

**PAOLIN Mélina**

Spécialisation Sciences et Génie de l'Environnement

À l'École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires

## **Étude des facteurs contrôlant l'atténuation lumineuse dans une lagune semi-fermée.**

### **Calibration d'un modèle bio-optique pour le Bassin d'Arcachon**



**Mars à Août 2012**

**Ifremer ODE LER Arcachon**

**Maîtres de stage : Martin Plus et Isabelle Auby**

# Remerciements

---

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent à mes maîtres de stage, Martin Plus et Isabelle Auby, qui m'ont accompagné tout au long de ce stage, pour leurs conseils et leur disponibilité. Cela m'a permis de progresser sans cesse durant ces 6 mois.

Je remercie vivement Patrick Grillas (Station biologique de la Tour du Valat) de nous avoir prêté les capteurs de lumière sans quoi ces expériences n'auraient pas été réalisables et je remercie aussi Henri Bouillard, de l'Université de Bordeaux 1 pour avoir construit le support des capteurs très rapidement.

Un grand merci à Myriam Rumebe-Perriere et Coralie Connes pour avoir bien voulu nous accompagner lors des sorties sur le terrain, nous aider pour les expériences et pour leur patience entre deux manipulations.

Merci également à Florence D'Amico, Claire Barbier, Marie-Pierre Tournaire et Magali Duval pour m'avoir conseillé et aidé pendant toute l'étape de réflexion sur le protocole expérimental, pour avoir répondu à toutes mes questions et m'avoir formé pour réaliser seule les analyses au laboratoire. Je vous remercie également de m'avoir fait découvrir les missions hebdomadaires du laboratoire sur le terrain.

Mes remerciements vont ensuite à Roger Kantin pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe et surtout pour avoir transmis ma candidature pour ce stage.

Merci à Danièle Maurer, Gilles Trut, Florence Trut et Christine Chassagne pour leur accueil et leur amabilité.

Je souhaite également remercier Bertrand Lubac pour ses conseils par rapport au protocole expérimental et son intérêt pour mon stage et Francis Gohin pour avoir répondu à mes interrogations, relu et critiqué une première version de ce manuscrit.

Enfin, je remercie mes professeurs, Irina Ioannou, Aurélie Muller et Damien Banas, pour avoir bien voulu répondre à toutes mes questions en statistiques ou concernant d'autres aspects de mon stage.

Isabelle AUBY – Martin PLUS  
Station Ifremer  
Quai du commandant Silhouette  
33120 ARCACHON

ATTESTATION DE STAGE

mel : iauby@ifremer.fr ; mplus@ifremer.fr

Arcachon, le lundi 13 août 2012

Mélina Paolin a effectué un stage de 5 mois (12 mars 2012 – 14 août 2012)  
dans notre laboratoire sur le sujet suivant :

*« Etude des facteurs contrôlant l'atténuation lumineuse dans une lagune semi-fermée – Calibration d'un modèle bio-optique pour le Bassin d'Arcachon. »*

Dans ce cadre, Mélina a réalisé les tâches suivantes :

- Définition des protocoles de mesure à partir de la bibliographie ;
- Mise en œuvre des campagnes de mesure et de prélèvement ;
- Mise en œuvre des analyses chimiques (CDOM, MES, Chlorophylle a)
- Traitements et analyse des données (statistiques, modèles).

Dans tous ces domaines, grâce à sa forte implication, à sa rigueur et à sa grande agilité intellectuelle, Mélina s'est avérée rapidement autonome et très efficacement réactive à nos quelques remarques.

Pour ces raisons, il s'avère qu'elle a parfaitement su répondre aux questions posées dans le cadre de ce stage, y compris à celles (non prévues) concernant des applications de ses résultats aux conditions lumineuses disponibles pour les zostères.

Il faut également souligner chez Mélina sa grande gentillesse, qui est une qualité essentielle pour s'intégrer dans une équipe.

Nous ne pouvons que la recommander à l'organisme qui pourrait avoir besoin de ses services.

Maîtres de stage :

Isabelle AUBY

Martin Plus

Institut français de Recherche  
pour l'Exploitation de la Mer

Etablissement public à caractère  
industriel et commercial

Station d'Arcachon  
Quai du Commandant Silhouette  
33120 Arcachon  
France

téléphone 33 (0)5 57.72.29.80  
télécopie 33 (0)5.57.72.29.99  
<http://www.ifremer.fr>

**Siège social**  
155, rue Jean-Jacques Rousseau  
92138 Issy-les-Moulineaux Cedex  
France  
R.C.S. Nanterre B 330 715 368  
APE 731 Z  
SIRET 330 715 368 00297  
TVA FR 46 330 715 368

téléphone 33 (0)1 46 48 21 00  
télécopie 33 (0)1 46 48 22 96  
<http://www.ifremer.fr>

# Sommaire

---

<b>Introduction</b> .....	1
<b>1. Matériel et méthode</b> .....	3
1.1. Site de l'étude .....	3
1.2. Méthodes de prélèvement et d'analyse.....	5
1.2.1. Éclairement .....	5
1.2.1.1. Dispositif expérimental .....	5
1.2.1.2. Calcul du coefficient d'atténuation lumineuse mesuré : $K_{PAR}$ .....	7
1.2.2. Température, salinité et turbidité .....	7
1.2.3. Chlorophylle a, MES et CDOM.....	7
1.3. Présentation des modèles bio-optiques.....	11
1.3.1. Modèle de Gohin <i>et al.</i> (2005) .....	11
1.3.2. Modèle de Gohin <i>et al.</i> (2005) ajusté .....	11
1.3.3. Modèle de Gallegos (1994) .....	11
1.3.4. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)....	13
1.3.5. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson <i>et al.</i> (2008).....	14
1.3.6. Modèles statistiques.....	15
1.3.7. Evaluation de la qualité des modèles .....	15
<b>2. Résultats</b> .....	17
2.1. Variabilité des paramètres mesurés .....	17
2.2. Corrélation entre les paramètres mesurés.....	19
2.3. Modèles bio-optiques .....	22
2.3.1. Modèle de Gohin <i>et al.</i> (2005) .....	22
2.3.2. Modèle de Gohin <i>et al.</i> (2005) ajusté .....	23
2.3.3. Modèle de Gallegos (1994) .....	24
2.3.4. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)....	24
2.3.5. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson <i>et al.</i> (2008).....	25

2.3.6.	Modèles statistiques.....	26
<b>3.</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>28</b>
3.1.	Choix du meilleur modèle bio-optique.....	29
3.2.	Disponibilité de la lumière pour la zostère marine.....	34
	<b>Conclusion.....</b>	<b>37</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>38</b>
	<b>Annexe.....</b>	<b>41</b>

# Introduction

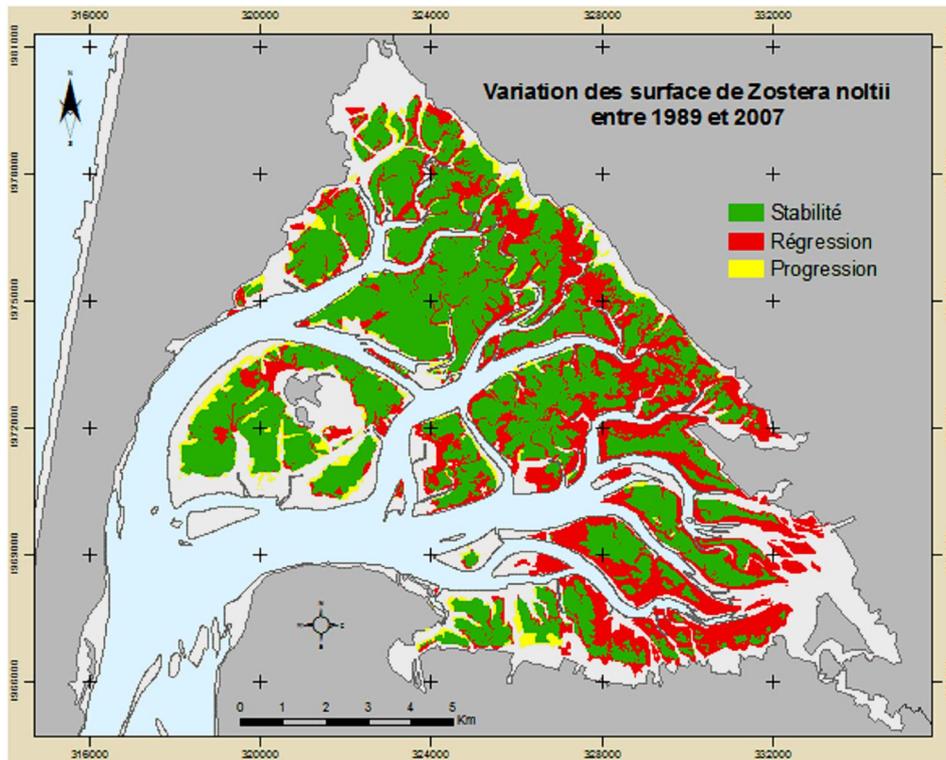
---

La connaissance de la pénétration et de la disponibilité en lumière au sein des systèmes aquatiques est d'un intérêt fondamental. En effet, les interactions entre l'énergie lumineuse disponible, la distribution du spectre selon la verticale, et la physiologie des organismes réalisant la photosynthèse, composent le socle de la production primaire de l'écosystème. (Platt *et al.*, 1984). De nombreux modèles (tels que ceux de Gallegos *et al.*, 1990 ; Banas *et al.*, 2005 ; Biber *et al.*, 2007) permettent de définir un coefficient d'atténuation/absorption de la lumière  $K_d$  utilisé ensuite dans la loi de Beer-Lambert. Ce coefficient d'absorption peut être décomposé comme la somme algébrique des absorptions dues à l'eau pure, à la matière organique dissoute colorée (CDOM) et au matériel particulaire. L'absorption due au matériel particulaire peut elle-même être décomposée en deux contributions : celle du phytoplancton et celle des particules inertes, minérales et organiques en suspension.

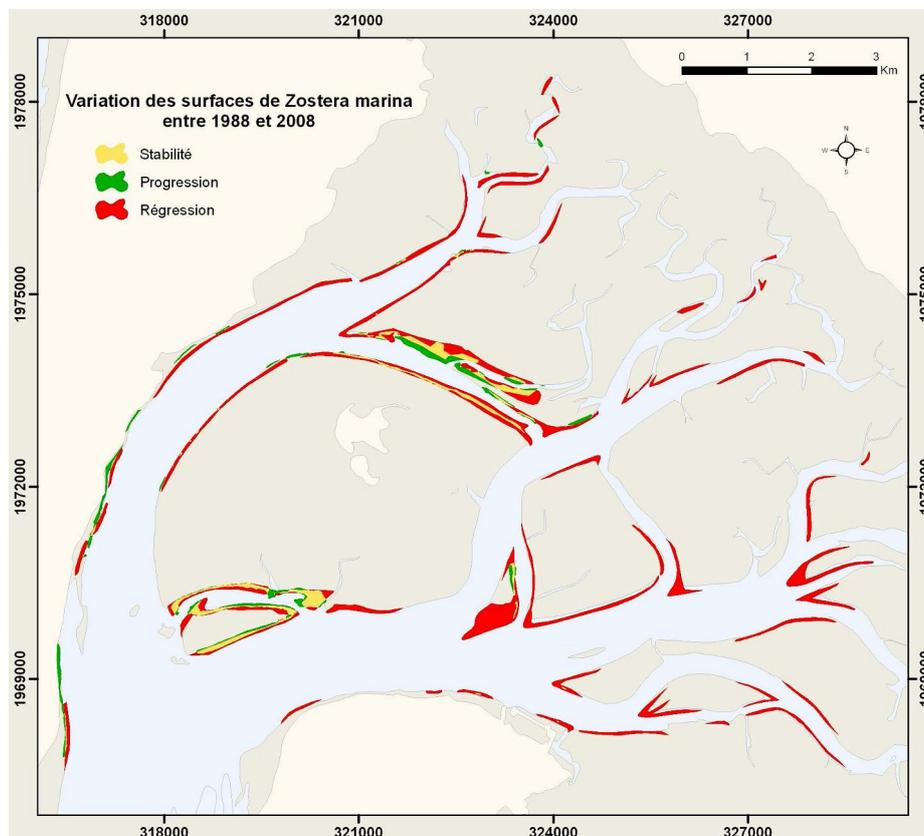
L'étude présentée dans ce document avait pour but d'étudier les relations entre l'atténuation lumineuse dans la colonne d'eau et les différents composants des eaux du Bassin d'Arcachon sur la base de mesures *in situ*. Dans un premier temps, il s'agissait de déterminer si le modèle de Gohin *et al.* (2005), utilisé dans les modèles de production primaire développés au laboratoire Ifremer d'Arcachon, était bien adapté aux eaux du Bassin. Dans un deuxième temps, s'il était démontré que tel n'était pas le cas, il s'agissait de tester et de calibrer un autre modèle bio-optique mieux adapté aux conditions locales. De plus, afin d'être intégré au modèle de production primaire utilisé à Arcachon, le nouveau modèle devait être exprimé en fonction des paramètres définis dans les modèles : l'eau pure, le phytoplancton (exprimé par l'intermédiaire de la concentration en chlorophylle *a*), la salinité et la matière particulaire non-planctonique.

Cette étude est liée aux programmes scientifiques OSQUAR (Ostréiculture et qualité de l'environnement du Bassin d'Arcachon) et « Dynamique des herbiers de zostères ». Les zostères sont des phanérogames aquatiques particulièrement importantes pour l'équilibre biologique du milieu. Deux espèces de zostères se développent sur le Bassin d'Arcachon : *Zostera marina*, la zostère marine, et *Zostera noltii*, la zostère naine. La zostère naine colonise les zones découvrant à marée basse (zones intertidales) alors que la zostère marine colonise les cuvettes intertidales et les bords des chenaux en zone subtidale, jusqu'à une profondeur variant selon les sites. Ces plantes exercent plusieurs fonctions. Tout d'abord, elles favorisent la diversité et l'abondance de la faune aquatique et d'une microflore épiphyte. De plus, elles stabilisent leur substrat en limitant les effets de l'agitation de l'eau sur le taux de remise en suspension des particules fines. Enfin, elles jouent un rôle de tampon dans les lagunes dans le cycle des nutriments (Auby *et al.*, 2011).

Ces herbiers connaissent une phase de régression sur le Bassin d'Arcachon (Fig. 1 et 2). Un certain nombre d'hypothèses quant à la cause de cette régression ont été émises. Or, l'extension des herbiers est limitée à une certaine profondeur, qui est imposée par l'atténuation lumineuse sous-marine. Cette étude pourra donc peut-être aider à valider ou invalider l'hypothèse liée à un déficit de lumière.



*Fig. 1 : Variation de l'extension des herbiers de Zostera noltii entre 1989 et 2007 (Auby et al., 2011)*



*Fig. 2 : Variation de l'extension des herbiers de Zostera marina entre 1988 et 2008 (Auby et al., 2011)*

# 1. Matériel et méthode

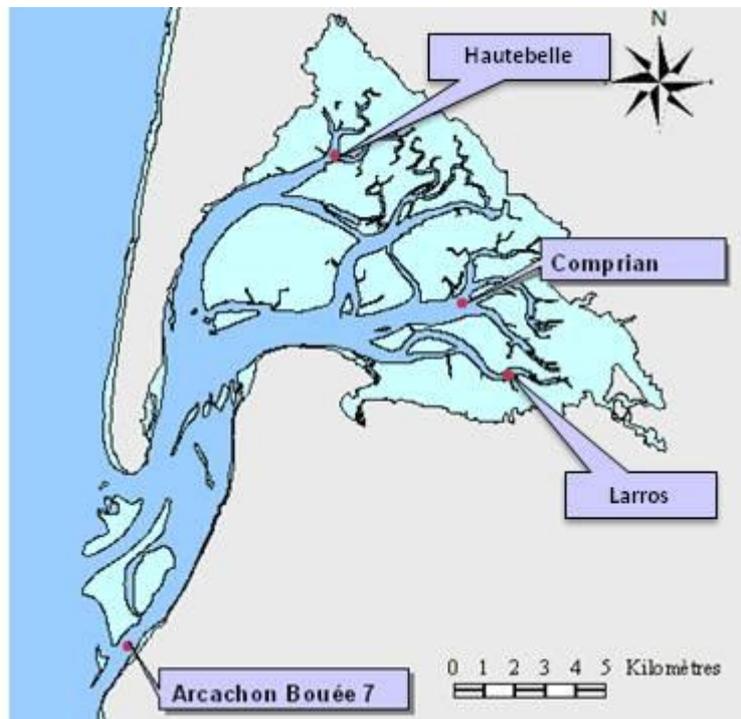
---

## 1.1. Site de l'étude

Le Bassin d'Arcachon (44°40 N, 01°10 W) est une lagune mésotidale de forme triangulaire localisée sur la côte Atlantique française. Sa surface totale est d'environ 174 km<sup>2</sup>. Il est soumis à une marée semi-diurne dont le marnage varie entre 0,8 m en période de morte-eau et 4,6 m en période de vive-eau. Les volumes d'eau échangés avec l'extérieur lors d'un cycle de marée sont d'environ 265.10<sup>6</sup> et 490.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> respectivement en morte-eau et vive-eau. Ce bassin communique avec l'Océan Atlantique par deux étroites passes, séparées par le Banc d'Arguin. Plusieurs petits ruisseaux débouchent sur le Bassin d'Arcachon mais les deux principales rivières sont l'Eyre et le canal du Porge, qui contribuent à plus de 95 % des apports totaux annuels en eaux douces.

Quatre stations réparties sur l'ensemble du Bassin d'Arcachon ont été choisies pour cette étude (Fig. 3 et tableau 1) :

- Comprian
- Arcachon-Bouée 7
- Pointe de Hautebelle
- Larros



*Fig. 3 : Localisation des points de prélèvement au niveau du Bassin d'Arcachon*

Libellé	Coordonnées Géographiques Degrés décimaux		Coordonnées Géographiques Degrés minutes décimales	
	Longitude - X	Latitude - Y	Longitude - X	Latitude - Y
<b>Arcachon- Bouée 7</b>	-1.246333300	44.5614833300	1°14.780	44°33.689
<b>Comprian</b>	-1.0992833300	44.6802166700	1°05.957	44°40.813
<b>Hautebelle</b>	-1.1621666667	44.7284333333	1°09.730	44°43.706
<b>Larros</b>	-1.07075	44.6592	1°04.245	44°39.552

Tableau 1 : Coordonnées des points de prélèvement

Les stations Comprian et Larros se situent à proximité du débouché de l'Eyre, fleuve côtier, qui apporte à lui seul 73 % de l'eau douce dans le Bassin d'Arcachon. Ces deux stations sont fortement soumises aux vents dominants (secteur ouest), du fait de leur fetch important.

La station Hautebelle est abritée des vents dominants par la côte pour les vents de nord-ouest, et pour ceux de sud-ouest par l'île aux Oiseaux (Auby *et al.*, 2011). L'eau douce arrivant à la station Hautebelle provient principalement du canal du Porge.

La station Arcachon-Bouée 7 se situe près des passes du Bassin d'Arcachon. Les eaux de cette station sont les plus océaniques, plus éloignées de l'influence des fleuves côtiers et caractérisées par une énergie hydrodynamique importante (houle et courants).

Le choix des différentes stations a été réalisé de façon à obtenir une gamme de coefficients d'atténuation la plus large possible.

## 1.2. Méthodes de prélèvement et d'analyse

Sur chaque point, les observations ont été réalisées pendant 10 heures environ, afin de prendre en compte une grande partie du cycle de marée. Les différentes campagnes de mesures sont listées ci-après (Tableau 2) :

Station	Date de la campagne	Horaires de prélèvement	Coefficient de la marée	Heure de la pleine mer	Heure de la basse mer
Comprian	11/05/12	de 7h00 à 17h00	66	10h21	16h11
Arcachon-Bouée 7	01/06/12	de 9h00 à 17h40	73	15h40	09h12
Hautebelle	04/07/12	de 8h00 à 16h45	98	18h58	12h45
Larros	24/07/12	de 7h50 à 17h30	78	9h38	15h40

*Tableau 2 : Renseignements sur les campagnes de mesures*

Certaines mesures étaient réalisées en continu, via des sondes ou des capteurs : température, salinité, turbidité, éclairement aérien et subaquatique à deux profondeurs.

D'autres paramètres étaient mesurés à partir de prélèvements d'eau réalisés toutes les 45 minutes : concentration en matières en suspension (matières minérales et organiques), concentration en chlorophylle *a* phytoplanctonique, absorption des CDOM (matières organiques dissoutes colorées).

### 1.2.1. Éclairement

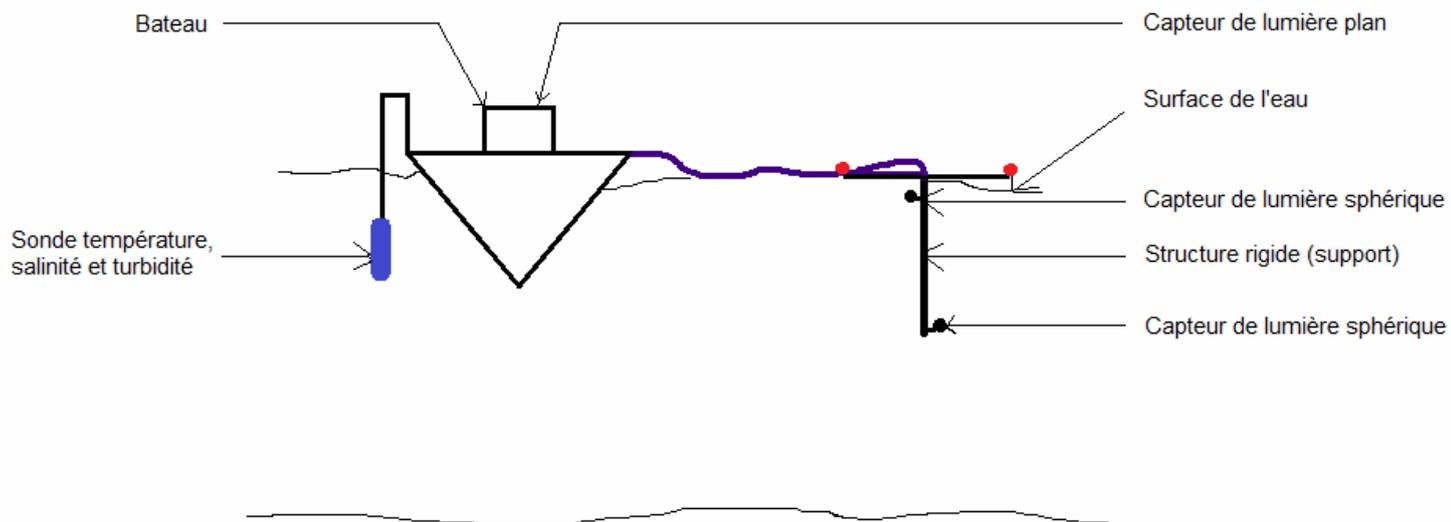
#### 1.2.1.1. Dispositif expérimental

Un capteur de lumière plan (LI-190SA Quantum Sensor) est positionné sur le toit du bateau pour mesurer l'énergie lumineuse au-dessus de la surface de l'eau,  $I_0$ , en  $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

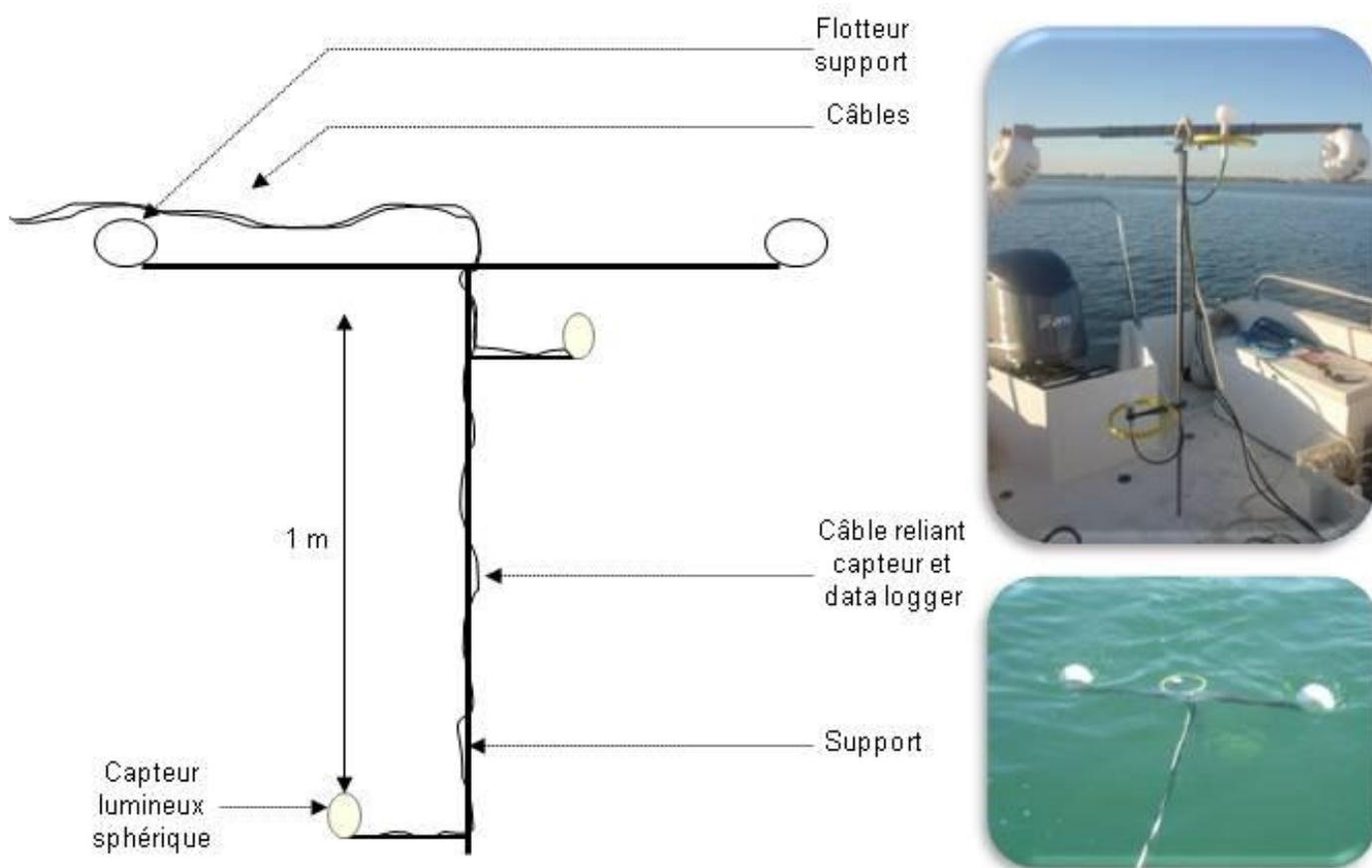
Deux capteurs sphériques de lumière (LI-193 Underwater Quantum Sensor) sont placés dans l'eau, fixés à une structure rigide, reliée au bateau (voir Fig. 4 et 5). Ces deux capteurs permettent de mesurer l'énergie lumineuse entre 400 et 700 nm, c'est-à-dire dans le spectre des longueurs d'onde utilisables pour la photosynthèse ou PAR (Photosynthetically Active Radiation). La différence de profondeur entre les deux capteurs était fixée à 1 m, et le dispositif était placé de façon à ce qu'aucune ombre portée ne vienne perturber les mesures.

Les mesures de lumière sont donc les suivantes :

- $I_0$ , l'énergie lumineuse incidente, juste au-dessus de la surface.
- $\text{PAR}_0$ , l'énergie lumineuse entre 10 et 15 cm sous la surface en fonction de l'agitation de la surface de la mer.
- $\text{PAR}_z$ , l'énergie lumineuse à 1 m sous le capteur sphérique mesurant le  $\text{PAR}_0$ .



*Fig. 4 : Schéma de l'installation*



*Fig. 5 : Schéma de l'appareillage pour les capteurs de lumière sphériques*

Les capteurs de lumière ont fait l'objet d'une calibration le 30 novembre 2011.

### 1.2.1.2. Calcul du coefficient d'atténuation lumineuse mesuré : $K_{PAR}$

L'énergie lumineuse à une profondeur ( $z$ ) peut être modélisée à l'aide de la loi de Beer-Lambert, qui s'écrit sous la forme suivante [1] :

$$I_z = I_0 \times e^{-k \times z} \quad [1]$$

avec :  $I_z$  : énergie lumineuse à la profondeur  $z$  (en  $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$I_0$  : énergie lumineuse de sub-surface (en  $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$k$  : coefficient d'atténuation lumineuse dans la colonne d'eau (en  $\text{m}^{-1}$ )

$z$  : profondeur (en m).

Dans notre étude, le PAR (Photosynthetically Active Radiation) a été mesuré. Donc, la formule suivante [2] a été utilisée :

$$PAR_z = PAR_0 \times e^{-K_{PAR} \times z} \quad [2]$$

avec :  $PAR_z$  : le PAR à la profondeur  $z$  (en  $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$PAR_0$  : le PAR juste sous la surface de l'eau (en  $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$K_{PAR}$  : le coefficient d'atténuation lumineuse dans la colonne d'eau entre 400 et 700 nm (en  $\text{m}^{-1}$ )

$z$  : la profondeur (en m).

Ainsi, à partir de l'équation [1] on calcule le coefficient d'atténuation lumineuse [3] :

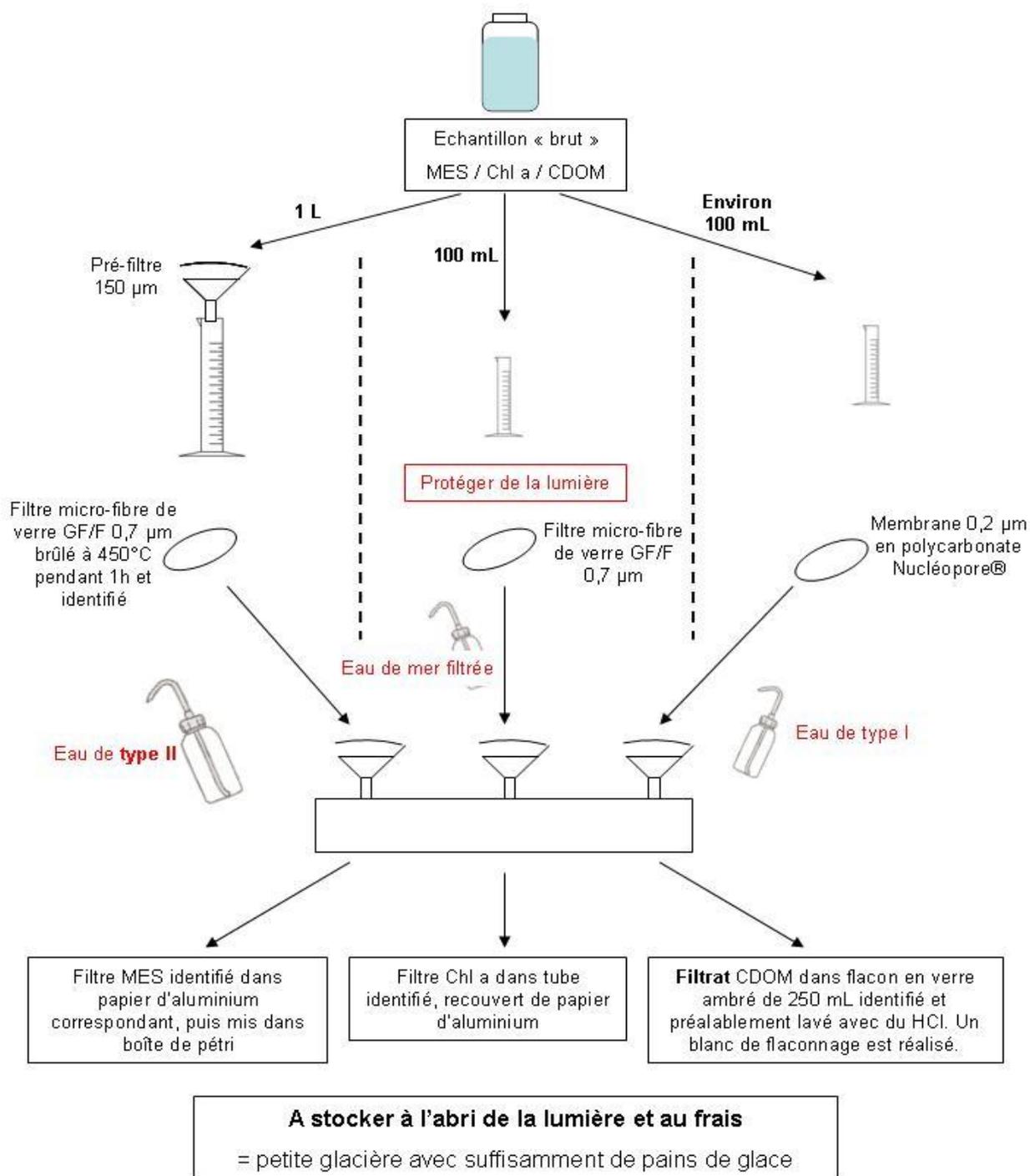
$$K_{PAR} = -\frac{1}{z} \times \ln\left(\frac{PAR_z}{PAR_0}\right) \quad [3]$$

### 1.2.2. Température, salinité et turbidité

Une sonde YSI 6600 V2, placée à une profondeur intermédiaire entre les deux capteurs sphériques (voir Fig. 4), permet de mesurer les valeurs de turbidité (NTU), salinité et température ( $^{\circ}\text{C}$ ) toutes les minutes pendant toute la durée des campagnes de mesures.

### 1.2.3. Chlorophylle $a$ , MES et CDOM

Des prélèvements d'eau à une profondeur intermédiaire entre les deux capteurs sphériques sont effectués à l'aide de la bouteille Niskin (de 5 L), toutes les 45 minutes et immédiatement filtrés pour analyse ultérieure des concentrations en chlorophylle  $a$ , matières en suspension et de l'absorption des CDOM, selon les protocoles d'Aminot et Kérouel (2004) pour la chlorophylle  $a$  et les MES et de Babin et *al.* (2003) et Loos et Costa (2010) pour les CDOM. Ils sont décrits dans la figure 6.



*Fig. 6 : Schéma de la filtration des MES, chlorophylle a et CDOM*

Les analyses sont réalisées suivant les protocoles établis par Aminot et Kérouel (2004) pour la chlorophylle *a* et les MES, et Babin et *al.* (2003) et Biber et Gallegos (2007) pour les CDOM.

➤ **Chlorophylle *a*** : avant analyse, les filtres sont stockés au congélateur à -25°C. La chlorophylle *a* est extraite avec 10 mL d'acétone à 90%. Puis, le filtre est déchiqueté, le tube est bouché et agité pour disperser les fibres. L'extraction acétonique se poursuit une nuit au réfrigérateur. Les tubes sont ensuite centrifugés et le surnageant est prélevé. La fluorescence de l'échantillon non acidifié est mesurée. Puis 70 µL de HCl 0,3 N sont ajoutés, et la fluorescence de l'échantillon acidifié est mesurée. Ceci permet de calculer la concentration en chlorophylle *a* par le calcul suivant [4] :

$$[\text{Chlorophylle } a](\mu\text{g} / \text{L}) = K \times \left( \frac{R_{\max}}{R_{\max} - 1} \right) \times (F^{\text{NA}} - F^{\text{A}}) \times \left( \frac{v}{1000 \times V} \right) \quad [4]$$

avec :  $F^{\text{NA}}$  : fluorescence de l'échantillon non acidifié ;

$F^{\text{A}}$  : fluorescence de l'échantillon acidifié ;

$R_{\max}$  : rapport d'acidification maximum : calculé automatiquement (constante= 1,922) ;

$K$  : coefficient d'étalonnage (constante = 1) ;

$V$  : volume d'eau filtrée (L) : 100 mL

$v$  : volume de solvant d'extraction (mL) : 10 mL d'acétone à 90%

$D$  : prendre en compte la dilution si elle a eu lieu

➤ **MES** : les filtres sont placés à l'étuve à 70°C pendant toute une nuit. Puis, ils sont mis au dessiccateur jusqu'à la pesée. La concentration en MES est calculée grâce à la formule suivante [5] :

$$\text{MES}(\text{mg} / \text{L}) = \frac{P2 - P1}{V} \quad [5]$$

avec :  $P1$  (mg) : le poids du filtre + aluminium avant filtration ;

$P2$  (mg) : le poids du filtre + aluminium après filtration ;

$V$  : le volume filtré (en L).

Afin de déterminer la quantité de matière organique (MO) et la quantité de matière minérale (MM), les filtres après avoir été pesés, sont mis dans le four à moufle à 500°C pendant 1 heure au minimum. Puis, ils sont laissés au dessiccateur 1 heure au minimum pour refroidir. Chaque filtre est pesé sur une balance de classe I avec son enveloppe d'aluminium. On trouve ainsi le poids  $P3$ .

La concentration en matière organique est donnée par la formule suivante [6] :

$$\text{MO}(\text{mg} / \text{L}) = \frac{P2 - P3}{V} \quad [6]$$

avec :  $P1$  (mg) : le poids du filtre + aluminium avant filtration

$P2$  (mg) : le poids du filtre + aluminium après filtration

$P3$  (mg) : le poids du filtre + aluminium + MES - MO

V : le volume filtré (en L).

La concentration en matière minérale est donnée par [7]:

$$MM (mg / L) = \frac{P3 - P1}{V} \quad [7]$$

➤ **CDOM** : les flacons contenant le filtrat sont stockés au réfrigérateur avant leur analyse. L'absorbance des échantillons est mesurée à plusieurs longueurs d'onde : 440, 683, 684, 685, 686 et 687 nm au spectrophotomètre Unicam UV 300, dans des cuves de 10 cm de trajet optique. L'expression suivante [8] permet de calculer l'absorbance nette à 440 nm :

$$A(440)_{nette} = A(\lambda) - C(\lambda) \quad [8]$$

avec :  $A(\lambda)$  : l'absorbance de l'échantillon mesurée à  $\lambda$  nm.

$A(440)_{nette}$  : l'absorbance nette à 440 nm en AU (unité d'absorbance)

$C(\lambda)$  : la correction à appliquer à  $A(\lambda)$  (équation [9]) :

$$C(\lambda) = \frac{A(683) + A(684) + A(685) + A(686) + A(687)}{5} \quad [9]$$

L'absorption par la matière colorée organique dissoute à 440 nm,  $g_{440}$ , est calculée de la manière suivante [10] :

$$g_{440} = \frac{A(440)_{nette} \times 2,303}{l} \quad [10]$$

avec :  $l$  : trajet optique en m (dans notre étude, il est égal à 10 cm = 0,1 m).

### 1.3. Présentation des modèles bio-optiques

Le modèle MARS (Model for Applications at Regional Scales) est un modèle hydrodynamique développé et diffusé par l'équipe du laboratoire de physique et sédimentologie du département « dynamiques de l'environnement côtier » de l'Ifremer. Ce code est dédié à la modélisation océanographique côtière des échelles régionales jusqu'aux échelles littorales. Il permet de modéliser des courants marins, des hauteurs d'eau et des concentrations en éléments solubles (ou en suspension temporaire) transportés par les courants. Un modèle biologique simulant la production primaire dans le Bassin d'Arcachon est couplé au modèle hydrodynamique. Un des objectifs de cette étude était d'alimenter le modèle de production primaire par un modèle bio-optique bien adapté au Bassin d'Arcachon.

Différents modèles de la littérature ont été testés en utilisant le jeu de données recueilli à l'occasion de cette étude.

#### 1.3.1. Modèle de Gohin *et al.* (2005)

Le modèle proposé par Gohin *et al.* en 2005 pour calculer un  $K_{PAR}$  est actuellement utilisé dans le modèle MARS.

Dans ce modèle le  $K_{PAR}$  est estimé en fonction de la concentration en matières minérales et de la teneur en chlorophylle  $a$  (équation [11]) :

$$K_{PAR} = 0,07 MM + 0,09 Chl a^{0,75} + a_w \quad [11]$$

avec : MM : la concentration en matières minérales en suspension (en mg/L)

Chl a : la concentration en chlorophylle  $a$  (en  $\mu\text{g/L}$ )

$a_w$  : le coefficient d'absorption de l'eau pure. Il est égal à  $0,04 \text{ m}^{-1}$  (Smith et Baker, 1981).

#### 1.3.2. Modèle de Gohin *et al.* (2005) ajusté

Le modèle de Gohin *et al.* (2005) (équation [11]) a été ajusté au mieux avec le logiciel SigmaStat à nos données recueillies lors des campagnes de prélèvement.

#### 1.3.3. Modèle de Gallegos (1994)

Ce modèle est composé de sept équations qui expriment l'absorption totale et le spectre de dispersion en fonction de la longueur d'onde.

Le coefficient d'atténuation lumineuse,  $K$ , est calculé de la manière suivante [12] :

$$K = \frac{1}{\mu_0} \times [a_t^2 + G(\mu_0) \times a_t \times b]^{\frac{1}{2}} \quad [12]$$

avec :  $G(\mu_0) = g_1 \times \mu_0 - g_2$

$g_1$  et  $g_2$  sont deux coefficients qui dépendent de la fonction de dispersion de phase dans la colonne d'eau (Kirk, 1984). Il est communément admis de prendre  $g_1 = 0,425$  et  $g_2 = 0,190$ .

$\mu_0$  : cosinus de l'angle réfracté du zénith solaire à l'interface air-eau. Il est fonction de la latitude, de la date et de l'heure de la journée.

$a_t$  : coefficient d'absorption spectrale total (en  $m^{-1}$ ).

$b$  : coefficient de dispersion (en  $m^{-1}$ ).

Le coefficient de dispersion est calculé de la manière suivante [13] :

$$b(\lambda) = \frac{550}{\lambda} \times [\text{Turbidité}] \quad [13]$$

avec :  $\lambda$  : la longueur d'onde, en nm.

L'absorption par les différents composants des eaux marines est additive, proportionnelle à la concentration des différents composants, et fonction des longueurs d'ondes du spectre lumineux. Ces composants sont : l'eau pure elle-même, la matière organique dissoute colorée, le phytoplancton et la matière particulaire non-planctonique. Cependant, ces composants n'absorbent pas dans les mêmes longueurs d'onde. Les CDOM et les particules minérales absorbent essentiellement la lumière dans les courtes longueurs d'onde (UV, bleu et bleu vert) (Kirk, 1976 ; Kostoglidis *et al.*, 2005). L'eau pure absorbe surtout dans le rouge et l'infrarouge. En ce qui concerne le spectre d'absorption de la chlorophylle, il est caractérisé par deux maxima d'absorption, respectivement centrés à 440 et 680 nm (Froidefond et Doxaran, 2004).

L'expression qui permet de calculer le coefficient d'absorption total,  $a_t$ , est la suivante [14] :

$$a_t = a_y + a_{ph} + a_d + a_w \quad [14]$$

avec :  $a_y$  : coefficient d'absorption des matières organiques colorées dissoutes, en  $m^{-1}$ .

$a_{ph}$  : coefficient d'absorption du phytoplancton, en  $m^{-1}$ .

$a_d$  : coefficient d'absorption des particules autres que le phytoplancton, en  $m^{-1}$ .

$a_w$  : coefficient d'absorption de l'eau pure, en  $m^{-1}$  (égal à  $0,04 m^{-1}$  comme précédemment).

Le coefficient d'absorption du phytoplancton est calculé comme ci-dessous [15] :

$$a_{ph}(\lambda) = a_{ph}^*(\lambda) \times [\text{Chl } a] \quad [15]$$

avec : [Chl] : la concentration en chlorophylle  $a$  (en  $\mu g \cdot L^{-1}$ ).

$a_{ph}^*(\lambda)$  : le coefficient d'absorption spectrale du phytoplancton normalisé à la concentration en chlorophylle  $a$ , en  $m^2 \times (mg \text{ Chl } a)^{-1}$ . Ce coefficient est tiré de la littérature (Gallegos et Correll, 1990).

Le coefficient d'absorption des particules autres que le phytoplancton est calculé à partir de la turbidité (équation [16]).

$$a_d(\lambda) = \sigma_d(\lambda) \times [Turb] \quad [16]$$

avec :  $\sigma_d(\lambda) = \sigma_{bl} + \sigma_{400} \times e^{[-s_d \times (\lambda - 400)]}$

et [Turb] : la valeur de la turbidité (en NTU).

Pour les valeurs de  $\sigma_{bl}$ ,  $\sigma_{400}$  et  $s_d$ , les valeurs estimées par Gallegos (1994) ont été utilisées, soit :  $\sigma_{bl} = 0,116 \text{ m}^{-1} \cdot \text{NTU}^{-1}$ ,  $\sigma_{400} = 0,258 \text{ m}^{-1} \cdot \text{NTU}^{-1}$  et  $s_d = 0,0165 \text{ nm}^{-1}$ .

Enfin, le coefficient d'absorption de la matière organique colorée dissoute (CDOM) est exprimé par la fonction suivante [17] :

$$a_y(\lambda) = g_{440} \times e^{[-s_y \times (\lambda - 440)]} \quad [17]$$

avec :  $g_{440}$  : l'absorption par la matière colorée organique dissoute à 440 nm (longueur d'onde caractéristique, qui est la plus souvent prise par convention (Kirk, 1994), calculée précédemment, en  $m^{-1}$ .

$s_y = 0,014 \text{ nm}^{-1}$ . Cette valeur a été choisie car le coefficient  $s_y$  varie entre 0,010 et 0,020  $\text{nm}^{-1}$ , et la valeur moyenne est 0,014  $\text{nm}^{-1}$  (Bricaud *et al.*, 1981).

**Les paramètres  $a_y$ ,  $a_{ph}$ ,  $a_d$ ,  $a_w$  et  $b$  ont été moyennés sur les longueurs d'onde de 400 à 700 nm correspondant au PAR.**

### 1.3.4. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)

Alors que Gallegos (1994) a choisi d'utiliser la turbidité pour calculer le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique, Gallegos et Correll (1990) proposent d'utiliser la concentration en matières minérales (MM).

Nous avons modifié le modèle de Gallegos (1994) en remplaçant l'équation [16] par l'équation [18] tirée de Gallegos et Correll (1990).

$$a_d(\lambda) = (0,153MM - 0,13) \times e^{[-0,0104 \times (\lambda - 400)]} \quad [18]$$

avec : MM : concentration en matières minérales en suspension (en mg/L).

### 1.3.5. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008)

Une relation reliant le  $K_d(\text{PAR})$  au  $K_d$  à 490 nm a été développée dans la publication de Pierson *et al.* (2008). Elle s'établit de la sorte [19] :

$$K_d(\text{PAR}) = 0,6677 \times K_d(490)^{0,6763} \quad [19]$$

Celle-ci permet de s'affranchir des moyennes réalisées sur les paramètres  $a_y$ ,  $a_{ph}$ ,  $a_d$ ,  $a_w$  et  $b$  (cf. paragraphe 1.3.3.). L'équation [19] a été utilisée afin de transformer le  $K_d(\text{PAR})$ , que nous avons mesuré, en  $K_d(490)$ . Ceci a permis d'appliquer les deux modèles précédents (Gallegos (1994) et Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)) à la longueur d'onde 490 nm.

Les paramètres des équations ont été modifiés pour aboutir aux calculs ci-dessous :

Le coefficient d'atténuation lumineuse à 490 nm,  $K_d(490)$ , est calculé de la manière suivante [20] :

$$K_d(490) = \frac{1}{\mu_0} \times [a_t(490)^2 + G(\mu_0) \times a_t(490) \times b(490)]^{\frac{1}{2}} \quad [20]$$

avec :  $G(\mu_0) = g_1 \times \mu_0 - g_2$

$g_1$ ,  $g_2$  et  $\mu_0$  ont été définis dans le paragraphe 1.3.3.

Le coefficient de dispersion est calculé comme ci-dessous (équation [21]) :

$$b(490) = \frac{550}{490} \times [\text{Turbidité}] \quad [21]$$

L'expression qui permet de calculer le coefficient d'absorption total est la suivante [22] :

$$a_t(490) = a_y(490) + a_d(490) + a_{ph}(490) + a_w(490) \quad [22]$$

avec :  $a_y(490) = g_{440} \times e^{[-0,014 \times (490-440)]}$  [23]

$$a_{ph}(490) = 0,0207 \times [\text{Chl } a] \quad [24]$$

$$a_w(490) = 0,0196 \quad [25]$$

Le coefficient d'absorption des particules autres que le phytoplancton à 490 nm calculé à partir du modèle de Gallegos (1994), soit avec la turbidité, se calcule ainsi (équation [26]) :

$$a_d(490) = \sigma_d(490) \times [\text{Turbidité}] \quad [26]$$

avec :  $\sigma_d(490) = 0,116 + 0,258 \times e^{[-0,0165 \times (490-400)]}$

En appliquant l'équation [18] du modèle de Gallegos et Correll (1990) pour calculer le coefficient d'absorption des particules autres que le phytoplancton à 490 nm, l'équation suivante [27] est obtenue :

$$a_d(490) = (0,153[MM] - 0,13) \times e^{[-0,0104 \times (490-400)]} \quad [27]$$

### 1.3.6. Modèles statistiques

Des régressions multiples de type « pas à pas » ont été réalisées avec les paramètres que nous avons mesurés (K(PAR), turbidité, Chl *a*, MES, salinité, matières minérales en suspension, matières organiques en suspension, et CDOM).

Par ailleurs, ce type d'analyse a été réalisé avec les seuls paramètres présents dans le modèle MARS (MM, salinité et chlorophylle *a*)

### 1.3.7. Evaluation de la qualité des modèles

L'évaluation de la qualité des modèles a été réalisée selon les recommandations de Piñeiro *et al.* (2008) par régression entre les observations et les valeurs prédites et test de la significativité des hypothèses « pente = 1 et ordonnée à l'origine = 0 » (test de Student avec le seuil de signification  $\alpha = 5\%$ ). Cette évaluation a été complétée par les calculs suivants :

➤ **RMSD** (Root Mean Square Deviation) : il estime la moyenne des différences entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées (de la même unité que le modèle en évaluation). On le calcule de la manière suivante :

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})^2}{n}}$$

avec :  $Y_{i\text{mod}}$  : la valeur *i* de la variable modélisée ;  
 $Y_{i\text{obs}}$  : la valeur *i* de la variable observée ;  
*n* : la taille de l'échantillon.

➤ **MAE** (Mean Absolute Error) : erreur moyenne absolue.

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}}|$$

Plus le RMSD et le MAE sont élevés, moins le modèle est bon.

➤ **Eff** (Efficiency) : coefficient d'efficacité. Plus ce coefficient est proche de 1 et meilleur est le modèle.

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2}$$

avec :  $\bar{Y}_{\text{obs}}$  : la moyenne des valeurs observées.

## 2. Résultats

---

### 2.1. Variabilité des paramètres mesurés

Cette étude a permis de collecter des données (salinité, CDOM, turbidité, MES, MM, chlorophylle  $a$ ,  $K_{PAR}$ ) sur un cycle de marée pour quatre stations du Bassin d'Arcachon (Arcachon-Bouée 7, Hautebelle, Comprian, Larros). Ces données sont regroupées dans la figure 7. Des renseignements complémentaires sur les campagnes de mesure sont fournis dans le tableau 2 du paragraphe 1.2.

La figure 7 montre les tendances des paramètres mesurés au cours d'un cycle de marée.

➤ **Salinité** : Elle varie entre 22 et 35,13, avec les minimums de salinité au niveau de la station Comprian et les maximums enregistrés à Arcachon-Bouée 7. La salinité est croissante durant toute la phase montante de la marée et atteint son maximum à marée haute et elle est décroissante pendant la phase descendante pour atteindre son minimum à marée basse.

➤ **CDOM** (représentées par  $g_{440}$ ) : Elles varient entre 0,03 et 1,56  $m^{-1}$ . Les minimums sont enregistrés à Arcachon-Bouée 7 et les maximums à Comprian. Elles varient de manière inverse à la salinité.

➤ **Turbidité** : Elle varie entre 0 et 30,1 NTU avec les minimums de turbidité au niveau de la station Arcachon-Bouée 7 et les maximums à Larros. La turbidité diminue pendant la phase montante de la marée et atteint son minimum 1h30 après l'heure de la pleine mer. Lors de la phase descendante, la turbidité croît et atteint son maximum environ une heure avant la basse mer pour les stations Comprian et Larros et environ 1h30 la basse mer pour Hautebelle (pour Arcachon-Bouée 7, il est difficile d'en juger puisque nous n'avons pas de données avant la basse mer).

➤ **MES et MM** : Les MES varient entre 4,8 et 81,2 mg/L et les MM varient entre 2,8 et 71,4 mg/L. Leurs minimums sont enregistrés à Arcachon-Bouée 7 et leurs maximums à Larros. Ces paramètres suivent les mêmes tendances que la turbidité.

➤ **Chlorophylle  $a$**  : La concentration en chlorophylle  $a$  varie entre 1,14 et 15  $\mu g/L$ . Les plus faibles valeurs de chlorophylle  $a$  sont obtenues à Arcachon-Bouée 7 et les plus élevées à Larros. La concentration en chlorophylle  $a$  augmente pendant la phase descendante de la marée et atteint son maximum à basse mer. Elle est décroissante pendant la phase montante de la marée et est minimale aux alentours de la pleine mer pour les stations Comprian et Larros.

➤  **$K_{PAR}$**  : Le coefficient d'atténuation lumineuse varie entre 0,33 et 3,41  $m^{-1}$  avec les minimums enregistrés à la station Arcachon-Bouée 7 et les maximums à Larros. Ce coefficient augmente pendant la phase descendante de la marée et est maximum une heure avant la basse mer pour Comprian et Larros et 1h30 avant pour Hautebelle. Pendant la phase montante, il décroît et est minimum environ 1h30 après la pleine mer. Il suit globalement la même tendance que la turbidité, les MES et les MM.

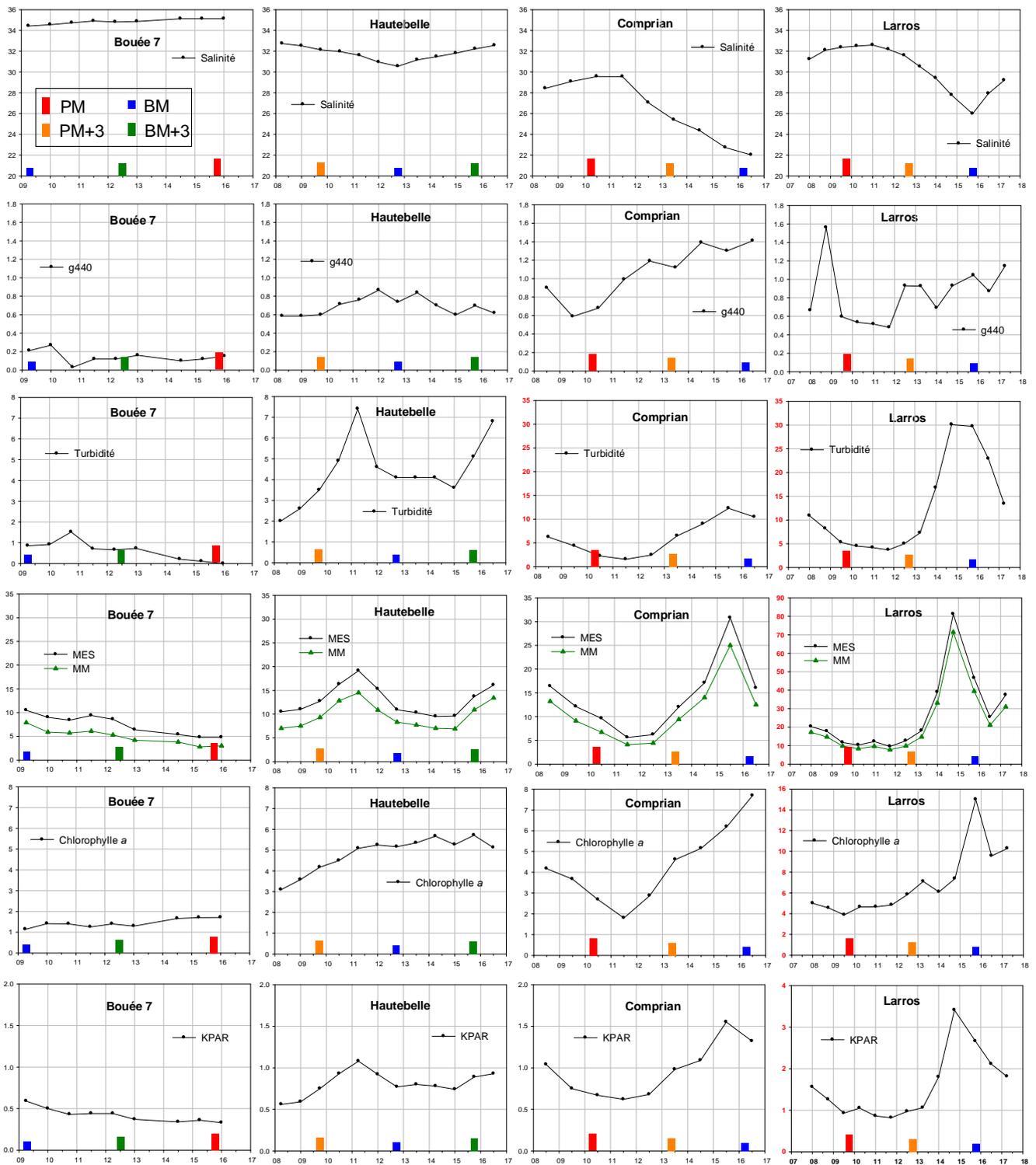


Fig. 7 : Variation des différents paramètres mesurés (salinité, CDOM, turbidité, MES, MM, chlorophyll a et  $K_{PAR}$ ) au cours d'un cycle de marée pour quatre stations du Bassin d'Arcachon

Unité des paramètres :

- Salinité (sans unité)
- g440 (en  $m^{-1}$ )
- Turbidité (en NTU)
- MES et MM (en mg/L)
- Chlorophyll a (en  $\mu g/L$ )
- $K_{PAR}$  (en  $m^{-1}$ )

Les mesures réalisées lors de cette étude mettent en évidence les caractéristiques des stations (Fig. 7).

La station Arcachon-Bouée 7 présente les salinités les plus élevées des stations étudiées du Bassin d’Arcachon et les plus faibles turbidités, MES, MM, CDOM et chlorophylle *a*. C’est à cette station que les eaux les plus claires ont été enregistrées ( $K_{PAR}$  très faible). De plus, les valeurs relevées sur un cycle de marée sont très tamponnées par la proximité de l’océan, elles varient très faiblement.

La station Larros présente les eaux les plus chargées que nous ayons enregistrées. Les concentrations en MES, MM, chlorophylle *a* et la turbidité sont les plus élevées de nos données. Ces eaux ne laissent que très peu passer la lumière.

La station Comprian a aussi de fortes teneurs en MES et MM mais elles sont un peu moins élevées que Larros.

Les paramètres mesurés aux stations Hautebelle, Comprian et Larros varient fortement au cours du cycle d’une marée.

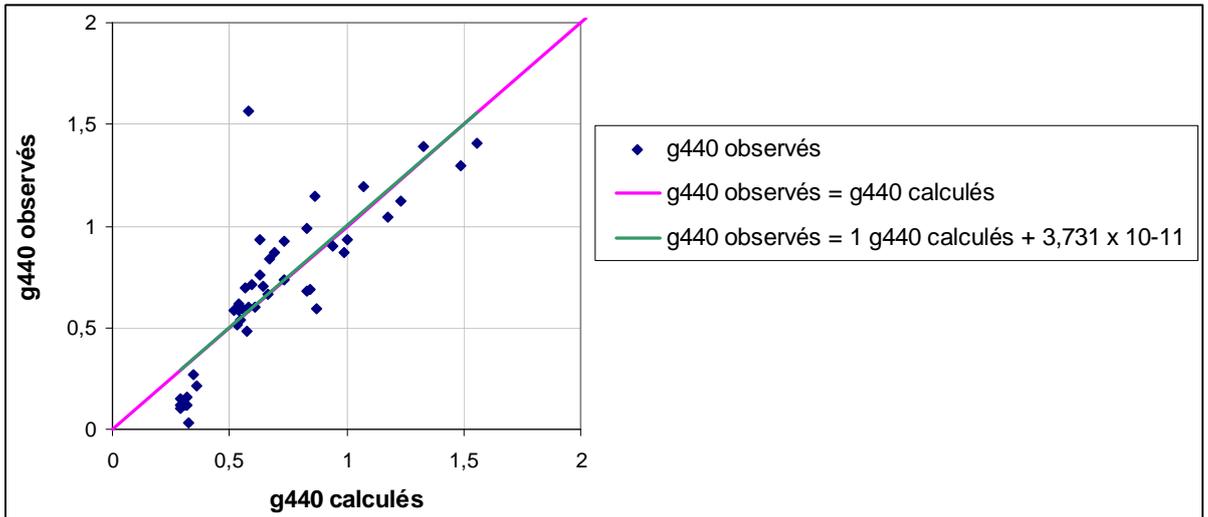
## 2.2. Corrélation entre les paramètres mesurés

Les paramètres enregistrés sont parfois corrélés entre eux (Fig. 8). Par exemple, le coefficient d’atténuation lumineuse et la turbidité ont un coefficient de corrélation de 0,98 (plus ce coefficient est proche de 1 et plus les deux variables sont corrélées).

Par ailleurs, on peut également remarquer que la corrélation entre les CDOM et la salinité est élevée : le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de -0,84. La fonction affine décroissante suivante (équation [31]) lie les deux variables.

$$g_{440} = 3,690 - 0,0968 \text{ Salinité} \quad [31]$$

Les valeurs de CDOM observées ont été comparées aux valeurs prédites par l’équation [31] (Fig. 17).



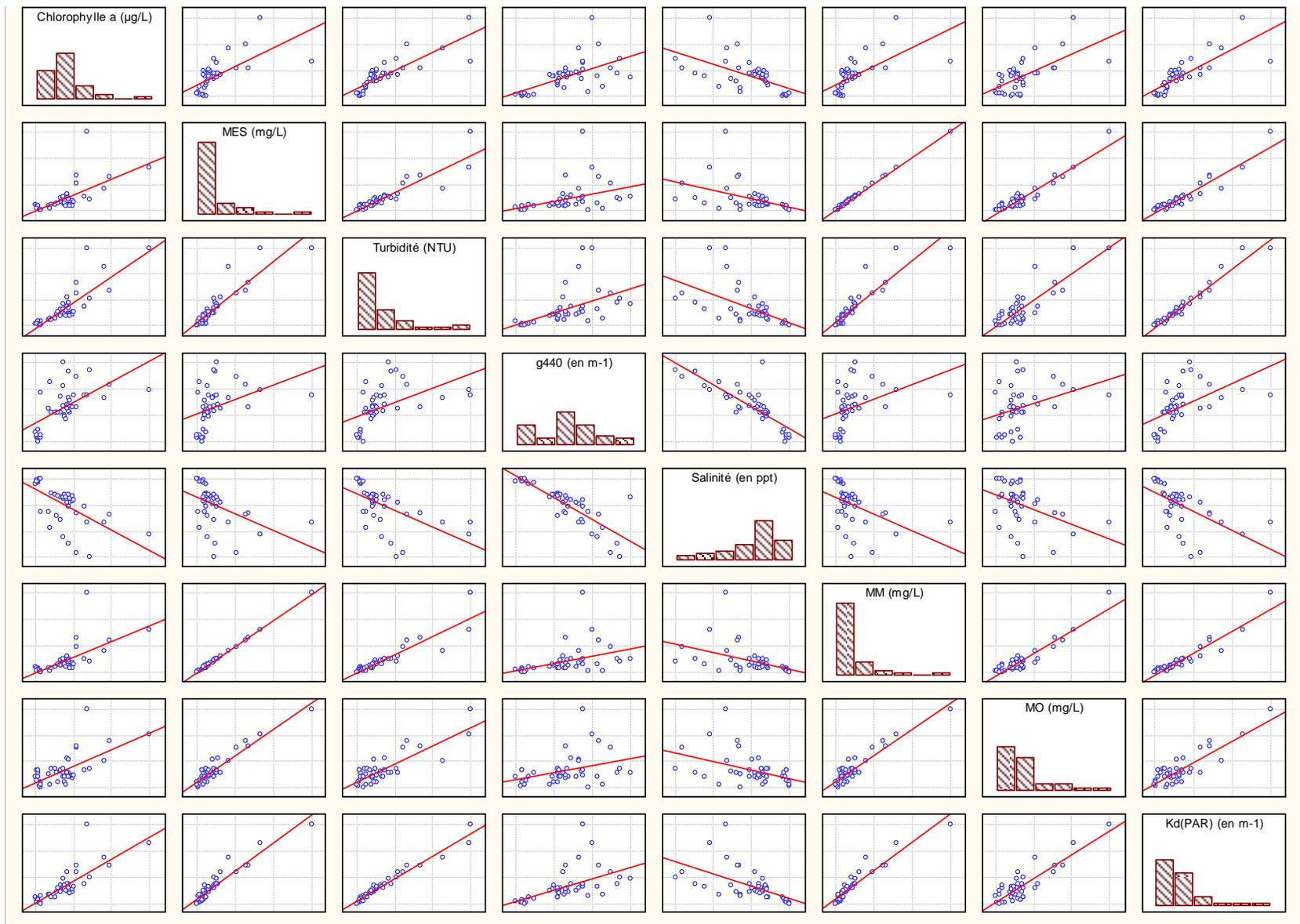
*Fig. 17 : Valeurs de CDOM observés en fonction des valeurs prédites à partir de l'équation [31]*

La pente et l'ordonnée à l'origine de cette régression linéaire sont significativement égale à 1 (p-value  $\approx 1$ ) et 0 (p-value  $\approx 1$ ) respectivement. De plus, les résultats suivants ont été obtenus :

RMSD = 0,208 m<sup>-1</sup>

MAE = 0,14 m<sup>-1</sup>

Eff = 0,699



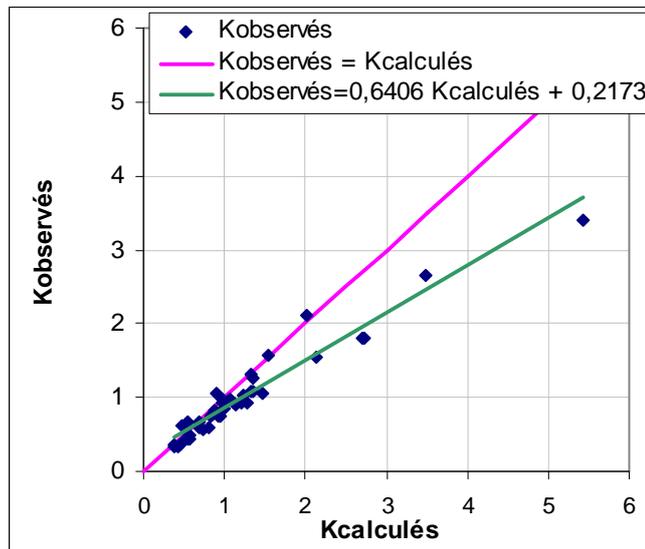
*Fig. 8 : Graphiques de corrélations entre les paramètres mesurés pendant cette étude*

## 2.3. Modèles bio-optiques

Tous les modèles ont été définis dans le paragraphe 1.3.

### 2.3.1. Modèle de Gohin *et al.* (2005)

Les valeurs de  $K_{PAR}$  obtenues par le modèle de Gohin *et al.* (2005) ont été comparées aux valeurs mesurées (voir Fig. 9).



*Fig. 9 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gohin *et al.* (2005)*

Ce modèle n'est pas satisfaisant. En effet, la pente de la régression entre les valeurs observées et les valeurs prédites est non égale à 1 ( $p\text{-value} = 2,22 \times 10^{-16} < 0,05$ , selon le test de Student) et l'ordonnée à l'origine est non égale à 0 ( $p\text{-value} = 4,53 \times 10^{-6} < 0,05$ , selon le test de Student). Les estimateurs de qualité du modèle atteignent les valeurs suivantes :

$$\text{RMSD} = 0,427 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,242 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,514.$$

Les paramètres de ce modèle ont été modifiés légèrement récemment (Gohin, comm. pers.) de la façon suivante:

$$K_{PAR} = 0,05MM + 0,05Chla^{0,75} + 0,06$$

Une nouvelle analyse avec ces paramètres a été effectuée, les tests statistiques indiquent une meilleure adéquation avec les données recueillies à Arcachon (Fig. 10). Cependant les tests sur la pente ( $p\text{-value} = 0,02$ ) et l'ordonnée à l'origine ( $p\text{-value} = 0,0001$ ) demeurent rejetés.

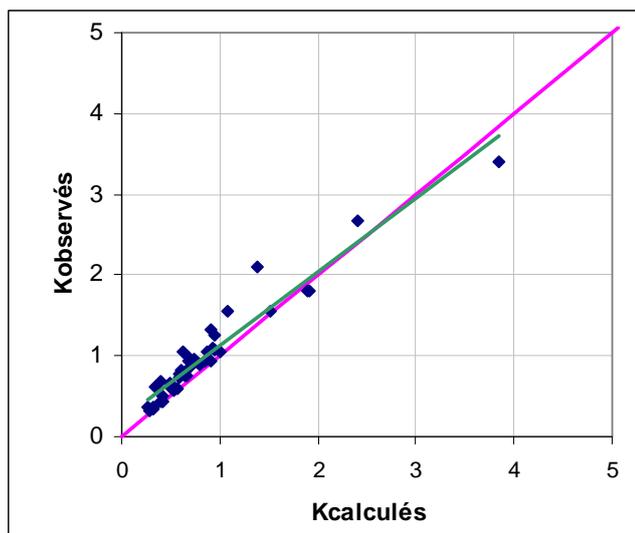


Fig. 10 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gohin et al. (2005) modifié (Gohin, comm. pers.)

Les estimateurs de qualité du modèle atteignent les valeurs suivantes :

$$\text{RMSD} = 0,228 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,170 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,878.$$

### 2.3.2. Modèle de Gohin et al. (2005) ajusté

Le modèle de Gohin et al. (2005) a été ajusté au mieux à nos valeurs mesurées. L'équation ci-dessous [28] a été obtenue :

$$K = 0,0377 MM + 0,161 Chl a^{0,721} + 0,04 \quad [28]$$

La figure 11 compare les coefficients d'atténuation lumineuse observés aux valeurs prédites selon ce modèle.

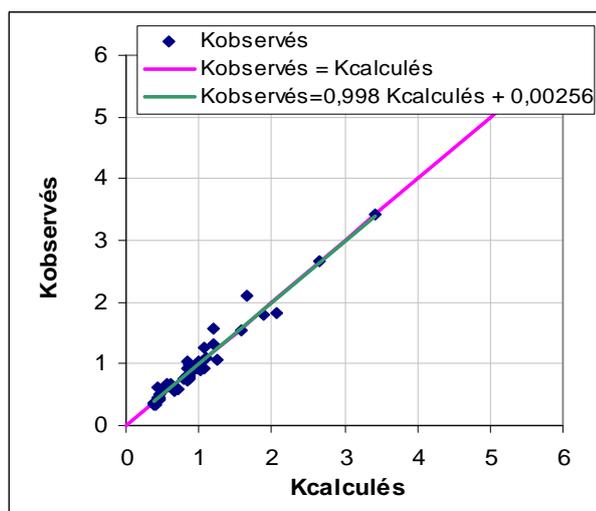


Fig. 11 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gohin et al. (2005) ajusté

La pente est significativement égale à 1 ( $p\text{-value} = 0,95 > 0,05$ ) et l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 ( $p\text{-value} = 0,949 > 0,05$ ). Les estimateurs de qualité du modèle atteignent les valeurs suivantes :

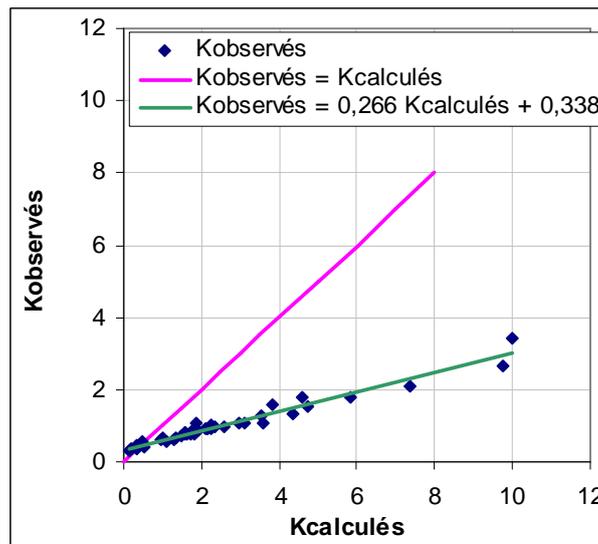
$$\text{RMSD} = 0,132 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,09 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,953$$

### 2.3.3. Modèle de Gallegos (1994)

La figure 12 compare les coefficients d'atténuation lumineuse observés aux valeurs prédites selon le modèle de Gallegos (1994).



*Fig. 12 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gallegos (1994)*

La pente n'est pas égale à 1 ( $p\text{-value} \approx 0$ ) et l'ordonnée à l'origine n'est pas égale à 0 ( $p\text{-value} = 1,71 \times 10^{-15}$ ). Les résultats suivants ont été obtenus :

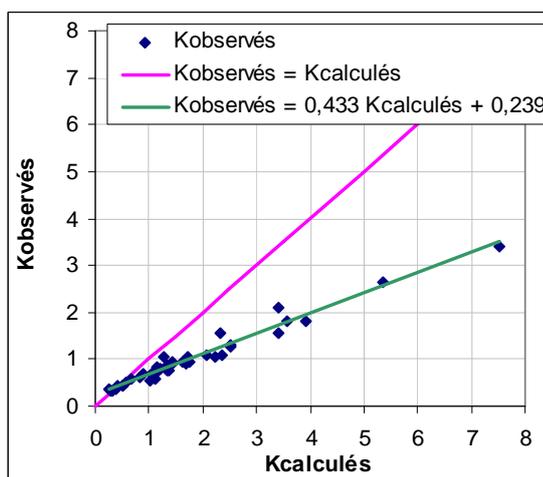
$$\text{RMSD} = 2,21 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 1,5 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = -12,1$$

### 2.3.4. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)

La figure 13 compare les coefficients d'atténuation lumineuse observés aux valeurs prédites selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990).



*Fig. 13 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990)*

La pente n'est pas égale à 1 ( $p$ -value  $\approx 0$ ) et l'ordonnée à l'origine n'est pas égale à 0 ( $p$ -value =  $6,94 \times 10^{-11}$ ). Les résultats suivants ont été obtenus :

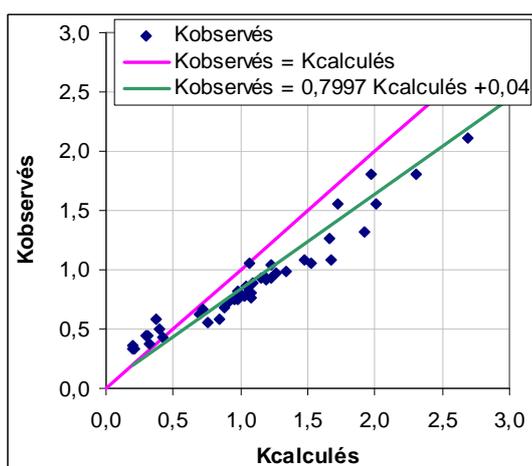
$$\text{RMSD} = 1,09 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,75 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = -2,15$$

### 2.3.5. Modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008)

➤ La figure 14 compare les coefficients d'atténuation lumineuse observés aux valeurs prédites selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) (avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos (1994), équation [26]).



*Fig. 14 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) (calculé avec l'équation [26])*

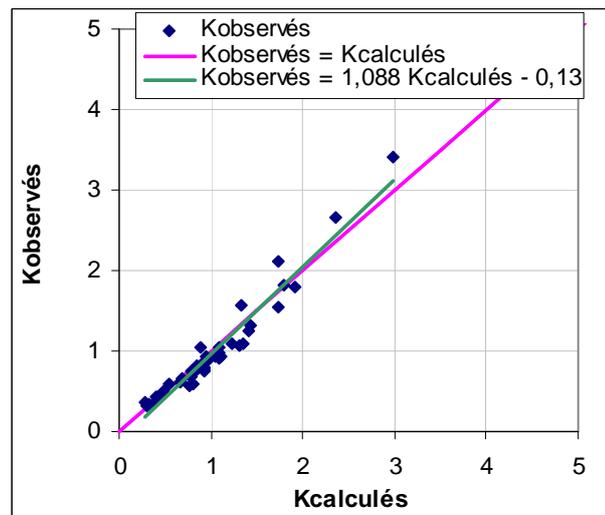
La pente de la régression n'est pas significativement égale à 1 ( $p\text{-value} = 1 \times 10^{-6}$ ) mais l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 ( $p\text{-value} = 0,389 > 0,05$ ). Les résultats ci-dessous ont été obtenus :

$$\text{RMSD} = 0,295 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,25 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,768$$

➤ La figure 15 compare les coefficients d'atténuation lumineuse observés aux valeurs prédites selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) (avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos et Correll (1990), équation [27]).



*Fig. 15 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés selon le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) (calculé avec l'équation [27])*

La pente de la régression n'est pas significativement égale à 1 ( $p\text{-value} = 0,04 < 0,05$ ) et l'ordonnée à l'origine n'est pas significativement égale à 0 ( $p\text{-value} = 0,01 < 0,05$ ). Les résultats suivants ont été obtenus :

$$\text{RMSD} = 0,15 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,12 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,936$$

### 2.3.6. Modèles statistiques

➤ Dans un premier temps, une régression multiple de type « pas à pas » a été réalisée avec l'ensemble des variables mesurées ( $K_{\text{PAR}}$ , -variable expliquée- ; turbidité, MES, Chl  $\alpha$ , CDOM, salinité, MM et MO). Le modèle suivant a été obtenu (équation [29]) :

$$K = 0,399 + 0,054 \text{Turbidité} + 0,141 \text{g440} + 0,024 \text{MM} - 0,0478 \text{MO} \quad [29]$$

Les coefficients d'atténuation lumineuse observés ont été comparés aux valeurs prédites par cette équation [29] (Fig. 16).

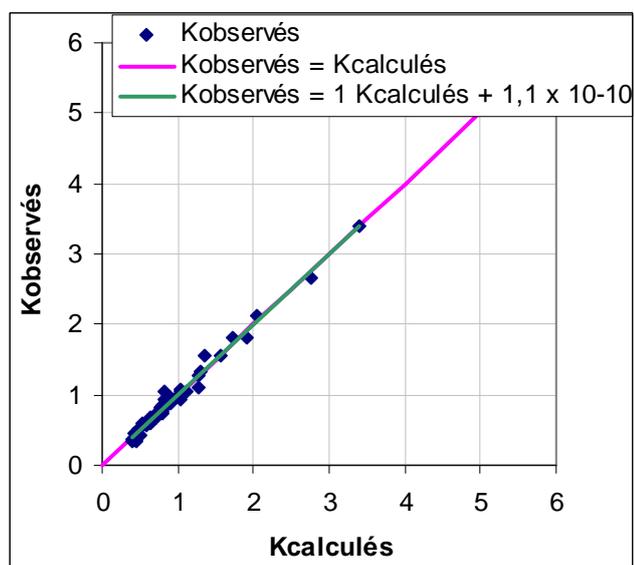


Fig. 16 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés à partir de l'équation [29]

La pente de la régression est significativement égale à 1 (p-value  $\approx 1 > 0,05$ ) et l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 (p-value  $\approx 1 > 0,05$ ). Les résultats suivants ont été obtenus :

$$\text{RMSD} = 0,076 \text{ m}^{-1}$$

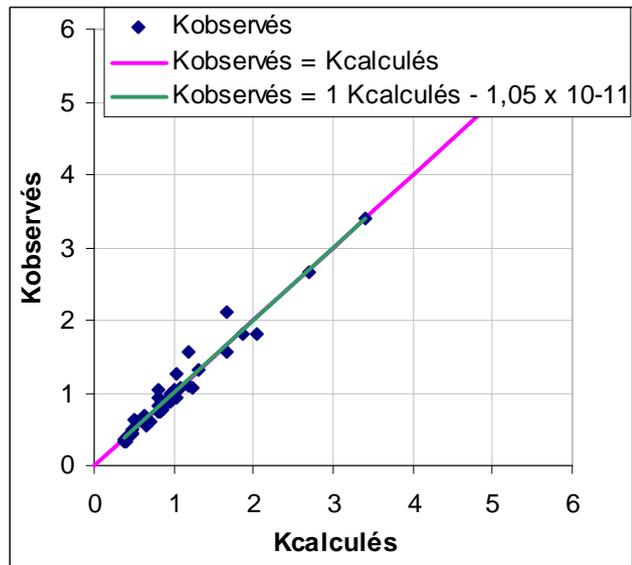
$$\text{MAE} = 0,055 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,98$$

Dans un second temps, une régression multiple de type « pas à pas » a été réalisée avec les seuls paramètres pris en compte dans le modèle MARS, c'est-à-dire les matières minérales en suspension, la concentration en chlorophylle *a* et la salinité. L'équation ci-dessous [30] a été obtenue :

$$K = 0,722 + 0,0622 \text{Chl } a + 0,0372 \text{MM} - 0,0159 \text{Salinité} \quad [30]$$

Les coefficients d'atténuation lumineuse observés ont été comparés aux valeurs prédites par cette équation [30] (voir Fig. 17).



*Fig. 17 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés à partir de l'équation [30]*

La pente de la régression est significativement égale à 1 (p-value  $\approx$  1) et l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 (p-value  $\approx$  1). Les résultats ci-dessous ont été obtenus :

$$\text{RMSD} = 0,126 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,08 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,957$$

# 3. Discussion

---

## 3.1. Choix du meilleur modèle bio-optique

Le modèle de Gohin *et al.* (2005) est actuellement utilisé dans les modèles de production primaire au laboratoire Ifremer d'Arcachon. Nous avons comparé les valeurs de coefficient d'atténuation lumineuse obtenus avec ce modèle aux valeurs mesurées lors de cette étude. La figure 9 montre que pour des valeurs de  $K_{PAR}$  comprises entre 0,3 et 1,5  $m^{-1}$ , ce modèle prédit relativement bien les valeurs de  $K_{PAR}$ . Cependant, pour des  $K_{PAR}$  supérieurs à 1,5  $m^{-1}$ , les valeurs prédites s'éloignent des valeurs réelles. Ce modèle n'est donc pas directement applicable pour le Bassin d'Arcachon, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il a été bâti en utilisant des séries de données provenant d'eaux du large. Ce modèle calcule des valeurs de  $K_{PAR}$  trop élevées dans les eaux caractérisées par de fortes teneurs en MES, sans doute parce qu'il ne prend pas en compte la variabilité des CDOM (supposées corrélées aux MES, ce qui n'est pas le cas dans le Bassin d'Arcachon – cf figure 8).

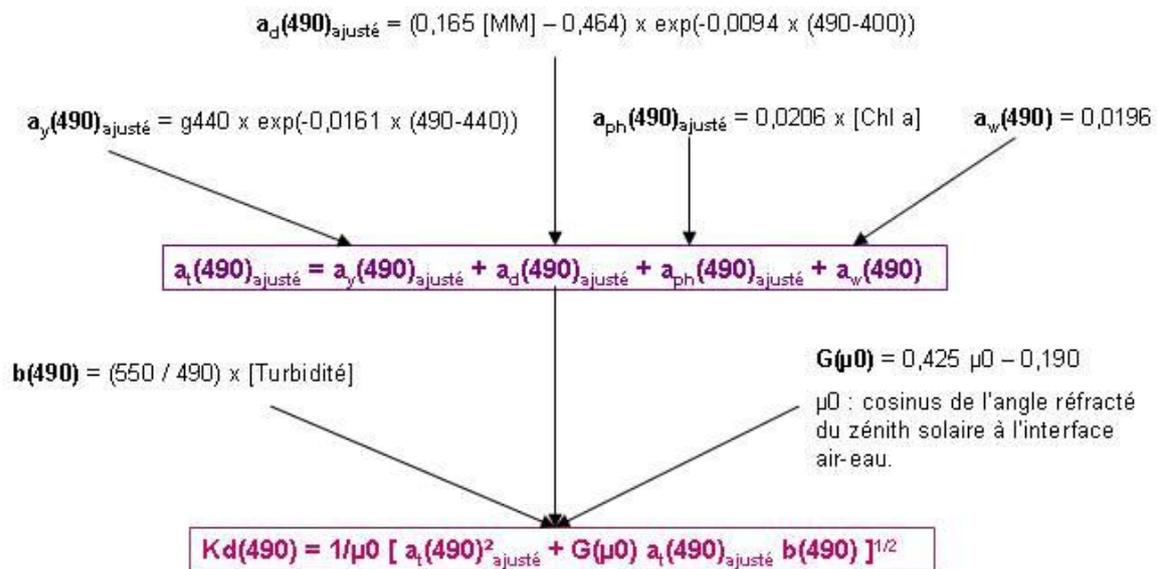
Par ailleurs, nous avons ajusté le modèle de Gohin *et al.* (2005) au mieux à nos valeurs mesurées. Les statistiques réalisées (paragraphe 2.2.2.) permettent de conclure que l'efficacité de ce modèle est bien améliorée par rapport au modèle de base.

Nous avons testé d'autres modèles issus de la littérature :

- le modèle de Gallegos (1994),
- le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Gallegos et Correll (1990),
- le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos (1994) (équation [26]),
- le modèle de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson *et al.* (2008) avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos et Correll (1990) (équation [27]).

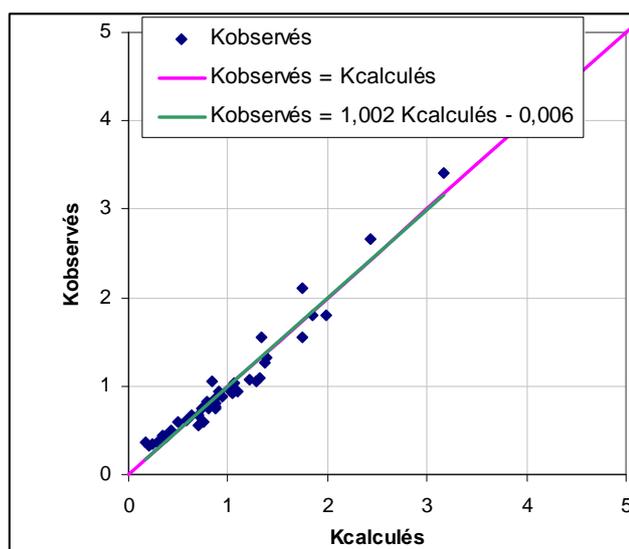
Les trois premiers modèles prédisent des valeurs beaucoup trop élevées par rapport aux valeurs mesurées. Ils ne sont donc pas adaptés pour le Bassin d'Arcachon. Comme élément d'explication de cette non adéquation, on peut suspecter la différence des conditions qui ont présidé à la construction de ces modèles. En effet, les modèles de Gallegos ont été créés pour la rivière Rhode, sur la baie de Chesapeake, aux Etats-Unis. Les salinités dans la rivière Rhode étaient comprises entre 30 et 34 ‰ alors que pour les stations étudiées du Bassin d'Arcachon, elles varient dans un plus grand intervalle (entre 22 et 36 ‰). Enfin, en moyenne, la concentration en chlorophylle *a* dans la rivière Rhode était de 15  $\mu g/L$  (contre 4,62  $\mu g/L$  pour les stations du Bassin) ;  $g_{440} = 0,3 m^{-1}$  (contre 0,7  $m^{-1}$ ) ; turbidité = 5 NTU (contre 6,4 NTU) et  $K_{PAR} = 2,04 m^{-1}$  (contre 0,99  $m^{-1}$ ). Donc, ces modèles étaient conçus pour calculer des coefficients d'atténuation plus élevés, avec des fortes concentrations en chlorophylle *a*.

Le quatrième modèle testé prédit avec beaucoup plus de précision les valeurs réelles. Cependant, la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression entre les valeurs observées et les valeurs prédites ne sont pas significativement égale à 1 et 0 respectivement (voir paragraphe 2.2.5.). Ce modèle n'est donc pas encore assez précis pour le Bassin d'Arcachon. Nous avons donc tenté d'ajuster ce quatrième modèle aux valeurs mesurées. Nous avons obtenu le modèle suivant (Fig. 18) :



*Fig. 18 : Schéma du modèle ajusté de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson et al. (2008) avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos et Correll (1990)*

Les coefficients d'atténuation lumineuse observés ont été comparés aux valeurs prédites par ce modèle ajusté (voir Fig. 19).



*Fig. 19 : Coefficients d'atténuation lumineuse observés en fonction des coefficients d'atténuation lumineuse calculés à partir du modèle ajusté de Gallegos (1994) modifié par l'équation tirée de Pierson et al. (2008) avec le coefficient d'absorption de la matière particulaire non planctonique calculé selon le modèle de Gallegos et Correll (1990)*

La pente de la régression entre les valeurs observées et les valeurs prédites est significativement égale à 1 (p-value = 0,95) et l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 (p-value = 0,89). Les résultats suivants ont été obtenus :

$$\text{RMSD} = 0,137 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{MAE} = 0,11 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Eff} = 0,95$$

L'ajustement du modèle à nos valeurs permet donc d'améliorer fortement le modèle initial. Il pourrait permettre de prédire relativement bien les valeurs observées du  $K_{\text{PAR}}$  sur le Bassin d'Arcachon.

Le premier modèle statistique (équation [29]) est le modèle le plus performant pour le Bassin d'Arcachon. Cependant, il n'est pas exprimé en fonction des paramètres définis dans le modèle MARS utilisé au laboratoire Ifremer d'Arcachon. Nous avons donc retenu que les paramètres pris en compte dans ce modèle et obtenu l'équation [30] (paragraphe 2.2.6.). Le fait de ne retenir que la concentration en chlorophylle  $a$ , les matières minérales en suspension et la salinité est justifié. En effet, d'une part, la turbidité est fortement corrélée à la chlorophylle  $a$  et aux MM (Fig. 8) :

- le coefficient de corrélation entre la turbidité et la chlorophylle  $a$  est de 0,83
- le coefficient de corrélation entre la turbidité et les matières en suspension est de 0,91.

D'autre part, les CDOM et la salinité sont aussi fortement corrélées (voir paragraphe 2.2.7.). Une relation linéaire lie ces deux variables (équation [31]).

Un tel type de relation a déjà été mis en évidence dans d'autres régions du globe. Des travaux (Bowers et Brett, 2008 ; Ferrari et Dowell, 1998) réalisés au pays de Galle et au sud de la mer Baltique, par exemple, présentent des expressions liant les CDOM à la salinité :

$$\rightarrow g = g_s \times \left(1 - \frac{S}{S_0}\right) \quad (\text{Bowers et Brett, 2008})$$

avec :  $g$  : la concentration en CDOM en un point de l'estuaire où la salinité est  $S$ .  
 $g_s$  : la concentration en CDOM dans une source d'eau où la salinité est nulle.

$\frac{g_s}{S_0}$  : la pente de la droite reliant  $g$  en fonction de  $S$ .

$$\rightarrow a_{CDOM}(355) = 9,87 (\pm 0,5) - 1,5 (\pm 0,07) \text{ Salinité} \quad (\text{Ferrari et Dowell, 1998})$$

avec :  $a_{CDOM}$  : le coefficient d'absorption des CDOM à 355 nm.

Ces corrélations permettent de justifier le fait que nous ayons utilisé la salinité à la place des CDOM qui en milieu côtier proviennent de deux sources (Froidefond et Doxaran, 2004) :

- les apports continentaux d'origine pédologique, principalement les acides humiques et fulviques (Kirk, 1994). Dans le Bassin d'Arcachon, ils sont surtout transportés par l'intermédiaire de l'Eyre ;
- les apports provenant de la dégradation du phytoplancton (Bricaud et Stramski, 1990).

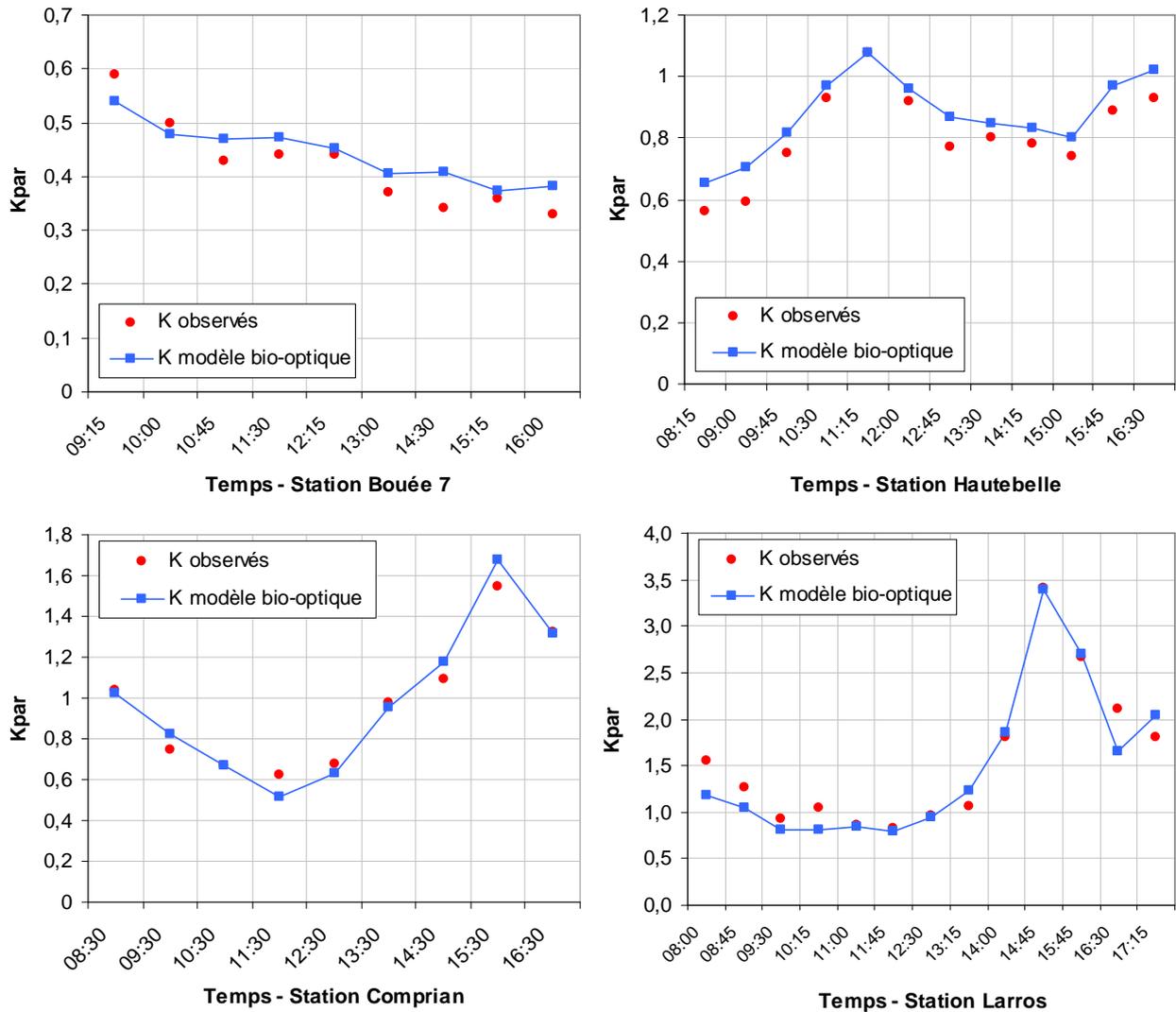
Il faut ici signaler que les valeurs de  $K_{PAR}$  mesurés sont entachées d'une erreur liée aux variations de la distance entre les deux capteurs sub-aquatiques ainsi qu'à la profondeur absolue de ces deux capteurs. En effet, le calcul du  $K_{PAR}$  mesuré dépend de la profondeur  $z$ , de  $PAR_z$  et de  $PAR_0$ .

Lorsque le courant est important, le support sur lequel les capteurs de lumière sont fixés, est fortement incliné. Nous avons alors supposé l'angle d'inclinaison du support, puis calculé la profondeur  $z$  à l'aide du cosinus de cet angle. Les mesures réalisées lors des vitesses maximales de courant ont été retirées. Par ailleurs, la hauteur entre le capteur du  $PAR_0$  et la surface de l'eau varie en fonction de l'agitation de la surface de l'eau : nous avons estimé qu'elle variait entre 0,10 et 0,17 m environ. Les valeurs de  $K_{PAR}$  sont donc soumises à un risque d'erreur de  $\pm 0,03 \text{ m}^{-1}$ .

De plus, les valeurs de concentration en chlorophylle  $a$ , matières minérales et d'absorbance des CDOM sont elles aussi soumises à un petit risque d'erreur :

- précision de la concentration en chlorophylle  $a$  :  $\pm 15 \%$
- précision sur la concentration en MM :  $\pm 0,1$  à  $0,15 \text{ mg}$ .

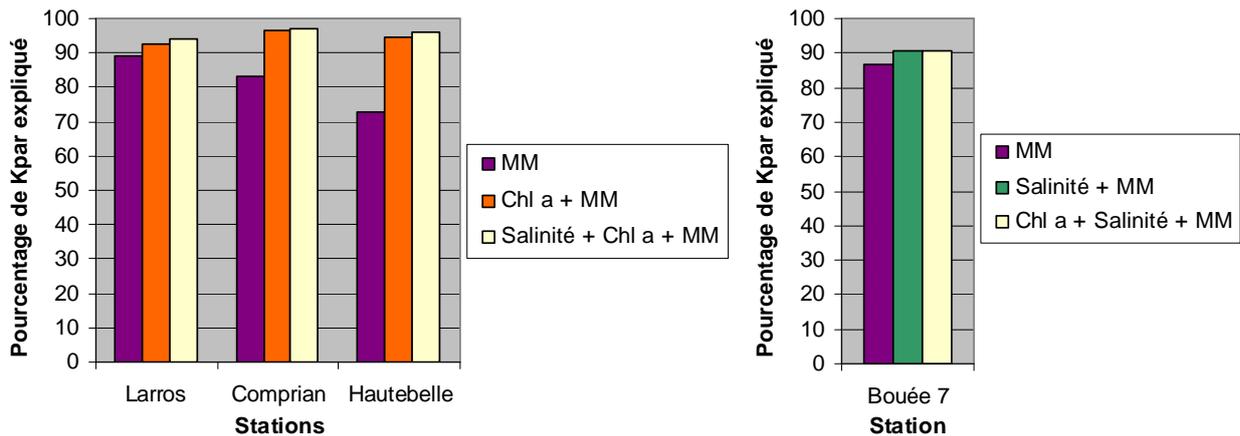
Finalement, le modèle le plus adapté au Bassin d'Arcachon est le modèle issu d'une régression multiple (équation [30]). L'efficacité et la précision de ce modèle sont relativement élevées (voir Fig. 20) et il est exprimé en fonction des variables définies dans le modèle MARS.



*Fig. 20 : Adéquation du modèle bio-optique aux valeurs observées au cours du cycle d'une marée en fonction des stations étudiées*

Cependant il est à noter que la formule proposée (Eq. [30]) donne une valeur de  $K_{PAR}$  proche de  $0,17 \text{ m}^{-1}$ , si on considère une eau océanique pure (salinité 35, absence de matières en suspension et absence de chlorophylle), ce qui est élevé par rapport au  $K_{PAR}$  attendu pour ce type de masses d'eau ( $0,06\text{-}0,08 \text{ m}^{-1}$ ). Faute de très faibles valeurs de  $K_{PAR}$ , ce modèle n'est pas adapté aux eaux du large très pures.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à la contribution des composantes de l'eau au coefficient d'atténuation lumineuse. En effet, les constituants de l'eau contribuent de manière non égale à expliquer le coefficient d'atténuation lumineuse (voir Fig. 21). Ceux qui expliquent la plus grande part de la variation du  $K_{PAR}$  sont les matières minérales en suspension quelque soit la station. La chlorophylle  $a$  et la salinité ajoutent un peu d'explication au coefficient d'atténuation lumineuse.



*Fig. 21 : Contribution des constituants de l'eau (matières minérales, chlorophylle a et salinité) au coefficient d'atténuation lumineuse (Kpar) pour les quatre stations étudiées*

### 3.2. Disponibilité de la lumière pour la zostère marine

Le modèle bio-optique trouvé permet de pouvoir observer la quantité de lumière disponible en fonction de la profondeur à partir de la loi de Beer-Lambert. En effet, comme la colonne d'eau au sein du Bassin d'Arcachon est homogène, nous pouvons appliquer facilement cette loi :

$$PAR_z = PAR_0 \times \exp^{(-K_{PAR} \times z)} \quad [2]$$

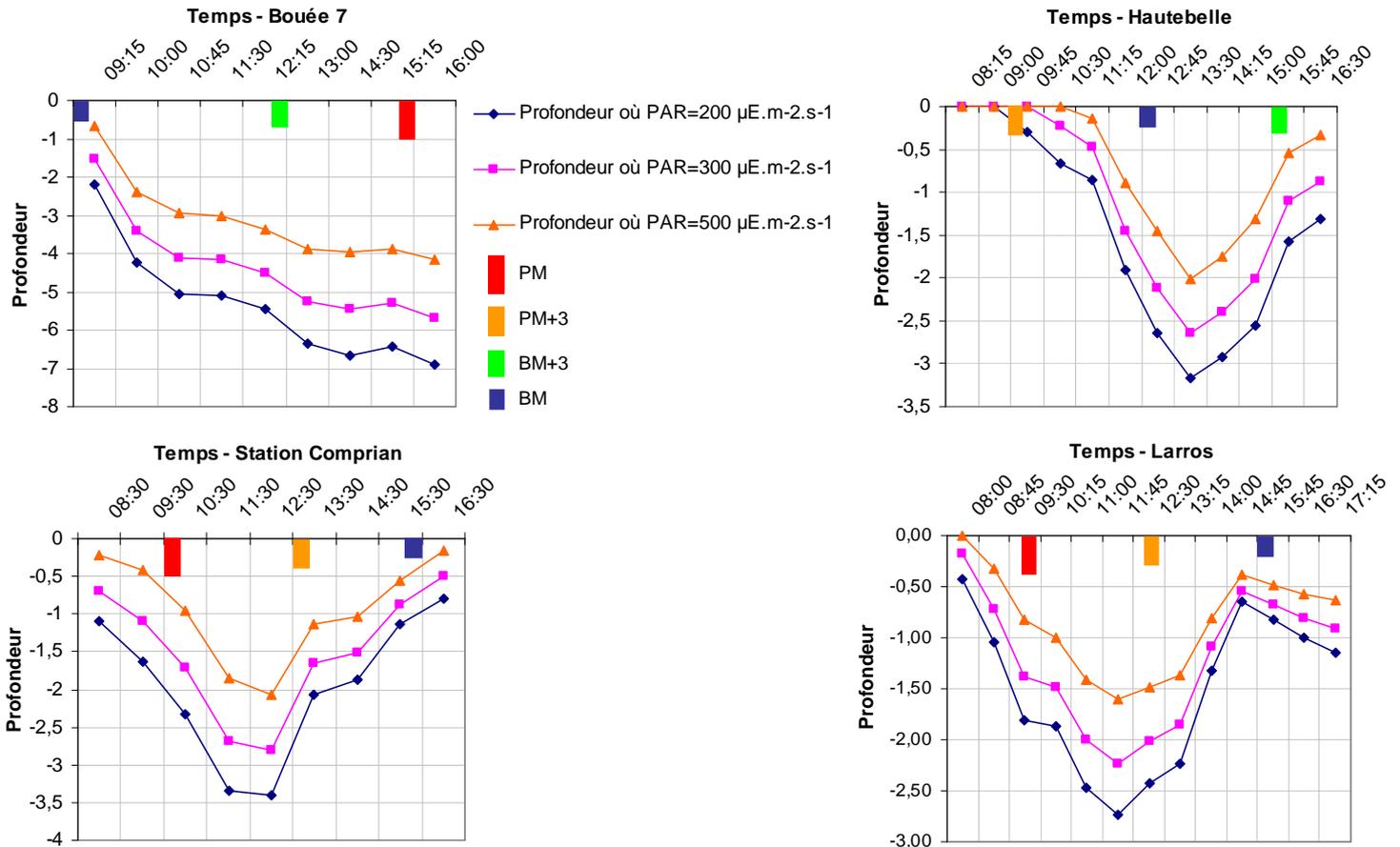
Le PAR est le spectre de longueur d'onde utilisable par les pigments photosynthétiques. C'est la lumière utilisée par les végétaux chlorophylliens, groupe auquel appartiennent les zostères. La disponibilité en lumière est l'un des facteurs prépondérant conditionnant le développement et le maintien de ces herbiers fixés sur le fond. Comme déjà évoqué, on peut s'interroger sur le rôle de l'éclairement sub aquatique sur la régression (et/ou sur la non recolonisation) des herbiers de zostères marines dans les zones « est » du Bassin (notamment les zones des stations « Comprian » et « Hautebelle », tandis que les populations plus occidentales se sont maintenues. Les mesures réalisées au cours de cette étude permettent d'apporter quelques éléments de réponses à cette question.

Globalement, la production primaire des végétaux s'accroît en fonction de l'éclairement jusqu'à une valeur  $I_k$  (intensité lumineuse saturante) à partir de laquelle on mesure une production maximale de la plante (qui peut néanmoins être limitée par d'autres facteurs, tels que la température ou la disponibilité en nutriments). Cette valeur de  $I_k$  varie selon les populations de zostères et de la saison, comme montré par Plus *et al.* (2005) ou Zimmerman *et al.* (1995) par exemple, grâce à une adaptation de leurs stocks pigmentaires.

Pendant, l'été, d'après ces deux publications, les valeurs de  $I_k$  sont maximales : environ  $500 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  pour les zostères marines de la lagune de Thau, qui se développent dans des eaux claires

(Plus *et al.*, 2005), 200 à 300  $\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  pour celles de la Baie de San Francisco (Zimmerman *et al.*, 1995), soumises à des conditions plus turbides.

La figure 22 représente les variations de profondeur au-dessous de la surface de l'eau correspondant à ces trois valeurs d'éclairement saturant.



*Fig. 22 : Pénétration de la lumière à 200, 300 et 500  $\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  au cours d'une marée aux stations Arcachon-Bouée 7, Hautebelle, Comprian et Larros*

Dans un second temps, nous avons calculé la quantité de lumière susceptible de parvenir aux herbiers de zostères marines au niveau de ces quatre stations, en retenant comme profondeurs les bornes auxquelles se développaient les herbiers dans les zones internes du Bassin (0 à -2 m). Les résultats de ces observations sont rapportés dans les graphiques de la figure 23.

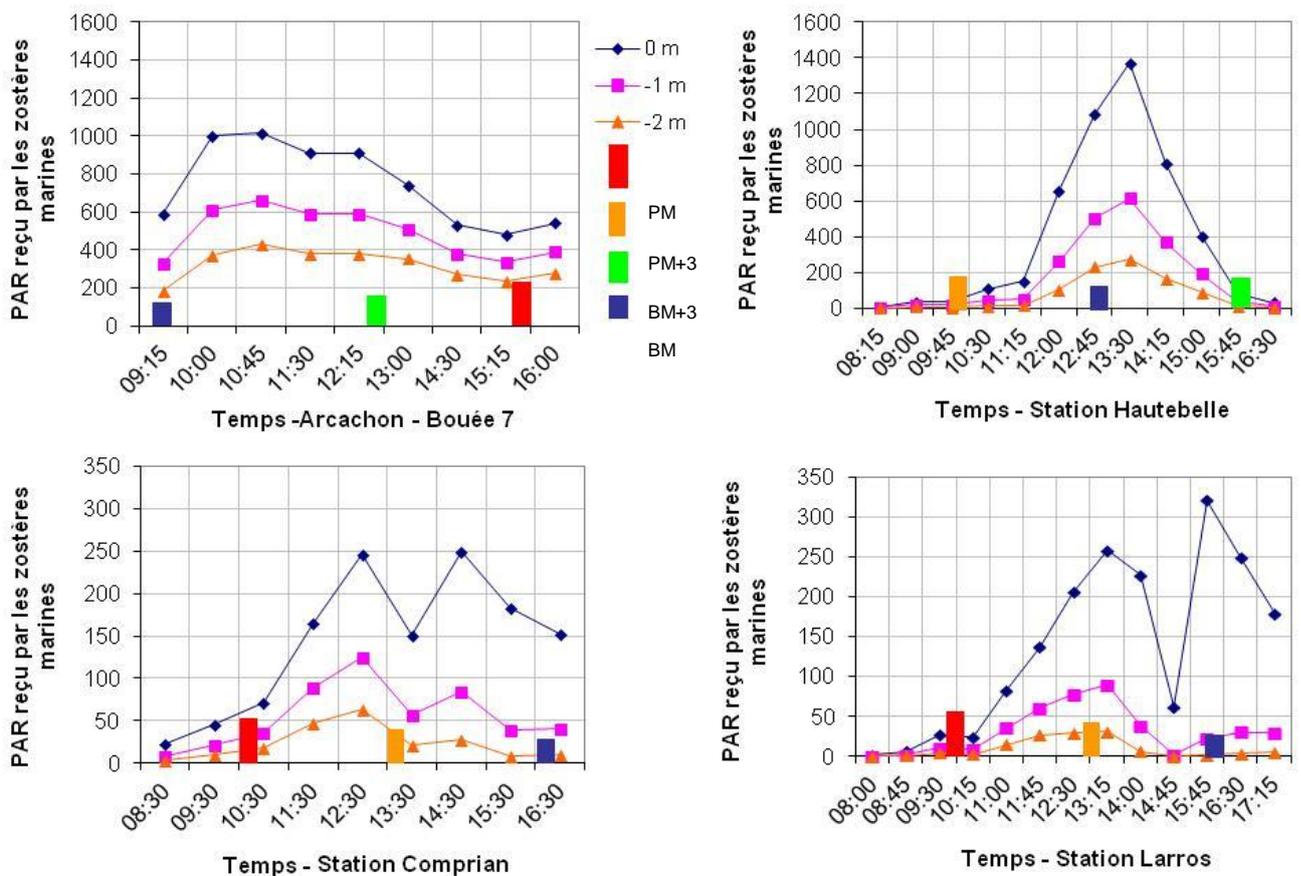


Fig. 23 : Quantité de lumière susceptible de parvenir aux zostères marines (entre 0 et -2 m de profondeur) à Arcachon-Bouée 7, Hautebelle, Comprian et Larros

Les quatre stations étudiées semblent pouvoir se regrouper en trois types différents de conditions lumineuses pour les zostères marines.

- Au niveau de la station Arcachon-Bouée 7, les zostères de trois niveaux bathymétriques bénéficient la plupart du temps d’une intensité lumineuse de  $300 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les zostères les plus profondes reçoivent une intensité lumineuse supérieure à  $300 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  pendant environ 4h30. D’après différentes études (Dennison et Alberte, 1986 ; Zimmerman *et al.*, 1989, 1991 ; Kraemer et Alberte, 1993), les zostères marines nécessiteraient de recevoir entre 2,5 et 4h d’intensité lumineuse supérieure à leur Ik entre le printemps et l’automne . Ainsi, les conditions lumineuses au niveau de cette station semblent être suffisantes pour permettre aux zostères à -2 m de profondeur de survivre et se développer correctement.

- Au niveau de la station Hautebelle, les zostères situées à -2 m bénéficient pendant un temps très court (1h15) d’un éclaircissement supérieur à  $200 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Si le Ik estival de ces populations s’élève à  $200 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , les zostères des niveaux supérieurs (-1m et 0m) disposent d’assez de lumière pour se développer correctement. Par contre, si le Ik s’élève à  $300 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , seules les zostères situées à proximité du 0 bénéficient de conditions lumineuses permettant leur survie.

● Enfin, au niveau des stations de Comprian et Larros, seules les zostères situées à 0 m de profondeur bénéficient pendant quelques heures d'un éclairage supérieur à  $200 \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , ce niveau d'éclairage n'étant jamais atteint dans les niveaux bathymétriques inférieurs. Ainsi, la zone potentiellement colonisable par les zostères est très réduite au niveau de ces stations.

Au vu de ces résultats, on peut suspecter que le développement des zostères marines est limité par l'éclairage dans les zones orientales du bassin, surtout pour les populations situées vers les stations de Comprian et Larros.

De plus, il faut considérer que ces mesures ont été réalisées au printemps et en été, qui sont les saisons où l'intensité lumineuse disponible pour les zostères est maximale. Même si le niveau de  $I_k$  diminue pendant l'hiver, il est probable que cette limitation est plus marquée à cette saison, en raison d'une moindre pénétration de la lumière (moins d'éclairage solaire et moindre pénétration dans l'eau en raison de la diminution de l'angle zénithal et de plus fortes teneurs en MES) et de l'accroissement du besoin des zostères à disposer d'un éclairage saturant pendant un temps plus long (environ 6 h par jour d'après Zimmerman *et al.*, 1989).

A terme, les travaux entrepris pour modéliser la production primaire dans le Bassin permettront d'étendre ces observations et de déterminer plus précisément le rôle de la lumière dans la distribution spatiale des zostères dans cette baie.

# Conclusion

---

Le but principal de cette étude était de calibrer un modèle bio-optique adapté au Bassin d’Arcachon, sur la base de mesures acquises au cours de quatre campagnes réalisées au cours des printemps et été 2012 dans la lagune.

Plusieurs modèles de la littérature ont été testés, dont celui de Gohin *et al.* (2005) actuellement utilisé dans les modèles de production primaire développés au laboratoire Ifremer d’Arcachon, et ceux de Gallegos (1994), Gallegos (1994) modifié par l’équation tirée de Gallegos et Correll (1990) et Gallegos (1994) modifié par l’équation tirée de Pierson *et al.* (2008), en les utilisant directement et en les re-paramétrant afin de les ajuster aux données recueillies lors des campagnes de prélèvement. La qualité de ces différents modèles a été étudiée en utilisant un certain nombre d’outils mathématiques (RMSD, MAE, Eff).

Nous avons ainsi pu mettre en évidence que le modèle de Gohin *et al.* (2005) n’était pas adapté pour le Bassin d’Arcachon, présentant notamment une forte dérive pour des coefficients d’atténuation lumineuse supérieurs à  $1,5 \text{ m}^{-1}$ . Ce problème s’explique probablement par le fait que ce modèle a été défini sur les eaux du large qui ont des coefficients d’atténuation de la lumière plus faibles que dans une lagune. Il est néanmoins possible, en ajustant les paramètres de ce modèle aux données recueillies lors de cette étude, d’obtenir un modèle très satisfaisant pour le Bassin d’Arcachon (Efficacité 0.95 et RMSD  $0.13 \text{ m}^{-1}$ ).

Finalement, il est apparu que le meilleur modèle s’appliquant à ces données est issu d’une régression multiple. Cette régression est exprimée en fonction des variables définies dans le modèle MARS :

$$K_{PAR} = 0,722 + 0,0622 \text{ Chl } a + 0,0372 \text{ MM} - 0,0159 \text{ Salinité} \quad [30]$$

avec :  $K_{PAR}$  : le coefficient d’atténuation lumineuse (en  $\text{m}^{-1}$ ) entre 400 et 700 nm (qui sont les longueurs d’onde utilisables par les pigments photosynthétiques)

Chl  $a$  : la concentration en chlorophylle  $a$  (en  $\mu\text{g/L}$ )

MM : la concentration en matières minérales dissoutes (en  $\text{mg/L}$ ). Ce constituant de l’eau explique la plus grande part de la variation du  $K_{PAR}$ .

L’efficacité de ce modèle est élevée (0,96) et le risque d’erreur est de  $0,13 \text{ m}^{-1}$ . Il est applicable au niveau du Bassin d’Arcachon pour des coefficients d’atténuation compris entre 0,3 et  $3,4 \text{ m}^{-1}$ , avec des concentrations en chlorophylle  $a$  en moyenne de  $4,6 \mu\text{g/L}$  (écart-type =  $2,7 \mu\text{g/L}$ ), des concentrations en matières minérales comprises entre 2,8 et  $71,4 \text{ mg/L}$  (avec une moyenne de  $12,7 \text{ mg/L}$  et un écart-type =  $12,1 \text{ mg/L}$ ) et des salinités comprises entre 22 et 36 ‰. Pour des eaux du large très pauvres en matières en suspension et en chlorophylle, ce modèle surestime en revanche le  $K_{PAR}$ , et on lui préférera le modèle de Gohin (2005) modifié par exemple.

Enfin, les mesures recueillies au cours de cette étude ont permis de réaliser des calculs préliminaires sur l’éclairement disponible pour les herbiers de zostères marines en différents points

du Bassin. Les résultats obtenus semblent mettre en évidence une forte limitation par la lumière pour les populations de zostères localisées dans les zones orientales du bassin, notamment dans son angle sud-est. Ce déficit en lumière peut donc être évoqué comme une raison possible de la non recolonisation de ces zones par les zostères.

# Bibliographie

---

- Auby I. et Grillas P., 1996. Etude des herbiers de *Zostera noltii* de l'étang du Vaccarès. Synthèse des résultats 1993-1995.
- 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 de zostères dans le Bassin d'Arcachon : état des lieux et recherche des causes. Rapport Ifremer, - RST/LER/AR/11.007, 155 p. + annexes.
- Aminot A. et Kérouel R., 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. 336 p.
- Babin M., Stramski D., Ferrari G. M., Claustre H., Bricaud A., Obolensky G., Hoepffner N., 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particules, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C7), 3211.
- Banas *et al.*, 2005. Short time scale changes in underwater irradiance in a wind-exposed lagoon (Vaccarès lagoon, France) : efficiency of infrequent field measurements of water turbidity or weather data to predict irradiance in the water column. *Hydrobiologia*, 551: 3-16.
- Biber P. D., C. L. Gallegos, 2007. Calibration of a bio-optical model in the North River, North Carolina (Albemarle-Pamlico Sound): a tool to evaluate water quality impacts on seagrass. *Estuaries and Coasts*, 31: 177-191.
- Bowers, D.G. et Brett H.L., 2008. The relationship between CDOM and salinity in estuaries: an analytical and graphical solution. *Journal of Marine Systems*, 73: 1-7.
- Bricaud Annick, Morel André et Prieur Louis, 1981. Absorbance by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*, 26(1): 43-53.
- Bricaud, A. et Stramski, D., 1990. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnology and Oceanography*, 35: 563-582.
- Dennison, W.C. et Alberte, R.S., 1986. Photoadaptation and growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) transplants along a depth gradient. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 98: 265-282.
- Ferrari G.M. et Dowell M.D., 1998. CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the southern Baltic sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47: 91-105.

- Froidefond, J.-M. et Doxaran D., 2004. Télédétection optique appliquée à l'étude des eaux côtières. *Télédétection*, 4 : 579-597.
- Gallegos Charles L. et Correll David L., 1990. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. *Limnology and Oceanography*, 35(7): 1486-1502.
- Gallegos Charles L., 1994. Refining habitat requirements of submersed aquatic vegetation: role of optical models. *Estuaries*, 17: 187-199.
- Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Huret M., Herbland A., 2005. Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95: 29-46.
- Kirk, J.T.O., 1976. Yellow substance (Gelbstoff) and its contribution to the attenuation of photosynthetically active radiation in some inland and coastal south-eastern Australian waters. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 27: 61-71.
- Kirk, J.T.O., 1984. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. *Limnology and Oceanography*, 29(2): 350-356.
- Kirk, J.T.O., 1994. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 509 p.
- Kostoglidis, A., Pattiaratchi C. B. et Hamilton D. P., 2005. CDOM and its contribution to the underwater light climate of a shallow, microtidal estuary in south-western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63: 469-477.
- Kraemer, G.P. et Alberte, R.S., 1993. Age-related patterns of metabolism and biomass in subterranean tissues of *Zostera marina* (eelgrass). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 95: 193-203.
- Legendre, P. et Legendre L., 1998. *Numerical ecology*. 2<sup>nd</sup> English edition. Elsevier Science BV, Amsterdam. xv + 853 p.
- Loos E. A., M. Costa, 2010. Inherent optical properties and optical mass classification of the waters of the Strait of Georgia, British Columbia, Canada. *Progress in Oceanography*, 87: 144-156.
- Millet B., Robert C., Grillas P., Coughlan C., Banas D., 2010. Numerical modelling of vertical suspended solids concentrations and irradiance in a turbid shallow system (Vaccares, Se France). *Hydrobiologia*, 638: 161-179.
- Pierson D. C., Kratzer S., Strömbeck N., Håkansson B., 2008. Relationship between the attenuation of downwelling irradiance at 490 nm with the attenuation of PAR (400 nm-700 nm) in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 112: 668-680.

- Piñeiro G., Perelman S., Guerschman J.P., Paruelo J.M., 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological modelling*, 316-322.
- Platt *et al.*, 1984. Thermodynamics of the pelagic ecosystem : elementary closure conditions for biological production in the open ocean, p. 49-84. In flows of energy and materials in marine ecosystems. NATO Conf. Ser. 4, Mar Sci. V. 13 Plenum.
- Plus M., Auby I., Verlaque M. et Levavasseur G., 2005. Seasonal variations in photosynthetic irradiance response curves of macrophytes from a Mediterranean coastal lagoon. *Aquatic Botany*, 81: 157-173.
- Smith Raymond C. et Baker Karen S., 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Applied Optics*, 20(2): 177-184.
- Zimmerman, R.C., Smith R.D., and Alberte R.S., 1989. Thermal acclimation and whole-plant carbon balance in *Zostera marina L.* (eelgrass). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 130: 93-109.
- Zimmerman, R.C., Reguzzoni J.L., Wyllie-Echeverria S., Josselyn M. and Alberte R.S., 1991. Assessment of environmental suitability for growth of *Zostera marina L.* (eelgrass) in San Francisco Bay. *Aquat. Bot.*, 39: 353-366.
- Zimmerman, R.C., Reguzzoni J.L. and Alberte R.S., 1995. Eelgrass (*Zostera marina L.*) transplants in San Francisco Bay: Role of light availability on metabolism, growth and survival. *Aquatic Botany*, 51: 67-86.

## Annexe : Relation entre l'intensité lumineuse mesurée avec le capteur plan et celle mesurée avec le capteur sphérique

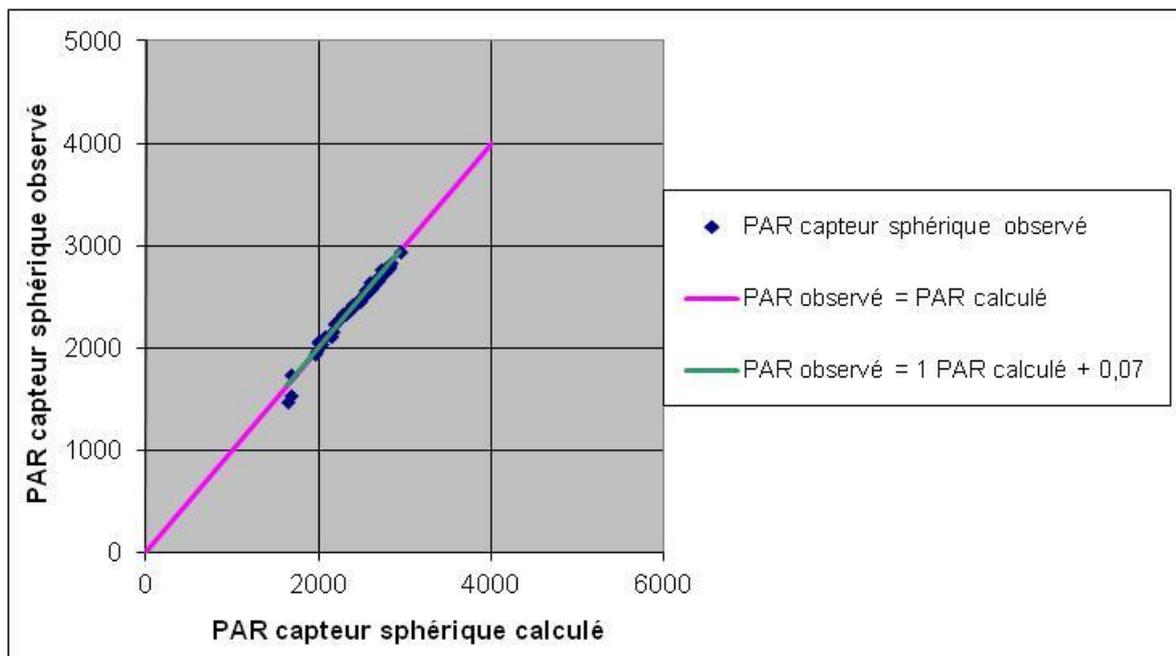
La relation liant les valeurs de PAR mesuré avec le capteur sphérique et celles mesurées avec le capteur plan est la suivante [a] :

$$PAR_{sphérique} = 1,648 PAR_{plan} - 19,113 \text{ angle zénithal solaire} + 1234,858 \quad [a]$$

avec : PAR sphérique : le PAR mesuré avec le capteur sphérique

PAR plan : le PAR mesuré avec le capteur plan

La figure A compare le PAR mesuré avec le capteur sphérique de lumière au PAR calculé avec l'équation [a].



*Fig. A : PAR observé mesuré avec le capteur sphérique en fonction du PAR calculé à partir des données de PAR mesuré avec le capteur plan et l'angle zénithal solaire*

La pente de la régression est significativement égale à 1 (p-value  $\approx 1$ ) et l'ordonnée à l'origine est significativement égale à 0 (p-value = 0,999). Les résultats ci-dessous ont été obtenus :

RMSD =  $38,57 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

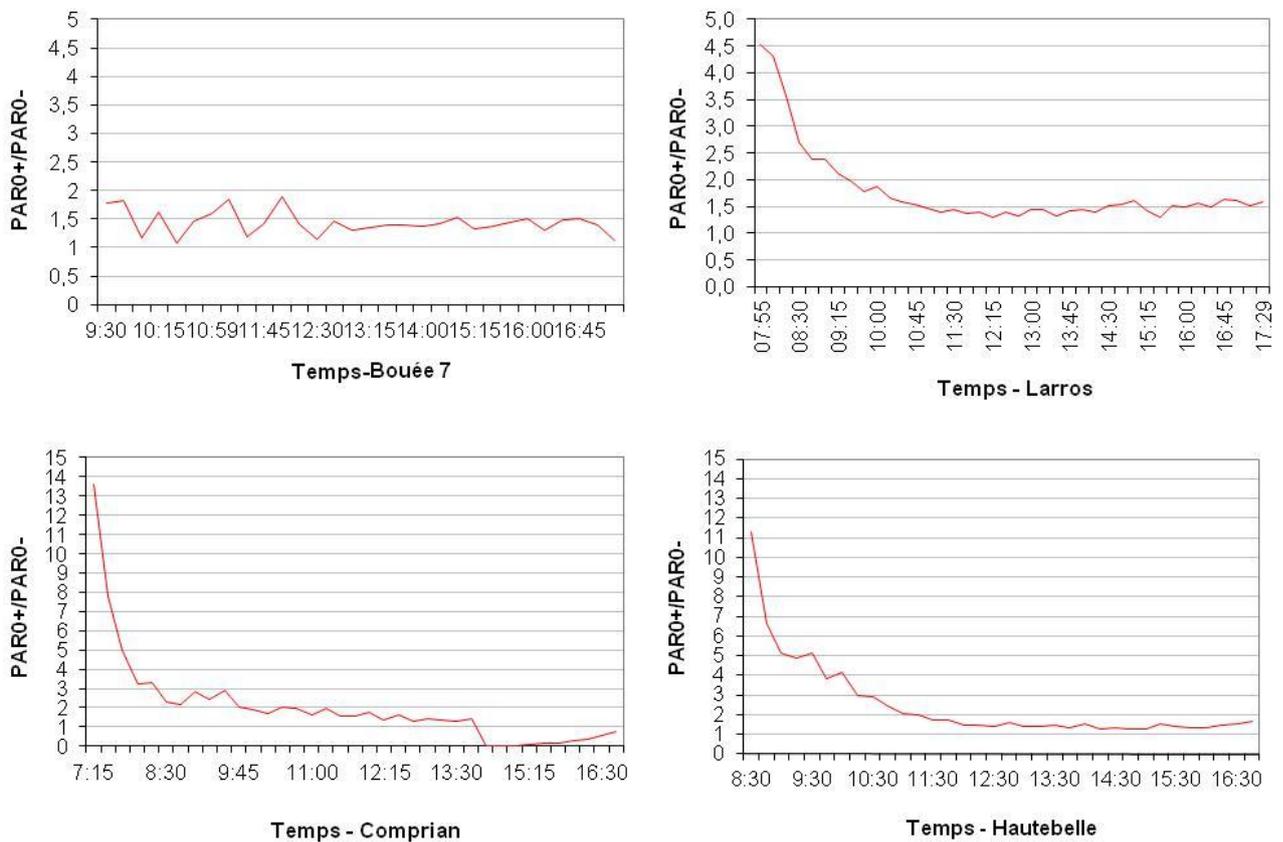
MAE =  $25,1 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Eff = 0,985

La figure B permet d'observer les variations au cours de la journée du rapport :  $\frac{PAR0^+}{PAR0^-}$

avec :  $PAR0^+$  : le PAR mesuré dans l'air avec le capteur plan et transformé en sphérique grâce à la relation [a].

$PAR0^-$  : le PAR mesuré sous la surface de l'eau avec le capteur sphérique.



*Fig. B : Variation du rapport  $\frac{PAR0^+}{PAR0^-}$  au cours de la journée pour les quatre stations étudiées*