vitesses de chute des sédiments et effets du système racinaire), il est très probable que les effets du développement saisonnier et de la régression des herbiers soient encore plus importants une fois ces processus implémentés dans le modèle.

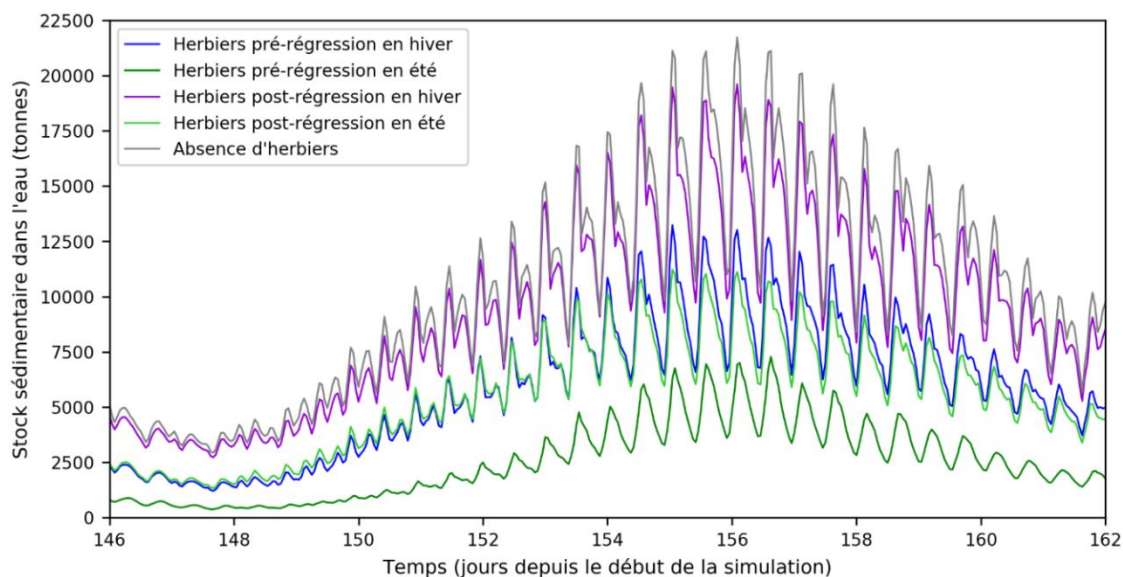


Figure 26 : Evolution des stocks de sédiments en suspension simulés dans le Bassin au cours d'un cycle de marée (morte-eau/vive-eau) pour différentes conditions de développement saisonnier et d'extension des herbiers de zostères.

### 5.1.3 Prise en compte de l'effet des herbiers sur les vitesses de chute des sédiments en suspension

Les observations réalisées par [Ganthy et al. \(2015\)](#) avaient permis la mise en évidence de l'effet du feuillage des zostères sur le dépôt des sédiments à travers deux processus distincts :

- un effet de piégeage accru en raison de la collision des particules sédimentaires contre les feuilles de zostères, se traduisant par une augmentation de leur vitesse de chute (Figure 27a),
- un effet de blocage des sédiments en suspension au sommet de la canopée, pour de fortes densités de feuilles et lorsque les feuilles sont fortement courbées par la vitesse du courant (Figure 27b).

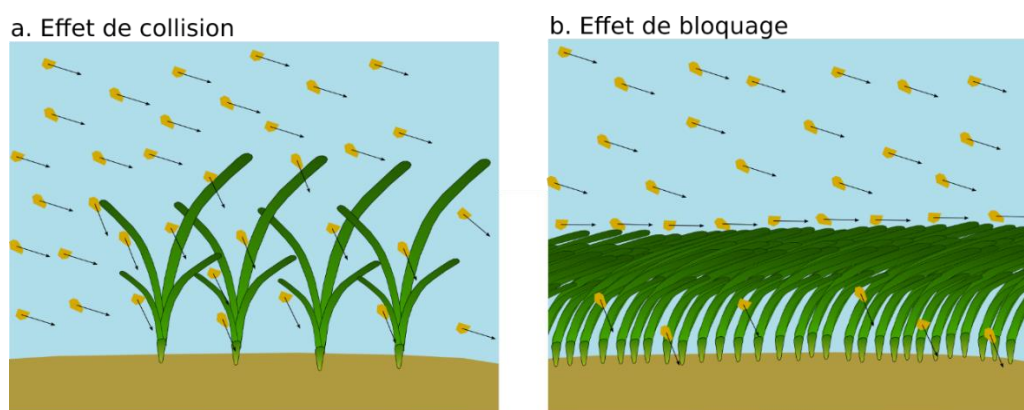


Figure 27 : Représentation schématique des processus de piégeage (a.) et de blocage (b.) des sédiments en suspension.

Ces deux processus, de « piégeage » et de « blocage » ont été paramétrés et implémentés dans le module MUSTANG.

En ce qui concerne le piégeage, le paramétrage a été défini tel que :

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -  
31.05.2024

$$C_{\text{piègeage}} = 1 + P_{\text{max}} \times \frac{e^{(S \times UV \times k_{\text{piègeage}}) - 1}}{e^{(k_{\text{piègeage}}) - 1}} \quad \text{Si } k_{\text{piègeage}} \neq 0 \quad (\text{Eq. 27a})$$

$$C_{\text{piègeage}} = 1 + P_{\text{max}} \times S \times UV \quad \text{Si } k_{\text{piègeage}} = 0 \quad (\text{Eq. 27b})$$

Où,  $C_{\text{piègeage}}$  est le coefficient de correction de la vitesse de chute en raison du piégeage,  $P_{\text{max}}$  est le taux de correction maximum (à calibrer),  $S$  est la surface frontale occupée par les feuilles par unité de surface (*i.e.* le taux d'occupation par le feuillage sur une section verticale),  $k_{\text{piègeage}}$  est un paramètre de calibration, et  $UV$  est la norme de la vitesse. L'introduction de la vitesse dans la formulation a pour objectif de rendre compte de l'augmentation de la probabilité qu'une particule rencontre une feuille lorsque la vitesse de l'écoulement augmente.

Un exemple de valeurs du coefficient de correction est présenté figure 28 pour différentes valeurs de  $k_{\text{piègeage}}$ , et pour  $P_{\text{max}}=10$ .

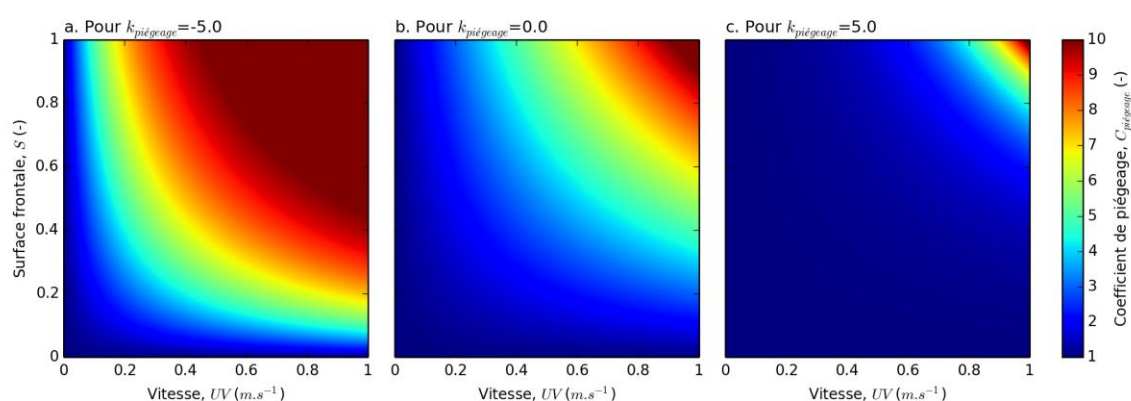


Figure 28 : Valeurs du coefficient de piégeage pour différentes valeurs de  $k_{\text{piègeage}}$  en fonction de la norme de la vitesse et de la surface frontale de l'herbier.

En ce qui concerne le blocage, le paramétrage a été défini tel que :

$$C_{\text{blocage}} = 1 - \frac{e^{(A \times k_{\text{blocage}}) - 1}}{e^{(k_{\text{blocage}}) - 1}} \quad \text{Si } k_{\text{blocage}} \neq 0 \quad (\text{Eq. 28a})$$

$$C_{\text{blocage}} = 1 - A \quad \text{Si } k_{\text{blocage}} = 0 \quad (\text{Eq. 28b})$$

Où,  $C_{\text{blocage}}$  est le coefficient de correction de la vitesse de chute en raison du blocage,  $A$  est la surface horizontale occupée par les feuilles par unité de surface (*i.e.* le taux d'occupation par le feuillage sur le plan horizontale), et  $k_{\text{blocage}}$  est un paramètre de calibration.

Un exemple de valeurs du coefficient de correction est présenté figure 29 pour différentes valeurs de  $k_{\text{blocage}}$ .

La vitesse de chute corrigée ( $WS_{\text{corr}}$ ) est ensuite calculée tel que :

$$w_{s,\text{corr}} = w_s \times C_{\text{blocage}} \times C_{\text{piègeage}} \quad (\text{Eq. 29})$$

Il faut signaler qu'en dehors de la canopée le coefficient de piégeage est égal à 1. Par ailleurs, le coefficient de blocage n'est appliqué que dans la couche correspondant au sommet de la canopée.



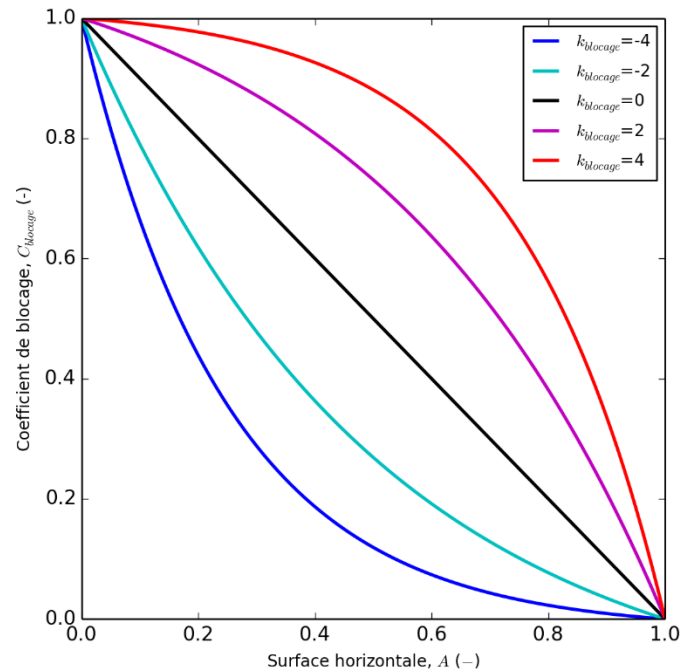


Figure 29 : Valeurs du coefficient de blocage pour différentes valeurs de  $k_{\text{blockage}}$  en fonction de la surface horizontale de l'herbier.

Bien que d'ores et déjà implémentés dans le module MUSTANG, ces paramétrages n'ont pas encore été testés ni calibrés.

#### 5.1.4 Prise en compte de l'effet du système racinaire sur l'érosion des sédiments

Afin de paramétrer l'effet du système racinaire des zostères sur l'érosion des sédiments, les données issues de tests d'érodabilité réalisés sur les sédiments des estrans du Bassin d'Arcachon (Ganthy, 2011) ont été ré-analysées.

Dans un premier temps, les tests réalisés sur les sédiments non végétalisés ont permis de paramétrer la contrainte critique d'érosion des vases ( $\tau_{ce,mud}$ , Eq. 30a) et le coefficient d'érosion des vases ( $E_{0,mud}$ ) en fonction de la concentration relative en vase ( $C_{mud,rel}$ ), tels que :

$$\tau_{ce,mud} = 2,0E^{-5} \cdot C_{mud,rel}^{1,81} \quad (\text{Eq. 30a})$$

$$E_{0,mud} = 2,4E^{-11} \cdot C_{mud,rel}^{2,95} \quad (\text{Eq. 30b})$$

Les données ayant permis de réaliser ce paramétrage sont présentées dans les figures 30a et 30b, pour  $\tau_{ce,mud}$  et  $E_{0,mud}$  respectivement.

Dans un second temps, à partir de ce paramétrage, les contraintes critiques et les coefficients d'érosion théoriques ont pu être calculés et comparés à ceux effectivement mesurés pour les tests réalisés dans le niveau racinaire des herbiers, de manière à obtenir les coefficients de correction liés à la présence des racines et rhizomes des zostères. Ces coefficients de correction ont ensuite pu être paramétrés en fonction de la biomasse racinaire mesurée pour ces tests (Figure 30c et 30d, respectivement pour les corrections de  $\tau_{ce,mud}$  et  $E_{0,mud}$ ).

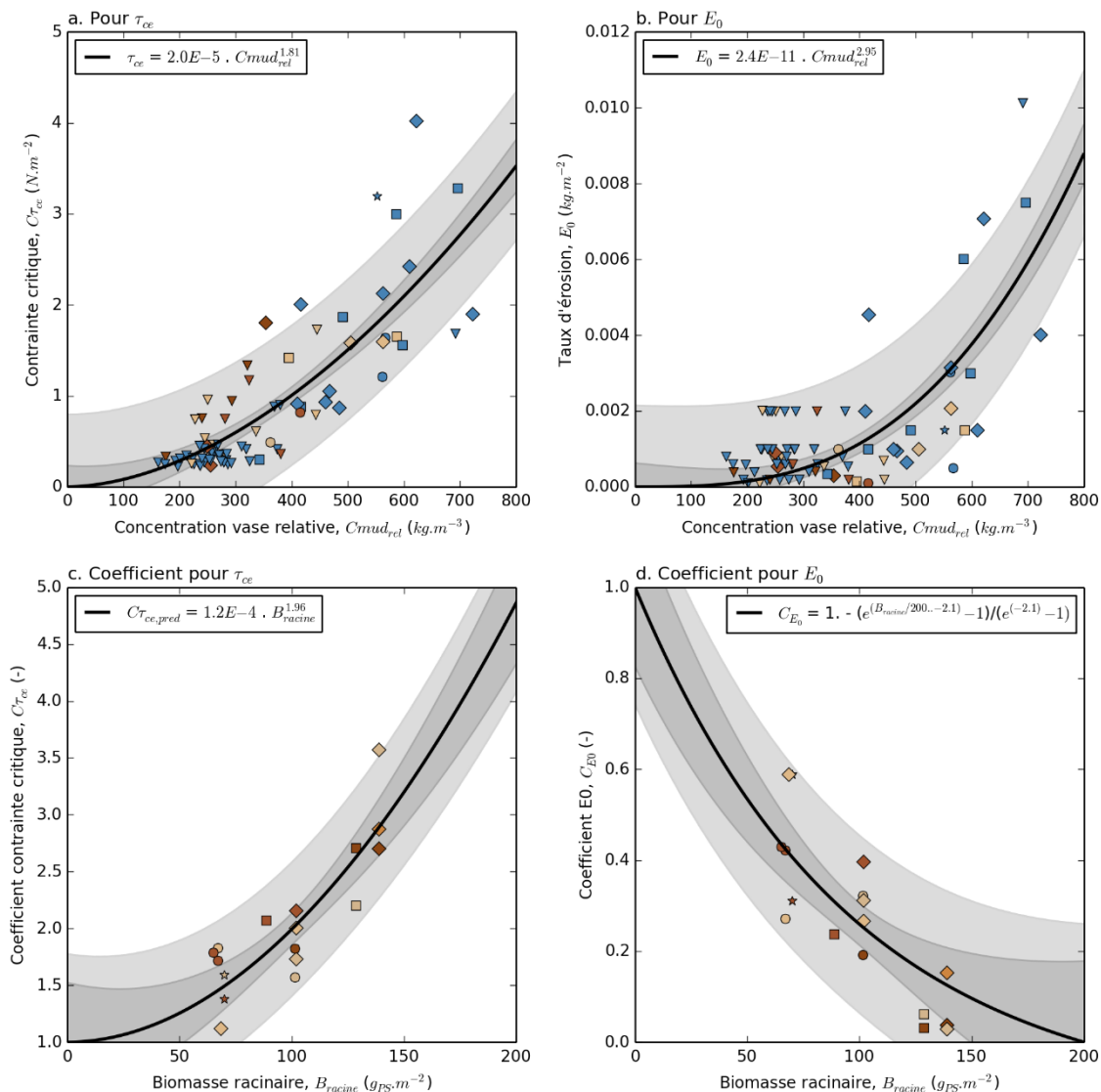


Figure 30 : Paramétrage de la contrainte critique d'érosion (a.) et du coefficient d'érosion (b.) des vases pour les sédiments non végétalisés, et des coefficients de correction à appliquer à la contrainte critique (c.) et au coefficient d'érosion (d.) en présence du niveau racinaire. Le style de marqueurs indique les tests réalisés pour différents sites du Bassin d'Arcachon. Leur couleur indique différents niveaux de profondeur (bleu : surface ; du marron clair au marron foncé : profondeurs 1 cm à 5 cm sous la surface). La courbe noire correspond au paramétrage obtenu et les intervalles de confiance et de prédiction sont présentés en gris foncé et gris clair, respectivement.

Le paramétrage des coefficients de correction, ainsi que l'évolution de la profondeur du niveau racinaire des herbiers ont été implémentés dans le module MUSTANG. Ces paramétrages n'ont pas encore été testés, en raison du fait qu'il est nécessaire que le modèle dispose des biomasses racinaires en chaque maille de calcul, nécessitant ainsi de disposer du module de croissance simplifié évoqué précédemment.

## 5.2 Avancement et réalisations de l'année 2021

Le développement et implémentation du module sédimentaire à la plateforme de modélisation ayant été terminé durant l'année 2020, aucune modification notable n'a été réalisée en 2021 sur le module sédimentaire.

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 - 31.05.2024

La présence de vagues pouvant être d'importance primordiale sur le transport sédimentaire, il est fondamental de les prendre en compte dans l'étude de la dynamique sédimentaire. Suite à l'ajout du modèle de vagues à la plateforme de modélisation, il est désormais possible de considérer l'effet des contraintes de cisaillement dues aux vagues sur le fond, ainsi que le transport sédimentaire qui y est associé.

Alors que le modèle sédimentaire était jusque-là calibré pour le Bassin d'Arcachon pour la présence de courants uniquement, il convient de re-calibrer le modèle, en considérant la présence simultanée de vagues et de courants. Cette nouvelle étape de calibration du modèle sédimentaire, en termes de concentrations de matières en suspension, mais également d'évolution du niveau sédimentaire, incluant l'effet des vagues et des courants, fera l'objet d'un stage de Master 2 (Janvier-Juin 2022).

### 5.3 Avancement et réalisations au terme de l'année 2022

Le modèle sédimentaire, prenant en compte l'effet des courants, des vagues et des herbiers sur la dynamique sédimentaire a été calibré dans le cadre d'un stage de M2 (par Amélie Arias) ayant eu lieu entre Janvier et Juin 2022. Cependant, un bug lourd de conséquences a été décelé dans le code MUSTANG et corrigé, mais la modification du code a nécessité la re-calibration du modèle sédimentaire. Cette nouvelle phase de calibration a débuté en Novembre 2022 et les résultats obtenus sont très prometteurs malgré quelques divergences qui demeurent et qui devraient être corrigées très prochainement. La calibration du modèle sédimentaire devrait donc se terminer très prochainement et être achevée d'ici la fin Février 2023.

La modèle est calibré en 5 sites (Comprian, Girouasse, Courbey, Jacquets, Tes) répartis dans le bassin (Fig. 31) sur les données collectées dans le cadre du suivi ARCHYD.

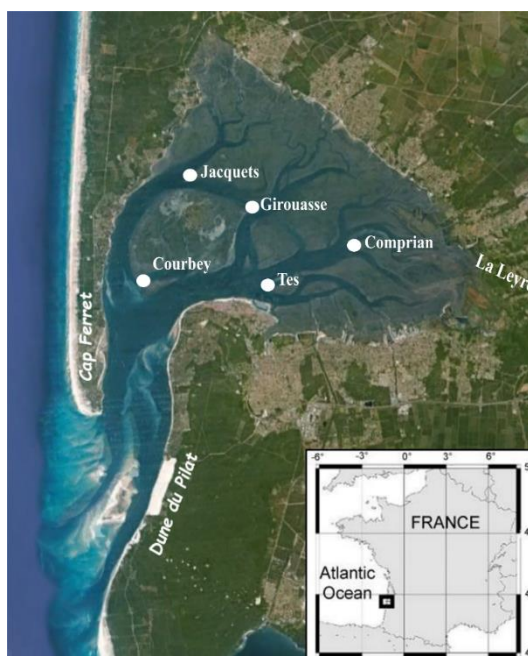


Figure 31 : Carte du bassin d'Arcachon faisant figurer les sites utilisés pour la calibration du modèle sédimentaire

La calibration est effectuée sur deux périodes, une période pré-régression entre le 15/10/2000 et le 15/08/2001 et une période post-régression entre le 15/10/2019 et le 15/08/2020. Ces périodes ont été sélectionnées afin de calibrer le modèle avec des développements d'herbiers différents, que ce soit par la prise en compte de la régression, mais aussi du cycle annuel. De plus ces années possèdent des hivers venteux, lors desquels on s'attend à avoir des flux sédimentaires plus intenses, ce qui présente des conditions défavorables pour la calibration du modèle sédimentaire.

Dans le cas du scénario pré-régression (Fig. 32, 33), on remarque un modèle qui reproduit globalement bien les cmes mesurées. À Comprian (Fig. 32) la dynamique générale des cmes est bien reproduite, comme l'indique la tendance linéaire (Fig. 32d) obtenue et la RMSE correspondante de  $3.92 \text{ mg.l}^{-1}$ . Une légère tendance à la sous-estimation peut toutefois être constatée. C'est particulièrement le cas lors des mortes-eaux estivales, alors que les vives-eaux estivales sont particulièrement bien reproduites. Des remarques similaires peuvent être faites concernant Girouasse (Fig. 33a), Jacquets (Fig. 33c) et Tes (Fig. 33d), toujours avec une tendance linéaire bien reproduite malgré une légère sous-estimation globale et de bonnes RMSE respectives de 3.73, 4.71 et  $3.94 \text{ mg.l}^{-1}$ . Cette sous-estimation est particulièrement due à la présence d'évènements venteux qui ne sont pas bien reproduits par le modèle, entraînant de forts pics de sous-estimation, qui ont pour conséquence de tirer la courbe de tendance vers le bas. Ce phénomène est bien visible pour tous les sites, mais plus prononcé à Courbey (Fig. 33b), où la courbe de tendance est fortement déviée, avec une RMSE un peu plus importante de  $4.91 \text{ mg.l}^{-1}$ , mais qui reste satisfaisante.

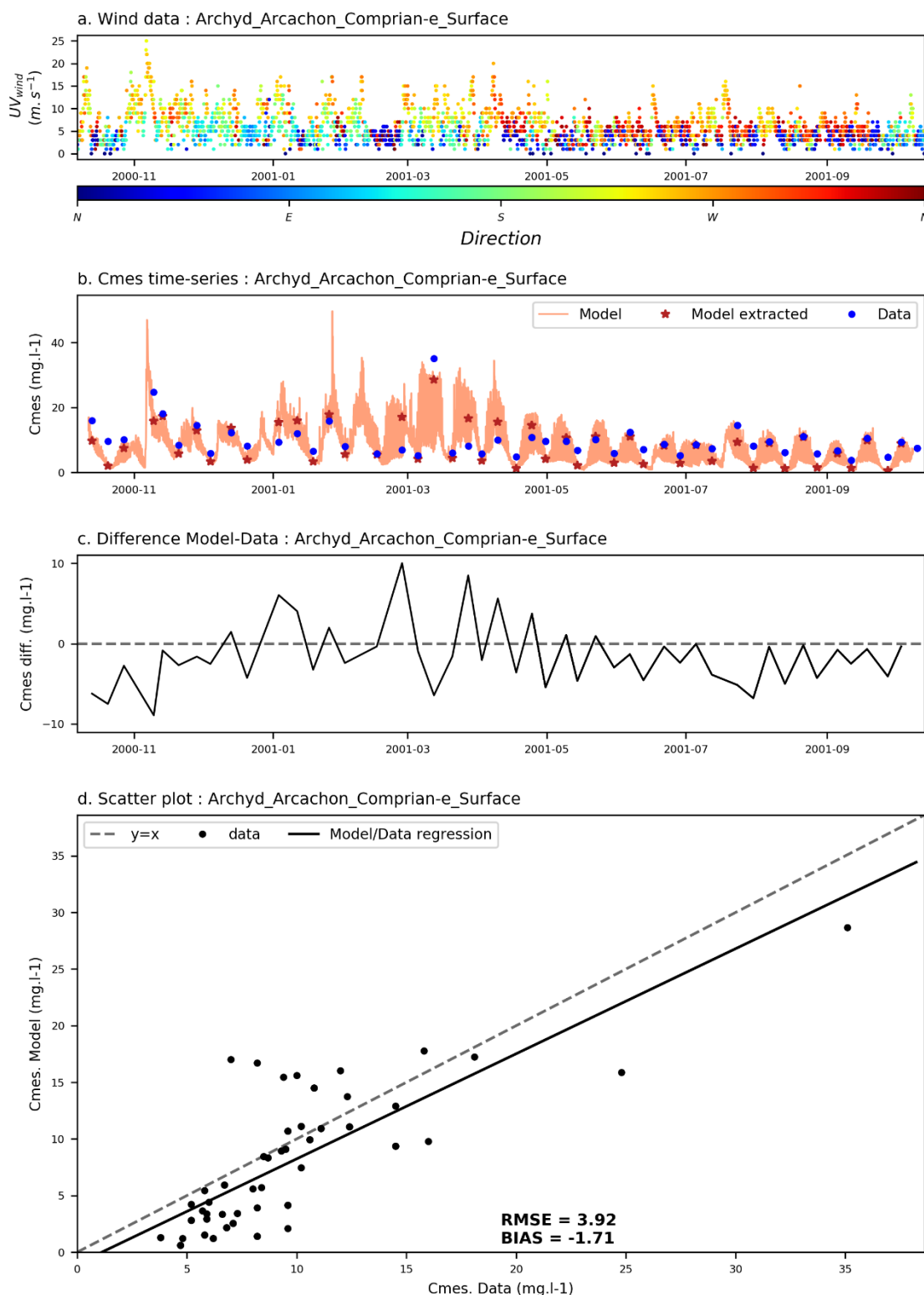


Figure 32 : Résultats de la calibration pré-régression du modèle sédimentaire en termes de cmes à Comprian et présentés sous forme de séries temporelle (b) en comparant le modèle (courbe continue rouge) et les valeurs extraites (étoiles rouges) aux dates où des données (cercle bleu) sont disponibles. (c) la différence entre le modèle et les mesures, (d) le nuage de point des concentrations de matières en suspension avec les cmes mesurées en abscisses et les cmes modélisées en ordonnées. Les conditions de vents (a) sont présentées, la couleur donnant une indication quant à la direction du vent.

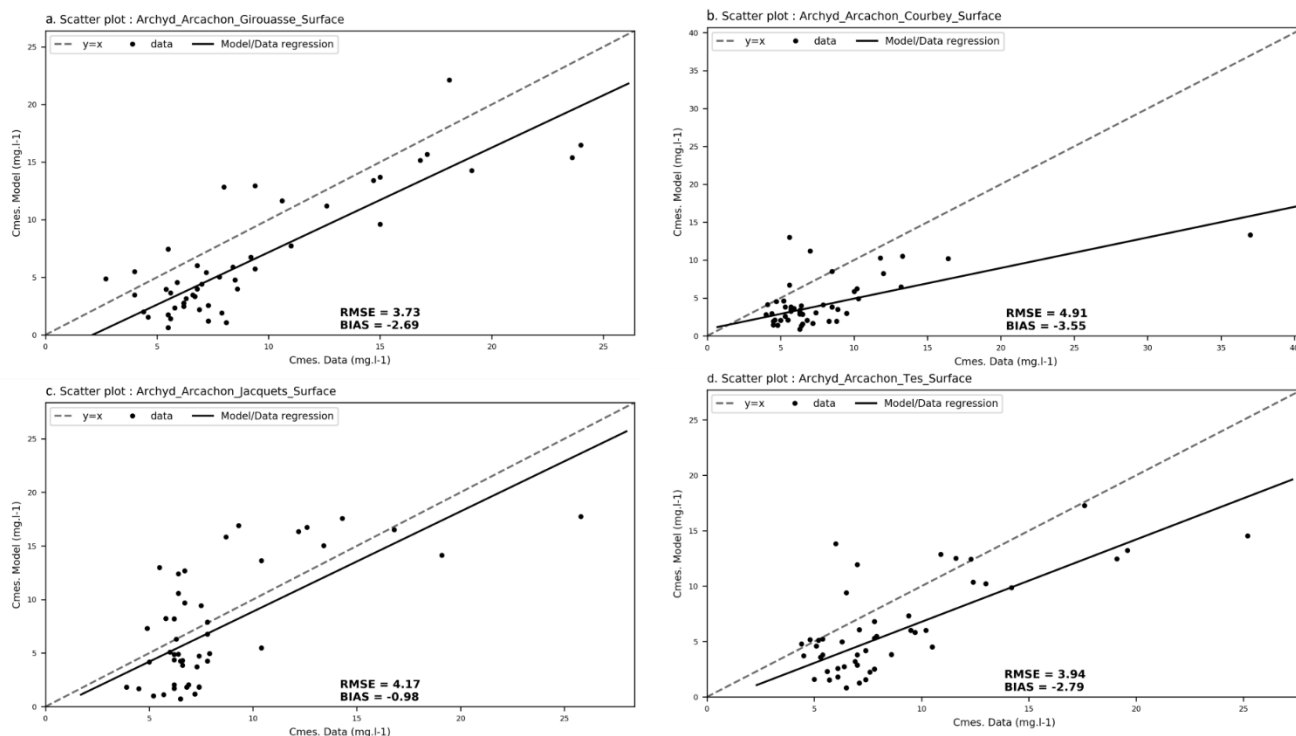


Figure 33 : Nuage de points des concentrations de matières en suspension avec les cmes mesurées en abscisses et les cmes modélisées en ordonnées à Girouasse (a), Courbey (b), Jacquets (c) et Tes (d), dans le cas du scénario pré-régression.

En ce qui concerne le scénario post-régression (Fig. 34,35), les données estivales sont toujours bien reproduites, à Comprian (Fig. 34), comme pour les autres sites. Les tendances hivernales sont également bien reproduites, malgré une légère surestimation à Courbey (Fig. 35b), mais de larges sous-estimations sont visibles lors des pics de vent, témoignant de la mauvaise capacité du modèle à prendre en compte l'impact des fortes conditions de vagues sur la dynamique sédimentaire. Ce phénomène déjà visible dans le scénario pré-régression est d'autant plus marqué dans le scénario post-régression à cause de la perte de capacité des herbiers à stabiliser le sol suite à leur déclin. Des courbes de tendances fortement tirées vers le bas sont donc observées pour tous les sites, à l'exception de Jacquets (Fig. 35c), avec une RMSE atteignant 8.51 mg.l<sup>-1</sup> à Comprian (Fig. 35a). À Jacquets (Fig. 35c) la tendance est particulièrement bien reproduite et la calibration actuelle fournit une bonne représentation de la dynamique sédimentaire en ce site, comme l'indique la faible RMSE de 3.49 mg.l<sup>-1</sup>.

Dans les étapes de calibration à venir, il conviendra de s'affranchir des sous-estimations observées lors des pics de vagues et de corriger les autres divergences qui peuvent subsister, telles que la sous-estimation des cmes lors de la période estivale pré-régression.

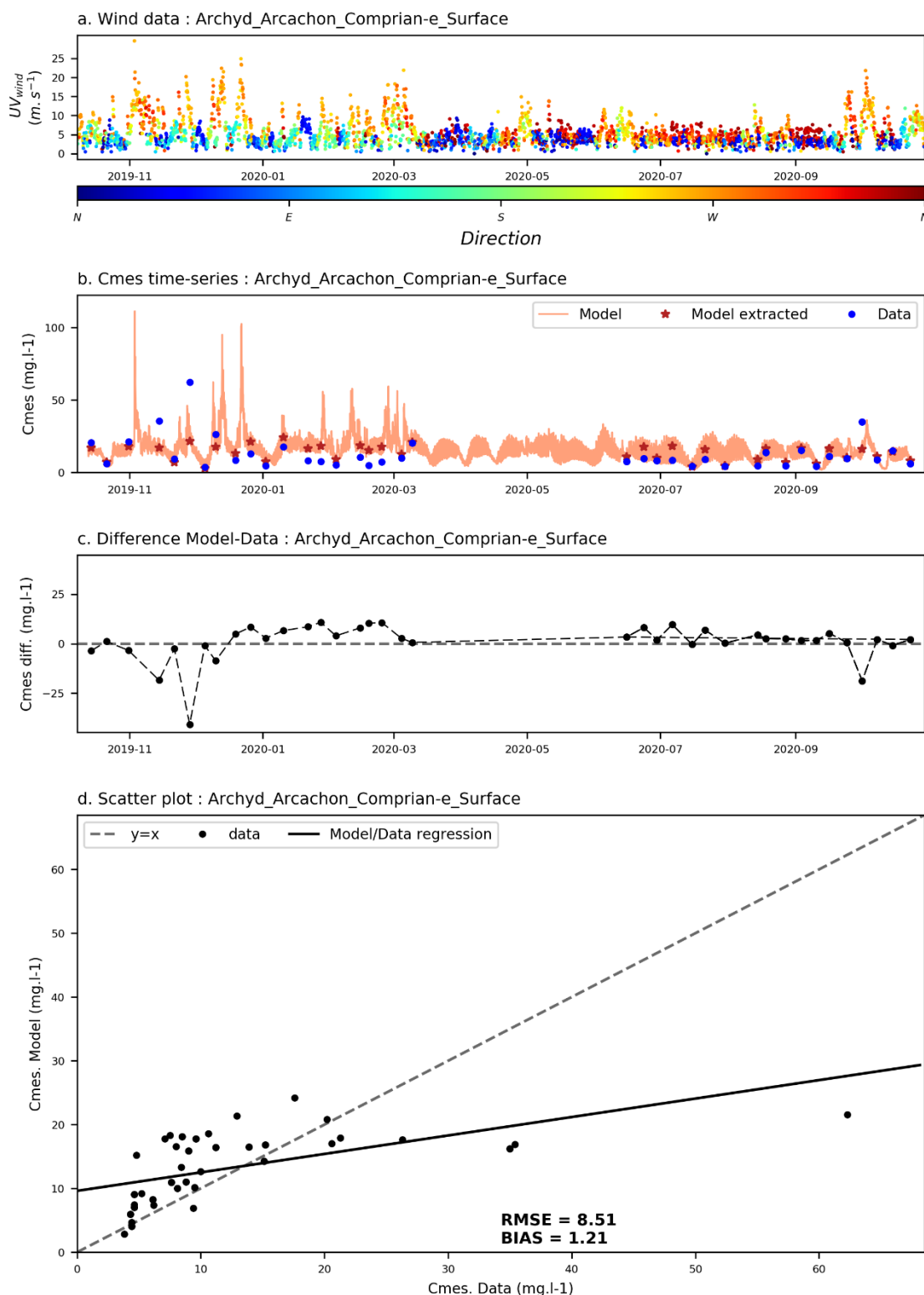


Figure 34 : Résultats de la calibration post-régression du modèle sédimentaire en termes de cmes à Comprian et présentés sous forme de séries temporelle (b) en comparant le modèle (courbe continue rouge) et les valeurs extraites (étoiles rouges) aux dates où des données (cercle bleu) sont disponibles. (c) la différence entre le modèle et les mesures, (d) le nuage de point des concentrations de matières en suspension avec les cmes mesurées en abscisses et les cmes modélisées en ordonnées. Les conditions de vents (a) sont présentées, la couleur donnant une indication quant à la direction du vent.

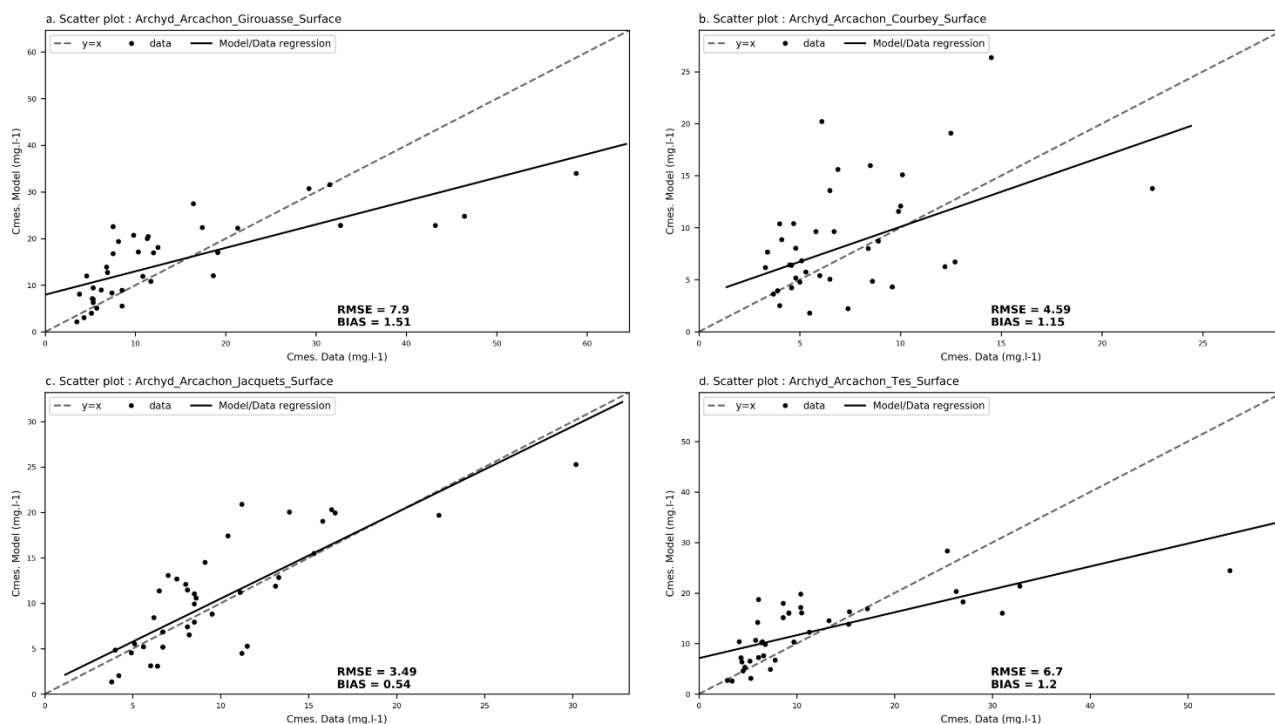


Figure 35 : Nuage de points des concentrations de matières en suspension avec les cmes mesurées en abscisses et les cmes modélisées en ordonnées à Girouasse (a), Courbey (b), Jacquets (c) et Tes (d), dans le cas du scénario post-régression.



## 5.4 Avancement et réalisations de l'année 2023

### 5.4.1 Calibration et validation du modèle

#### 5.4.1.1 Calibration pré-régression (2001-2001)

La calibration du modèle sédimentaire s'est poursuivie au cours de l'année 2023, en conservant la stratégie de calibration détaillée en section 5.3. Les résultats de calibration pré- et post-régression sont présentés en Figures 36 et 37. Ces résultats font état d'une bonne représentation des observations par le modèle aux 4 sites de calibration, comme indiqué sur le nuage de points (Figure 37) par les courbes de tendance qui sont proches de la droite et les données regroupées autour de cette ligne, avec une RMSE variant entre 3.51 mg.l<sup>-1</sup> à *Tes* et 4.26 mg.l<sup>-1</sup> à *Girouasse*. Le modèle a une légère tendance à sous-estimer les concentrations en matière en suspension (cmes), comme indiqué par le biais négatif aux 4 sites (Figure 37), mais tend toutefois à surestimer les événements venteux modérés (Figures 36.bdc).

Les observations sont particulièrement bien reproduites aux 4 sites de calibration pour les étés calmes et l'automne (Figure 36), excepté pour une légère sous-estimation des marées de mortes eaux, particulièrement à *Girouasse* (Figure 36). En hiver, certaines tempêtes sont surestimées, principalement entre Novembre et fin Janvier à *Comprian*, *Girouasse* et *Jacquets* (Figure 36.bcd). Cependant, l'évènement le plus énergétique se produisant début Novembre, atteignant 25 m.s<sup>-1</sup> et donnant lieu à des cmes excédant 20 mg.l<sup>-1</sup>, est correctement représenté en ces trois sites. A *Tes*, le modèle fournit une meilleure représentation des conditions hivernales (Figure 36.e). A noter que les différences entre les observations et les valeurs simulées sont comprises entre -10 mg.l<sup>-1</sup> et 10 mg.l<sup>-1</sup>, faisant état de la bonne capacité du modèle à représenter la période hivernale pré-régression.

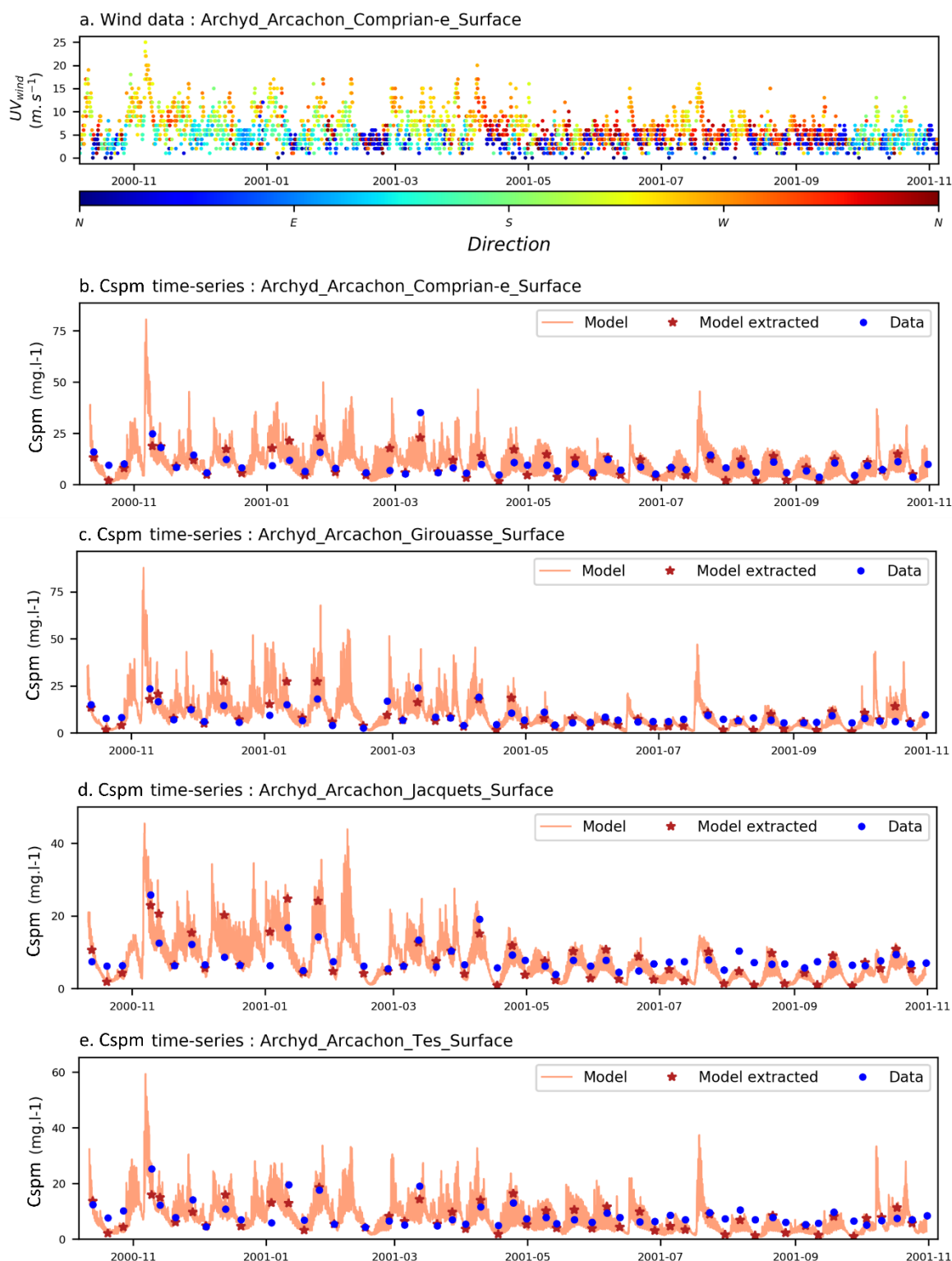


Figure 36: (a) Séries temporelles des conditions de vent représentant l'intensité des vents et leur direction (échelle de couleur). Concentrations en sédiment en suspension à la surface à Comprian (b), Girouasse (c), Jacquets (d) et Tes (e) dans le cas pré-régression. Les points bleus sont les concentrations mesurées et les séries temporelles grisées correspondent aux concentrations simulées, avec les étoiles rouges les concentrations en sédiments en suspension extraites à la date des mesures.

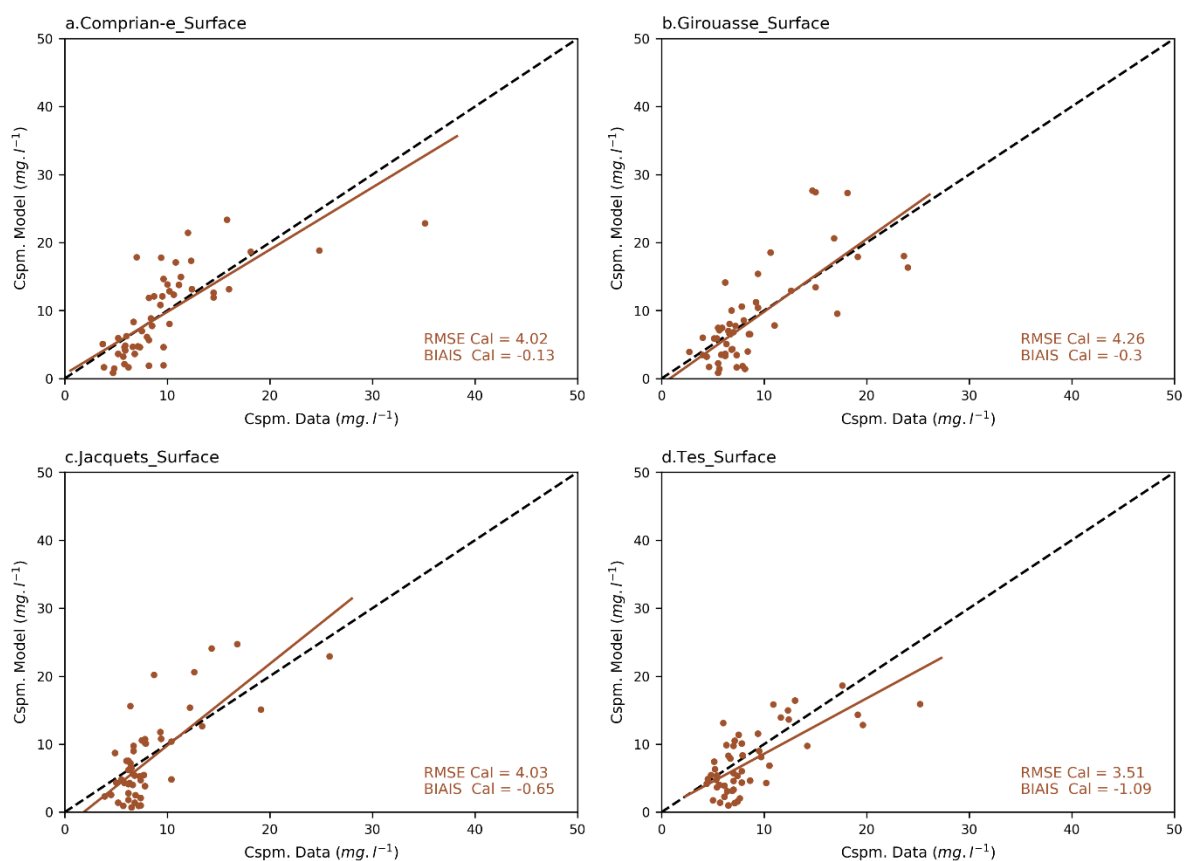


Figure 37: Nuages de points fournissant une comparaison entre les concentrations en sédiments en suspension simulées et mesurées à Comprian (a), Girouasse (b), Jacquets (c) et Tes (d) dans le cas pré-régression. La courbe marron est la courbe des tendances et la courbe pointillée noire est la courbe identité.

#### 5.4.1.2 Calibration post-régression (2019-2020)

Lors de la période post-régression, les concentrations en sédiment en suspension sont plus importantes que lors de la période pré-régression en tous les sites (Figure 38). Elles atteignent souvent  $20 \text{ mg.l}^{-1}$  lors des périodes calmes et excèdent constamment  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  lors de tempêtes à *Comprian*, *Girouasse* et *Tes* (Figures 38.bce). A *Jacquets*, des concentrations en sédiment en suspension plus basses sont observées, inférieures à  $20 \text{ mg.l}^{-1}$  lors de périodes calmes et excédant rarement  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  lors de tempêtes (Figure 38.d). De ce fait, les valeurs de RMSE varient entre  $4.42 \text{ mg.l}^{-1}$  à *Jacquets* et  $7.93 \text{ mg.l}^{-1}$  à *Comprian* (Figure 39), témoignant de la capacité du modèle à reproduire les mesures.

La période estivale est caractérisée par des conditions calmes avec des vitesses pics de vent excédant rarement  $8 \text{ m.s}^{-1}$  (Figure 38.a). Au cours de cette période, les cmes sont bien approximées à *Girouasse* (Figure 38.c) et *Jacquets* (Figure 38.d) et durant les mortes eaux à *Tes* (Figure 38.e), mais surestimées à *Comprian* (Figure 38.b) et durant les vives eaux à *Tes* (Figure 38.e). Le mois de Novembre présente des conditions très venteuses (atteignant jusqu'à  $25 \text{ m.s}^{-1}$ ) qui sont plutôt bien reproduites à tous les sites, malgré une large sous-estimation au cours du mois de Novembre à *Comprian* et *Tes* (Figures 38.be). Cependant, le reste des tempêtes hivernales sont bien représentées en ces deux sites. La période allant de Janvier à mi-Février présente des conditions plus calmes, qui sont surestimées en tous les sites (Figure 38), comme mis en évidence par le biais positif variant entre  $0.65 \text{ mg.l}^{-1}$  à *Tes* et  $2.03 \text{ mg.l}^{-1}$  à *Comprian* (Figure 39).

En Novembre, la biomasse épigée n'est pas encore à son minimum et la végétation continue de jouer un rôle majeur dans la mitigation de la resuspension de sédiments. La biomasse est minimale durant le reste de l'hiver (entre Décembre et Mars ; [Cognat 2019](#)) et au cours de cette période, la majorité de la stabilisation du fond sédimentaire peut être attribuée à la capacité de rétention de la biomasse hypogée. Cependant, la présence de racines mortes dans le sédiment faisant suite à la régression, dont la décomposition est un long processus ([Auby, 1991](#)), contribue toujours à la stabilisation du sédiment ([Ganthy, 2011](#)), mais n'est pas considérée dans le modèle, expliquant ainsi les surestimations observées durant l'hiver.

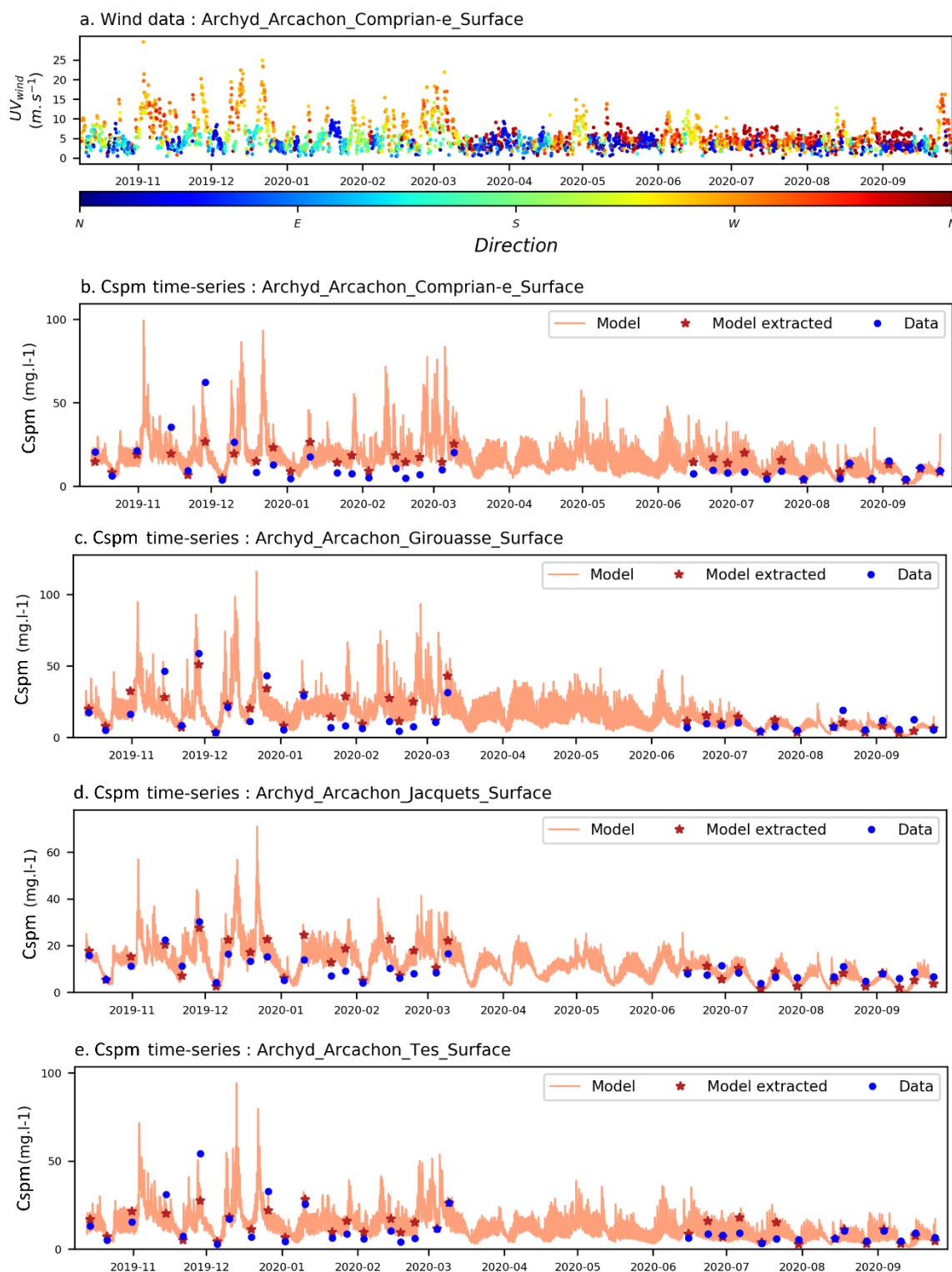


Figure 38: (a) Séries temporelles des conditions de vent représentant l'intensité des vents et leur direction (échelle de couleur). Concentrations en sédiments en suspension à la surface à Comprian (b), Girouasse (c), Jacquets (d) et Tes (e) dans le cas post-régression. Les points bleus sont les concentrations mesurées et les séries temporelles grisées correspondent aux concentrations simulées, avec les étoiles rouges les concentrations en sédiments en suspension extraites à la date des mesures.

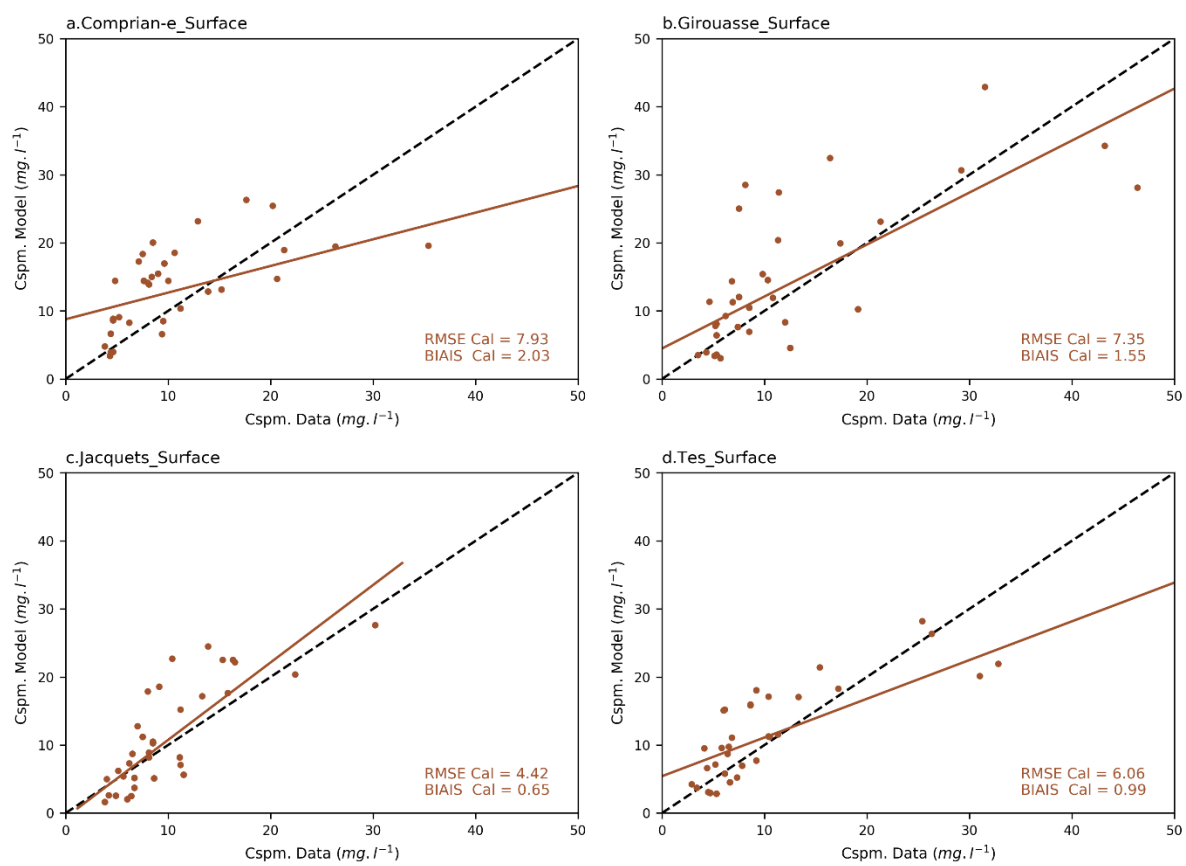


Figure 39: Nuages de points fournissant une comparaison entre les concentrations en sédiments en suspension simulées et mesurées à Comprian (a), Girouasse (b), Jacquets (c) et Tes (d) dans le cas post-régression. La courbe marron est la courbe des tendances et la courbe pointillée noire est la courbe identité.

### 5.4.1.3 Validation du modèle

La validation du modèle est effectuée sur une période intermédiaire (2010-2011), lors de laquelle la majorité de la régression a déjà eu lieu. Par conséquent, la période de validation est caractérisée par une couverture d'herbiers proche de celle post-régression. La couverture d'herbiers correspondante est obtenue en interpolant spatialement et temporellement les cartes de couverture d'herbiers pré et post-régression.

Les résultats de validation montrent une bonne représentation par le modèle des concentrations en sédiments en suspension observées en ces 4 sites (Figure 40), comme mis en évidence par les faibles RMSEs, variant entre 2.65 mg.l<sup>-1</sup> à *Tes* (Figure 40.d) et 4.74 mg.l<sup>-1</sup> à *Comprian* (Figure 40.a). Au printemps, l'été et l'automne, les observations sont particulièrement bien reproduites, à l'exception de certaines vives eaux qui sont légèrement surestimées au printemps et en été, et certaines mortes eaux qui sont sous-estimées en automne (Figure 41). En hiver, bien qu'il y ait une tendance à la surestimation des tempêtes, le mois le plus énergétique (Novembre), caractérisé par des vents atteignant 15 à 20 m.s<sup>-1</sup>, est bien reproduit en tous les sites. Malgré ces différences, les 4 sites font états de faibles différences en concentrations en matière en suspension entre les mesures et les prédictions, comprises entre -7 et 7 mg.l<sup>-1</sup> à *Jacquets* et *Tes*, et entre -10 et 10 mg.l<sup>-1</sup> à *Comprian* et *Girouasse*, excepté pour deux vives eaux estivales qui ne sont pas bien reproduites à *Comprian* (Figure 6.b).

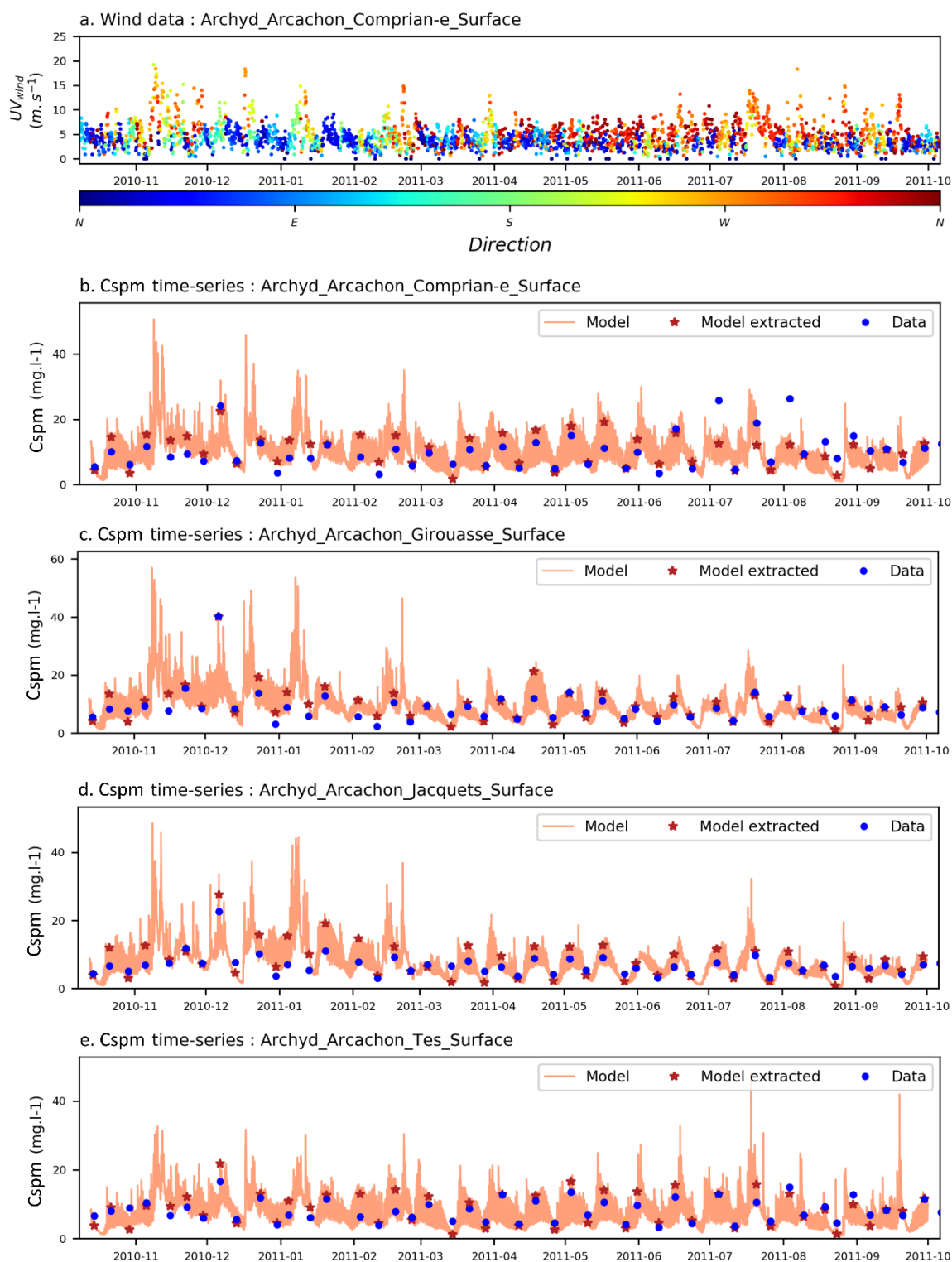


Figure 40: (a) Séries temporelles des conditions de vent représentant l'intensité des vents et leur direction (échelle de couleur). Concentrations en sédiments en suspension à la surface à Comprian (b), Girouasse (c), Jacquets (d) et Tes (e) pour la validation du modèle. Les points bleus sont les concentrations mesurées et les séries temporelles grisées correspondent aux concentrations simulées, avec les étoiles rouges les concentrations en sédiments en suspension extraites à la date des mesures.



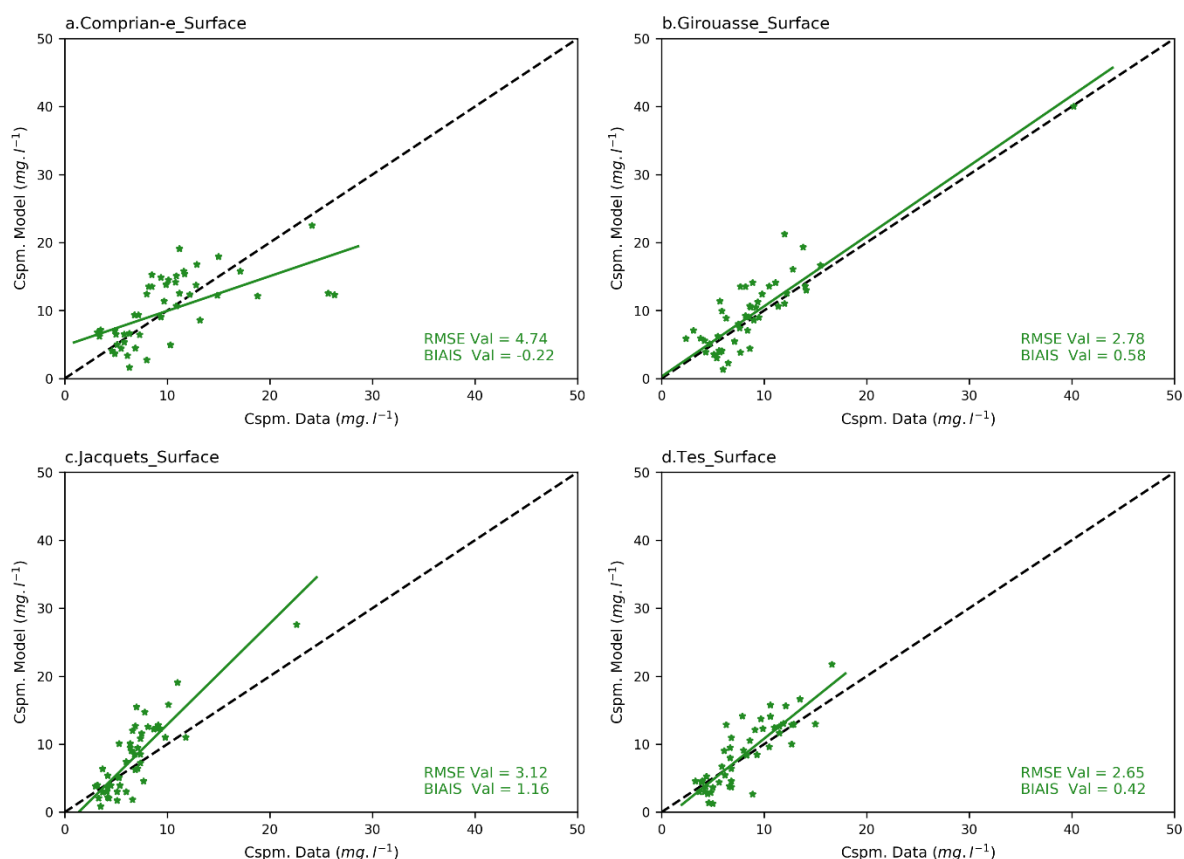


Figure 41: Nuages de points fournissant une comparaison entre les concentrations en sédiments en suspension simulées et mesurées à Comprian (a), Girouasse (b), Jacquets (c) et Tes (d) pour la validation du modèle. La courbe verte est la courbe des tendances et la courbe pointillée noire est la courbe identité.

Les séries temporelles de l'intensité du vent et des cmes, présentées en Figure 41 témoignent d'une corrélation positive entre ces deux processus, indiquant que dans le Bassin d'Arcachon, les évènements venteux contribuent significativement à la resuspension des sédiments, comme cela a précédemment été reporté dans un environnement abrités tel que celui-ci (Contti Neto *et al.*, 2022). La concentration en sédiments en suspension montre aussi une dépendance de ce paramètre au cycle de marée de mortes-eaux vives-eaux, avec des concentrations plus élevées lors des vives-eaux, lorsque les conditions hydrodynamiques sont plus intenses. Ces séries temporelles montrent aussi une forte variabilité saisonnière des concentrations, avec des concentrations bien plus faibles en été qu'en hiver, lorsque la végétation est complètement développée.

#### 5.4.2 Effets de la régression des herbiers sur le sédiment en suspension

Les séries temporelles du stock de sédiments en suspension dans la lagune sont présentées dans le cas pré- et post- régression, pour la période hivernale (Figure 42.a) et estivale (Figure 42.b). Dans le scénario pré-régression, la période estivale est caractérisée par un stock moyen de sédiments en suspension de 2704 tonnes avec des maximums atteignant 7000 tonnes (Figure 42.c). En hiver, le stock moyen en sédiments en suspension est de 11305 tonnes avec un pic de concentration excédant régulièrement 40000 tonnes et un maximum atteignant 100000 tonnes (Figure 42.a). Dans le scénario post-régression, la période estivale présente un stock sédimentaire

en suspension moyen de 5432 tonnes avec un maximum atteignant 18000 tonnes (Figure 42.c). En hiver, la série temporelle du stock sédimentaire en suspension est caractérisées par une valeur moyenne de 11770 tonnes et présente une dynamique similaire à celle observée dans le cas pré-régression (Figure 42.a).

La différence entre les stocks sédimentaires pré- et post- régression est présentée pour la période hivernale en Figure 42.b et période estivale en Figure 42.d. Ces figures indiquent que le stock sédimentaire en suspension est constamment supérieur dans le scénario post-régression, quelle que soit la saison. En été, le taux d'augmentation moyen du stock sédimentaire est de 112%, avec un pic atteignant 250% (Figure 42.d). En hiver, la régression des herbiers entraîne une augmentation du stock sédimentaire moyen de 23% (Figure 42.b), avec un taux d'évolution bien plus important lors des deux premières semaines de la période hivernale (de l'ordre de 90%), caractérisée par des conditions de vent calmes. Lors de cette période, les contraintes de cisaillement sur le fond sont principalement gouvernées par les courants de marée, puisque les conditions de vagues sont très peu énergétiques. Les précédents résultats quant à l'influence de la régression des herbiers sur les conditions de vagues et de courants dans le Bassin d'Arcachon ont révélé que l'impact de la régression des herbiers en hiver est plus important sur les courants de marée que sur les vagues. Cela implique qu'à cette saison, les variations des contraintes de cisaillement sur le fond en lien avec la régression des herbiers sont principalement le résultat de la modification des conditions de marée. Ces résultats expliquent ainsi que les contraintes sur le fond et le stock sédimentaire en suspension, soient plus sensible à la modification de la couverture d'herbiers lors de périodes calmes telles que celles-ci.

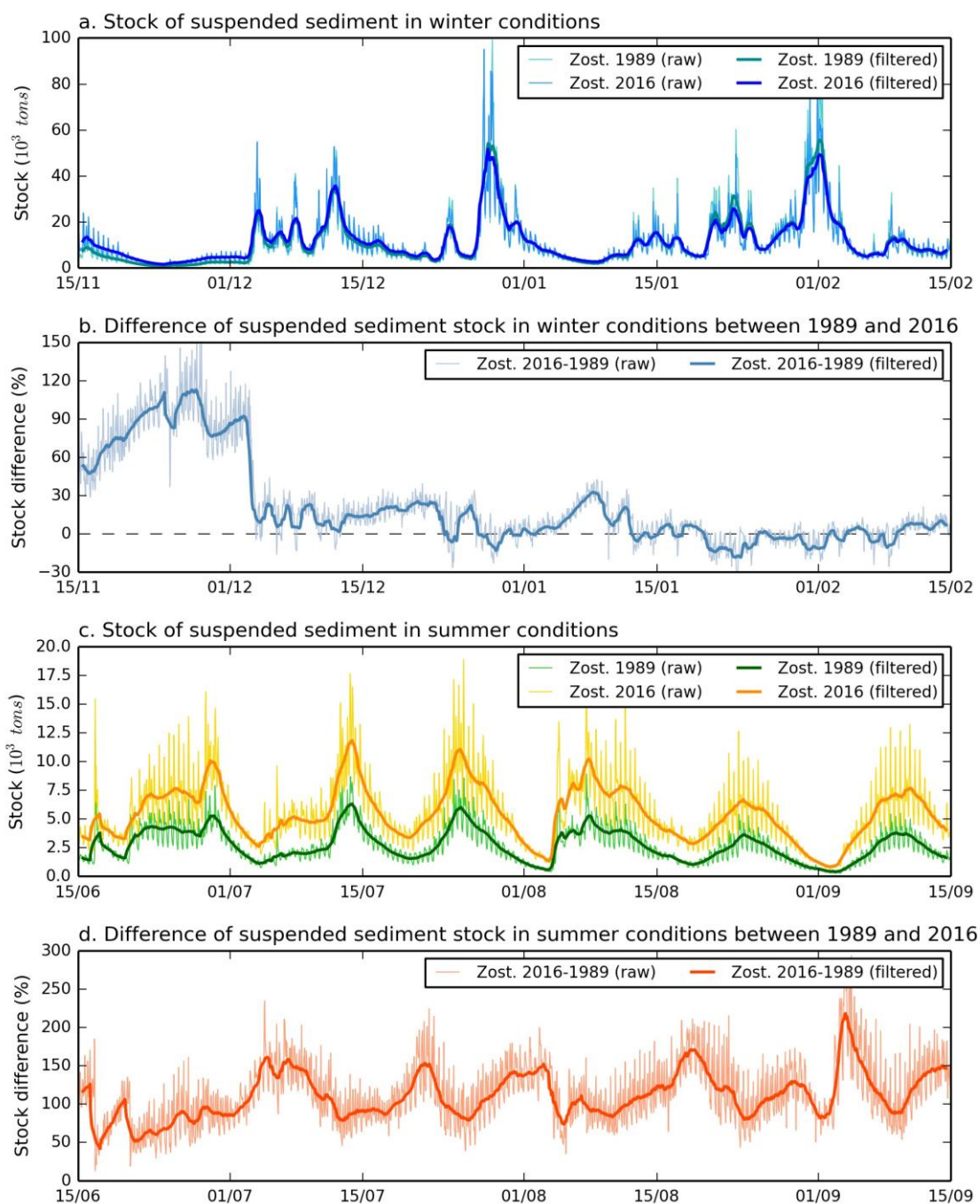


Figure 42: Séries temporelles du stock sédimentaire en suspension total au sein de la lagune (a.) pour les périodes hivernales pré-régression (ligne cyan) et post-régression (ligne bleue) et (c.) pour les périodes estivales pré-régression (ligne verte) et post-régression (ligne orange). Le taux d'évolution du stock sédimentaire en suspension entre le scénario pré- et post-régression pour la période hivernale (b.) et estivale (d). La série temporelle grisée représente la moyenne horaire du stock sédimentaire, alors que la série temporelle pleine correspond à la moyenne journalière.

La Figure 43 illustre les variations des concentrations moyennes en sédiments en suspension entre les scénarios pré- et post- régression, calculées comme :  $(SSC_{post-decline} - SSC_{pre-decline}) / SSC_{pre-decline}$ . En hiver (Figure 43.a), Les cmes augmentent de l'ordre de 10 % dans les chenaux et de 30 % dans le coin nord du Bassin, mais diminue de l'ordre de 30 % sur le reste des estrans. En été (Figure 43.a), l'augmentation des concentrations est observée à l'échelle du Bassin, avec un taux d'évolution variant entre 50 % et 100 % dans la partie Ouest du Bassin et l'embouchure, et des cmes multipliées entre 3 et 6 dans la partie Est du Bassin (Figure 43.b). Les modifications des concentrations en sédiments en suspension les plus importantes (> 600 %) se sont produites en bout de chenaux internes, soulignant la tendance du sédiment à atteindre le fond des chenaux et à s'accumuler dans ces zones suite au déclin des herbiers.

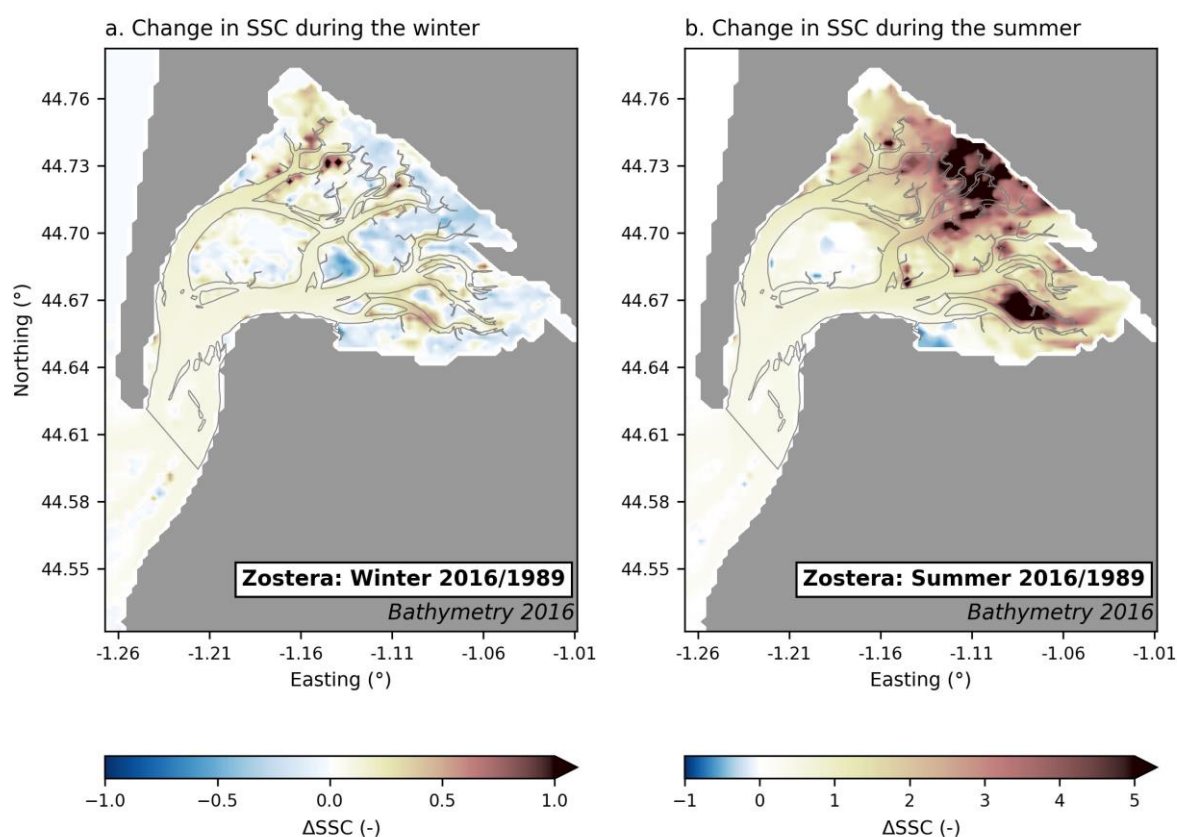


Figure 43: Modification de la concentration en sédiments en suspension moyenne entre les scénarios pré- et post-régression, au cours de la période hivernale (a) et estivale (b). A noter que différentes échelles sont utilisées en été et en hiver.

La régression des herbiers et notamment la perte de biomasse hypogée réduisent la capacité de la végétation à stabiliser le fond sédimentaire (Gacia *et al.*, 1999). De plus, les pertes de feuilles intensifient les vitesses de courants et conditions de vagues, donnant lieu à des contraintes de cisaillement sur les estrans plus importantes. De ce fait, le déclin des herbiers favorise l'érosion du sédiment sur les estrans, particulièrement en été lorsque la biomasse épigée atteint un maximum et l'influence de la végétation sur les écoulements et les flux sédimentaires est la plus prononcée. La concentration en sédiments en suspension n'est pas seulement renforcée sur les estrans, mais aussi dans le réseau de chenaux (Figure 43). Bien que les conditions hydrodynamiques soient plus importantes dans les chenaux principaux et puissent expliquer les concentrations en sédiments en suspension plus importantes dans ces chenaux, elles diminuent dans les chenaux secondaires et les chenaux internes. Ces résultats suggèrent que l'augmentation des concentrations en sédiment en suspension observée dans les chenaux est principalement due à la remobilisation de sédiments sur les estrans, qui sont transportées à travers le Bassin jusqu'à son embouchure. La modification des conditions hydrodynamiques, en particulier l'intensification des vitesses de flots, favorise le transport de sédiments au sein des chenaux et contribue à l'accumulation de sédiments en suspension en bout de chenaux internes (Figure 43.b).

En hiver, la biomasse épigée de *Z. noltei* est basse (Auby and Labourg, 1996) et la capacité des herbiers à réguler les flux sédimentaires est bien plus faible que pendant le reste de l'année (Hansen and Reidenbach, 2013). Par conséquent, l'influence de la régression des herbiers sur les concentrations en matière en suspension est de moindre amplitude au cours de cette saison. De plus, en lien avec des taux de dépôt pré-régression plus importants, le système racinaire peut être enterré sous une couche plus épaisse de sédiment, ce qui signifie que davantage de sédiment est disponible pour être remis en suspension lors de cette période, en comparaison de la période post-régression. En effet, suite à la régression, le niveau racinaire atteint régulièrement la surface du sédiment en hiver (résultat non présenté), limitant ainsi l'érosion du sédiment, particulièrement à cette saison lorsque le système racinaire contribue grandement à la capacité de rétention du sédiment. De ce fait, les modifications du niveau racinaire permettent d'expliquer la baisse des concentrations en matière en suspension observées sur les estrans au cours de l'hiver (Figure 43.a).

#### 5.4.3 Effets de la régression des herbiers sur les flux d'import/export de sédiments

La figure 44 présente l'échange du stock sédimentaire en suspension entre l'intérieur du Bassin et l'océan ouvert, en hiver (Figure 44.a) et en été (Figure 44.b). Le stock sédimentaire en suspension étant plus important dans la lagune en été comme en hiver, cela donne lieu à une quantité plus importante de sédiments quittant la lagune lors du jusant, mais aussi ré-entrant dans le Bassin lors du flot. La masse sédimentaire moyenne échangée par l'embouchure au cours d'une marée (Figure 44.c) indique qu'en hiver, la masse sédimentaire exportée augmente de 4368 tonnes par marée avant la régression à 4752 tonnes par marée après la régression (+ 8.8 %). En été, la masse de sédiments exportés augmente de 1577 tonnes par marée à 2174 tonnes par marée (+38.9 %). En retour, un stock de sédiment plus important entre dans la lagune lors du flot, augmentant en hiver de 3859 tonnes par marée avant la régression à 4190 tonnes par marée après la régression (+8.5 %), et en été de 1443 tonnes par marée à 1985 tonnes par marée (+38.6 %). La masse cumulée de sédiments échangés entre la lagune et l'océan ouvert est donnée pour chaque période

d'intérêt en Figure 43.d et indique qu'en été comme en hiver, 54 tonnes de sédiments sont perdues par marée. Bien que ces pertes ne soient pas statistiquement significatives, cela fait état d'une légère augmentation du sédiment exporté du Bassin suite à la régression des herbiers.

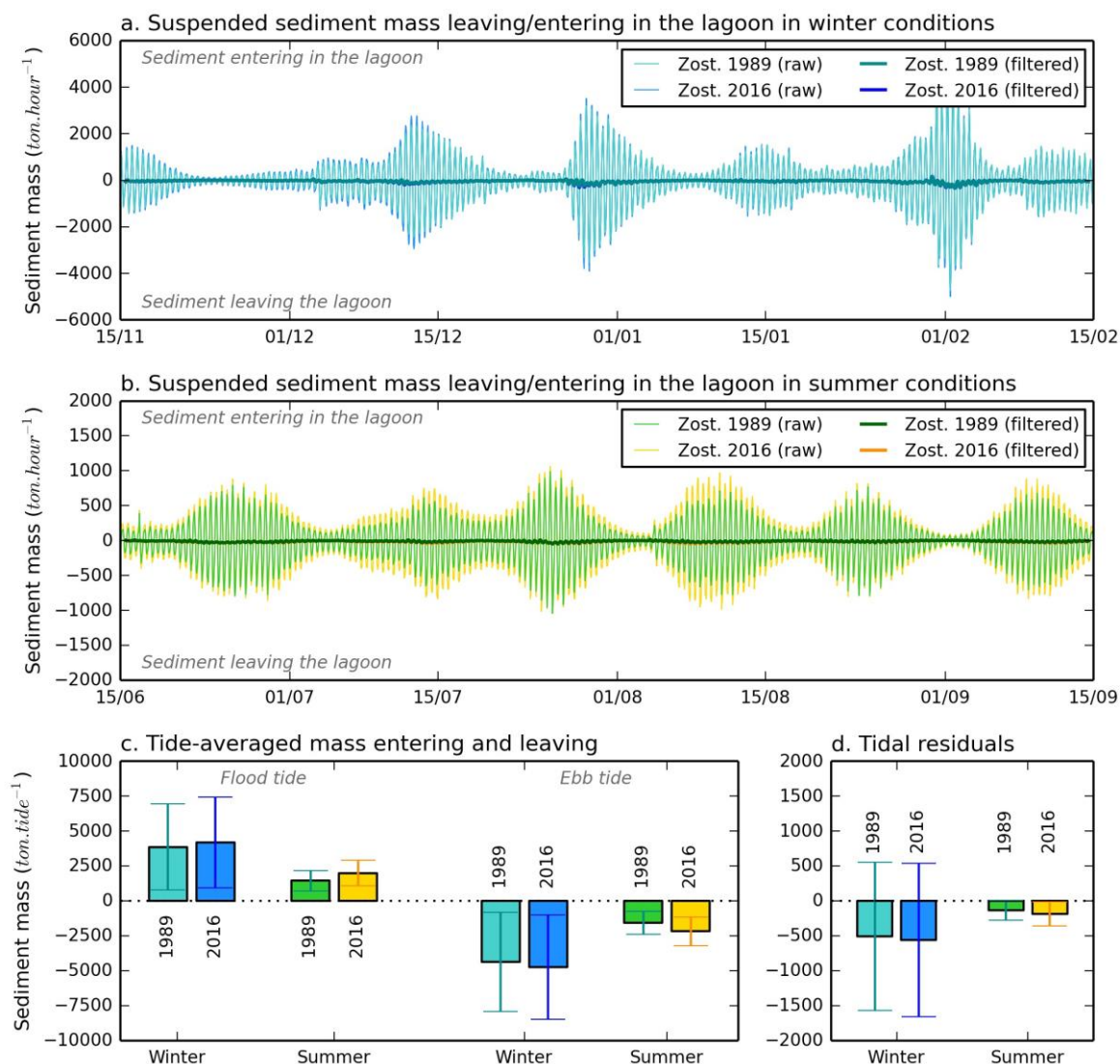


Figure 44: Masse sédimentaire échangée entre la lagune et l'océan ouvert. Les séries de la masse sédimentaire entrant (valeurs positives) et sortant (valeur négative) de la lagune durant l'hiver (a) dans le scénario pré-régression (ligne cyan) et post-régression (ligne bleue) et en été (b) dans le scénario pré-régression (ligne verte) et post-régression (ligne jaune). (c) Budget sédimentaire moyen par marée échangé à la frontière du Bassin durant le flot (gauche) et le jusant (droite) et le budget sédimentaire cumulé échangé entre le Bassin et l'océan ouvert pour les différentes périodes d'intérêts

L'intensification de l'export de sédiment s'explique par l'augmentation du stock sédimentaire en suspension disponible pour être exporté en dehors de la lagune, associée à l'amplification des vitesses de jusant observées sur les estrans. Ce renforcement de l'export de sédiment concorde avec les résultats de précédentes études (Speer and Aubrey, 1985; Friedrichs and Aubrey, 1988) ayant démontré que dans les environnements dominés par le jusant, le sédiment a tendance à être exporté vers l'océan ouvert. Cela rejoint aussi les résultats de Donatelli *et al.* (2018) qui ont fait état d'une réduction de la capacité des lagunes côtières à retenir du sédiment suite à la perte de prés-salés.

De plus, le Bassin d'Arcachon est caractérisé par un important flux de retour, avec 95% des masses d'eau quittant la lagune au jusant, y retournant lors du flot suivant (Plus *et al.*, 2009). Ce phénomène explique que malgré un budget de sédiments quittant le Bassin plus important et davantage de sédiments exportés vers l'océan ouvert (Figure 44.d), plus de sédiment retourne également dans la lagune et est ainsi disponible pour être déposé durant le flot (Figure 44.b).

A noter que les flux sédimentaires calculés dans cette étude ne considèrent pas la houle, qui devrait pourtant intensifier l'arrivée de sédiment de l'océan ouvert, avec de faibles changements entre les scénarios pré- et post-régression.

#### 5.4.4 Effets de la régression des herbiers sur le niveau sédimentaire

La Figure 45 présente les variations du niveau sédimentaire entre les scénarios pré- et post-régression, en considérant la végétation avec ses caractéristiques hivernales (Figure 45.a) et estivales (Figure 45.b). Les variations du niveau sédimentaire sont fortement hétérogènes mais témoignent d'une tendance spatiale distincte. Les estrans situés le long des côtes ont tendance à s'accroître, avec des taux de dépôt atteignant  $30 \text{ mm.an}^{-1}$  durant l'hiver et moins de  $10 \text{ mm.an}^{-1}$  durant l'été. Les estrans de la parties Est du Bassin, plus loin des côtes, ont tendance à s'éroder, avec des taux d'érosion atteignant  $20 \text{ mm.an}^{-1}$  en été comme en hiver. Cependant, les estrans de la partie Ouest du Bassin ont seulement subi de faibles variations en hiver et négligeables en été.

En ce qui concerne le réseau de chenaux, les chenaux internes et secondaires ont tendance à se combler durant l'hiver. En été, cette tendance est seulement visible dans les chenaux internes de fond de Bassin. Ces résultats soutiennent les observations faites par les gestionnaires du Bassin (SIBA pers. com.), indiquant le comblement des chenaux internes de fond de Bassin.

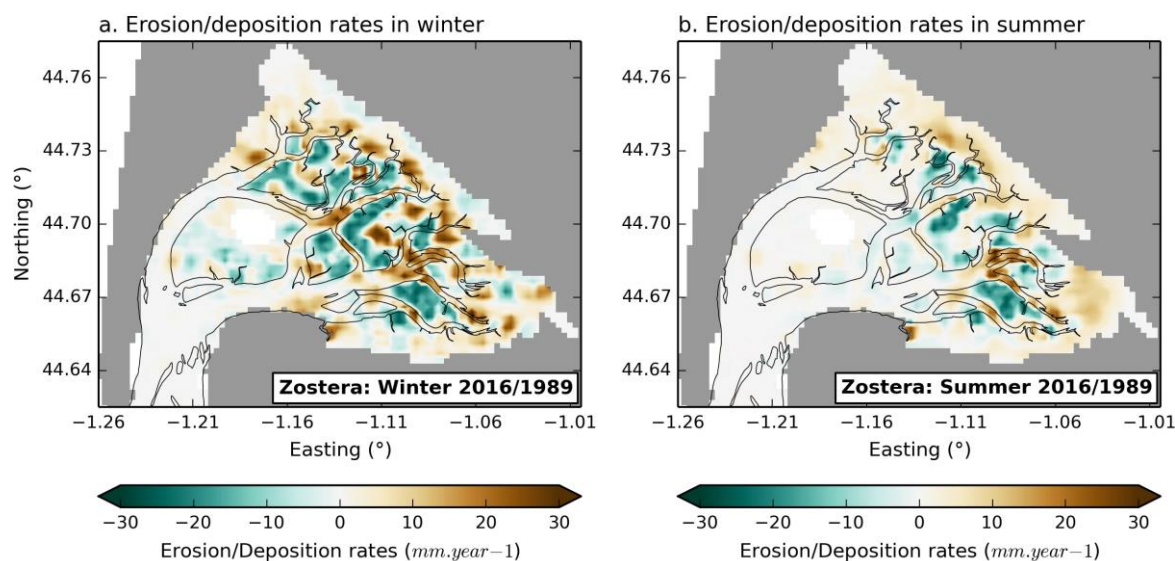


Figure 45: Modifications du taux net d'érosion/dépôt annuel entre le scénario pré- et post- régression, pour la période hivernale (a.) et estivale (b.). Les zones marrons correspondent à de l'accrétion et les zones bleues de l'érosion.

#### 5.4.5 Fiabilité du modèle à prédire les évolutions morphologiques

Simultanément au déclin des herbiers, d'importantes évolutions morphologiques ont été mesurées dans le Bassin d'Arcachon. Ces évolutions morphologiques sont quantifiées en termes de taux d'évolution (en  $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ ) entre les données bathymétriques de 1993 et 2016, une période incluant la régression des herbiers de zostères (Figure 46.a). De plus, les taux d'évolution du niveau sédimentaire simulés (Figure 46.b) sont calculés comme la différence entre les taux net d'érosion / dépôt entre les scénarios pré- et post- régression, au cours d'une année (entre Novembre 2020 et Octobre 2021). Une comparaison des taux d'évolution du niveau sédimentaire observés (Figure 46.a) et simulés (Figure 46.b) fait état de tendances d'évolution identiques, caractérisées par de l'accrétion sur les estrans situés le long des côtes et de l'érosion sur les estrans situés davantage à l'intérieur de la lagune. L'intensité des variations du niveau sédimentaire est également globalement bien reproduite, comme indiqué par le nuage de points comparant les mesures et les simulations (Figure 46.c), caractérisé par une tendance quasi-linéaire et une pvalue  $< 0.01$ . Ces résultats démontrent la très bonne capacité du modèle à reproduire les évolutions morphologiques observées dans le Bassin.

Toutefois, quelques différences sont visibles entre les observations et les prédictions. Les sites d1 (Figure 46.d1) et d2 (Figure 46.d2) sont tous les deux caractérisés par la présence de parcs à huîtres, ainsi que des dragages réguliers en d1. L'omission des parcs à huîtres dans le modèle donne lieu en une représentation biaisée de la dynamique du fond sédimentaire en ces sites, qui sont ainsi exclus de la régression linéaire (Figure 46.c). De plus, des disparités peuvent être observées dans les chenaux principaux où le modèle sous-estime fortement ces modifications. Le projet ARCADE a également démontré que les modifications hydrodynamiques observées dans les chenaux principaux sont pour la plupart dues aux évolutions morphologiques de l'embouchure, qui ne sont pas prise en compte dans ces simulations. Ces évolutions morphologiques sont ainsi très probablement responsables des modifications bathymétriques observées dans les chenaux



principaux en Figure 46.b. De plus, dans la région du sud du Bassin (proche de La Teste), le modèle échoue à représenter l'accrétion. Cette différence peut être expliquée par l'important développement d'algues durant l'été dans cette zone (Lissardy *et al.*, 2023) et leur capacité à stabiliser le sédiment, un facteur qui n'est également pas considéré dans notre modèle. Finalement, il faut noter que les taux d'érosion/dépôt observés sont calculés à partir de mesures espacées de 23 ans, alors que ceux simulés sont calculés sur une période d'un an. De ce fait, la variabilité interannuelle des conditions hydrodynamiques et des événements tempétueux pouvant être responsable d'importantes évolutions morphologiques, ne sont pas inclus dans les prédictions.

La forte corrélation entre les mesures et les prédictions souligne que la régression des herbiers peut expliquer les évolutions morphologiques observées dans la lagune. De ce fait, il peut être conclu que la régression des herbiers est le principal responsable des évolutions morphologiques qui se sont produites dans le Bassin d'Arcachon, excepté dans les chenaux principaux.

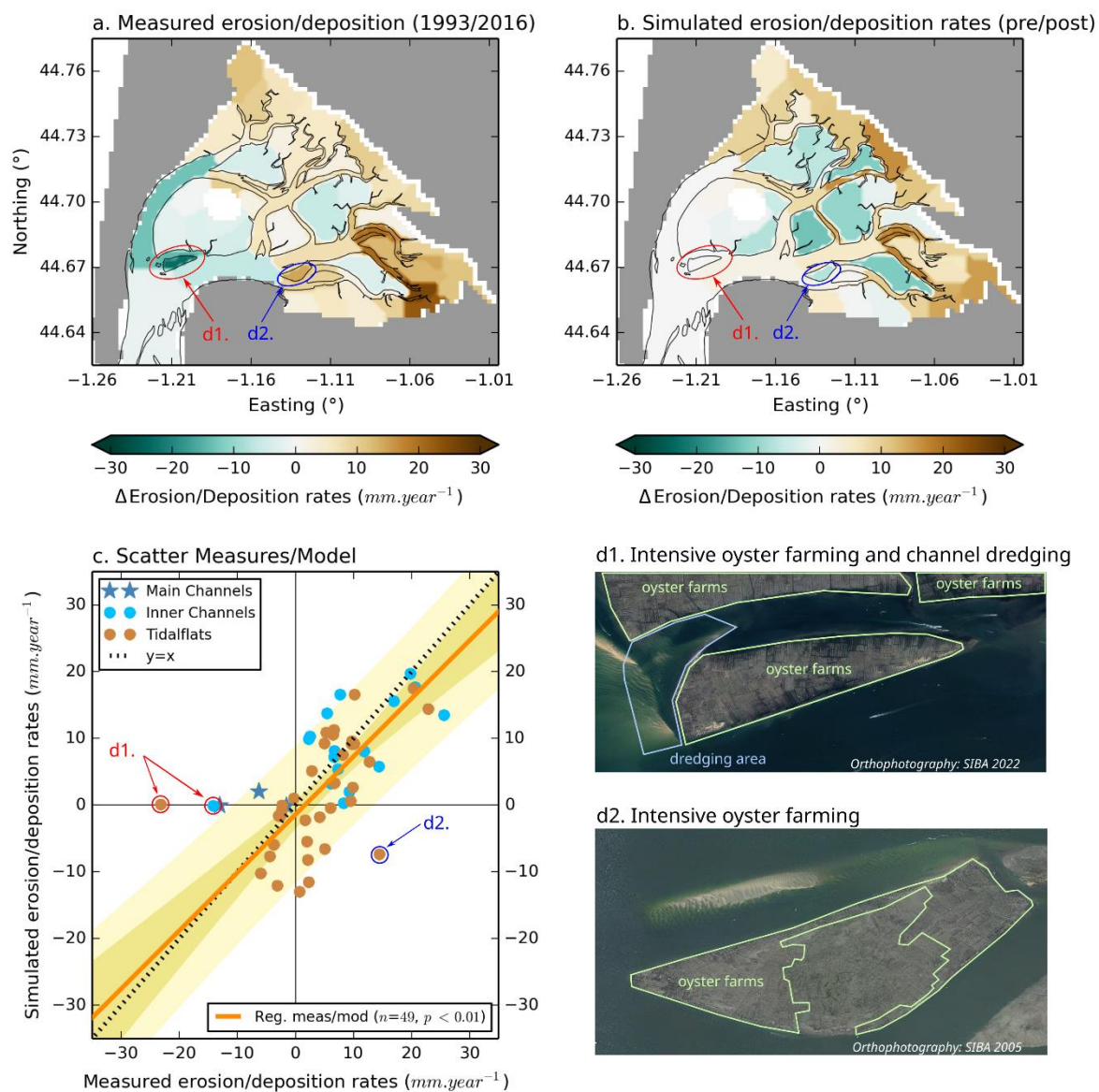


Figure 46: (a) Taux d'évolution du niveau sédimentaire calculé à partir des données bathymétriques de 1993 et 2016 et (b) le taux d'évolution du niveau sédimentaire simulé, induit par la régression des herbiers. (c) Comparaison de l'évolution du niveau sédimentaire entre les prédictions et les observations. (d1, d2) Vues aériennes aux sites d1 et d2 où le modèle ne réussit pas à représenter les observations.

#### 5.4.6 Boucles de rétroactions bio-hydro-sédimentaires

Le dynamique sédimentaire, l'hydrodynamique et la croissance des herbiers sont trois processus fortement interdépendants, pouvant soit être maintenues dans un état stable ou déstabilisées par des mécanismes de rétroactions (Bouma *et al.*, 2009). L'initiation de la régression des herbiers, probablement due à des canicules et la présence de contaminants dans l'eau (Auby *et al.*, 2011; Cognat *et al.*, 2018), a ainsi déstabilisé une première boucle de rétroactions entre végétation et hydrodynamique. Les pertes de végétation ont intensifié les conditions de vagues et de courant (Parties 3 et 4), renforçant les contraintes hydrodynamiques qui s'exercent sur les herbiers et engendrant des pertes d'herbiers supplémentaires, causées par de l'affouillement et de la destruction mécanique. Ces pertes additionnelles induites par l'hydrodynamique ont ainsi contribuées à l'accélération du déclin et mis en place un mécanisme d'auto-amplification entre l'intensification des conditions hydrodynamiques et la régression des herbiers.

La perturbation de la dynamique sédimentaire faisant suite à la régression des herbiers a déstabilisé une seconde boucle de rétroaction entraînant l'augmentation des concentrations en matière en suspension et la possible détérioration des conditions lumineuses. La figure 47 présente la modification des conditions de lumière dans le fond de la colonne d'eau suite à la régression des herbiers. Ces résultats révèlent une réduction de l'intensité lumineuse sur tous les estrans lorsque l'on considère les herbiers avec leurs caractéristiques hivernales (Figure 47.b). Dans la partie Est du Bassin, où les concentrations en matière en suspension ont le plus augmenté, la radiation photosynthétiquement active (PAR) a été réduite par deux. Cependant, au cours de l'hiver, les conditions lumineuses ne sont pas significativement impactées par la régression des herbiers (Figure 47.a). Par ailleurs, les conditions lumineuses ne sont pas modifiées dans le fond des chenaux, puisque la lumière n'atteint pas le fond de la colonne d'eau dans ces zones, aussi bien avant qu'après la régression.

La lumière est souvent considérée comme l'un des principaux paramètres de contrôle de la croissance des herbiers (Zharova *et al.*, 2001; Cognat *et al.*, 2018), impliquant que la détérioration des conditions de lumière dans le fond de la colonne d'eau a augmenté les contraintes liées à la lumière s'exerçant sur les herbiers (Koch, 2001; Kuusemäe *et al.*, 2016) et donner lieu à des pertes additionnelles.

Cette étude suggère ainsi que la régression initiale des herbiers a établi deux mécanismes d'auto-amplification entremêlés faisant intervenir l'intensification des conditions hydrodynamiques, l'amplification de l'érosion et la détérioration des conditions lumineuses, ainsi que l'accélération des pertes d'herbiers dans le Bassin d'Arcachon.

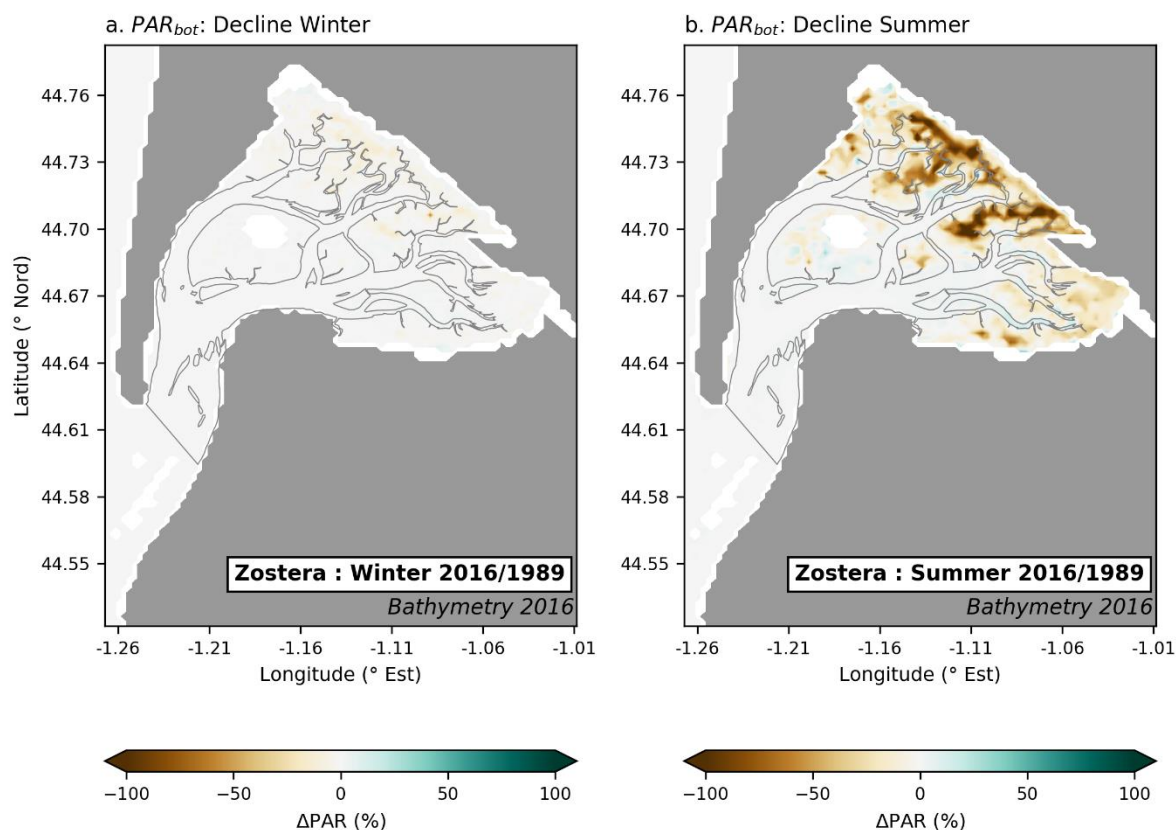


Figure 47: Taux d'évolution de la radiation photosynthétiquement active (PAR) au fond de la colonne d'eau entre 1989 et 2016, en considérant la végétation avec ses caractéristiques hivernales (a.) et estivales (b.). Les zones marron représentent une dégradation des conditions de lumière et les zones bleues une amélioration des conditions de lumière.

## 6 Herbiers

### 6.1 Avancement et réalisations de l'année 2020

En ce qui concerne les herbiers et le développement du modèle de croissance simplifié, un travail de bibliographie a été réalisé dans le but de présélectionner les équations principales qui régiront les différents processus liés à la croissance des herbiers de zostères. A partir de ce travail bibliographique, les équations retenues se basent principalement sur une adaptation/fusion des travaux réalisés par [Verhagen et Nienhuis \(1983\)](#), [Plus et al. \(2003\)](#) et [Renton et al. \(2011\)](#).

A ce stade, il ne s'agit que du contexte général qui sera, par la suite et au fil des développements et tests, modifié, affiné et complété.

### 6.2 Avancement et réalisations de l'année 2021

La mise en équation du modèle débutée en 2020, a été poursuivie en 2021 et a aboutie au développement complet du modèle de croissance simplifié. Le fonctionnement de ce modèle ainsi que les formulations et paramétrisations sur lesquelles il repose ont fait l'objet d'une documentation technique à part entière et présentée en Annexe de ce rapport.

Le modèle a dans un premier temps été développé sous Python, afin de faciliter sa calibration. Son implémentation dans MARS3D est actuellement en cours. En parallèle, sa calibration est également en cours et fournit déjà des résultats satisfaisant bien que celle-ci ne soit pas totalement achevée (Figures 48,49,50).

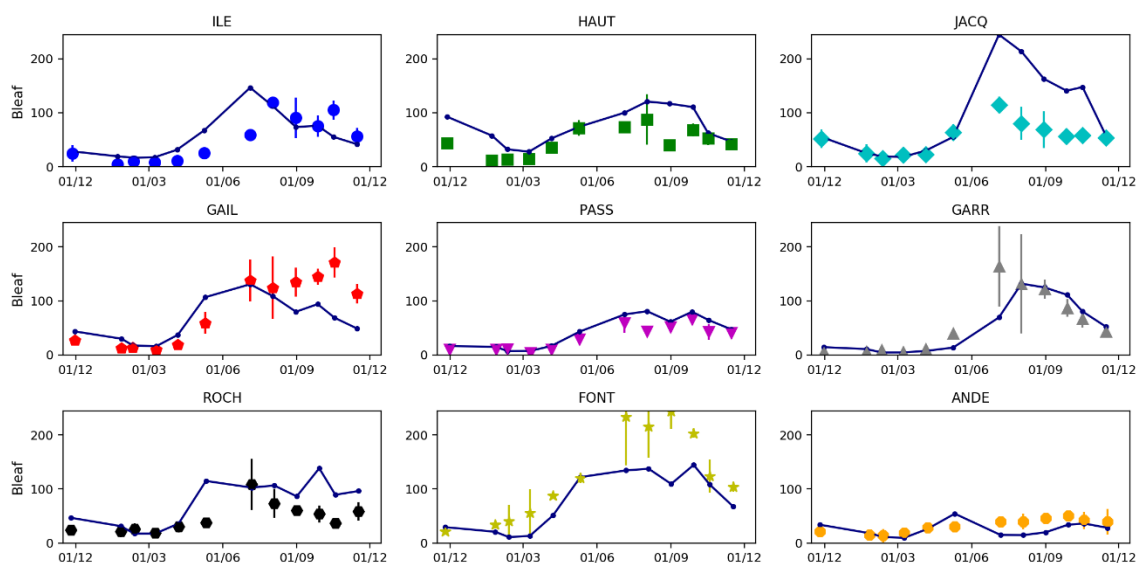


Figure 48 : Comparaison des biomasses foliaires mesurées et simulées (trait plein) pour les neuf sites échantillonnés par Cognat (2019).

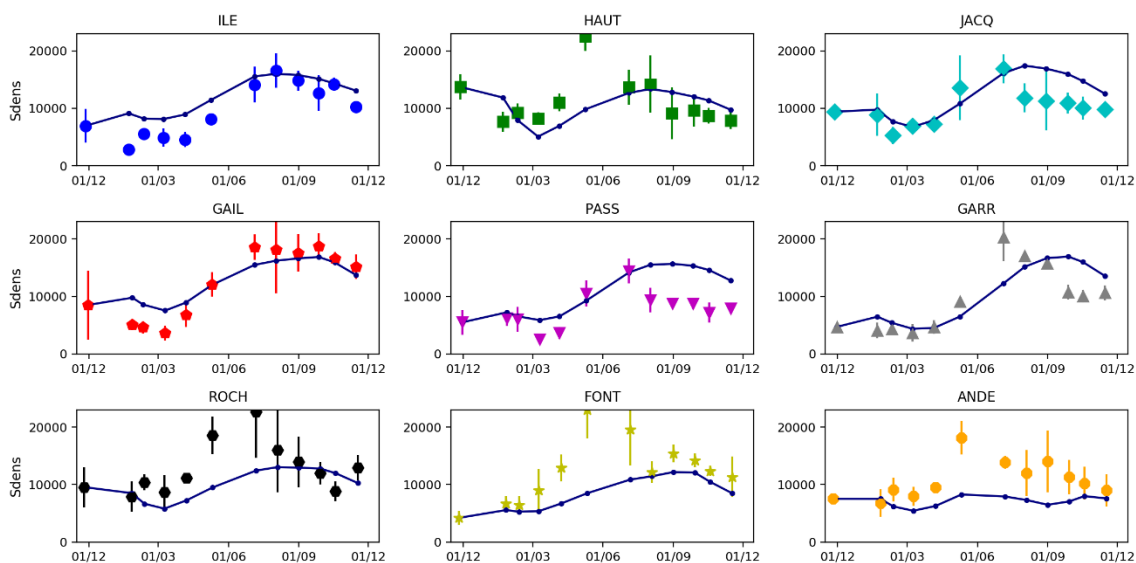


Figure 49 : Comparaison des densités de pieds mesurées et simulées (trait plein) pour les neufs sites échantonnés par Cognat (2019).

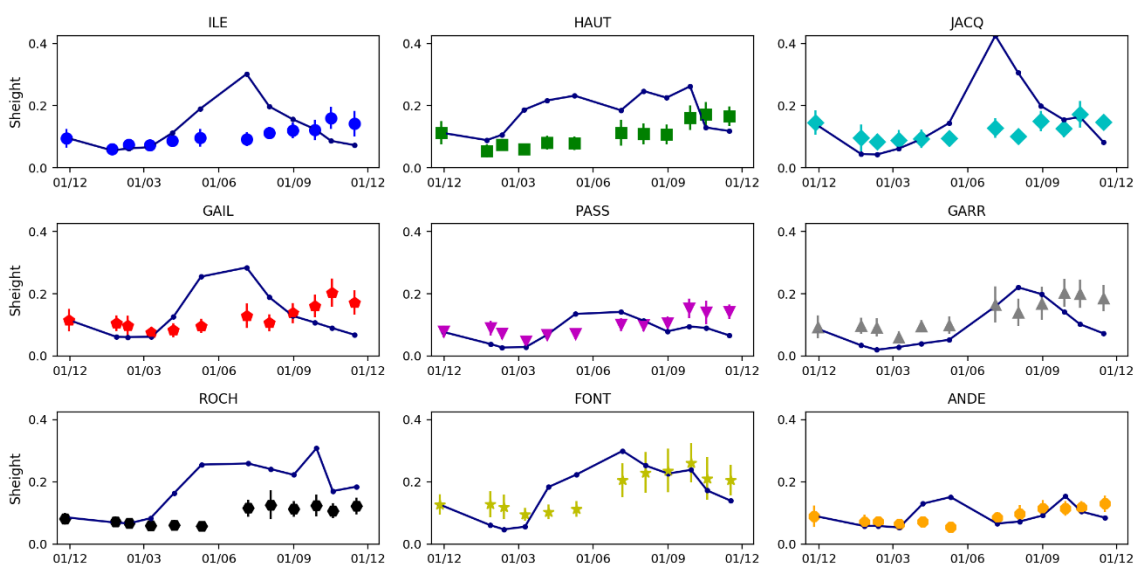


Figure 50 : Comparaison des hauteurs de pied mesurées et simulées (trait plein) pour les neufs sites échantonnés par Cognat (2019).

### 6.3 Avancement et réalisations de l'année 2023

Le modèle de croissance des zostères est calibré en termes de biomasse épigée en comparant les résultats de simulation aux données collectées dans le cadre du projet ReZoEnv (Cognat, 2019). Cette campagne de mesure fournit un jeu de données des caractéristiques d'herbiers, incluant des séries temporelles d'évolution de *Zostera noltei* en 9 sites répartis dans le Bassin (Figure 51). Ce jeu de données est utilisé pour la calibration du modèle (Figure 52).

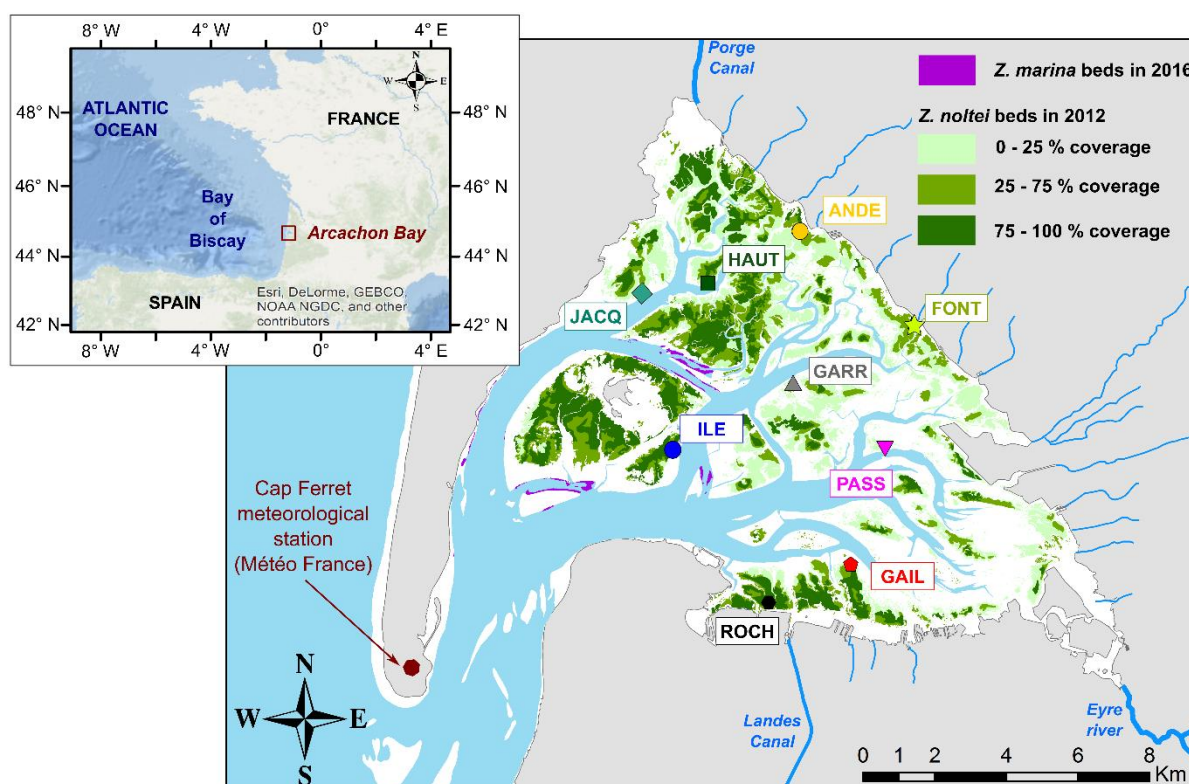


Figure 51: Carte représentant les sites de calibration et la couverture des herbiers de *Z. noltei* et *Z. marina* en 2012 et 2016, respectivement (Figure extraite de Cognat et al., 2018).

Dans le Bassin d'Arcachon, *Zostera noltei* possède une forte variabilité spatiale, que la large résolution spatiale du modèle (maille de 235 mètres) ne reproduit pas précisément. Afin de minimiser ces erreurs, la biomasse est calculée en chaque maille comme la valeur médiane entre neuf mailles, en considérant la maille du site correspondant et les 8 mailles voisines.

Le modèle de croissance des herbiers reproduit le cycle annuel de *Z. noltei* de manière satisfaisante en tous les sites (excepté à ANDE; Figure 52.b), caractérisé par un minimum de biomasse durant l'hiver (entre Décembre et Mars) et un maximum durant l'été (entre Juillet et Septembre). Alors que le modèle capture globalement bien la dynamique saisonnière, certaines incohérences peuvent être observées à GARR, JACQ, et FONT, où le pic de biomasse estival se produit un mois plus tôt et à GAIL, où le pic de biomasse s'étend jusqu'en Novembre.

Au cours de l'hiver, la biomasse est relativement uniforme en tous les sites (environ 20 g<sub>DW</sub>.m<sup>-2</sup>) et est correctement approximée par le modèle. Le modèle témoigne également d'une bonne capacité à reproduire la croissance saisonnière au printemps en la majorité des sites, malgré une importante sous-estimation à ANDE et ROCH (Figures 52.b and 52.f). En été, le pic de biomasse fait état d'une forte variabilité à l'échelle du Bassin, variant entre 50 g<sub>DW</sub>.m<sup>-2</sup> ou moins à PASS et ANDE et jusqu'à plus de 150 g<sub>DW</sub>.m<sup>-2</sup> à GAIL, FONT et GARR. Durant cette saison, le modèle fournit une prédiction particulièrement bonne à ILE et GAIL, et reproduit de manière satisfaisante les observations à HAUT et JACQ, compte tenu de la forte variabilité spatiale de la biomasse en ces sites. Cependant, les observations sont fortement surestimées à ANDE, PASS et ROCH et sous-estimées à FONT et GARR.

Les surestimations du modèle à ANDE et ROCH (Figures 52.b et f) peuvent être attribuées à la présence d'algues qui ne sont pas prises en compte dans le modèle. Ces algues réduisent fortement la lumière disponible pour la photosynthèse des zostères (Cognat *et al.*, 2018). Les surestimations de biomasse à PASS (Figure 52.d) peuvent être expliquées par d'importantes concentrations en contaminants (Gouriou *et al.*, 2018), de par la proximité de ce site avec l'embouchure de la Leyre, associée à d'importantes concentrations en chlorophylle (Maurer *et al.*, 2017). Ces fortes concentrations en chlorophylle indiquent la présence de quantités substantielles de phytoplancton, qui capture la lumière et réduit la lumière disponible pour la photosynthèse des herbiers. Cependant, aucun de ces deux processus induisant des pertes de biomasse ne sont pris en compte dans le modèle. GARR est un des sites présentant les conditions de lumière les plus faibles ; de ce fait d'importants mécanismes d'adaptation sont en jeu en ce site (Cognat *et al.*, 2018). Afin de s'adapter aux conditions lumineuses, *Z. noltei* modifie sa teneur en chlorophylle et allonge ses feuilles (Olesen *et al.*, 2002; Peralta *et al.*, 2002; Cognat *et al.*, 2018). Alors que le premier mécanisme est pris en compte dans le modèle, l'adaptation de l'élongation des feuilles n'est pas prise en compte et peut entraîner des sous-estimations de la biomasse simulée (Figure 52.i).

Finalement, à FONT, Cognat *et al.* (2018) ont indiqué que les herbiers sont constamment submergés, puisque situés au sein d'une dépression. De par la résolution spatiale du modèle, cette dépression n'y est pas représentée, entraînant ainsi l'émergence des herbiers pour une période plus longue et donnant lieu à des pertes liées à la dessiccation plus importantes, ce qui explique les sous-estimations observées en ce site



Bien que l'on puisse expliquer la majorité des différences entre les prédictions et les observations, nous ne sommes pas capable de fournir une explication satisfaisante concernant la sous-estimation du pic de biomasse qui s'étend jusqu'en Novembre à GAIL (Figure 52.g). La biomasse simulée est grandement dépendante des conditions hydrodynamiques, la lumière disponible, et les températures, rendant sa calibration particulièrement difficile. De plus, les conditions hydrodynamiques et lumineuses dépendent de la calibration du modèle de courant, de vague et de transport sédimentaire, incluant tous des biais de calibration qui s'accumulent. En gardant à l'esprit que cette calibration constitue une calibration préliminaire du modèle de croissance des zostères, ces résultats de calibration apparaissent très satisfaisants.

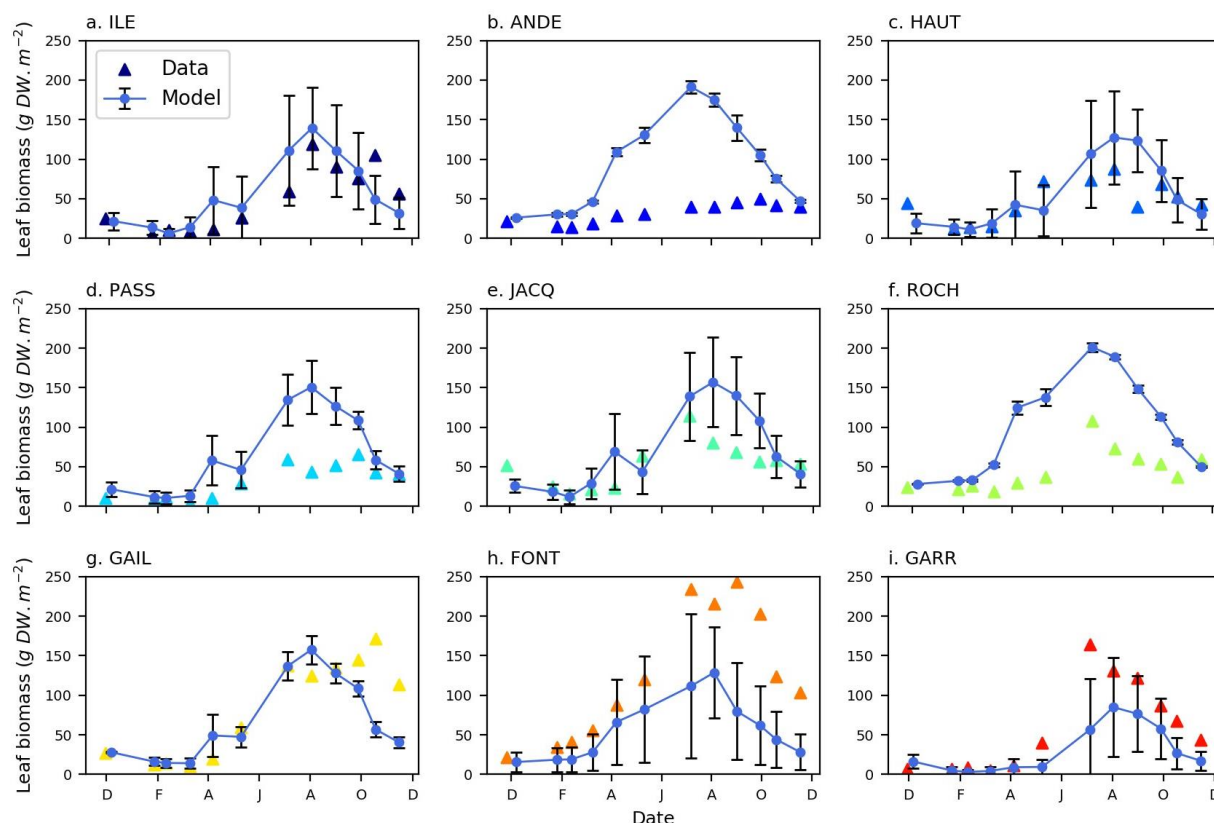


Figure 52: Résultats de validation du modèle de croissance des herbiers ZOSTERA présentés en neuf sites (a. to f.) distribués dans tout le Bassin. La biomasse prédite (points bleus) est comparée aux mesures (triangles) obtenues dans le cadre du projet RezoEnv (Cognat, 2019). Les barres d'erreur correspondent à l'écart type de biomasse calculé en considérant la valeur de biomasse dans la maille correspondante et ses 8 mailles voisines.

## 7 Potentiels scénarios d'évolution climatique

### 7.1.1 Introduction

La productivité et la distribution des herbiers sont contrôlées par les conditions environnementales de leur milieu. De ce fait, lorsqu'un des facteurs de croissance nécessaire au développement des herbiers vient à manquer, cela génère une source de stress pour la végétation et on parle alors d'eux comme des facteurs limitant. Dans le bassin d'Arcachon, l'hydrodynamique a été identifié comme le facteur de contrôle principal de la croissance des herbiers (Cognat *et al.*, 2018), devant la lumière et la température qui jouent néanmoins un rôle majeur dans le développement des herbiers. En effet, la lumière apparaît comme le principal facteur limitant dans de nombreux environnements (e.g. de los Santos, 2010 ; Möller *et al.*, 2019), de par son rôle prépondérant dans le processus de photosynthèse. Les conditions lumineuses sont influencées par de nombreux facteurs qui peuvent réduire la quantité de lumière reçue par la végétation que sont la profondeur, la turbidité, ou encore la présence d'espèces invasives (Zharova *et al.*, 2001 ; Jin et Ji, 2013). La température, de par son influence sur la productivité, le taux de photosynthèse et la respiration, est également souvent désignée comme l'un des paramètres principaux contrôlant la croissance des herbiers (Pérez et Romero, 1992). Des températures élevées vont augmenter la respiration par rapport au taux de photosynthèse et au-dessus d'une certaine température le taux de respiration peut dépasser le taux de photosynthèse, résultant en un dépérissement de la végétation suite à une carence en carbone (Bocci *et al.*, 1997).

Dans le contexte actuel de l'accélération du changement climatique, les conditions hydrodynamiques, de température et de lumière vont très probablement être modifiées et risquent d'augmenter le stress subi par les herbiers. Le réchauffement de l'océan est considéré comme l'une des menaces liées au changement climatique les plus sévères pour la végétation côtière (Duarte *et al.*, 2018), principalement dans les habitats peu profonds (Waycott *et al.*, 2009) tels que le Bassin d'Arcachon. La température de surface globale a augmenté depuis la période 1850-1900 et il est estimé que début 2030 le seuil de 1.5°C par rapport à cette période sera franchi (Arias *et al.*, 2021). Ces 30 dernières années ont été marquées par une accélération du réchauffement des températures de l'eau, qui s'est renforcée depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. Selon les scénarios considérés, il est prévu que le niveau de réchauffement des océans actuellement observé soit multiplié entre 2 et 8 d'ici 2100 (Arias *et al.*, 2021). À cela s'ajoute l'augmentation globale de la fréquence, durée et intensité des vagues de chaleur depuis 1950 qui devrait se poursuivre au moins jusqu'en 2100, alors que la fréquence et l'intensité des vagues de froid ont diminué (Arias *et al.*, 2021). Ainsi, les événements extrêmes très rares vont devenir plus fréquents et il y a une chance que des événements sans précédents se produisent (Arias *et al.*, 2021). L'analyse des données de température du bassin d'Arcachon confirme cette tendance observée globalement, avec une augmentation de la température moyenne annuelle de l'air (données Météo France mesurées au sémaphore du Ferret) de 0.38°C/an au cours des 30 dernières années (Figure 53.a et b) et de la température moyenne annuelle de l'eau (données Ifremer mesurées à la jetée d'Eyrac) de 0.021°C/an depuis le début du siècle (Figure 54). L'analyse des températures de l'air a de plus révélé une augmentation de la température maximale annuelle de 0.105°C/an sur les 30 dernières années (Figure 53.c), témoignant bien de l'amplification de la magnitude des vagues de chaleur sur notre site d'étude.

D'ici 2100, une élévation du niveau marin est attendue par rapport au niveau moyen observé sur la période 1995 - 2014 de 0.28 à 0.55m selon le scénario le plus favorable (SSP1-1.9) et de 0.63-1.01m sous le scénario le plus défavorable (SSP5-8.5) (Arias *et al.*, 2021). Alors que l'élévation du

niveau moyen est observée depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, une croissance du taux d'élévation est reportée depuis 1960 (Arias *et al.*, 2021). Cette tendance a été observée dans le Golfe de Gascogne où le niveau d'eau moyen a augmenté au cours des dernières décennies (Chust *et al.*, 2011), avec une accélération notable de la montée des eaux depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle (Le Treut, 2013). Bien que la végétation marine ait une bonne capacité d'adaptation à la montée des eaux en favorisant les processus d'accrétion (Fagherazzi *et al.*, 2012), un taux d'élévation trop important ne permettra pas à la végétation marine d'adapter le niveau du fond sédimentaire assez rapidement. La dégradation des conditions lumineuses faisant suite à l'augmentation de la profondeur entrainera alors la mort des herbiers (Potouroglou *et al.*, 2017 ; Fagherazzi *et al.*, 2012).

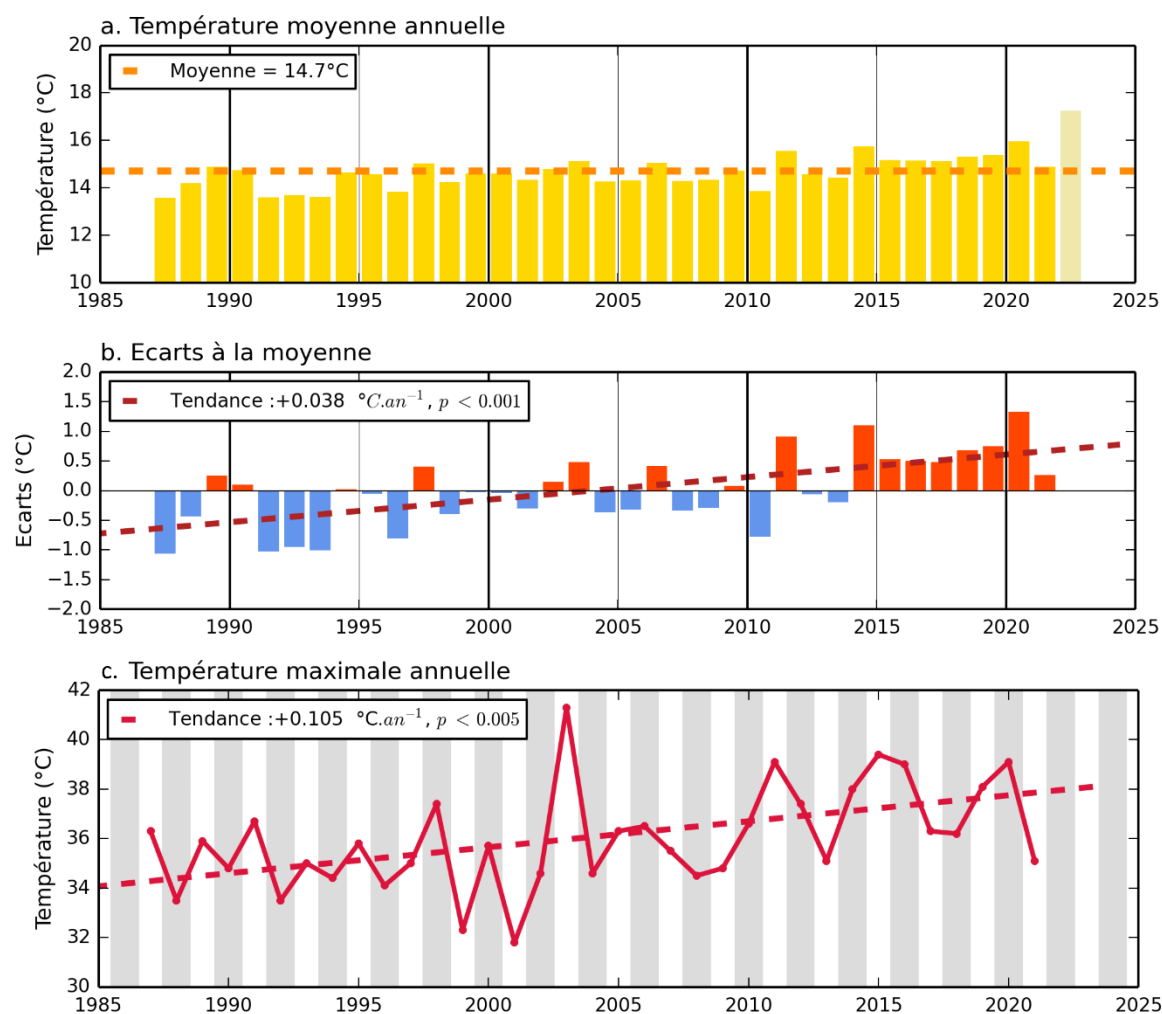


Figure 53 : Températures annuelles moyennes (a) et la moyenne de ces températures représentée par la ligne pointillée orange. L'écart à la moyenne des températures annuelles moyennes (b) et la tendance d'évolution de ces températures représentée par la ligne pointillée rouge. L'évolution de la température maximale annuelle (c) et leur tendance (ligne pointillée magenta)

Par ailleurs, l'élévation du niveau marin va affecter l'hydrodynamique à une échelle globale (Vousdoukas *et al.*, 2017) et modifier la marée (Pickering *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2014) suite à la réduction du frottement sur le fond et la modification des propriétés de résonance et de

réflexion sur les côtes (Idier *et al.*, 2017). La modification de la dynamique tidale va d’une part influencer la dynamique sédimentaire (Boelens *et al.*, 2017) qui à son tour va réduire les conditions de lumière dans la colonne d’eau, et d’autre part modifier le temps de renouvellement des masses d’eau (Du et Shen, 2016) et influencer la qualité de l’eau.

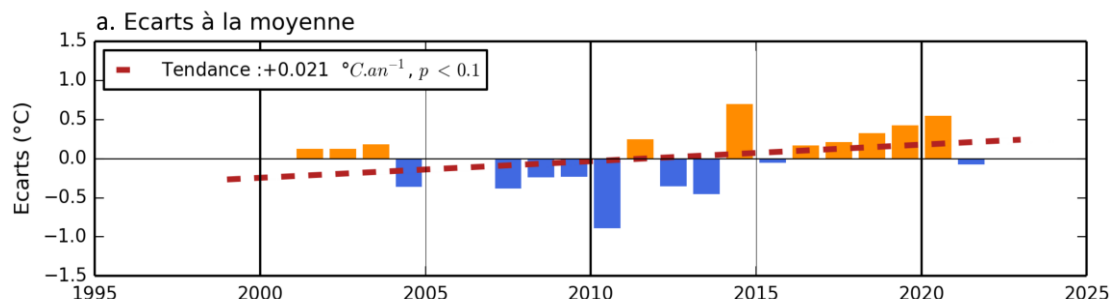


Figure 54 : Écarts à la moyenne des températures annuelles de l’eau. La courbe pointillée rouge représente la tendance de l’évolution des températures

L’évolution des conditions environnementales liées au changement climatique va renforcer le stress subit par les herbiers et on s’attend à ce que la régression des herbiers de zostères du bassin d’Arcachon se poursuive, voir s’accélère, avec des implications sur les processus hydro-sédimentaires. Cette étude a pour objectif de comprendre comment les rétroactions bio-hydro-sédimentaires vont évoluer en réponse à différents scénarios climatiques potentiels.

Une tendance à l’augmentation globale des vitesses de vent, entre 5 à 10 %, a été observé au cours des 20 dernières années (Young *et al.*, 2011). Cependant, l’analyse faite sur les données de vent (Météo France), mesurées au sémaphore du Cap Ferret ne révèle pas de tendance significative quant à l’évolution des forts coups de vent. Pour cette raison, cette première étude de la réponse des rétroactions bio-hydro-sédimentaires à de potentiels scénarios d’évolution ne prendra pas en compte ce paramètre et se concentra seulement sur l’élévation du niveau marin et l’évolution des températures de l’air et de l’eau.

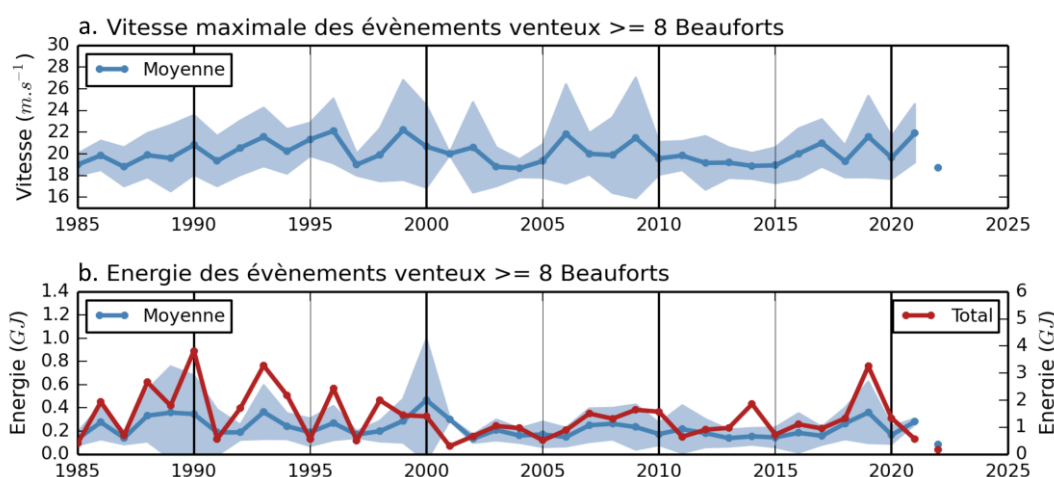


Figure 55 : Evolution de la vitesse maximale des vents supérieurs à 8 Beauforts (a) et de leur énergie (b)

### 7.1.2 Choix des simulations à effectuer

La réponse des processus bio-hydro-sédimentaires à des scénarios d'évolution potentiels de la hauteur d'eau, température de l'air et température de l'eau va être étudiée à travers 5 scénarios (Table 3). Le choix de ces scénarios permet d'étudier indépendamment l'impact de l'élévation du niveau marin et de l'évolution du cycle annuel des températures (air et eau), mais aussi l'effet cumulée de ces deux paramètres. Ces simulations sont également effectuées en présence d'évènements extrêmes afin de comprendre l'impact de tels évènements sur la survie des herbiers. L'évolution des températures de l'air et de l'eau sont étudiées conjointement puisque corrélées.

N° Simulations	Variables climatiques	Évènements extrêmes
1	Niveau d'eau	×
2	Température de l'air Température de l'eau	×
3	Température de l'air Température de l'eau	Température de l'air Température de l'eau
4	Niveau d'eau Température de l'air Température de l'eau	×
5	Niveau d'eau Température de l'air Température de l'eau	Température de l'air Température de l'eau

Table 3 : Définition des scénarios d'évolution détaillant les variables climatiques considérées et la prise en compte ou non d'évènements extrêmes

### 7.1.3 Quantification de l'évolution

L'évolution de ces paramètres climatiques est étudiée à moyen terme en utilisant les prévisions faites dans la région Europe de l'Ouest et centrale, effectuées pour la période (2041-2060 ; référée 2050 dans la suite de cette étude dans un souci de concision) dans le cas du scénario IPCC SSP2-4.5. Ce scénario correspond à un scénario intermédiaire désigné « business as usual » pour lequel le rythme d'émission actuel ne subit pas de variations brutales majeures. Il est considéré comme le scénario le plus vraisemblable (Lepoussez et Aboukrat, 2022) et sera donc utilisé dans le reste de cette étude. L'évolution de ces paramètres est considérée par rapport à la période de référence 1995-2014, pour laquelle de nombreuses données sont disponibles dans le bassin d'Arcachon.

Dans cette région et sous ces conditions une élévation du niveau marin de 0.2 mètre a été prédite (Gutiérrez et al., 2021). Concernant l'évolution des températures, un cycle annuel de l'évolution de ces températures peut être extrait de l'Atlas interactif IPCC 2021 (Gutiérrez et al., 2021) qui fournit l'évolution de la température de l'air et de l'eau à la surface (Figure 56) pour chaque mois de l'année.

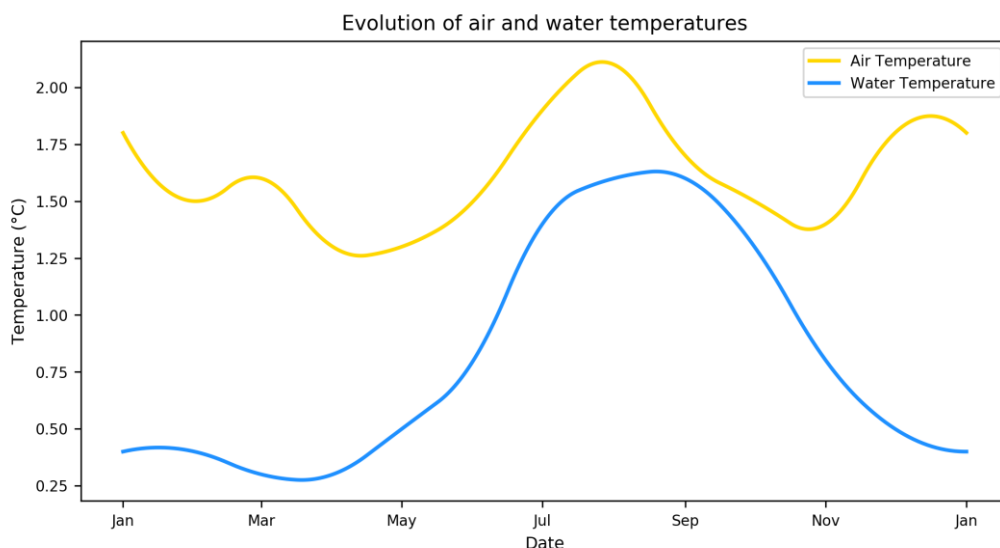


Figure 56 : Cycle annuel d'évolution des températures de l'air (courbe jaune) et de la surface de l'océan (courbe bleue) en Europe de l'Ouest entre 1995-2014 et 2041-2060 (données [Gutiérrez et al., 2021](#))

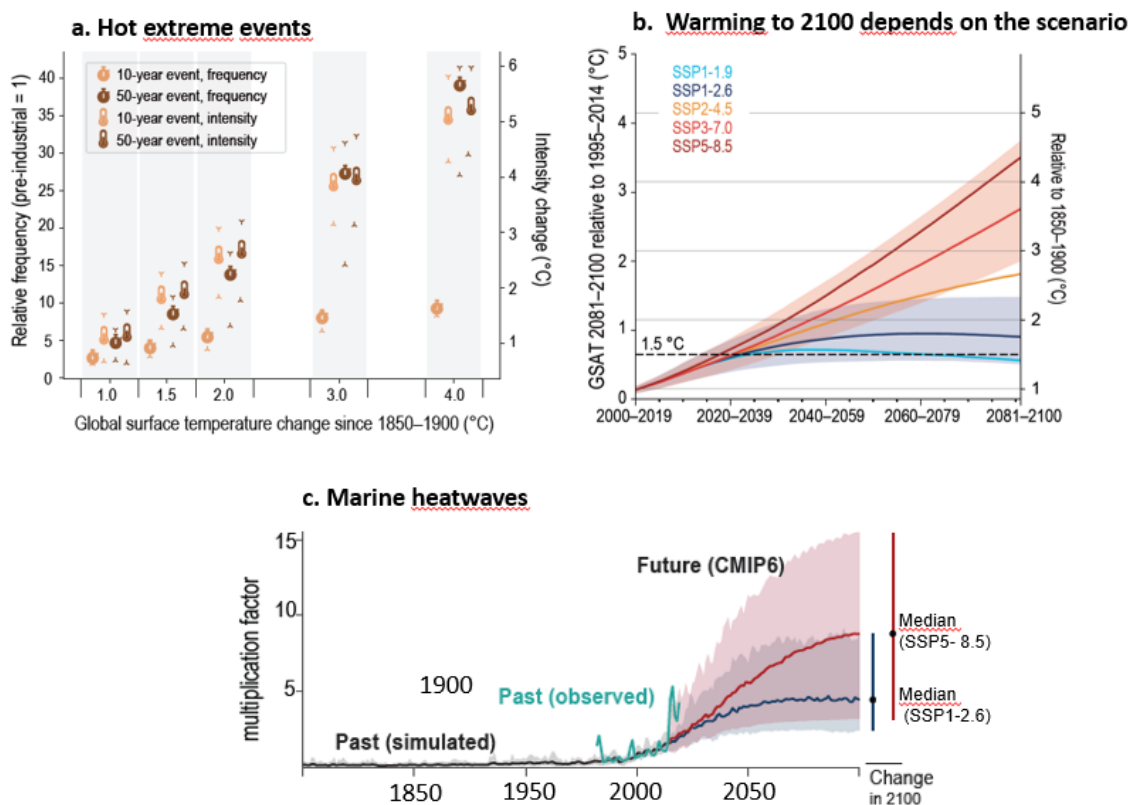


Figure 57 : Graphiques d'évolution de l'intensité et fréquence des vagues de chaleur de la température de l'air (a), de la température de l'air en fonction du scénario climatique considéré (b) et de la fréquence des vagues de chaleur marines(c) ([Arias et al., 2021](#))

Le nombre vagues de chaleur et leur intensité peuvent être définis grâce à l'utilisation d'un coefficient multiplicateur déterminé à partir des courbes (Figure 57) que ce soit pour la température de l'air (Figure 57.a) ou de l'eau (Figure 57.c). Sous le scénario SSP2-4.5, une augmentation de la température de 2°C par rapport à la période 1850-1900 est attendue alors que la période 1995-2014 est marquée par une température globale de la surface de la Terre d'environ 1°C au-dessus de la référence (Figure 57.b). On estime qu'actuellement le nombre d'évènements extrêmes ayant une période de retour de 10 a été multiplié par 3 par rapport à leur fréquence initiale et va être multiplié par 5 à l'horizon 2050 (Figure 57.a). Leur intensité a augmenté de ~1°C par rapport à 1850-1900 et devrait augmenter de 2.5°C par rapport à cette référence (Figure 57.a). De fait, il est prévu que la fréquence des évènements extrêmes soit multipliée par 1.7 d'ici à 2050, avec un gain d'intensité de 1.5°C. Le digramme d'évolution des vagues de chaleur de la surface océanique indique que le nombre de vagues de chaleur pourrait être multiplié par 3 entre la période 1995-2014 et 2050 (Figure 57.c).

En plus des vagues de chaleur, une diminution des vagues de froid est attendue. Bien que la diminution du nombre de vagues de froid soit attendu d'ici 2050 (Arias *et al.*, 2021), aucune données ne permet de quantifier leur évolutions potentielles. Ainsi il a été décidé de multiplier la fréquence de ces évènements par un coefficient compris entre 0.5 et 0.9 afin de réduire leur nombre.

Dans le Bassin d'Arcachon, en plus de l'apport en eau lié à la marée, il y a en plus une contribution importante des rivières. Bien que les paramètres hydrologiques et le débit des rivières soient amenés à évoluer, notamment à cause de la modification du régime de précipitation, ces derniers ne seront pas pris en compte dans cette étude. Cependant, afin d'obtenir une évolution de la température de l'eau dans le bassin cohérente avec les prévisions réalisées, la température des rivières a été modifiée en utilisant le cycle d'évolution de la température de surface océanique (Figure 56)

## 7.1.4 Génération des forçages

### 7.1.4.1 Élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau marin est prise en compte à travers la modification de la bathymétrie de la zone d'étude. Afin de modéliser une augmentation de la profondeur il a été décidé d'abaisser le niveau de la bathymétrie plutôt que d'artificiallement élever le niveau marin qui est une opération plus fastidieuse. Le modèle MARS3D qui repose sur l'utilisation de grilles gigognes (rang 0,1,2) afin de reproduire la dynamique tidale le plus précisément possible a nécessité d'appliquer la correction bathymétrique souhaitée aux 3 grilles correspondantes aux différents rangs. Grâce à la grande extension spatiale du rang 0 et la solution de marée FES 2012 utilisée dans MARS3D, l'impact de l'élévation du niveau marin sur la dynamique tidale, modélisée par un abaissement bathymétrique, est reproduit de manière satisfaisante par le modèle (Idier *com. pers.*).

Cependant, les zones émergées étant masquées dans le modèle, la montée des eaux ne va pas être modifiée et les phénomènes de réflexion sur les côtes ne vont donc pas être reproduits convenablement induisant de légers biais sur la propagation de la marée. Par ailleurs, aucun modèle à débordement n'a été utilisé dans le bassin d'Arcachon afin d'étudier la réponse du niveau d'eau effectif suite à une élévation du niveau marin global de 0.2m. On considère donc que l'élévation du niveau marin dans le bassin d'Arcachon est similaire à l'élévation globale.

#### 7.1.4.2 Température de l'air

L'analyse des températures est effectuée sur la période 1999 – 2014 afin de respecter le plus possible la période de référence utilisée dans les scénarios IPCC (1995-2014). Aucune donnée n'étant disponible avant 1999, la plage de données n'a pas pu être étendue jusqu'en 1995.

À partir de ces données de températures possédant une discrétisation horaire, le cycle annuel des températures a été créé. Une fenêtre glissante de 15 jours est utilisée pour calculer la valeur médiane de température à une date donnée en considérant les 7 jours précédents et suivants de toutes les années étudiées. Cette opération est effectuée pour chaque heure afin d'obtenir le cycle annuel de la température médiane reproduisant aussi bien la variation annuelle des températures que la variation journalière.

Le cycle annuel d'évolution des températures de l'air (Figure 56) est alors sommé au cycle médian défini à partir de nos données (Figure 58 ; courbe verte) permettant d'obtenir le cycle annuel des températures prévisionnel de 2050.

Bien que [Fischer et Schär \(2010\)](#) recommandent d'utiliser une période de 30 ans pour déterminer les événements extrêmes, la période de 15 ans précédemment définie a été conservée afin de rester fidèle à la définition des scénarios d'évolutions et de manière à ne pas inclure dans nos données les événements extrêmes des dernières années qui se sont déjà intensifiés sous l'effet du changement climatique.

En accord avec la recommandation effectuée par [Perkins et Alexander \(2013\)](#), la définition des vagues de chaleur repose sur l'utilisation d'un percentile. Dans cette étude une vague de chaleur est définie comme une période au cours de laquelle les maximums journaliers de températures excèdent le percentile 90 de la période de contrôle pendant au moins 6 jours consécutifs ([Fischer et Schär, 2010](#)). Ici, le percentile 90 de la période de contrôle est calculé de la même manière que la médiane des températures. Toutefois son calcul est effectué sur la température journalière moyenne afin d'obtenir une discrétisation journalière de ce cycle. La série temporelle des températures est ainsi ré-analysée et les événements de plus de 6 jours dont la valeur maximale journalière est supérieure au percentile 90 sont alors considérés comme des vagues de chaleur.

De la même manière que [Schegel et al., \(2021\)](#) ont adapté la définition des vagues de chaleur marines faites par [Hobday et al., \(2016\)](#) pour des vagues de froid marines, dans cette étude on adapte la paramétrisation de [Fischer et Schär, \(2010\)](#) afin de définir les vagues de froid de l'air. Une vague de froid est ainsi définie comme une période de 6 jours ou plus au cours de laquelle les minimales journalières de températures sont inférieures au percentile 10 de la période de contrôle.

Tous les événements répondant à la définition d'événements extrêmes sont enregistrés. Afin de conserver une distribution annuelle de ces événements cohérente avec leur occurrence actuelle, l'année a été scindée en 4 saisons (hiver, été, ...). Le nombre moyen d'événements ayant lieu par saison a ensuite été calculé et multiplié par le coefficient d'évolution de l'événement extrême correspondant (vague de chaleur ou de froid) afin d'obtenir la fréquence saisonnière de chaque événement estimée pour 2050.

Les événements extrêmes se produisant au cours d'une saison sont sélectionnés aléatoirement parmi les événements extrêmes ayant eu lieu au cours de la saison considérée et ajoutés au cycle annuel correspondant au scénario d'étude (Figure 58). Dans le cas des vagues de chaleur, il est



estimé que leur intensité va augmenter de 1.5°C d'ici 2050 (Figure 57.a), la température de ces évènements a donc été incrémenté pour tenir compte de cette intensification.

Une option supplémentaire ajoutée dans la sélection des évènements extrêmes permet à l'utilisateur de sélectionner des évènements de son choix. Cette option nous permet de sélectionner des évènements extrêmes conséquents que l'on veut voir apparaître dans notre forçage afin d'en étudier l'impact. Dans cette étude les canicules d'Août 2003 (1/08/2003 au 15/08/2003) et Juillet 2006 (10/07/2006 au 28/07/2006) ont été sélectionnées et ajoutées en priorité aux évènements extrêmes.

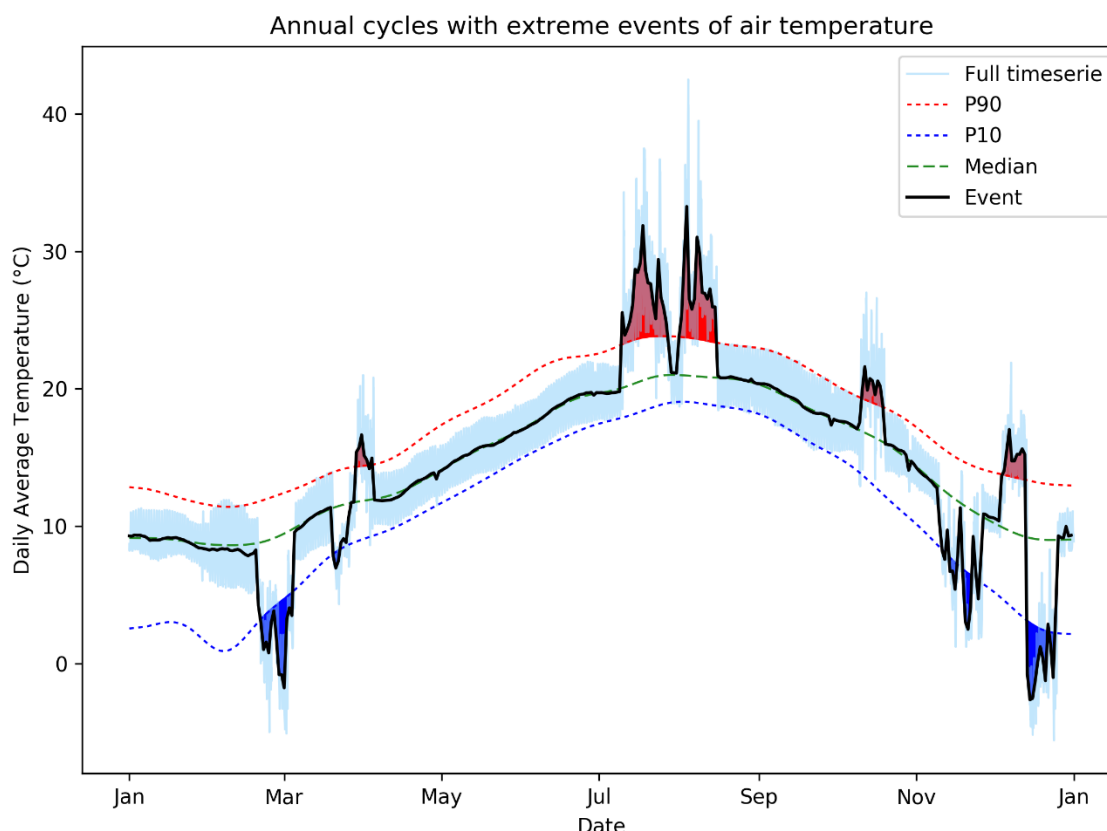


Figure 58 : Cycle annuel de la température de l'air (ligne noire) défini à partir de la médiane des températures de la période de contrôle (ligne pointillée verte) et série temporelle complète présentant une discrétisation horaire (courbe bleue claire). Les zones rouges représentent les vagues de chaleur, i.e les évènements supérieurs au percentile 90 des températures et les zones bleues les vagues de froid (ligne pointillée rouge), i.e les évènements inférieurs au percentile 10 des températures (ligne pointillée bleu)

#### 7.1.4.3 Température de l'eau

Une méthode similaire à celle employée pour les températures de l'air est utilisée afin de représenter la potentielle évolution des températures de l'eau.

Conformément à la recommandation d'utiliser une période de 30 ans pour définir un cycle annuel de référence (Hobday *et al.*, 2016), la plage de données a été étendue le plus possible. Ayant un jeu de données allant de 2007 à 2022, cette période a été utilisée afin de se rapprocher au maximum de la recommandation, quitte à sortir légèrement de l'intervalle de référence définie

par le scénario IPCC (1995-2014). Par conséquent le coefficient multiplicateur représentant l'évolution du nombre d'évènements extrêmes a été adapté en conséquence.

Similairement à ce qui a été effectué pour la température de l'air, une fenêtre glissante de 15 jours a été utilisée pour reconstruire la température médiane à la surface. Cependant le modèle MARS3D étant un modèle 3D, il est forcé avec des températures 3D et il est donc nécessaire de définir le profil 1DV des températures dans la colonne d'eau. À cette fin, le cycle annuel de température a été défini au fond de la colonne d'eau de la maille présentant la plus grande profondeur. Afin de s'affranchir de la variabilité entre ces deux cycles, liée aux approximations statistiques inhérentes à l'utilisation d'une valeur médiane pour reconstruire les deux séries de températures, ces deux cycles annuels ont été approximés par des sinus. Une interpolation linéaire entre la température de surface et de fond a permis de reconstruire le profil de température 1DV dans la colonne d'eau. Il convient de noter qu'une analyse des données de température montre qu'à ces profondeurs relativement faibles (~50m) la thermocline ne peut être observée et un gradient linéaire fournit une approximation valable de la variation de température dans la colonne d'eau.

Afin de simuler l'évolution potentielle des températures de l'eau en 2050, le cycle annuel d'évolution de la température de surface de l'océan (Figure 56) a été sommé à notre cycle annuel de surface (Figure 59 ; ligne pointillée verte). N'étant pas en mesure de quantifier l'évolution de la température dans la colonne d'eau induite par le changement climatique, on estime que la température de fond au point le plus profond n'évolue pas. Bien que des évolutions de températures induite par le changement climatique aient été observées dans le Golfe de Gascogne à des profondeurs allant jusqu'à 500m (Le Treut, 2013), on ne les prendra pas en compte dans cette étude préliminaire. Une telle approximation permet de définir un gradient linéaire entre l'évolution de la température de surface et le fond où la température n'évolue pas, fournissant ainsi un profil 1DV de l'évolution des températures dans la colonne d'eau. Finalement, par sommation, les cycles annuels de la température à l'horizon 2050 sont obtenus dans chaque couche de la colonne d'eau.

La définition des évènements extrêmes de température de l'eau repose également sur l'utilisation d'un percentile : un percentile 90 pour les vagues de chaleur (Hobday *et al.*, 2016) et un percentile 10 pour les vagues de froid (Schlegel *et al.*, 2021). Les pics de chaleur et de froid sont considérés comme de tels évènements extrêmes si leur durée excède 5 jours (Hobday *et al.*, 2016 ; Schlegel *et al.*, 2021). Si deux vagues de chaleur sont espacées de moins de 2 jours on considère alors qu'il s'agit d'un seul et même évènement (Hobday *et al.*, 2016 ; Schlegel *et al.*, 2021). Les vagues de chaud et de froid sont déterminés pour la couche de surface à l'interface air mer et appliquée à cette couche en adoptant la même stratégie que celle détaillée pour la température de l'air (Figure 59). Ces évènements sont ensuite appliqués au reste de la colonne d'eau en considérant une dissipation exponentielle de la température entre la surface et le fond, sous l'hypothèse que la profondeur maximale atteinte n'est pas impactée par l'évènement extrême. Cependant, la stratégie de détecter les évènements extrêmes et appliquer leur intensité maximale à la surface ne permet pas de considérer les phénomènes d'upwelling, ni les courants chauds ou froids, dont le pic d'intensité peut être observé au fond ou dans les couches intermédiaires de la colonne d'eau.

Finalement, les cycles annuels de températures (air et eau) sont répétés sur toute la durée de la simulation si cette dernière excède un an.

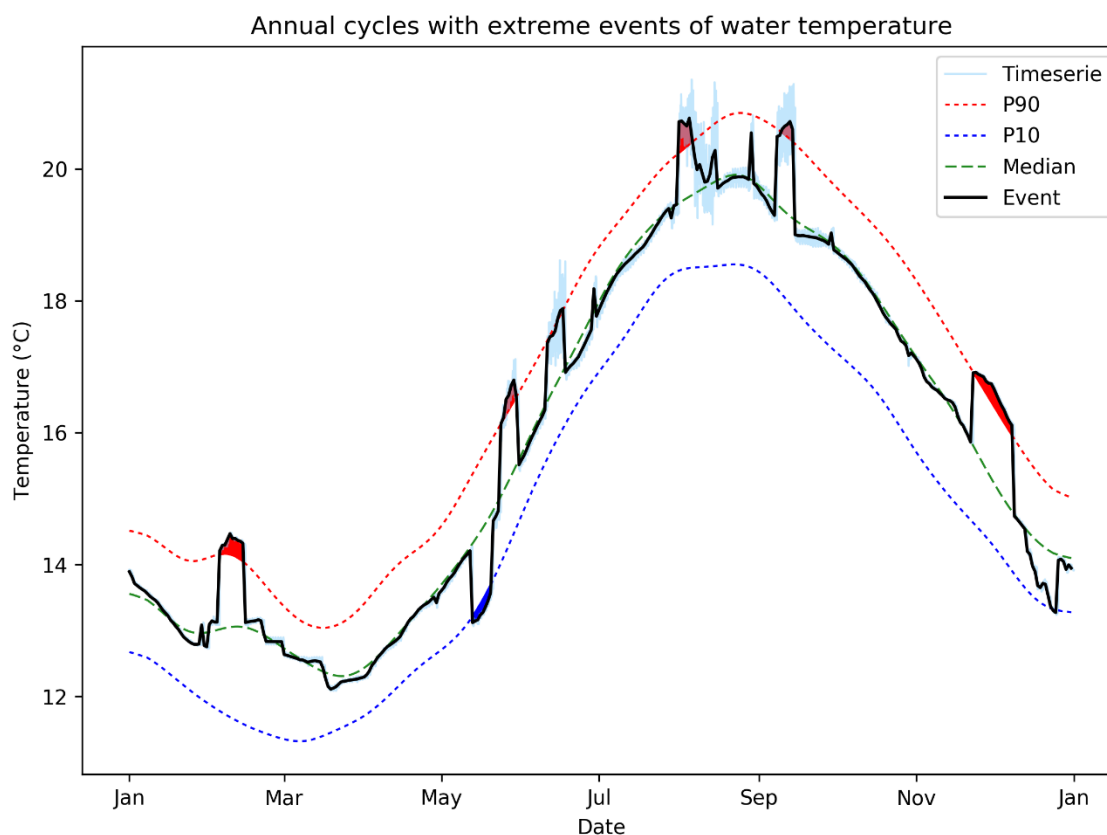


Figure 59 : Cycle annuel de la température de surface de l'eau (ligne noire) défini à partir de la médiane des températures de la période de contrôle (ligne pointillée verte) et série temporelle complète présentant une discrétisation horaire (courbe bleue claire). Les zones rouges représentent les vagues de chaleur, i.e les évènements supérieurs au percentile 90 des températures et les zones bleues les vagues de froid (ligne pointillée rouge), i.e les évènements inférieurs au percentile 10 des températures (ligne pointillée bleu)

#### 7.1.4.4 Température des rivières

Le cycle annuel d'évolution de la température de la surface des océans a été appliqué à la température des rivières afin d'avoir une température de l'eau dans le bassin cohérente avec la température de surface de l'océan ouvert.

## 7.2 Avancement et réalisations de l'année 2023

### 7.2.1 Définition des simulations

L'influence de la modification des températures de l'air et des températures de l'eau sur les potentielles évolutions des herbiers de zostères est étudiée grâce à une analyse de scénario. A cette fin, des forçages de températures de l'air (Figure 60) et de l'eau (Figure 61) correspondant aux différents scénarios sont générés en utilisant la routine détaillée en section 7.1.4.

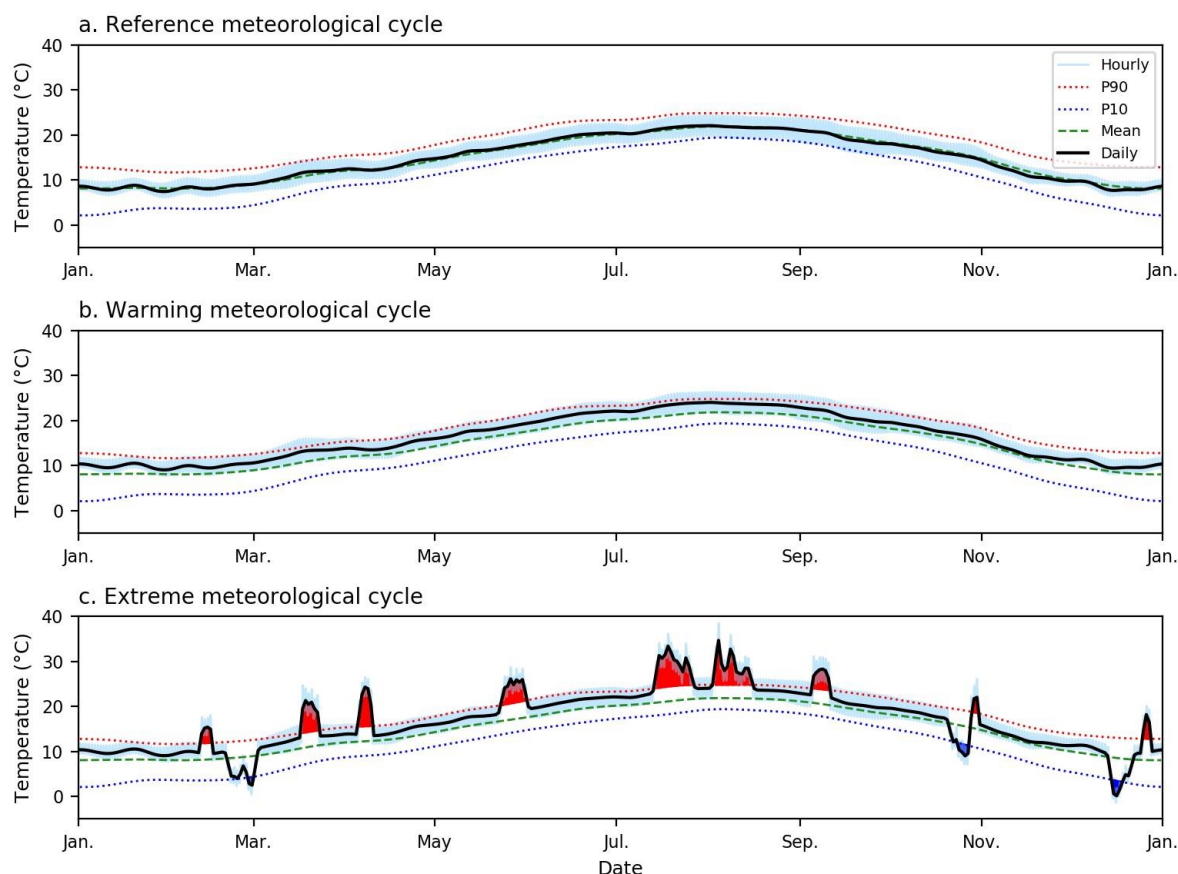


Figure 60: Cycle annuel des températures de l'air dans le scénario Référence (a.), Réchauffement (b.) et Extrême (c.). La ligne noire correspond à la moyenne journalière du cycle climatologique, la ligne bleue claire est la moyenne horaire du cycle climatologique et la ligne verte est le cycle climatologique moyen de la période de contrôle. Les canicules sont définies en lien avec le percentile 90 de la période de contrôle (ligne pointillée rouge) et représentée par les zones rouges, alors que les vagues de froid sont définies en lien avec le percentile 10 des températures sur la période de contrôle (ligne pointillée bleue) et représentée par les zones en bleues.

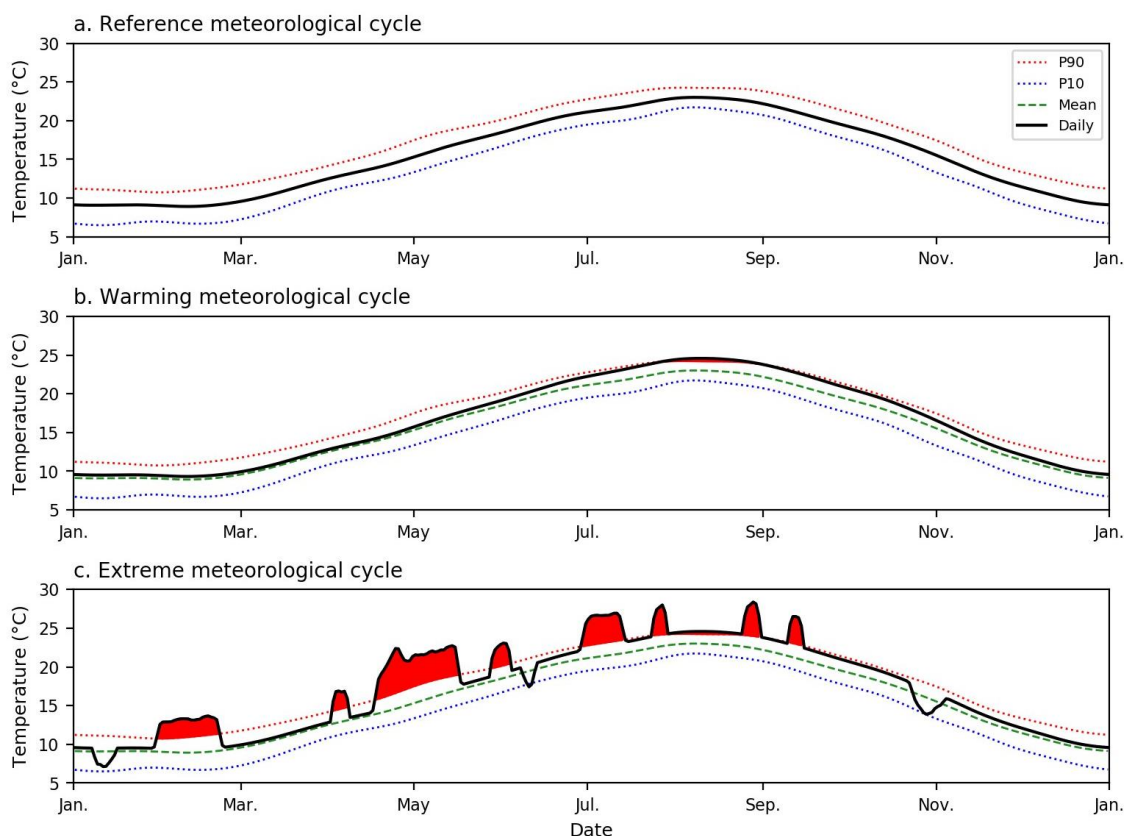


Figure 61: Cycle annuel des températures de l'eau dans le scénario Référence (a.), Réchauffement (b.) et Extrême (c.). La ligne noire correspond à la moyenne journalière du cycle climatologique, la ligne bleue claire est la moyenne horaire du cycle climatologique et la ligne verte est le cycle climatologique moyen de la période de contrôle. Les canicules sont définies en lien avec le percentile 90 de la période de contrôle (ligne pointillée rouge) et représentée par les zones rouges, alors que les vagues de froid sont définies en lien avec le percentile 10 des températures sur la période de contrôle (ligne pointillée bleue) et représentée par les zones en bleues.

Cette analyse de scénarios repose sur la définition de trois scénarios, présentés en Table 4. Le scénario *Référence* (scénario 1) est forcé en utilisant le cycle climatologique de la période de contrôle (1995-2014), alors que le scénario *Réchauffement* (scénario 2) est forcé en utilisant le cycle climatologique à l'horizon 2050. Une comparaison des scénarios *Référence* et *Réchauffement* fournit une compréhension préliminaire de l'influence de l'augmentation des températures sur l'évolution de la biomasse épigée. De plus, la prise en compte d'évènements extrêmes de températures dans le scénario *Extrême* (scénario 3) donne une aperçue de la capacité de *Z. noltei* à faire face aux vagues de chaleur et de froids.

Table 4: Définition des scénarios de températures (colonne de gauche), associée aux cycles annuels des températures de l'air et de l'eau utilisés pour forcer le modèle (2<sup>ème</sup> colonne) et prise en compte (ou non) d'évènements extrêmes (canicules (HW) et vagues de chaleur (CS); 3<sup>ème</sup> colonne).

Scénarios	Variables climatiques	Evènements extrêmes	Cycles climatologiques
1 Référence	Température de l'air (1995-2014) Température de l'eau (1995-2014)	×	Figure 5.9.a Figure 5.10.a

2 Réchauffement	Température de l'air (2050) Température de l'eau (2050)	×	Figure 5.9.b Figure 5.10.b
3 Extrême	Température de l'air(2050) Température de l'eau (2050)	Température de l'air (HW & CS) Température de l'eau (HW & CS)	Figure 5.9.c Figure 5.10.c

Chaque scénario est simulé sur une période de 2 deux ans (entre le 01/01/2017 et 01/03/2019). La première année correspond à une période de spin-up (du 01/01/2017 au 01/01/2018) et la seconde correspond à la période de simulation effective (entre le 01/01/2018 et 01/03/2019). Une attention particulière est portée à une période estivale (15/06/2018 – 15/09/2018) et une période hivernale (15/11/2018 – 15/02/2019), chacune présentant des caractéristiques de végétation et des conditions hydrodynamiques distinctes, ainsi qu'une troisième période couvrant une année complète (01/01/2018 – 01/01/2019).

Les forçages de température sont définis comme des cycles annuels de un an, répétés afin de couvrir la période de simulation. Le forçage de température de l'air est appliqué uniformément à notre zone d'étude. Le forçage de température de l'eau est appliqué aux rebords du domaine de simulation, alors que le forçage de température des rivières est appliqué aux embouchures des rivières. Dans le reste du Bassin, la température de l'eau est initialisée avec une température uniforme de 10°C, et son évolution est calculée en utilisant une équation d'advection, incluant les flux de chaleur entre l'air et l'eau.

## 7.2.2 Résultats

### 7.2.2.1 Evolutions spatiales

Les variations de biomasse épigée entre les différents scénarios sont présentées spatialement pour les différentes périodes d'intérêt en Figure 62. A la fin de l'été, le réchauffement entraîne des pertes de biomasse dans tout le Bassin, de l'ordre de 10 % (Figure 62.a). A noter que des gains de biomasse locaux peuvent être observés sur les rebords de certains estrans, signifiant que les gains de biomasse liés à la température prévalent sur les pertes de biomasse liées à la température dans les zones les plus profondes des estrans. A l'inverse, au cours de l'hiver, l'augmentation des températures entraîne des pertes de biomasse (de l'ordre de 10%) dans tout le Bassin (Figure 62.b). Lors de ce mois frais, la croissance est stimulée par l'augmentation des températures. En considérant la période annuelle (Figure 62.e), les pertes ayant lieu en été et les gains ayant lieu en hiver se compensent et la biomasse reste relativement stable au cours de cette période. De faibles pertes de biomasse peuvent toutefois être observées sur les estrans de la partie sud, ainsi que de faibles gains de biomasses sur les rebords de certains estrans.

La prise en compte d'évènements extrêmes intensifie le stress induit par la chaleur sur les herbiers durant l'été, donnant lieu à d'importantes pertes de biomasse de l'ordre de 25 % à l'échelle du Bassin (Figure 62.b). Ces résultats suggèrent que plutôt que le seul réchauffement des températures, la modification de l'intensité et de la fréquence des évènements extrêmes devrait être la première cause du déclin de *Z. noltei* (Figures 62.a. and b). L'intensification du stress de chaleur induit par l'ajout d'évènements extrêmes résulte aussi en d'importantes pertes de biomasses au cours de l'hiver (Figure 62.d). Similairement, la prise en compte d'évènements extrêmes de température au cours de la période annuelle (Figure 62.f) donne lieu à des pertes de biomasse de 15 % à l'échelle du Bassin.

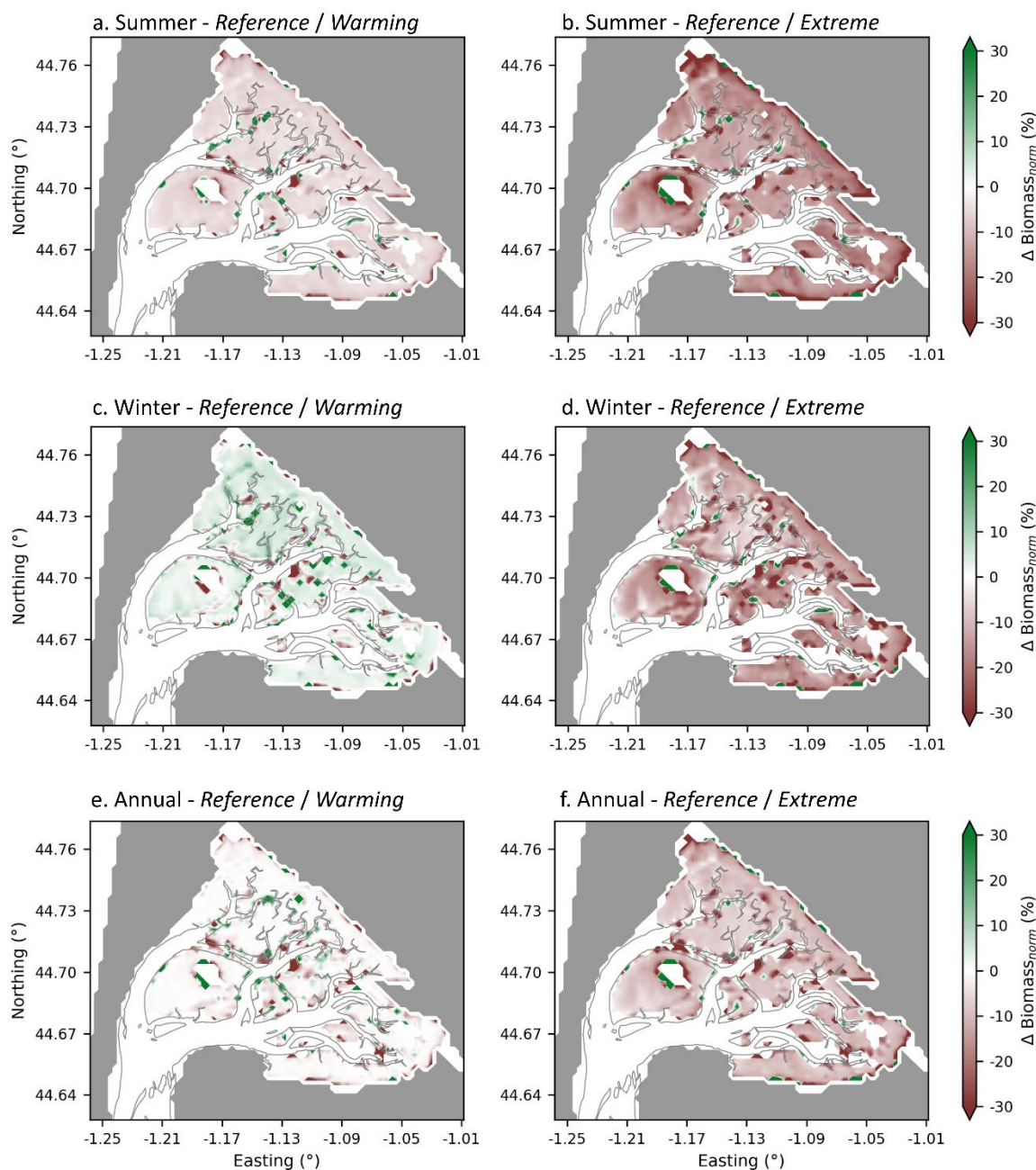


Figure 62: Représentation spatiale du taux d'évolution de biomasse entre le scénario Réchauffement et Référence, pour la période estivale, hivernale et annuelle (a,c,e, respectivement), et entre le scénario Extrême et Référence pour les différentes périodes (b,d,f, respectivement).



### 7.2.2.2 Evolutions à l'échelle du Bassin

Des indicateurs de développement des herbiers (biomasse totale épigée, surface totale colonisée par les herbiers et biomasse moyenne) sont calculés à l'échelle du Bassin à la fin de l'été et de l'hiver pour chaque scénario, et présenté en Figure 63. En été, la biomasse épigée totale (Figure 63.a) décroît de 3261 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Reference* à 3045 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Réchauffement* (une perte de 6.6 %) pour atteindre 2543 tonnes<sub>PS</sub> en considérant les événements extrêmes (une perte de 22.0 % par rapport au scénario *Reference*). Cela indique qu'à la fin de l'été, la biomasse épigée totale est négativement corrélée à la température, montrant que les événements extrêmes ont une influence néfaste sur la survie des herbiers de *Z. noltei*. A l'inverse, durant l'hiver, la biomasse épigée totale augmente avec la température, allant de 783 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Reference* à 881 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Réchauffement* (gain de 12.6 %) à 880 tons<sub>DW</sub> dans le scénario *Extrême* (gain de 12.5 %). A noter qu'une très faible variation de biomasse (-1 tonnes<sub>PS</sub>) est observée suite à l'ajout des événements extrêmes, entre le scénario *Réchauffement* et *Extrême*.

La surface totale colonisée par les herbiers ne subit pas de changement significatif entre les différents scénarios (Figure 63.b), exhibant seulement une faible réduction de la surface totale colonisée par les herbiers de 0.6 % dans le scénario *Warming*, en été comme en hiver, et de 1.2 % dans le scénario *Extrême* pour les deux périodes. Cette baisse de la surface colonisée par les herbiers est identique en été comme en hiver, suggérant que les zones dans lesquelles la végétation disparaît lors de la première moitié de l'année ne sont pas recolonisées lors de la seconde moitié, malgré l'augmentation de la biomasse épigée totale avec la température lors de l'hiver.

La biomasse spatialement et annuellement moyennée (Figure 63.c) reste constante entre les scénarios *Reference* et *Warming* (76 g<sub>PS</sub>.m<sup>-2</sup>), suite à l'exacerbation de la croissance des herbiers au printemps et une biomasse plus importante lors des mois les plus froids qui compensent les pertes de biomasses induites par des températures plus élevées en été. Cependant, les vagues de chaleur donnent lieu à des pertes de biomasse qui réduisent la biomasse moyenne de 69 g<sub>PS</sub>.m<sup>-2</sup> dans le scénario *Extrême*. Pour des caractéristiques d'herbiers estivales et hivernales, la biomasse moyenne suit la même tendance que la biomasse épigée totale (Figure 63.a).

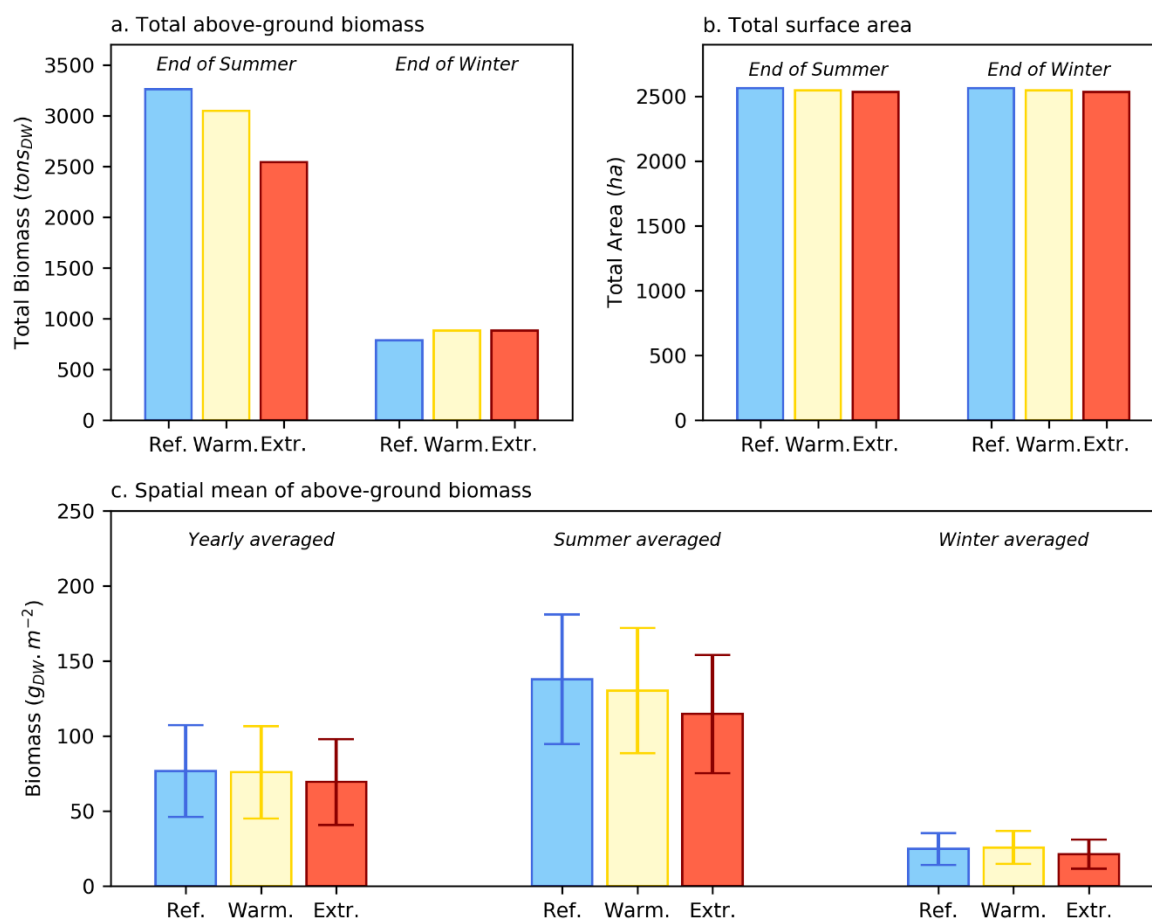


Figure 63: Indicateurs d'évolution de biomasse à l'échelle du Bassin: (a) biomasse épigée totale, (b) surface totale, et (c) biomasse épigée moyennée spatialement, données pour les scénarios Référence (barres bleues), Réchauffement (barres jaunes), et Extrême (barres rouges).

### 7.2.2.3 Prise en compte de réponses physiologiques supplémentaires

Bien que ce modèle considère l'influence de la température sur la modification de certains processus physiologiques tels que la dessiccation et la respiration, la perturbation de la reproduction et de la germination en lien avec les variations de température ne sont pas incluses dans le modèle. De plus, la mortalité des plantes liées à la présence de contaminants dans l'eau n'est pas prise en compte dans le modèle, bien que reconnue comme partiellement responsable de l'initiation de la régression des herbiers dans le Bassin d'Arcachon (Auby *et al.*, 2011). La prise en compte des contaminants est particulièrement importante dans le contexte du changement climatique, puisque des températures plus élevées peuvent exacerber la toxicité de certains contaminants (Gamain *et al.*, 2018) et entraîner un apport supplémentaire en sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), toxique pour les plantes (Rigaud *et al.*, 2018; Hasler-Sheetal et Holmer, 2022; De Fouw *et al.*, 2022). Cependant, cet aspect n'est pas considéré dans le modèle. Puisque ces processus devraient induire des pertes de biomasse supplémentaires, on peut s'attendre à des pertes d'herbiers engendrées par l'augmentation des températures plus importantes que celles simulées dans cette étude.

## 7.3 Impact de la hausse du niveau marin sur le développement des herbiers de *Z. noltei*

### 7.3.1 Modélisation numérique

La propagation de la marée est calculée en utilisant la solution de marée FES2012 (Carrere, 2013), implémentée dans le modèle hydrodynamique MARS3D. Ce modèle repose sur un système de grilles gigognes. L'élévation du niveau marin moyen est simulée en abaissant artificiellement le niveau bathymétrique des différentes grilles, au lieu d'augmenter la hauteur du niveau marin. Cette méthode reproduit de manière satisfaisante l'effet de la hausse du niveau marin moyen sur l'hydrodynamique tidale grâce à la large étendue spatiale de la plus grande grille.

L'augmentation du niveau marin moyen devrait submerger de nouvelles zones terrestres et redéfinir le littoral à l'échelle mondiale. Cela devrait donner lieu à l'apparition de nouvelles zones favorables à la colonisation des herbiers, pourvu qu'il n'y ait pas d'obstacle anthropique entravant leur progression (Valle *et al.*, 2014). Cependant, dans ce modèle, les zones terrestres sont masquées, et par conséquent, l'évolution du littoral, ainsi que la modification de la réflexion de la marée sur les côtes, ne sont pas prises en compte.

### 7.3.2 Scénarios simulés

En Europe de l'Ouest, le niveau marin moyen devrait augmenter de 0.2 m entre la période 1995-2014 et 2050, en considérant un scénario d'évolution modéré (SSP2-4.5), et pourrait atteindre 1.0 m à l'horizon 2100 dans le cas du scénario le plus préjudiciable (SSP-8.5; Arias *et al.*, 2021). Dans cette étude, deux scénarios de hausse du niveau marin sont simulés: un scénario moyen-terme de 0.2 m (Scénario *Modéré*) et un scénario long-terme de hausse du niveau marin moyen extrême de 1.0 m (Scénario *Extrême*). Pour comparaison, un troisième scénario considérant le niveau marin moyen actuel est défini (scénario *Référence*).

L'impact de ces deux scénarios sur les herbiers est évalué en termes de biomasse épigée. Cette étude est conduite sur une période de 2 ans, à savoir entre 01/01/2017 et 15/02/2019. La première année (entre 01/01/2017 et 01/01/2018) correspond à la période de spin-up requise afin que le modèle hydrodynamique et de transport sédimentaire atteignent un équilibre statistique. La simulation effective est menée entre le 01/01/2018 et 15/02/2019 et inclut 3 périodes d'intérêts sur lesquelles cette analyse se focalise : une période estivale (20/06/2018 – 20/09/2018), une période hivernale (15/11/2018 – 15/02/2019) et une année complète (01/01/2018 – 01/01/2019).

### 7.3.3 Résultats

#### 7.3.3.1 Evolutions spatiales

L'impact de l'élévation du niveau marin moyen sur *Z. noltei* est illustré en figure 64, comme le taux d'évolution de biomasse entre les différents scénarios de hausse du niveau marin. En été, une élévation du niveau marin moyen de 0.2 m (Scénario *Modéré*; Figure 64.a) entraîne une très légère perte de biomasse sur la majorité des estrans, excepté sur les rebords du Bassin, où les estrans sont les plus élevés et des gains de biomasse se produisent. En hiver, une hausse du niveau marin modérée donne lieu à une augmentation de la biomasse sur les estrans du nord et des rebords de

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 - 31.05.2024

Bassin, mais des pertes de biomasse sur les estrans situés dans la moitié sud du Bassin (Figure 64.c). Au cours de la période annuelle (Figure 64.e), des pertes de biomasse sont observées sur les estrans du sud et sud-est du Bassin, atteignant 20 %. Cependant, pas de changements significatifs ne se produisent dans l'ouest et le nord du Bassin.

En considérant une hausse extrême du niveau marin moyen de 1 mètre (*Extreme scenario*), les pertes de biomasse observées dans le scénario *Modéré* sont exacerbées. En été, de faibles pertes de biomasse d'environ 10 % sont observées à l'échelle du Bassin, avec d'importantes pertes de biomasse d'environ 75 % sur les estrans situés le long des chenaux (Figure 64.b). Malgré ces pertes, la biomasse des zostères augmentent sur les estrans situés le long des côtes. Au cours de l'hiver (Figure 64.d) et la période annuelle (Figure 64.f), les variations de biomasse font état de modifications très similaires, avec une diminution de la biomasse à l'échelle du Bassin, en moyenne de 30 % et 20 % respectivement, et atteignant 75 % le long des chenaux. Toutefois, un développement de biomasse continue d'être observé sur les estrans situés le long des côtes et de l'île aux Oiseaux.

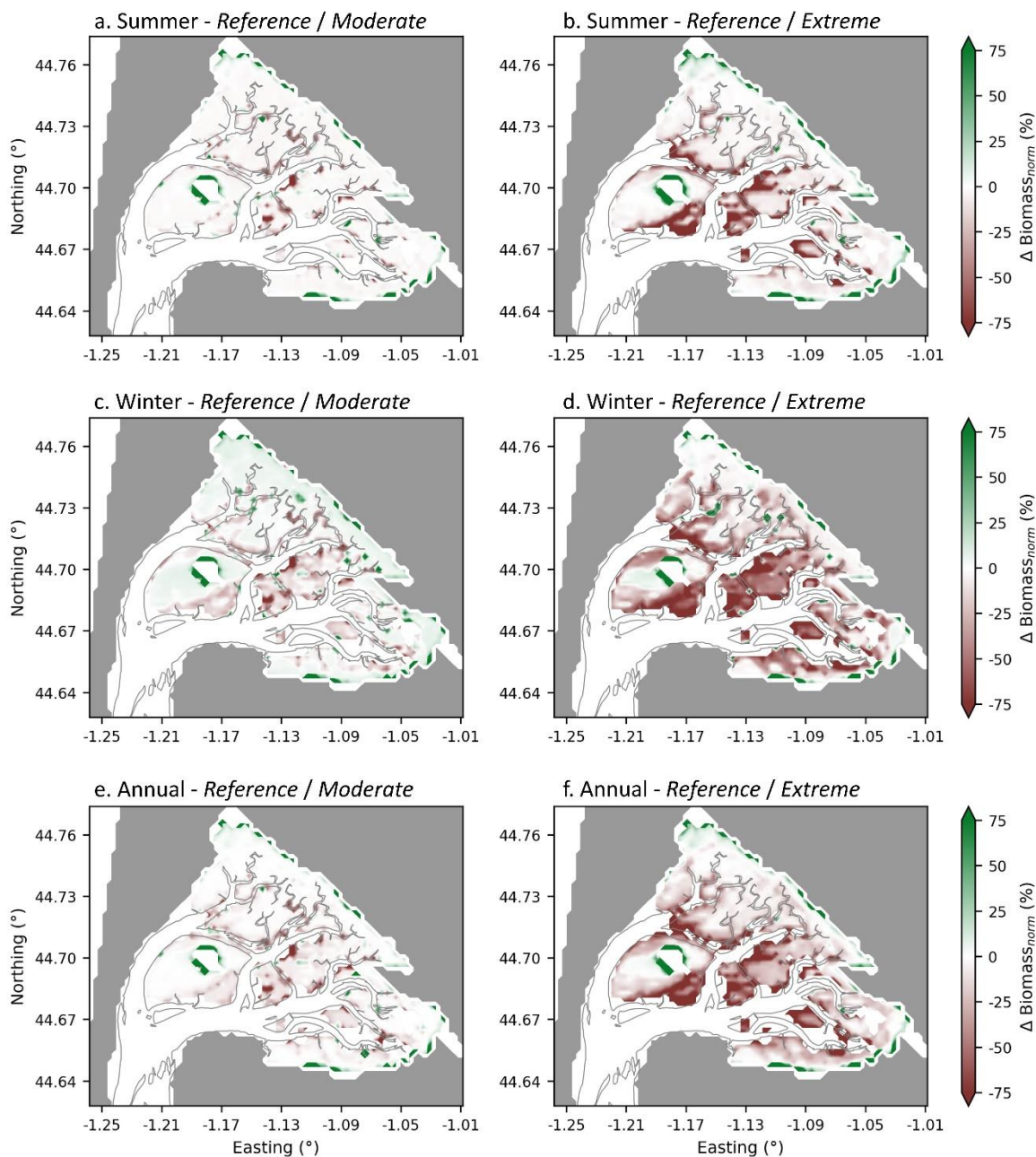


Figure 64: Représentation spatiale du taux d'évolution de biomasse entre le scénario Modéré et Référence, pour la période estivale, hivernale et annuelle (a,c,e, respectivement), et entre le scénario Extrême et Référence pour les différentes périodes (b,d,f, respectivement).

### 7.3.3.2 Evolutions à l'échelle du Bassin

En lien avec les variations spatiales de biomasse observées en Figure 64, La Figure 65 fournit une comparaison de la biomasse épigée totale et de la surface totale colonisée par les herbiers à la fin de chaque période de simulation pour les différents scénarios. En été, les pertes de biomasses induites par une hausse du niveau marin de 0.2 m (scénario *Modéré*; Figure 65.a) entraînent une légère baisse de la biomasse épigée totale, allant de 3265 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Référence* à 3204 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Modéré* (Figure 65.a), ce qui représente une perte de biomasse de 1.8 %. Similairement, une augmentation modérée du niveau marin moyen réduit la surface totale colonisée par les herbiers de 2563 ha dans le scénario *Référence* à 2524 ha dans le scénario *Modéré*, correspondant à une perte de 39 ha (1.5 %). En hiver, les pertes de biomasses observées dans le Bassin (Figure 65.b) réduisent aussi la biomasse épigée totale de 769 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Référence* à 726 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Modéré* (Figure 65.a), ce qui représente une perte de 5.6 %. Similairement, la surface totale colonisée décroît de 2563 ha à 2523 ha (une perte de 1.6 %; Figure 65.b).

Dans le cas d'une forte hausse du niveau marin moyen de 1 mètre (scénario *Extrême*), les pertes substantielles de biomasse à l'échelle du Bassin entraînent une diminution de la biomasse épigée totale et de la surface totale colonisée en été comme en hiver (Figures 65.a et b).

A la fin de l'été, la biomasse épigée totale diminue de 3266 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Référence* à 2987 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Extrême* (Figure 65.a), représentant une réduction de 8.5 %. La surface totale colonisée par les herbiers est réduite de 2563 ha dans le scénario *Référence* à 2356 ha dans le scénario *Extrême* (Figure 65.b), correspondant à une perte de 8.1 %. A la fin de l'hiver, la biomasse totale épigée est réduite de 769 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Référence* à 562 tonnes<sub>PS</sub> dans le scénario *Extrême* (une perte de 26.9 % ; Figure 65.a). Finalement, la surface totale colonisée par les herbiers va de 2564 à 2351 ha (Figure 65.b), ce qui représente une réduction de 8.3 %.

Avec la hausse du niveau marin moyen, la biomasse moyennée spatialement et temporellement (Figure 65.c) diminue, et est réduite de 77 g<sub>PS</sub>.m<sup>-2</sup> dans le scénario *Référence* à 74 g<sub>PS</sub>.m<sup>-2</sup> dans le scénario *Modéré*, pour atteindre 66 g<sub>PS</sub>.m<sup>-2</sup> dans le scénario *Extrême*.

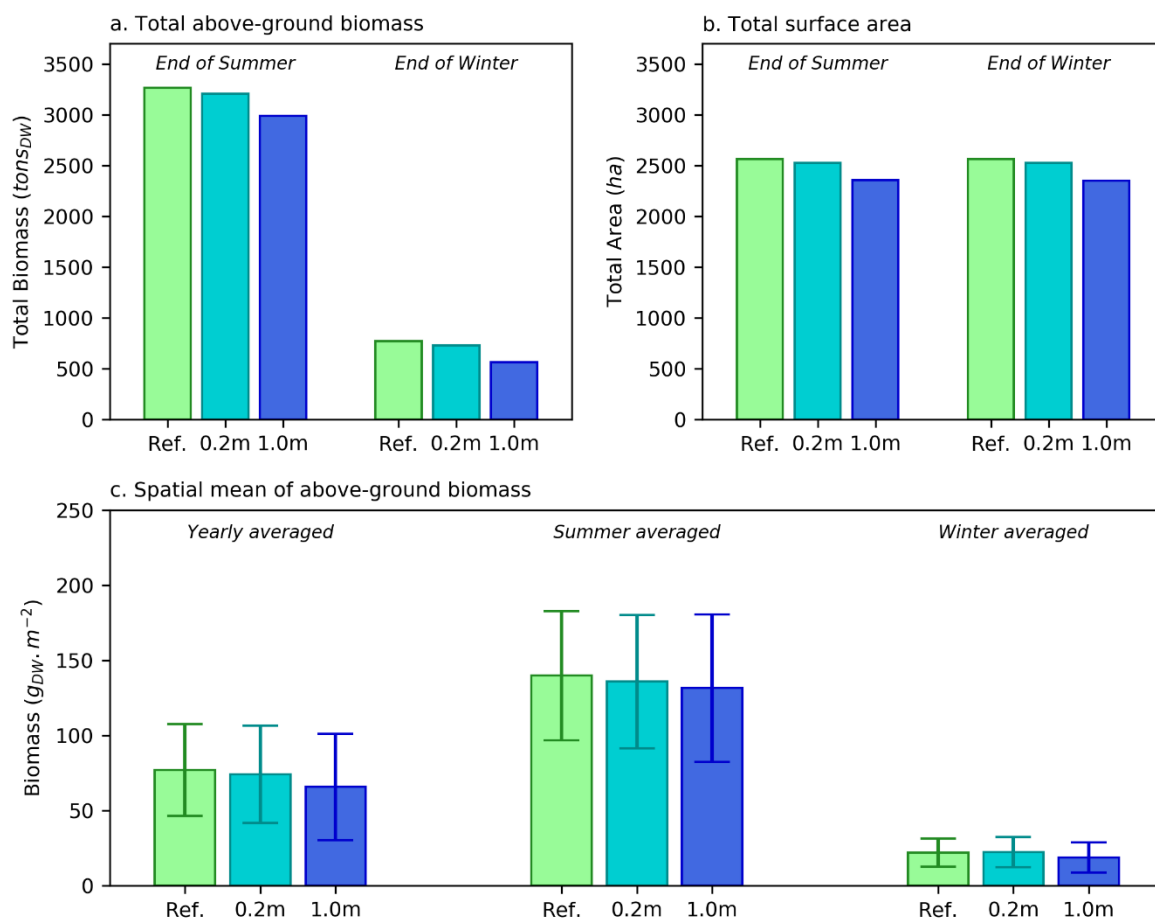


Figure 65: Indicateurs d'évolution de biomasse à l'échelle du Bassin: (a) biomasse épigée totale, (b) surface totale, et (c) biomasse épigée moyennée spatialement, données pour les scénarios Référence (barres vertes), Modéré (barres cyan), et Extrême (barres bleues).

### 7.3.3.3 Discussion and Conclusion

Alors que le niveau marin moyen augmente, la profondeur augmente et la lumière disponible au fond de la colonne d'eau est réduite. Par conséquent, la hausse du niveau marin moyen induit des pertes de biomasse liées à la lumière, comme mis en évidence dans de précédentes études (Carr *et al.*, 2016; Potouroglou *et al.*, 2017). Cependant, les espèces intertidales, telles que *Z. noltei*, peuvent bénéficier d'être émergentes lors de la marée basse, en recevant suffisamment de lumière de sorte à ce que leur croissance ne soit pas limitée par la réduction de la lumière disponible. En considérant une élévation du niveau marin moyen de 0.2 m, la période estivale, caractérisée par de longues durées d'ensoleillement, est seulement caractérisée par de faibles pertes de biomasse induites par la lumière (Figure 64.a). Cependant, en hiver, lorsque la durée d'ensoleillement est plus courte, la quantité de lumière reçue lors des marées basses est moins importante et des pertes de biomasse plus importantes se produisent à cette saison (Figure 64.b).

Avec la hausse du niveau marin et l'augmentation de la profondeur, les vitesses orbitales proches du fond peuvent être atténuées et les contraintes hydrodynamiques exercées sur les herbiers réduites (Carr *et al.*, 2016). L'hydrodynamique étant le principal facteur limitant de la croissance de *Z. noltei* dans le Bassin d'Arcachon (Cognat *et al.*, 2018), la hausse du niveau marin semble

limiter les pertes induites par l'hydrodynamique en hiver, lorsque les conditions hydrodynamiques sont les plus intenses. Cela donne lieu à une biomasse plus importante suite à la hausse modérée du niveau marin (0.2 mètre ; Figure 65.c), principalement visible dans le nord et l'est du Bassin.

Avec la hausse du niveau marin, les pertes de biomasse liées à la lumière sont exacerbées. Cela est mis en évidence par l'élargissement des zones présentant de la régression, qui affectent la totalité du Bassin dans le cas d'une hausse de 1 m (scénario *Extrême*: Figure 64.bdf). Ce processus devenant même prédominant sur les gains de biomasse liés à l'hydrodynamique en hiver (Figure 64.b). Les pertes de biomasse les plus importantes se produisent le long des chenaux, où les estrans sont les plus profonds, et la lumière disponible au fond de la colonne d'eau est davantage réduite.

De plus, une précédente étude (Mariotti, 2018) a montré que dans une lagune côtière chenalisée, la hausse du niveau marin peut intensifier la vitesse pic des courants dans les chenaux. De ce fait, en plus de la réduction des conditions de lumière sur les parties les plus profondes des estrans, on peut s'attendre à une intensification des vitesses de courants, engendrant des pertes de biomasse supplémentaires dans ces zones.

Bien qu'une hausse extrême du niveau marin entraîne d'importantes pertes de biomasse à l'échelle du Bassin, cela favorise aussi le développement de la biomasse sur les parties les moins profondes des estrans, puisque les pertes liées à la dessiccation sont limitées par des temps d'immersion plus longs. Ces résultats suggèrent que la hausse du niveau marin moyen pourrait permettre à *Z. noltei* de coloniser de nouvelles zones suite à l'inondation des régions côtières les moins profondes (Valle *et al.*, 2014). Cependant, les côtes du Bassin d'Arcachon sont fortement urbanisées, entravant ainsi la progression des herbiers vers ces zones, rendant cette hypothèse peu probable.

En réalité, *Z. noltei* présente des mécanismes d'adaptation aux conditions environnementales. Alors que certains mécanismes d'adaptation sont pris en compte dans le modèle de croissance, tel que l'adaptation de la teneur en chlorophylle aux conditions lumineuses, de nombreux autres mécanismes d'adaptation ne sont pas considérés. Un exemple est l'adaptation de la longueur de feuille aux conditions lumineuses et l'énergie hydrodynamique, permettant à *Z. noltei* de développer des feuilles plus longues et plus larges lorsque les conditions hydrodynamiques sont plus calmes (Peralta *et al.*, 2006; Cognat *et al.*, 2018), augmentant de ce fait leur capacité à capter la lumière. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que les pertes de biomasse effectives soient plus basses que celles simulées dans cette étude.

Cette étude a révélé que la réponse des herbiers à la hausse du niveau marin dépend de la modification des conditions hydrodynamiques et de la lumière disponible, régulée par la dynamique sédimentaire. De ce fait, de futurs travaux devraient s'intéresser à mener une étude complète de l'influence de la hausse du niveau marin sur la dynamique hydro-sédimentaire afin de mieux comprendre les relations entre l'évolution des herbiers et la modification des conditions environnementales.



## 8 Références bibliographiques

- Anderson M.E. and Smith J.M.** (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering* 83 (2014) 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.004>
- Adams M.P., Collier C.J., Uthicke S., Ow Y., Langlois L., O'Brien K.R.** (2017). Model fit versus biological relevance: evaluating photosynthesis-temperature models for three tropical seagrass species. *Nature Scientific Report*, 7:39930. <https://doi.org/10.1038/srep39930>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R.G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M.D., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P.W., Trewin, B., Achuta Rao, K., Adhikary, B., Allan, R.P., Armour, K., Bala, G., Barimalala, R., Berger, S., Canadell, J.G., Cassou, C., Cherchi, A., Collins, W., Collins, W.D., Connors, S.L., Corti, S., Cruz, F., Dentener, F.J., Dereczynski, C., Di Luca, A., Diongue Niang, A., Doblus-Reyes, F.J., Dosio, A., Douville, H., Engelbrecht, F., Eyring, V., Fischer, E., Forster, P., Fox-Kemper, B., Fuglestedt, J.S., Fyfe, J.C., Gillett, N.P., Goldfarb, L., Gorodetskaya, I., Gutierrez, J.M., Hamdi, R., Hawkins, E., Hewitt, H.T., Hope, P., Islam, A.S., Jones, C., Kaufman, D.S., Kopp, R.E., Kosaka Y., Kossin, J., Krakovska, S., Lee, J.-Y., Li, J., Mauritsen, T., Maycock, T.K., Meinshausen, M., Min, S.-K., Monteiro, P.M.S., Ngo-Duc, T., Otto, F., Pinto, I., Pirani, A., Raghavan, K., Ranasinghe, R., Ruane, A.C., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Samset, B.H., Sathyendranath, S., Seneviratne, S.I., Sörensson, A.A., Szopa, S., Takayabu, I., Tréguier, A.-M., van den Hurk, B., Vautard, R., von Schuckmann, K., Zaehle, S., Zhang, X., Zickfeld, K.** (2021). Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, pp. 33–144.
- Auby, I., Bost, C.-A., Budzinski, H., Dalloyau, S., Desternes, A., Belles, A., Trut, G., Plus, M., Pere, C., Couzi, L., Feigne, C., Steinmetz, J.** (2011). Régression des herbiers des zostères dans le Bassin d’Arcachon : état des lieux et recherche de causes. *RST/ODE/LER/AR/11.007*.
- Auby, I., Labourg, J.-P.** (1996). Seasonal dynamics of *Zostera noltii* Hornem. in the bay of Arcachon (France). *Journal of Sea Research*, 34(4), 269-277.
- Battjes J.A, Janssen J. P. F. M.** (1978). Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves. *Coastal Engineering*, 1978:569-587 <https://doi.org/10.1061/9780872621909.034>
- Bertin X., Olabarrieta M.** (2016). Relevance of infragravity waves in a wave-dominated inlet. *Journal of Geophysical Research*, 35(4):269-277. <https://doi.org/10.1002/2015JC011444>
- Best Ü.S.N., Van der Wegen M., Dijkstra J., Willemsen P.W.J.M., Borsje B.W., Roelvink D.J.A.** (2018). Do salt marshes survive sea level rise ? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics. *Environmental Modelling and Software*, 109:152-166. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.004>
- Bouma, T. J., Friedrichs, M., Van Wesenbeeck, B. K., Temmerman, S., Graf, G., Herman, P. M. J.** (2009). Density-dependent linkage of scale-dependent feedbacks : A flume study on the  
Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d’Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -  
31.05.2024

intertidal macrophyte *Spartina anglica*. *Oikos*, 118(2), 260-268.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2008.16892.x>

**Bradley K., Houser C.** (2009). Relative velocity of seagrass blades: Implications for wave attenuation in low-energy environments. *Journal of Geophysical Research*, 114:F01004.  
<https://doi.org/10.1029/2007JF000951>

**Brun F.G., Vergara J.J., Hernandez I., Pérez-Llorens J.L.** (2005). Evidence for vertical growth in *Zostera noltii* Hornem. *Botanica Maritima*, 48:446-450. <https://doi.org/10.1515/BOT.2005.059>

**Cabaço S., Ferreira O., Santos R.** (2010). Population dynamics of the seagrass *Cymodocea nodosa* in Ria Formosa lagoon following inlet artificial relocation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87:510-516. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.02.002>

**Carr J.A., D’Odorico P., McGlathery K.J., Wiberg P.L.** (2016). Spatially explicit feedbacks between seagrass meadow structure, sediment and light: Habitat suitability for seagrass growth. *Advances in Water Resources*, 93:315-325.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.001>

**Carrère L., Lyard F., Cancet M., Guillot A., Roblou L.** (2013). FES2012: A new global tidal model taking advantage of nearly twenty years of altimetry. *20 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium (Venice Italy), 24-29 September 2013*.

**Cayocca F.** (1996). Modélisation morphodynamique d’une embouchure tidale : application aux Passes d’entrée du Bassin d’Arcachon. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1*, 426 pp.

**Cayocca F.** (2001). Long-term morphological modeling of a tidal inlet : the Arcachon Basin, France. *Coastal Engineering*, 42(2):115-142.

**Chust, G., Á. Borja, A. Caballero, X. Irigoien, J. Sáenz, R. Moncho, M. Marcos, P. Liria, J. Hidalgo, M. Valle, V. Valencia** (2011). Climate Change Impacts on Coastal and Pelagic Environments in the Southeastern Bay of Biscay . *Climate Research* 48(2):307-32. doi: [10.3354/cr00914](https://doi.org/10.3354/cr00914).

**Coffaro, G., G. Bendoricchio** (1997). Modelling Biomass and Nutrient Dynamics in Eelgrass (*Zostera Marina* L.): Applications to the Lagoon of Venice (Italy) and Oresund (Denmark). *Ecological Modelling*.

**Cognat M., Ganthy F., Auby I., Barraquand F., Rigouin L., Sottolichio A.** (2018). Environmental factors controlling biomass development of seagrass meadows of *Zostera noltei* after a drastic decline (Arcachon Bay, France). *Journal of Sea Research*, 140:87-104.  
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.07.005>

**Cognat M.** (2019). Rôles des facteurs environnementaux et des interactions biomorphodynamiques sur l’évolution spatio-temporelle des herbiers de zostères dans une lagune mésotidale. *Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux*, 305 pp.

**Contti Neto, N., Pomeroy, A., Lowe, R., Ghisalberti, M.** (2022). Seagrass meadows reduce wind-wave driven sediment resuspension in a sheltered environment. *Frontiers in Marine Science*, 8, 733542. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.733542>

**Dean R., Dalrymple R.** (1991). Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.*

- Dennison W.C.** (1987). Effects of light on seagrass photosynthesis, growth and depth distribution. *Aquatic Botany*, 27:15-26.
- Donatelli, C., Ganju, N. K., Zhang, X., Fagherazzi, S., Leonardi, N.** (2018). Salt marsh loss affects tides and the sediment budget in shallow bays. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10), 2647-2662. <https://doi.org/10.1029/2018JF004617>
- Du, Jiabi, et Jian Shen.** (2016). Water Residence Time in Chesapeake Bay for 1980–2012. *Journal of Marine Systems* 164:101-11. doi: [10.1016/j.jmarsys.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.011).
- Duarte C.M.** (1991). Seagrass depth limits. *Aquatic Botany*, 40:363-377.
- Duarte, B., Martins, I., Rosa, R., Matos, A. R., Roleda, M. Y., Reusch, T. B. H., Engelen, A. H., Serrão, E. A., Pearson, G. A., Marques, J. C., Caçador, I., Duarte, C. M., Jueterbock, A.** (2018). Climate Change Impacts on Seagrass Meadows and Macroalgal Forests : An Integrative Perspective on Acclimation and Adaptation Potential. *Frontiers in Marine Science*, 5, 190.
- Fagherazzi, S., Kirwan, M. L., Mudd, S. M., Guntenspergen, G. R., Temmerman, S., D’Alpaos, A., van de Koppel, J., Rybczyk, J. M., Reyes, E., Craft, C., Clough, J.** (2012). Numerical models of salt marsh evolution : Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, 50(1), RG1002
- Fischer, E. M., et C. Schär** (2010). Consistent Geographical Patterns of Changes in High-Impact European Heatwaves. *Nature Geoscience* 3(6):398-403. doi: [10.1038/ngeo866](https://doi.org/10.1038/ngeo866).
- Fonseca M.S., Fisher J.S.** (1986). A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration. *Marine Ecology Progress Series*, 29:15-22.
- Fourqurean J.W., Duarte C.M., Kennedy H., Marba N., Holmer M., Mateo M.A., Apostolaki E.T., Kendrick G.A., Krause-Jensen D., McGlathery K.J., Serrano O.** (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5:5050-509. <https://doi.org/10.1038/NGEO1477>
- de Fouw, J., Reilmeyer, K., van der Geest, M., Smolders, A., van der Heide, T.** (2022). Increased temperature reduces the positive effect of sulfide-detoxification mutualism on *Zostera noltii* nutrient uptake and growth. *Marine Ecology Progress Series*, 692, 43-52.
- Friedrichs, C. T., Aubrey, D. G.** (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries : A synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5), 521-545. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(88\)90082-0](https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90082-0)
- Gacia, E., Granata, T. C., Duarte, C. M.** (1999). An approach to measurement of particle flux and sediment retention within seagrass (*Posidonia oceanica*) meadows. *Aquatic Botany*, 65(1-4), 255-268. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00044-3)
- Gamain P., Feurtet-Mazel A., Maury-Brachet R., Auby I., Pierron F., Belles A., Budzinski H., Daffe G., Gonzalez P.** (2018). Can pesticides, copper and seasonal water temperature explain the seagrass *Zostera noltei* decline in the Arcachon Bay? *Marine Pollution Bulletin*, 134:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.024>
- Ganthy F.** (2011). Rôle des herbiers de zostères (*Zostera noltii*) sur la dynamique sédimentaire du Bassin d’Arcachon. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1*, 284 pp.  
 Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d’Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 - 31.05.2024

- Ganthy F., Sottolichio A., Verney R.** (2011). The stability of vegetated tidal flats in a coastal lagoon through quasi in-situ measurements of sediment erodibility. *Journal of Coastal Research*, *SI64* :1500-1504.
- Ganthy F., Sottolichio A., Verney R.** (2013a). Seasonal modification of tidal flat sediment dynamics by seagrass meadows of *Zostera noltii* (Bassin d’Arcachon, France). *Journal of Marine Systems*, *109-110*:S233-S240. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.11.027>
- Ganthy F., Verney R., Sottolichio A.** (2013b). A numerical investigation on the effect of small and flexible seagrass *Zostera noltii* on water flow. *Proceedings of the 7th International Conference on Coastal Dynamics, 24-28 June 2013, Arcachon, France*.
- Ganthy F., Soissons L., Sauriau P.G., Verney R., Sottolichio A.** (2015). Effect of short flexible seagrass *Zostera noltei* on flow, erosion and deposition processes determined using flume experiments. *Sedimentology*, *62*:997-1023. <https://doi.org/10.1111/sed.12170>
- Gouriou, L., Trut, G., Auby, I., Rigouin, L., Meteigner, C., Oger-Jeanneret, H.** (2018). Valorisation des données de la surveillance chimique DCE dans les masses d’eau du bassin Adour-Garonne (2008- 2015). *ODE/LITTORAL/LER/AR/18.03*.
- Gutiérrez, J.M., Jones, R.G., Narisma, G.T., Alves, L.M., Amjad, M., Gorodetskaya, I.V., Grose, M., Klutse, N.A.B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L.O., Mernild, S.H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B., Yoon, J.-H.** (2021). Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.)]. *Cambridge University Press. In Press*. Interactive Atlas available from Available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Hansen, J. C. R., Reidenbach, M. A.** (2013). Seasonal growth and senescence of a *Zostera marina* seagrass meadow alters wave-dominated flow and sediment suspension within a coastal Bay. *Estuaries and Coasts*, *36*(6), 1099-1114. <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9620-5>
- Hasler-Sheetal, H., Holmer, M.** (2015). Sulfide Intrusion and Detoxification in the Seagrass *Zostera marina*. *PLOS ONE*, *10*(6), e0129136.
- van der Heide T., van Nes E.H., van Katwijk M.M., Olf H., Smolders A.J.P.** (2011). Positive feedbacks in seagrass ecosystems – Evidence from large-scale empirical data. *PLoS ONE*, *6*(1):e16504. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016504>
- Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., Benthuyzen, J. A., Burrows, M. T., Donat, M. G., Feng, M., Holbrook, N. J., Moore, P. J., Scannell, H. A., Sen Gupta, A., Wernberg, T.** (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, *141*, 227-238.
- Huret M., Sourisseau M., Petitgas P., Struski C., Léger F., Lazure P.** (2013). A multi-decadal hindcast of a physical-biogeochemical model and derived oceanographic indices in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, *109-110*:S77-S94. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.02.009>

- Idier, Déborah, François Paris, Gonéri Le Cozannet, Faiza Boulahya, Franck Dumas** (2017). Sea-Level Rise Impacts on the Tides of the European Shelf. *Continental Shelf Research* 137:56-71. doi: [10.1016/j.csr.2017.01.007](https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.007).
- Ifremer** (1997). Etude intégrée du Bassin d'Arcachon – Synthèse 1997. 129 pp.
- Ifremer** (2018). Qualité du milieu marin Littoral. Bulletin de la surveillance 2017. Départements : Girond, Landes, Pyrénées Atlantiques. *Rapport Ifremer, ODE/LITTORAL/LER-AR/AN/18-011*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00451/56293/>
- Infantes E., Terrados J., Orfila A., Cañella B., Alvarez-Ellacuria A.** (2009). Wave energy and the upper depth limit distribution of *Posidonia oceanica*. *Botanica Maritima*, 52(5):419-427. <https://doi.org/10.1515/BOT.2009.050>
- Jin, Kang-Ren, et Zhen-Gang Ji** (2013). A Long Term Calibration and Verification of a Submerged Aquatic Vegetation Model for Lake Okeechobee. *Ecological Processes* 2(1):23. doi: [10.1186/2192-1709-2-23](https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-23).
- Jones N.L. Monismith S.G.** (2007). Measuring short-period wind waves in a tidally forced environment with a subsurface pressure gauge. *Limnology and Oceanography: Methods* 5, 2007, 317–327.
- van Keulen M., Borowitzka M.A.** (2003). Seasonal variability in sediment distribution along an exposure gradient in a seagrass meadow in Shoalwater Bay, Western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57:587-592. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00394-3](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00394-3)
- Koch, E. W.** (2001). Beyond light : Physical, geological, and geochemical parameters as possible submersed aquatic vegetation habitat requirements. *Estuaries*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.2307/1352808>
- Kombiadou K., Ganthly F., Verney R., Plus M., Sottolichio A.** (2014). Modelling the effects of *Zostera noltei* meadows on sediment dynamics: application to the Arcachon lagoon. *Ocean Dynamics*, 64:1499-1516. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0754-1>
- Kuusemäe, K., Rasmussen, E. K., Canal-Vergés, P., Flindt, M. R.** (2016). Modelling stressors on the eelgrass recovery process in two Danish estuaries. *Ecological Modelling*, 333, 11-42. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.008>
- Larkum A.W.D., Orth R.J., Duarte C.M.** (2007). Seagrasses: biology, ecology and conservation. *Springer Verlag, Berlin*, 691 pp.
- Lazure P., Dumas F.** (2008). An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for application at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, 31(2):233-250. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>
- Le Hir P., Cayocca F., Waeles B.** (2011). Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research*, 31(10):S135-149. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.009>
- Le Treut H.** (2013). Les impacts du changement climatique en Aquitaine. *Presses Univesitaires de Bordeaux, Pessac, 2013 LGPA-éditions, Pessac, 2013. ISBN : 978-2-86781-874-5*

- Lissardy M., Rigouin L., Ganthy F.** (2023). IDHEBARC 2022 : Bilan d'activité. Secteur de La Teste de Buch. ODE/LITTORAL/LER-AR/23.007. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00840/95161/>
- Maisondieu C., Accensi M., Le Roux J.F., Boudière E.** (2017). Manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE. Mise à jour 2017 du jeu de données de hincast. REM/RDT/LCSM/17-281. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00415/52606/>
- Mariotti, G.** (2018). Marsh channel morphological response to sea level rise and sediment supply. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 209, 89-101
- Maurer, D., D'Amico, F., Meteigner, C., Rumebe, M., Rigouin, L., Tournaire, M.-P., Trut, G., Ganthy, F., Gouriou, L., Auby, I., Oger-Jeaneret, H., Savoye, N., Lienart, C., Jude, F., Del Amo, Y., Beaugard, L.** (2017). Contribution à l'étude de l'origine de la chlorophylle dans le bassin d'Arcachon. RST/ODE/LITTORAL/LER/AR/17.007.
- McDevitt-Irwin J.M., Lacarella J.C., Baum J.K.** (2016). Reassessing the nursery role of seagrass habitats from temperate to tropical regions : a meta-analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 557:133-143. <https://doi.org/10.3354/meps11848>
- Méndez, F. Losada I.** (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*, 51(2):103–118. <https://doi.org/10.1016/j.coasaleng.2003.11.003>
- Mengual B., Le Hir P., Cayocca F., Garlan T.** (2017). Modelling fine sediment dynamics: Towards a common erosion law for fine sand, mud and mixtures. *Water*, 9:564. <https://doi.org/10.3390/w9080564>
- Mehta A.J., Partheniades E.** (1979). Kaolinite resuspension properties. *Technical Note, Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 104(HY4):409-416.
- Möller, Iris** (2019). Applying Uncertain Science to Nature-Based Coastal Protection: Lessons From Shallow Wetland-Dominated Shores. *Frontiers in Environmental Science* 7:49. doi: [10.3389/fenvs.2019.00049](https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00049).
- O'Brien K.R., Waycott M., Maxwell P., Kendrick G.A., Udy J.W., Ferguson A.J.P., Kilminster K., Scanes P., McKenzie L.J., McMahon K., Adams M.P., Samper-Villarreal J., Collier C., Lyons M., Mumby P.J., Radke L., Christiansen M.J.A., Dennison W.C.** (2018). Seagrass ecosystem trajectory depends on the relative timescale of resistance, recovery and disturbance. *Marine Pollution Bulletin*, 134:166-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.006>
- Olesen, B., Enríquez, S., Duarte, C., Sand-Jensen, K.** (2002). Depth-acclimation of photosynthesis, morphology and demography of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* in the Spanish Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 236, 89-97.
- Orth R.J., Carruthers T.J.B., Dennison W.C., Duarte C.M., Fourqurean J.W., Heck K.L.J., Hughes A.R., Kendrick G.A., Kenworthy W.J., Olyarni S., Short F.T., Waycott M., Willims S.L.** (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *BioScience*, 56:987-996.
- Paul M., Amos C.L.** (2011). Spatial and seasonal variation in wave attenuation over *Zostera noltii*. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 116(C8). <https://doi.org/10.1029/2010JC006797>

- Peralta, G., Brun, F., Pérez-Lloréns, J., Bouma, T.** (2006). Direct effects of current velocity on the growth, morphometry and architecture of seagrasses : A case study on *Zostera noltii*. *Marine Ecology Progress Series*, 327, 135-142.
- Peralta, G., Pérez-Lloréns, J. L., Hernández, I., Vergara, J. J.** (2002). Effects of light availability on growth, architecture and nutrient content of the seagrass *Zostera noltii* Hornem. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 269(1), 9-26.
- Pérez, Marta, et Javier Romero** (1992). Photosynthetic Response to Light and Temperature of the Seagrass *Cymodocea Nodosa* and the Prediction of Its Seasonality. *Aquatic Botany* 43(1):51-62. doi: [10.1016/0304-3770\(92\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)90013-9).
- Perkins, S. E., et L. V. Alexander** (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate* 26(13):4500-4517. doi: [10.1175/JCLI-D-12-00383.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1).
- Pezerat M., Bertin X., Martins K., Mengual B., Hamm L.** (2021). Simulating storm waves in the nearshore area using spectral model: Current issues and a pragmatic solution. *Ocean Modelling*, 101:101737 <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101737>
- Plus M., Chappelle A., Ménesguen A., Deslous-Paoli J.M., Auby I.** (2003). Modelling seasonal dynamics of biomass and nitrogen contents in a seagrass meadow (*Zostera noltii* Hornem.): application to the Thau lagoon (French Mediterranean coast). *Ecological Modelling*, 161:213-238.
- Plus M., Dalloyau S., Trut G., Auby I., de Montaudouin X., Emery E., Noël C., Viala C.** (2010). Long-term evolution (1988-2008) of *Zostera* spp. Meadows in Arcachon Bay (Bay of Biscay). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 87:357-366. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.016>
- Plus, M., Dumas, F., Stanisière, J.-Y., Maurer, D.** (2009). Hydrodynamic characterization of the Arcachon Bay, using model-derived descriptors. *Continental Shelf Research*, 29(8), 1008-1013. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.016>
- Potouroglou M., Bull J.C., Krauss K.W., Kennedy H.A., Fusi M., Daffonchio D., Mangora M.M., Githaiga M.N., Diele K., Huxham M.** (2017). Measuring the role of seagrass in regulating sediment surface elevation. *Nature Scientific Reports*, 7:11917. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12354-y>
- Renton M., Airey M., Cambridge M.L., Kendrick G.A.** (2011). Modelling seagrass growth and development to evaluate transplanting strategies for restoration. *Annals of Botany*, 108:1213-1223. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr131>
- Ribaudo C., Plus M., Ganthly F., Auby I.** (2016). Carbon sequestration loss following *Zostera noltei* decline in the Arcachon Bay (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 179:4-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.024>
- Rigaud, S., Deflandre, B., Maire, O., Bernard, G., Duchêne, J. C., Poirier, D., Anschutz, P.** (2018). Transient biogeochemistry in intertidal sediments: New insights from tidal pools in *Zostera noltei* meadows of Arcachon Bay (France). *Marine Chemistry*, 200, 1-13.
- Ruessink B.G, Walstra D.J.R, Southgate H.N** (2003). Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches, *Coastal Engineering*, 48:139-149 [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00023-1)

- de los Santos, C., Brun, F., Bouma, T., Vergara, J., Pérez-Lloréns, J.** (2010). Acclimation of seagrass *Zostera noltii* to co-occurring hydrodynamic and light stresses. *Marine Ecology Progress Series*, 398, 127-135.
- Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C., Walker B.** (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413:591-596.
- Scheffer M., Bascompte J., Brock W.A., Brovkin V., Carpenter S.R., Dakos V., Held H., van Nes E.H., Rietkerk M., Sugihara G.** (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461:53-59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
- Schlegel, R. W., Darmaraki, S., Benthuyssen, J. A., Filbee-Dexter, K., Oliver, E. C. J.** (2021). Marine cold-spells. *Progress in Oceanography*, 198, 102684.
- Soulsby R.** (1997). Dynamics of marine sands. *Thomas Telford Publications, Londres*.
- Speer, P. E., Aubrey, D. G.** (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II : Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(2), 207-224. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(85\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0272-7714(85)90097-6)
- Suybuyk W., Bouma T.J., Govers L.L., Giesen K., de Jong D.J., Herman P., Hendricks J., van Katwijk M.M.** (2016). Surviving in changing seascapes: sediment dynamics as bottleneck for long-term seagrass presence. *Ecosystems*, 19:296-310. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9932-3>
- Suzuki T., Zijlema M., Burger B., Meijer M.C., Narayan S.** (2012). Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN. *Coastal Engineering*, 59:64-71 <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.07.006>
- Unsworth R.K.F., Nordlund L.M., Cullen-Unsworth L.C.** (2018). Seagrass meadows support global fisheries production. *Conservation Letters*, e12566. <https://doi.org/10.1111/conl.12566>
- Valle, M., Chust, G., del Campo, A., Wisz, M. S., Olsen, S. M., Garmendia, J. M., Borja, Á.** (2014). Projecting future distribution of the seagrass *Zostera noltii* under global warming and sea level rise. *Biological Conservation*, 170, 74-85.
- Van Leussen W.** (1994). Estuarine macroflocs and their role in fine-grain sediment transport. *Thèse de Doctorat, Utrecht University*.
- Verhagen J.H.G., Nienhuis P.H.** (1983). A simulation model of production, seasonal changes in biomass and distribution of eelgrass (*Zostera marina*) in Lake Grevelongen. *Marine Ecology Progress Series*, 10:187-195.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L.** (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5(3), 304-323.
- Waycott M., Duarte C.M., Carruthers T.J.B., Orth R.J., Dennison W.C., Olyarnik S., Calladine A., Fourqurean J.W., Heck K.L., Hughes A.R., Kendrick G.A., Kenworthy W.J., Short F.T., Williams S.L.** (2009). Accelerating loss of seagrass across the globe threatens coastal ecosystems. *PNAS*, 106:12377-12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- Winterwerp J.C.** (1998). A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3):309-326.



- Wolanski E., Asaeda T., Imberger J.** (1989). Mixing across a lutocline. *Limnology and Oceanography*, 34:931-938.
- WW3DG (WAVEWATCH III® Development Group)** (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. *Note Technique 333*, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. + Annexes.
- Young, I. R., S. Zieger, et A. V. Babanin** (2011). Global Trends in Wind Speed and Wave Height. *Science* 332(6028):451-55. doi: [10.1126/science.1197219](https://doi.org/10.1126/science.1197219).
- Zharova, N., Sfriso, A., Voinov, A., Pavoni, B.** (2001). A simulation model for the annual fluctuation of *Zostera marina* biomass in the Venice lagoon. *Aquatic Botany*, 70(2), 135-150.

## 9 ANNEXE

Description du modèle de croissance des zostères.

### 9.1 Notations préliminaires

Les variables et notations listées ici seront communes aux deux modèles qui seront développés : un modèle 1DV (python) et le module HYBIOSED-ZOSTERA ajouté à MARS3D (fortran). A noter toutefois, que certaines dimensions et variables ne seront pas utilisées dans le modèle 1DV, du fait précisément de son caractère 1DV.

Une autre remarque concerne le fait que pour le modèle 1DV, les données de lumière utilisées proviennent des capteurs déployés à 5 cm au-dessus du fond, et donc correspondant à la lumière ambiante dans la canopée. Dans le modèle MARS, la lumière sera calculée à chaque niveau sigma

Dans l'ensemble des tableaux présentés ci-dessous (excepté le Tableau-1), sont indiqués les numéros des équations dans lesquelles les paramètres/variables sont **calculé(e)s** et/ou **utilisé(e)s**.

#### 9.1.1 Indices

Les différents indices utilisés pour décrire les équations régissant le modèle sont présentés ci-dessous (**Tableau-1**). Afin d'éviter tout risque de confusion, dans les équations décrites ci-après, les indices correspondant aux différentes dimensions seront toujours indiqués entre crochets (ex. [k,i,j]) et non entre parenthèses, ces dernières étant réservées aux formulations mathématiques.

Tableau 1 : Liste des indices		
Nom générique	Description	Nom code
<i>i</i>	indice spatial de maille selon X [imin : imax]	i
<i>j</i>	indice spatial de maille selon Y [jmin : jmax]	j
<i>k</i>	indice vertical de couche selon Z [kmin : kmax]	k
<i>s</i>	indice de chaque génération de pieds [1 : nb_shoot]	s
<i>l</i>	indice de feuille pour chaque pied [1 : nb_leaf]	l
<i>t</i>	indice du pas de temps ou temps	T
<i>p</i>	indice du dt_shoot pour le plastochrone intervalle [1 : nb_plast]	P
<i>c</i>	indice du dt_chloro pour la teneur en chlorophylle [1 : nb_chloro]	c

#### 9.1.2 Paramètres numériques liés au temps

Afin de tenir compte au mieux des différents processus contrôlant la croissance et la dynamique des zostères, tout en minimisant le temps de calcul et la mémoire nécessaire, le parti a été pris de raisonner sur la base de pas de temps combinés. C'est-à-dire que certains processus sont calculés à une certaine fréquence, et que d'autres processus sont calculés une autre fréquence.

Ainsi, les calculs reposent sur cinq pas de temps différents (présentés ci-dessous par ordre croissant, ainsi que dans le **Tableau-2**) :

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -  
31.05.2024

- **Le pas de temps général du modèle** (pas de temps de MARS ou des forçages disponibles dans le cas du modèle 1DV) : *dt*. Il s'agit du pas de temps auquel les différents forçages (lumière, température, etc) sont mis à jour. A chaque *dt*, les variables intermédiaires liés à la production de biomasse, de nouveaux pieds ou de graines, à la respiration, à la mortalité, et à la croissance des épiphytes sont incrémentés. Ces variables incrémentées seront ensuite divisées par la durée correspondant au pas de temps de mise à jour pour le processus concerné (cf. ci-après). Ce pas de temps est donné en heures.
- **Le pas de temps de mise à jour de la biomasse des pieds et des épiphytes** : *dt\_biom*. A chaque *dt\_biom*, les variables intermédiaires liées à la production de biomasse des pieds et des épiphytes, à la respiration et à la mortalité sont tout d'abord moyennées, puis utilisées pour résoudre les équations de mise à jour de la biomasse de chaque pied et de la biomasse totale des épiphytes. Ce pas de temps, supérieur au pas de temps général du modèle, permet de gagner en temps de calcul, tout en améliorant la stabilité du modèle ; il est de l'ordre de l'heure à plusieurs heures.
- **Le pas de temps de mise à jour des pieds** : *dt\_shoot*. A chaque *dt\_shoot*, les variables relatives à la création de nouveaux pieds, ainsi qu'à l'évolution des feuilles d'un pied (création d'une nouvelle feuille, gain/perte de longueur des feuilles d'un pied) sont moyennées, puis les différentes générations de pieds sont mises à jour : nombre de pieds par classe d'âge et distribution des feuilles (âge et longueur de chaque feuille). Ce pas de temps permet d'une part de gagner en temps de calcul, mais également de limiter la quantité de mémoire allouée. En effet, les variables relatives aux pieds sont allouées dans un tableau dont la taille est calculée en divisant l'âge maximum que peut avoir un pied par *dt\_shoot*. Chaque ligne des tableaux correspond donc à une génération (classe d'âge) de pieds, les équations d'évolution de la biomasse étant résolues pour chacune d'entre elles. Ce pas de temps est donné en jours.
- **Le pas de temps d'intégration de la lumière reçue pour le calcul de la teneur en chlorophylle des feuilles** : *dt\_chloro*. Les intensités lumineuses de compensation et de saturation peuvent être calculées en fonction de la teneur en chlorophylle des feuilles. Ceci permet de prendre en compte en partie l'adaptation des zostères aux conditions d'éclairement. A partir de certaines données de terrain, une relation entre la lumière moyenne sur les *dt\_chloro* derniers jours (5 jours) et la teneur en chlorophylle des feuilles a été obtenue.
- **Le pas de temps d'intégration de la température pour le calcul du plastochrone intervalle** : *dt\_plast*. A partir de certaine données, une relation entre la température moyenne sur les *dt\_plast* derniers jours (5 jours) et le plastochrone intervalle (nombre de jours pour qu'une nouvelle feuille apparaisse) a été obtenue.

<b>Tableau 2 : Paramètres temporelles</b>				
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeur retenue</b>
<i>dt</i>	Pas de temps général du modèle	dt	<i>sec</i>	Modèle-dépendant
<i>dt<sub>biom</sub></i>	Pas de temps pour la mise à jour de la biomasse des pieds	dt_biom	<i>heure</i>	6
<i>dt<sub>shoot</sub></i>	Pas de temps pour la génération de nouveaux pieds	dt_shoot	<i>jour</i>	1
<i>dt<sub>chloro</sub></i>	Pas de temps d'intégration de la lumière pour le calcul de la teneur en chlorophylle des feuilles	dt_chloro	<i>jour</i>	5
<i>dt<sub>plast</sub></i>	Pas de temps d'intégration de la température pour le calcul du plastochrone	dt_plast	<i>jour</i>	5

### 9.1.3 Description des variables utilisées

#### 9.1.3.1 Forçages

<b>Tableau 3 : Variables relatives aux forçages</b>				
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>	<b>Allocation</b>
$\sigma_w$	Niveau sigma (base de la couche) <i>Eq. 8</i>	sigma_w	-	kmin-1 : kmax
$H_{wat}$	Hauteur d'eau	Hwat	m	imin:imax , jmin:jmax
$Z_b$	Hauteur au-dessus du fond de la base de la couche considérée <i>Eq. 9</i>	Zbot	m	kmin- 1:kmax, imin:imax, jmin:jmax
$DZ_b$	Épaisseur de la couche <i>Eq. 10</i>	Dzsig	m	kmin- 1:kmax, imin:imax, jmin:jmax
$I_{surf}$	Lumière incidente en surface	Light_surf	$\mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{W.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$I_b$	Lumière incidente à la base de chaque couche (sigma) <i>Eq. 12</i>	Light_b	$\mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{W.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	kmin:kmax, imin:imax, jmin:jmax
$I_{bot}$	Lumière incidente au sommet de la canopée (avant application l'atténuation par les épiphytes et de l'auto-ombrage	Light_bot	$\mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{W.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$\theta_{wat}$	Température de l'eau au fond <i>Eq.</i>	Temp_wat	°C	imin:imax jmin:jmax
$\theta_{air}$	Température de l'air <i>Eq.</i>	Temp_air	°C	imin:imax jmin:jmax
$\theta_{bot}$	Température utilisée dans les calculs : de l'eau au fond ou de l'air <i>Eq. 9</i>	Temp_bot	°C	imin:imax jmin:jmax
$\theta_{plast}$	Température utilisée dans calcul de l'intervalle plastochrone <i>Eq. 14</i>	Temp_plast	°C	imin:imax jmin:jmax
$UV_{wind}$	Norme de la vitesse du vent <i>Eq. 10</i>	UV_wind	$\text{m.s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$RH$	Humidité relative de l'air <i>Eq. 10</i>	RH	-	imin:imax jmin:jmax
$H_s$	Hauteur significative des vagues <i>Eq.</i>	Hs	m	imin:imax jmin:jmax
$T_p$	Période de pic des vagues <i>Eq. 36</i>	Tp	sec	imin:imax jmin:jmax
$U_{wave}$	Vitesse orbitale des vagues selon X <i>Eq. 33</i>	Uwave	$\text{m.s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$V_{wave}$	Vitesse orbitale des vagues selon Y <i>Eq. 33</i>	Vwave	$\text{m.s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$U_{curr}$	Vitesse des courants selon X <i>Eq. 32</i>	Ucur	$\text{m.s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$V_{curr}$	Vitesse des courants selon Y <i>Eq. 32</i>	Vcur	$\text{m.s}^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$\theta$	Température <i>Eq. 21 ; 24 ; 29 ; 46</i>	Temp	°C	imin:imax jmin:jmax

$U_{can}$	Vitesse des courants dans la canopée selon X <b>Eq. 11</b>	$U_{can}$	$m.s^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$V_{can}$	Vitesse des courants dans la canopée selon Y <b>Eq. 11</b>	$V_{can}$	$m.s^{-1}$	imin:imax jmin:jmax
$C_{mes}[k, i, j]$	Concentration de matière en suspension dans l'eau	-	$g.l^{-1}$	kmin:kmax, imin:imax, jmin:jmax
$Sal[k, i, j]$	Salinité	-	-	kmin:kmax, imin:imax, jmin:jmax

### 9.1.3.2 Forçages internes

<b>Tableau 4 : Variables relatives aux forçages internes</b>			
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>
$C_{chloro,leaf}$	Teneur en chlorophylle des feuilles <b>Eq. 12</b>	Chloro_leaf	$mg. g_{ps}^{-1}$
$WC_{leaf}$	Teneur en eau des feuilles <b>Eq. 11</b>	WC_leaf	%
$Evap$	Évapotranspiration <b>Eq. 10</b>	Evap	-
$I_{chloro}$	Lumière incidente moyenne reçue ( $I_{chloro}$ ) au cours des $dt_{chloro}$ derniers jours <b>Eq. 11</b>	Light_chloro	$\mu mol photon.m^{-2}.s^{-1}$ ou $W.m^{-2}.s$
$PAR$	rayonnement photosynthétiquement actif ( $PAR$ ) <b>Eq. 13 ; 15</b>	PAR	$\mu mol photon.m^{-2}.s^{-1}$ ou $W.m^{-2}.s$
$LAI$	l'indice de surface foliaire <b>Eq. 14</b>	LAI	$m^3$
$I_k$	Intensité lumineuse de saturation <b>Eq. 16</b>	Ik	$\mu mol photon.m^{-2}.s^{-1}$ ou $W.m^{-2}.s$
$I_c$	Intensité lumineuse de saturation <b>Eq. 16</b>	Ic	$\mu mol photon.m^{-2}.s^{-1}$ ou $W.m^{-2}.s$
$\Delta_{plast}$	Intervalle plastochrone <b>Eq. 32 ;33 ;34</b>	Plastochrone_Interv	jour
$Sect_{leaf}$	Section de feuilles <b>Eq. 47</b>	Leaf_Section	$m^2$
$\tau_{crit}$	Contrainte de cisaillement critique <b>Eq. 48</b>	Crit_Stress	$N.m^{-2}$
$UV_{curr}$	Norme des vitesses de courants <b>Eq. 49</b>	UVcur	$m.s^{-1}$
$UV_{wave}$	Norme des vitesses orbitales des vagues <b>Eq. 50</b>	UVwave	$m.s^{-1}$
$C_d$	Coefficient de traînée induite par les herbiers sur les courants <b>Eq. 51</b>	Cd	-
$\tau_{curr,0}$	Contrainte de cisaillement sur le fond due aux courants purs <b>Eq. 52</b>	Tbc	$N.m^{-2}$
$f_w$	Coefficient de frottement dû aux vagues <b>Eq. 53</b>	fw	-
$\tau_{wave}$	Contrainte de cisaillement sur le fond due aux vagues <b>Eq. 54</b>	Tbw	$N.m^{-2}$
$\tau_{curr}$	Contrainte de cisaillement sur le fond due aux courants, intégrant l'effet des vagues <b>Eq. 55</b>	Tbc	$N.m^{-2}$
$\alpha$	Coefficient prenant en compte la direction des courants <b>Eq. 56</b>	alp	-

$\beta$	Coefficient prenant en compte la direction des vagues <i>Eq. 57</i>	beta	-
$\tau_{tot}$	Contrainte de cisaillement totale s'exerçant sur le fond <i>Eq. 58</i>	Tautot	$N.m^{-2}$
$Tr_{R2L,tmp}$	Taux de translocation temporaire pour le calcul de $Tr_{R2L}$ <i>Eq. 49</i>	tr_R2L	$jour^{-1}$
$BR_s$	Biomasse racinaire d'un pied <i>Eq. 50</i>	BRs	$g_{ps}.m^{-2}$
$K_{light,dessic}$	Coefficient de réduction photosynthétique liée à la dessiccation	-	-
$H_{wat,crit}$	Niveau d'eau critique en dessous duquel il y a émergence	HwatCrit	$m$
$t_{resilience}$	Durée écoulée depuis que la résilience a été activée	Resilience_tcount	$jour$
$C_{resilience}$	Compteur de changement d'état lors de la phase de résilience	Resilience_dbiom	

### 9.1.3.3 Variables globales

Tableau 5 : Variables globales			
Nom générique	Description	Nom code	Unité
$A_{shoot}$	Age des pieds	Shoot_age	<i>Jour</i>
$A_{leaf}$	Age des feuilles	Leaf_age	<i>jour</i>
$B_{leaf}$	Biomasse foliaire	Leaf_biomass	$g_{ps}.m^{-2}$
$B_{shoot}$	Biomasse des pieds	Shoot_biomass	$g_{ps}.m^{-2}$
$B_{root}$	Biomasse racinaire	Broot_LiveTot	$g_{ps}.m^{-2}$
$B_{epi}$	Biomasse épiphytique	Epiphytes	$g_{ps}.m^{-2}$
$D_{shoot}$	Densité de feuilles	Shoot_density	$m^{-2}$
$H_{shoot}$	Hauteur de pieds	Shoot_height	$m$
$L_{leaf}$	Longueur de feuilles	Leaf_length	$m$
$T_{leaf}$	Épaisseur de feuilles	Leaf_thick	$m$
$W_{leaf}$	Largeur de feuilles	Leaf_width	$m$
$B_{shoot,adult}$	Biomasse de pieds matures	biom_mature_shoot	$g_{ps}.m^{-2}$



#### 9.1.3.4 Variables d'état totales

<b>Tableau 6 : Variables d'état totales</b>			
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>
$B_{leaf,tot}$	Biomasse foliaire totale <i>Eq. 173</i>	Bleaf_Tot	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{root,tot}$	Biomasse racinaire totale <i>Eq. 75</i>	Broot_LiveTot	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{epi,tot}$	Biomasse totale de tous les pieds <i>Eq. 144</i>	Biom_Tot	$g_{PS}.m^{-2}$
$L_{leaf,tot}$	Longueur moyenne des feuilles <i>Eq. 177</i>	LeafLength_Tot	$m$
$W_{leaf,tot}$	Largeur moyenne des feuilles <i>Eq. 178</i>	LeafWidth_Tot	$m$
$T_{leaf,tot}$	Épaisseur moyenne des feuilles <i>Eq. 179</i>	LeafThick_Tot	$m$
$H_{shoot,tot}$	Hauteur moyenne de pieds <i>Eq. 175</i>	ShootHeight_Tot	$m$
$D_{shoot,tot}$	Densité totale de pieds <i>Eq. 174</i>	ShootDens_Tot	$m^{-2}$
$NB_{leaf,tot}$	Nombre moyen de feuilles par pieds <i>Eq. 176</i>	ShootNBLeaf_Tot	-
$NB_{shoot}$	Nombre de nouveaux pieds créés <i>Eq. 65</i>	Nb_new_shoot	-
$A_{shoot,tot}$	Âge moyen des pieds <i>Eq. 180</i>	Shoot_age_mean	<i>Jour</i>
$A_{leaf,tot}$	Âge moyen des feuilles <i>Eq. 181</i>	Leaf_age_mean	<i>Jour</i>
$A_{oldest\_leaf,tot}$	Âge maximal des feuilles <i>Eq. 182</i>	Leaf_age_oldest	<i>Jour</i>
$B_{root,dead}$	Biomasse de racines mortes <i>Eq. 186</i>	Broot_dead	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{root,live}$	Biomasse de racines vivantes	Broot_live	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{root,decomp}$	Biomasse de racines décomposées <i>Eq. 185</i>	decomp_biom	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{leaf,seed}$	Biomasse de feuilles obtenue de la germination des graines <i>Eq. 101</i>	lbiom_seeds	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{root,seed}$	Biomasse de racines obtenue de la germination des graines <i>Eq. 102</i>	rbiom_seeds	$g_{PS}.m^{-2}$

#### 9.1.3.5 Taux d'évolution

Tableau 7 : Taux d'évolution			
Nom générique	Description	Nom code	Unité
$P_{biom,light}$	Production de biomasse liée à la lumière (Eq. 36)	fp_biom_light	$Jour^{-1}$
$P_{biom,\theta}$	Production de biomasse liée à la température (Eq. 35)	fp_biom_temp	$Jour^{-1}$
$P_{biom,age}$	Production de biomasse liée à la température (Eq. 38)	fp_biom_age	$Jour^{-1}$
$R_{biom,\theta}$	Respiration liée à la température (Eq. 41)	fr_biom_temp	$Jour^{-1}$
$R_{root,\theta}$	Respiration des racines liée à la température (Eq. 41)	fr_root_temp	$Jour^{-1}$
$M_{biom,\theta}$	Mortalité liée à la température (Eq. 46)	fm_biom_temp	$Jour^{-1}$
$M_{root,\theta}$	Mortalité des racines liée à la température (Eq. 46)	fm_root_temp	$Jour^{-1}$
$M_{biom,age}$	Mortalité liée à l'âge des pieds (Eq. 42)	fm_biom_age	$Jour^{-1}$
$M_{biom,hydro}$	Mortalité liée à l'hydrodynamique (Eq. 59)	fm_biom_hydro	$Jour^{-1}$
$M_{biom,dessic}$	Mortalité liée à la dessiccation (Eq. 60)	fm_biom_dessic	$Jour^{-1}$
$P_{shoot,\theta}$	Calcul du nombre de pieds produits en lien avec la température (Eq. 62)	fp_nshoot_temp	$Jour^{-1}$
$P_{shoot,root}$	Calcul du nombre de pieds produits en lien avec la biomasse racinaire (Eq. 61)	fp_nshoot_root	$Jour^{-1}$
$P_{shoot,light}$	Calcul du nombre de pieds produits en lien avec la lumière (Eq. 63)	fp_nshoot_light	$Jour^{-1}$
$P_{leaf,light}$	Calcul du taux de production de feuilles en lien avec la lumière (Eq. 64)	ProdRate_Leaf	$Jour^{-1}$
$Tr_{L2R}$	Translocation des feuilles vers les racines (Eq. 65)	Tr_L2R	$Jour^{-1}$
$Tr_{R2L}$	Translocation des racines vers les feuilles (Eq. 66)	Tr_R2L	$Jour^{-1}$
$Tr_{R2L,age}$	Terme correctif lié à l'âge pour la Translocation des racines vers les feuilles (Eq. 69)	-	$Jour^{-1}$
$P_{epi,\theta}$	Production d'épiphytes liée à la température (Eq. 84)	fp_epi_temp	$Jour^{-1}$
$P_{epi,light}$	Production d'épiphytes liée à la lumière (Eq. 85)	fp_epi_light	$Jour^{-1}$

$R_{epi,\theta}$	Respiration des épiphytes liée à la lumière <b>(Eq. 86)</b>	fr_epi_temp	$Jour^{-1}$
$P_{seed,hydro}$	Taux de production de graines liée à l'hydrodynamique <b>(Eq. 72)</b>	fp_seed_hydro	$Jour^{-1}$
$P_{seed}$	Taux de production de graines <b>(Eq. 78)</b>	hbs_zost_seeds_produced	$Jour^{-1}$
$M_{biom,hydro,adult}$	Mortalité hydrodynamique des pieds matures	fm_hydro_mature	$Jour^{-1}$
$M_{seed,INsed}$	Taux de mortalité des graines dans le sédiment <b>(Eq. 82)</b>	fm_seeds_sed	$Jour^{-1}$
$M_{seed,wat}$	Taux de mortalité des graines dans l'eau <b>(Eq. 80)</b>	fm_seeds_wat	$Jour^{-1}$
$\Gamma_{decomp,root}$	Taux de décomposition des racines <b>(Eq. 183)</b>	decomp_rate	$Jour^{-1}$
$\Gamma_{decomp,root,\theta}$	Taux de décomposition des racines en fonction de la température <b>(Eq. 184)</b>	decomp_rate_temp	$Jour^{-1}$

### 9.1.3.6 Variables relatives à la reproduction sexuée et germination

<b>Tableau 8 : Variables relatives aux graines</b>			
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>
$Seed_{flowering}$	Taux de production des graines <b>Eq. 73</b>	flowering_rate	$Jour^{-1}$
$cv_{seed, sed}$	Concentration de graines dans chaque couche de sédiment <b>Eq. 82</b>	cv_wat	-
$cv_{seed, wat}$	Concentration de graines dans chaque couche de la colonne d'eau <b>Eq. 79, 81</b>	cv_sed	-
$Seed_{INsed}$	Concentration totale de graines dans le sédiment <b>Eq. 95</b>	seed_insed	-
$Seed_{Germ, lim}$	Coefficient limitant la germination des graines <b>Eq. 95</b>	limGerm	-
$Seed_{Germ}$	Taux de germination des graines <b>Eq. 97</b>	germination_rate_dtshoot	-
$NB_{seed, germ}$	Le nombre de graines qui ont germées à dtshoot <b>Eq. 99</b>	seeds_germinated_dtshoot	-
$NB_{shoot, germ}$	Le nombre de nouveaux pieds issus de la germination des graines <b>Eq. 100</b>	nb_new_germ	-
$Day_{len, seed}$	Limite sur le taux de production par la longueur de la journée <b>Eq. 74</b>	comp_seed_daylen	-
$Day_{len}$	Durée d'une journée pour les productions de grains <b>Eq. 75</b>	dureej	heures
$Day_{jul}$	Jour de l'année	dyear	-

### 9.1.3.7 Variables d'évolutions

<b>Tableau 9 : Variables d'évolutions</b>			
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>
$P_{leaf}^s$	Taux de production des feuilles <i>Eq. 87</i>	ProdRate_Leaf	$Jour^{-1}$
$\Lambda_{leaf}^s$	Taux de perte de biomasse feuilles <i>Eq. 88</i>	Loss_Rate_Leaf	$Jour^{-1}$
$\Lambda_{root}^s$	Taux de perte de biomasse racine <i>Eq. 89</i>	Loss_Rate_Root	$Jour^{-1}$
$P_{epi}^s$	Taux de production d'épiphytes <i>Eq. 90</i>	fprod_epi	$Jour^{-1}$
$\Lambda_{epi}^s$	Taux de perte d'épiphytes <i>Eq. 91</i>	floss_epi	$Jour^{-1}$
$NB_{shoot}$	Nombre de nouveaux pieds produits <i>Eq. 92</i>	Nb_newshoot	-
$B_{leaf,NBshoot}$	Biomasse correspondant à la production de nouveau shoot <i>Eq. 93</i>	LBiom_New_Shoot	$g_{PS}.m^{-2}$
$L_{leaf,gain}^s$	Gain de longueur de feuilles total <i>Eq. 117</i>	Lgain_rest	$m$
$L_{leaf,loss}^s$	Perte de longueur de feuilles totale <i>Eq. 118</i>	Lloss_rest	$m$
$B_{shoot,gain}^s$	Gain de biomasse de feuilles <i>Eq. 106</i>	-	$g_{PS}.m^{-2}$
$B_{shoot,loss}^s$	Perte de biomasse de feuilles <i>Eq. 107</i>	-	$g_{PS}.m^{-2}$
$L_{gain}^s$	Gain total à allouer au pied	Lgain	$m$
$L_{loss}^s$	Pertes totales à allouer au pied	Lloss	$m$
$C_{leaf,loss,len}^{s,l}$	Pertes d'élongation sont normalisées par la longueur des feuilles de chaque pied	Closs_len	-
$C_{leaf,gain}^{s,l}$	Gain d'élongation lié à l'âge <i>Eq. 119</i>	Cgain_age	-
$C_{leaf,loss}^{s,l}$	Pertes d'élongation liées à l'âge <i>Eq. 120</i>	Closs_age	-
$C_{leaf,gain,sum}$	Gain total d'élongation <i>Eq. 127</i>	Cgain_sum	-
$C_{leaf,loss,sum}$	Pertes totales de longueurs de feuilles hors pertes hydrodynamique <i>Eq. 128</i>	Closs_sum	-
$L_{gain,init}$	Gain d'élongation initial des feuilles en fonction de leur âge <i>Eq. 6</i>	-	$m$
$L_{loss,init}$	Pertes d'élongation initiales des feuilles en fonction de leur âge <i>Eq. 7</i>	-	$m$

### 9.1.3.8 Variables d'initialisation

<b>Tableau 10 : Paramètres d'initialisation</b>				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$B_{leaf,init} / B_{leaf,new}$	Initial leaf biomass	i_Bleaf	$g_{PS}.m^{-2}$	25.0
$B_{root\_live,init} / B_{root\_live,new}$	Initial alive root biomass	i_Broot_alive	$g_{PS}.m^{-2}$	49.0
$B_{root\_dead,init} / B_{root\_dead,new}$	Initial dead root biomass	i_Broot_dead	$g_{PS}.m^{-2}$	15.0
$D_{shoot,init} / D_{shoot,new}$	Initial shoot density	i_Shoot_dens	$m^{-2}$	6960.0
$H_{shoot,init} / H_{shoot,new}$	Initial shoot height	i_Shoot_height	$m$	0.095
$L_{leaf,init} / L_{leaf,new}$	Initial leaf length	i_Leaf_length	$m$	0.073
$W_{leaf,init} / W_{leaf,new}$	Initial leaf width	i_Leaf_width	$m$	0.00069
$T_{leaf,init} / T_{leaf,new}$	Initial leaf thickness	i_Leaf_thick	$m$	0.00015
$N_{shoot,init} / N_{shoot,new}$	Initial number of leaves per shoot	i_nb_leaf_shoot	-	2.83

\* Init : Initialisation du modèle ; New : génération d'un nouveau pied / feuille

<b>Tableau 11 : Paramètres numériques</b>				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Eq.
$N_{shoot}$	Nombre de génération de pieds	nb_shoot	-	<b>Eq. 1</b>
$N_{leaf}$	Nombre maximum de feuilles par pieds	nb_leaf	-	<b>Eq. 2</b>
$N_{chloro}$	Taille du tableau pour le calcul de la lumière moyenne sur dt_chloro	nb_chloro	-	<b>Eq. 3</b>
$N_{plast}$	Taille du tableau pour le calcul de la température moyenne sur dt_shoot	nb_plast	-	<b>Eq. 4</b>

### 9.1.3.9 Variables relatives à la spatialisation du modèle

<b>Tableau 12 : Variables relatives à la progression</b>			
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>
$U_{loss}$	Vitesse de scouring <b>Eq. 213</b>	Uloss	$m.s^{-1}$
$F_{loss,scour}$	fraction de maille perdue par scouring <b>Eq. 205</b>	FracLoss	-
$F_{new}$	Le taux d'occupation de la maille après progression <b>Eq. 199 ; 206</b>	position_wat	-
$F_{init}$	Le taux d'occupation de la maille avant progression	position_wat	-
$\tau_{b,loc}$	Contraintes de cisaillement <b>Eq. 210</b>	Taubloc	$N.m^{-2}$
$Weight_{\tau}$	Coefficient de pondération pour le calcul du scouring <b>Eq. 209</b>	Weight	-
$F_{gain,tot}$	Fraction de maille gagnée par progression de l'herbier <b>Eq. 192</b>	Frac_gain_tot	-
$F_{local}$	La fraction correspondant au gain à allouer localement <b>Eq. 193</b>	hbs_zost_frac_local	-
$F_{send}$	La fraction correspondant au gain à exporter <b>Eq. 194</b>	hbs_zost_frac_send	-
$F_{gain,local}$	Portion du gain total lié à la progression à allouer localement <b>Eq. 195</b>	Fgain_local	-
$F_{gain,export}$	Portion du gain total lié à la progression à exporter <b>Eq. 196</b>	Fgain_export	-
$F_{send,weighted}$	Gain de fraction exportée vers les mailles voisines <b>Eq. 197</b>	hbs_zost_frac_send_weighted	-
$F_{gain,received}$	Fraction de maille reçue des mailles voisines <b>Eq. 198</b>	hbs_zost_frac_received_weighted	-

## 9.2 Initialisation des variables du modèle

### 9.2.1 Paramètres d'initialisation généraux

Le nombre de classe d'âge de pieds ( $N_{shoot}$ ) est calculé en fonction du pas de temps  $dt_{shoot}$  et de l'âge maximum des pieds ( $A_{shoot,max}$ ), tel que :

$$(Eq. 1) \quad N_{shoot} = 1 + \frac{A_{shoot,max}}{dt_{shoot}}$$

C'est-à-dire qu'une génération est créée à chaque  $dt_{shoot}$ , jusqu'à ce que l'âge maximum des pieds soit atteint.

La taille du tableau pour les feuilles de chaque pied ( $N_{leaf}$ ) dépend du nombre maximum de feuille par pieds ( $N_{leaf,max,shoot}$ ) :

$$(Eq. 2) \quad N_{leaf} = 1 + N_{leaf,max,shoot}$$

La taille du tableau pour le calcul de la lumière moyenne permettant le calcul de la teneur en chlorophylle est calculée telle que :

$$(Eq. 3.1) \quad N_{chloro} = 1 + \frac{dt_{chloro}}{dt_{shoot}} \quad \text{pour } dt_{shoot} \leq dt_{chloro}$$

$$(Eq. 3.2) \quad N_{chloro} = 1 \quad \text{pour } dt_{shoot} > dt_{chloro}$$

La taille du tableau pour le calcul de la température moyenne permettant le calcul du plastochrone intervalle est calculée telle que :

$$(Eq. 4.1) \quad N_{plast} = 1 + \frac{dt_{plast}}{dt_{shoot}} \quad \text{pour } dt_{shoot} \leq dt_{plast}$$

$$(Eq. 4.2) \quad N_{plast} = 1 \quad \text{pour } dt_{shoot} > dt_{plast}$$

### 9.2.2 Initialisation de l'intervalle plastochrone

Le cycle annuel des températures est généré par une fonction cosinus avec une période d'une année, centré sur la moyenne du maximum  $\theta_{plast,max}$  et minimum  $\theta_{plast,min}$  de la température annuel pour le calcul du plastochrone et fluctuant entre  $\theta_{plast,max}$  et  $\theta_{plast,min}$ , le maximum étant atteint à  $Day_{\theta_{plast,max}}$ . L'intervalle plastochrone est ensuite calculé pour chaque jour à partir de ce cycle de température en utilisant la formule définie en 1.4.7.

### 9.2.3 Initialisation de la densité de pieds et feuilles par pieds

La densité des pieds est initialisée grâce à une distribution normale sur l'âge des différentes générations. Cette loi normale est centrée sur l'âge maximal auquel le pic de densité est atteint.

La distribution de la densité de pied pour chaque génération est effectuée à l'aide d'une loi normale, centrée sur l'âge maximal auquel le pic de densité est atteint ( $A_{shoot,peak}$ ) et dont la forme, l'amplitude et l'espérance varient en fonction du jour de l'année. Cela permet de prendre en compte le cycle annuel du développement des herbiers. Ainsi, on obtient une densité moins importante en Hiver qu'en Été, mais avec une densité plus uniforme entre les différentes



génération, alors qu'au Printemps on a un fort pic de densité à  $A_{shoot,peak}$  mais qui est rapidement dissipé pour les autres générations. À noter que  $A_{shoot,peak}$  est représenté par un cosinus définissant le cycle annuel d'évolution de la génération qui a la plus forte densité.

#### 9.2.4 Initialisation de la densité de feuilles par pieds

A partir de l'âge du pied et du cycle annuel de l'intervalle plastochrone, le nombre de feuilles est calculé. Cette opération est répétée pour chaque génération, puis le nombre moyen de feuilles par pied est calculé et finalement appliqué à chaque pied de chaque génération.

#### 9.2.5 Initialisation des paramètres morphologiques des feuilles

La largeur et l'épaisseur des feuilles sont initialisées avec les valeurs utilisées lors de la création d'une nouvelle feuille ( $W_{leaf,new}$  et  $T_{leaf,new}$ ). L'initialisation de la longueur de feuilles est également effectuée à partir de la longueur d'une nouvelle feuille ( $L_{leaf,new}$ ), mais à laquelle sont appliquées les gains et les pertes liées à l'âge des feuilles, tels que :

$$(Eq. 5) \quad L_{leaf,init} = (L_{leaf,new} + L_{gain,init}) (1 + L_{loss,init})$$

Où :

$$(Eq. 6) \quad L_{gain,init} = C0 A_{leaf}^{C1}$$

$$(Eq. 7.1) \quad L_{loss,init} = 1 - e^{\frac{C2 (A_{leaf} - A_{leaf,adult})}{A_{leaf,max}}} \quad \text{si } A_{leaf} > A_{leaf,adult}$$

$$(Eq. 7.2) \quad L_{loss,init} = 0 \quad \text{sinon}$$

Avec  $C0$ ,  $C1$ ,  $C2$ , des coefficients itératifs qui minimisent l'erreur sur la biomasse.

En dernier lieu, ces paramètres morphologiques sont utilisés pour calculer la biomasse de feuille initiale totale ( $B_{leaf,init}$ ).

<b>Tableau 13 : paramètres d'initialisation</b>				
<b>Nom générique</b>	<b>Description</b>	<b>Nom code</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeur retenue</b>
$A_{shoot,max}$	Age maximum des pieds	shoot_age_max	Days	120
$\theta_{plast,max}$	Température annuelle maximum pour le calcul du plastochrone	Temp_Plast_Max	°C	25
$\theta_{plast,min}$	Température annuelle minimum pour le calcul du plastochrone	Temp_Plast_Min	°C	8
$Day_{\theta_{plast,max}}$	Jour de l'année lors duquel la température maximale pour le calcul du plastochrone est atteinte	Plast_Dyear	Days	220
$A_{leaf,adult}$	Age d'une feuille adulte	leaf_age_adult	Days	5
$A_{leaf,max}$	Age maximum des feuilles	leaf_age_max	Days	60
$N_{leaf,max,shoot}$	Nombre de feuilles maximum par pied	nb_leaf_max	-	6

### 9.3 Variables de forçages externes

#### 9.3.1 Description verticale dans la colonne d'eau

Tout d'abord, la distribution des niveaux  $\sigma_w$  est calculée dans le modèle 1DV, de la même manière que dans MARS3D :

$$(Eq. 8.1) \quad \sigma_w[k] = \frac{1}{2}(\sigma_w[k] + \sigma_w[k + 1]) \quad \text{pour } k_{min} \leq k \leq k_{max}$$

$$(Eq. 8.2) \quad \sigma_w[k] = -1 \quad \text{pour } k = 0$$

Avec, dans ce cas,  $k_{min} = 1$

En présence d'eau (lorsque  $H_{wat}[i, j] \geq H_{wat, crit}$ ), la hauteur au-dessus du fond à la base de chaque couche, s'écrit :

$$(Eq. 9) \quad Z_b[k, i, j] = (1 + \sigma_w[k]) \cdot H_{wat}[i, j] \quad \text{pour } k = k_{min} - 1 : k_{max}$$

L'épaisseur de chaque couche est définie :

$$(Eq. 10) \quad DZ_b[k, i, j] = Z_b[k - 1, i, j] - Z_b[k, i, j] \quad \text{pour } k = k_{min} \leq k \leq k_{max}$$

#### 9.3.2 Calcul de la vitesse des courants dans la canopée

Les vitesses 3D des courants issues du modèle hydrodynamique sont utilisées pour calculer la vitesse moyennée sur la profondeur à l'intérieur de la canopée :

pour  $k = k_{min} \leq k \leq k_{max}$  :

$$(Eq. 11.1) \quad U_{can}[i, j] = \sum_k \text{avec herbiers } U_{curr}[k, i, j] DZ_b[k, i, j]$$

$$(Eq. 11.2) \quad V_{can}[i, j] = \sum_k \text{avec herbiers } V_{curr}[k, i, j] DZ_b[k, i, j]$$

#### 9.3.3 Forçage lié à la lumière

La lumière ambiante au sommet de la canopée formée par les herbiers est notée  $I_{bot}[i, j]$ , c'est cette valeur qui est utilisée dans le modèle 1DV. Cependant, dans le module HYBIOSED\_ZOSTERA, cette variable est calculée à partir de la lumière en surface ( $I_{surf}[i, j]$ ), telle que :

La lumière à la base de chaque couche est ensuite calculée telle que :

$$(Eq. 12.1) \quad I_b[k, i, j] = I_{surf}[i, j] \cdot e^{(-K_{d, wat}[k, i, j] \cdot (H_{wat}[i, j] - Z_b[k, i, j]))} \quad \text{pour } k = k_{max}$$

$$(Eq. 12.2) \quad I_b[k, i, j] = I_b[k + 1, i, j] \cdot e^{(-K_{d, wat}[k, i, j] \cdot (Z_b[k + 1, i, j] - Z_b[k, i, j]))} \quad \text{pour } 0 \leq k \leq k_{max}$$

Avec, selon Paolin (2012) :

$$(Eq. 13) \quad K_{d,wat}[k, i, j] = Kp_{cst} + Kp_{chloro} \cdot C_{chloro,wat}[k, i, j] + Kp_{mes} \cdot C_{mes}[k, i, j] + Kp_{sal} \cdot Sal[k, i, j]$$

$I_{bot}[i, j]$  est ensuite calculé en interpolant  $I_b[k, i, j]$  au niveau du sommet de la canopée.

Dans le cas où  $H_{wat}[i, j] \geq H_{wat,crit}$ ,  $I_{bot}[i, j] = I_{surf}[i, j]$ .

Les variables  $I_b[k, i, j]$  et  $I_{bot}[i, j]$  sont calculées à chaque pas de temps du modèle hydrodynamique.

Tableau 14 : paramètres liés à la lumière dans la colonne d'eau				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Kp_{cst}$	Constants du coefficient d'atténuation lumineuse	hbs_c_kpar_cst	-	0.722
$Kp_{chloro}$	Coefficient d'atténuation lié à la chlorophylle dans l'eau	hbs_c_kpar_chloro	-	0.0622
$Kp_{mes}$	Coefficient d'atténuation lié au sédiment en suspension	hbs_c_kpar_mes	-	0.0372
$Kp_{sal}$	Coefficient d'atténuation lié à la salinité	hbs_c_kpar_sal	-	-0.0159

### 9.3.4 Forçage lié à la température

Dans le modèle 1DV, la température ambiante au fond ( $\theta_{bot}[i, j]$ ) a été mesurée directement (que les capteurs soient immergés ou émergés). Dans le module HYBIOSED, la température ambiante au fond ( $\theta_{bot}[i, j]$ ) correspond alternativement à  $\theta_{wat}[0, i, j]$  ou à  $\theta_{air}[i, j]$  selon que la maille considérée est immergée ou non. Il s'agit ici de la température instantanée pour chaque  $dt$ .

Pour permettre le calcul de l'intervalle plastochrone, la température moyenne ( $\theta_{plast}[i, j]$ ) sur les  $dt_{plast}$  derniers jour doit être également calculée :

$$(Eq. 14) \quad \theta_{plast}[i, j] = \frac{\sum_{t=0}^{t=dt_{plast}} \theta_{bot}[i, j] \cdot dt}{dt_{plast}}$$

### 9.3.5 Forçage lié à l'évapotranspiration

Le taux d'évapo-transpiration ( $Evap[i, j]$ ), dépendant de la vitesse du vent, de la température de l'air et de l'humidité relative est calculé selon la formule de Thornthwaite, tel que :

$$(Eq. 15) \quad Evap[i, j] = 0.484 \cdot (1.0 + 0.6 \cdot UV_{wind}[i, j]) e^{\left(\frac{17.27 \cdot \theta_{air}[i, j]}{237.3 + \theta_{air}[i, j]}\right)} (1.0 - RH[i, j])$$

Une première correction est effectuée pour considérer l'effet du self-shading

$$(Eq. 16) \quad Evap[i, j] = Evap[i, j] LAI[i, j]$$

Avec,

$$(Eq. 17) \quad LAI[i, j] = \frac{B_{leaf,tot}[i, j]}{K_{LAI}}$$

Et une seconde correction permet de prendre en compte l'ouverture et la fermeture des stomates

$$(Eq. 18) \quad Evap[i, j] = Evap[i, j] \delta[i, j]$$

$$(Eq. 19.1) \quad \delta[i, j] = 0 \quad \text{si } PAR \leq I_c$$

$$(Eq. 19.2) \quad \delta[i, j] = 1 \quad \text{si } PAR \geq I_k$$

Sinon, si  $IcIk_{evap,x0} \neq 0$  :

$$(Eq. 19.3) \quad \delta[i, j] = \frac{e^{IcIk_{evap,x0} \frac{PAR[i,j]-Ic[i,j]}{Ik[i,j]-Ic[i,j]} - 1}}{e^{IcIk_{evap,x0} - 1}}$$

$$(Eq. 19.3) \quad \delta[i, j] = \frac{PAR[i,j]-Ic[i,j]}{Ik[i,j]-Ic[i,j]} \quad \text{sinon}$$

Tableau 15 : paramètres liés à la lumière dans la colonne d'eau				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{LAI}$	Coefficient de conversion du LAI en biomasse de feuille	LAI_2_LBiom	$g.m^{-2}$	18.87
$IcIk_{evap,x0}$	Coefficient de réduction de l'évapotranspiration lié à la fermeture des stomates	IcIk_evap_x0	-	5.0

## 9.4 Variables de forçages internes

### 9.4.1 Teneur en eau

La teneur en eau des feuilles ( $WC_{leaf}$ ) est calculée de manière similaire à celle indiquée par Azevedo *et al.* (2017)

Pour  $H_{wat}[i, j] \leq H_{wat, crit}$  :

$$(Eq. 20.1) \quad \frac{\partial WC_{leaf}[i, j]}{\partial t} = WC_{leaf}[i, j] \cdot Evap[i, j] \cdot \frac{K_{evap}}{3600} \cdot dt$$

Pour  $WC_{leaf}[i, j] = 1$  :

$$(Eq. 20.2) \quad \frac{\partial WC_{leaf}[i, j]}{\partial t} = 0$$

Sinon, :

$$(Eq. 21.1) \quad K_h[i, j] = K_{humid}(1 - WC_{leaf}[i, j]) \quad \text{Si } K_{humid, x0} = 0$$

$$(Eq. 21.2) \quad K_h[i, j] = K_{humid} \frac{e^{K_{humid, x0}(1 - WC_{leaf}[i, j])} - 1}{e^{K_{humid, x0}} - 1} \quad \text{Sinon}$$

$$(Eq. 20.3) \quad \frac{\partial WC_{leaf}[i, j]}{\partial t} = \frac{K_h[i, j]}{3600} dt$$

$WC_{leaf}[i, j]$  est finalement calculé :

$$(Eq. 22) \quad WC_{leaf}[i, j] = \frac{\partial WC_{leaf}[i, j]}{\partial t} + WC_{leaf}[i, j]$$

Tableau 16 : Paramètres liés à la teneur en eau				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{evap}$	Coefficient de relation entre l'évaporation et la perte de teneur en eau des feuilles	Kevap	-	-0.1
$K_{humid}$	Coefficient d'humidification	Khumid	Heure <sup>-1</sup>	100
$K_{humid, x0}$	Coefficient d'humidification effective	Khumid_x0	-	-5.0

### 9.4.2 Réduction photosynthétique liée à la dessiccation

$$(Eq. 23.1) \quad K_{light, dessic}[i, j] = 1 \quad \text{si } WC_{leaf}[i, j] \geq WC_{leaf, dessic}$$

$$(Eq. 23.2) \quad K_{light, dessic}[i, j] = \frac{e^{\frac{WC_{leaf}[i, j]}{WC_{leaf, dessic}} C_{leaf, dessic}} - 1}{e^{C_{leaf, dessic}} - 1} \quad \text{sinon, si } C_{leaf, dessic} \neq 0$$

$$(Eq. 23.3) \quad K_{light, dessic}[i, j] = \frac{WC_{leaf}[i, j]}{WC_{leaf, dessic}} \quad \text{sinon}$$

Tableau 17 : Paramètres liés à réduction photosynthétique à cause de la dessiccation				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$WC_{leaf,dessic}$	Teneur en eau minimales pour la réduction photosynthétique liée à la dessiccation	WC_Ldessic	-	0.85
$C_{leaf,dessic}$	Coefficient de réduction de la photosynthétique liée à la dessiccation	CLleaf_dessic	-	5

### 9.4.3 Teneur en chlorophylle

La teneur en chlorophylle ( $C_{chloro,leaf}$ ) est calculée à partir de la lumière moyenne reçue ( $I_{chloro}$ ) au cours des  $dt_{chloro}$  derniers jours :

$$(Eq. 24) \quad C_{chloro,leaf} = PAR2_{chloro,x1} \cdot I_{chloro} + PAR2_{chloro,x0}$$

Tableau 18 : Paramètres liés à la teneur en chlorophylle				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$PAR2_{chloro,x0}$	Coefficient de compensation de l'intensité lumineuse	PAR_2_Chloro_x0	-	-0.1
$PAR2_{chloro,x1}$	Coefficient d'atténuation de l'intensité lumineuse	PAR_2_Chloro_x1	-	100

### 9.4.4 Atténuation lumineuse par auto-ombrage

L'atténuation lumineuse par l'auto-ombrage est calculée à partir du rayonnement photosynthétiquement actif ( $PAR$ ) :

Pour  $H_{wat}[i,j] > H_{wat,crit}$  :

$$(Eq. 25.1) \quad PAR[i,j] = PAR[i,j] \exp(-2 LAI[i,j] \cdot K_{Im,selfsh})$$

Pour  $H_{wat}[i,j] \leq H_{wat,crit}$  et  $LAI \geq 1$  :

$$(Eq. 25.2) \quad PAR[i,j] = PAR[i,j] \frac{K_{Em,selfsh}}{LAI[i,j]}$$

Sinon

$$(Eq. 25.3) \quad PAR[i,j] = PAR[i,j]$$

Avec l'indice de surface foliaire ( $LAI$ ), calculé :

$$(Eq. 26) \quad LAI[i,j] = \frac{B_{leaf,tot}[i,j]}{K_{LAI}}$$

Tableau 19 : Paramètres liés à l'atténuation lumineuse par auto-ombrage				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{LAI}$	Coefficient de conversion du LAI en biomasse de feuille	LAI_2_LBiom	$g.m^{-2}$	18.87
$K_{Em,selfsh}$	Coefficient d'efficacité du LAI durant l'émersion	Klai_self_shading_em	-	1.0
$K_{Im,selfsh}$	Coefficient d'efficacité du LAI durant l'immersion	Klai_self_shading_im	-	0.020

#### 9.4.5 Atténuation lumineuse par les épiphytes

L'atténuation lumineuse due à la présence d'épiphytes est calculée à partir de Plus *et al.* (2003), dans le cas où la biomasse épiphytique ( $B_{epi}$ ) et foliaire ( $B_{leaf}$ ) soient non-nulles

$$(Eq. 27) \quad PAR[s, i, j] = PAR[i, j] \exp\left(-K_{epi} \frac{B_{epi}[s, i, j]}{B_{leaf}[s, i, j]}\right)$$

Tableau 20 : Paramètres liés à l'atténuation lumineuse due à la présence d'épiphytes				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{epi}$	Coefficient d'atténuation lumineuse lié à la présence d'épiphytes	Kepiphytes	$g.m^{-2}$	4.8

#### 9.4.6 Intensité lumineuse de compensation et de saturation

La fonction utilisée pour le calcul de l'intensité lumineuse de compensation ( $I_c$ ) et de saturation ( $I_k$ ) est identique. Dans cette fonction, la variable faisant référence indifféremment soit à  $I_c$  ou  $I_k$  sera alors nommée  $I_{kIc}$ .

L'intensité lumineuse de compensation et de saturation peuvent être calculées de différentes manières, selon la méthode ( $TYPE_{I_{kIc}}$ ) choisie. :

Pour  $TYPE_{I_{kIc}} = 0$ , méthode constante

$$(Eq. 28.1) \quad I_{kIc}[i, j] = I_{kIc_{cst}}$$

Pour  $TYPE_{I_{kIc}} = 1$ , méthode basée sur la date (Plus *et al.*, 2003)

$$(Eq. 28.2) \quad I_{kIc}[i, j] = \frac{1}{2}(I_{kIc_{min}} + I_{kIc_{max}}) + \frac{1}{2}(I_{kIc_{min}} - I_{kIc_{max}}) \cos\left(2\pi \frac{Day_{year} - Day_{I_{kIc_{max}}}}{365}\right)$$

Ici,  $Day_{Year}$  fait référence au  $J^{ème}$  jour de l'année.



Enfin, pour  $TYPE_{IkIc} = 2$ , méthode basée sur la teneur en chlorophylle :

$$(Eq. 28.3) \quad IkIc[i, j] = IkIc_{min} \quad \text{pour } C_{chloro,leaf}[i, j] > C_{chloro,IcIc_{min}}$$

$$(Eq. 28.4) \quad IkIc[i, j] = IkIc_{max} \quad \text{pour } C_{chloro,leaf}[i, j] < C_{chloro,IcIc_{max}}$$

Sinon et si  $C_{chloro,IcIc_{x0}} = 0$  :

$$(Eq. 28.5) \quad IkIc[i, j] = IkIc_{max} + \frac{(C_{chloro,leaf}[i, j] - C_{chloro,IcIc_{max}})}{(C_{chloro,IcIc_{min}} - C_{chloro,IcIc_{max}})} (IkIc_{min} - IkIc_{max})$$

Sinon :

$$(Eq. 28.6) \quad IkIc[i, j] = IkIc_{min} + DIcIk \frac{\exp(x C_{chloro,IcIc_{x0}}) - 1}{\exp(C_{chloro,IcIc_{x0}}) - 1}$$

Avec,

$$(Eq. 29) \quad Dc = C_{chloro,IcIc_{min}} - C_{chloro,IcIc_{max}}$$

$$(Eq. 30) \quad DIcIk = IkIc_{max} - IkIc_{min}$$

$$(Eq. 31) \quad x = 1 - \frac{C_{chloro,leaf}[i, j] - C_{chloro,IcIc_{max}}}{Dc}$$

Tableau 21 : Paramètres liés aux intensités lumineuses de compensation et de comparaison				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Ic_{max}$	Intensité lumineuse de compensation max	Ic_max	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	80
$Ic_{min}$	Intensité lumineuse de compensation min	Ic_min	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	20
$Ic_{cst}$	Intensité lumineuse de compensation constante	Ic_cst	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	48
$Ik_{max}$	Intensité lumineuse de saturation max	Ik_max	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	380
$Ik_{min}$	Intensité lumineuse de saturation min	Ik_min	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	175
$Ik_{cst}$	Intensité lumineuse de saturation constante	Ik_cst	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	280
$C_{chloro,IcIc_{max}}$	Teneur en chlorophylle pour laquelle $Ik/Ic = Ik_{max}/Ic_{max}$	Chloro_IcIk_max	-	3.0
$C_{chloro,IcIc_{min}}$	Teneur en chlorophylle pour laquelle $Ik/Ic = Ik_{min}/Ic_{min}$	Chloro_IcIk_min	-	7.0
$C_{chloro,Ic_{x0}}$	Coefficient exponentiel de la teneur en chlorophylle	Chloro_Ic_x0	-	0
$C_{chloro,Ik_{x0}}$	Coefficient exponentiel de la teneur en chlorophylle	Chloro_Ik_x0	-	0
$Day_{Ic_{max}}$	Jour de l'année ayant l'intensité lumineuse de compensation max	day_Icmax	-	115
$Day_{Ik_{max}}$	Jour de l'année ayant l'intensité lumineuse de saturation max	day_Ikmax	-	115

### 9.4.7 Intervalle plastochrone

(Eq. 32) 
$$\Delta_{plast}[i,j] = K_{plastC0,leaf} \exp(K_{plastC1,leaf} \theta_{plast}[i,j])$$

Cependant, si  $\Delta_{plast}$  dépasse  $\Delta_{plast,max}$  :

(Eq. 33) 
$$\Delta_{plast}[i,j] = \Delta_{plast,max}$$

Un facteur correctif est ensuite appliqué à l'intervalle plastochrone:

(Eq. 34) 
$$\Delta_{plast}[i,j] = \Delta_{plast}[i,j] K_{plastCx,leaf}$$

Tableau 22 : Paramètres liés à l'intervalle plastochrone				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$\Delta_{plast,max}$	Valeur maximale de l'intervalle plastochrone	leaf_plast_max	Jour	40
$K_{plastC0,leaf}$	Coefficient multiplicateur pour le calcul de l'intervalle plastochrone	leaf_plast_C0	-	13
$K_{plastC1,leaf}$	Puissance pour le calcul de l'intervalle plastochrone	leaf_plast_C1	-	- 0.002
$K_{plastCx,leaf}$	Coefficient multiplicateur de l'intervalle plastochrone	leaf_plast_Cx		0.75

## 9.5 Production de biomasse

### 9.5.1 Production de biomasse liée à la température

$$(Eq. 35.1) \quad P_{biom,\theta}[i,j] = P\theta_{k0} \left( \frac{\theta_{p0,biom} - \theta[i,j]}{\theta_{p0,biom}} \right)^{SP\theta_{a0}} \quad \text{Pour } \theta[i,j] \leq \theta_{p0,biom}$$

$$(Eq. 35.2) \quad P_{biom,\theta}[i,j] = P\theta_{k1} \left( \frac{\theta[i,j] - \theta_{p0,biom}}{\theta_{pmax,biom} - \theta_{p0,biom}} \right)^{SP\theta_{a1}} \quad \text{Sinon}$$

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$P\theta_{k0}$	Coefficient multiplicatif du taux de production à 0°C	Ptemp_k0	-	0.15
$P\theta_{k1}$	Coefficient multiplicatif du taux de production à $\theta_{pmax,biom}$	Ptemp_k1	-	1.5
$\theta_{p0,biom}$	Température du taux de production de biomasse optimal	Tp0_biom	°C	19.4
$\theta_{pmax,biom}$	Température maximale du taux de production de biomasse	Tpmax_biom	°C	35.0
$SP\theta_{a0}$	Coefficient directeur de la fonction de production lorsque $\theta \leq \theta_{p0,biom}$	SPtemp_a0	-	0.7
$SP\theta_{a1}$	Coefficient directeur de la fonction de production lorsque $\theta_{p0,biom} < \theta \leq \theta_{pmax,biom}$	SPtemp_a1	-	1.1

### 9.5.2 Production de biomasse liée à la lumière

$$(Eq. 36.1) \quad P_{biom,light}[s,i,j] = 0 \quad \text{Pour } PAR[s,i,j] \leq I_c$$

$$(Eq. 36.2) \quad P_{biom,light}[s,i,j] = \tanh\left(\frac{PAR[s,i,j] - I_c[i,j]}{I_k[i,j] - I_c[i,j]}\right) \quad \text{Sinon}$$

La production de biomasse est corrigée pour prendre en compte la dessiccation :

$$(Eq. 37) \quad P_{biom,light}[s,i,j] = P_{biom,light}[s,i,j] K_{light,dessic}[i,j]$$

Avec  $K_{light,dessic}$  défini en 1.4.2

### 9.5.3 Production de biomasse liée à l'âge

Si la méthode 0 ( $Method_{A,prod} = 0$ ) de Verhagen and Nienhuis 1983 :

$$(Eq. 38.1) \quad P_{biom,age}[S, i, j] = K0_{A,shoot} + \frac{1 - K0_{A,shoot}}{1 + \left(\frac{A_{shoot}[S, i, j]}{A_{shoot,adult}}\right)^2}$$

Sinon la méthode 1 est utilisée:

$$(Eq. 38.2) \quad P_{biom,age}[S, i, j] = \frac{1}{1 + e^{-xa[s, i, j] \cdot Sig0}} + (1 - y_{min})$$

Avec,

$$(Eq. 39) \quad xa[s, i, j] = 1 - \left(\frac{A_{shoot}[S, i, j]}{A_{shoot,adult} \cdot K1_{A,shoot}}\right)$$

$$(Eq. 40) \quad y_{min} = \frac{1}{1 + e^{-Sig0}}$$

**Tableau 24 : Paramètres liés à la production de biomasse due à l'âge**

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Method_{A,prod}$	Méthode utilisée pour calculer la production de biomasse liée à l'âge	zost_prod_age_method	-	1
$K0_{A,shoot}$	Coefficient multiplicateur utilisé dans la méthode 0	Shoot_age_PAcoef	-	0.3
$K1_{A,shoot}$	Coefficient multiplicateur utilisé dans la méthode 1	zost_shoot_age_matcoef	-	2.0
$Sig0$	Coefficient de forme de la fonction sigmoïde utilisée dans la méthode 1	zost_shoot_age_sig0	-	6.0
$A_{shoot,adult}$	Age d'un pied mature	shoot_age_mature	Jours	30

## 9.6 Fonctions liées à la respiration

### 9.6.1 Respiration des feuilles et de racines due à la température

$$(Eq. 41) \quad R_{\theta}[i, j] = R0 K_{R0}^{\theta[i, j] - \theta_{R0}}$$

Tableau 25 : Paramètres liés à la respiration due à la température				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$R0_{leaf}$	Taux de respiration des feuilles à $\theta_{R0,leaf}$	Rleaf0	$Jour^{-1}$	0.1
$\theta_{R0,leaf}$	Température de référence pour la respiration des feuilles	Temp_Rleaf0	°C	21.0
$K_{R0,leaf}$	Coefficient multiplicateur pour la respiration des feuilles	Coef_Rleaf0	-	1.2
$R0_{root}$	Taux de respiration des racines à $\theta_{R0,leaf}$	Rroot0	$Jour^{-1}$	0.04
$\theta_{R0,root}$	Température de référence pour la respiration des racines	Temp_Rroot0	°C	22.6
$K_{R0,root}$	Coefficient multiplicateur pour la respiration des racines	Coef_Rroot0	-	1.25

## 9.7 Mortalité

### 9.7.1 Mortalité liée à l'âge des pieds

Deux  $TYPE_{age, Mleaf}$  correspondants à différentes méthodes de calcul

Pour  $TYPE_{age, Mleaf} = 0$ , c'est-à-dire le cas linéaire :

$$(Eq. 42.1) \quad M_{biom,age}[s, i, j] = 0.0 \quad \text{si } A_{shoot}[s, i, j] \leq A_{shoot,adult}$$

$$(Eq. 42.2) \quad M_{biom,age}[s, i, j] = \frac{A_{shoot}[s, i, j] - A_{shoot,adult}}{A_{s,max} - A_{shoot,adult}} \quad \text{sinon}$$

Autrement, pour  $TYPE_{age, Mleaf} = 1$  :

$$(Eq. 42.3) \quad M_{biom,age}[s, i, j] = 0.0 \quad \text{si } A_{tmp}[s, i, j] \leq 0$$

$$(Eq. 42.4) \quad M_{biom,age} [s, i, j] = \frac{1 - \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{A_{tmp}}{K_{age,x1} \cdot A_{shoot,adult}} \right)^2} \right)}{M_{max}} \quad \text{sinon}$$

Avec,

$$(Eq. 43) \quad A_{tmp}[s, i, j] = A_{shoot}[s, i, j] - K_{age,x0} A_{shoot,adult}$$

$$(Eq. 44) \quad M_{age,tmp} = A_{shoot,max} - (K_{age,x0} A_{shoot,adult})$$

$$(Eq. 45) \quad M_{max} = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{M_{age,tmp}}{K_{age,x1} A_{shoot,adult}} \right)^2}$$

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{age,x0}$	Coefficient de compensation : Fraction de $A_{s,adult}$	Cmort_age0	-	0.7
$K_{age,x1}$	Coefficient directeur	Cmort_age1	-	1.0
$A_{shoot,adult}$	Age de maturité d'un pied	shoot_age_mature	jour	30
$A_{shoot,max}$	Age maximum d'un pied	shoot_age_max	jour	120

### 9.7.2 Mortalité des feuilles et des racines liée à la température

$$(Eq. 46) \quad M_{\theta} = M_0 K_{M_0}^{\theta - \theta_{M_0}}$$

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$M_{0,leaf}$	Taux de mortalité des feuilles à $\theta_{M_0,leaf}$	Mleaf0	jour <sup>-1</sup>	0.018
$\theta_{M_0,leaf}$	Température de référence pour la mortalité des feuilles	Temp_Mleaf0	°C	20.0
$K_{M_0,leaf}$	Coefficient multiplicateur pour la mortalité des feuilles	Coef_Mleaf0	-	1.2
$M_{0,root}$	Taux de mortalité des racines à $\theta_{M_0,leaf}$	Mroot0	jour <sup>-1</sup>	0.005
$\theta_{M_0,root}$	Température de référence pour la mortalité des racines	Temp_Mroot0	°C	20.0
$K_{M_0,root}$	Coefficient multiplicateur pour la mortalité des racines	Coef_Mroot0	-	1.15

### 9.7.3 Mortalité liée à l'hydrodynamique

Le calcul préalable d'un certain nombre de paramètres est nécessaire pour le calcul de ce taux de mortalité :

$$(Eq. 47) \quad Sect_{leaf}[i, j] = 1000 W_{leaf}[i, j] \cdot 1000 T_{leaf}[i, j]$$

Titre du rapport : ARCADE – Approche intégrée du fonctionnement hydro-bio-sédimentaire du Bassin d'Arcachon : Dynamiques et Evolutions ; Rapport final 2020-2023, Tâche 3 -

31.05.2024

Page 150 sur 181

$$(Eq. 48) \quad \tau_{crit}[i, j] = K_{\tau_{crit}} K_{sect2\tau_{crit}, x0} (Sect_{leaf}[i, j])^{K_{sect2\tau_{crit}, x1}}$$

La mortalité induite par l'hydrodynamique utilise les vitesses moyennes d courants dans la colonne d'eau ( $U_{curr}$  ;  $V_{curr}$ ). Les vitesses 3D ont donc besoin d'être moyennées sur la verticale.

$$(Eq. 49) \quad UV_{curr}[i, j] = \sqrt{U_{can}^2[i, j] + V_{can}^2[i, j]}$$

$$(Eq. 50) \quad UV_{wave}[i, j] = \sqrt{U_{wave}^2[i, j] + V_{wave}^2[i, j]}$$

$$(Eq. 51) \quad C_d[i, j] = 0.0474 \left( \frac{Z_{0leaf}}{H_{wat}[i, j]} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$(Eq. 52) \quad \tau_{curr,0}[i, j] = \rho_{wat} C_d[i, j] UV_{curr}^2[i, j]$$

$$(Eq. 53) \quad f_w[i, j] = 1.39 \left( \frac{UV_{wave}[i, j] T_p[i, j]}{2\pi Z_{0leaf}} \right)^{-0.52}$$

$$(Eq. 54) \quad \tau_{wave}[i, j] = \frac{1}{2} \rho_{wat} f_w[i, j] UV_{wave}^2[i, j]$$

$$(Eq. 55) \quad \tau_{curr}[i, j] = \tau_{curr,0}[i, j] \left( 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_{wave}[i, j]}{\tau_{wave}[i, j] + \tau_{curr,0}[i, j]} \right)^{3.2} \right)$$

$$(Eq. 56) \quad \alpha[i, j] = \arccos \left( \frac{V_{can}[i, j]}{UV_{curr}[i, j]} \right)$$

$$(Eq. 57) \quad \beta[i, j] = \arccos \left( \frac{V_{wave}[i, j]}{UV_{wave}[i, j]} \right)$$

$$(Eq. 58) \quad \tau_{tot}[i, j] = \frac{\sqrt{(\tau_{curr}[i, j] + \tau_{wave}[i, j] \cdot |\cos(\alpha[i, j] - \beta[i, j])|)^2 + (\tau_{wave}[i, j] \cdot |\sin(\alpha[i, j] - \beta[i, j])|)^2}}$$

La mortalité due à l'hydrodynamique ( $M_{biom,hydro}$ ) peut alors être calculée :

$$(Eq. 59.1) \quad M_{biom,hydro}[i, j] = 0 \quad \text{pour } H_{wat}[i, j] \leq H_{wat,crit} \text{ ou } L_{leaf}[i, j] = 0$$

$$(Eq. 59.2) \quad M_{biom,hydro}[i, j] = 0 \quad \text{pour } \tau_{tot}[i, j] \leq \tau_{crit}[i, j]$$

$$(Eq. 59.3) \quad M_{biom,hydro}[i, j] = \frac{CM_{leaf,hydro}}{86400} \left( \frac{\tau_{tot}}{\tau_{crit}} - 1 \right)^{KM_{leaf,hydro}} \quad \text{sinon}$$

Tableau 28 : Paramètres liés à la mortalité due à l'hydrodynamique				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{\tau crit}$	Coefficient multiplicateur pour la contrainte critique de rupture des feuilles	Ctaucrit	-	0.000005
$CM_{leaf,hydro}$	Taux de perte lié à l'hydrodynamique	CMleaf_hydro	jour <sup>-1</sup>	0.08
$KM_{leaf,hydro}$	Puissance pour le taux de perte lié à l'hydrodynamique	CMleaf_hydro_pow	-	2.8
$K_{sect2\tau crit,x0}$	Coefficient multiplicateur pour le calcul de la contrainte critique de rupture à partir de la section de feuille	sect2taucr_x0	-	6.26
$K_{sect2\tau crit,x1}$	Puissance pour le calcul de la contrainte critique de rupture à partir de la section de feuille	sect2taucr_x1	-	1.05
$Z0_{leaf}$	Longueur de rugosité des feuilles	Z0leaf	m	0.0005

#### 9.7.4 Mortalité liée à la dessiccation

$$(Eq. 60.1) \quad M_{biom,dessic}[i,j] = 0 \quad \text{si } WC_{leaf}[i,j] \geq WC_{M,dessic}$$

Sinon et si  $KM_{leaf,dessic} = 0$

$$(Eq. 60.2) \quad M_{biom,dessic}[i,j] = M_{max,dessic} + WC_{leaf}[i,j] \frac{-M_{max,dessic}}{WC_{M,dessic}}$$

$$(Eq. 60.3) \quad M_{biom,dessic} = M_{max,dessic} \frac{\exp\left(KM_{leaf,dessic} \cdot \left(1 - \frac{WC_{leaf}[i,j]}{WC_{M,dessic}}\right)\right) - 1}{e^{KM_{leaf,dessic} - 1}} \quad \text{sinon}$$

Tableau 29 : Paramètres liés à mortalité due à la dessiccation				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$KM_{leaf,dessic}$	Coefficient pour le taux de mortalité dû à la dessiccation	CMleaf_dessic	-	5.0
$M_{max,dessic}$	Taux de mortalité maximal dû à la dessiccation	Mmax_dessic	jour <sup>-1</sup>	0.1
$WC_{M,dessic}$	Teneur en eau minimale des feuilles pour rester en vie	WC_Mdessic	-	0.85



## 9.8 Évolution des pieds et de leurs feuilles

### 9.8.1 Calcul du taux de production de pieds en lien avec la biomasse racinaire

$$(Eq. 61) \quad P_{shoot,root}[i,j] = \frac{B_{root,tot}[i,j]}{(B_{root,tot}[i,j] + K_{root,Snew})}$$

Tableau 30 : Paramètres liés au calcul du nombre de pieds en lien avec la biomasse				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$K_{root,Snew}$	Pondération de la biomasse racinaire limitant la création d'un nouveau pied	Kroot_nshoot	-	10.0

### 9.8.2 Calcul du taux de production de nouveaux pieds en lien avec la température

$$(Eq. 62.1) \quad P_{shoot,\theta}[i,j] = 0 \quad \text{Pour } \theta[i,j] < \theta_{Snew}$$

$$(Eq. 62.2) \quad P_{shoot,\theta}[i,j] = \frac{\theta[i,j] - \theta_{Snew}}{(K_{\theta,Snew} + \theta[i,j] - \theta_{Snew})} \quad \text{Sinon}$$

Tableau 31 : Paramètres liés au calcul du nombre de nouveaux pieds en lien avec la température				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$\theta_{Snew}$	Température minimale pour la création d'un nouveau pied	Temp_nshoot0	°C	6.0
$K_{\theta,Snew}$	Coefficient pour la création d'un nouveau pied	Ktemp_nshoot	-	3.0

### 9.8.3 Calcul du taux de production de nouveaux pieds en lien avec la lumière

$$(Eq. 63) \quad P_{shoot,light}[i,j] = P_{biom,light}[i,j]$$

### 9.8.4 Production de feuilles liée à la lumière

$$(Eq. 64.1) \quad P_{leaf,light}[s,i,j] = P_{biom,light}[s,i,j] B_{leaf,max,Em} \quad \text{pour } H_{wat}[i,j] \leq H_{wat,crit}$$

$$(Eq. 64.2) \quad P_{leaf,light}[s,i,j] = P_{biom,light}[s,i,j] B_{leaf,max,Im} \quad \text{sinon}$$

Tableau 32 : Paramètres liés à la production de feuilles en lien				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$B_{leaf,max,Em}$	Production de biomasse maximale durant l'émersion	pmax_biom_Em	jour <sup>-1</sup>	0.7
$B_{leaf,max,m}$	Production de biomasse maximale durant la phase d'immersion	pmax_biom_Im	jour <sup>-1</sup>	0.7

## 9.8.5 Fonctions liées à la translocation de biomasse

### 9.8.5.1 Translocation des feuilles vers les racines (L2R)

$$(Eq. 65) \quad Tr_{L2R}[s, i, j] = Tr_{L2R,R0}$$

### 9.8.5.2 Translocation des racines vers les feuilles (R2L)

$$(Eq. 66) \quad Tr_{R2L}[s, i, j] = \frac{Tr_{R2L,tmp} BR_s[s, i, j]}{B_{root,tot}[i, j]}$$

Avec,

$$(Eq. 67) \quad Tr_{R2L,tmp} = Tr_{R2L,T0} \frac{(Tr_{R2L,\theta c}^{Tr_{R2L,p} + \theta} Tr_{R2L,p})}{Tr_{R2L,\theta c}^{Tr_{R2L,p}}}$$

$$(Eq. 68) \quad BR_s[s, i, j] = \frac{B_{root,tot}[i, j] D_{shoot}[s, i, j]}{D_{shoot,tot}[i, j]}$$

### 9.8.5.3 Correction de la translocation de biomasse des racines vers les feuilles liée à l'âge des pieds

$$(Eq. 69.1) \quad Tr_{R2L,age}[s, i, j] = 1 \quad \text{si } A_{shoot}[s, i, j] \leq A_{s,Adult}$$

Sinon

$$(Eq. 69.2) \quad Tr_{R2L,age}[s, i, j] = x \quad \text{si } C_{age,x0} = 0$$

$$(Eq. 69.3) \quad Tr_{R2L,age}[s, i, j] = \frac{e^{x C_{age,x0} - 1}}{e^{C_{age,x0} - 1}} \quad \text{sinon}$$

Avec,

$$(Eq. 70) \quad x = \frac{A_{shoot,max} - A_{shoot}[s, i, j]}{A_{shoot,max} - A_{s,Adult}}$$

Finalement,

$$(Eq. 71) \quad Tr_{R2L}[s, i, j] = Tr_{R2L}[s, i, j] \cdot Tr_{R2L,age}$$

**Tableau 33 : Paramètres liés à translocation**

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Tr_{L2R,R0}$	Taux de translocation des feuilles vers les racines	TrL2R_R0	-	0.4
$Tr_{R2L,T0}$	Taux de translocation minimal	TrR2L_T0	-	0.007
$Tr_{R2L,\theta c}$	Température caractéristique	TrR2L_Tc	°C	20.3
$Tr_{R2L,p}$	Coefficient directeur	TrR2L_p	-	3.0
$C_{age,x0}$	Coefficient pour la correction de la translocation liée à l'âge	TrR2L_age_x0	-	-2.0

## 9.9 Production et germination de graines

### 9.9.1 Graines produites

#### 9.9.1.1 Production de graines en lien avec l'hydrodynamique

La production de graines liée à l'hydrodynamique est calculé à partir du stress hydrodynamique ( $\tau_{tot}$ ), calculé en 1.7.3 :

$$(Eq. 72) \quad P_{seed,hydro}[i,j] = \tau_{tot}[i,j] C_{repro,hydro}$$

#### 9.9.1.2 Production de graines en lien avec la durée d'une journée

Le taux de floraison des zostères s'écrit :

$$(Eq. 73) \quad Seed_{flowering}[i,j] = Day_{len,seed} C_{seed,ESRmax} P_{biom,\theta}[i,j] M_{biom,hydro,adult}[i,j] P_{seed,hydro}[i,j]$$

Où  $M_{biom,hydro,adult}$  est la mortalité hydrodynamique des pieds matures, comme calculée en 1.7.3 mais pour les pieds matures.  $Day_{len,seed}$  est l'effort maximal pour la reproduction sexuée à 0°C, obtenu par :

$$(Eq. 74) \quad Day_{len,seed} = \frac{\max(Day_{len}-14;0)}{1.57}$$

Avec,  $Day_{len}$  calculé à partir de la formulation de Forsythe et al., (1995) :

$$(Eq. 75) \quad Day_{len} = 24 - \frac{24}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\sin(0.833 \frac{\pi}{180}) + \sin(\frac{lat-\pi}{180}) \sin(declinangle)}{\cos(\frac{lat-\pi}{180}) \cos(declinangle)} \right)$$

$$(Eq. 76) \quad declinangle = \sin^{-1}(0.39795 \cos(revolangle))$$

$$(Eq. 77) \quad revolangle = 0.2163108 + 2 \tan^{-1}(0.9671396 \tan(0.0086(Day_{jul} - 186.0)))$$

Enfin, le nombre de graines produites est calculé par :

Si  $B_{shoot,adult} > B_{leaf,min,seed}$  :

$$(Eq. 78.1) \quad P_{seed}[i,j] = Seed_{flowering}[i,j] B_{shoot,adult} F_{init}[i,j] \frac{dt}{86400}$$

Sinon

$$(Eq. 78.2) \quad P_{seed}[i,j] = 0.0$$

Tableau 34 : Paramètres liés à la production de graines				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$C_{seed,ESRmax}$	Effort maximum de reproduction sexuée à 0°C	c_seed_ESRmax	-	N/A
$B_{leaf,min,seed}$	Biomasse de feuilles minimum pour la production de graine	c_seed_LBiom_min	$gPs.m^{-2}$	N/A
$C_{repro,hydro}$	Coefficient multiplicateur appliqué aux contraintes de cisaillement pour la génération de pieds reproducteurs	Repro_hydro_x0	-	1

### 9.9.2 Libération de graines dans l'eau

La concentration en graines dans la colonne d'eau est donnée par :

$$(Eq. 79) \quad cv_{seed,wat}(k, i, j) = \frac{P_{seed}[i,j]}{dz(khcan,i,j)}$$

Avec,  $khcan$  le minimum entre le numéro de couche correspondant au sommet de la canopée et la couche maximale.

### 9.9.3 Mortalité des graines dans l'eau

La mortalité des graines dans l'eau est calculée pour chaque couche de la colonne d'eau :

$$(Eq. 80) \quad M_{seed,wat} = M_{seed} cv_{seed,wat}(k, i, j) \frac{dt}{86400}$$

Où, est la concentration de graines dans l'eau ( $cv_{wat}$ ) est donnée par :

$$(Eq. 81) \quad cv_{seed,wat}(k, i, j) = cv_{seed,wat}(k, i, j) - M_{seed,wat}$$

### 9.9.4 Mortalité des graines dans le sédiment

Pour chaque couche de sédiment, si la concentration en graine dans le sédiment est non nulle :

$$(Eq. 82) \quad M_{seed,INsed} = M_{seed} cv_{seed,sed}(k, i, j) \frac{dt}{86400}$$

Où, est la concentration de graines dans le sédiment ( $cv_{sed}$ ) est donnée par :

$$(Eq. 83) \quad cv_{seed,sed}(k, i, j) = cv_{seed,sed}(k, i, j) - M_{seed,INsed}$$

Tableau 35 : Paramètres liés à la mortalité des graines				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$M_{seed}$	Mortalité des graines	c_seed_ESRmax	Seed_mort	0.0001

## 9.10 Évolution de la biomasse d'épiphytes

### 9.10.1 Production d'épiphytes liée à la température

(Eq. 84.1)  $P_{epi,\theta}[i,j] = 0$  pour  $\theta[i,j] < \theta_{p0,epi}$

(Eq. 84.2)  $P_{epi,\theta}[i,j] = 2$  pour  $\theta[i,j] \geq \theta_{p1,epi}$

(Eq. 84.3)  $P_{epi,\theta}[i,j] = (\Omega_{\theta,epi})^{\theta[i,j]-20}$  sinon

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$\Omega_{\theta,epi}$	Taux de croissance des épiphytes avec la température	Omega_temp_epi	-	1.1
$\theta_{p0,epi}$	Température minimale pour la production d'épiphytes	Tp0_epi	°C	10.0
$\theta_{p1,epi}$	Température maximale pour la production d'épiphytes	Tp1_epi	°C	27.0

### 9.10.2 Production d'épiphytes liée à la lumière

(Eq. 85.1)  $P_{epi,light}[i,j] = \tanh\left(\frac{PAR[i,j]}{Ik_{epi}}\right)$

(Eq. 85.2)  $P_{epi,light}[i,j] = P_{epi,light}[i,j] P_{max,Em}$  pour  $H_{wat}[i,j] \leq H_{wat,crit}$

(Eq. 85.3)  $P_{epi,light}[i,j] = P_{epi,light}[i,j] P_{max,Im}$  sinon

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Ik_{epi}$	Intensité lumineuse de saturation reçue par les épiphytes	Ik_epi	$\mu\text{mol photon}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	182.0
$P_{max,Em}$	Taux de production de biomasse d'épiphytes max	pmax_epi_em	$\text{jour}^{-1}$	0.05
$P_{max,Im}$	Taux de production de biomasse d'épiphytes max	pmax_epi_im	$\text{jour}^{-1}$	0.30

### 9.10.3 Respiration des épiphytes liée à la température

(Eq. 86)  $R_{epi,\theta}[i,j] = R_{epi,0} P_{epi,\theta}[i,j]$

Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$R_{epi,0}$	Taux de respiration des épiphytes	Repi0	$\text{jour}^{-1}$	0.15

## 9.11 Principe de fonctionnement du modèle

Le fonctionnement de ce modèle repose sur deux parties distinctes, une première dans laquelle est effectué le calcul des forçages et des variables pour l'étude de la croissance des zostères et une seconde partie dans laquelle est gérée l'évolution des feuilles et des pieds, que ce soit leur croissance, génération ou disparition.

Les processus en jeu n'intervenant pas tous à la même échelle, le modèle repose sur plusieurs pas de temps, à savoir, le pas de temps global du modèle, un pas de temps relatif à la biomasse et un pas de temps relatif aux pieds, durant lesquels des variables et phénomènes différents sont calculés et modélisés.

### 9.11.1 Mise à jour des forçages

Dans un premier temps, les forçages externes, relatifs à l'environnement dans lequel les zostères évoluent, sont mis-à-jour. Leur actualisation est effectuée à chaque pas de temps du modèle ( $dt_{mod}$ ) pour :

- Niveau d'eau ( $H_{wat}$ )
- Température ( $\theta$ )
- Rayonnement actif pour la photosynthèse ( $PAR$ )
- Humidité relative ( $RH$ )
- Vitesses des courants ( $U_{curr}$  ;  $V_{curr}$ )
- Vitesses orbitales des vagues ( $U_{wave}$  ;  $V_{wave}$ )

### 9.11.2 Calcul des variables du modèle

Les variables relatives aux herbiers sont calculées à partir des forçages externes, suivant le pas de temps auquel elles interviennent. Ainsi, le calcul des variables du modèle est séparé en plusieurs fonctions, chacune intervenant à un pas de temps différent.

#### 9.11.2.1 Calcul des variables intervenant à $dt_{model}$

##### 9.11.2.1.1 Calcul des variables relatives à la teneur en eau

- Évapotranspiration ( $Evap$ ) (cf. 1.3.5)
- Teneur en eau des feuilles ( $WC_{leaf}$ ) (cf. 1.4.1)

##### 9.11.2.1.2 Calcul des variables relatives à la lumière

- La teneur en chlorophylle des feuilles ( $C_{chloro,leaf}$ ) (cf. 1.4.3)
- L'auto-ombrage ( $PAR$ ) (cf. 1.4.4)
- La production d'épiphytes à la lumière ( $P_{epi,light}$ ) (cf. 1.4.5)
- L'intensité lumineuse de compensation ( $I_c$ ) (cf. 1.4.6)
- L'intensité lumineuse de saturation ( $I_k$ ) (cf. 1.4.6)
- L'atténuation de lumière due aux épiphytes des pieds et des feuilles ( $PAR$ ) (cf. 1.4.5)
- Réduction photosynthétique lié à la teneur en eau ( $K_{light,dessic}$ ) (cf. 1.4.2)

#### 9.11.2.1.3 Calcul des paramètres d'évolution liés à la lumière

- Taux de production de biomasse due à la lumière ( $P_{biom,light}$ ) (cf. 1.5.2)
- Taux de production de nouveaux pieds due à la lumière ( $P_{shoot,light}$ ) (cf. 1.8.2)
- Taux de production d'épiphytes due à la lumière ( $P_{epi,light}$ ) (cf.1.10.2)

#### 9.11.2.1.4 Calcul des paramètres d'évolution liés à la température

- Taux de production des feuilles due à la température ( $P_{biom,\theta}$ ) (cf. 1.5.1)
- Taux de respiration des feuilles dus à la température ( $R_{biom,\theta}$ ) (cf. 1.6.1)
- Taux de respiration des racines dus à la température ( $R_{root,\theta}$ ) (cf. 1.6.1)
- Taux de mortalité des feuilles dus à la température ( $M_{biom,\theta}$ ) (cf. 1.7.2)
- Taux de mortalité des racines dus à la température ( $M_{root,\theta}$ ) (cf. 1.7.2)
- Taux de production de nouveaux pieds due à la température ( $P_{shoot,\theta}$ ) (cf. 1.8.2)
- Taux de production d'épiphytes due à la température ( $P_{epi,\theta}$ ) (cf. 1.10.1)
- Respiration des épiphytes due à la température ( $R_{epi,\theta}$ ) (cf. 3.9.3)

#### 9.11.2.1.5 Calcul des paramètres d'évolution liés à l'âge

- Production de biomasse due à l'âge ( $P_{biom,age}$ ) (cf. 1.5.3)
- Mortalité des pieds due à l'âge ( $M_{biom,age}$ ) (cf. 1.7.1)

#### 9.11.2.1.6 Calcul des paramètres d'évolution liée à l'hydrodynamique

- Mortalité due aux conditions hydrodynamiques ( $M_{leaf,hydro}$ ) (cf. 1.7.3)

#### 9.11.2.1.7 Calcul des paramètres d'évolution liés à la dessiccation

- Mortalité due à la dessiccation ( $M_{biom,dessic}$ ) (cf. 1.7.4)

#### 9.11.2.1.8 Calcul des paramètres d'évolution liés à la biomasse racinaire

- Taux de production de nouveaux pieds en considérant la limitation induite par la biomasse racinaire ( $P_{shoot,root}$ ) (cf. 1.8.1)

#### 9.11.2.2 Calcul des variables à dt\_biom

##### 9.11.2.2.1 Calcul des termes de translocation

- Translocation des feuilles vers les racines ( $Tr_{L2R}$ ) (cf. 1.8.5.1)
- Translocation des racines vers les feuilles ( $Tr_{R2L}$ ) (cf. 1.8.5.2)
- Correction de  $Tr_{R2L}$  liée à l'âge ( $Tr_{R2L,age}$ ) (cf. 1.8.5.3)

### 9.11.2.2.2 Calcul des taux de production de feuilles

Taux de production des feuilles

$$(Eq. 87) \quad P_{leaf}^S = P_{biom,\theta}^S \cdot P_{biom,age}^S \cdot P_{biom,light}^S$$

Tableau 39 : Paramètres liés à au taux de production des feuilles				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$P_{max,Em}$	Taux de production maximal de biomasse lors de l'émergence	pmax_biom_Em	$Jour^{-1}$	0.7
$P_{max,Im}$	Taux de production maximal de biomasse lors de l'immersion	pmax_biom_Im	$Jour^{-1}$	0.7

### 9.11.2.2.3 Calcul des taux de pertes de feuilles

Taux de perte de feuilles

(Eq. 88)

$$\Lambda_{leaf}^S = R_{biom,\theta}^S + M_{biom,\theta}^S + M_{biom,age}^S + M_{biom,hydro}^S + M_{biom,dessic}^S + M_{biom,toxic}^S$$

### 9.11.2.2.4 Calcul des taux de pertes de racines

Taux de perte de racine

$$(Eq. 89) \quad \Lambda_{root}^S = R_{root,\theta}^S + M_{root,\theta}^S$$

### 9.11.2.2.5 Calcul du taux de production d'épiphytes

$$(Eq. 90) \quad P_{epi}^S = P_{epi,light}^S + P_{epi,temp}^S$$

### 9.11.2.2.6 Calcul du taux de perte d'épiphytes

(Eq. 91)

$$\Lambda_{epi}^S = R_{epi,temp}^S + M_{epi,temp}^S + M_{biom,\theta}^S + M_{biom,age}^S + M_{biom,hydro}^S + M_{biom,toxic}^S + M_{biom,dessic}^S$$

### 9.11.2.3 Calcul des variables à dt\_shoot

#### 9.11.2.3.1 Calcul de l'intervalle plastochrone

- Calcul de l'intervalle plastochrone ( $\Delta_{plast}$ ) (3.2.3)

#### 9.11.2.3.2 Production de nouveaux pieds

$$(Eq. 92) \quad NB_{shoot} = P_{max} \cdot P_{shoot,\theta} \cdot P_{shoot,light} \cdot P_{shoot,root} \cdot dt_{shoot}$$

$$(Eq. 93) \quad B_{leaf,NBshoot} = NB_{shoot} B_{leaf,new}$$

Où,  $B_{leaf,new}$  correspond à la biomasse d'une nouvelle feuille à son initialisation :

$$(Eq. 94) \quad B_{leaf,new} = 1000 \rho_{dry} L_{leaf,new} T_{leaf,new} W_{leaf,new}$$



Tableau 40 : Paramètres liés à au taux de production des feuilles				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$P_{max}$	Taux de génération de nouveaux pieds	Nbnew_max	$Jour^{-1}$	850
$\rho_{leaf,dry}$	Masse volumique sèche des feuilles	rho_leaf_dry	$kg.m^{-3}$	185

### 9.11.2.3.3 Taux de germination des graines

Pour chaque couche du sédiment (parcouru à partir de la surface) et tant que la profondeur de la couche ( $k_{sed}$ ) est inférieure à une profondeur maximale de germination ( $Seed_{depth,max}$ ), la concentration en graines dans le sédiment est calculée :

$$(Eq. 95) \quad Seed_{INsed} = \sum_{k_{sed} \leq seed_{depth,max}} cv_{seed, sed} (k_{sed})$$

S'il y a plus d'une graine dans le sédiment et que la quantité de lumière moyenne au sein de la canopée sur dtshoot ( $PAR$ ) est supérieure à la quantité de lumière minimale requise pour la germination ( $Seed_{light,min}$ ), un coefficient limitant la germination des graines et reposant sur la biomasse de feuilles est calculée :

$$(Eq. 96.1) \quad Seed_{Germ,lim} = 1 - \left( \frac{B_{leaf}}{B_{leaf,germ,max}} \right)^2 \quad \text{si } B_{leaf,tot} \leq B_{leaf,germ,max}$$

$$(Eq. 96.2) \quad Seed_{Germ,lim} = 0 \quad \text{sinon}$$

Finalement, le taux de germination des graines est exprimé :

$$(Eq. 97.1) \quad Seed_{Germ} = Seed_{germ,max} Seed_{Germ,lim} P_{biom,\theta}$$

Dans le cas où les conditions sur la quantité de graines dans le sédiment et la quantité de lumière au sein de la canopée ne sont pas respectées : , le taux de germination des graines s'écrit :

$$(Eq. 97.2) \quad Seed_{Germ} = 0$$

Rapporté à dtshoot, le taux de germination devient :

$$(Eq. 98) \quad Seed_{Germ,dtshoot} = Seed_{Germ} \frac{dtshoot}{86400}$$

Le nombre de graines qui ont germées à dtshoot ( $N_{seed,germ}$ ):

$$(Eq. 99) \quad NB_{seed,germ} = Seed_{Germ,dtshoot} Seed_{INsed}$$

Le nombre de nouveaux pieds issus de la germination des graines ( $N_{B_{shoot,germ}}$ ):

$$(Eq. 100) \quad N_{B_{shoot,germ}} = \frac{Seed_{Germ,dtshoot}}{Seed_{mass}}$$

Finalement, la biomasse de feuilles ( $B_{leaf,seed}$ ) et de racines ( $B_{root,seed}$ ) obtenues de la germination des nouvelles graines sont calculées :

$$(Eq. 101) \quad B_{leaf,seed}(i,j) = N_{shoot,germ} B_{leaf,new}$$

$$(Eq. 102) \quad B_{root,seed} = N_{shoot,germ} B_{leaf,new} Tr_{L2R}$$

Tableau 41 : Paramètres liés à la germination des graines				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Seed_{depth,max}$	Profondeur maximale pour la germination des graines	Seed_DepthMax	$m$	0.02
$Seed_{light,min}$	Lumière minimum pour la germination des graines	c_seed_LightMin	$\mu molphoto.m^{-2}.s^{-1}$	150
$B_{leaf,germ,max}$	Biomasse de feuilles maximale autorisant la germination	Seed_LBmax	$gPS.m^{-2}$	150
$Seed_{germ,max}$	Taux de germination maximum	Seed_GERMmax	$Jour^{-1}$	0.174
$Seed_{mass}$	Masse d'une seule graine	Seed_Mass	$gPS$	0.0012

#### 9.11.2.3.4 Retrait du sédiment des graines qui ont germées

Pour chaque couche du sédiment (parcouru à partir de la surface) et tant que la profondeur de la couche ( $k_{sed}$ ) est inférieure à une profondeur maximale de germination ( $Seed_{depth,max}$ ), la nouvelle concentration en graines dans le sédiment est calculée :

$$(Eq. 103) \quad cv_{seed,seed}(k_{sed}) = cv_{seed,seed}(k_{sed}) - cv_{seed,seed}(k_{sed}) Seed_{germ,dtshoot}$$

### 9.11.3 Calcul de la variation de biomasse

À chaque  $dt_{biom}$ , la biomasse des pieds des pieds, des racines et d'épiphytes sont mises à jour. Leur calcul reposant sur la résolution d'un système d'équations différentielles, la variation de biomasse est calculée par la méthode d'analyse numérique Runge - Kutta 4.

#### 9.11.3.1 Variation de la biomasse foliaire et racinaire

La variation de biomasse pour un pied de chaque génération, en fonction du temps, s'écrit :

$$(Eq. 104) \quad \frac{dB_{shoot}^S}{dt} = (P_{leaf}^S (1 - Tr_{L2R}^S) - \Lambda_{leaf}^S) B_{shoot}^S + Tr_{R2L}^S B_{root}$$

Et la variation de biomasse racinaire en fonction du temps, s'écrit :

$$(Eq. 105) \quad \frac{dB_{root}}{dt} = \sum_{s=smin}^{smax} (P_{leaf}^S Tr_{L2R}^S B_{shoot}^S D_{shoot}^S - Tr_{R2L}^S B_{root}) - \Lambda_{epi} B_{root} - B_{leaf,NBshoot} + B_{root,seeds}$$

La variation des taux de production et de pertes de biomasse sont obtenus par :

$$(Eq. 106) \quad \frac{dP_{biom}^s}{dt} = P_{leaf}^s (1 - Tr_{L2R}^s) B_{shoot}^s + Tr_{R2L}^s B_{root}$$

$$(Eq. 107) \quad \frac{d\Lambda_{biom}^s}{dt} = \Lambda_{leaf}^s B_{shoot}^s$$

### 9.11.3.2 Variation de la biomasse épiphytique

La variation de la biomasse épiphytique s'écrit :

$$(Eq. 108) \quad \frac{dB_{epi}^{s,l}}{dt} = (P_{epi}^{s,l} - \Lambda_{epi}^{s,l}) B_{epi}^{s,l}$$

## 9.11.4 Mise à jour des pieds et des feuilles

### 9.11.4.1 Mise à jour des feuilles et des pieds à $dt_{biom}$

Dans un premier temps, la variation de biomasse des pieds et des racines qui a lieu à  $dt_{biom}$  est incrémentée à la variation de biomasse qui a lieu à  $dt_{shoot}$  (pas de temps plus large). Il en est de même pour la production et les pertes de biomasse qui ont eu lieu à  $dt_{biom}$ .

L'âge des feuilles ( $A_{leaf}$ ) et des pieds ( $A_{shoot}$ ) est également actualisé en étant incrémenté de  $dt_{biom}$

Les différentes biomasses sont ensuite mises à jour avec la variation de biomasse qui a eu lieu à  $dt_{biom}$

#### 9.11.4.1.1 Biomasse des pieds

$$(Eq. 109) \quad B_{shoot}^s = B_{shoot}^s + \frac{dB_{shoot}^s}{dt}$$

#### 9.11.4.1.2 Biomasse racinaire

$$(Eq. 110) \quad B_{root} = B_{root} + \frac{dB_{root}}{dt}$$

#### 9.11.4.1.3 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne totale s'écrit comme la somme de la biomasse de chaque génération :

$$(Eq. 111) \quad B_{leaf} = \sum_{s=smin}^{s=max} (B_{shoot}^s \cdot D_{shoot}^s)$$

#### 9.11.4.1.4 Résistance à la mortalité

A cause de l'intervention de différents processus biologiques qui n'interviennent pas tous à la même échelle de temps et de faire disparaître un pied qui n'aurait pas dû mourir, une période de résistance à la mortalité est introduite.

La résilience est activée lorsque la biomasse totale de feuilles ( $B_{leaf}$ ) passe sous un seuil critique de biomasse totale minimum ( $B_{leaf,min}$ ) et que la biomasse totale de racines ( $B_{root}$ ) est aussi inférieure à ce seuil de biomasse. Dans ce cas le compteur du temps de résilience  $t_{resilience}$  est initialisé et mis à jour et incrémenté à chaque pas de temps, tant que la période de résilience se poursuit :

$$(Eq. 112) \quad t_{resilience}[i,j] = t_{resilience}[i,j] + \frac{dt_{biom}}{24}$$

Lorsque la résilience est nécessaire et fait survivre le pied alors que celui-ci aurait dû être tuée, un compteur de changement d'état ( $C_{resilience}$ ) est décrémenté :

$$(Eq. 113.1) \quad C_{resilience} = C_{resilience} - 1$$

Dans le cas où la résilience a précédemment été activée mais que la biomasse totale de feuille ( $B_{leaf}$ ) est supérieure au seuil critique ( $B_{leaf,min}$ ), la période résilience se poursuit, mais le compteur de changement est dans ce cas incrémenté :

$$(Eq. 113.2) \quad C_{resilience} = C_{resilience} + 1$$

Lorsque la période de résilience la durée maximale de résilience ( $t_{resilience} \geq t_{resilience,max}$ ), si le compteur de changement d'état est négatif ( $C_{resilience} \leq 0$ ), cela signifie que la résilience été fortement nécessaire pour le maintien en vie du pied en vie. Dans ce cas le pied est tué. Dans le cas contraire où  $C_{resilience} > 0$ , le pied est conservé et sa croissance se poursuit d'elle-même.

Tableau 42 : Paramètres liés à la résilience à la mortalité				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$t_{resilience,max}$	Durée de résilience maximale <i>Eq. 65</i>	Max_resilience	Jour	15

#### 9.11.4.1.5 Réinitialisation de ce qui est mort

La biomasse totale est recalculée avec l'équation 76 (*Eq. 76*). Si la biomasse totale est inférieure à la biomasse minimale, les caractéristiques des herbiers sont remises à zéro dans cette maille.

#### 9.11.4.1.6 Age des feuilles

$$(Eq. 114) \quad A_{shoot}^s = A_{shoot}^s + \frac{dt_{biom}}{24}$$

$$(Eq. 115) \quad A_{leaf}^{s,l} = A_{leaf}^{s,l} + \frac{dt_{biom}}{24}$$

#### 9.11.4.1.7 Biomasse épiphytique

$$(Eq. 116) \quad B_{epi}^{s,l} = B_{epi}^{s,l} + \frac{dB_{epi}^{s,l}}{dt}$$

#### 9.11.4.2 Mise à jour des feuilles et des pieds à $dt_{shoot}$

##### 9.11.4.2.1 Calcul des gains et pertes en terme d'élongation des feuilles

La production et les pertes totales de biomasse qui ont eu lieu au cours de  $dt_{shoot}$  sur chaque pied sont utilisées pour calculer ces gains et pertes en terme de longueur de feuilles. Pour cela, on considère que toutes les feuilles du pied considéré ont la même épaisseur et la même largeur. On peut ainsi calculer l'élongation totale à partir du gain de biomasse absolu du pied ( $B_{gain,shoot}^S$ ), c'est-à-dire la biomasse produite, sans prendre en compte la perte de biomasse résultant de la mortalité.

Pour le gain en termes d'élongation, il vient :

$$(Eq. 117) \quad L_{leaf,gain}^S = \frac{B_{shoot,gain}^S}{1000 \cdot \rho_{leaf,dry} \cdot W_{leaf}^S \cdot T_{leaf}^S}$$

Et pour la perte :

$$(Eq. 118) \quad L_{leaf,loss}^S = \frac{B_{shoot,loss}^S}{1000 \cdot \rho_{leaf,dry} \cdot W_{leaf}^S \cdot T_{leaf}^S}$$

Où  $B_{shoot,gain}^S$  est la biomasse produite calculée Eq. 106 et  $B_{shoot,loss}^S$  la perte de biomasse calculée Eq. 107.

##### 9.11.4.2.2 Conditions pour la création d'une nouvelle feuille

On étudie ensuite si la création d'une nouvelle feuille est possible. Pour cela un certain nombre de conditions doivent être respectées :

- La biomasse à allouer ( $B_{shoot,gain}^S$ ) est supérieure au seuil de biomasse nécessaire à la génération d'une nouvelle feuille ( $B_{leaf,init}$ ) :

$$- \quad B_{shoot,gain}^S \geq B_{leaf,new}$$

- L'intervalle plastochrone est respecté, c'est-à-dire que la plus jeune feuille du pied ( $A_{leaf}^0$ ) est assez ancienne pour permettre la génération d'une nouvelle :

$$- \quad A_{leaf}^{s,0} \geq \Delta_{plast}$$

- Le pied n'est pas trop ancien :

$$- \quad A_{shoot}^S \leq A_{shoot,max} - \frac{1}{2} A_{leaf,adult}$$

- Le nombre maximal de feuilles par pied ne doit pas être excédé

Sous ces conditions, une nouvelle feuille peut-être générée. Dans ce cas, la feuille est générée avec une biomasse ( $B_{leaf,new}$ ) et une longueur initiale ( $L_{leaf,new}$ ), qu'il convient de retirer, respectivement, au gain de biomasse ( $B_{shoot,gain}^S$ ) et d'élongation ( $L_{gain}^S$ ) qui doivent être alloués au reste des feuilles.

À noter que les pertes de biomasse ( $B_{shoot,loss}^S$ ) et d'élongation ( $L_{loss}^S$ ) ne sont pas influencées par la génération d'une nouvelle feuille.

### 9.11.4.2.3 Gain et perte d'élongation liés à l'âge

Le gain et les pertes d'élongation liés à l'âge sont calculés pour chaque feuilles, sauf la plus âgée de chaque pied, afin de prendre en compte la sénescence et favoriser la croissance des feuilles plus récentes.

Si  $C_{leaf,c1} = 0$  :

$$(Eq. 119.1) \quad C_{leaf,gain}^{s,l} = 1 + \frac{A_{leaf}^{s,l}}{A_{leaf,max}} (C_{leaf,c0} - 1)$$

$$(Eq. 120.1) \quad C_{leaf,loss}^{s,l} = C_{leaf,c0} + \frac{A_{leaf}^{s,l}}{A_{leaf,max}} (1 - C_{leaf,c0})$$

Sinon

$$(Eq. 119.2) \quad C_{leaf,gain}^{s,l} = C_{leaf,c0} + y_n \frac{\exp(x2 C_{leaf,c1}) - 1}{\exp(C_{leaf,c1}) - 1}$$

$$(Eq. 120.2) \quad C_{leaf,loss}^{s,l} = C_{leaf,c0} + y_n \frac{\exp(x1 C_{leaf,c1}) - 1}{\exp(C_{leaf,c1}) - 1}$$

Avec,

$$(Eq. 121) \quad x1 = \frac{A_{leaf}^{s,l}}{A_{leaf,max}}$$

$$(Eq. 122) \quad x2 = 1.0 - \frac{A_{leaf}^{s,l}}{A_{leaf,max}}$$

$$(Eq. 123) \quad y_n = 1 - C_{leaf,c0}$$

Enfin, les pertes d'élongation sont normalisées par la longueur des feuilles de chaque pied :

$$(Eq. 124) \quad C_{leaf,loss,len}^{s,l} = \frac{L_{leaf}^{s,l}}{\sum_{l=lmin}^{lmax} L_{leaf}^{s,l}} C_{leaf,loss}^{s,l}$$

Tableau 43 : Paramètres liés à l'élongation des feuilles due à l'âge				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$C_{leaf,c0}$	Taux de gain d'élongation à $A_{leaf,max}$ <i>Eq. 57</i>	leaf_length_g_C0	-	0.5
$C_{leaf,c1}$	Coefficient exponentiel pour le calcul du gain d'élongation en fonction de l'âge des feuilles <i>Eq. 57</i>	leaf_length_g_C1	-	-3.0
$A_{leaf,max}$	Age maximal d'une feuille <i>Eq. 58</i>	leaf_age_max	Jour	60
$A_{leaf,adult}$	Age de maturité d'une feuille	leaf_age_adult	jour	5

#### 9.11.4.2.4 Gains et pertes totales finales de la longueur de chaque feuilles

Finalement, les gains et les pertes (hors pertes hydrodynamiques) sont normalisés dans un souci de conservativité, afin de déterminer l'élongation finale due aux différentes causes de gains et de pertes.

$$(Eq. 125) \quad L_{leaf,gain}^{s,l} = \frac{C_{leaf,gain}^{s,l}}{C_{leaf,gain\_sum}} L_{gain}^s$$

$$(Eq. 126) \quad L_{leaf,loss}^{s,l} = \frac{C_{leaf,loss,len}^{s,l}}{C_{leaf,loss\_sum}} L_{loss}^s$$

Avec,

$$(Eq. 127) \quad C_{leaf,gain\_sum} = \sum_{l=lmin}^{lmax} C_{leaf,gain}^{s,l}$$

$$(Eq. 128) \quad C_{leaf,loss\_sum} = \sum_{l=lmin}^{lmax} C_{leaf,loss,len}^{s,l}$$

#### 9.11.4.2.5 Mise à jour des longueurs de feuilles

Dans un premier temps, on applique le gain d'élongation à la feuille :

$$(Eq. 129) \quad L_{leaf,tmp}^{s,l} = L_{leaf}^{s,l} + L_{leaf,gain}^{s,l}$$

Et on retire ce gain du gain total à attribuer au pied :

$$(Eq. 130) \quad L_{gain,tmp}^s = L_{gain}^s - L_{leaf,tmp}^{s,l}$$

Dans le cas où les pertes d'élongation à attribuer à cette feuille sont supérieures à la longueur nouvelle longueur de feuilles ( $L_{leaf,loss}^{s,l} > L_{leaf,tmp}^{s,l}$ ) :

- La feuille est retirée et ses caractéristiques sont mises à 0 ( $L_{leaf,tmp}^{s,l} = 0$ )
- La longueur de feuille qui a été retirée est soustraite des pertes totales à appliquer au pied :

$$(Eq. 131) \quad L_{loss,tmp}^s = L_{loss}^s - L_{leaf,tmp}^{s,l}$$



Au contraire, si  $L_{leaf,loss}^{s,l} < L_{leaf,tmp}^{s,l}$  :

- Les pertes sont appliquées à la feuille :

$$(Eq. 132) \quad L_{leaf,tmp}^{s,l} = L_{leaf,tmp}^{s,l} - L_{leaf,loss}^{s,l}$$

- Les pertes sont soustraites des pertes totales à appliquer au pied :

$$(Eq. 133) \quad L_{loss,tmp}^s = L_{loss}^s - L_{leaf,loss}^{s,l}$$

Enfin, il convient de vérifier que toutes les pertes et gains d'élongation aient été attribués, c'est-à-dire que  $L_{loss,tmp}^s = 0$  et  $L_{gain,tmp}^s = 0$ . Si ce n'est pas le cas, la procédure est répétée à partir de la section 1.11.4.2.3 avec les nouveaux paramètres :

$$(Eq. 134) \quad L_{gain}^s = L_{gain,tmp}^s$$

$$(Eq. 135) \quad L_{loss}^s = L_{loss,tmp}^s$$

$$(Eq. 136) \quad L_{leaf}^{s,l} = L_{leaf,tmp}^{s,l}$$

#### 9.11.4.2.6 Mise à jour finale de la création de feuille

Dans le cas où une nouvelle feuille est créée, les autres feuilles sont décalées d'un rang, de sorte à ce que la liste des feuilles soit toujours ordonnée par ordre d'âge croissant. La nouvelle feuille est alors ajoutée en première position avec les caractéristiques suivantes :

$$(Eq. 137) \quad A_{leaf} = \frac{1}{2} dt_{shoot}$$

$$(Eq. 138) \quad B_{leaf} = B_{leaf,new}$$

$$(Eq. 139) \quad L_{leaf} = L_{leaf,new}$$

$$(Eq. 140) \quad W_{leaf} = W_{leaf,new}$$

$$(Eq. 141) \quad T_{leaf} = T_{leaf,new}$$

$$(Eq. 142) \quad B_{epi} = B_{epi,init}$$

#### 9.11.4.2.7 Mise à jour finale de la biomasse de chaque feuille

$$(Eq. 143) \quad B_{leaf}^{s,l} = 1000 \rho_{leaf,dry} L_{leaf} W_{leaf} T_{leaf}$$

#### 9.11.4.2.8 Mise à jour de la biomasse totale d'épiphytes

La biomasse totale d'épiphytes totale est calculée :

**(Eq. 144)** 
$$B_{epi,tot} = \sum_{s=smin}^{smax} \left( \sum_{l=lmin}^{lmax} B_{epi}^{s,l} \right) D_{shoot}^s$$

### 9.11.4.3 Génération de nouveaux pieds à $dt_{shoot}$

Pour effectuer la création d'une nouvelle génération, les anciens pieds, ainsi que les paramètres de feuilles et d'épiphytes correspondants, sont décalés au sein des listes ordonnées en âge, afin de permettre la création d'une nouvelle génération en tête de liste.

S'il y a en effet génération d'un nouveau pied, c'est-à-dire que :

$$(Eq. 145) \quad NB_{shoot} + NB_{shoot,germ} > 0$$

Alors un nouveau pied est créé avec les caractéristiques initiales suivantes :

$$(Eq. 146) \quad B_{shoot} = B_{leaf,new}$$

$$(Eq. 147) \quad D_{shoot} = NB_{shoot} + NB_{shoot,germ}$$

$$(Eq. 148) \quad H_{shoot} = L_{leaf,new}$$

Les nouveaux pieds sont générés avec une seule feuille donc toutes les caractéristiques de feuilles sont mises à 0 sauf celles de la première feuille.

$$(Eq. 149) \quad A_{leaf} = \frac{1}{2} dt_{shoot}$$

$$(Eq. 150) \quad B_{leaf} = 0$$

$$(Eq. 151) \quad L_{leaf} = 0$$

$$(Eq. 152) \quad W_{leaf} = 0$$

$$(Eq. 153) \quad T_{leaf} = 0$$

$$(Eq. 154) \quad B_{leaf}^{0,0} = B_{leaf,new}$$

$$(Eq. 155) \quad L_{leaf}^{0,0} = L_{leaf,new}$$

$$(Eq. 156) \quad W_{leaf}^{0,0} = W_{leaf,new}$$

$$(Eq. 157) \quad T_{leaf}^{0,0} = T_{leaf,new}$$

#### 9.11.4.3.1 Création de pieds par germination

Dans le cas particulier où le taux d'occupation initial ( $F_{init}$ ) est nul et  $NB_{shoot,germ} > 0$ , la nouvelle maille est initialisé avec :

$$(Eq. 158) \quad F_{init} = NB_{shoot,germ} F_{0seed}$$

$$(Eq. 159) \quad A_{shoot}^0 = \frac{1}{2} dt_{shoot}$$

$$(Eq. 160) \quad B_{shoot}^0 = B_{leaf,new}$$

$$(Eq. 161) \quad D_{shoot}^0 = NB_{shoot,germ}(i, j)$$

$$(Eq. 162) \quad H_{shoot}^0 = L_{leaf,new}$$

(Eq. 163)  $B_{epi,shoot}^0 = B_{leaf,new} B_{epi0,frac}$

(Eq. 164)  $A_{leaf}^{0,0} = \frac{1}{2} dtshoot$

(Eq. 165)  $B_{leaf}^{0,0} = B_{leaf,new}$

(Eq. 166)  $L_{leaf}^{0,0} = L_{leaf,new}$

(Eq. 167)  $B_{epi,leaf}^{0,0} = B_{leaf,new} B_{epi0,frac}$

(Eq. 168)  $B_{leaf} = B_{leaf,seed}$

(Eq. 169)  $B_{root,live} = B_{root,seed}$

(Eq. 170)  $D_{shoot} = N_{shoot,germ}$

(Eq. 171)  $H_{shoot} = L_{leaf,new}$

Dans le cas où le taux d'occupation souterrain  $F_{init,seed}$  est également nul

(Eq. 172)  $F_{init,seed} = NB_{shoot,germ} F0_{seed}$

Tableau 44 : Paramètres liés à la création de nouveaux pieds par germination				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$B_{epi0,frac}$	Coefficient pour la génération d'épiphytes sur une nouvelle feuille (fraction de la biomasse de feuille)	CBepi0	-	0.01
$F0_{seed}$	Fraction de maille occupée par la germination d'une nouvelle graine	seed_pos0	-	N/A

#### 9.11.4.4 Mise à jour finale des pieds et des feuilles à dtbiom

##### 9.11.4.4.1 Biomasse aérienne totale

La biomasse aérienne totale s'écrit comme la somme de la biomasse de chaque génération :

$$(Eq. 173) \quad B_{leaf,tot} = \sum_{s=smin}^{smax} (B_{shoot}^s \cdot D_{shoot}^s)$$

##### 9.11.4.4.2 Densité totale de pieds

$$(Eq. 174) \quad D_{shoot,tot} = \sum_{s=smin}^{smax} D_{shoot}^s$$

##### 9.11.4.4.3 Hauteur moyenne de pieds

$$(Eq. 175) \quad H_{shoot,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} (\max(L_{leaf}^s) \cdot D_{shoot}^s)}{D_{shoot,tot}}$$

##### 9.11.4.4.4 Nombre moyen de feuilles

$$(Eq. 176) \quad NB_{leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} (N_{leaf}^s \cdot D_{shoot}^s)}{D_{shoot,tot}}$$

##### 9.11.4.4.5 Longueur moyenne de feuilles

$$(Eq. 177) \quad L_{leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (L_{leaf}^{s,l} \cdot D_{shoot}^s)}{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (D_{shoot}^s)}$$

##### 9.11.4.4.6 Largeur moyenne de feuilles

$$(Eq. 178) \quad W_{leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (W_{leaf}^{s,l} \cdot D_{shoot}^s)}{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (D_{shoot}^s)}$$

##### 9.11.4.4.7 Epaisseur moyenne de feuilles

$$(Eq. 179) \quad T_{leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (T_{leaf}^{s,l} \cdot D_{shoot}^s)}{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (D_{shoot}^s)}$$

##### 9.11.4.4.8 Âge moyen de pieds

$$(Eq. 180) \quad A_{shoot,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} A_{shoot}^s \cdot D_{shoot}^s}{D_{shoot,tot}}$$

##### 9.11.4.4.9 Âge moyen de feuilles

$$(Eq. 181) \quad A_{leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (A_{leaf}^{s,l} \cdot D_{shoot}^s)}{\sum_{s=smin}^{smax} \sum_{l=lmin}^{lmax} (D_{shoot}^s)}$$

## 9.11.4.4.10 Âge maximal des feuilles

(Eq. 182) 
$$A_{oldest\_leaf,tot} = \frac{\sum_{s=smin}^{smax} A_{leaf}^{s,-1} \cdot D_{shoot}^s}{D_{shoot,tot}}$$

### 9.11.5 Décomposition des racines mortes

Les racines mortes ne disparaissent pas immédiatement du sédiment mais se décompose lentement dans le sol et continue de contribuer à la stabilisation du sédiment même en étant mortes. Il est donc important de prendre en compte la décomposition des racines mortes dans notre modèle. Le taux de décomposition des racines ( $\Gamma_{decomp,root}$ ) peut être exprimé selon 5 méthodes :

**Méthode 0** : La décomposition des racines n'est pas prise en compte :

$$(Eq. 183.1) \quad \Gamma_{decomp,root} = 0$$

**Méthode 1** : Utilisation d'un taux de décomposition des racines constant :

$$(Eq. 183.2) \quad \Gamma_{decomp,root} = C1_{decomp,root}$$

**Méthode 2** : Utilisation d'un taux de décomposition des racines qui dépend de la température :

$$(Eq. 183.3) \quad \Gamma_{decomp,root} = \Gamma_{decomp,root,\theta}$$

Avec  $\Gamma_{decomp,root,\theta}$  le taux de décomposition des racines dépendant de la température,

$$(Eq. 184.1) \quad \Gamma_{decomp,root,\theta} = \Gamma_{decomp,root,\theta_{min}} \text{ si } \theta_{air} \leq \theta_{decomp,min}$$

$$(Eq. 184.2) \quad \Gamma_{decomp,root,\theta} = \Gamma_{decomp,root,\theta_{max}} \text{ si } \theta_{air} \geq \theta_{decomp,max}$$

Enfin, pour  $\theta_{decomp,min} < \theta_{air} < \theta_{decomp,max}$  :

Si le coefficient de décomposition des racines liée à la température n'est pas nul ( $C2_{decomp,root}$ ) :

$$(Eq. 184.3) \quad \Gamma_{decomp,root,\theta} = \Gamma_{decomp,root,\theta_{min}} + \frac{e^{\left(\frac{\theta_{air}-\theta_{decomp,min}}{\theta_{decomp,max}-\theta_{decomp,min}}\right)C2_{decomp,root}-1}}{e^{C2_{decomp,root}-1}}$$

Sinon ( $C2_{root,decomp} = 0$ ) :

$$(Eq. 184.4) \quad \Gamma_{decomp,root,\theta} = \Gamma_{decomp,root,\theta_{min}} + \frac{\theta_{air}-\theta_{decomp,min}}{\theta_{decomp,max}-\theta_{decomp,min}} (\Gamma_{decomp,root,\theta_{max}} - \Gamma_{decomp,root,\theta_{min}})$$

**Méthode 3** : Utilisation d'un taux de décomposition des racines qui dépend de la porosité (PAS ENCORE IMPLÉMENTÉ) :

$$(Eq. 183.4) \quad \Gamma_{decomp,root} = \Gamma_{decomp,root,poro}$$

**Méthode 4** : Utilisation d'un taux de décomposition des racines qui dépend à la fois de la température et de la porosité :

$$(Eq. 183.5) \quad \Gamma_{decomp,root} = \Gamma_{decomp,root,\theta} \Gamma_{decomp,root,poro}$$

La biomasse de racines décomposées ( $B_{root,decomp}$ ) est ensuite calculée :

(Eq. 185) 
$$B_{root,decomp} = \Gamma_{decomp,root} \frac{dtshoot}{86400} B_{root,dead}$$

Et la biomasse de racines mortes et biomasse racinaires totale peuvent être recalculées :

(Eq. 186) 
$$B_{root,dead} = B_{root,dead} - B_{root,decomp}$$

(Eq. 187) 
$$B_{root,tot} = B_{root,dead} + B_{root,live}$$

Tableau 45 : Paramètres liés à la décomposition des racines				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$C1_{decomp,root}$	Taux constant de décomposition des racines (Méthode 1) <i>Eq. 57</i>		-	N/A
$C2_{decomp,root}$	Coefficient de décomposition des racines liée à la température (Méthode 2 et 4) <i>Eq. 57</i>		-	N/A
$\theta_{decomp,max}$	Température de décomposition maximale (Méthode 2 et 4) <i>Eq. 58</i>		°C	N/A
$\theta_{decomp,min}$	Température de décomposition minimale (Méthode 2 et 4) <i>Eq. 57</i>		°C	N/A



## 9.12 Spatialisation du modèle

L'évolution spatiale des herbiers est prise en compte à travers un mécanisme de progression, à savoir l'extension des rhizomes et un mécanisme de régression, à savoir le scouring

### 9.12.1 Extension des rhizomes

#### 9.12.1.1 Calcul de la fraction à allouer localement et à exporter

La progression spatiales des herbiers est scindée en deux catégories : La progression locale qui a lieu au sein de la maille considérée et la progression vers les mailles avoisinantes. La progression est calculée en termes de gain de surface en fonction de la surface de maille et exprimée comme une fraction de maille. La progression totale est donc notée  $F_{gain,tot}$ .

Le calcul de cette variable repose sur le taux d'occupation initial de la maille ( $F_{init}$ ), traduit en termes de surface de maille colonisée ( $S_0$ ) :

$$(Eq. 188) \quad S_0 = Area_{cell} F_{init}$$

Sous l'hypothèse d'un patch d'herbier circulaire, le rayon du patch initial ( $R_0$ ) peut être calculé

$$(Eq. 189) \quad R_0 = \sqrt{\frac{S_0}{\pi}}$$

L'agrandissement du patch en réponse à la progression des herbiers est obtenu à partir de la vitesse d'élongation horizontale des rhizomes ( $U_{growth,rhz}$ ) :

$$(Eq. 190) \quad R_1 = R_0 + \left( \frac{U_{growth,rhz}}{1000} \right) \frac{dt_{shoot}}{86400}$$

$$(Eq. 191) \quad S_1 = \pi R_1^2$$

Finalement, la progression totale de l'herbier est calculée :

$$(Eq. 192) \quad F_{gain,tot} = \frac{(S_1 - S_0)}{Area_{cell}}$$

Ce gain est ensuite scindé afin d'obtenir la progression qui a eu lieu localement ( $F_{local}$ ) et le gain a exporté vers les mailles avoisinantes ( $F_{send}$ ) :

$$(Eq. 193) \quad F_{local} = F_{gain,local} F_{gain,tot}$$

$$(Eq. 194) \quad F_{send} = F_{gain,export} F_{gain,tot}$$

Où  $F_{gain,local}$  est la fraction de gain local, c'est-à-dire la proportion du gain à allouer dans la maille en question et calculée :

$$(Eq. 195.1) \quad F_{gain,local} = 1 \quad \text{Si } F_{init} \leq F_{min,export}$$

$$(Eq. 195.2) \quad F_{gain,local} = 1 - (F_{init} - F_{min,export}) \left( \frac{1}{1 - F_{min,export}} \right) \quad \text{Si } C_{gainloc} = 0$$

$$(Eq. 195.3) \quad F_{gain,local} = \frac{e^{\left( \frac{1 - F_{init}}{1 - F_{min,export}} \right) C_{gainloc}} - 1}{e^{C_{gainloc}} - 1} \quad \text{Sinon}$$

Et  $F_{gain,export}$  la fraction du gain total à exporter vers les mailles avoisinantes :

$$(Eq. 196) \quad F_{gain,export} = 1 - F_{gain,local}$$

### 9.12.1.2 Allocation de la réception:

Il est estimé que la progression des herbiers vers une maille voisine s'effectue dans la majorité des cas vers une maille adjacente (les mailles ont un côté en commun) que vers une maille de coin (seulement un coin en commun). De fait, des coefficients de pondération sont appliqués pour prendre en compte la probabilité plus importante qu'une maille exporte du gain vers les mailles adjacentes. Les coefficients de pondération ( $W$ ) sont exprimés dans le tableau ci-dessous avec les numéros des mailles voisines ( $n_w$ ) inscrits entre parenthèse.

5.75% (1)	19.25% (2)	5.75% (3)
19.25% (4)		19.25% (5)
5.75% (6)	19.25% (7)	5.75% (8)

Le gain exporté vers les mailles voisines ( $F_{send,weighted}$ ) est donc calculé à partir de ce coefficient de pondération et d'un coefficient aléatoire entre 0 et 1 pour prendre en compte les incertitudes de ce transfert :

$$(Eq. 197) \quad F_{send,weighted}(n_w) = 2 \text{ rand}([0,1]) W F_{gain,export}$$

Le gain reçu des mailles voisines est donc exprimée

$$(Eq. 198) \quad F_{gain,received} = \sum_{n_w,neighbours} F_{send,weighted}(n_w)$$

Avec  $F_{send,weighted}(n_w) = 0$  si la maille avoisinante en question est masquée

### 9.12.1.3 Mise à jour du nouveau taux d'occupation

Finalement, le nouveau taux d'occupation de la maille ( $F_{new}$ ) est actualisé, à partir de l'occupation initiale, ce qui a été gagné localement et ce qui a été reçu des mailles voisines :

$$(Eq. 199) \quad F_{new} = F_{init} + F_{gain,local} + F_{gain,received}$$

Dans le cas où la progression affecte une maille qui n'était auparavant pas colonisée, l'initialisation des paramètres d'herbiers dans cette maille est effectuée en utilisant les caractéristiques d'herbiers de la maille avoisinante fournissant la fraction d'herbiers la plus importante.

Tableau 46 : Paramètres liés à la progression des herbiers				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Area_{cell}$	Surface de la maille <i>Eq. 57</i>	cell_area	$m^2$	N/A
$U_{growth,rhz}$	Vitesse d'élongation des rhizomes <i>Eq. 57</i>	uroot_horizon	$mm.jour^{-1}$	N/A
$F_{min,export}$	Fraction de maille occupée minimale autorisant l'export vers les mailles avoisinantes <i>Eq. 57</i>	fmin_export	-	N/A
$C_{gainloc}$	Coefficient permettant le calcul du gain local <i>Eq. 57</i>	c_gainloc_coef	-	N/A

## 9.12.2 Scouring

### 9.12.2.1 Calcul du taux d'occupation suit au scouring

Similairement à ce qui est effectué pour la progression, on considère un patch circulaire au sein de la maille de rayon  $R_{ini}$  et surface  $S_{ini}$  calculés :

$$(Eq. 201) \quad S_{ini} = F_{init} Area_{cell}$$

$$(Eq. 202) \quad R_{ini} = \sqrt{\frac{S_{ini}}{\pi}}$$

La surface et le rayon du patch après scouring, respectivement  $S_{new}$  et  $R_{new}$ , sont calculés

$$(Eq. 203) \quad R_{new} = R_{ini} - (U_{loss} dt biom)$$

$$(Eq. 204) \quad S_{new} = \pi R_{new}^2$$

Avec  $U_{loss}$  la vitesse de scouring du patch, calculé en 1.11.2.2

La fraction de maille perdue par scouring est calculée :

$$(Eq. 205) \quad F_{loss,scour} = \frac{(S_{ini} - S_{new})}{Area_{cell}} Weight_{\tau}$$

Où  $Weight_{\tau}$  est un coefficient de pondération, calculé en 1.11.2.2

Finalement, le taux d'occupation de la maille est mis à jour suite suite aux pertes liées au scouring qui ont lieu à dtbiom:

$$(Eq. 206) \quad F_{new} = \max(F_{init} - F_{loss,scour}, 0)$$

Dans le cas où  $F_{new} = 0$  les paramètres d'herbiers sont réinitialisés au sein de cette maille.

### 9.12.2.2 Calcul de la vitesse de scouring et du coefficient de pondération

Une fraction d'occupation minimum ( $F_{min}$ ) au-dessus de laquelle les contraintes de cisaillement sur le fond générant du scouring sont calculées grâce aux contraintes de cisaillement des mailles adjacentes ( $cell_{adjacent}$ ) est définie :

$$(Eq. 207) \quad F_{min} = \frac{\pi Rmin^2}{Area_{cell}}$$

Avec

$$(Eq. 208) \quad Rmin = \min(dx, dy) - \delta_{xy}$$

où  $\delta_{xy} = 0.01$ .

Soit  $n_{w,adj}$  les mailles adjacentes, c'est à dire les mailles voisines ( $n_w = 2,4,5,7$ ) comme définies en 1.11.1.2 et  $NB_{wet}$  le nombre de mailles adjacentes en eau.

Le coefficient de pondération ( $Weight_{\tau}$ ) est initialement exprimé :

$$(Eq. 209.1) \quad Weight_{\tau} = 0.25 NB_{wet}$$

Dans le cas où  $F_{init} \geq F_{min}$ , les contraintes de cisaillement  $\tau_{b,loc}$  sont calculées :

$$(Eq. 210.1) \quad \tau_{b,loc} = \frac{\sum n_{w,adj} \min(\tau_{tot}(n_{w,adj}), T_{b,max})}{NB_{wet}}$$

$\tau_{tot}$  est calculé similairement aux contraintes de cisaillement définies en 1.6.3

Ensuite, des corrections sont appliquées à  $\tau_{b,loc}$  et au coefficient de pondération si  $F_{init} < 1$  :

$$(Eq. 209.1) \quad Weight_{\tau} = W_{out} Weight_{\tau} + W_{in}$$

$$(Eq. 210.1) \quad \tau_{b,loc} = W_{out} \tau_{b,loc} + W_{in} \min(\tau_{tot}, T_{b,max})$$

Où

$$(Eq. 211) \quad W_{in} = 1 - (F_{init} - F_{min}) \frac{1}{1 - F_{min}}$$

$$(Eq. 212) \quad W_{out} = (F_{init} - F_{min}) \frac{1}{1 - F_{min}}$$

Dans le cas où  $F_{init} < F_{min}$  et  $F_{init} > 0$ , c'est-à-dire que le scouring a lieu localement au sein de la maille :

$$(Eq. 209.2) \quad Weight_{\tau} = 1$$

$$(Eq. 210.2) \quad \tau_{b,loc} = \min(\tau_{tot}, T_{b,max})$$

Sinon (si  $F_{init} = 0$ ) :

(Eq. 210.3)  $\tau_{b,loc} = 0$

(Eq. 209.3)  $Weight_{\tau} = 0$

Enfin, si  $\tau_{b,loc} \geq \tau_{crit,scour}$ , les contraintes de cisaillement critiques à partir desquelles il y a scouring, la vitesse de scouring est calculée :

(Eq. 213.1) 
$$U_{loss} = \left( \frac{U_{0,scour}}{1000 \times 86400} \right) \left( \frac{\tau_{b,loc}}{\tau_{crit,scour}} - 1 \right)^{\alpha_{scour}}$$

(Eq. 213.2)  $U_{loss} = 0$  sinon

Tableau 47 : Paramètres liés à au scouring				
Nom générique	Description	Nom code	Unité	Valeur retenue
$Area_{cell}$	Surface de la maille <i>Eq. 57</i>	cell_area	$m^2$	-
$U_{0,scour}$	Taux de scouring	c_U0_scour	$mm.jour^{-1}$	
$\alpha_{scour}$	Puissance pour l'excès de cisaillement	c_alpha_scour	-	
$\tau_{crit,scour}$	Contraintes de cisaillement critique générant du scouring	c_taucrit_scour	$N.m^{-2}$	