Université de Lille
Unité Mixte de Recherche - **Laboratoire d'Optique Atmosphérique** (LOA)
École doctorale **Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement** (SMRE)

Développement d'une méthode d'étalonnage en vol utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan dans le cadre de la mission 3MI

Thèse présentée par

Mohamed S. Djellali

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Lille

Discipline : Physique
Spécialité : Terre, Enveloppes fluides

Thèse soutenue publiquement le 17 décembre 2024

Rapporteurs	Dr. François-Marie Bréon	DR, CEA/LSCE
	Pr. Jean-Claude Roger	University of Maryland
Présidente du jury	Pr. Céline Cornet	Université de Lille
Examinateurs	Dr. Camille Desjardins	CNES
	Dr. Bertrand Fougnie	EUMETSAT
	Dr. Lucas Landier	CNES
Directeur de thèse	Pr. Jérôme Riedi	Université de Lille
Invité	Sébastien Marcq	CNES

Table des matières

I Introduction **8**

II État de l'art de l'étalonnage en vol d'instruments spatiaux utilisant des cibles naturelles prédictibles **12**

i Introduction 13
ii Principaux types d'étalonnage en vol utilisant des cibles naturelles 14
1 Étalonnage absolu en réflectance (*Absolute calibration*) . . . 14
2 Étalonnage inter-bandes 17
3 Étalonnage inter-instrument (*intercalibration*) 21
iii Suivi temporel de l'étalonnage 23
iv Conclusion 25

III 3MI : Caractéristiques, objectifs de la mission, et exigences en terme d'étalonnage **27**

i Caractéristiques de 3MI 28
1 Design 28
2 Objectifs de la mission 30
ii Modèle radiométrique instrumental 32
1 Définitions générales 32
2 Interaction de la lumière avec les polariseurs 36
3 Non-uniformité de la réponse instrumentale dans le champ 37
4 Coefficient d'étalonnage absolu 38
5 Formulation du MRI 39
6 Exigences en terme d'étalonnage 41
iii Conclusion 41

IV Sensibilité de la réflectance du *glitter* aux paramètres géophysiques 44
i Introduction . . . 45
ii Outils de transfert radiatif utilisés . . . 47
1 Description . . . 47
2 Modèle de surface . . . 48
3 Modèles d'aérosols . . . 48
iii Modèle du *glitter* . . . 48
iv Études de sensibilité . . . 50
1 Sensibilité aux paramètres du vent : vitesse de surface et direction . . . 51
2 Sensibilité au type et à la quantité d'aérosols . . . 63
3 Sensibilité à la couleur de l'eau . . . 80
4 Sensibilité dans le SWIR à la salinité de l'eau . . . 87
v Conclusion . . . 93

V Méthode d'étalonnage absolu utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan 95
i Introduction . . . 96
ii Méthode d'étalonnage . . . 96
1 Principe . . . 96
2 Critères de sélection . . . 101
3 Effet de la non-monotonie de la réflectance TOA autour de la direction spéculaire . . . 105
iii Conclusion . . . 108

VI Application de l'algorithme aux mesures PARASOL 110
i Introduction . . . 111
ii Résultats du pré-traitement des données PARASOL . . . 112
1 Distribution géographiques des pixels utiles à l'étalonnage . . . 112
2 Vitesse du vent . . . 113
3 Épaisseur optique aérosol (AOT) . . . 115
4 Distributions des valeurs de réflectance . . . 117
iii Résultat des simulations des données PARASOL . . . 122

1 Résultats pour les canaux non-polarisés 123
2 Résultats pour les canaux polarisés 135
iv Suivi temporel de l'étalonnage de POLDER-3 150
v Conclusion 154

VII Conclusion générale et perspectives 157

Liste des figures 207

Liste des tableaux 213

Liste des acronymes 215

Références 217

Page blanche laissée intentionnellement

Development of an in-flight calibration method using the sunglint for the 3MI Mission

Abstract

This thesis presents the development of an innovative in-flight calibration method using the sunglint effect on the ocean surface, particularly within the context of the 3MI mission. As the successor to the POLDER/PARASOL instruments, 3MI offers improved capabilities in multi-spectral observation, enabling precise monitoring of aerosols, clouds, and the Earth's atmosphere.

The research focuses on leveraging the sunglint, a natural reflection phenomenon that occurs on the ocean surface, as a calibration target for radiometers. The sunglint provides a polarized signal with high intensity, making it a useful reference for instrument calibration. However, the method's main challenge lies in accurately modeling the effect of surface wind speed and aerosol properties, both of which affect the precision of the simulated reflected signal.

Through sensitivity studies and model simulations, the thesis demonstrates that it is possible to minimize these uncertainties by focusing on specific zones of invariance within the sunglint reflection, where the impact of geophysical parameters, mainly the surface wind speed, is less pronounced. This innovative approach was tested with data from the POLDER3/PARASOL mission, achieving accurate simulations and validating the method for potential application to 3MI and future satellite missions.

The proposed calibration technique is significant not only for enhancing 3MI's radiometric calibration capabilities but also for broader applications across various instruments used in Earth observation. It has the potential to become a standard for in-flight calibration and its temporal monitoring which is particularly critical for climate and environmental monitoring missions.

Keywords : In-flight calibration, Sunglint, Ocean surface reflection, Radiometry, 3MI mission, POLDER/PARASOL, Aerosol monitoring, Geophysical parameter modeling, Satellite instrumentation, Earth observation

Développement d'une méthode d'étalonnage en vol utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan dans le cadre de la mission 3MI

Résumé

Cette thèse présente le développement d'une méthode innovante d'étalonnage en vol utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan, en particulier dans le cadre de la mission 3MI. Successeur des instruments POLDER/PARASOL, 3MI offre des capacités améliorées en matière d'observation multi-spectrale, permettant une surveillance précise des aérosols, des nuages et de l'atmosphère terrestre.

La recherche se concentre sur l'utilisation du *glitter*, un phénomène naturel de réflexion se produisant à la surface de l'océan, comme cible d'étalonnage pour les radiomètres. Le *glitter* fournit un signal polarisé avec une forte intensité, ce qui en fait une référence utile pour l'étalonnage des instruments. Cependant, le principal défi de la méthode réside dans la modélisation précise de l'impact de la vitesse du vent de surface et des propriétés des aérosols, qui influencent toutes deux la précision de la simulation du signal réfléchi.

Grâce à des études de sensibilité et des simulations de modèles, la thèse démontre qu'il est possible de minimiser ces incertitudes en se concentrant sur des zones d'invariance spécifiques au sein de la réflexion du *glitter*, où l'impact des paramètres géophysiques, principalement la vitesse du vent, est moins prononcé. Cette approche novatrice a été testée avec les données de la mission POLDER3/PARASOL, obtenant des simulations précises et validant la méthode pour une application potentielle à 3MI et aux futures missions satellitaires.

La technique d'étalonnage proposée est significative non seulement pour améliorer les capacités d'étalonnage radiométrique de 3MI, mais aussi pour des applications plus larges sur divers instruments utilisés pour l'observation de la Terre. Elle a le potentiel de devenir une norme pour l'étalonnage en vol et le suivi temporel de celui-ci, critique notamment dans les missions de surveillance climatique et environnementale.

Mots-clés : Étalonnage en vol, Réflexion spéculaire (glitter), Réflexion à la surface de l'océan, Radiométrie, Mission 3MI, POLDER/PARASOL, Surveillance des aérosols, Modélisation des paramètres géophysiques, Instrumentation satellitaire, Observation de la Terre

REMERCIEMENTS

Une thèse de doctorat, c'est avant tout une aventure et une expérience qui dépasse le cadre personnel. C'est un chemin parcouru grâce à plusieurs personnes, sans qui tout le travail présenté ici n'aurait pas été possible. Je souhaite commencer ces remerciements en soulignant que ce travail n'aurait pu voir le jour sans le financement octroyé par le Centre National d'Études Spatiales ainsi que la Région Hauts-de-France, que je remercie sincèrement.

Bien évidemment, une thèse sans encadrement ni soutien est impossible, et je ne saurai jamais assez remercier mon directeur de thèse, Jérôme Riedi, qui m'a encouragé et soutenu depuis de longues années. Il m'a fait découvrir le monde de la recherche et permis de saisir des opportunités diverses et variées qui m'ont enrichi non seulement en tant que scientifique, mais aussi en tant que personne. Ce travail n'aurait jamais abouti sans son soutien indéfectible.

Je souhaite également remercier sincèrement Frédéric Parol, qui m'a été d'une grande aide tout au long de cette thèse, mais aussi bien avant, durant mes années de master. Un grand merci également à Philippe Dubuisson, qui m'a soutenu et a cru en mon travail et en moi.

Une thèse, c'est aussi, et surtout, beaucoup de questions. À ce titre, je tiens à exprimer ma gratitude envers Souichiro Hioki, qui m'a énormément aidé dans la réalisation de ces travaux et qui, en plus d'être un collègue aux grandes compétences, est un ami précieux dont j'ai beaucoup appris. En parlant de questions, je remercie également François Thieuleux et Fabrice Ducos pour leur aide ainsi que pour nos nombreuses discussions techniques enrichissantes. Je remercie également Frédérique Auriol, qui a été d'une grande aide lors des travaux sur l'instrument OSIRIS, ainsi que Fabien Waquet pour ses questions pertinentes qui ont permis de faire avancer ces travaux. Mes remerciements vont aussi à tous les membres du LOA en général, et à ceux que je n'ai pas cités, mais qui se reconnaîtront.

Merci également à Sébastien Marcq de m'avoir fait découvrir l'environnement de travail des ingénieurs du CNES. Je remercie aussi sincèrement François-Marie Bréon et Jean-Claude Roger d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi que les membres du jury : Céline Cornet, Camille Desjardins, Bertrand Fougnie et Lucas Landier. Merci d'avoir accepté d'évaluer ces travaux.

Enfin, je n'oublie pas mes frères Khalil et Lamine, ainsi que ma sœur Hasna, pour avoir toujours cru en moi. Je remercie également mon cher ami Dumitru, pour avoir été là dans les moments difficiles, ainsi que Mustapha, pour les nombreuses expériences partagées durant cette aventure.

Je dédie ce travail à mes parents, à qui je dois tout.

Chapitre I

Introduction

Les informations collectées par les capteurs à bord des satellites d'observation de la Terre ont révolutionné notre connaissance de l'environnement planétaire. L'inquiétude croissante concernant les problèmes environnementaux actuels et la durabilité future de notre planète a suscité un grand intérêt pour la surveillance des principales variables du système terrestre. La télédétection par satellite est un outil particulièrement précieux pour collecter des informations essentielles sur l'état de l'environnement. Les impacts du changement climatique, de la déforestation, de la désertification, des incendies, des inondations et d'autres perturbations dues à des causes naturelles ou anthropiques nécessitent une source de données géographiques actualisées, globales et complètes. Les observations satellitaires de la Terre fournissent une vue globale et récurrente des nombreux processus dynamiques se produisant dans le système Terre-atmosphère.

La télédétection définit les méthodes de mesures consistant à étudier des cibles sans avoir à interagir avec le milieu. Cela est notamment possible par le biais de l'analyse des rayonnements émis ou réfléchis par les milieux étudiés. Plus communément, le terme est lié à l'acquisition d'informations sur la Terre ou d'autres planètes (études de l'atmosphère, des sols etc...). Pour recueillir le rayonnement en question, on a recours à l'utilisation de différents types d'instruments. Notamment, on citera les radiomètres imageurs. Ces types d'instruments sont dotés d'une chaîne de mesure complexe, composée de systèmes optiques avancés se terminant par des matrices de détecteurs (e.g. matrices CCD). Cela permet d'enregistrer des images d'une scène telle que l'atmosphère terrestre vue depuis l'espace, et permet l'accès à des informations sur cette dernière. L'exploitation des données de ces instruments requièrent des exigences particulières en termes d'étalonnage. En effet, la précision de l'étalonnage radiométrique est l'un des principaux éléments contribuant à la qualité des mesures d'un instrument. Les instruments sont étalonnés durant des campagnes de caractérisations effectuées en laboratoire et ce, avant leur mise en orbite. Une fois en vol, ces instruments subissent des dégradations dues à l'exposition aux rayonnements ionisants ainsi que le vide spatial, en plus du vieillissement des composants même de ces derniers. Pour faire face à ce problème, de nombreux instru-

ments disposent de systèmes d'étalonnage en vol qui sont embarqués sur la plateforme (Zhou et al., 2015). Ces dispositifs requièrent une préparation poussée et coûteuse et finissent également par subir une dégradation dont il faut pouvoir quantifier l'effet à long terme (Bertrand Fougnie and Patrice Henry, 2015). La difficulté de devoir maintenir un bon étalonnage pour chacun des instruments ainsi que leurs dispositifs embarqués a poussé certaines missions spatiales à considérer l'utilisation de sources naturelles modélisables. Ces dernières permettent d'atteindre des précisions d'étalonnage radiométrique suffisantes pour effectuer de la télédétection (Fougnie et al., 2007; Hagolle et al., 1999). L'un des premiers instruments à s'être entièrement basé sur l'étalonnage utilisant des sources naturelles est l'instrument POLDER (Hagolle et al., 1999). Les instruments de type POLDER ont offert un avantage considérable en terme d'observations de la Terre depuis l'espace, notamment par leur capacité de mesure multi-directionnelle et polarimétrique. Le succès du design et des résultats des missions utilisant ces derniers a naturellement découlé sur le développement d'un nouvel instrument s'en inspirant, le Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarisation Imager (3MI).

3MI est un radiomètre imageur intégré à la future plateforme satellitaire METOP-SG-A prévue pour un lancement mi-2025. Successeur des instruments POLDER/PARASOL dont il est fortement inspiré (Marbach et al., 2013; Fougnie et al., 2018), il sera dédié à l'étude des aérosols, des nuages, et du climat. Bien qu'il ait plusieurs similarités avec ces prédécesseurs, 3MI se démarque notamment par l'apport d'une plus grande information multi-spectrale avec des canaux spectraux allant de 410 nm à 2130 nm (contre 443 nm à 1020 nm pour POLDER/PARASOL) . À l'instar de son prédécesseur, 3MI ne dispose pas de système d'étalonnage en vol embarqué, et sera étalonné uniquement en utilisant des cibles naturelles (Marbach et al., 2013; Fougnie et al., 2018). La gamme spectrale étendue dans le proche et moyen infrarouge ainsi qu'une chaîne de mesure plus complexe introduisent de nouveaux défis en terme d'étalonnage instrumental. Les travaux présentés dans cette thèse ont pour but le développement d'une méthode novatrice pour l'étalonnage en vol utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan (*glitter*) qui serait

applicable à 3MI mais également à différents autres instruments imageurs observant la Terre depuis l'espace dans le domaine spectral couvrant le visible et l'infrarouge proche et moyen.

À cet effet, nous entamerons la présentation des travaux par un aperçu global de l'état de l'art en terme d'étalonnage en vol. Par la suite, nous présenterons l'instrument 3MI, en prenant soin de décrire ses principales caractéristiques techniques, modèle radiométrique instrumental, les applications attendues pour les différentes bandes spectrales, ainsi que les objectifs de la mission en terme d'étalonnage. Nous poursuivrons par une étude détaillée de la sensibilité à différents paramètres géophysiques de la réflectance TOA lors de l'observation du *glitter*. Le but de l'étude de sensibilité est de déterminer les paramètres auxquels les observations du *glitter* sont les plus sensibles pour mettre en évidence le cœur du problème et les défis rencontrés lors des simulations des observations du phénomène. Par la suite, nous établirons les hypothèses de base permettant de définir la méthode d'étalonnage que nous allons proposer, ainsi que les critères de sélection des pixels/points d'intérêt. Finalement, nous présenterons les résultats de la validation de l'approche proposée sur les mesures POLDER/PARASOL (POLDER-3), pour la période entre 2006 et 2010. Cette partie décrira également les défis auxquels nous avons été confrontés ainsi que les approches utilisées pour y faire face. Nous concluerons sur les résultats obtenus, les limitations de l'approche actuelle ainsi que les perspectives et implications pour l'utilisation de cette nouvelle méthode d'étalonnage applicable à la fois pour les observations de réflectances totales et polarisées.

Chapitre II

État de l'art de l'étalonnage en vol d'instruments spatiaux utilisant des cibles naturelles prédictibles

I INTRODUCTION

L'étalonnage d'un instrument consiste à établir la relation entre les valeurs des grandeurs physiques mesurées par ce dernier et le signal produit par l'instrument lorsqu'il est dans un environnement contrôlé. Ainsi, grâce au contrôle de l'environnement de mesure, il devient possible de modéliser avec précision ce que l'instrument observe et mesure. Pour décrire la réponse de l'instrument, on définit notamment ce qu'on appelle un modèle radiométrique. Les définitions et caractérisations des modèles radiométriques d'instruments tels que 3MI, POLDER, ainsi que de OSIRIS (version aéroportée de 3MI) sont décrits en détail dans la littérature (Hagolle et al., 1999; Goloub et al., 1994; Crespin and Lafrance, 2013; Auriol et al., 2008; Djellali, 2017). Le but de ce chapitre n'est pas la présentation en détail des modèles radiométriques de tous les instruments précédemment cités. Nous nous focaliserons sur 3MI et POLDER, et prendrons soin de décrire le modèle de 3MI ainsi que les principaux paramètres de ce dernier pouvant être caractérisés via les méthodes d'étalonnage que nous allons discuter dans ce chapitre.

Le principe de l'étalonnage en vol utilisant des cibles naturelles repose sur la capacité à pouvoir modéliser de manière précise le signal au sommet de l'atmosphère (*Top of atmosphere* (TOA)) tel que mesuré par l'instrument. Pour ce faire, on sélectionnera des scènes particulières observées par l'instrument lors de son vol. Ces dernières, grâce à leurs propriétés typiques et remarquables, seront plus faciles à modéliser. L'objectif étant, dans le cas de 3MI, de pouvoir simuler la luminance mesurée avec une précision meilleure que 2% (Fougnie et al., 2018). Dans ce qui suit, nous allons décrire les différents types d'étalonnages et leur utilité dans le suivi des performances radiométriques de l'instrument.

Ce chapitre donne un aperçu global de l'état de l'art en matière de méthodes d'étalonnage utilisant des cibles naturelles modélisables ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients. Chaque méthode verra son principe décrit, ainsi que ce qu'elle permet d'achever en terme de caractérisation instrumentale.

II PRINCIPAUX TYPES D'ÉTALONNAGE EN VOL UTILISANT DES CIBLES NATURELLES

1 Étalonnage absolu en réflectance (*Absolute calibration*)

Nous allons nous intéresser à la réflectance observée par l'instrument pour la faire correspondre au nombre de comptes numériques donnés par l'instrument en sortie de chaîne d'acquisition. En laboratoire, ce type d'étalonnage se fait généralement en utilisant des sphères intégratrices aussi appelées sphères d'étalonnage. Ces dernières servent de sources lumineuses lambertiennes, homogènes, dont l'intensité est temporellement stable et connue sur une partie du spectre électromagnétique (Labsphere, 2011).

Pour ce qui est de l'étalonnage en vol, la principale méthode utilisée pour estimer la réflectance mesurée se base sur la diffusion Rayleigh. Ce choix est dû au fait que la physique sous-jacente à ce phénomène est relativement bien maîtrisée, et de fortes hypothèses peuvent être émises lors de la sélection des scènes utiles. Dans ces conditions, les codes de simulation du transfert radiatif réussissent à restituer le signal au TOA avec des précisions acceptables pour effectuer de l'étalonnage. Il est à rappeler que la diffusion Rayleigh voit sont efficacité décroître fortement en fonction de la longueur d'onde (les lois de la diffusion favorisent les plus courtes longueurs d'onde), et l'épaisseur optique moléculaire qui varie selon λ^{-4} (Bates, 1984; Bucholtz, 1998; Bréon, 1998). La capacité de mesure polarimétrique des instruments POLDER/PARASOL a également introduit un besoin en terme d'étalonnage absolu de la composante polarisée du rayonnement. Pour ce faire, l'une des cibles qui a été considérée est le *glitter* (réflexion spéculaire à la surface de l'océan). Une méthode d'étalonnage utilisant cette cible a été proposée par et validée sur le prototype aéroporté de POLDER (Toubbé, 1996; Toubbé et al., 1999).

1.1 Diffusion Rayleigh

Pour ce type d'étalonnage, on sélectionne une longueur d'onde $\lambda \leqq 670$nm (la valeur de λ mentionnée ci-contre se base sur une des valeurs des bandes spectrales de POLDER et 3MI). Dans un cas concret, il faut sélectionner des scènes au dessus de l'océan (pour avoir une surface sombre), sans nuages, et dans des zones où la quantité d'aérosols est faible. Dans cette situation, la contribution de la diffusion Rayleigh au signal total, à ces longueurs d'ondes, est de l'ordre de 90% du signal total (Chander et al., 2013; Fougnie, 2016). Ainsi, seules quelques corrections mineures sont à apporter au signal, à savoir : les aérosols résiduels, la réflectance marine, et l'absorption gazeuse. Les principaux points pris en compte et dont l'effet est modélisé/corrigé pour cette méthode (Vermote et al., 1992) sont :

– L'épaisseur optique Rayleigh (τ_{Ray}) : elle est estimée en prenant une pression moyenne de surface ;

– Les aérosols : leur effet est très variable. Ainsi, il faudra choisir un ou plusieurs modèles différents. Certains types d'aérosols peuvent modifier la visibilité et donc la valeur de la contribution des aérosols au signal total, le choix d'un modèle adapté s'impose ;

– L'écume de mer : a une contribution lambertienne au signal observé. Son effet est représenté par le produit entre la couverture de l'écume et la réflectance intrinsèque de l'écume. La réflectance intrinsèque de l'écume est considérée indépendante de la vitesse du vent et dont la valeur est constante entre 400 et 850 nm ;

– La réflectance de surface (en dehors du *glitter*) : comme nous considérons une surface océanique, la contribution de la surface vient principalement du contenu en chlorophylle et en sédiments. Pour simplifier le problème et minimiser les erreurs sur la réflectance restituée, on considérera des eaux claires ;

– La réflexion spéculaire (*glitter*) : dépend de la géométrie d'observation. L'étendue de la zone affectée dépend de la vitesse du vent. On se posera suffisamment loin de la réflexion spéculaire, et pour s'éloigner de l'étendue du *glitter*, on impose une limite sur la vitesse du vent ;

– L'absorption par les gaz atmosphériques : il y a quatre principaux absorbants à considérer. L'oxygène et le dioxyde de carbone, dont les concentrations sont relativement stables et connues, ainsi que l'ozone et la vapeur d'eau, dont les concentrations varient fortement et doivent être estimées.

D'un point de vue pratique, cette méthode permet d'étalonner l'instrument sur les longueurs d'ondes de la partie visible du spectre électromagnétique, et ce, sur toute l'étendue du champ de vue de l'instrument, mises à part les zones affectées par la réflexion spéculaire.

1.2 Taux de polarisation à partir du *glitter*

Cette approche va utiliser la capacité multidirectionnelle de l'instrument POLDER permettant d'observer à la fois le *glitter* et des zones non affectées par la réflexion spéculaire, quasi simultanément. Le taux de polarisation du *glitter* ne dépendant que de la géométrie d'observation, nous pouvons ainsi émettre des hypothèses sur les autres paramètres du problème (vitesses de vent, modèles d'aérosols) (Toubbé, 1996; Toubbé et al., 1999). Une fois la part de la réflectance due aux aérosols estimée, il devient possible de corriger l'observation du *glitter* de cette dernière et d'obtenir une estimation du taux de polarisation observé par l'instrument. Le principal avantage de cette approche est qu'elle donne la possibilité d'estimer la luminance polarisée sans données exogènes, notamment, sans une connaissance explicite de la vitesse de vent et de la quantité d'aérosols. Les inconvénients, quant à eux, proviennent principalement des hypothèses sur les modèles d'aérosols, ainsi qu'une limitation sur la vitesse de vent car la réflectance de l'écume de mer n'est pas prise en compte. De plus, l'utilisation d'une direction en dehors du *glitter* pour corriger ce dernier de l'effet de l'atmosphère, requiert une observation d'une même scène vue sous deux géométries d'observation. Ainsi, cette méthode demande une application sur des instruments doté d'un champ de visée ou d'un mode d'acquisition permettant des mesures multidirectionnelles.

2 Étalonnage inter-bandes

Comme nous venons de le décrire, l'étalonnage absolu en réflectance utilisant la diffusion Rayleigh ne permet pas d'estimer avec une précision suffisante les luminances mesurées au niveau du TOA pour toutes les bandes spectrales. La raison principale de cette perte de précision provient du fait que la diffusion Rayleigh décroît fortement en fonction de la longueur d'onde ($\propto \lambda^{-4}$) rendant la méthode d'étalonnage précédemment décrite applicable uniquement aux longueurs d'onde du spectre visible. Les méthodes d'étalonnage dites inter-bandes, comme leur nom l'indique, permettent de porter les coefficients d'étalonnage obtenus aux plus courtes longueurs d'onde (typiquement ≤ 670 nm pour POLDER/PARASOL), au reste des bandes spectrales. Pour ce faire, on sélectionne une bande spectrale dans le visible, dont l'étalonnage est considéré connu avec suffisamment de confiance (pour POLDER, le choix s'était porté sur le canal à 565 nm). Cette dernière sert alors de référence pour étalonner le reste des bandes spectrales sur des cibles spectralement neutres. Ces dernières permettent alors la définition de facteurs de proportionnalité entre les canaux spectraux et le canal de référence (Lafrance et al., 2002; Hagolle et al., 1999, 2004).

Ainsi, pour que l'approche soit valide, il faut utiliser des cibles qui soient spectralement neutres (c.-à-d. "blanches") ou ayant une variation spectrale très bien connue. Les cibles les plus utilisées pour ce genre d'application sont la réflexion spéculaire à la surface de l'océan (*glitter*) ainsi que les nuages convectifs épais - *Deep Convective Clouds* (DCC) ou certains sites désertiques stables.

2.1 Réflexion spéculaire à la surface de l'océan

Lors de son orbite autour de la terre, un instrument tel que POLDER/PARASOL ou bien 3MI observera souvent des scènes contenant un *glitter*. Bien que souvent un inconvénient lors des mesures, voire même de l'étalonnage en vol (e.g. étalonnage absolu en réflectance par estimation de la diffusion Rayleigh), la réflexion spéculaire à la surface de l'océan est un atout majeur pour d'autres méthodes d'étalonnage. En effet, le *glit-*

ter est une cible pouvant être considérée comme spectralement neutre jusqu'aux plus grandes longueurs d'onde du spectre solaire (au delà du spectre visible), et permet donc d'étalonner les différents canaux spectraux entre eux. De plus, c'est un phénomène très polarisant et directionnel pour la lumière, ce qui peut en faire un atout majeur pour un étalonnage en lumière polarisée, comme la méthode développée par B. Toubbé que nous avons précédemment décrite (Toubbé, 1996; Toubbé et al., 1999). D'un point de vue radiométrique, l'observation du *glitter* est sensible au contenu en aérosols, à l'indice de réfraction de l'eau, et la vitesse du vent à la surface de l'océan. Ainsi, la connaissance et/ou la bonne estimation de ces paramètres est une nécessité pour garantir les meilleurs résultats possibles. En ce qui concerne la restitution des propriétés des aérosols, la présence du *glitter* invalide l'hypothèse de l'océan noir vers 865 nm (Hagolle et al., 2004). On notera ici, l'utilité des instruments dotés d'une capacité de mesure multidirectionnelle tels que POLDER/PARASOL ou 3MI permettant une restitution des propriétés des aérosols en dehors des zones affectées par le *glitter* simultanément à l'observation de ce dernier.

Bien que faisant face à plusieurs inconvénients significatifs pour un étalonnage absolu, l'observation de la réflexion spéculaire à la surface de l'océan offre un avantage considérable en terme d'étalonnage inter-bande et ce, pour des longueurs d'ondes allant jusqu'au moyen infrarouge. Cette propriété reste cependant à vérifier pour l'instrument 3MI, ce dernier disposant d'une bien plus grande étendue spectrale dans le moyen infrarouge et l'hypothèse stipulant une constance de l'indice de réfraction de l'eau n'est plus nécessairement valable (Marbach et al., 2013). D'un point de vue pratique, le *glitter* présente néanmoins un inconvénient : il n'est pas toujours possible d'obtenir une observation idéale de ce dernier (typiquement : un ciel clair au dessus de l'océan), le problème provenant principalement de la couverture nuageuse. Cependant, les instruments peuvent assez fréquemment obtenir de bonnes conditions d'observation pour ce type d'étalonnage. La contribution de la réflexion spéculaire au signal TOA peut être estimée en utilisant la vitesse et direction du vent avec un modèle de *glitter* tel que celui de Cox et Munk (Cox and Munk, 1954). Le principe de base des méthodes d'étalonnage inter-

bande utilisant le *glitter* consiste en l'utilisation d'une bande spectrale de référence dans la région visible du spectre électromagnétique (l'étalonnage absolu de cette bande de référence est considéré comme étant le plus précis parmi les autres bandes). Dans le cas de POLDER, la bande à 565 nm avait été sélectionnée. D'abord, les luminances mesurées aux bandes spectrales à étalonner sont corrigées de l'absorption moléculaire. Ensuite, la luminance TOA du *glitter* dans chaque bande spectrale est simulée puis comparée à la mesure POLDER correspondante. La bande de référence sert à estimer la rugosité de surface. Dans le cas de POLDER, une Look-Up-Table (LUT) est utilisée pour estimer la vitesse du vent à partir de la mesure à 565 nm. La LUT est calculée en supposant une atmosphère purement moléculaire (Deuzé et al., 1989). L'effet des aérosols est estimé en utilisant une direction en dehors de la zone de réflexion spéculaire. La luminance TOA est ainsi estimée pour toutes les autres bandes spectrales, à l'exception des bandes où l'absorption gazeuse est forte (763 nm et 910 nm pour POLDER). Pour ces dernières, l'absorption gazeuse est d'abord estimée, puis, les coefficients d'étalonnage sont déduits en utilisant comme référence le *glitter* observé aux bandes spectrales 765 nm et 865 nm, respectivement.

Les instruments grand champ tels que POLDER/PARASOL et 3MI nécessitent également de pouvoir étalonner les pixels de la matrice du détecteur individuellement. Cet étalonnage, dit "dans le champ" (*flat field*) permet de s'assurer que la réponse de l'instrument est homogène sur toute l'étendue du champ de visée ce dernier. Ce type d'étalonnage requiert également des cibles qui soient spectralement neutres. Cependant, la réflexion spéculaire, de par sa nature localisée, ne permet pas une couverture globale de la matrice et on préférera donc un autre type de cible pouvant être spectralement neutre tels que les nuages convectifs épais.

2.2 Nuages convectifs épais (DCC)

Un autre type de cibles intéressantes pour l'étalonnage inter-bandes sont les nuages convectifs épais. En effet, ils représentent dans le spectre visible des cibles spectralement

neutres, tout comme le *glitter*, et permettent donc d'étalonner plusieurs canaux spectraux entre eux. L'un des principaux avantages de cette méthode par rapport à celle mentionnée précédemment, est qu'il est aussi possible d'utiliser leurs larges couvertures du champ de vue de l'instrument pour l'étalonner dans le champ (c.-à-d. étalonner tous les pixels de la matrice du détecteur). De plus, la couverture nuageuse étant globale, il est relativement facile de sélectionner des cas adaptés pour effectuer ce type d'étalonnage. Ceci étant, bien que la disponibilité de la couverture nuageuse ne soit pas un inconvénient, seule une partie des nuages permet de mener à bien cette procédure d'étalonnage. À cause du fait que la quantité d'aérosols et de vapeur d'eau, la réflectance du sol, et l'intensité de la réflexion spéculaire au dessus de l'océan, soient des paramètres très variables, les nuages doivent être sélectionnés en fonction de plusieurs critères pour réduire au maximum les incertitudes et ne garder que les cas plus représentatifs. Les candidats sélectionnés pourront être considérés, en bonne approximation, comme des diffuseurs blancs situés au TOA (Fougnie, 2016). Ainsi, on sélectionnera d'abord des nuages convectifs hauts et épais. Ces derniers se développent au dessus des océans subtropicaux (pour des latitudes comprises entre 30° N et 30° S). Ils atteignent de très hautes altitudes (entre 15 et 18 km, selon la hauteur de la tropopause). De plus, la nature de ces nuages est telle que la majorité des aérosols et de la quantité de vapeur d'eau se retrouvent en dessous de ces derniers car ils sont surtout présents dans les plus basses couches de l'atmosphère. Un autre critère de sélection concerne leur homogénéité spatiale. Une condition sur la pression apparente des nuages est également nécessaire. Cette dernière sera limitée à 400 hPa pour garantir une bonne structure verticale ainsi que pour minimiser l'effet d'autres paramètres atmosphériques (tels que la présence d'aérosols, ou de vapeur d'eau au dessus du nuage). Enfin, seuls les nuages dont la réflectance est supérieure à 0.7 seront retenus, et ce, pour avoir des cas où l'effet de la diffusion est le plus prominent possible (Lafrance et al., 2002; Fougnie, 2010). Bien évidemment, comme toute méthode, l'utilisation des nuages hauts pour l'étalonnage inter-bandes présente des inconvénients. La principale limitation est la variation de la réflectance des nuages en fonction de la longueur d'onde.

En effet, celle-ci décroît fortement dans le moyen infrarouge et des études de sensibilités dans le proche et moyen infrarouge devront être effectuées pour s'assurer de son utilité (Marbach et al., 2013).

3 Étalonnage inter-instrument (*intercalibration*)

Le principe de ces méthodes est d'utiliser des mesures issues de différents instruments pour des mêmes cibles. Le but étant d'étalonner les instruments entre eux. Typiquement, l'approche consiste à prendre un capteur de référence et à effectuer des correspondances géométriques (angles zénithaux solaires et de visées) et spectrales avec un autre capteur. Il est préférable pour cela d'utiliser un des capteurs ayant des bandes spectrales similaires, ou des capteurs couvrant le maximum de bandes spectrales se rapprochant de celles du capteur de référence. Concernant les cibles d'intérêt, il existe diverses approches possibles. Le but de cette partie n'étant pas d'être exhaustif ni de décrire le détail des diverses et nombreuses approches d'inter-étalonnage, nous citerons les techniques ayant un potentiel applicatif à 3MI ainsi que celles déjà utilisées sur les instruments POLDER/PARASOL.

3.1 *Simultaneous Nadir Overpass* (SNO)

La méthode SNO consiste, comme son nom l'indique, à comparer les mesures effectuées par l'instrument à étalonner et un instrument de référence observant la même scène au nadir en quasi-simultané. Cette approche a montré son fort potentiel applicatif sur une gamme spectrale variée allant du solaire, au thermique ainsi qu'aux micro-ondes (Cao and Heidinger, 2002; Cao et al., 2004, 2005, 2007, 2008, 2011; Lacovazzi and Cao, 2008; Heidinger et al., 2002; Barroso et al., 2005; Wu et al., 2008a). Un élargissement de l'étendue de colocalisation de l'approche SNO en considérant un nombre de points plus importants, dont les observations sont moyennées est également appelée inter-étalonnage statistique (*Statistical Intercalibration*). Cela rend l'approche particulièrement utile dans les études du climat où les données utilisées sont moyennées sur de longues durées et grandes étendues spatiales (Mears and Wentz, 2009; Semunegus et al., 2010; Shi and Bates, 2011).

3.2 Inter-étalonnage utilisant des sites instrumentés (*Vicarious Ground Based Calibration*)

Ce type d'approche consiste à estimer la luminance au TOA mesurée par un instrument au dessus d'un site instrumenté spécifique en utilisant un code de transfert radiatif. On peut citer comme exemple le site de La Crau, situé en France. Ce dernier a été utilisé, entre autres, pour les étalonnages des instruments SPOT et Pléiades (Santer et al., 1992; Lachérade et al., 2012) ainsi que pour la validation sur le prototype aéroporté de POLDER de la méthode d'étalonnage en luminance polarisée sur *glitter* (Toubbé et al., 1999).

3.3 Inter-étalonnage utilisant des cibles invariantes

Les cibles invariantes les plus utilisées sont les *Pseudo-Invariant Calibration Sites* (PICS) . Ce sont typiquement des zones désertiques (cf. Figure 1). Parmi les caractéristiques notables de ces cibles, on notera leur stabilité temporelle ainsi qu'une uniformité spatiale. De plus, les réflectances obervées tendent à être élevées, avec un faible taux d'aérosols et pratiquement pas de végétation. Par conséquent, de telles cibles sont également utilisées pour le suivi temporel de l'étalonnage des instruments observant la Terre. Les PICS sont recommandés par le *Committee on Earth Observation Satellites* (CEOS), non seulement pour les propriétés précédemment citées, mais également pour la grande quantité de données historiques archivées où ces sites ont été utilisés pour la caractérisation instrumentale (Chander et al., 2013).

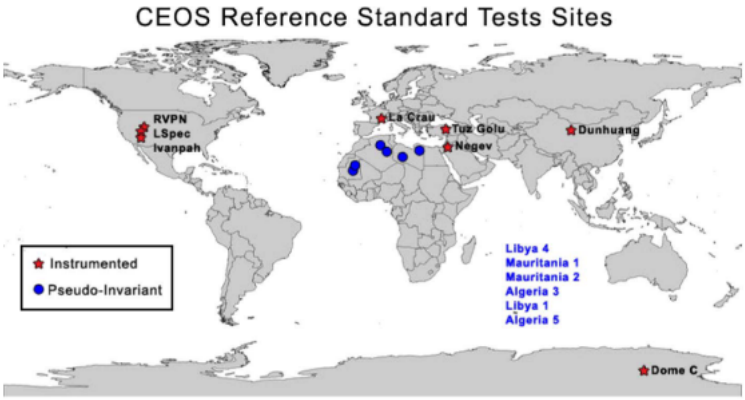


FIGURE 1 – Distribution des sites recommandés par le CEOS (Chander et al., 2013). En rouge, les sites instrumentés. En bleu, les sites PICS

D'un point de vue méthodologique, le signal au TOA tel que vu par l'instrument de référence est corrigé de l'effet de la diffusion Rayleigh, des aérosols, et de l'absorption gazeuse. Par la suite, une interpolation spectrale de la réflectance de surface déduite du capteur de référence est utilisée pour simuler la réflectance de surface observée par le capteur que l'on souhaite étalonner, en prenant en compte la réponse instrumentale de ce dernier. Enfin, la contribution atmosphérique est rajoutée pour reconstruire le signal au TOA qui est par la suite comparé au signal réellement mesuré par le capteur à étalonner (Hagolle et al., 1999; Chander et al., 2013; Bouvet, 2014; Fougnie, 2016).

III SUIVI TEMPOREL DE L'ÉTALONNAGE

L'une des problématiques majeures dans l'étalonnage d'un radiomètre est le suivi dans le temps de son vieillissement demandant notamment le réajustement des coefficients d'étalonnage de son modèle radiométrique. Comme nous le verrons dans le Chapitre III, le modèle radiométrique instrumental (MRI) de 3MI est relativement complexe. Cette complexité augmente le nombre de paramètres pouvant être affectés au cours de la vie de l'instrument. Bien modéliser le vieillissement de ce dernier fait donc partie des critères indispensables à la réussite de la mission.

Les cibles invariantes sont privilégiées pour le suivi temporel de l'étalonnage. On

notera l'utilisation des DCC, des PICS ainsi que le *glitter* (Henry et al., 1993; Markham et al., 2006; Fougnie et al., 2007; Morstad and Helder, 2008; Wu et al., 2008b; Chander et al., 2010, 2013; Xiong, 2010). L'utilisation de chaque cible présente bien évidemment les mêmes avantages et inconvénients que précédemment cités. En l'occurrence, la réflexion spéculaire, bien qu'elle permette d'avoir une réponse spectrale neutre sur toute l'étendue spectrale de l'instrument, elle ne permet pas d'étalonner tous les pixels de la matrice pour des instruments tels que POLDER/PARASOL ou 3MI à cause de la nature géométriquement localisée du phénomène. Les DCC quant à eux, bien qu'ils permettent un étalonnage sur tout le champ de vue de l'instrument, montrent rapidement leur faiblesse dans le moyen infrarouge où la réflectance décroît de manière considérable, et devient de plus en plus dépendante de la microphysique des nuages (Fougnie and Bach, 2009). Les cibles stables temporellement, quant à elles, disposent d'un problème d'échantillonnage temporel. Le passage au dessus de ces zones, et dans des conditions favorables à l'étalonnage, ne se faisant pas aussi fréquemment qu'avec les DCC par exemple. Dans le cas de PARASOL, la modélisation du suivi des coefficients d'étalonnage a été effectué à l'aide d'une méthode en décroissance exponentielle. Cette approche s'est avérée acceptable et permet de modéliser la dérive temporelle des coefficients d'étalonnage avec le temps avec précision de 0.5% par décénnie (Fougnie, 2010; Fougnie et al., 2016).

IV CONCLUSION

L'instrument 3MI est un radiomètre imageur fortement inspiré du concept POLDER. Il apporte également un bon nombre d'améliorations significatives à ce dernier. En plus d'une résolution au sol accrue, ce dernier dispose d'un nombre supérieur de canaux spectraux permettant ainsi d'améliorer l'étendue spectrale par rapport à son prédécesseur. 3MI pourra mesurer sur un spectre allant de 410 nm à 2130 nm (contre 443 nm à 1020 nm pour POLDER/PARASOL). L'instrument sera également capable de mesurer la luminance polarisée sur toutes ses bandes spectrales, à l'exception de celles centrées sur les zones de fortes absorptions gazeuses (763 nm, 765 nm, et 910 nm). Combinées à sa capacité de mesure multidirectionnelle, ces caractéristiques en font un instrument idéal pour l'étude des aérosols et des nuages, la restitution des propriétés de surface, aussi bien que pour la qualité de l'air, la prédiction climatique, et les prévisions météorologiques. Tout comme son prédécesseur, 3MI se basera uniquement sur l'observation de cibles naturelles pour son étalonnage en vol. Les méthodes d'étalonnage en vol utilisées avec POLDER constituent de bons points de départ pour l'étalonnage de 3MI. En effet, les méthodes telles que l'étalonnage absolu en diffusion Rayleigh ou encore l'utilisation d'autres instruments pour de l'inter-étalonnage, ne nécessiteront que peu ou pas d'adaptation pour être applicables. Ceci étant, les caractéristiques nouvelles de 3MI par rapport à POLDER impliqueront nécessairement des ajustements à faire. Certaines méthodes, telles que celles pour l'inter-bandes utilisant les DCC, nécessiteront une alternative ou des ajustements pour les applications aux plus grandes longueurs d'ondes, et ce, à cause de la réflectance des nuages qui décroît fortement dans le moyen infrarouge. Une alternative envisageable serait d'utiliser de manière plus systématique la réflexion spéculaire pour l'inter-bandes en combinaison avec les DCC pour l'étalonnage dans le champ ainsi que pour la détermination des réflectances de surface lors de l'utilisation des DCC dans le moyen infrarouge. Quant à l'étalonnage en polarisation, on notera l'utilisation de l'information polarisée du rayonnement avec des observations de la réflexion spéculaire au dessus de l'océan. En effet, une méthode basée sur le *glitter* permettant d'étalonner

l'instrument POLDER en polarisation avait déjà été élaborée auparavant (Toubbé, 1996; Toubbé et al., 1999). Ceci étant, cette dernière présente quelques inconvénients pour une utilisation de manière entièrement opérationnelle. La technique est particulièrement sensible aux types d'aérosols vu qu'ils sont d'abord déterminés en utilisant une direction en dehors du *glitter*. Ainsi, cette méthode n'offre une précision optimale que pour des angles zénithaux solaires autour de 45°, angle auquel le taux de polarisation intrinsèque du *glitter* est élevé, permettant de réduire l'erreur commise sur la restitution des propriétés des aérosols. Une bonne connaissance des propriétés des aérosols présents est une condition impérative à l'application de la méthode (Toubbé et al., 1999). Une piste intéressante concernant 3MI serait donc de revisiter cette dernière et d'en étudier la faisabilité ainsi que les performances auxquelles on pourrait s'attendre, notamment en considérant l'évolution des méthodes de restitution des aérosols depuis le développement initial de l'approche. Cependant, la réflexion spéculaire étant sensible à l'indice de réfraction de la surface, un questionnement concernant la variation de ce dernier dans le moyen infrarouge se pose. Davantage d'investigations devront être faites dans ce sens. De même, la résolution au sol accrue de 3MI impliquera probablement des effets sur les performances radiométriques de l'instrument, notamment lors des observations en luminance polarisée. Quant au suivi en vol du vieillissement/évolution des paramètres du modèle radiométrique, l'utilisation de méthodes d'étalonnage permettant un bon échantillonnage spatio-temporel telle que l'utilisation des DCC, devra être appuyée par des observations de *glitter* pour l'étalonnage. L'utilisation des cibles stables telles que les déserts, ou encore l'antarctique, devront également être envisagées, en complément aux approches précédemment citées.

Chapitre III

3MI : Caractéristiques, objectifs de la mission, et exigences en terme d'étalonnage

I CARACTÉRISTIQUES DE 3MI

1 Design

3MI est un radiomètre imageur inspiré du concept POLDER. Il est doté de 12 canaux spectraux allant de 410 nm à 2130 nm et mesure la composante polarisée du rayonnement dans 9 d'entre eux. Grâce à un système optique à grand champ (±51°du nadir), 3MI est également capable d'effectuer des mesures multi-directionnelles. Cette capacité de mesure sera d'une grande utilité pour l'étude des différentes cibles observées par 3MI. La fauchée instantannée de l'instrument est de 2200x2200 km^2 pour le visible et proche infrarouge (VNIR) et de 2200x1100 km^2 pour le moyen infrarouge (SWIR). Le concept de mesure repose sur un système de roues porte-filtres, chaque filtre étant associé à une bande spectrale (cf. Figures 2 et 3). Pour les mesures en polarisation, il est nécessaire d'effectuer trois mesures successives utilisant des analyseurs. Ces derniers sont polarisés linéairement à -60°, 0°, et +60° par rapport à la direction *along-track*. La combinaison des trois mesures polarisées permettent de restituer les composantes du vecteur de Stokes, donnant accès à l'information sur la composante polarisée du rayonnement. La durée entre deux acquisitions complètes pour une bande spectrale est de 22 secondes. Par conséquent, une cible se sera déplacée de 154 km dans le champ de vue de l'instrument et se déplacera donc dans l'image formée sur le plan focal après chaque acquisition. Cette propriété de mesure (illustrée dans la Figure 3) permet à 3MI d'observer chaque cible sous au moins 14 angles différents. Pour des contraintes techniques, l'instrument dispose de deux systèmes optiques, un pour le visible et proche infrarouge (VNIR - 410 nm à 910 nm) et un pour le moyen infrarouge (SWIR - 910 nm à 2130 nm). Le détecteur utilisé dans la chaîne d'acquisition VNIR est de type CCD tandis que celui utilisé dans le SWIR est de type CMOS. Le détail des bandes spectrales ainsi que des applications auxquelles elles serviront est donné dans la Table 1. On notera la redondance de la bande spectrale à 910 nm ayant pour but de servir de point de référence pour l'étalonnage géométrique entre les deux têtes optiques (correspondance des pixels entre les images VNIR et SWIR) ainsi

que pour vérifier les résultats des coefficients d'étalonnage absolu entre les deux chaînes de mesures.



FIGURE 2 – Rendu 3D de 3MI et de ses roues porte-filtres (Source : ESA)

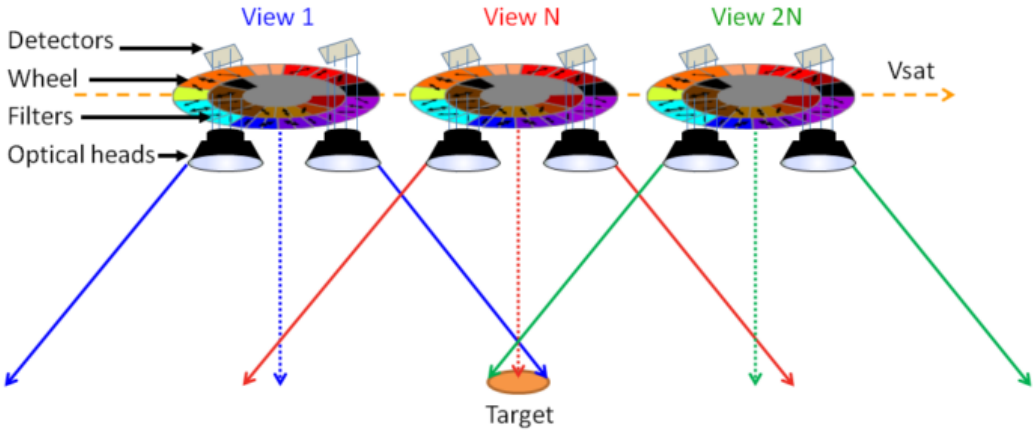


FIGURE 3 – Le concept 3MI (Marbach et al., 2013)

Pour conclure, voici les principales caractéristiques de 3MI :

— Un système optique grand champ circulaire (similaire à POLDER) ;

— Deux chaînes d'acquisition : une pour le VNIR et l'autre pour le SWIR. Pour le VNIR c'est une matrice CCD de 509x509 pixels. Pour le SWIR, un detecteur CMOS de 255x499 pixels ;

— Le IFOV de l'instrument sera de 2200x2200 km^2 pour le VNIR et 2200x1100 km^2 pour le SWIR ;

— Au nadir, la résolution au sol est de 4x4 km^2 ;

— La mesure se fait grâce à une roue porte-filtre en rotation continue.

2 Objectifs de la mission

Successeur des instruments POLDER, 3MI promet d'améliorer à partir de son héritage les différentes possibilités en matière d'étude de l'atmosphère. Les instruments POLDER avaient permis grâce à leur concept de mesure des études uniques du système Terre-atmosphère, notamment sur le sujet des aérosols, nuages, ainsi que les études des BRDF des surfaces (Buriez et al., 1997; Harmel and Chami, 2011; Loisel et al., 2008; Waquet et al., 2013; Tanré et al., 2011; Riedi et al., 2010; Desmons et al., 2017; Parol et al., 2004; Maignan et al., 2004, 2009). L'apport d'information supplémentaire sur la composante polarisée du rayonnement par rapport à son prédécesseur, ainsi qu'une plus grande étendue spectrale et résolution au sol en feront un instrument idéal pour l'étude des aérosols et des nuages. À cet effet, nous présentons le tableau ci-dessous (Table 1), résumant les principales caractéristiques des différentes bandes spectrales de l'instrument ainsi que le principal usage auxquelles elles seront destinées.

Optique	λ (FWHM) [nm]	Polarisation	Utilisation Principale
VNIR	410 (20)	✔	Aérosols absorbants, nuages de cendres.
	443 (20)	✔	Absorption et hauteur des aérosols.
	490 (20)	✔	Aérosols, albédo de surface, réflectance des nuages, COT.
	555 (20)	✔	Albédo de surface.
	670 (20)	✔	Propriétés des aérosols.
	763 (10)	✖	Hauteur des aérosols et des nuages.
	765 (20)	✖	Hauteur des aérosols et des nuages.
	865 (40)	✔	Végétation, aérosols, nuages, et propriétés de surface.
	910 (20)	✖	Vapeur d'eau et corrections atmosphériques.
SWIR	910 (20)	✖	Étalonnage géométrique uniquement.
	1370 (40)	✔	Cirrus, et vapeur d'eau.
	1650 (40)	✔	Propriétés de surface pour la restitution des propriétés des aérosols.
	2130 (40)	✔	Caractérisation de la surface pour les aérosols, microphysique des nuages, végétation.

TABLE 1 – Canaux de 3MI et leurs principales utilisations

Le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) dispose d'un instrument nommé OSIRIS, qui est un prototype aéroporté de 3MI. Ce dernier peut servir de simulateur aéroporté pour la validation de certaines des techniques d'étalonnage qui seront proposées pour 3MI. Dans le chapitre destiné aux résultats des validations que nous avons menées sur les données PARASOL, nous aborderons également les études préliminaires qui ont été effectuées à l'aide des mesures OSIRIS dans l'optique du développement de méthodes

d'étalonnage pour 3MI.

II MODÈLE RADIOMÉTRIQUE INSTRUMENTAL

Le MRI permet d'exprimer la réponse globale du capteur à une intensité lumineuse quelconque (polarisée ou non). Il définit la relation entre une luminance et les comptes numériques en sortie de chaîne de mesure. La définition d'un MRI doit être également complétée en prenant en compte les effets de non-linéarité du détecteur, du courant d'obscurité, du *smearing* ainsi que de la lumière parasite. L'instrument 3MI étant similaire à POLDER, la définition du MRI de POLDER reste en majorité applicable à ce dernier. La particularité du cas de 3MI réside principalement dans le fait que l'instrument dispose de deux chaînes de mesure différentes : une pour le visible et proche infrarouge (VNIR) et l'autre pour le moyen infrarouge (SWIR). Il est intéressant de noter la présence de la bande spectrale à 910 nm dans les deux chaînes de mesure VNIR ainsi que SWIR. L'utilité principale de cette redondance réside dans la possibilité de l'utiliser pour de l'inter-étalonnage géométrique entre les deux capteurs.

1 Définitions générales

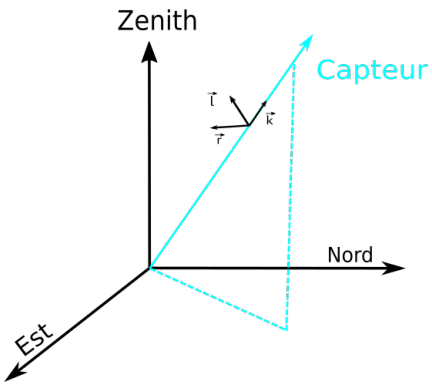


FIGURE 4 – Géométrie d'observation dans le référentiel terrestre

Un rayonnement polarisé incident au niveau du détecteur peut être exprimé en fonction d'un vecteur de Stokes comme suit :

$$L = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \approx 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Les paramètres Q et U sont définis à partir du référentiel $(\vec{k}, \vec{l}, \vec{r})$ avec :

— $\vec{k}$ la direction incidente

— $\vec{l}$ dans le plan méridien

— $\vec{r}$ perpendiculaire à $\vec{l}$ de sorte à ce que $(\vec{k}, \vec{l}, \vec{r})$ forment un référentiel orthonormé (cf. Figure 4)

La lumière incidente passe d'abord par un objectif télécentrique permettant de faire converger les rayons provenant de différentes directions de telle sorte à ce qu'ils arrivent de manière perpendiculaire aux filtres (équipé de polariseurs ou pas) de l'instrument pour finalement atteindre la matrice de détecteurs dans le plan focal de l'objectif (cf. Figure 5).

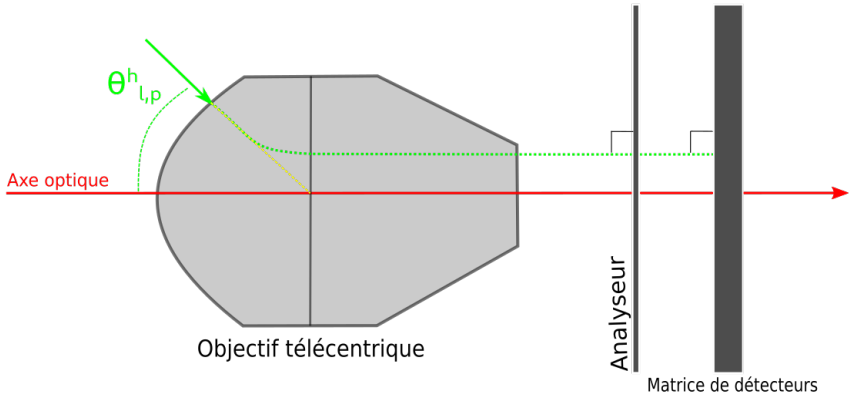


FIGURE 5 – Représentation schématique du principe de l'objectif télécentrique

La Table 2 montre les différents canaux de 3MI. On attribuera à chaque canal un indice

k, avec les indices de 0 à 9 inclus, pour les canaux présents dans la chaîne de mesure VNIR. Les indices de 10 à 14 définissent les canaux présents dans le SWIR.

Tête optique	Indice	Nom du canal	λ (FWHM) [nm]	Polarisation
VNIR	0	Dark Current	/	✖
	1	3MI-1	410 (20)	✔
	2	3MI-2	443 (20)	✔
	3	3MI-3	490 (20)	✔
	4	3MI-4	555 (20)	✔
	5	3MI-5	670 (20)	✔
	6	3MI-6	763 (10)	✖
	7	3MI-7	765 (20)	✖
	8	3MI-8	865 (40)	✔
	9	3MI-9	910 (20)	✖
SWIR	10	/	910 (20)	✖
	11	3MI-10	1370 (40)	✔
	12	3MI-11	1650 (40)	✔
	13	3MI-12	2130 (40)	✔
	14	Dark Current	/	✖

TABLE 2 – Canaux de 3MI et leurs principales propriétés

Pour définir le modèle radiométrique, considérons une tête optique h, avec sa matrice de détecteurs composée de l_{max} lignes et p_{max} colonnes. On définit le référentiel instrumental de la tête optique h dans un référentiel orthonormé (O_h, X_h, Y_h, Z_h) tel que :

— O_h est le centre de la matrice ;

— X_h est la direction passant par le point O et parallèle aux colonnes de la matrice ;

— Y_h est la direction passant par le point O et parallèle aux lignes de la matrice ;

— Z_h est la direction perpendiculaire à la matrice.

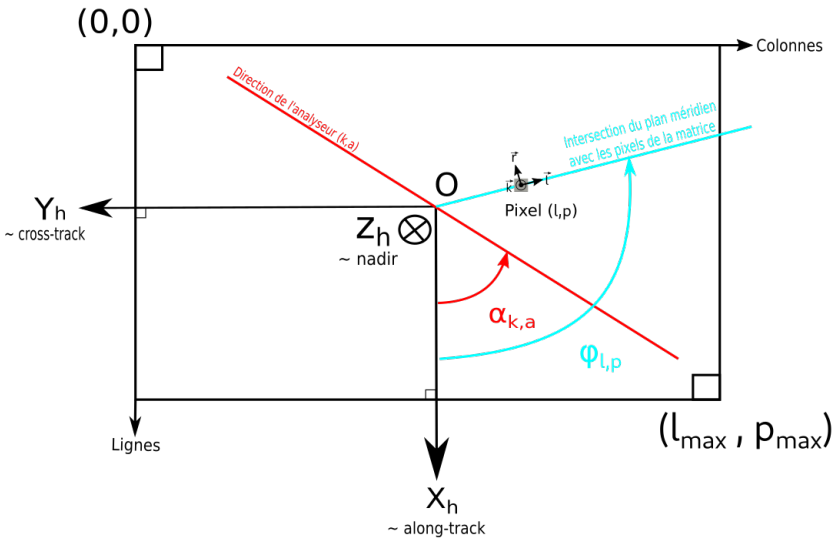


FIGURE 6 – Référentiel instrumental et positionnement des pixels sur la matrice

Chaque pixel $(l,\ p)_h$ à la surface du détecteur de la tête optique h est associé à un couple angulaire $(\theta^h_{l,p},\ \phi^h_{l,p})$ caractérisant la lumière incidente où :

— $\theta^h_{l,p}$ est l'angle d'incidence par rapport à l'axe optique (cf. Figure 5) ;

— $\phi^h_{l,p}$ est l'angle azimutal entre l'axe X_h et l'intersection du plan méridien avec la matrice de détecteurs (cf. Figure 6).

Pour un canal polarisé k, il existe trois directions de polariseurs dont les axes principaux sont à 60° les uns des autres. Par convention, le polariseur $a = 2$ est pris comme référence (avec un angle $\alpha = 0°$). On obtient donc une définition des angles α des analyseurs a pour un canal k comme suit :

$$a = 1 \leftrightarrow \alpha_{k,1} = -60° \qquad a = 2 \leftrightarrow \alpha_{k,2} = 0° \qquad a = 3 \leftrightarrow \alpha_{k,3} = +60°$$

Une représentation schématique du positionnement des analyseurs dans le référentiel instrumental est montré dans la Figure 7.

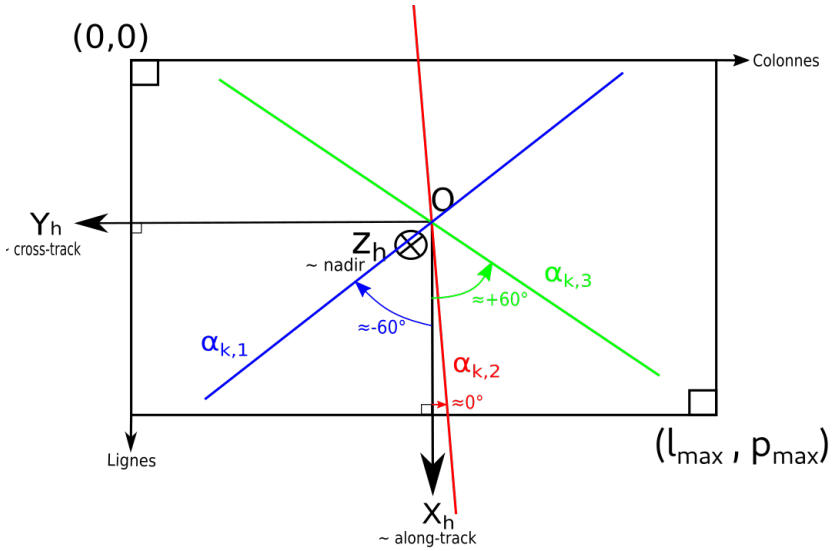


FIGURE 7 – Référentiel instrumental et positionnement des pixels sur la matrice

2 Interaction de la lumière avec les polariseurs

Tout d'abord, nous allons supposer que l'effet induit par l'objectif télécentrique n'est qu'un effet de convergence sur les rayons incidents les faisant ainsi arriver de manière perpendiculaire sur les roues porte-filtres ainsi que la matrice de détecteurs (cf. Figure 5).

En partant de cette hypothèse, l'intensité R de la lumière incidente dans le canal k, sur le pixel $(l,p)_h$ et après un passage à travers un polariseur linéaire parfait est exprimée par :

$$R^k_{l,p} = \frac{1}{2} \times \left[I^k_{l,p} + Q^k_{l,p}.cos\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big) + U^k_{l,p}.sin\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big) \right] \quad (2)$$

où $\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big)$ est l'angle entre l'intersection du plan méridien avec la matrice du détecteur au pixel (l,p) de la tête optique h, et la direction du polariseur (k,a) (cf. Figure 2).

Dans le cas de 3MI, nous devons également prendre en compte la dépolarisation induite par la rotation des analyseurs durant le temps d'intégration. On définit $\eta^{s,k}$ comme

étant le coefficient d'efficacité du polariseur du canal k et dépendant du temps d'intégration s. Ceci nous permet de réécrire l'équation 2 comme suit :

$$R^k_{l,p} = \frac{1}{2} \times \left[I^k_{l,p} + Q^k_{l,p}.\eta^{s,k}.cos\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big) + U^k_{l,p}.\eta^{s,k}.sin\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big)\right] \quad (3)$$

L'intensité est convertie en tension par le détecteur, puis, en comptes numériques C en sortie de chaîne de mesure. On peut donc écrire :

$$C^{k,a}_{l,p} \approx A^{k,a} \times \left[I^k_{l,p} + Q^k_{l,p}.\eta^{s,k}.cos\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big) + U^k_{l,p}.\eta^{s,k}.sin\Big(2(\phi^h_{l,p} - \alpha_{k,a})\Big)\right] \quad (4)$$

avec le facteur de proportionnalité $A^{k,a}$ qu'on appelle le coefficient d'étalonnage absolu du canal de mesure (k,a).

3 Non-uniformité de la réponse instrumentale dans le champ

La réponse de l'instrument n'étant pas parfaite sur tout le champ de visée de l'instrument, il faut introduire une composante au modèle radiométrique qui prends en considération les effets de variation de la transmission sur ce dernier. Pour ce faire, on effectue le produit de l'équation 4 par $\boxed{P^k(\theta^h_{l,p}) \times g^{k,a}_{l,p}}$ où :

— $P^k(\theta^h_{l,p})$: est une fonction modélisant la non-uniformité de la transmission des optiques de l'instrument pour le canal k de la tête optique h. Cette fonction représente la variation basse fréquence dans le champ de vue.

— $g^{k,a}_{l,p}$: coefficients associé aux variations moyennes et hautes fréquences dans le champ de vue.

Il est également nécessaire de prendre en compte la polarisation induite par l'objectif télécentrique.

On note cet effet par $\epsilon^k(\theta)$ dont l'effet est représenté par la matrice de Mueller suivante :

$$\begin{pmatrix} 1 & \epsilon^k(\theta) & 0 \\ \epsilon^k(\theta) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Par conséquent, pour une lumière incidente en entrée de l'objectif télécentrique, décrite par ses composantes de Stokes (I_1, Q_1, U_1), on obtient une lumière en sortie de ce dernier de composantes (I_2, Q_2, U_2) telle que :

$$\begin{pmatrix} \mathrm{I}_2 \\ \mathrm{Q}_2 \\ \mathrm{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon^k(\theta) & 0 \\ \epsilon^k(\theta) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{I}_1 \\ \mathrm{Q}_1 \\ \mathrm{U}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathrm{I}_1 + \epsilon^k(\theta) \times Q_1 \\ \epsilon^k(\theta) \times I_1 + Q_1 \\ \mathrm{U}_1 \end{pmatrix} \tag{5}$$

Cela nous permet ainsi d'écrire l'expression des comptes numériques mesurés pour n'importe quel pixel $(l, p)_h$ du détecteur de la tête optique h :

$$C_{l,p}^{k,a} \approx A^{k,a} \times P^k(\theta_{l,p}^h) g_{l,p}^{k,a} \times \begin{bmatrix} \left[1 + \epsilon^k(\theta)\right] \times I_{l,p}^k \\ + \left[\eta^{s,k}.cos\left(2\left(\phi_{l,p}^h - \alpha_{k,a}\right) + \epsilon^k(\theta)\right] \times Q_{l,p}^k \\ + \eta^{s,k}.sin\left(2\left(\phi_{l,p}^h - \alpha_{k,a}\right) \times U_{l,p}^k \end{bmatrix} \tag{6}$$

4 Coefficient d'étalonnage absolu

Le coefficient $A^{k,a}$ peut être écrit tel que :

$$\boxed{A^{k,a} = A^k \times T^{k,a}} \tag{7}$$

avec :

— A^k : le coefficient d'étalonnage absolu du canal k

— $T^{k,a}$: le coefficient de transmission relative entre les canaux polarisés.

Par convention : $T^{k,2} = 1$

Il est également important d'introduire des paramètres décrivant le gain et le temps d'intégration, car ceux-ci ont une relation proportionnelle directe avec l'intensité en sortie de chaîne de mesure. On note donc le produit : $\boxed{G_h^m \times t_s^k}$ tel que :

— t_s^k : le temps d'intégration s, pour le canal k ajustable pour chaque canal de mesure.

— G_h^m : le gain électronique m, pour la tête optique h, unique à chaque chaine de mesure (VNIR, et SWIR).

5 Formulation du MRI

5.1 MRI pour les canaux polarisés

Les développements précédents nous permettent donc de dériver le modèle radiométrique instrumental de 3MI. On a donc, pour une tête optique h, une bande spectrale k et polariseur a, l'expression suivante :

$$C_{l,p}^{m,s,k,a} = G_h^m.t_s^k.A^k.T^{k,a}.P^k(\theta_{l,p}^h).g_{l,p}^{k,a} \times \left[p_{1,l,p}^{s,k,a}.I_{l,p}^k + p_{2,l,p}^{s,k,a}.Q_{l,p}^k + p_{3,l,p}^{s,k,a}.U_{l,p}^k\right] \quad (8)$$

où :

— k est l'indice de canal (cf. Table 2).

— a est l'indice du polariseur ($1 \leq a \leq 3$) avec le polariseur 2 comme référence :

- a = 1 : $\alpha_{k,1} = -60°$
- a = 2 : $\alpha_{k,2} = 0°$
- a = 3 : $\alpha_{k,3} = +60°$

— m est l'indice correspondant à une valeur du gain G.

— s définit une valeur du temps d'exposition t.

— A^k est le coefficient d'étalonnage absolu du canal k.

— $T^{k,a}$ est le coefficient de transmission relative entre les différents polariseurs d'une même bande spectrale k.

— $P^k(\theta_{l,p}^h)$ est la partie basse fréquence de la variation de transmission caractérisant la non-uniformité de la réponse de l'instrument dans son champ de vue.

— $g_{l,p}^{k,a}$ sont les coefficients caractérisant les réponses moyenne et haute fréquences de l'instrument dans son champ de vue.

— $p_i^{s,k,a}(l,p)$ sont les fonctions représentant la variation basse fréquence de la trans-

mission du capteur dans le champ de vue telles que :

$$\begin{cases} \mathrm{p}_1^{s,k,a}(l,p) = 1 + \eta^{s,k}\epsilon^k(\theta^h_{l,p}).cos(2(\phi^h_{l,p} - \alpha^{k,a})) \\ \mathrm{p}_2^{s,k,a}(l,p) = \eta^{s,k}.cos(2(\phi^h_{l,p} - \alpha^{k,a})) + \epsilon^k(\theta^h_{l,p}) \\ \mathrm{p}_3^{s,k,a}(l,p) = \eta^{s,k}.sin(2(\phi^h_{l,p} - \alpha^{k,a})) \end{cases} \quad (9)$$

où :

- $\alpha^{k,a}$ définit l'angle du polariseur du canal k et analyseur a et tête optique h.
- $\theta^h_{l,p}$ est l'angle de visée pour le pixel (l,p) de la tête optique h.
- $\phi^h_{l,p}$ est l'angle azimutal pour le pixel (l,p) del a tête optique h.
- $\eta^{s,k}$ est le coefficient d'extinction des polariseurs du canal k.
- $\epsilon^k(\theta^h_{l,p})$ est la fonction modélisant la polarisation induite par l'objectif télécentrique pour le canal k et tête optique h.

5.2 MRI pour les canaux non-polarisés

Pour les 4 canaux de mesures non polarisés, le MRI peut être simplifié en l'absence de polariseurs.

On obtient : $$\boxed{C^{m,s,k}_{l,p} = G^m_h.t^k_s.A^k.P^k(\theta^h_{l,p}).g^k_{l,p} \times \left[I^k_{l,p} + \epsilon^k(\theta^h_{l,p}).Q^k_{l,p}\right]} \quad (10)$$

5.3 Remarques

— Le courant d'obscurité n'est pas introduit dans les équations 8 et 10 car ce dernier est pris en compte en amont de l'inversion du modèle radiométrique lors du traitement des données L1.

— L'effet de *smearing* est un effet caractéristique des matrices CCD (ne concerne que le capteur VNIR de 3MI). Tout comme avec POLDER, il sera nécessaire de le corriger (Hagolle et al., 1996; Fougnie et al., 2018).

— La caractérisation de la lumière parasite se fait par des mesures au sol et des méthodes de correction de cette dernière existent (Hagolle et al., 1996; Clermont

et al., 2018). Cependant, la similarité en terme de design entre 3MI et POLDER fait qu'une importance particulière sera accordée à ce phénomène pour éviter les problèmes observés sur PARASOL qui ont rendu le canal à 443 nm inutilisable pour une utilisation dans le cadre de sa mission scientifique (Fougnie, 2016).

6 Exigences en terme d'étalonnage

L'instrument 3MI est sujet à une liste d'exigences en terme d'étalonnage assurant la qualité des mesures pour mener à bien sa mission. Nous pouvons citer différentes conditions, principalement liées à la performance radiométrique, en mentionnant également quelques unes concernant les performances géométriques. Les principales conditions requises en terme de performances radiométriques sont (Fougnie et al., 2018) :

- Pour toute mesure, le coefficient d'étalonnage absolu devra être connu avec une exactitude meilleure que 2%. L'étalonnage interbande devra être connu avec une précision ≤ 1% ;
- Le suivi de l'étalonnage dans le temps (sur la durée de vie de l'instrument) devra être connu avec une précision ≤ 1% ;
- La précision de l'étalonnage des différentes vues d'une même cible devra être ≤ 2% et ≤ 0.1% pour l'étalonnage relatif inter-pixel (haute fréquence) pour une fenêtre de 10x10 pixels ;
- La sensibilité de l'instrument à la polarisation devra être connue à 10^{-3} près ;
- Le rapport signal sur bruit (*Signal to Noise Ratio - SNR*) devra être supérieur ou égal à 200. La réflectance de référence pour la définition du SNR est de 0.1 pour un angle zénithal solaire de 24°.

III CONCLUSION

Fortement inspiré de son prédécesseur POLDER, l'instrument 3MI permettra d'apporter de nombreuses améliorations à ce dernier. Grâce à l'addition de bandes spectrales

supplémentaires en plus de la capacité à mesurer la luminance polarisée sur toutes les bandes (hors bandes fortement sensible à la vapeur d'eau i.e. 763, 765, et 910 nm), 3MI permettra de considérablement augmenter l'apport en information en polarisation. De plus, l'étendue spectrale supérieure à PARASOL (410nm à 2130 nm contre 443 nm à 1020 nm, respectivement) permettra une analyse plus approfondie du système Terre-atmosphère ; plus particulièrement, l'étude des aérosols et des nuages, ainsi que les propriétés des surfaces. D'un point de vue design, 3MI se démarquera principalement des instruments POLDER par la présence de deux têtes optiques (requérant le traitement de deux modèles radiométriques distincts). En effet, 3MI aura une chaîne d'acquisition pour le VNIR (de 410 nm à 910 nm) ainsi qu'une pour le SWIR (910 nm à 2130 nm). La bande spectrale centrée à 910 nm est redondante, ayant pour but de servir de référence pour l'étalonnage géométrique (correspondances des observations entre les deux têtes optiques). La présence au Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'instrument OSIRIS, simulateur aéroporté de 3MI, est un atout majeur. En effet, OSIRIS permet d'avoir un système servant à tester de potentielles nouvelles approches, autant d'un point de vue étalonnage que d'un point vue scientifique (restitution des propriétés physiques des aérosols, des nuages, et de surface) qui pourront être proposées pour une utilisation sur les mesures 3MI. Le modèle radiométrique instrumental de 3MI est similaire à celui des instruments POLDER, avec notamment comme différence l'utilisation de deux MRI (un pour chaque tête optique). Les différentes méthodes d'étalonnage qui avaient été utilisées avec POLDER/PARASOL pourront être appliquées à 3MI. Les multiples paramètres du MRI pourront être restitués en vol par différentes méthodes d'étalonnage. On citera par exemple : l'utilisation des nuages convectifs hauts pour les paramètres définissant la réponse dans le champ de vue (cf. Équation 9), la diffusion Rayleigh pour la restitution du coefficient d'étalonnage absolu A_k (cf. Équation 7), etc. Cependant, les travaux présentés dans cette thèse se focaliseront uniquement sur la restitution de ce dernier paramètre (A_k) en utilisant des observations du *glitter*. Pour ce fait, nous allons aborder dans le chapitre suivant, les différents paramètres influant sur notre capacité à modéliser la luminance TOA de ces

observations. Nous présenterons donc les résultats d'études de sensibilité aux principaux paramètres géophysiques régissant le phénomène de réflexion spéculaire à la surface de l'océan.

Chapitre IV

Sensibilité de la réflectance du *glitter* aux paramètres géophysiques

I INTRODUCTION

La réflectance spéculaire à la surface de l'océan (anglais : *glitter*, *sunglint*) correspond à la lumière réfléchie sur l'interface eau-air. Ce phénomène de nature directionnelle est fonction de la rugosité de la surface. Dans le cas d'un océan sans la moindre vague (tel un miroir), la réflexion se fait entièrement dans la direcion spéculaire théorique. Cependant, la rugosité de la surface implique la présence d'une distribution des intensités autour de la direction spéculaire à cause d'un effet de réflexions dans des directions multiples (les pentes des vagues créent une sorte de multitude de miroirs dont les pentes sont différentes les unes des autres). La Figure 8 montre de manière schématique le principe du phénomène du *glitter*.

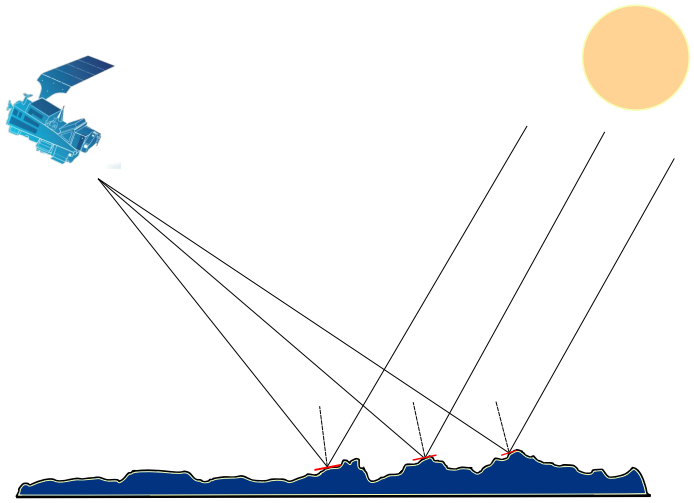


FIGURE 8 – Représentation schématique d'une observation du phénomène du *glitter*.

Les pentes des vagues sont mises en évidence par les lignes rouges. Les normales aux pentes sont représentées en pointillés. L'intensité du *glitter* dépend de la distribution statistique des pentes des vagues sur lesquelles la réflexion se produit. Un modèle décrivant le comportement du *sunglint* a été proposé par Cox et Munk (Cox and Munk, 1954, 1956). Bien que développé plus d'un demi-siècle auparavant, l'approche proposée par Cox et Munk reste toujours une excellente méthode de modélisation du *glitter* (Bréon and Henriot, 2006). La lumière intrinsèque du *glitter* est caractérisée par sa réflectance, que l'on

notera ρ_g ainsi que son taux de polarisation P_g. Ces deux paramètres sont entièrement caractérisés par les lois de Fresnel. Les paramètres influant directement sur l'intensité et taux de polarisation intrinsèques du *glitter* sont :

— la vitesse du vent ;

— la direction du vent ;

— l'indice de réfraction de l'eau.

En pratique, il faut également prendre en considération l'effet de l'atmosphère sur la lumière réfléchie vers l'instrument observant la surface. Pour cela, il sera donc important de quantifier l'effet de la quantité et type d'aérosols sur les observations *glitter*. De plus, le contenu en chlorophylle-a devra également être pris en compte pour les longueurs d'onde du spectre visible. Au delà du spectre visible, ce sera la variation de l'indice de réfraction de l'eau qui sera étudiée.

Ce chapitre sera consacré à l'étude du phénomène du *glitter* pour identifier les principaux paramètres du problème auxquels nous devrons faire face dans une perspective d'étalonnage de l'instrument 3MI. Nous commencerons d'abord par présenter les outils de transfert radiatif utilisés pour mener notre étude puis nous détaillerons davantage l'approche utilisée par Cox et Munk pour modéliser la réflexion spéculaire à la surface de l'océan et ce, via la présentation des principaux résultats du papier de référence (Cox and Munk, 1954) pris d'un point de vue de la problématique d'étalonnage. Par la suite, nous présenterons les résultats des différentes études de sensibilité visant à estimer l'effet des différents paramètres (vitesse et direction du vent, quantité et type d'aérosols, couleur de l'eau, et variation de l'indice de réfraction de l'eau dans le SWIR). Nous terminerons ce chapitre par un bilan d'erreur combinant les différentes sensibilités en supposant que les paramètres du problème sont des variables indépendantes.

II OUTILS DE TRANSFERT RADIATIF UTILISÉS

La capacité à modéliser la luminance au TOA est d'une importance capitale au bon déroulement des études visant à restituer les différents paramètres géophysiques permettant l'étude du système Terre-atmosphère. Dans notre cas, l'instrument 3MI servira principalement à l'étude des aérosols et des nuages dans un spectre allant de 410 nm à 2130 nm. Il est donc impératif de disposer de méthodes permettant de simuler les luminances TOA dans cette gamme spectrale avec des précisions de l'ordre du pour-cent. À cet effet, nous avons eu recours à l'utilisation de deux outils :

— Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) en sa version vectorielle (6SV) ;

— Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth Climate Observation (ARTDECO).

Sauf indication contraire, l'outil utilisé par défaut est ARTDECO.

1 Description

1.1 6SV

6S utilise une implémentation de la méthode des ordres successifs de diffusion SOS pour estimer la luminance TOA. Cette approche permet le calcul des valeurs de luminance TOA (totale et polarisée) en ciel clair avec une exactitude de l'ordre du pour-cent (Vermote et al., 1997; Kotchenova et al., 2006; Kotchenova and Vermote, 2007).

1.2 ARTDECO

ARTDECO est une suite d'outils de transferts radiatifs combinant plusieurs méthodes pour modéliser le transfert radiatif. La méthode que nous avons sélectionnée pour effectuer notre étude est celle de l'*adding-doubling* (De Haan et al., 1987).

2 Modèle de surface

Les modèles de surfaces utilisés pour les simulations que nous avons effectuées sont identiques et se basent sur l'approche proposée par Cox et Munk. Plus de détails sont donnés dans la section suivante, dédiée aux modèle du *glitter*.

3 Modèles d'aérosols

Pour 6SV nous avons utilisés les modèles prédéfinis dans ce dernier (cf. (D'Almeida et al., 1991; Vermote et al., 1997; Lenoble et al., 2013)). Pour ARTDECO, ce sont les modèles OPAC qui sont utilisés (Hess et al., 1998).

III Modèle du *glitter*

Comme nous l'avons précédemment décrit, le *glitter* est le phénomène qui se produit lorsque la lumière du soleil est réfléchie par la surface de l'eau. Lorsque cela se produit, la lumière est alors réfléchie sur une multitude de petites vagues ayant des pentes différentes. La rugosité de la surface permet donc d'observer une distribution des pentes des vagues sur lesquelles les réflexions se produisent. Ainsi, pour une géométrique d'observation donnée, la lumière du *glitter* est celle qui est réfléchie de manière spéculaire sur les facettes des vagues dont la normale est bissectrice à l'angle formé par la direction du soleil et celle d'observation. L'intensité et le taux de polarisation sont alors caractérisés par les lois de Fresnel et par la probabilité d'occurence de chaque facette/pente de vague. Appelons ρ_{os} la réflectance de la surface de l'océan (anglais : *ocean surface*). Pour des conditions géométriques données $(\theta_s, \theta_v, \phi)$ et une longueur d'onde λ, on peut écrire la réflectance ρ_{os} comme étant la somme de trois composantes (Koepke, 1984), telles que :

$$\rho_{os}(\theta_s,\theta_v,\phi,\lambda) = \rho_{wc}(\lambda) + \Big[1 - W\Big].\rho_{gl}(\theta_s,\theta_v,\phi,\lambda) + \Big[1 - \rho_{wc}(\lambda)\Big].\rho_{sw}(\theta_s,\theta_v,\phi,\lambda) \quad (11)$$

où :

— $\rho_{wc}(\lambda)$ est la réflectance due à l'écume (anglais : *whitecaps*) ; ne pas confondre avec la réflectance intrinsèque de l'écume (cf. équation 13) ;

— $\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ est la réflectance spéculaire à la surface de l'océan ;

— $\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ est la réflectance diffuse (sortante de la surface de l'eau) ;

— W est la surface relative couverte par l'écume exprimée en fonction de la vitesse du vent de surface w_s par :

$$W = 2.95\,10^{-6} w_s^{3.52} \tag{12}$$

pour des températures de l'eau supérieures à 14 °C (Monahan and Muircheartaigh, 1980).

Le premier terme de l'équation 11 est défini comme suit :

$$\rho_{wc}(\lambda) = W.f_{eff}.\rho_f(\lambda) \tag{13}$$

où :

— $\rho_f(\lambda)$ est la réflectance intrinsèque de l'écume ;

— $f_{eff} = 0.4 \pm 0.2$ est un facteur quantifiant l'efficacité de réflexion de l'écume qui dépend de la taille de cette dernière (Koepke, 1984).

Le second terme, quant à lui, dépend des coefficients de réflexion de Fresnel. On définit alors ρ_{gl} comme suit (Cox and Munk, 1954, 1956) :

$$\rho_{gl}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{\pi P(Z'_x, Z'_y) R(n, \theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)}{4cos(\theta_s)cos(\theta_v)cos^4(\beta)} \tag{14}$$

où :

— n est l'indice de réfraction complexe de l'eau ;

— $P(Z'_x, Z'_y)$ est la distribution statistique des pentes des vagues ;

— Z'_x et Z'_y représentent les composantes des pentes ;

— β est l'angle d'inclinaison des vagues.

Le troisième terme de l'équation 11 quantifie la réflectance observée juste au dessus de la surface océanique (niveau 0^+). Soit R_w le ratio entre la luminance ascendante et la luminance descendante à la surface de l'océan (au niveau juste au dessous de la surface ; niveau 0^-). On peut alors écrire la réflectance diffuse sortante de la surface océanique ρ_{sw} telle que (Cox and Munk, 1954, 1955, 1956) :

$$\rho_{sw}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{1}{n^2} \frac{R_w(\lambda).t_d(\theta_s).t_u(\theta_v)}{1 - a.R_w(\lambda)} \tag{15}$$

avec : $t_d(\theta_s)$ et $t_u(\theta_v)$ les transmittances pour les luminances rentrantes et sortantes, respectivement. Elles sont calculées via les coefficients de Fresnel pour l'interface air-eau. Le coefficient a vaut 0.485. Dans les simulations que nous avons effectuées pour les travaux présents dans cette thèse, la distribution statistique des pentes de vagues prends en compte l'anisotropie due à la direction du vent (pour plus de détail sur ces dernières, cf. (Bréon and Henriot, 2006)).

IV ÉTUDES DE SENSIBILITÉ

Comme nous avons pu le mentionner précédemment, le *glitter* est une cible que nous savons modéliser, notamment grâce aux travaux effectués par Cox et Munk. Cependant, pour mener à bien notre mission dans l'optique d'un étalonnage de l'instrument 3MI, nous devons être capables de quantifier la sensibilité aux paramètres du problème. Dans cette section, nous allons nous focaliser sur les principaux paramètres pouvant influencer le calcul du transfert radiatif permettant de simuler la luminance TOA au dessus des observations *glitter* en ciel clair : la vitesse et direction du vent de surface, la quantité et type d'aérosols, la couleur de l'eau (contenu en chlorophylle-a), et finalement, nous explorerons le potentiel effet que pourrait avoir la variation de l'indice de réfraction de l'eau dans le moyen infrarouge. Les sous-sections traiteront de chaque groupe de paramètres indépendamment des autres.

1 Sensibilité aux paramètres du vent : vitesse de surface et direction

1.1 Introduction

Parmi les paramètres que nous allons tester, celui auquel la réflectance du *glitter* est la plus sensible est la vitesse du vent de surface. En effet, comme déjà montré dans les travaux menés par Cox et Munk (Cox and Munk, 1954, 1955, 1956), la détermination des paramètres du vent est une étape cruciale à la bonne estimation de la luminance observée par l'instrument en vol au dessus d'une scène *glitter*. Cependant, les incertitudes présentes sur les estimations de ces paramètres sont non-négligeables pour une application en étalonnage absolu. En effet, l'incertitude typique des données de vitesse du vent utilisables en opérationnel telles que celles disponibles via ECMWF sont de l'ordre de 2 m/s (Pinson and Hagedorn, 2011). Cela induit des erreurs de l'ordre de 20% sur les réflectances simulées dans des géométries proches du point spéculaire (Djellali et al., 2019). Comme nous l'avons précédemment décrit, il est important de pouvoir modéliser le signal à 2% ou mieux dans le cadre de la mission 3MI. La méthode d'étalonnage que nous proposons, et qui sera décrite en détail dans le chapitre suivant, requiert une compréhension de l'effet des différents paramètres (principalement ceux du vent) sur la réflectance simulée. À cet effet, nous allons procéder à une présentation de différentes simulations de la réflectance TOA dans le but de quantifier la sensibilité aux paramètres du vents (vitesse et direction) dans la section suivante.

1.2 Vitesse du vent

Méthodologie : Nous allons d'abord nous intéresser à l'influence de la vitesse du vent de surface. Les figures 9, 10, 11, et 12 représentent des simulations effectuées dans le plan principal, à 490 et 865 nm. La grandeur représentée est la **luminance normalisée** I (notée

I_{tot} en luminance totale et I_{pol} en luminance polarisée) définie par :

$$I = \frac{\pi L}{E_s} \tag{16}$$

où :

— L est la luminance (totale ou polarisée) au TOA (on notera L_{tot} et L_{pol} la luminance totale et luminance polarisée, respectivement) ;

— E_s est l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère.

Les calculs sont effectués sans prise en compte du contenu en chlorophylle-a et pour un ciel clair sans aérosols. Pour une longueur d'onde et une géométrie d'observation données, les seuls paramètres variables sont : la vitesse du vent de surface et la direction (azimut) du vent ; le but étant de montrer les ordres de grandeur pouvant être attendus pour des géométries d'observations et valeurs de la vitesse/direction du vent typiques. L'inclusion des valeurs spécifiques de l'azimut du vent (0, 90, 180, et 270 degrés) dans les graphes dédiés à la vitesse du vent sert principalement à montrer les ordres de grandeurs en réflectance pour des valeurs d'azimut de vents dans les quatre principales directions : un vent soufflant dans la direction incidente de la lumière, la direction opposée, ainsi que les directions transverses. Des graphes dédiés aux ordres de grandeur des variations de l'azimut du vent seront discutés séparément dans la sous-section suivante.

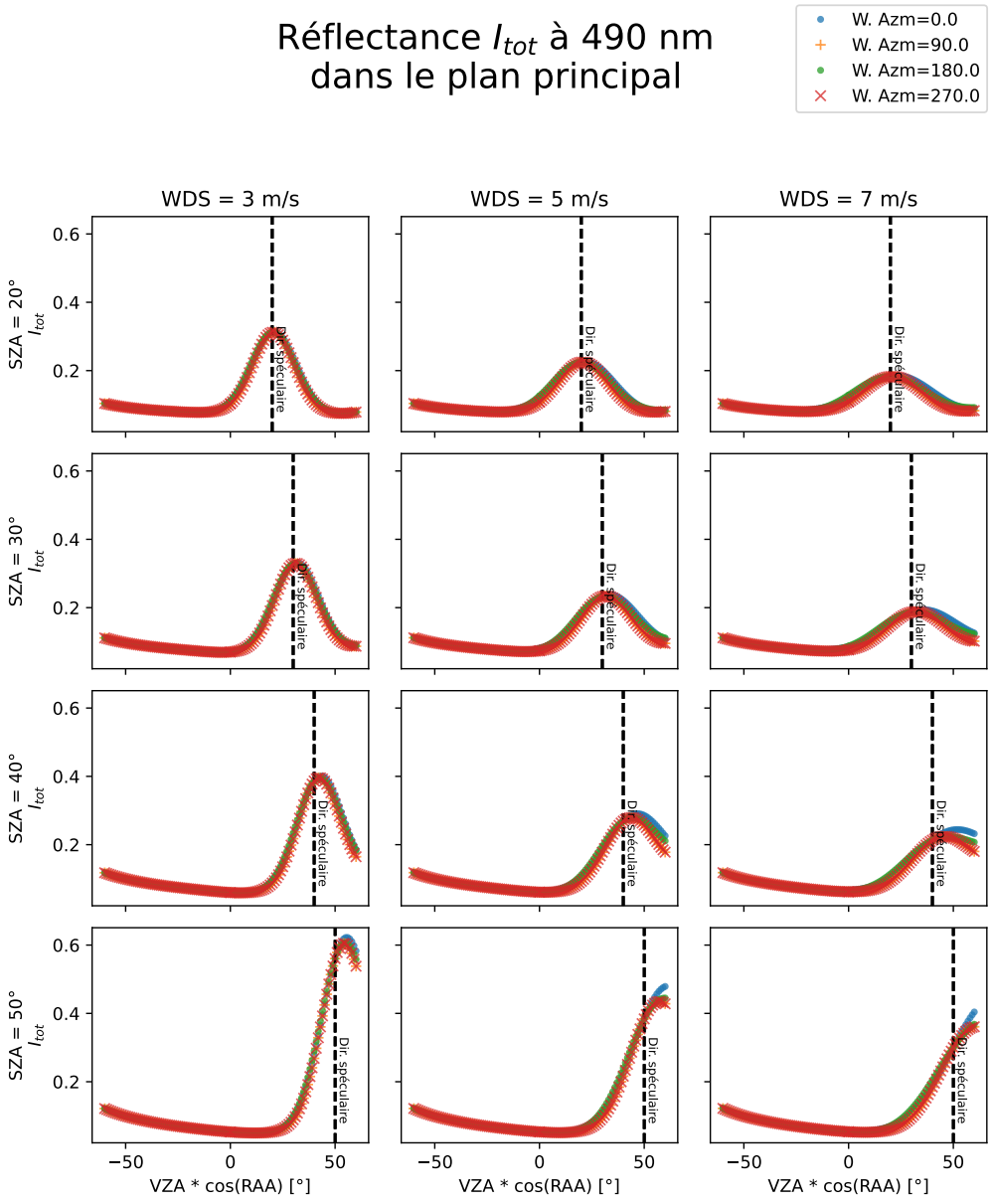


FIGURE 9 – Simulations à 490 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : réflectance normalisée I_{tot} (cf. équation 16). Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

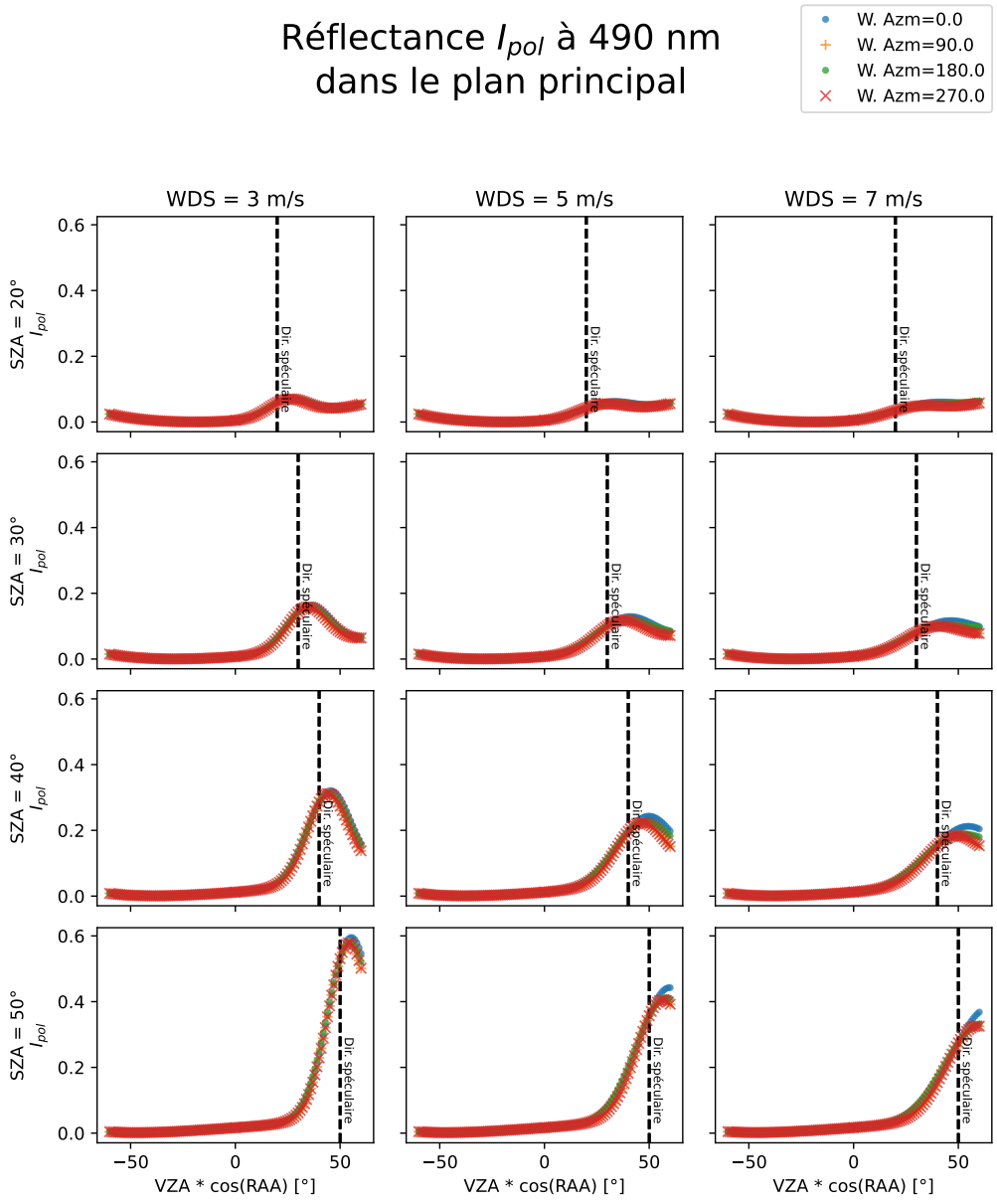


FIGURE 10 – Simulations à 490 nm en réflectance polarisée. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : réflectance normalisée I_{pol} (cf. équation 16). Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

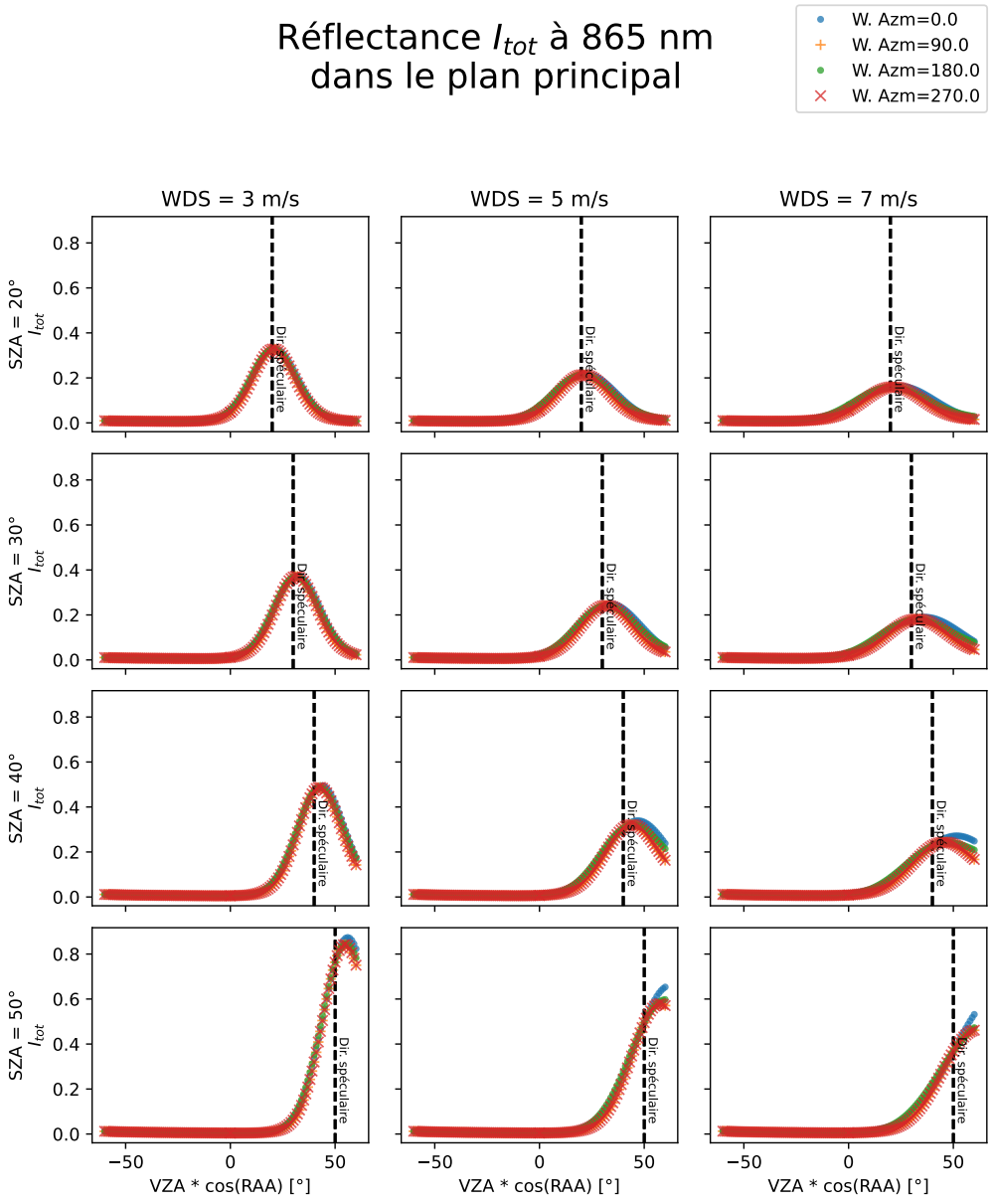


FIGURE 11 – Simulations à 865 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : réflectance normalisée I_{tot} (cf. équation 16). Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

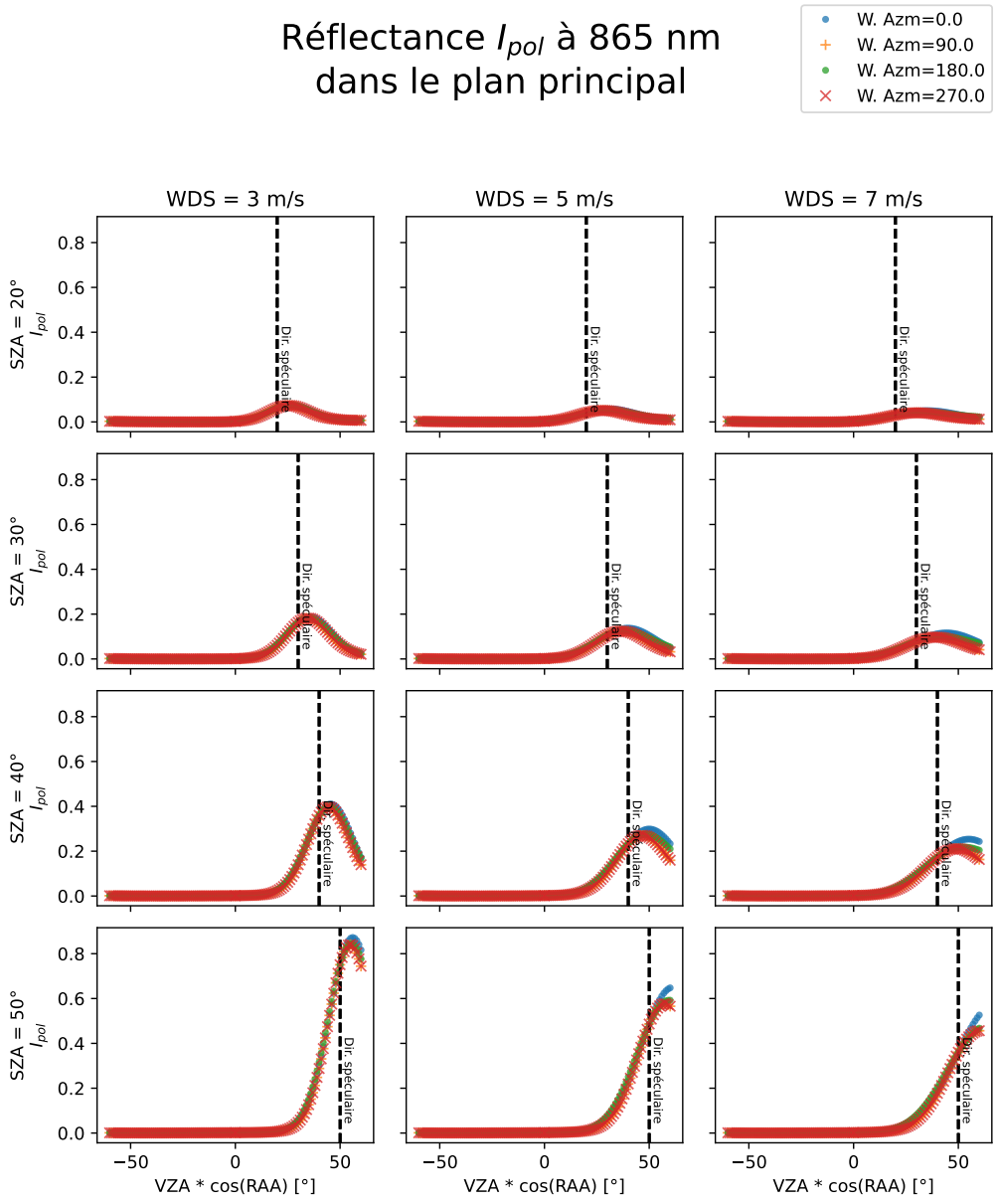


FIGURE 12 – Simulations à 865 nm en réflectance polarisée. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : réflectance normalisée I_{pol} (cf. équation 16). Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion : Le *glitter* est un phénomène exhibant une forte anisotropie. Le principal paramètre gouvernant l'intensité de ce dernier est celui de la vitesse du vent de surface. Pour des vitesses du vent faibles, on se rapproche de la réflexion spéculaire théorique où

la surface de l'eau s'assimile visuellement à un miroir. Dans ces conditions, le signal est plus "piqué", d'autant plus pour des angles zénithaux solaires élevés. Dans les cas simulés, l'effet de l'azimut du vent est plus visible dans une zone de 10 à 30 degrés autour de la direction spéculaire. Cet effet est d'autant plus prononcé pour les vitesses du vent les plus élevées.

1.3 Direction (azimut) du vent

Méthodologie : L'anisotropie du signal *glitter* est fortement influencée par la direction du vent. Pour exprimer l'effet de ce paramètre, nous calculons l'erreur relative en fonction de la direction du vent R_ϕ telle que :

$$R_\phi = \frac{I_{\phi=0} - I_\phi}{I_{\phi=0}} \tag{17}$$

où : I_ϕ est la réflectance (totale ou polarisée) simulée avec un azimuth du vent de ϕ degrés. Nous étudions donc l'erreur relative par rapport à une direction du vent de 0 °. On notera I_{tot} et I_{pol} la réflectance totale et polarisée, respectivement. Nous utilisons les mêmes conditions de simulation que les cas présentés dans les figures 9 à 12. La différence principale est que nous allons nous focaliser sur les ordres de grandeurs de l'erreur relative R_ϕ au lieu des valeurs de la réflectance. Les figures 13 et 14 montrent les résultats des simulations effectuées à cet effet.

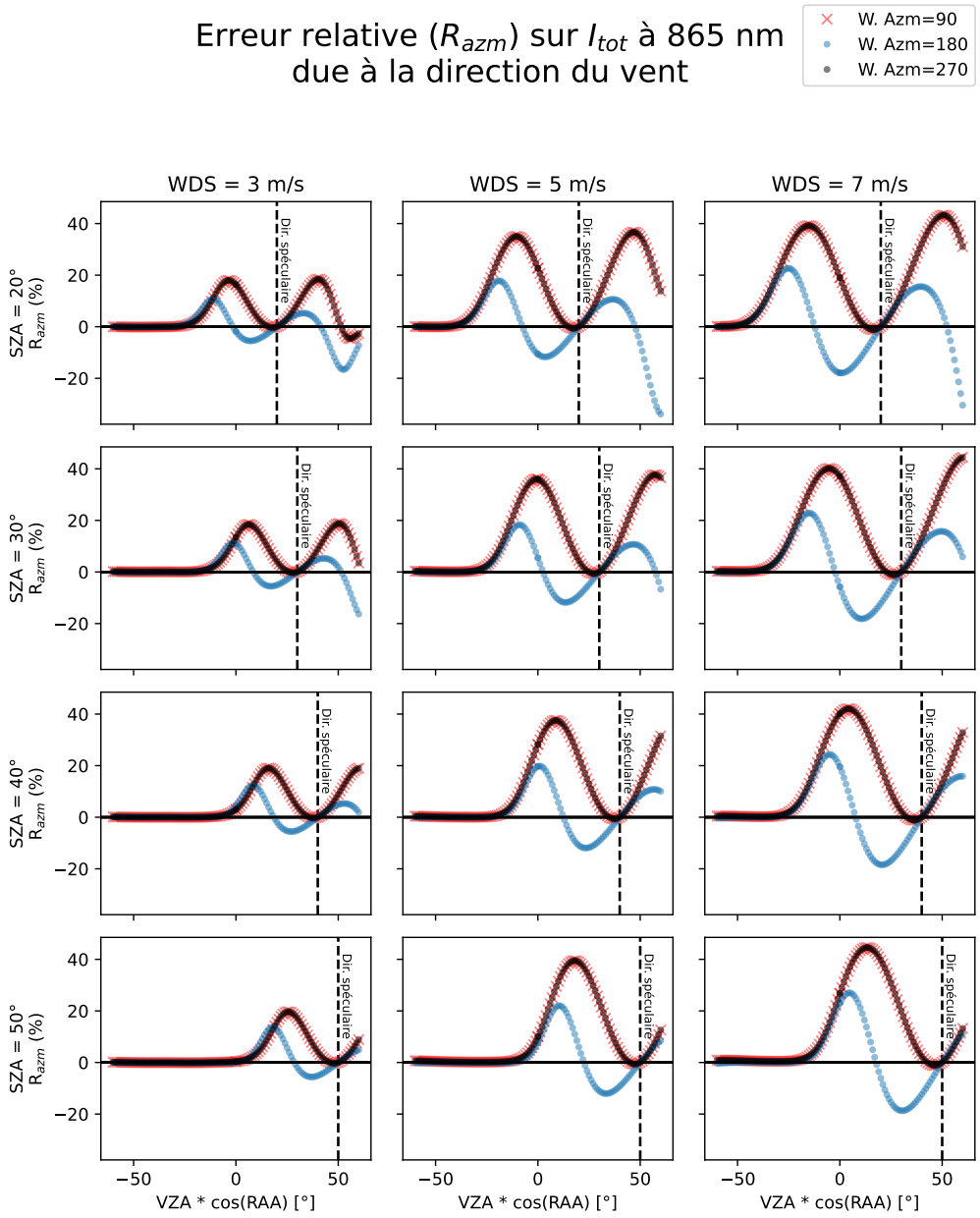


FIGURE 13 – Sensibilité à la direction du vent - 865 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 17) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

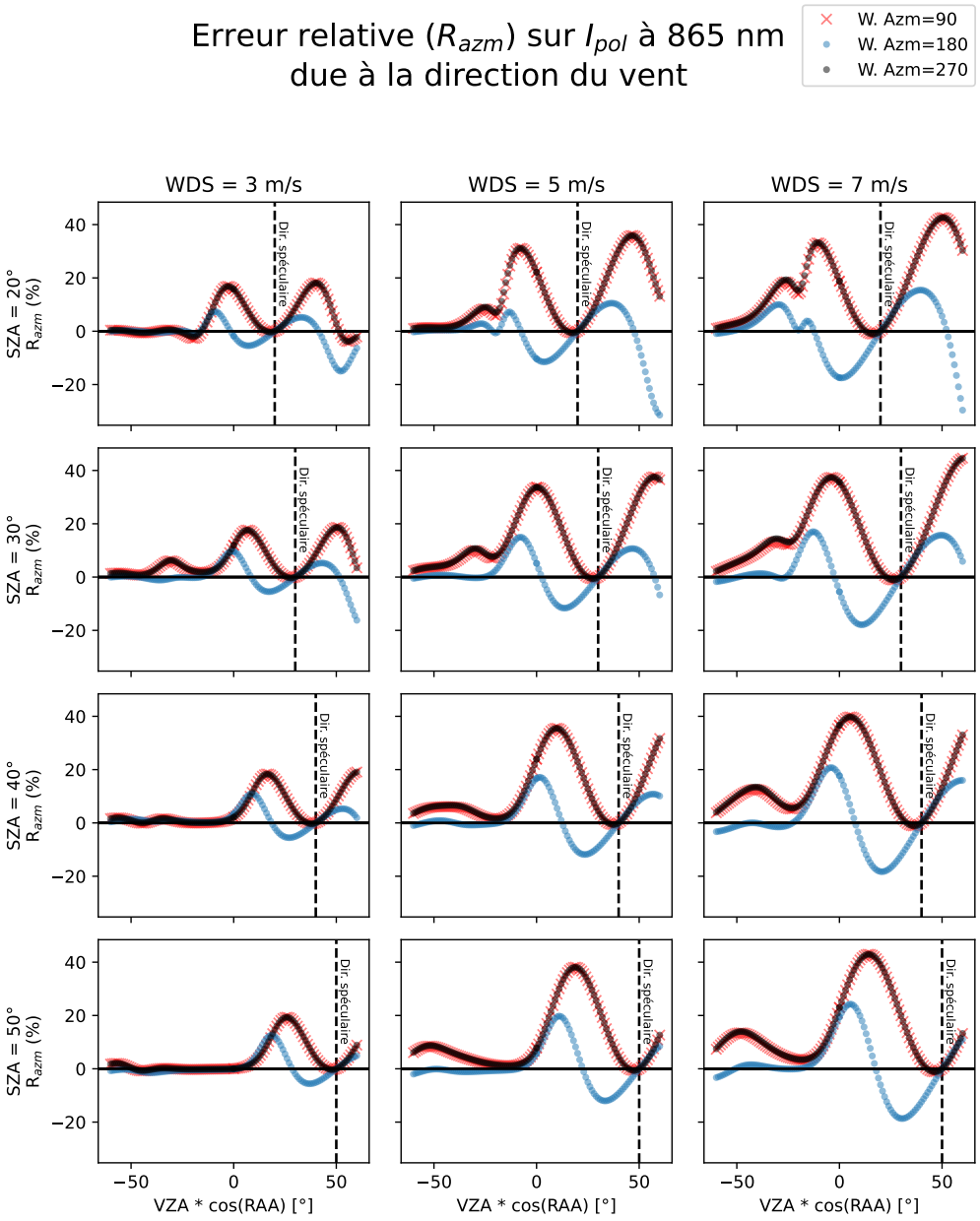


FIGURE 14 – Sensibilité à la direction du vent - 865 nm en réflectance polarisée. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 17) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

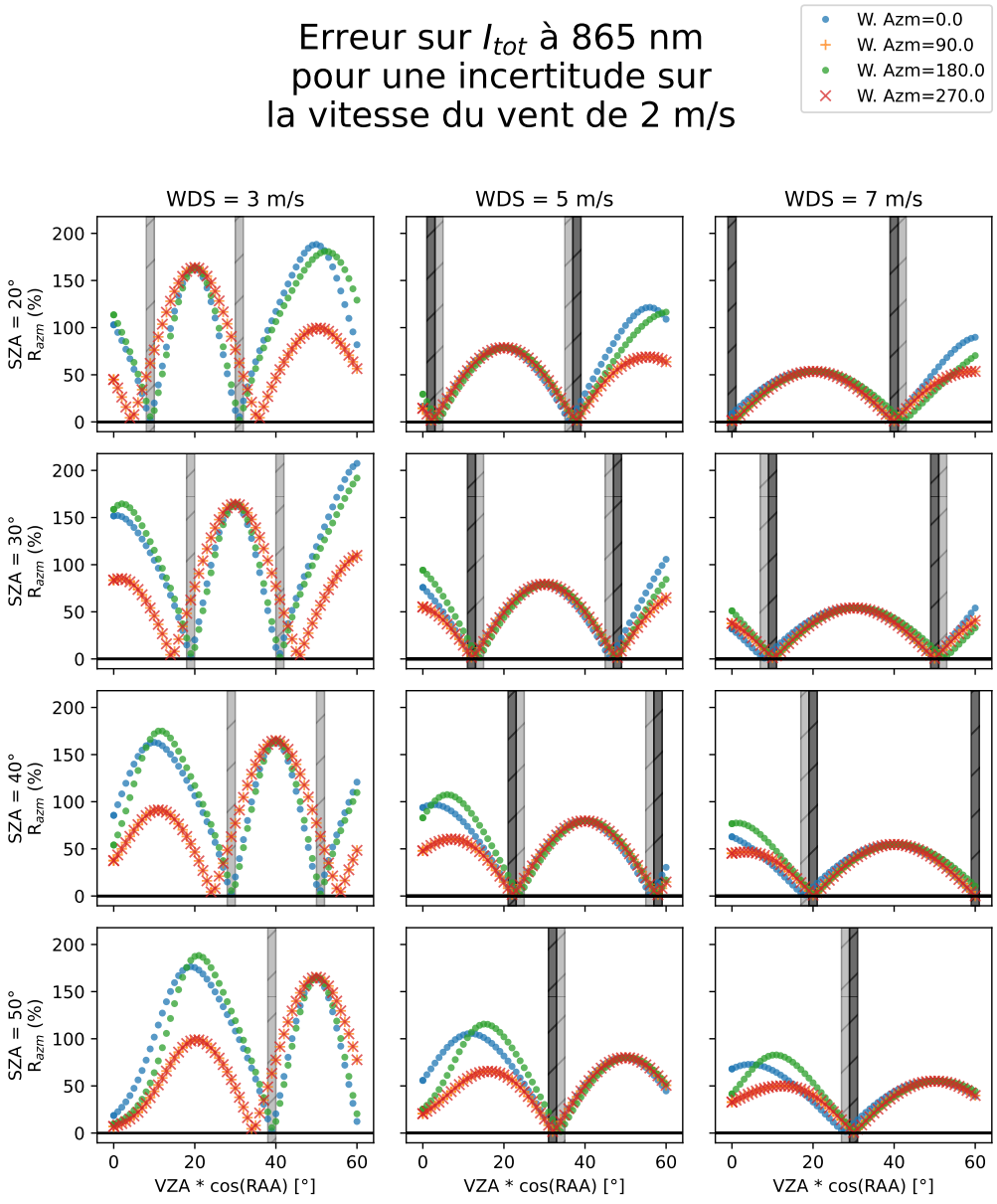


FIGURE 15 – Erreur relative sur la luminance totale à 865 nm pour une incertitude sur la vitesse du vent de surface de 2 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{azm} exprimée en pourcentage. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

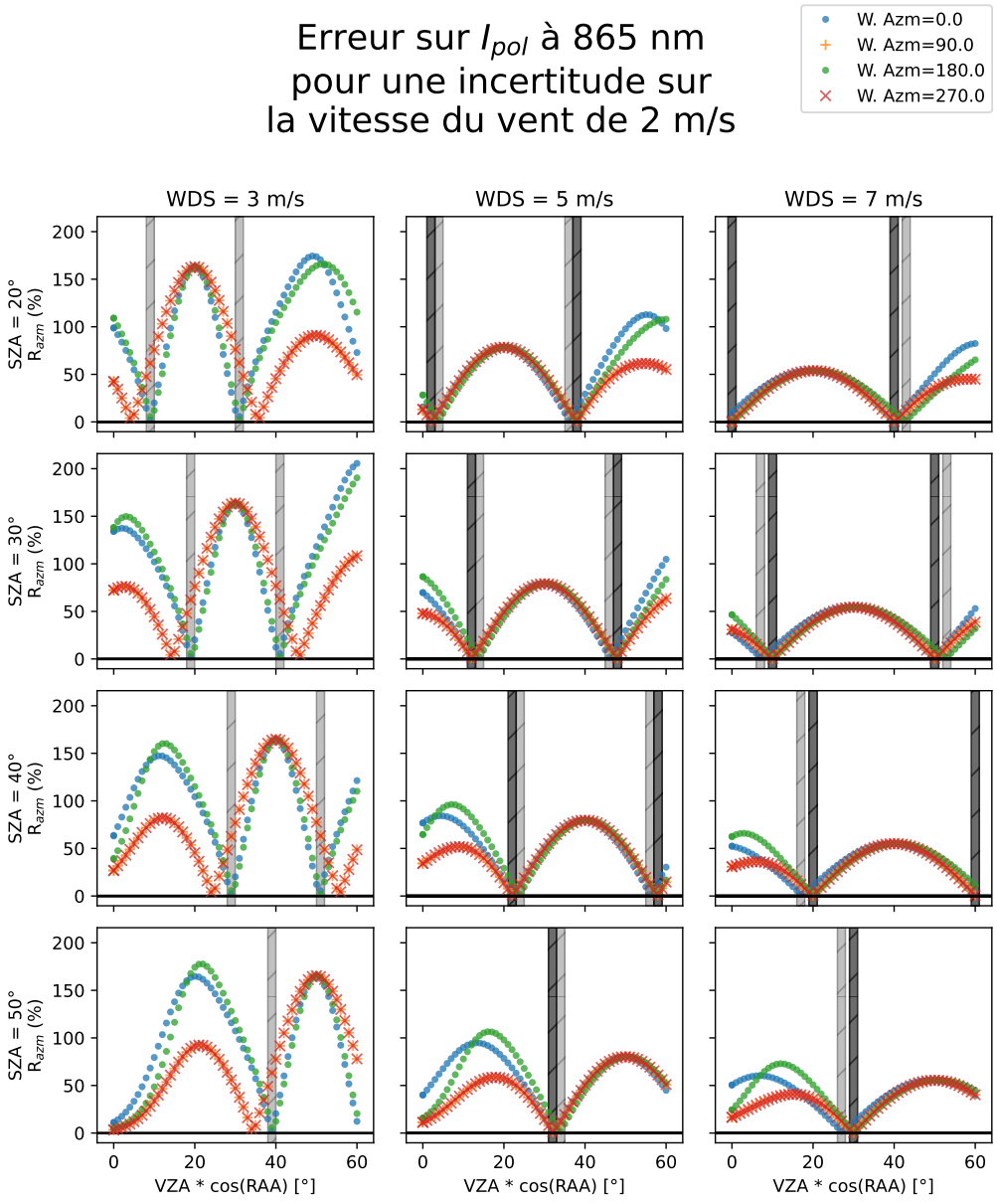


FIGURE 16 – Erreur relative sur la luminance polarisée à 865 nm pour une incertitude sur la vitesse du vent de surface de 2 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{azm} exprimée en pourcentage. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion :

Les figures 13 et 14 montrent que l'effet de l'anisotropie due à la direction du vent est

particulièrement visible dans une zone de 10 à 30 degrés autour de la direction spéculaire. La figure 13 permet d'en visualiser l'ordre de grandeur. En premier abord, nous pouvons déjà noter que l'effet est plus important pour les directions de la forme $k\frac{\pi}{2}$; $k \in \mathbb{N}$ avec k impair. De plus, l'erreur relative augmente avec la vitesse du vent de surface. Les maxima de R_ϕ sont de l'ordre de 20% pour des vitesses du vent de 3 m/s et de 40% pour des vitesses de 5 et 7 m/s. Il est également intéressant de noter que l'effet sur de la direction du vent est minime au niveau de la direction spéculaire ainsi que pour la direction de diffusion arrière. L'analyse des erreurs relatives montrées dans les figures 15 et 16 nous permet de faire une observation importante : **pour une incertitude quelconque sur la vitesse du vent de surface, il existe, dans un plan donné (ici le plan principal) deux zones contenant des géométries d'observation où l'erreur sur la réflectance due à l'incertitude sur la vitesse du vent est minimale**. Il est également important de noter que **la zone est la même pour la réflectance totale et polarisée**. Cette observation est l'idée principale de la méthode d'étalonnage que nous proposons et qui est le cœur des travaux de cette thèse. En effet, cette zone nous permet, en théorie, de simuler le *glitter* avec une erreur pouvant être inférieure à 2%, ce qui en ferait une cible idéale pour de l'étalonnage absolu. Les zones en question sont illustrées sur les figures 15 et 16 par les bandes verticales hachurées. Par défaut (et par souci de clarté des figures), seule la zone pour une simulation avec une direction de zéro (d'azimut du vent) est montrée. Cependant, là où les zones pour les autres directions coincident (deux colonnes de droite) la couleur hachurée est plus foncée. On note que les zones se superposent, indépendamment de la direction du vent pour les vitesses du vent de 5 et 7 m/s. La raison principale à cette observation est que pour les vitesses de vent les plus faibles, la directionnalité du *glitter* est accentuée car nous nous rapprochons davantage d'une réflexion spéculaire "pure" c'est à dire : la distribution statistique des réflexions spéculaires individuelles se produisant au niveau des facettes des vagues est plus piquée, la rendant d'autant plus directionnelle.

1.4 Conclusion

Les simulations présentées dans cette section nous permettent de conclure sur l'importance de la détermination des paramètres du vent de surface. Bien qu'il suffise d'avoir une estimation précise de la vitesse du vent de surface pour une bonne détermination de la réflectance *glitter* dans la direction spéculaire, il est important de noter que pour les directions entre cette dernière et la direction de diffusion arrière, une bonne connaissance de la direction du vent est également nécessaire. On a observé la présence d'une zone d'invariance dans le *glitter*. Cette zone existe pour chaque valeur de vitesse et direction du vent, ainsi que pour une incertitude donnée sur ces paramètres. On a également pu remarquer que pour les vitesses de vent de l'ordre de 5 m/s et plus, la direction du vent influe peu sur la position de la zone d'invariance dans le plan d'observation considéré. De plus, la zone d'invariance est la même en réflectance totale et polarisée, un point important au vu de l'objectif d'étalonnage qui est considéré.

2 Sensibilité au type et à la quantité d'aérosols

2.1 Introduction

Les aérosols sont des particules en suspension d'origines et de dimensions diverses. On peut les séparer en deux catégories : ceux d'origine naturelle, et ceux d'origine humaine, dits anthropiques. En ce qui concerne les aérosols d'origine naturelle, on peut citer : les poussières désertiques, les particules volcaniques ou celles dues aux feux de forêts, ou encore les embruns marins. Les aérosols anthropiques quant à eux, sont générés par les émissions de gaz dues aux processus de combustion (moteurs, usines...). L'étude des aérosols, et tout particulièrement en télédétection spatiale, relève d'un domaine à part entière. En effet, la complexité des phénomènes de diffusions et d'absorptions se produisant lors de l'interaction de la lumière avec ces derniers, en plus de leur diversité (types, tailles, quantités...) en font un des problèmes majeurs auxquels il est nécessaire de faire face lors de la restitution des propriétés de l'atmosphère (Liou, 2002). La figure 17

montre la distribution des valeurs moyennées de l'AOT à 550 nm de 2006 à 2010 à partir des produits POLDER-MODIS Level- 2 (PML2). Le but est de donner une idée de l'ordre de grandeur des valeurs d'AOT attendues au dessus des zones utilisées pour l'étalonnage utilisant des observations du *glitter* et ce, pour justifier le choix des valeurs d'AOT utilisées dans les tests qui seront présentés dans cette section.

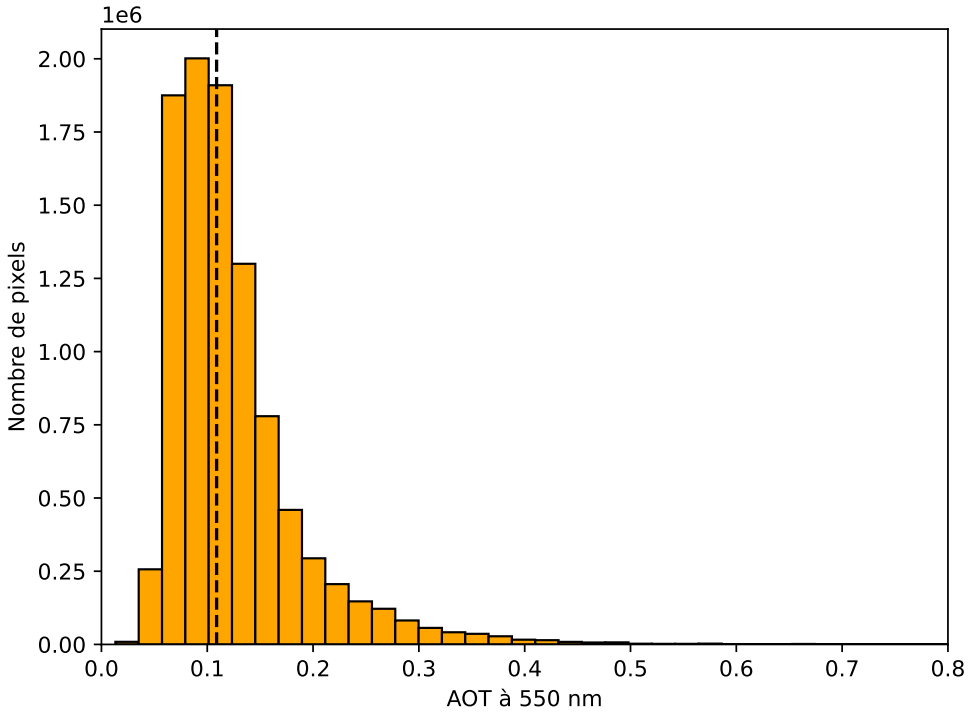


FIGURE 17 – Distribution des valeurs de l'épaisseur optique aérosol obtenues en moyennant les données PML2 de 2006 à 2010. La ligne verticale en pointillés représente la médiane.

2.2 Sensibilité à la quantité d'aérosols

Dans cette partie nous nous focalisons sur l'effet de l'épaisseur optique aérosol, définie par sa valeur à 550 nm. Les simulations sont effectuées en ciel clair et sans prise en compte du contenu en chlorophylle-a. La direction du vent est fixée à 0 degrés. Pour une longueur d'onde et une géométrie d'observation données, les seuls paramètres variables sont : la vitesse du vent de surface, la valeur de l'épaisseur optique aérosol à 550 nm ainsi que le type/modèle d'aérosol. Les modèles d'aérosols utilisés dans cette section sont tels

que définis dans la suite OPAC (Hess et al., 1998).

Méthodologie :

Pour illustrer l'effet de la valeur de l'AOT, nous allons de nouveau nous baser sur l'erreur relative : la valeur de référence par rapport à laquelle cette dernière est calculée est la réflectance simulée sans aérosols (AOT nulle). On écrit donc :

$$R_{aot} = \frac{I_0 - I_{aot}}{I_0} \tag{18}$$

où :

— I_{aot} est la réflectance (totale ou polarisée) simulée avec une AOT à 550 nm non nulle.

— I_0 est la réflectance (totale ou polarisée) simulée sans aérosols (AOT nulle).

On notera I_{tot} et I_{pol} la réflectance totale et polarisée, respectivement. Les figures 18 à 25 montrent les résultats des simulations obtenues en réflectance totale et polarisée pour les longueurs d'onde 490 nm et 865 nm et pour les modèles *Maritime Clean* et *Desert*.

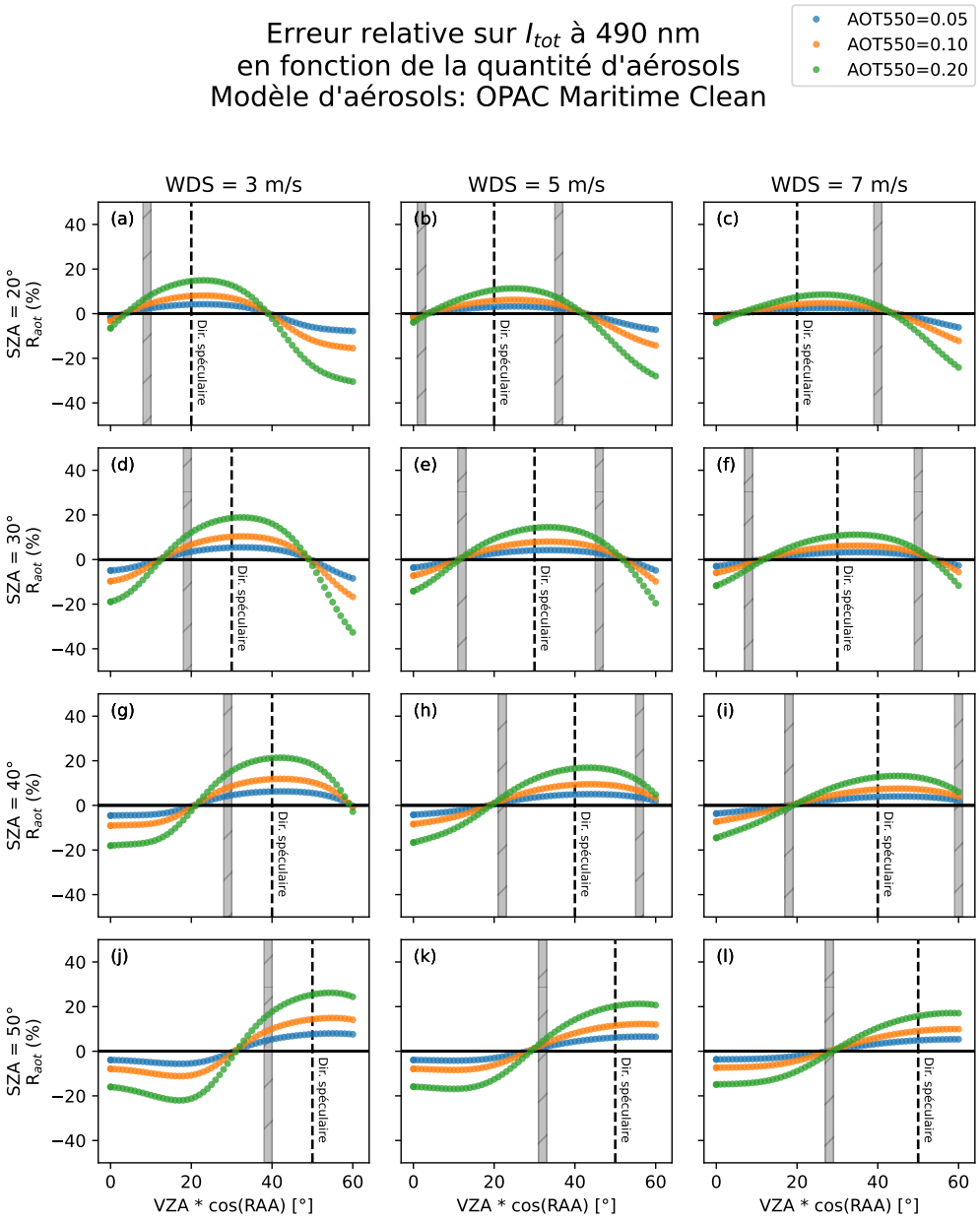


FIGURE 18 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

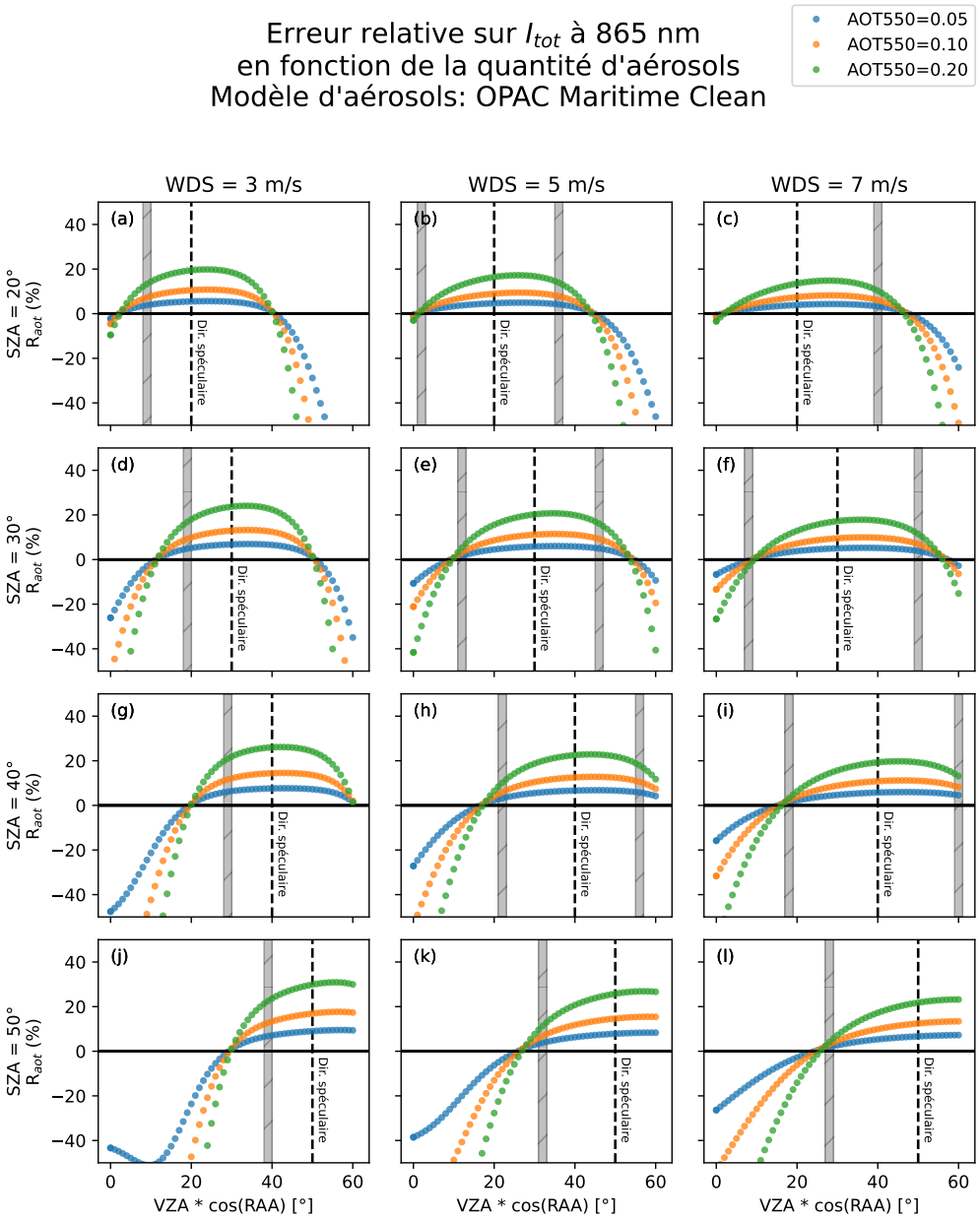


FIGURE 19 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

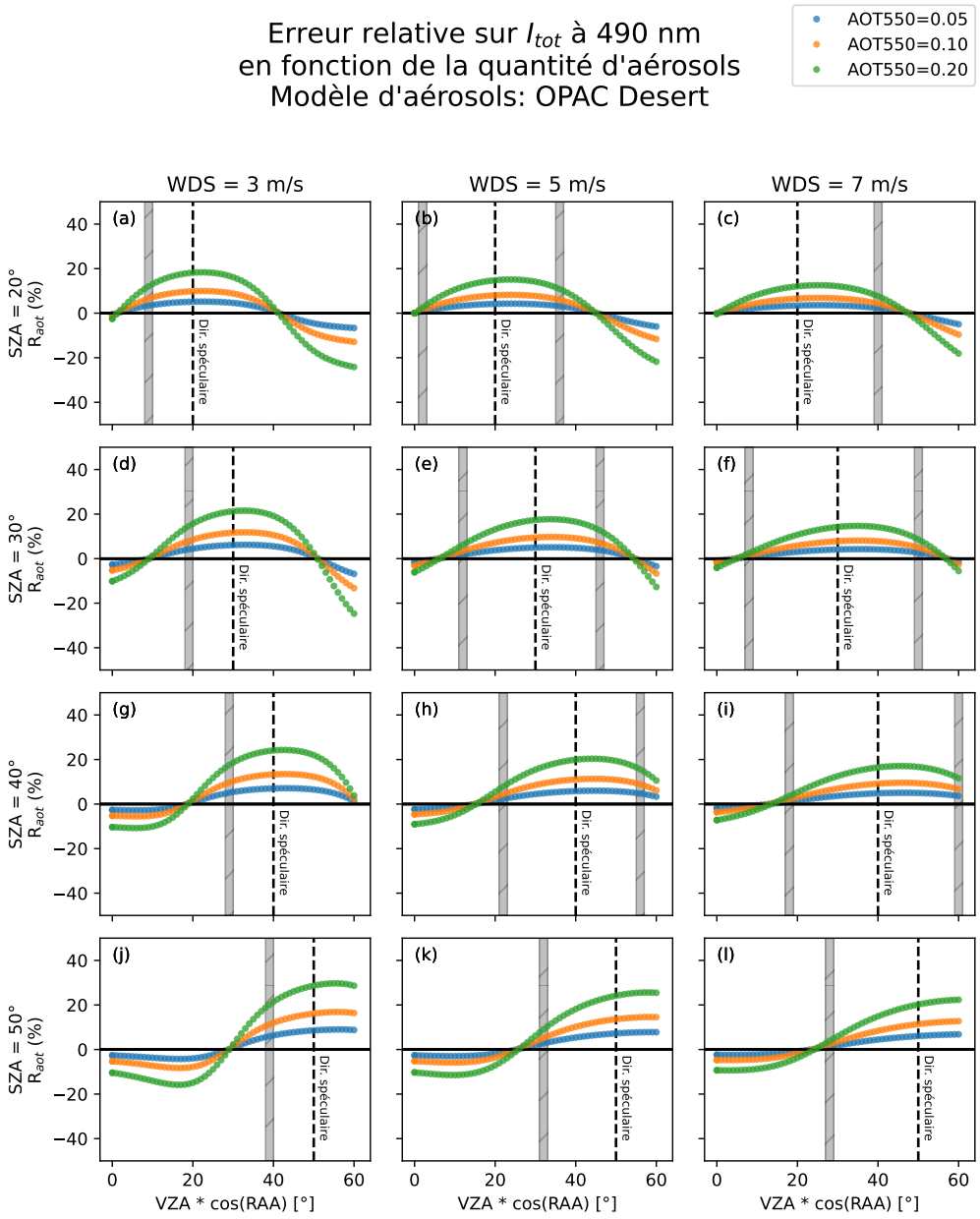


FIGURE 20 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Desert*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

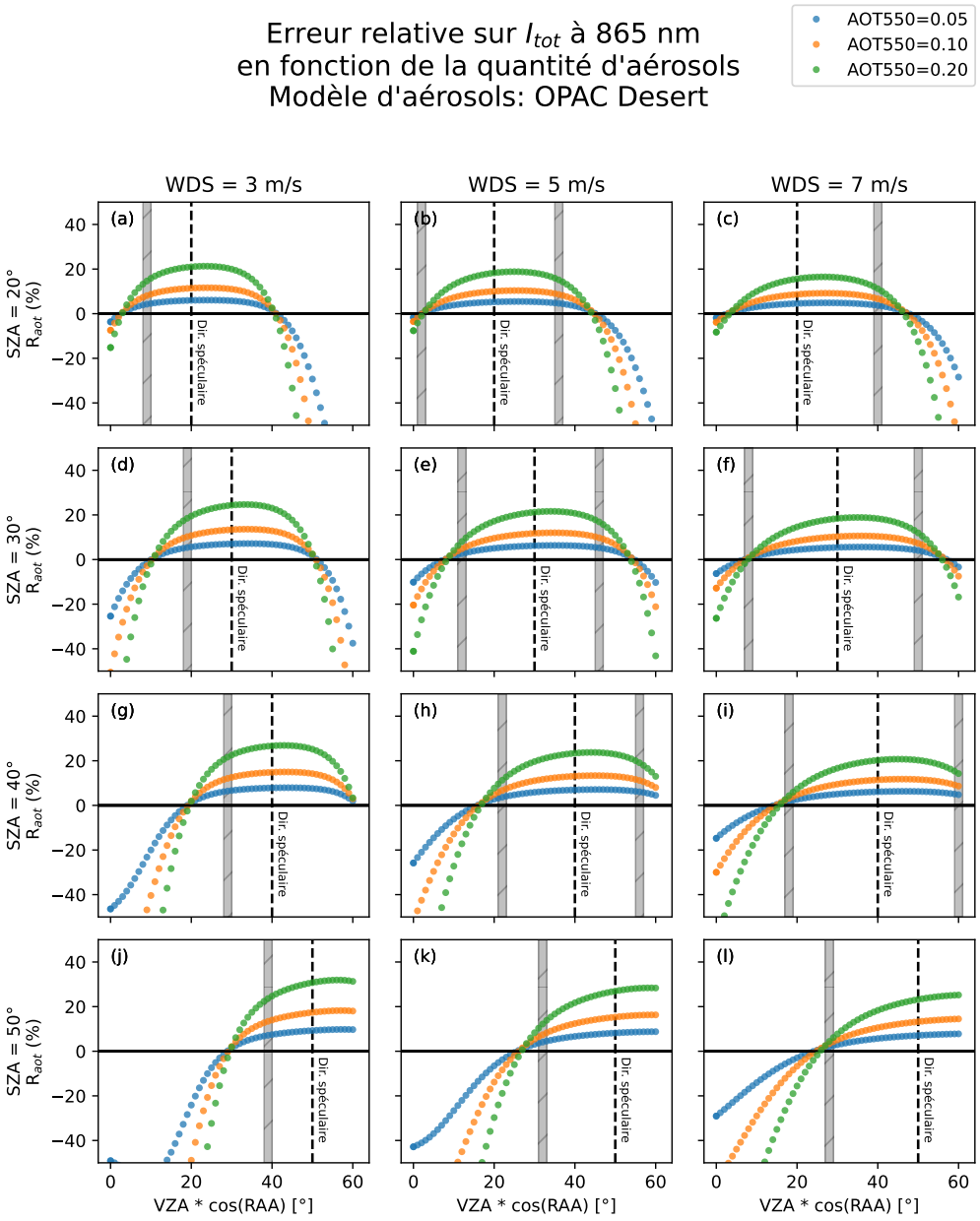


FIGURE 21 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Desert*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion : Les figures 18 à 21 montrent les erreurs relatives dues à un écart de valeur

d'AOT pour les modèles d'aérosols OPAC *Maritime Clean* (figures 18 19), et OPAC *Desert* (figures 20 et 21) en réflectance totale. Nous avons choisis les deux modèles d'aérosols suffisamment différents pour mieux illustrer les similarités observées dans le comportement des valeurs de réflectances à différentes valeurs de l'AOT. En effet, on remarque que l'erreur relative telle que définie dans l'équation 17 à un minimum à zéro qui se situe à la même géométrie d'observation quelle que soit la valeur de l'AOT550 testée. Ce comportement peut être expliqué par l'existence d'une réflectance de surface critique : pour chaque valeur de l'albédo de simple diffusion ω_0, il existe une valeur de la réflectance de surface critique ρ_c, pour laquelle la luminance montante est quasi-indépendante de l'épaisseur optique aérosol (Kaufman, 1987; Seidel and Popp, 2012). Il est d'autant plus intéressant de noter la coincidence, dans certaines géométries (sous-figures (i) par exemple), entre la zone d'invariance à la vitesse du vent et la celle d'invariance à l'AOT. Il serait donc judicieux, quand possible, de profiter de l'avantage d'être à la fois peu sensible à la vitesse du vent ainsi qu'à la quantité d'aérosols.

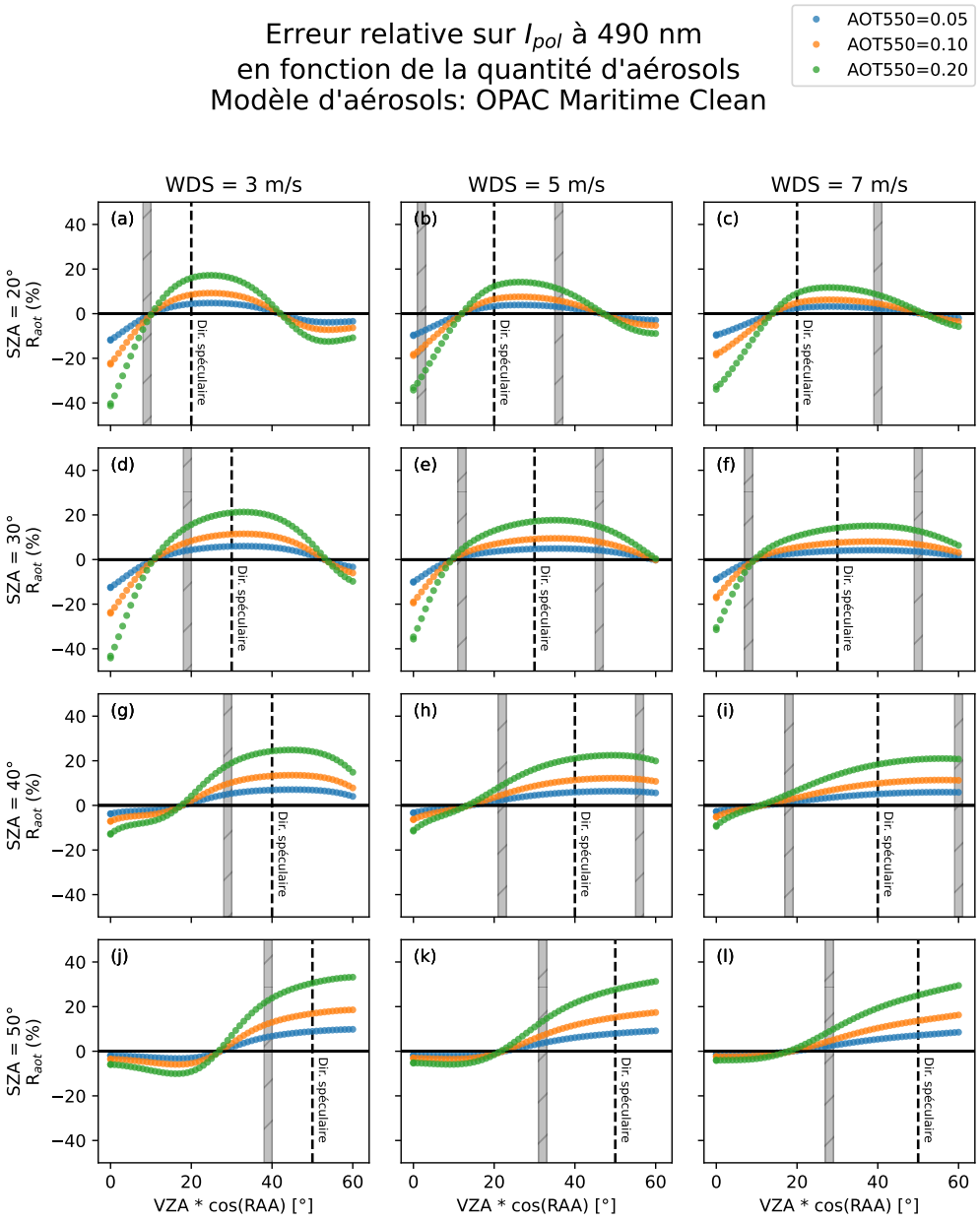


FIGURE 22 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

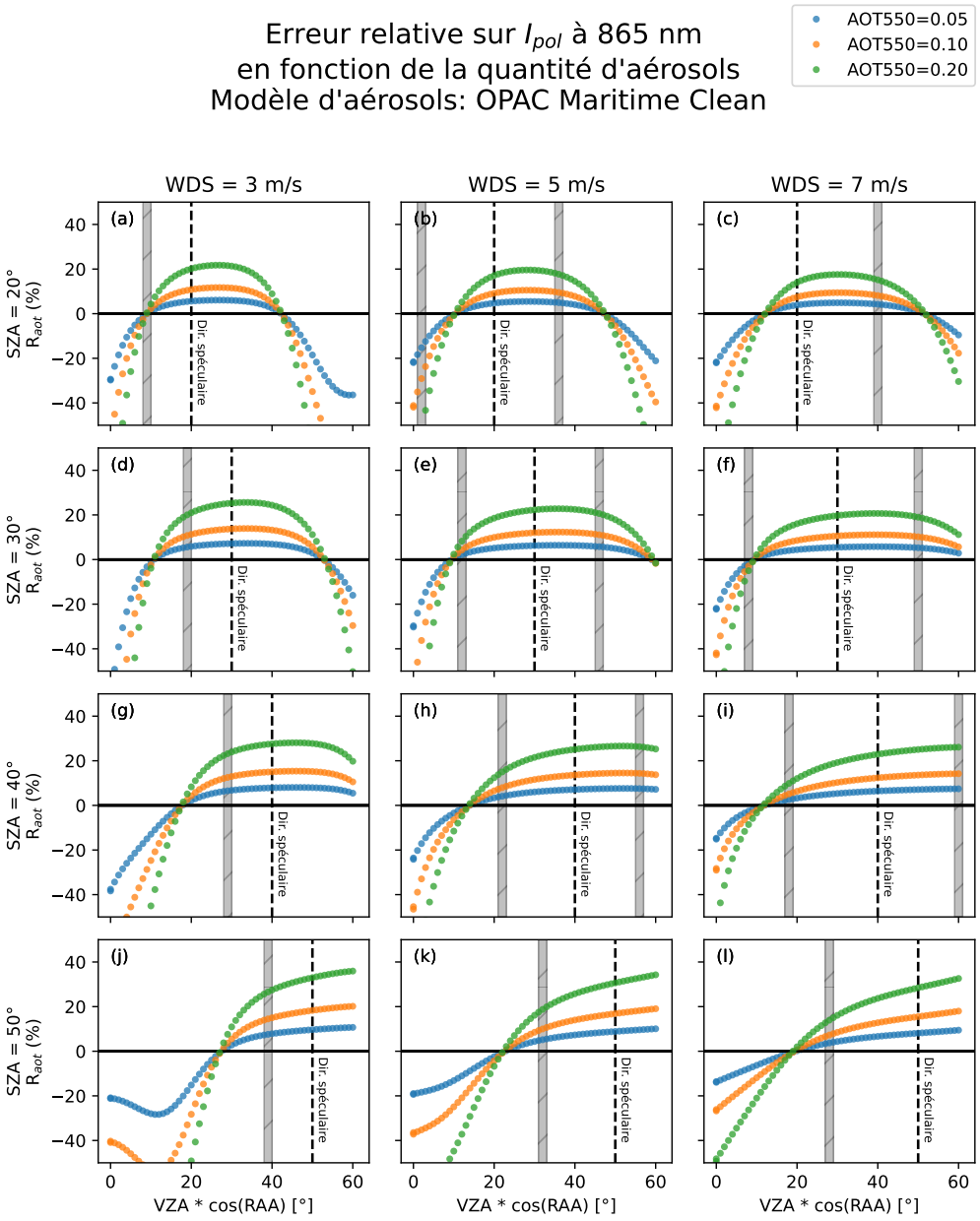


FIGURE 23 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

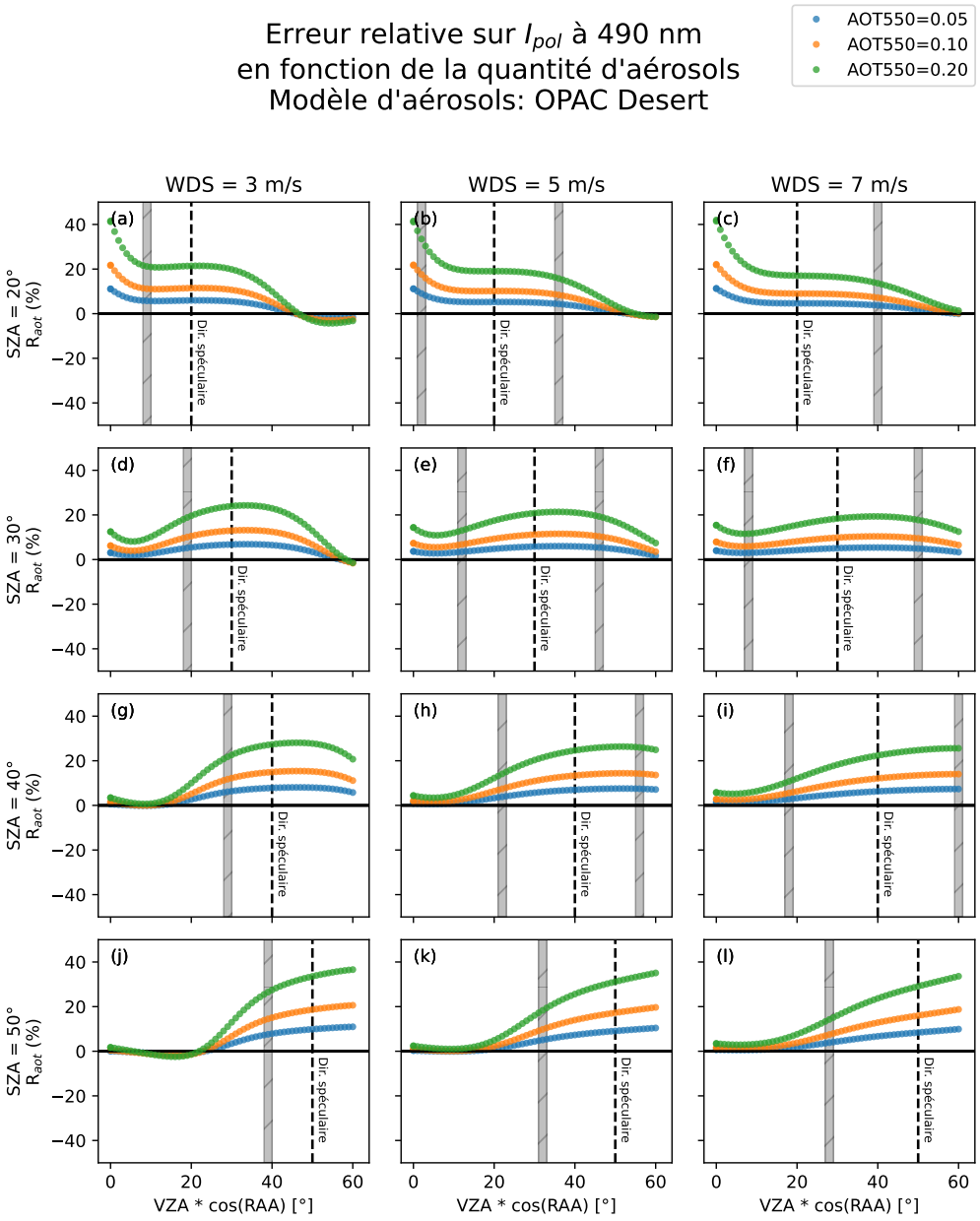


FIGURE 24 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Desert*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

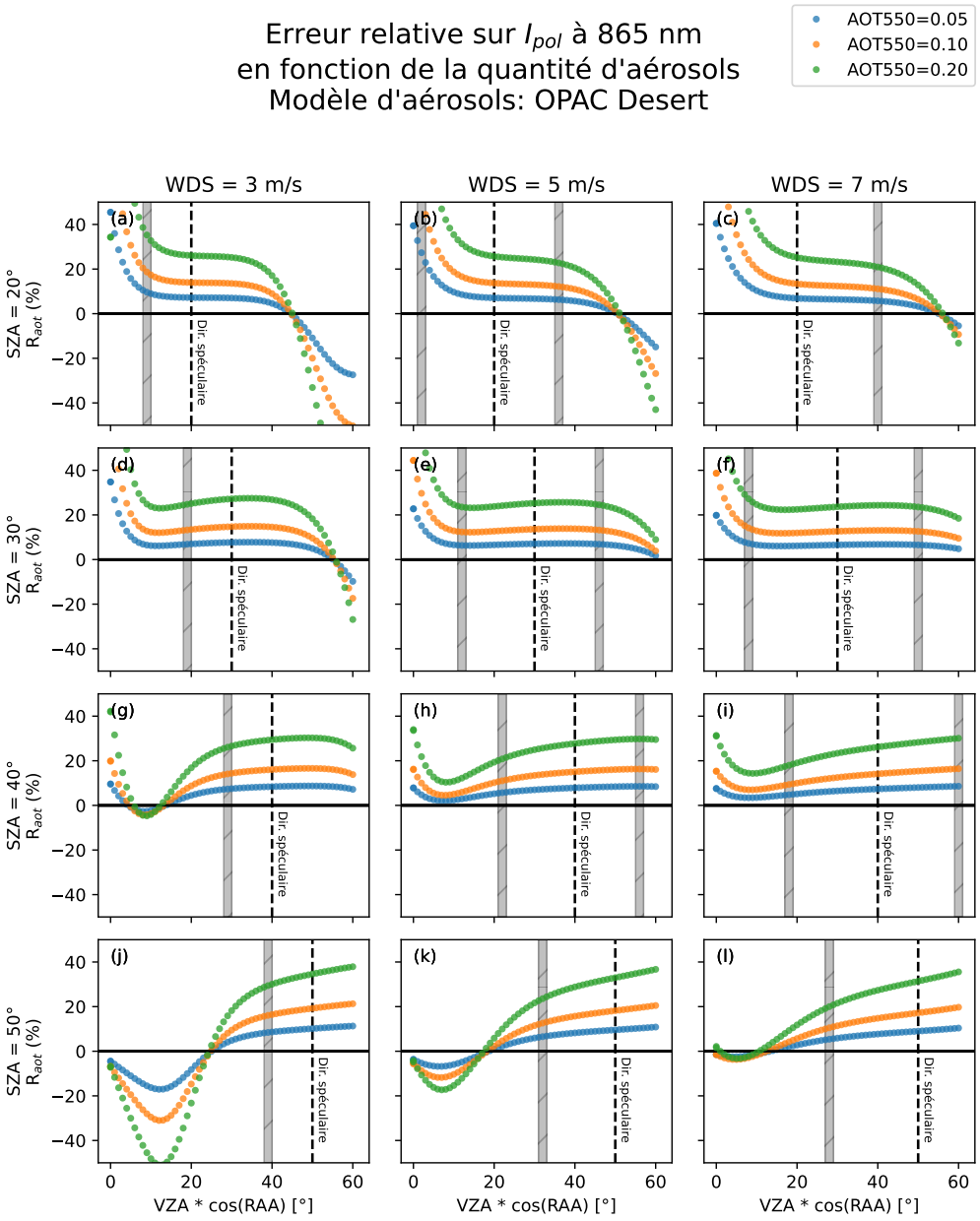


FIGURE 25 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Desert*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion :

Dans cette partie, nous discutons les observations pour les simulations en réflectance polarisée, c.-à-d. les figures 22 à 25. Bien que le comportement général soit différent en luminance polarisée en fonction du modèle et de la quantité d'aérosols, l'observation d'un point neutre où la valeur de l'erreur relative varie très peu ou pas en fonction de l'AOT reste la même. De plus, la coincidence entre la zone d'invariance d'AOT et celle de vitesse du vent reste également présente, cependant, les géométries où cette dernière existe diffèrent des simulations en luminance totale. Un exemple de coincidences des zones en luminance polarisée est visible dans la sous-figures (a) pour *OPAC Maritime Clean* (figures 22 et 23) ; aucune coincidence observable pour *OPAC Desert* (figures 24 et 25). Pour davantage de types d'aérosols testés, les figures 85 à 91 en annexe montrent les résultats pour les modèles OPAC suivants : *Maritime Polluted, Maritime Tropical, Continental Clean, Continental Polluted.*

2.3 Sensibilité aux types d'aérosols

Méthodologie : Dans les tests qui suivent, nous testons les variations dues à une différence entre les modèles choisis. Pour cela, nous fixons les paramètres du vent de surface (vitesse v et direction ϕ) ainsi que la valeur de l'AOT à 550 nm (ici fixée à 0.10). La vitesse du vent choisie est proche des valeurs moyennes observées par PARASOL que nous avons étudiées, et qui seront présentées dans le chapitre sur la validation de la méthode d'étalonnage. Quant à la valeur de l'AOT, elle représente une quantité typique d'aérosols observée au dessus des géométries *glitter* que nous avons sélectionnées pour l'étalonnage. Ainsi, dans les figures 26 et 27, la grandeur représentée est l'erreur relative qui est définie comme suit :

$$R_{model} = \frac{I_{MC} - I_X}{I_{MC}} \tag{19}$$

où :

— I_{MC} est la réflectance (totale ou polarisée) simulée en considérant le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Clean*

— I_X est la réflectance (totale ou polarisée) simulée pour un modèle d'aérosol X. Ici, nous avons sélectionné les modèles : *OPAC Maritime Polluted*, *OPAC Maritime Tropical*, et *OPAC Desert*.

Le but de ces tests n'est pas d'être le plus exhaustif possible sur l'effet d'une éventuelle erreur sur la prise en compte du bon modèle mais plutôt de se faire une idée sur les ordres de grandeur des différences pouvant être observées dans ces cas de figures, tout particulièrement dans la zone dite d'invariance à la vitesse du vent. Les figures 26 et 27 montrent les erreurs relatives R_{model} observées pour les paramètres précédemment définis, en luminance totale et polarisée et pour les longueurs d'onde 490, 670 et 865 nm.

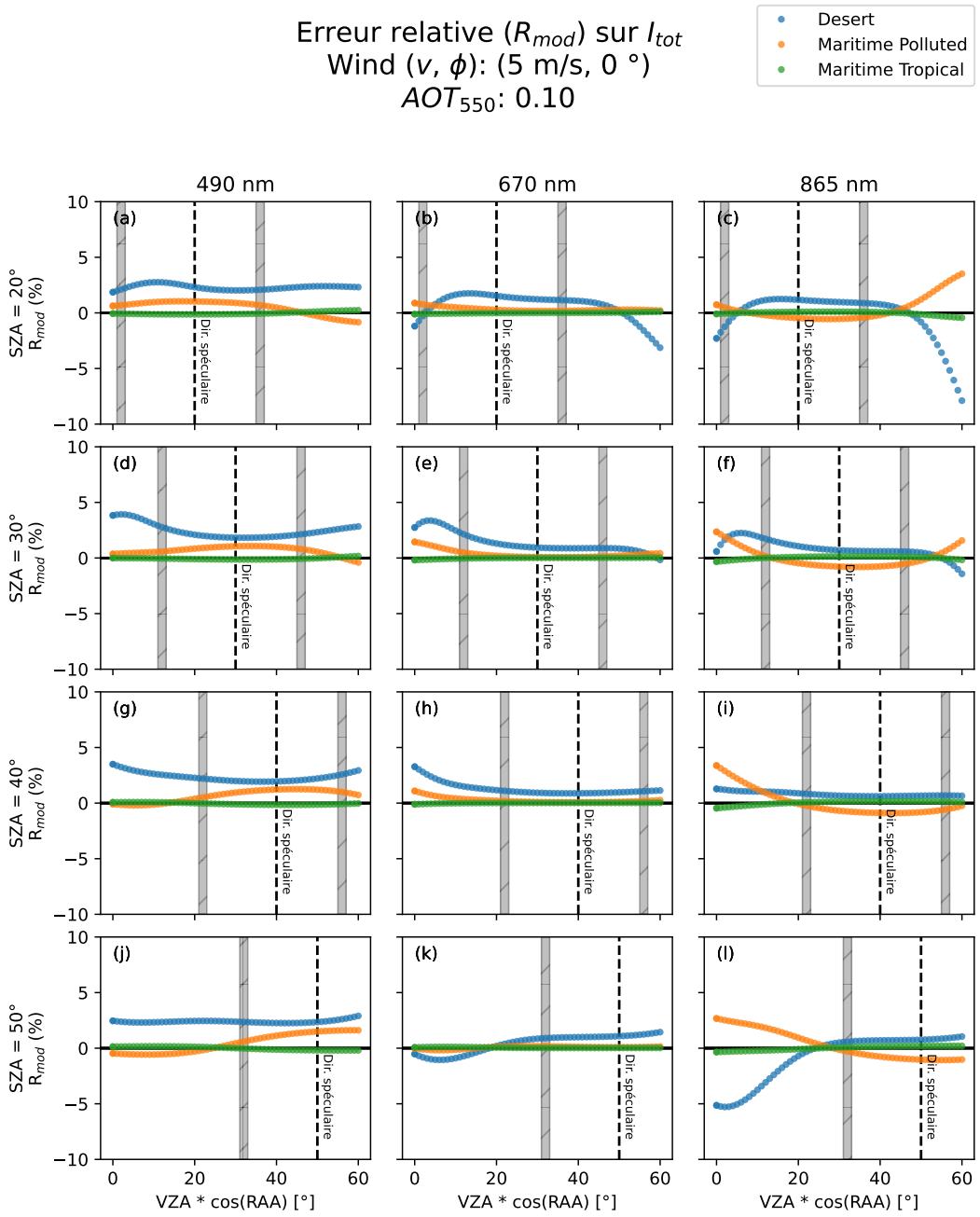


FIGURE 26 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

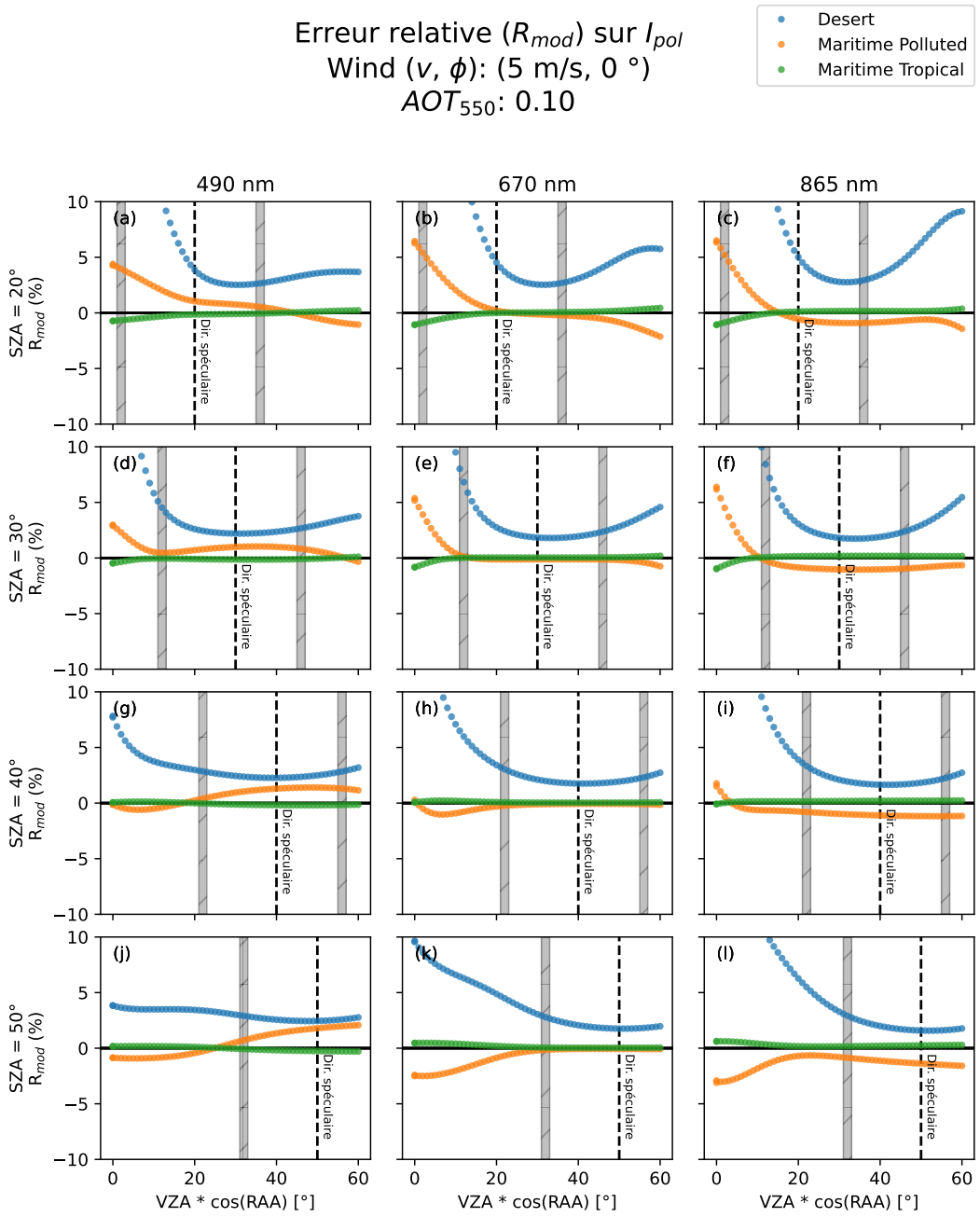


FIGURE 27 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion :

Les figures 26 et 27 permettent d'observer que pour les conditions de simulation testées, la différence relative entre les réflectances simulées dans la zone optimale (zone hachurée sur les graphiques) est de l'ordre de 5%, avec des valeurs de l'ordre de 10% dans les cas les plus extrêmes (comparaison entre aérosols marins et désertiques en luminance polarisée). Lorsque la comparaison est faite entre les différents aérosols marins testés (*Maritime Clean*, *Maritime Polluted*, *Maritime Tropical*), l'ordre de grandeur de la différence relative est de 2%. Cependant, cette erreur est proportionnelle à la quantité d'aérosols, ainsi, une erreur plus importante est attendue aux valeurs d'AOT les plus grandes. La différence relative entre les différents modèles d'aérosols marins testés est quant à elle de l'ordre de 1% qu'on soit en luminance totale ou polarisée. On pourrait supposer que dans la majorité des cas, considérer un modèle d'aérosol marin est suffisant pour estimer la réflectance aérosol au dessus du *glitter* dans la zone optimale. Des figures montrant des tests plus exhaustifs avec les valeurs d'AOT et de vitesse de vent de surface supplémentaires sont visibles en annexe.

2.4 Conclusion

Dans cette analyse de sensibilité aux aérosols, nous avons effectué des comparaisons en supposant la non-prise en compte de l'AOT dans nos simulations. L'utilisation de ce cas extrême nous a permis de comparer les reflectances obtenues avec différents modèles d'aérosols. Nous avons opté pour une simulation avec une valeur d'AOT (0.10) représentant la médiane des valeurs mesurées sur lesquelles la validation sera effectuée (cf. Figure 17) pour les comparaisons inter-modèles.

Le calcul de la différence relative sur la réflectance TOA en supposant un même modèle d'aérosol nous a montré que les erreurs attendues sont négligeables seulement si nous ne considérons pas du tout l'AOT et/ou si l'incertitude sur cette dernière est de l'ordre de 50 à 100%. Nous avons également noté des biais en moyenne supérieurs en luminance polarisée. Par la suite, nous avons comparé les erreurs attendues sur les réflectances en

supposant une erreur de modèle (utiliser un modèle différent / non approprié). Dans ce cas, nous avons observé que les différences ont des ordres de grandeur variant de 1 à 2% en moyenne pour les valeurs en luminance totale à 5 à 10% en luminance polarisée.

Sans grande surprise, ces tests ont montré qu'une bonne connaissance de l'AOT est nécessaire à la simulation de la réflexion *glitter*. Cependant, il est important de noter que les erreurs testées supposent une non-prise en compte de l'AOT, puis, des incertitudes de l'ordre de 100% et plus (0.05, 0.10, 0.20...). Il est raisonnable de supposer que les données d'AOT qui seront utilisées auront des incertitudes sur l'AOT largement inférieures aux différences testées, et donc supposer que les erreurs dues à de mauvaises représentation de l'AOT sont négligeables. Cependant, une erreur sur la mauvaise représentation du modèle d'aérosol sera non-négligeable dans la plupart des cas. Cette assertion est d'autant plus vraie en luminance polarisée. Il est également intéressant de noter que dans certaines géométries d'observation, des zones d'invariance à l'erreur de modélisation des aérosols (qu'elle soit en AOT ou au niveau du modèle même) existent, et coincident avec la zone d'invariance à la vitesse du vent de surface.

3 Sensibilité à la couleur de l'eau

3.1 Introduction

La concentration en chlorophylle-a est un paramètre géophysique important, listé parmi les *Essential Climate Variables* (ECV) (Bojinski et al., 2014; Mélin et al., 2016). Lors de l'étalonnage en vol d'un instrument observant l'atmosphère, il est impératif de bien caractériser la contribution à la luminance TOA provenant de la colonne d'eau, qui peut varier en fonction de ses propriétés de diffusion et d'absorption. Cette dernière affecte directement les restitutions des différents paramètres géophysiques tels que les propriétés des aérosols ou encore l'étalonnage utilisant la diffusion Rayleigh (de par sa contribution au signal total) (Hagolle et al., 1999; Loisel et al., 2008; Stramska and Stramski, 2005; Kay et al., 2009; Fougnie et al., 2010; Xu et al., 2016; Lin et al., 2016; Wang, 2016; Mélin et al.,

2016). La figure 28 montre la distribution des valeurs moyennes de chlorophylle-a dans les océans. Ces données proviennent des produits MODIS qui ont été utilisées pour la validation de la méthode d'étalonnage que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

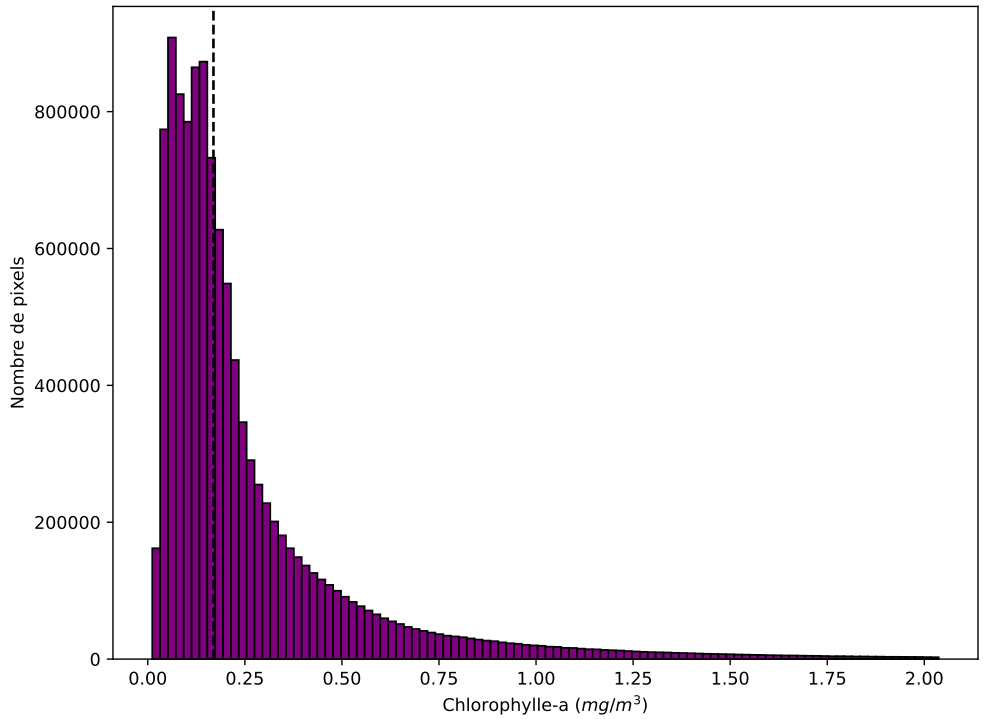


FIGURE 28 – Distribution des valeurs de chlorophylle-a obtenues en moyennant les données MODIS de 2006 à 2010. La ligne verticale en pointillés représente la médiane.

3.2 Méthodologie et discussion

Méthodologie

Pour ces tests, on sélectionne les longueurs d'onde centrales des bandes 3MI qui exhibent une sensibilité non-négligeable à la couleur de l'eau. Les bandes choisies sont celles centrées à 490, 555, et 670 nm. Les conditions de simulations sont un ciel clair, sans aérosols. On ne s'intéressera ici qu'à la réflectance totale. Les résultats des simulations sont montrés dans les figures 29 à 31.

On définit l'erreur relative sur la réflectance due à la présence de chlorophylle-a comme suit :

$$R_{chl} = \frac{I_{chl=0} - I_{chl}}{I_{chl=0}} \tag{20}$$

où :

— I_{chl} est la réflectance simulée avec une concentration de chlorophylle-a non-nulle.

— I_0 est la réflectance simulée pour une eau sans chlorophylle-a.

Les valeurs de concentration en chlorophylle-a choisie sont de 0.05, 0.15, 0.30, et 1.00 mg/m^3. Ces dernières représentent relativement bien les quantités de chlorophylle-a observées dans les scènes *glitter* que nous avons pu analyser.

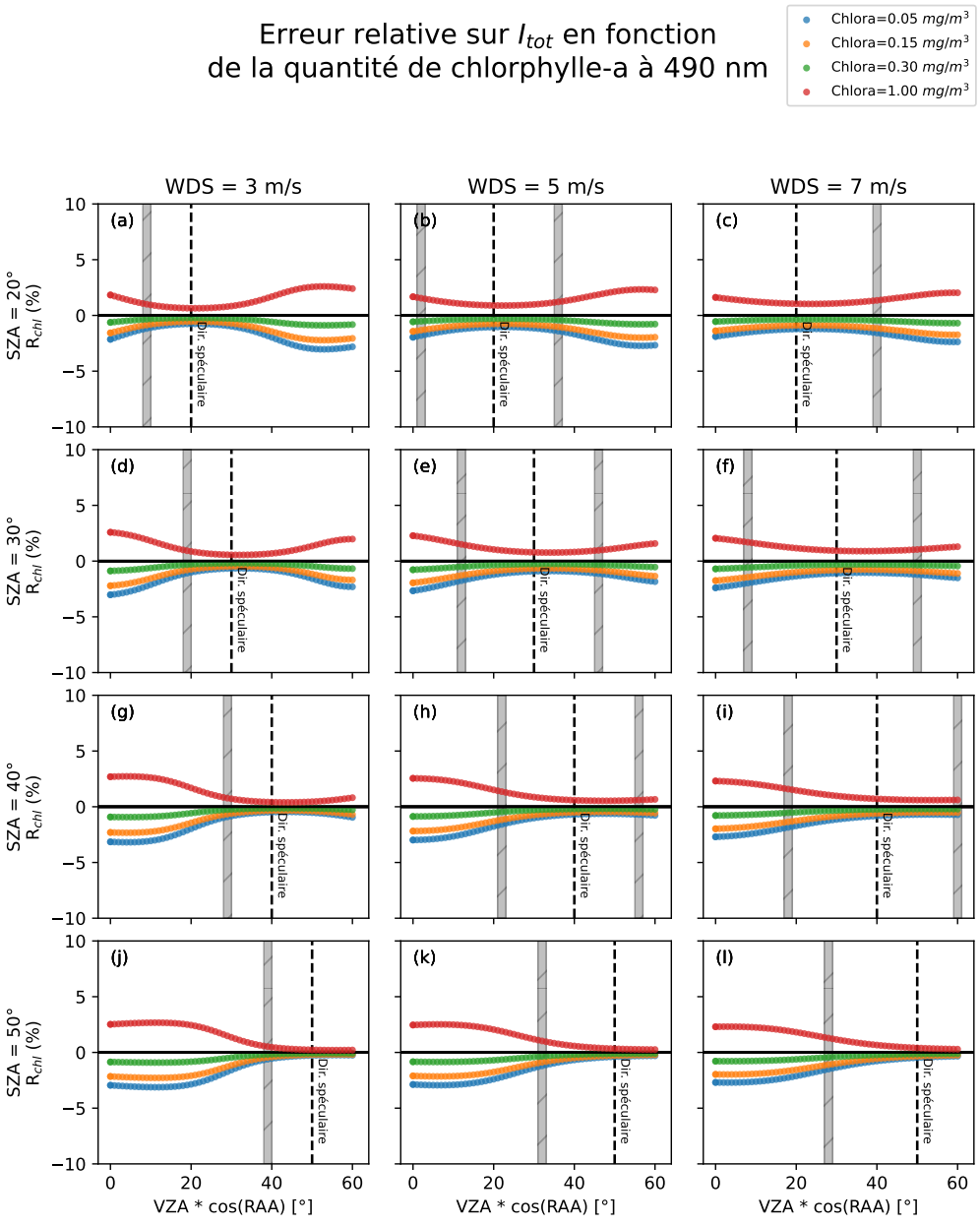


FIGURE 29 – Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 490 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

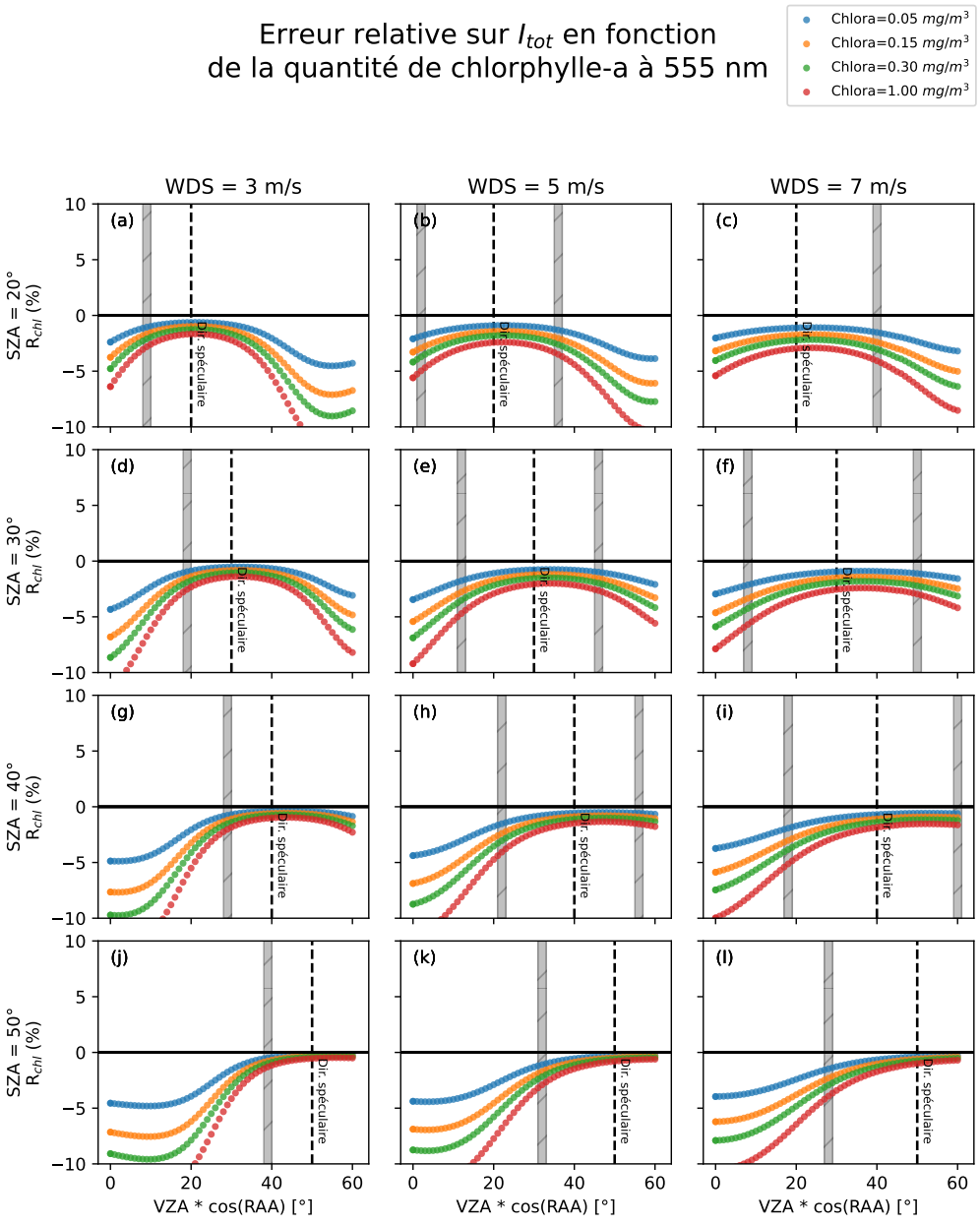


FIGURE 30 – Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 555 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

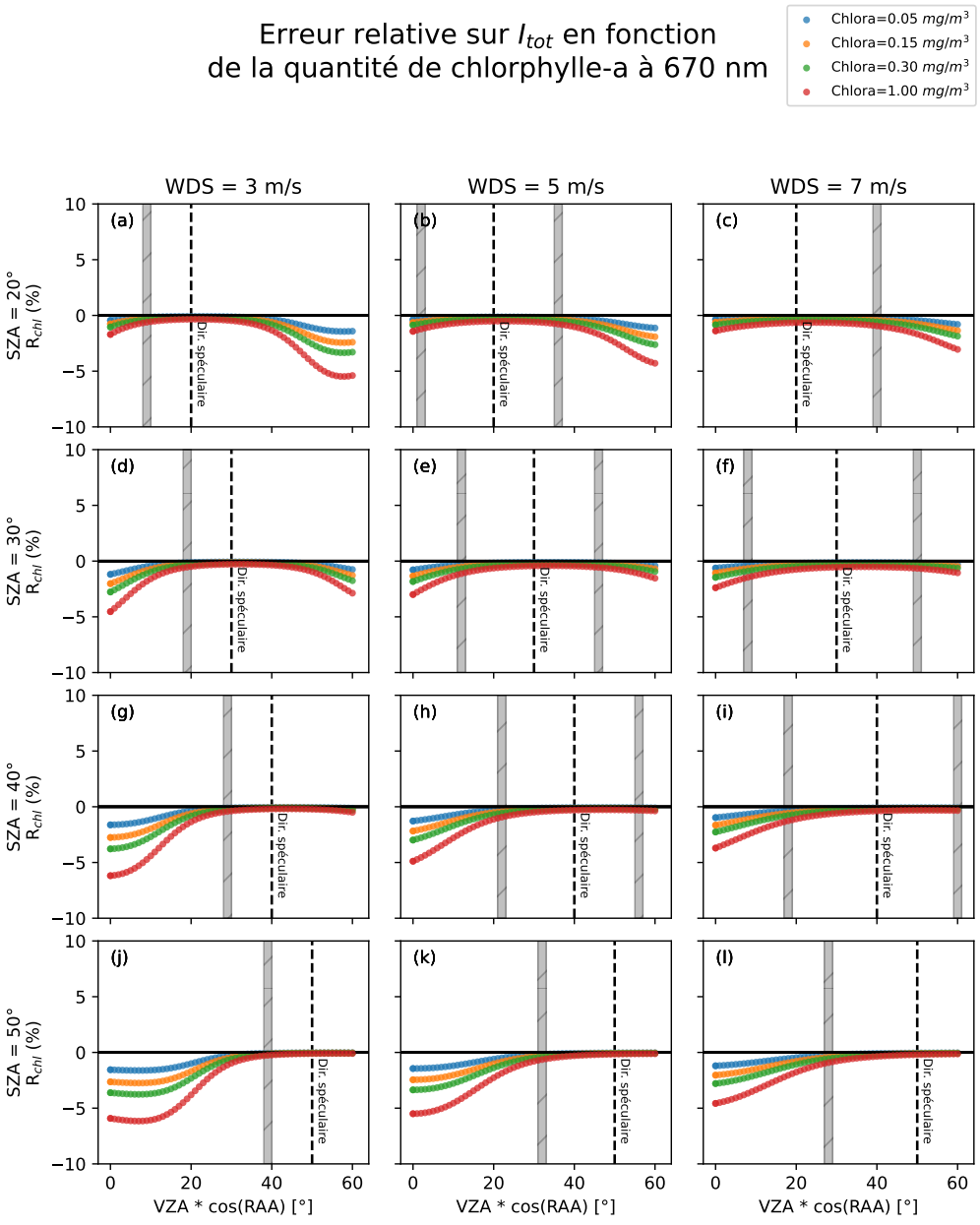


FIGURE 31 – Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 670 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion :

Comme précédemment, nous allons principalement commenter l'effet attendu dans

la zone d'invariance à la vitesse du vent (zones hachurées dans les figures).

On peut remarquer que pour toutes les valeurs de chlorophylle-a sauf pour la valeur de 1.00 g/cm^3, la différence relative est négative à 490 nm (figure 29). Pour 555 nm et 670 nm, la différence relative est toujours négative. Les différences relatives observées (en valeur absolue) dans la zone optimale varient entre 0.5 et 2% à 490 nm. À 555 nm, les différences sont les plus élevées, avec des valeurs qui varient entre 1 et 8%. À 670 nm les valeurs sont les plus faibles et on observe des différences relatives de l'ordre de 1% dans la zone optimale.

3.3 Conclusion

Les tests que nous avons effectués nous permettent d'ores et déjà de conclure sur l'importance de la connaissance de la quantité de chlorophylle-a pour l'estimation de la réflectance *glitter* dans l'optique de l'étalonnage en vol. On a pu observer que pour les longueurs d'ondes testées, des différences pouvant atteindre 8% sont tout à fait possible dans les cas les plus extrêmes. Cependant, il faut noter que les tests supposent un cas où la chlorophylle-a est complètement négligée (voir l'équation 20 pour la définition de R_{chl}). En réalité, les différences seront davantage de l'ordre du pour-cent en supposant une incertitude réaliste sur les valeurs de chlorophylle-a qui seront utilisées pour les simulations. De plus, il est important de noter que le *glitter* est une cible spectralement neutre qui peut être exploitée pour l'étalonnage au delà du spectre visible. En effet, observer le *glitter* à 865 nm ou encore en utilisant les bandes 3MI à 1650 et 2130 nm, on peut s'affranchir de la connaissance du contenu en chlorophylle-a car l'effet de la couleur de l'eau devient inexistant pour les applications que nous ciblons.

4 Sensibilité dans le SWIR à la salinité de l'eau

4.1 Introduction

Les niveaux de salinité des océans dépendent principalement des taux d'évaporation et de précipitation. Dans les zones côtières, on aura un effet conséquent dû aux sources fleuves et rivières. Ainsi, les taux de salinité varient grandement en fonction de la localisation géographique. On notera ainsi des taux de salinité relativement faibles au niveau des zones équatoriales (dus aux fortes précipitations). Au niveau des tropiques, la salinité est alors maximale et ce étant dû aux faibles quantités de précipitations combinées à un fort taux d'évaporation. Pour les zones polaires, la salinité sera minimale en raison de la fonte des glaciers, source majeure d'eau douce. La figure 32 montre le produit des données L2 de SMOS, et permet de rapidement se faire une idée sur la distribution des taux de salinité des surfaces océaniques.

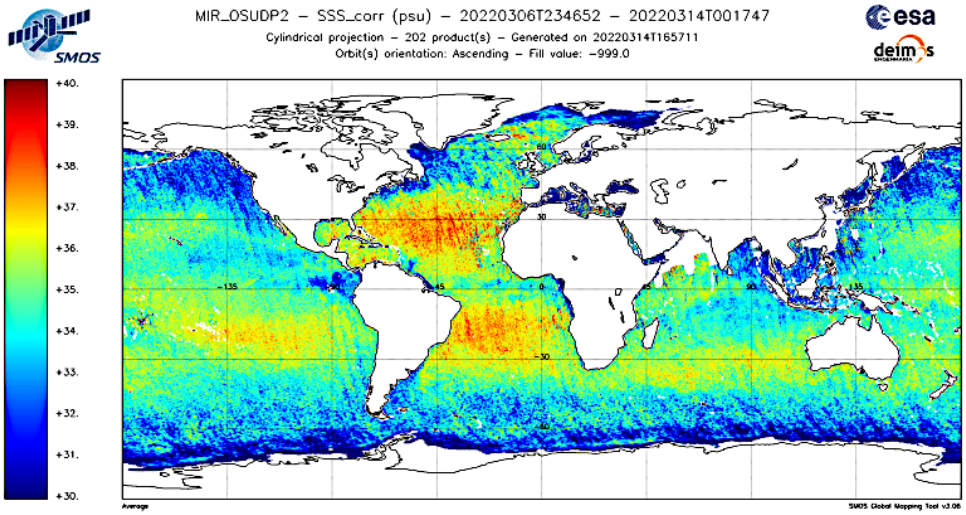


FIGURE 32 – Produit des données L2 de SMOS (Source : ESA)

Dans les tests que nous allons présenter, la salinité de référence est de 34.3 ‰, que l'on considère comme étant représentative de la plupart des étendues d'eaux salées (Sverdrup et al., 1944). Entre 0.25 µm et 4 µm, il n'y a pas de variation du coefficient d'extinction. La variation de l'indice de réfraction est alors une fonction linéaire de la salinité de l'eau, avec

une correction de 0.006 (Mclellan, 1965). Dans 6SV et ARTDECO, l'indice de réfraction de l'eau est alors modélisé comme suit :

$$\begin{cases} n_{rf} = n_r + n_{rc} * \frac{xsal}{34.3} \\ n_{if} = n_i + n_{ic} * \frac{xsal}{34.3} \end{cases} \tag{21}$$

où :

— n_{rf} est l'indice de réfraction réel ;

— n_r est l'indice de réfraction réel avant correction ;

— n_{rc} est la correction apportée à l'indice de réfraction réel Ici : $n_{rc} = 0.006$;

— n_{if} est l'indice de réfraction imaginaire ;

— n_i est l'indice de réfraction imaginaire avant correction ;

— n_{ic} est la correction apportée à l'indice de réfraction ; imaginaire. Ici : $n_{ic} = 0$ (aucune correction entre 0.25 µm et 4 µm) ;

— $xsal$ est le taux de salinité de l'eau en g/Kg ou partie par millier (*ppt : part per thousand*).

4.2 Méthodologie et discussion

Méthodologie

On définit l'erreur relative sur la réflectance aux variations de la salinité de l'eau comme suit :

$$R_{xsal} = \frac{I_{xsal=34.3} - I_{xsal}}{I_{xsal=34.3}} \tag{22}$$

où :

— I_{xsal} est la réflectance simulée avec une salinité de $xsal$ ppt.

On calcule donc l'erreur relative par rapport à la salinité de référence de 34.3 ppt donnée par Sverdrup (Sverdrup et al., 1944). Les résultats sont montrés dans les figures 33 à 36 pour la luminance totale à 490, 865, 1650, et 2130 nm respectivement.

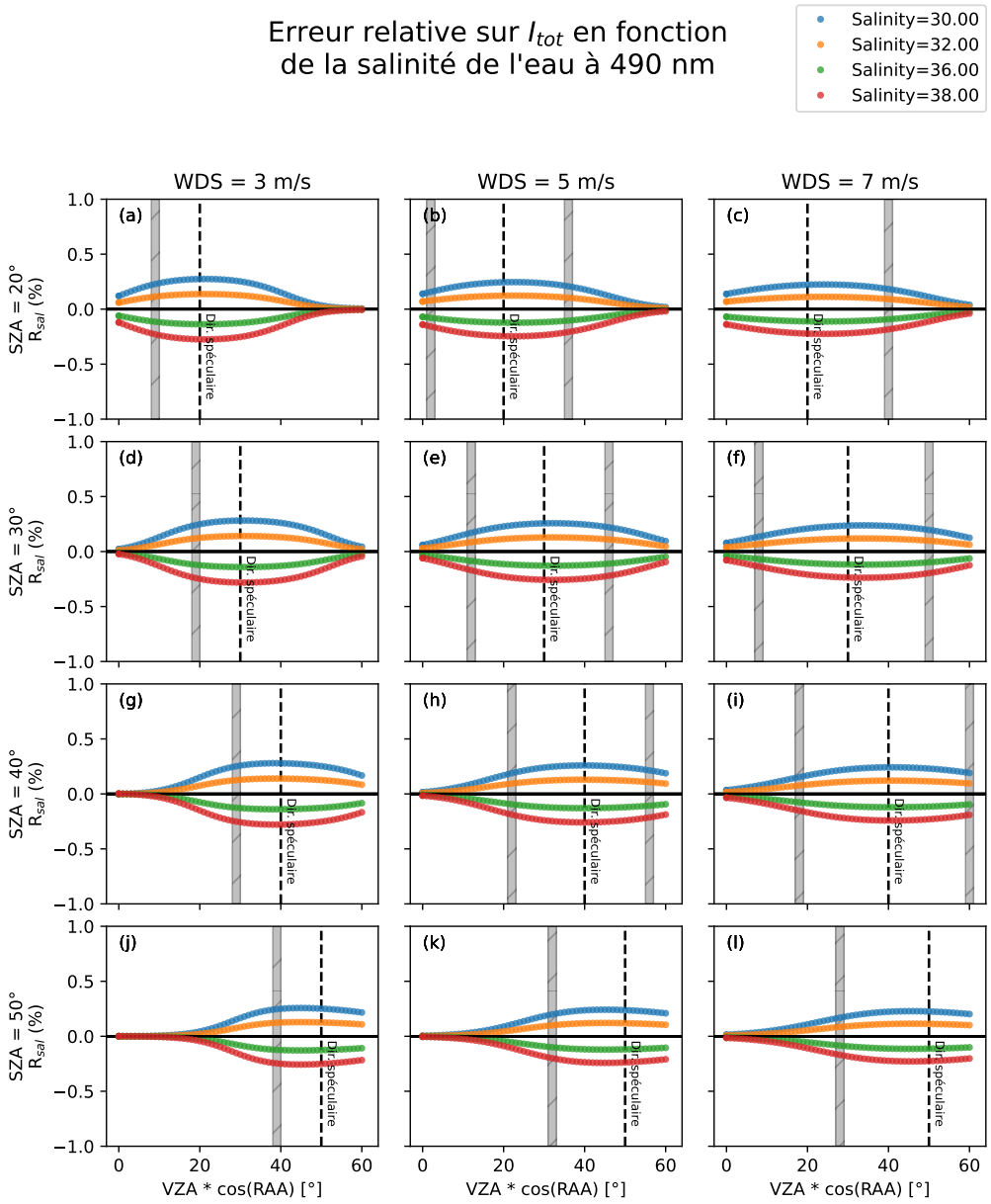


FIGURE 33 – Sensibilité à la salinité de l'eau à 490 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

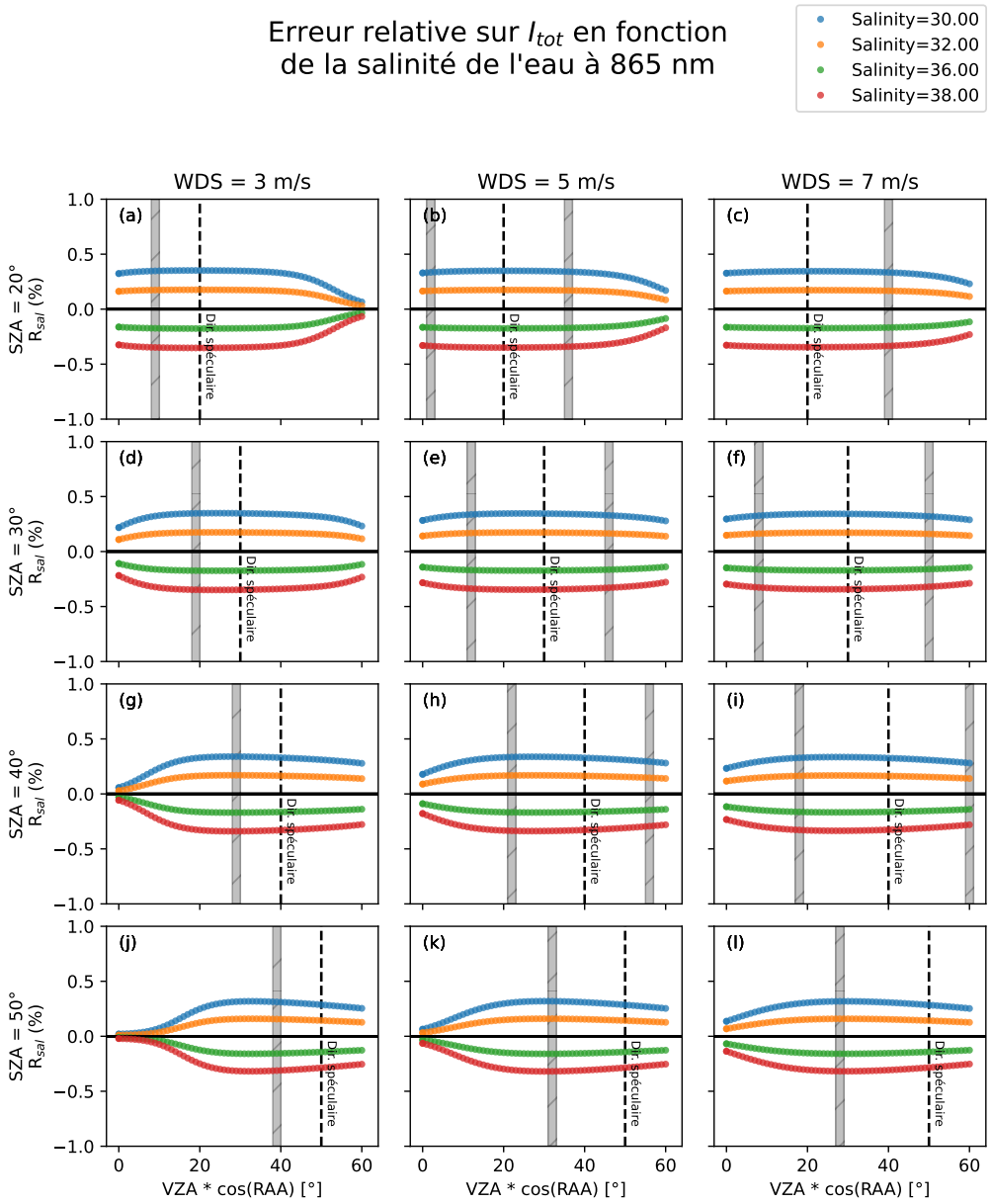


FIGURE 34 – Sensibilité à la salinité de l'eau à 865 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

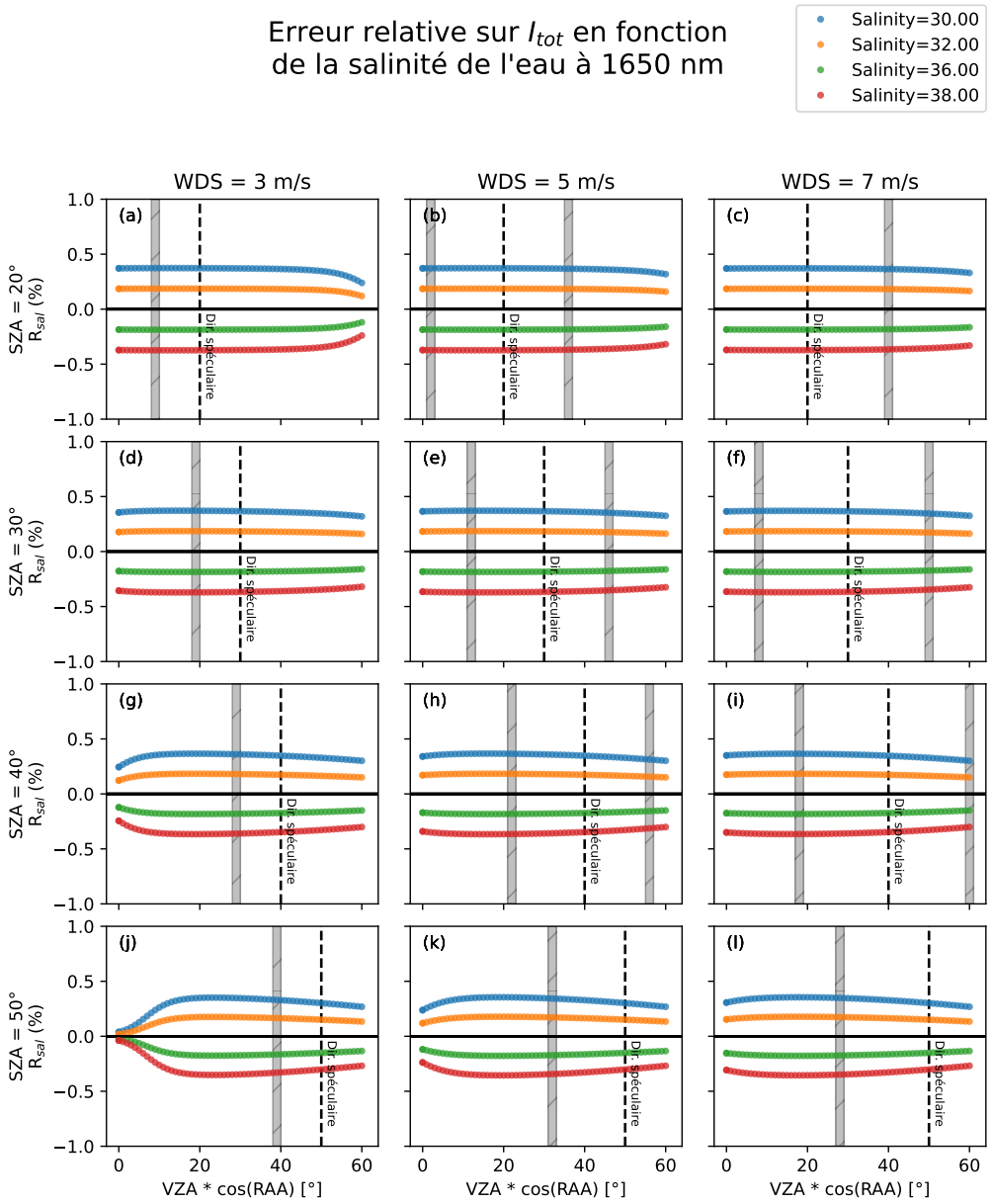


FIGURE 35 – Sensibilité à la salinité de l'eau à 1650 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

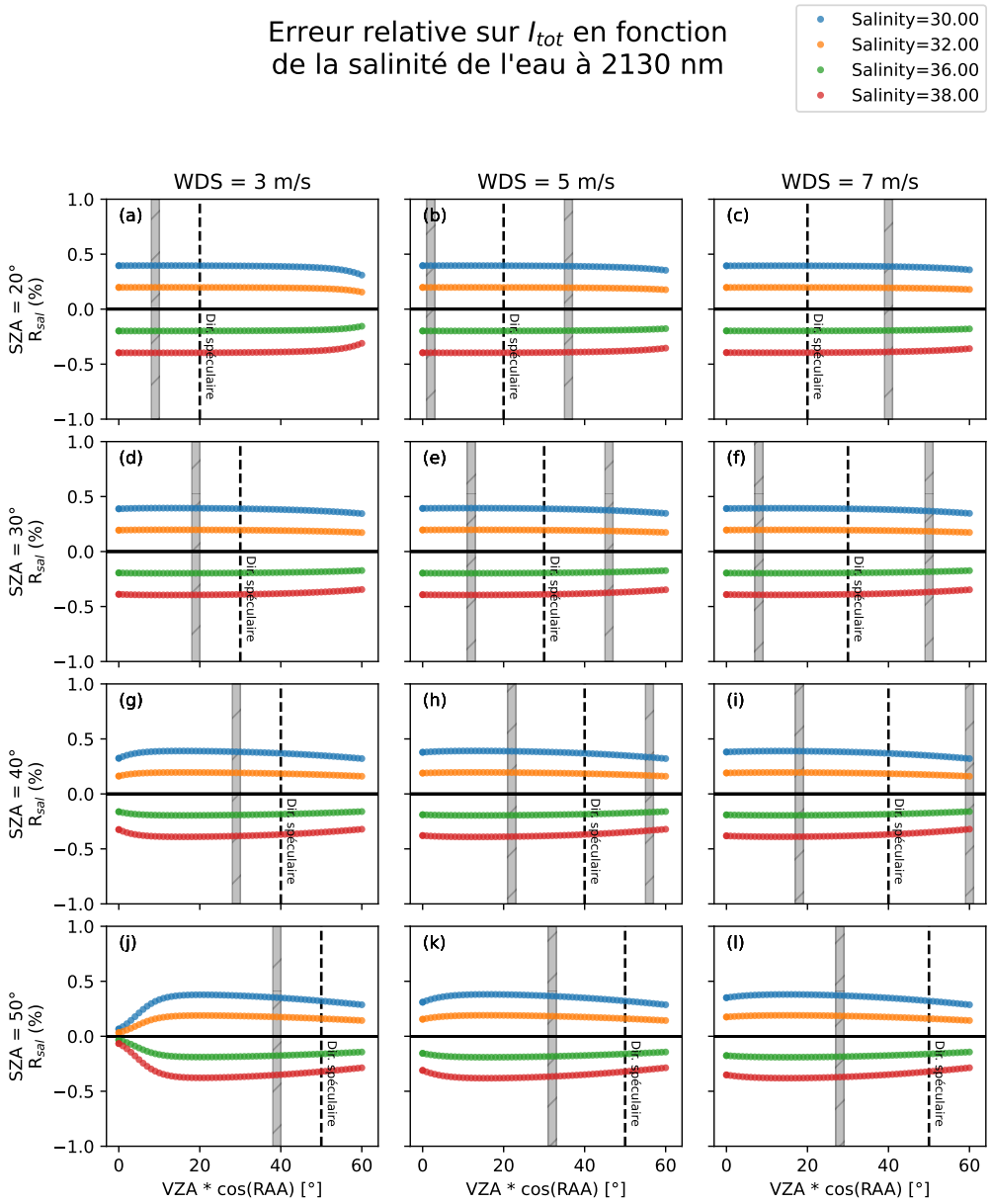


FIGURE 36 – Sensibilité à la salinité de l'eau à 2130 nm en réflectance totale. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec le cosinus de l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_ϕ (cf. équation 20) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

Discussion

L'effet de la variation de l'indice de réfraction de l'eau telle que modélisée par l'équa-

tion 21 peut être observé dans les figures 33 à 36. À 490 nm, l'effet reste non-négligeable avec des différences relatives de l'ordre de 0.25% pour les cas les plus extrêmes. Cette différence augmente avec la longueur d'onde et on observe ainsi des différences maximales à 2130 nm pouvant être de l'ordre de 0.50%.

4.3 Conclusion

Les résultats des tests impliquant les variations de la salinité de l'eau montrent qu'il devient nécessaire de considérer la salinité de l'eau pour la simulation du *glitter* lorsque l'incertitude sur cette dernière devient de l'ordre de 10% (34.3 ± 3.43 ppm) ou plus et ce, tout particulièrement pour les longueurs d'onde du SWIR. Des erreurs de l'ordre de 0.5% sont non-négligeables dans l'optique de l'étalonnage où on cible des simulations de la luminance TOA avec une justesse de 2% ou mieux. Cependant, dans le cas où le nombre de points sélectionnés pour l'étalonnage soit suffisamment important et que ces derniers soient suffisamment bien répartis autour du globe, on peut alors supposer que l'effet moyen de la variation de salinité soit grandement réduit. Il reste cependant préférable de considérer des valeurs spécifiques au cas par cas quand cela reste possible, notamment pour les zones où les valeurs de la salinité ont tendance à être grandement différentes de la moyenne (exemple : les pôles). Nous préconiserons ainsi l'utilisation de la climatologie de concentration en salinité pour notre application.

V CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré en détail la sensibilité de la réflectance du glitter à différents paramètres géophysiques, révélant l'impact de ces variables sur les mesures de réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA). Les résultats démontrent que la vitesse et la direction du vent, les types et quantités d'aérosols, la couleur de l'eau et l'indice de réfraction, influencent de manière significative les observations du glitter.

La sensibilité aux paramètres du vent est particulièrement marquante, se montrant

comme le paramètre principal contribuant à l'incertitude globable sur la simulation du *glitter*. Par ailleurs, nous avons constaté que les aérosols et la couleur de l'eau jouent un rôle crucial dans la variation des mesures de réflectance. Les aérosols peuvent altérer la lumière réfléchie et diffusée de manière significative, et nous avons observés que les effets étaient encore plus remarquables en luminance polarisée. Une erreur de choix du modèle d'aérosol sera probablement la source d'erreur principale du côté des aérosols - nous supposons en effet que les erreurs sur l'AOT ne seront pas suffisamment importantes pour altérer de manière significative les simulations si les modèles choisis sont représentatifs des observations. Quant à l'effet de la réflectance de la colonne d'eau, influencée par le contenu en chlorophylle-a, les effets, bien que présents, ne devraient pas être un contributeur majeur (relativement à la vitesse du vent et les aérosols). Une autre observation importante que nous avons notée concerne l'indice de réfraction de l'eau, et son effet dans le spectre infrarouge (SWIR). D'après nos analyses de sensibilité, son effet ne devra pas être négligé dans cette gamme spectrale pour les situations où les zones observées sont connues pour avoir des valeurs de salinités s'éloignant fortement de la moyenne globale. En moyennant au niveau global, l'effet devrait être minime, cependant, une bonne intégration de la salinité dans les paramètres de simulations reste préférable.

Chapitre V

Méthode d'étalonnage absolu utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan

I INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on décrit la méthode d'étalonnage absolu sur *glitter* que nous avons développée. Nous présentons ainsi les principales hypothèses de cette dernière, les critères de sélection, ainsi qu'une méthode d'application aux mesures *glitter*. Les chapitres précédents permettent déjà d'illustrer plusieurs propriétés de la réflexion spéculaire qui en font une cible idéale pour l'étalonnage en vol. En effet, les propriétés telles que la neutralité spectrale, les taux de polarisation élevés, ou encore la possibilité d'avoir des niveaux d'intensité suffisants quelle que soit la longueur d'onde observée dans le spectre solaire en ont fait une cible relativement utilisée pour des méthodes d'étalonnage interbande (Hagolle et al., 1999, 2004; Luderer et al., 2005). Cependant, la sensibilité de la réflectance aux différents paramètres de surface, et principalement la vitesse du vent, en font également une cible difficile à utiliser pour de l'étalonnage absolu. Les travaux effectués durant cette thèse ont principalement été axés sur l'élaboration d'une approche permettant de simuler la réflexion spéculaire spéculaire avec une justesse de l'ordre de 2%. Bien que ces derniers soient dans l'optique d'une application à 3MI, atteindre l'objectif précédemment mentionné ferait également de cette méthode une candidate idéale pour le suivi de l'étalonnage d'une multitude d'instruments observant la Terre depuis l'espace.

II MÉTHODE D'ÉTALONNAGE

1 Principe

1.1 Existence d'une zone d'invariance à la vitesse du vent

Le modèle proposé dans les travaux de Cox et Munk (Cox and Munk, 1954, 1955, 1956) nous montre qu'il est possible de simuler les observations *glitter* en considérant les contributions de chaque vague à la réflectance totale. La distribution des pentes des vagues utilisée est alors une gaussienne. L'hypothèse de base de l'approche que nous proposons repose sur le fait qu'il existe une zone où la variation de la réflectance du *glitter*

est minimale. Considérons une incertitude σ en m/s sur une vitesse du vent donnée. On peut alors simuler une situation de réflectance spéculaire aux vitesse du vent de surface de v, $v+\sigma$ et $v-\sigma$.

Prenons comme exemple le cas d'étude suivant :

— Une observation à 865 nm ;

— Une vitesse du vent de surface de 5 m/s ;

— Une incertitude $\sigma = 2m/s$;

— Un azimut du vent de 0 ° ;

— Un angle zénithal solaire à 20 ° ;

— Ciel clair, sans aérosols.

La figure 37 montre la simulation effectuée dans le plan principal avec les conditions précédemment mentionnées.

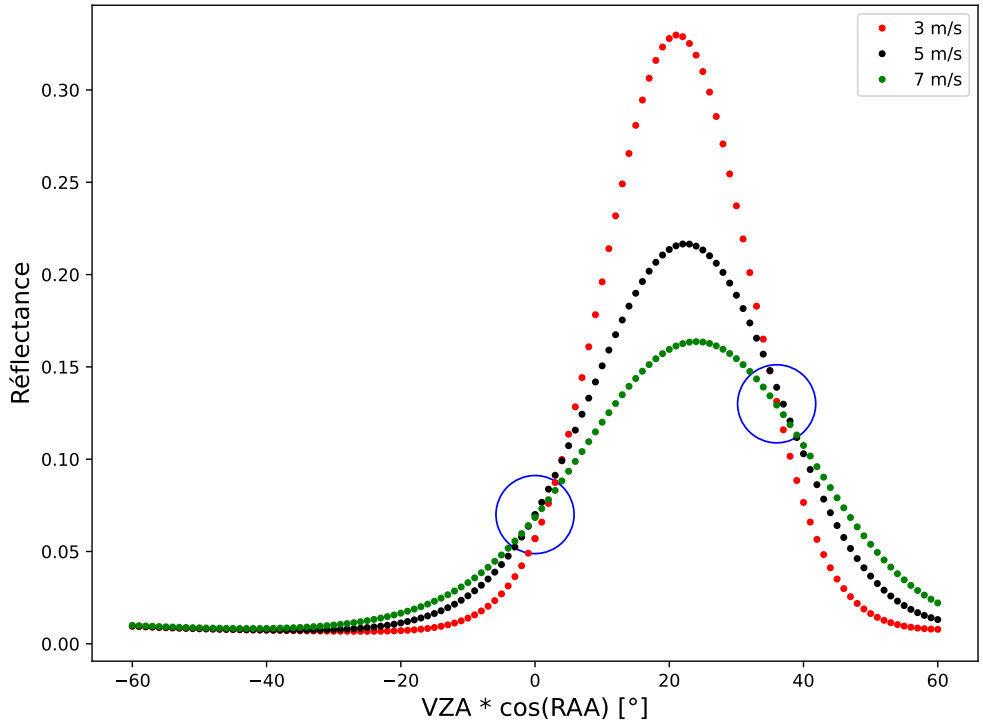


FIGURE 37 – Réflectance spéculaire dans le plan principal. Deux zones où les réflectances sont proches pour des vitesses du vent de 3, 5, et 7 m/s sont observables dans le plan principal ci-contre (cercles bleus).

L'idée de base est relativement simple : pour chaque géométrie solaire, il existera une zone telle que montrée dans la figure 37. Il faudra donc privilégier les points observés dans ces zones pour effectuer l'étalonnage absolu sur le *glitter*. L'objectif est de minimiser l'effet de la vitesse du vent sur la réflectance TOA en se concentrant sur ces géométries où la différence entre les simulations est minimale (pour des vitesses du vent différentes). Une représentation en diagramme polaire permet de visualiser de manière encore plus intuitive l'approche qui est proposée. La figure 38 montre des simulations effectuées dans les mêmes conditions que la figure 37 avec pour seule différence, le fait que les valeurs d'azimut relatif ont été simulées dans l'intervalle de 0 à 360 degrés. On effectue trois simulations, à 3, 5, et 7 m/s comme précédemment (sous figures (a), (b), et (c), respectivement). La sous-figure (d) est obtenue en calculant l'erreur relative R_{abc} telle que :

$$R_{abc} = \frac{I_a - I_c}{I_b} \tag{23}$$

où : I_a, I_b, I_c sont les réflectances simulées pour des vitesses du vent de surface de a, b et c, respectivement (ici, les figures (a), (b), et (c), pour 3, 5, et 7 m/s, respectivement). Les vitesses du vent a, b, et c sont reliées comme suit :

$$\begin{cases} a = b - \sigma \\ c = b + \sigma \end{cases} \tag{24}$$

où : σ est l'incertitude sur la vitesse du vent de surface. Dans le cas étudié ci-contre, $\sigma = 2 m/s$.

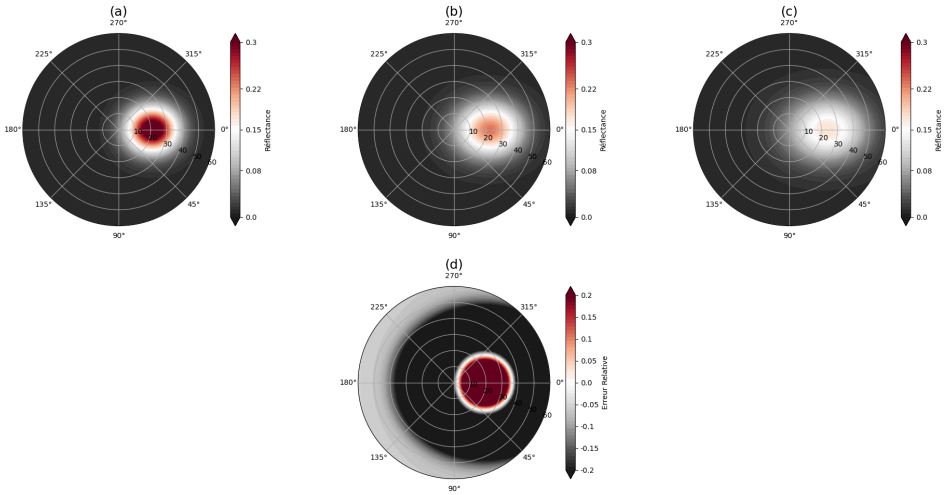


FIGURE 38 – Réflectance spéculaire représentée en diagramme polaire. Les sous-figures (a), (b), et (c) représentent les simulations à 3, 5, et 7 m/s, respectivement. La sous-figure (d) représente l'erreur relative R_{abc} telle que définie par l'équation 23.

On observe que la différence relative (figure 38-d) passe par deux minima pour chaque plan passant par le point spéculaire (le tout formant l'anneau en blanc délimitant une zone de différence relative minimale). Ces points correspondent aux intersections des valeurs de la réflectance observées dans la figure 37 de chaque côté du point spéculaire.

1.2 Justification d'une sélection purement géométrique des pixels

L'un des avantages principaux de l'approche proposée est qu'il n'est pas nécessaire de définir la zone dite d'invariance, ou zone optimale, pour chaque longueur d'onde. Pour illustrer cela, prenons le temps d'étudier la figure figure 39. Dans cette dernière, nous avons représenté la valeur absolue de l'erreur relative R_{abc} (cf. équation 23) dans le plan principal, pour différentes longueurs d'ondes (490, 670, 865, et 1650 nm). Les conditions de simulation sont les mêmes que pour la figure 38.

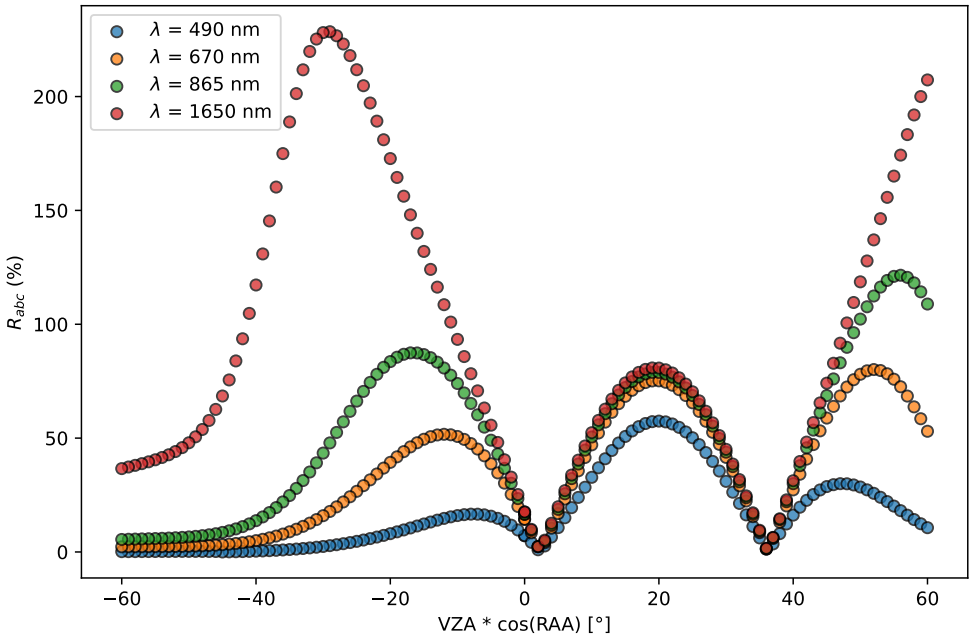


FIGURE 39 – Erreur relative $|R_{abc}|$ dans le plan principal.

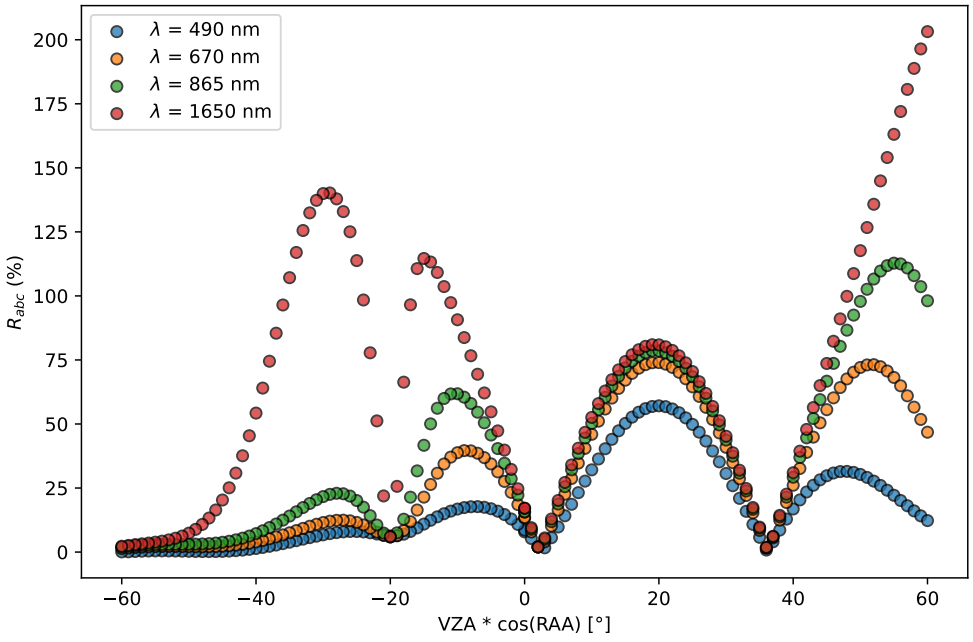


FIGURE 40 – Erreur relative $|R_{abc}|$ dans le plan principal en luminance polarisée.

L'analyse de la figure 39 nous permet de noter que les minima de l'erreur relative se situent dans la même zone géométrique. De plus, on peut noter à partir de la figure 40

que la zone est également la même en luminance polarisée. On peut donc déduire qu'il n'est pas nécessaire de déterminer la zone optimale (la moins sensible à la vitesse du vent) à toutes les longueurs d'onde ni de manière indépendante pour la luminance totale ou polarisée. Ainsi, pour les différences relatives inférieures ou égales à 2%, cette zone est la même, quelle que soit la longueur d'onde ou l'état de polarisation de la lumière.

2 Critères de sélection

Bien que nous avons pu montrer que dans des conditions idéales, il suffit simplement de sélectionner les points minimisant la valeur absolue de la différence relative telle que définie par l'équation 23, en pratique, il existe de nombreux paramètres rendant la tâche plus compliquée. On tentera de se focaliser sur les principaux paramètres, dont nous tentons de minimiser l'impact sur la qualité des mesures. Nous avons pu identifier aux travers des différentes études de sensibilités présentées dans le chapitre précédent un certain nombre de paramètre à considérer. De manière générale, nous imposons des conditions sur les vitesses du vent "réelles" (e.g. ECMWF - considérées vraies), sur les valeurs de l'AOT, ainsi que sur la couverture nuageuse. Nous citerons également, en conclusion, des paramètres supplémentaires qui pourraient potentiellement améliorer la qualité des pixels sélectionnés. Cependant, nous ne citerons ici que les paramètres qui ont été utilisés pour l'étude des mesures POLDER/PARASOL qui sera présentée par la suite.

2.1 Vitesse du vent

L'une des conditions principales consiste à limiter l'étendue des valeurs des vitesses du vent observées. On impose donc la condition suivante sur la vitesse du vent (unité : m/s) :

$$\boxed{3 \leq V_{vent} \leq 7} \tag{25}$$

Les raisons principales pour justifier ces limites sont :

— Une limite inférieure permet de s'assurer que le calcul de R_{abc} (cf. équation 23) soit possible. Nous considérons une incertitude par défaut $\sigma = 2m/s$ ce qui nous mène à des calculs où les valeurs de la vitesse du vent sera toujours supérieure ou égale à 1 m/s (MIN ($v_0, v_1, ...v_n$) ≥ 1) ;

— De plus, les vitesses du vent inférieures à 2 m/s se rapprochent davantage de la réflexion spéculaire théorique (où la surface se comporte comme un miroir) ; ces situations peuvent être délicates à simuler à cause de la nature très directionnelle du phénomène. On laisse donc une marge de sécurité en s'affranchissant de ces situations ;

— En ce qui concerne la limite supérieure, la raison principale réside dans le fait que les vitesses du vent supérieures à 7 m/s exhibent un effet non négligeable de l'écume de mer (Koepke, 1984; Moore et al., 2000; Albert et al., 2016). De plus, les réflectances simulées dans la zone pouvant être définie comme optimale deviennent de plus en plus faibles, le tout menant à des erreurs plus importantes sur la réflectance restituée.

2.2 AOT

La valeur de l'AOT est un paramètre dont la connaissance est importante pour la restitution des propriétés de l'atmosphère et ce, pour diverses applications. Dans le cas de l'algorithme d'étalonnage que nous proposons, il est principalement important d'éviter les valeurs élevée d'AOT. Nous considérerons élevée, toute valeur de l'AOT à 550 nm supérieure à 0.20. On impose donc la condition suivante :

$$\boxed{\text{AOT}_{550nm} \leq 0.20} \tag{26}$$

2.3 Couverture/fraction nuageuse

Lorsque l'atmosphère est observée depuis l'espace, les nuages recouvrent 70% de la surface. Les mesures effectuées par les instruments contiennent donc souvent des scènes

nuageuse. Pour le cas où l'observation du *glitter* est faite dans une optique d'étalonnage, les pixels nuageux sont bien évidemment à éviter. L'une des principales difficultés est qu'il ne suffit pas seulement de filtrer les pixels nuageux mais également de minimiser la "contamination" des pixels voisins. En effet, un nuage peut avoir un effet sur les pixels entourant une zone nuageuse même si ces derniers sont en théorie des pixels clairs (i.e. non nuageux). Parmi les effets, on peut noter l'effet d'ombrage, où l'ombre d'un nuage va venir modifier la réflectance (en l'occurrence, celle du *glitter*) observée en la diminuant. On peut également citer l'effet de la lumière réfléchie par le sommet du nuage qui vient s'ajouter à celle réfléchie par la surface. Ainsi, la condition sur le paramètre de la couverture/fraction nuageuse doit prendre en considération la contribution indirecte de la présence des nuages à proximité des pixels d'intérêt. À cet effet, l'approche choisie consiste à définir une boîte de 9×9 pixels dont le pixel central est le pixel d'intérêt (à simuler). Ce dernier ne sera alors sélectionné que si la boîte de 81 pixels est considérée comme étant un *ciel clair*. Soit x_{nm} un potentiel pixel d'intérêt pour l'étalonnage situé aux coordonnées (n, m) dans la matrice des mesures, et $F_{n,m}$ la valeur du *flag* ou drapeau/fanion (pouvant prendre la valeur 0 ou 1 ; 1 étant un pixel nuageux) correspondante. On sélectionne alors le pixel x_{nm} si et seulement si :

$$\boxed{\forall i \in \{n-1, n+1\} \text{ et } \forall j \in \{m-1, m+1\}\, F_{i,j} = 0} \tag{27}$$

On suppose ici que $n \pm 1$ et $m \pm 1$ restent à l'intérieur de la matrice des mesures. Si une boîte de 9×9 pixels ne peut être définie, alors le pixel x_{nm} n'est pas sélectionné.

2.4 Simulation avec le modèle de Cox & Munk

Tout comme nous l'avons précédemment défini dans l'équation 23, nous calculons l'erreur relative sur laquelle nous imposons une condition. L'objectif pour la mission 3MI étant de 2% sur la justesse des mesures (ce qui coincide également avec le niveau de différence relative permettant de sélectionner les pixels indépendamment de λ et/ou

I, I_p - voir figures 39 et 40), nous imposons donc que la valeur de la différence relative soit inférieure ou égale à cette valeur, pour l'incertitude donnée sur la vitesse du vent. Dans notre cas, l'incertitude étant de 2 m/s, on sélectionne donc les points observés dans une géométrie telle que les luminances simulées via le modèle de Cox & Munk respectent :

$$\frac{|I_{v-\sigma} - I_v|}{I_v} \leq 0.02 \tag{28a}$$

$$\frac{|I_v - I_{v+\sigma}|}{I_v} \leq 0.02 \tag{28b}$$

où :

— I_v est la réflectance simulée pour une vitesse du vent v ;

— $I_{v\pm\sigma}$ est la réflectance simulée pour une vitesse du vent de $v \pm \sigma$ où σ est l'incertitude sur la vitesse du vent que l'on se fixe pour définir la zone optimale.

On peut alors définir la condition en effectuant la somme entre 28a et 28b ce qui donne :

$$\boxed{\frac{|I_{v-\sigma} - I_{v+\sigma}|}{I_v} \leq 0.04} \tag{29}$$

où* :

$$\boxed{\frac{|I_{v-\sigma} - I_{v+\sigma}|}{2I_v} \leq 0.02} \tag{30}$$

*N. B. : Le passage de l'équation 29 à 30 suppose une variation monotone de la réflectance I_v en fonction de la vitesse du vent. Cependant, ceci n'étant pas le cas, cette hypothèse est relativement forte, et implique donc des une variations non-négligeables de la réflectance dans la zone géométriques que l'on souhaite sélectionner. La sous-section suivante décrit cela plus en détail.

3 Effet de la non-monotonie de la réflectance TOA autour de la direction spéculaire

Comme mentionné dans la précédente sous-section, l'hypothèse de base que nous avons prise comme critère de sélection des directions d'observation optimales du *glitter* (c.-à-d. où la sensibilité à la vitesse du vent de surface est faible) est en réalité une hypothèse forte sur la monotonie de la variation de la réflectance TOA au dessus du *glitter* en fonction de la vitesse du vent de surface.

L'attention du lecteur est donc attirée sur le fait que les résultats qui seront présentés dans cette thèse ont été obtenus avec ce critère de sélection initial qui s'est avéré par la suite ne pas être optimal en terme d'estimation de l'erreur attendue.

Cependant, il est important de noter que l'idée de base portant sur la présence d'une zone de faible sensibilité à la vitesse du vent de surface reste valide, et en particulier, la sélection de la zone de faible sensibilité n'est que marginalement impactée par ce changement. Pour illustrer cela, introduisons la figure 41.

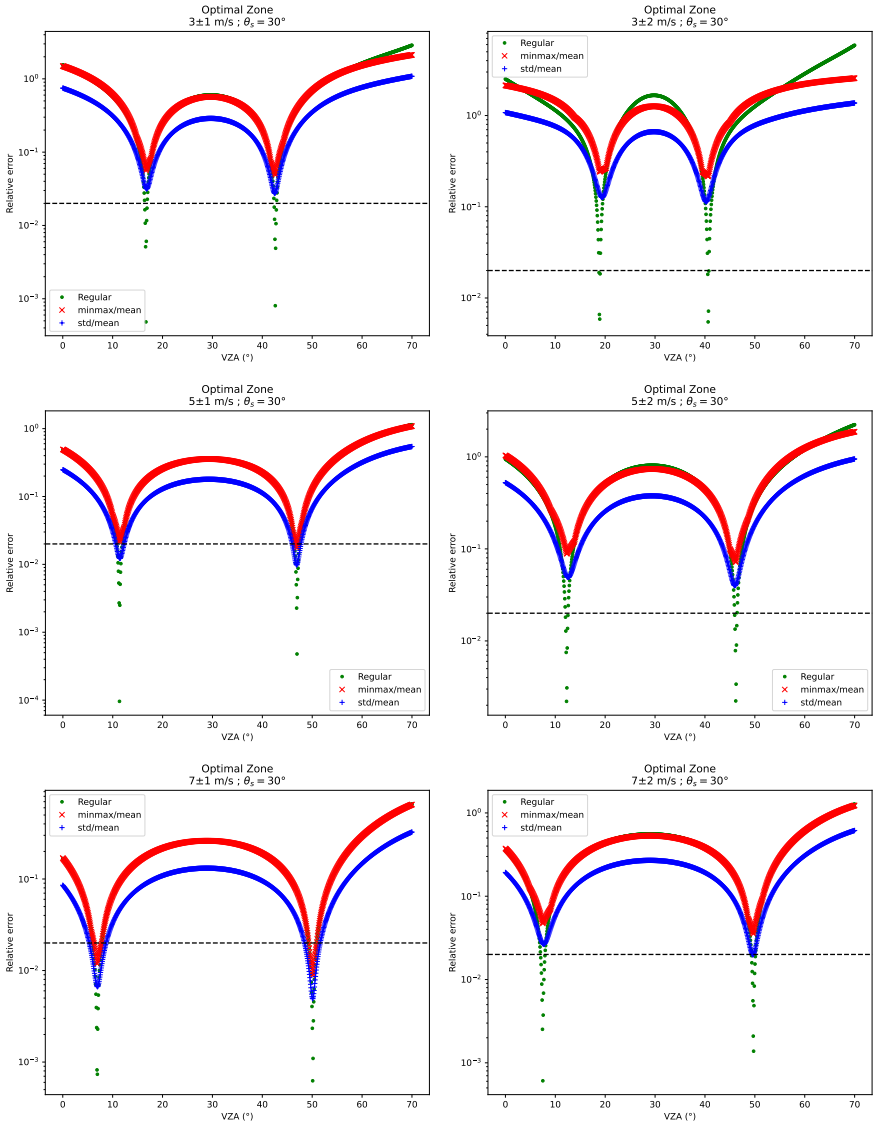


FIGURE 41 – Réflectance spéculaire dans le plan principal. En axe des abscisses : l'angle zénithal de visée. En axe des ordonnées : la valeur de la différence relative en échelle logarithmique ; la ligne horizontale en pointillés dénote la valeur 2 %. De gauche à droite : définition de la zone géométrique pour 1 m/s et 2 m/s d'incertitude sur la vitesse du vent, respectivement. De haut en bas : la vitesse de vent pour laquelle on définit la zone, ici de 3, 5, et 7 m/s, respectivement. L'angle zénithal solaire est de 30 degrés.

Avant de commenter les figures, prenons le soin de définir les variations représentées. Le graphe en vert dénoté par *"Regular"* dans la légende de la figure représente la différence relative calculée avec le critère de sélection envisagé initialement et supposant une variation monotone de I_v (tel que représenté par l'équation 30). Quant aux courbes en

rouge et en bleu, elles dénotent les variations avec des critères de sélections ayant pour but de mieux prendre en compte la non-monotonie de la variation de la réflectance TOA.

On définit donc le critère dénoté *minmax/mean* (graphe en rouge) :

$$\boxed{R_{\frac{minmax}{mean}} = \frac{|MAX(I_{v-\sigma}, I_v, I_{v+\sigma}) - MIN(I_{v-\sigma}, I_v, I_{v+\sigma})|}{MOYENNE(I_{v-\sigma}, I_v, I_{v+\sigma})}} \tag{31}$$

Ainsi que le critère *std/mean* (graphe en bleu)

$$\boxed{R_{\frac{std}{mean}} = \frac{\text{É}CART - TYPE(I_{v-\sigma}, I_v, I_{v+\sigma})}{MOYENNE(I_{v-\sigma}, I_v, I_{v+\sigma})}} \tag{32}$$

On note ici trois observations importantes :

— La non-monotonie de la variation de la réflectance TOA du *glitter* n'impacte pas la localisation de la zone géométrique des zones de faible sensibilité à la vitesse du vent ;

— L'erreur attendue dans la dite zone est systématiquement supérieure à ce à quoi on pourrait s'attendre avec un critère de sélection supposant une variation monotone de I_v ;

— La nature de la variation non-monotone de I_v fait que l'incertitude sur la vitesse du vent initialement proposée pour définir une zone de faible sensibilité (2 m/s) est trop élevée pour atteindre une précision satisfaisante (c.-à-d. à mieux que 2%).

Ces observations permettent en partie d'expliquer les écarts qui seront observés lors de la présentation des résultats sur l'application de la méthode d'étalonnage aux données POLDER/PARASOL. L'impact de la prise en compte d'un différent critère de sélection pour les pixels d'étalonnage (en l'occurrence le critère utilisant l'écart-type cf. Équation 32) sera montré en conclusion générale comme perspective d'amélioration de ces travaux. En particulier, cela permettra d'en partie expliquer la dispersion des valeurs qui sont plus importantes qu'attendue compte-tenu du seuil fixé à 2 % d'erreur mais ne considérant pas la non-monotonie de la réflectance TOA au dessus du *glitter*.

III CONCLUSION

Nous avons présenté les différents paramètres utilisés dans la sélection des pixels pour l'étalonnage. Comme mentionné en introduction de ce chapitre, les paramètres considérés sont ceux que nous estimons êtres les plus importants pour isoler les points d'intérêt. Une application de l'algorithme se restreignant aux conditions citées dans ce chapitre suffit pour obtenir des résultats comparables à ce que nous avons obtenu avec les mesures PARASOL (que nous présentons dans le chapitre suivant). Cependant, il existe des conditions supplémentaires qui peuvent être considérées pour affiner les résultats. Par exemple, on peut citer les tests suivants (liste non exhaustive) :

— S'assurer que nous sommes dans des eaux profondes en utilisant les données de bathymétrie pour minimiser les erreurs sur les simulations de *glitter* en eaux peu profondes, où la contribution de la surface est potentiellement non-négligeable ;

— Limiter l'angle zénithal solaire pour minimiser les erreurs potentielles induites par une masse d'air plus importante ;

— Restreindre les pixels sélectionnés à une ceinture de latitudes excluant les zones proches des pôles. Cela a un effet double : premièrement, on évitera la contamination des mesures *glitter* par les réflexions sur la glace aux niveau des pôles. Puis, pour des instruments tels que PARASOL/POLDER et 3MI, les points au niveaux des pôles sont observés avec des angles solaires élevés : cela nous permet donc à nouveau de minimiser les erreurs dues à une masse d'air plus élevée.

Il est important de noter que les différentes conditions supplémentaires citées ci-dessus ne sont pas impératives à l'application de la méthode. En effet, ces dernières dépendront du type de mesures à disposition de l'utilisateur. Cela découlera donc principalement de l'instrument considéré, ainsi que de l'utilité des mesures concernées. Par exemple, si on souhaite pouvoir suivre l'état de l'étalonnage dans le champ (cf. Chapitre II), il est possible qu'utiliser les mesures échantillonnant les bords de la matrice du détecteur soit utile, menant donc à modifier d'autres conditions pour pouvoir effectuer l'analyse. C'est donc pour cela que les conditions applicables de manière générique (sec-

tion ii) sont décrites comme étant l'algorithme de base. Il est également évident que les conditions décrites soient en elles-même sujettes à des modifications/optimisations ; les descriptions des paramètres et conditions imposées n'ont pas pour but de donner les valeurs optimales pour toute application mais plutôt de proposer une approche méthodique dont l'idée au cœur de cette dernière est le comportement du modèle de Cox & Munk. Les différents autres paramètres que nous avons ajouté (tel que les valeurs de l'AOT, ou encore les vitesses du vent) découlent principalement des recherches effectuées et forment donc des conditions plutôt dépendantes des cas que nous avons pu étudier.

Chapitre VI

Application de l'algorithme aux mesures PARASOL

I INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus à partir de l'analyse des données produites par PARASOL entre 2006 et 2010. Le LOA dispose d'une chaîne de traitement des données de niveau 1 (L1) co-localisées des instruments POLDER et MODIS permettant également de générer des produits de niveau 2 (L2) dénommée PML2. Les sets de données produits via cette dernière sont la base de l'étude qui sera présentée dans ce chapitre.

Tout d'abord, nous allons procéder à la présentation des données pré-sélectionnées par l'algorithme d'étalonnage en suivant les conditions de sélection décrites dans le chapitre précédent. Dans cette première partie, nous discuterons la distribution géographique des points, le nombre de pixels (échantillons), les distributions des valeurs de la réflectance TOA ainsi que celles des valeurs exogènes que nous jugeons être les plus importantes/influentes sur les mesures *glitter* (i.e. vitesse du vent de surface et épaisseur optique aérosol).

La seconde partie discutera les résultats proprement dit, c.-à-d. les comparaisons entre les mesures de l'instrument POLDER et les simulations de transfert radiatif de ces dernières. On prendra soin de séparer les résultats obtenus pour les canaux polarisés de ceux en luminance totale. La raison de cette dichotomie est principalement de pouvoir discuter les particularités observées en luminance polarisée lors de l'application de la méthode. Ces résultats seront décrits via la présentation des distributions des erreurs relatives telles que définies dans le chapitre sur les études de sensibilité. On représentera également ces valeurs via des diagrammes polaires (permettant une visualisation en 2D des erreurs sur la simulation du *glitter*). On terminera par une étude via le calcul de régressions linéaires entre les valeurs mesurées et simulées. La dernière partie de ce chapitre sera quant à elle consacrée au suivi temporel de l'étalonnage. On montrera alors les résultats obtenus en séries temporelles avec les erreurs relatives calculées mensuellement.

II RÉSULTATS DU PRÉ-TRAITEMENT DES DONNÉES PARASOL

Un algorithme de pré-sélection est appliqué aux données de niveau 1 de PARASOL/POLDER (pour plus de détail sur les produits en question, se référer à (Bréon, 2016)). Pour ce qui est des données exogènes : les composantes U (Ouest - Est) et V (Sud - Nord) du vent, la pression de surface, ainsi que les colonnes d'ozone et de vapeur d'eau sont données par ECMWF. Ces dernières sont contenues dans les fichiers de données obtenus en sortie de la chaîne PML2 ; on obtient un fichier HDF par orbite de l'instrument PARASOL. Aux données exogènes viennent s'ajouter : les valeurs de l'épaisseur optique aérosol (obtenues à partir du produit atmosphère POLDER (PRATM) ; pour une description de ce dernier cf. (Poussi, 2005)), ainsi que celles de la concentration en chlorophylle-a (obtenue à partir des produits GLOBCOLOUR - ESACCI-OC ; cf. https://climate.esa.int/en/projects/ocean-colour/key-documents/).

1 Distribution géographiques des pixels utiles à l'étalonnage

La visualisation de la distribution des pixels peut nous permettre de déterminer la présence de zones particulières à privilégier pour l'étalonnage utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan. Bien que nous connaissions déjà plusieurs zones utiles à différentes méthodes d'étalonnage (Rayleigh, DCC, etc.) (Vermote et al., 1992; Bertrand Fougnie and Patrice Henry, 2015; Fougnie et al., 2007), comparer les zones potentiellement observables dans cette étude pourrait faciliter la synergie entre l'application des différentes méthodes d'étalonnage en vol. On pourra également commenter le nombre de pixels/points obtenus dans le but de se faire une idée sur la faisabilité opérationnelle d'une telle approche.

La figure 42 montre la distribution géographique des pixels déterminés par l'algorithme d'étalonnage comme étant des candidants valides pour être simulés. Par souci de clarté, nous représentons la distribution sous forme d'un graphique en densité de pixels.

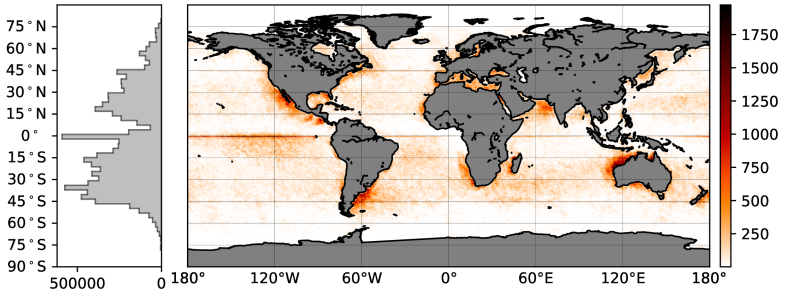


FIGURE 42 – Distribution géographique des pixels utiles à l'étalonnage sélectionnés lors du pré-traitement. Le code couleur représente la densité en nombre de ces derniers.

Nous pouvons noter que les points d'étalonnage sont présents de manière globale, avec quelques points d'agglomération. On note également des zones montrant une densité supérieure de points d'étalonnage :

— Océan pacifique, proche de l'équateur ;

— Zones proches des côtes : Côtes Ouest des États-Unis d'Amérique et Mexique, Argentine, et Australie ;

— Mer d'Arabie.

2 Vitesse du vent

Comme nous avons pu le voir grâce aux études de sensibilités, la vitesse du vent reste la variable la plus importante/influente lors de la simulation de la réflexion spéculaire à la surface de l'océan. Pour cette raison, connaitre l'ordre de grandeur des vitesses du vent observées pour les pixels sélectionnés est cruciale.

La figure 43 représente l'histogramme des valeurs de la vitesse du vent de surface en m/s des points d'étalonnage considérés. Il est important de noter que l'algorithme de pré-traitement rejette tous les points où la vitesse du vent est supérieure à 8 m/s, ce qui explique la troncature de la distribution observée.

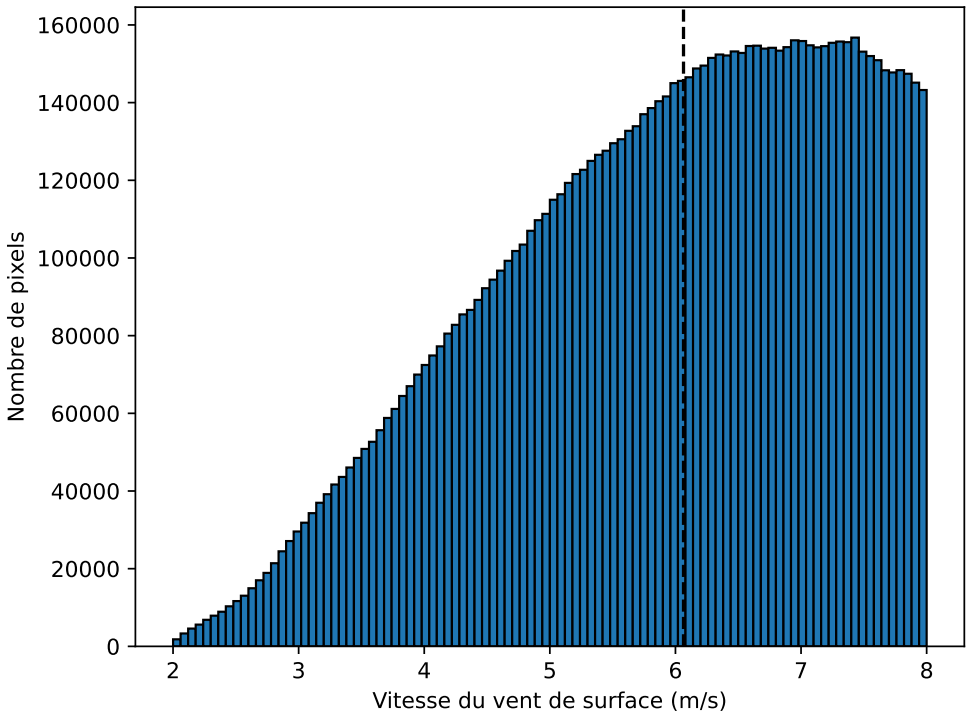


FIGURE 43 – Distribution des valeurs de la vitesse du vent de surface des pixels utiles à l'étalonnage sélectionnés lors du pré-traitement. La ligne verticale en pointillés représente la médiane.

Une remarque importante que nous pouvons faire est que les points pré-sélectionnés par l'algorithme d'étalonnage contiennent le mode principal de la vitesse du vent. La table 3 montre quelques grandeurs statistiques représentant la distribution présentée dans la figure 43.

10^e centile	3.926 m/s
Médiane	6.062 m/s
90^e centile	7.599 m/s
σ	1.363 m/s

TABLE 3 – Quelques valeurs statistiques décrivant la distribution de la vitesse du vent de surface pour les points d'étalonnage pré-sélectionnés.

3 Épaisseur optique aérosol (AOT)

L'étude des aérosols étant un des objectifs principaux de la mission 3MI, il est donc logique que nous représentions les valeurs observées pour les pixels d'étalonnage. Bien que les valeurs que nous allons observer peuvent être considérées comme "faibles" à cause de la limitation que nous imposons sur cette grandeur lors de la sélection des pixels, l'observation de la distribution de ces valeurs peut s'avérer utile pour se faire une idée de l'ordre de grandeur des erreurs sur les simulations des points. Les études de sensibilité que nous avons présentées dans le chapitre IV considèrent les cas les plus extrêmes en terme d'erreur sur l'AOT - nous avons calculé les erreurs commises par rapport à une AOT nulle. Malgré cela, la vitesse du vent reste le paramètre le plus influent sur la réflectance TOA. Nous avons également observé des zones où l'erreur en négligeant complètement l'AOT était quasi nulle dans certaines géométries d'observation. Quant aux erreurs dues à une mauvaise représentation des aérosols (erreur de définition du modèle / des propriétés des aérosols), on supposera que ces dernières sont négligeables au vu des zones géographiques concernées. En effet, le même modèle d'aérosol marin (OPAC Maritime Clean) a été pris comme modèle par défaut, une hypothèse que nous considérons adéquate pour la majorité des cas observés, à l'exception des zones sous l'influence des transports de poussières désertiques.

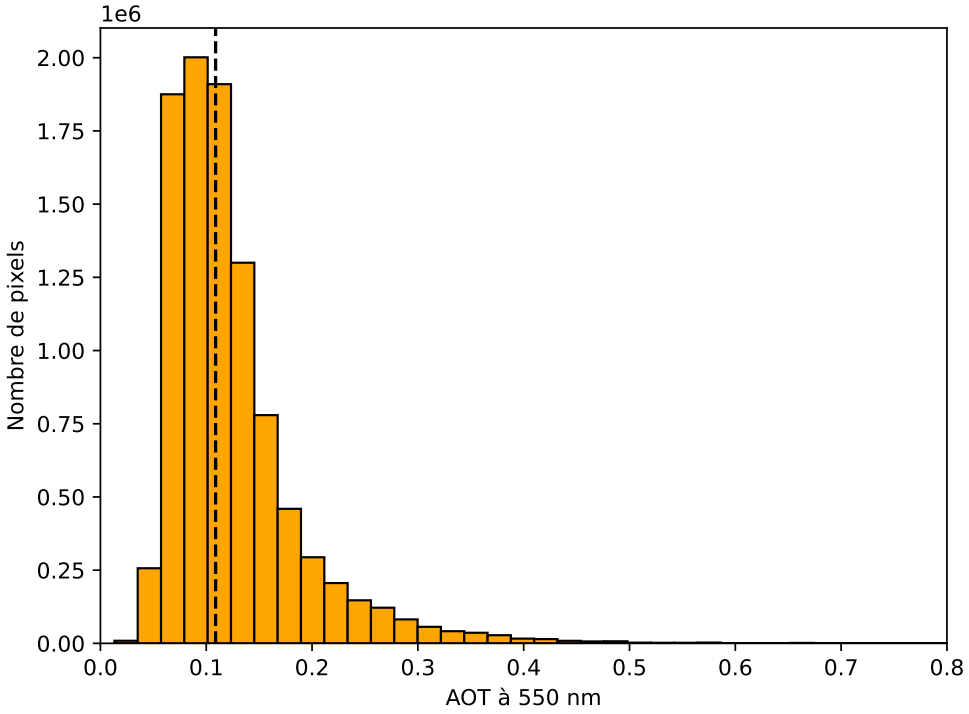


FIGURE 44 – Distribution des valeurs de l'épaisseur optique à 550 nm pour les pixels d'étalonnage considérés. La ligne verticale en pointillés représente la médiane.

La figure 44 représente les valeurs d'AOT à 550 nm calculées à partir de l'AOT à 865 nm dérivées des produits POLDER. La raison de la conversion en AOT à 550 nm réside principalement dans le fait que les simulations des pixels d'intérêt via les codes de transfert radiatif 6S et ARTDECO ont comme entrée commune l'AOT à 550 nm.

La table 4 présente quelques grandeurs statistiques associées à la distribution présentée dans la figure 44.

10^e centile	0.066
Médiane	0.109
90^e centile	0.197
σ	0.066

TABLE 4 – Quelques valeurs statistiques décrivant la distribution de l'AOT à 550 nm pour les points d'étalonnage pré-sélectionnés.

4 Distributions des valeurs de réflectance

Nous arrivons maintenant à la grandeur d'intérêt principale : la réflectance TOA. Dans cette partie, nous allons donc discuter les valeurs de réflectance (totale et polarisée) des pixels sélectionnés comme candidats à l'étalonnage par l'algorithme. L'intérêt de cette approche réside dans l'idée que l'on peut se faire des ordres de grandeur des réflectances. En effet, les différents processus de transformation subis par la lumière dans l'atmosphère (réflexion, diffusion, etc.) produit des observations pouvant grandement varier en terme d'intensités observées au niveau du sommet de l'atmosphère. La réflexion spéculaire à la surface de l'océan étant un phénomène produisant généralement des intensités observées significatives (ainsi qu'un signal fortement polarisé), il est important de pouvoir analyser les intensités des points sélectionnés par l'algorithme d'étalonnage. Dans cette optique, nous allons étudier les valeurs de la réflectance (totale et polarisée) ainsi que le degré de polarisation linéaire (DoLP). Les figures 45 à 47 montrent - de haut en bas (par figure) : les valeurs de la réflectance totale, la réflectance polarisée, et le degré de polarisation linéaire, respectivement.

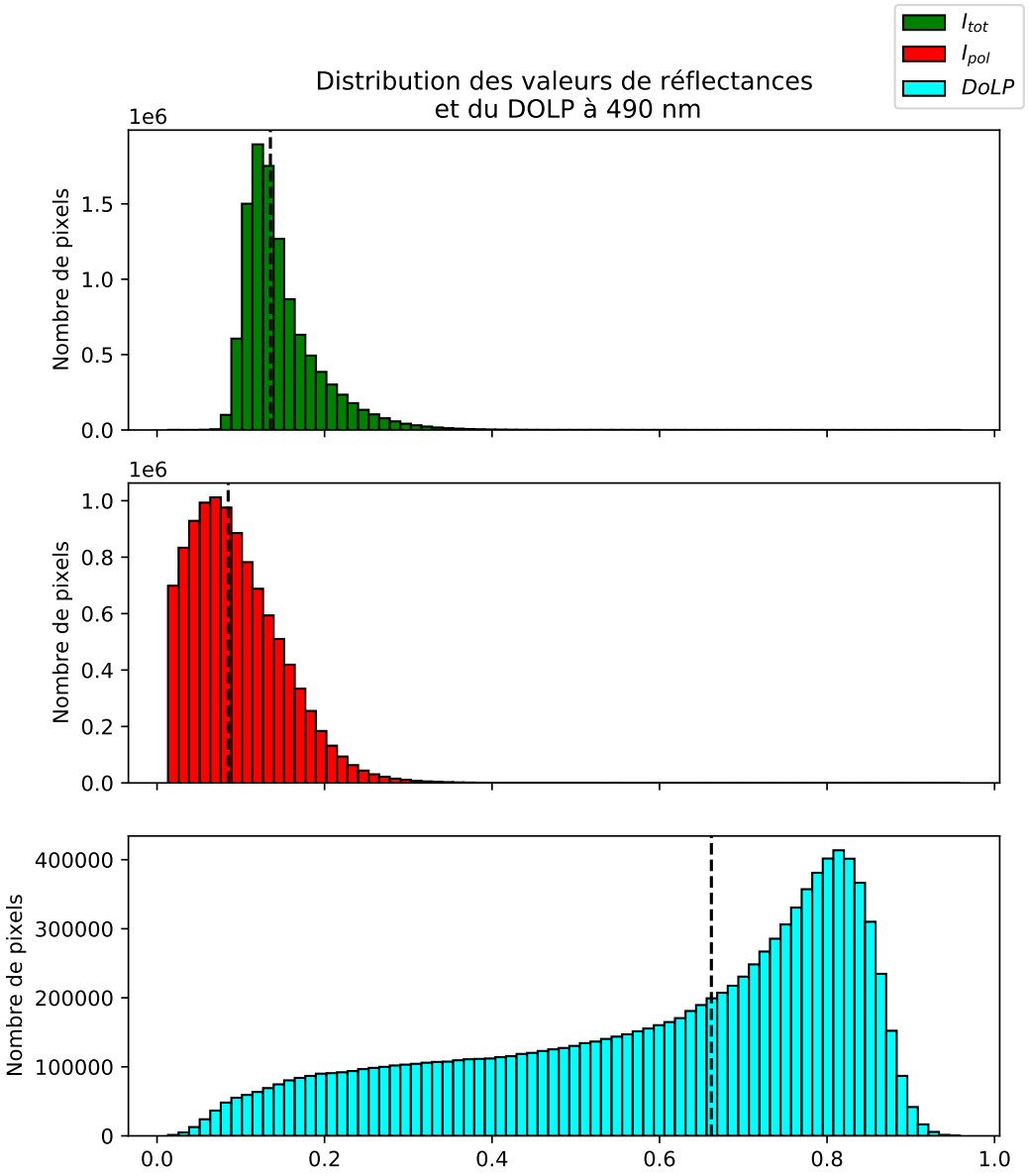


FIGURE 45 – De haut en bas, et pour la bande spectrale à 490 nm : valeurs de la réflectance totale, réflectance polarisée, et degré de polarisation linéaire. N.B. : L'axe des abscisses est partagé entre les trois graphiques.

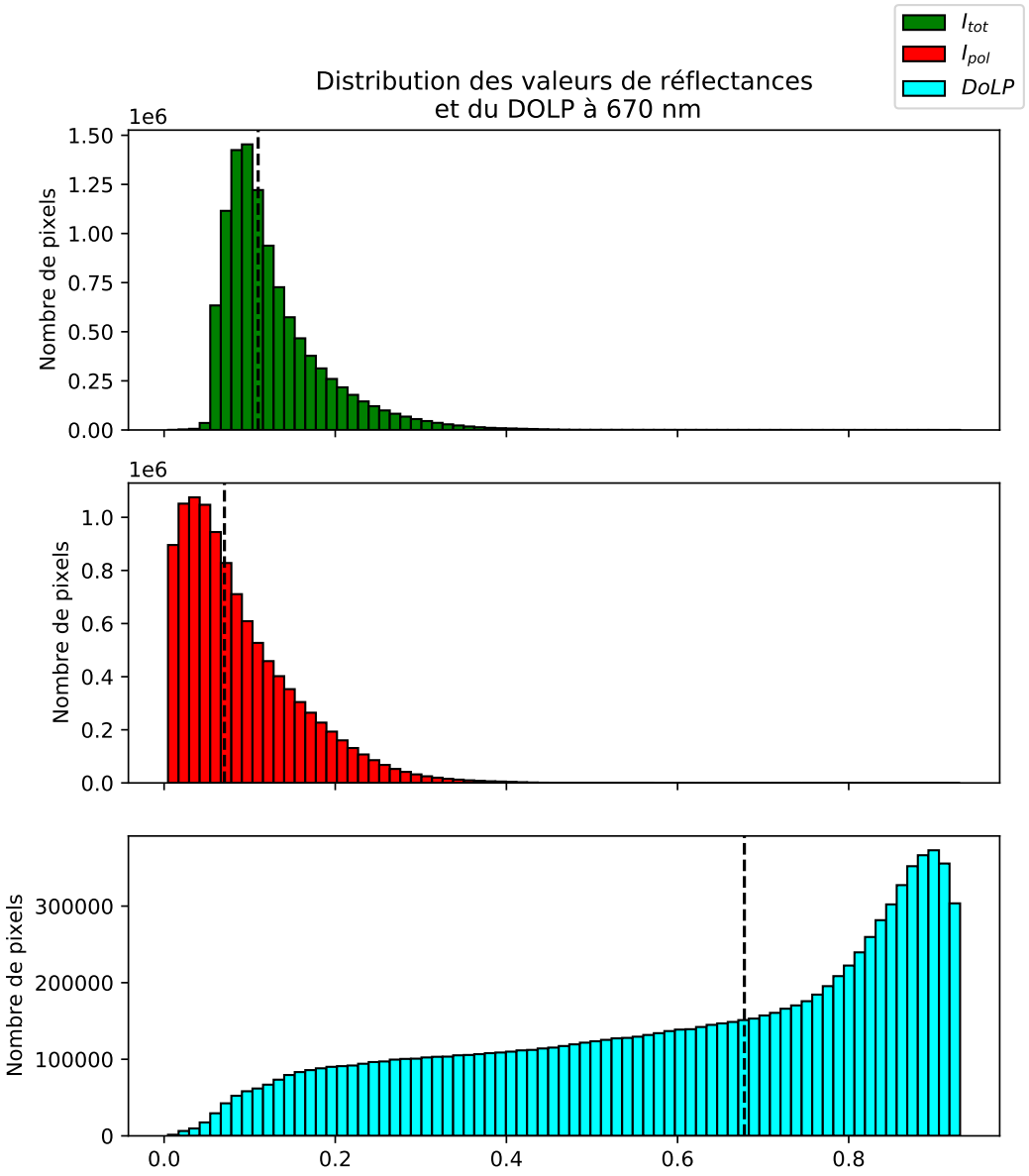


FIGURE 46 – De haut en bas, et pour la bande spectrale à 670 nm : valeurs de la réflectance totale, réflectance polarisée, et degré de polarisation linéaire. N.B. : L'axe des abscisses est partagé entre les trois graphiques.

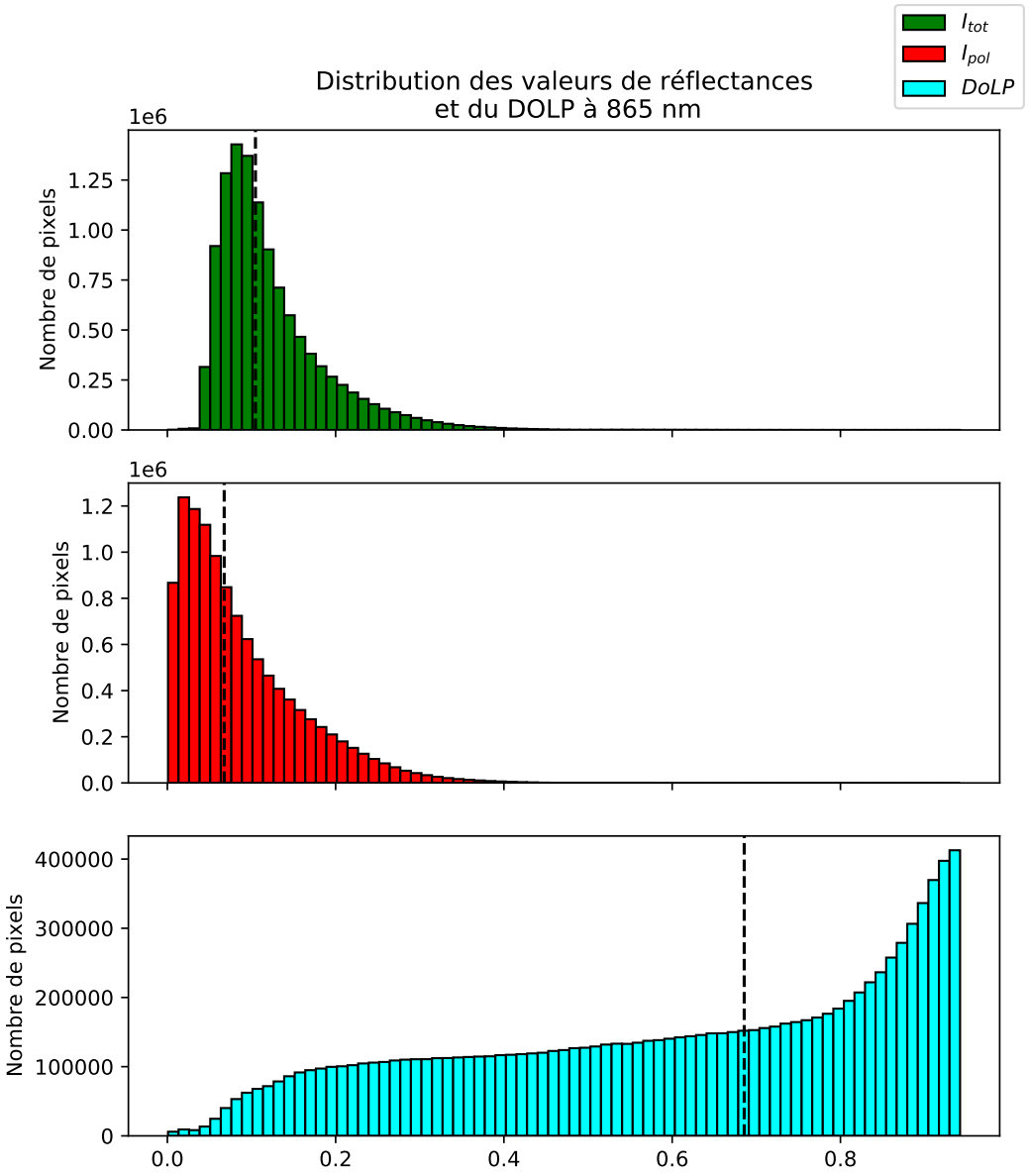


FIGURE 47 – De haut en bas, et pour la bande spectrale à 865 nm : valeurs de la réflectance totale, réflectance polarisée, et degré de polarisation linéaire. N.B. : L'axe des abscisses est partagé entre les trois graphiques.

Les tables 5 à 7 montrent les valeurs du 10ème centile, de la médiane, du 90ème centile, et de l'écart type associées aux figures 45 à 47, respectivement.

490 nm	I_{tot}	I_{pol}	DoLP
10^e centile	0.11	0.03	0.24
Médiane	0.14	0.08	0.66
90^e centile	0.21	0.17	0.84
σ	0.05	0.06	0.22

TABLE 5 – Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 45

670 nm	I_{tot}	I_{pol}	DoLP
10^e centile	0.07	0.02	0.23
Médiane	0.11	0.07	0.68
90^e centile	0.21	0.18	0.90
σ	0.06	0.07	0.25

TABLE 6 – Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 46

865 nm	I_{tot}	I_{pol}	DoLP
10^e centile	0.06	0.02	0.23
Médiane	0.10	0.07	0.69
90^e centile	0.21	0.19	0.94
σ	0.06	0.07	0.26

TABLE 7 – Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 47

III RÉSULTAT DES SIMULATIONS DES DONNÉES PARASOL

Les valeurs des pixels pré-sélectionnés par l'algorithme d'étalonnage ayant été présentées et discutées, nous abordons les résultats proprement dits : la comparaison des simulations aux mesures. Avant de procéder, il est important de rappeler les principales hypothèses sur lesquelles notre étude se base (pour le détail des critères de sélection, se référer au chapitre précédent) :

— La sélection des pixels situés dans les conditions géométriques optimales se fait via le modèle de Cox et Munk uniquement, sans prise en compte de l'atmosphère ;

— La sélection se fait en supposant une incertitude sur la vitesse du vent de surface donné par ECMWF égale à 2 m/s ;

— Les aérosols sont simulés en supposant le modèle OPAC Maritime Clean - cf. (Hess et al., 1998) ;

— Les pixels de classification *clear* et *probably clear* sont tous considérés comme non-nuageux (clairs) ;

— L'étalonnage de POLDER/PARASOL est considéré comme référence pour évaluer notre méthode.

À ses hypothèses de base on ajoutera une hypothèse sur les erreurs relatives calculées sur la réflectance : on limitera les erreurs aux valeurs inférieures ou égales à 20%. La justification de l'utilisation de cette valeur est basée sur le fait que l'hypothèse sur l'étalonnage PARASOL nous pousse à rejeter les simulations ayant des écarts supérieurs au seuil mentionné en les considérant comme étant forcément des faux positifs (pixels non valide à l'étalonnage).

Pour démontrer la validité de notre approche nous présenterons différents types de graphiques. Tout d'abord, une présentation des valeurs moyennes/médianes des erreurs relatives à différentes vitesses du vent sera discutée. Les simulations à des vitesses du vent biaisées de -2 et +2 m/s (le biais choisi est égal à l'incertitude supposée sur la vitesse du

vent) seront donc utilisées pour comparer les effets sur les valeurs médianes/moyennes de l'erreur relative entre les simulations et les mesures. Le cas idéal/parfait étant une différence nulle (pas d'effet de la vitesse du vent sur la simulation des mesures). Par la suite, nous montrerons les résultats sous forme de diagramme polaire des erreurs relatives permettant une meilleure visualisation des zones (dans le référentiel du *glitter*). Nous terminerons par une représentation permettant de comparer l'étalonnage actuel aux valeurs simulées via une régression linéaire sur un graphique $mesure = f(simulation)$ (on rappel que la "mesure" est celle donnée après l'étalonnage POLDER/PARASOL - considérée comme la valeur vraie). Avant de poursuivre la suite de ce chapitre, rappelons notre définition de l'erreur relative :

$$R_{err} = \frac{I_{mes} - I_{sim}}{I_{sim}} \tag{33}$$

Cela implique que les valeurs positives et négatives de R_{err} représentent respectivement, une sous-estimation et sur-estimation du signal.

1 Résultats pour les canaux non-polarisés

1.1 Distributions des erreurs relatives

Les figures 48, 49, et 50, montrent les distributions des erreurs relatives pour les canaux non polarisés de POLDER à 490, 670, et 865 nm, respectivement. Le graphique supérieur représente les valeurs médianes des distributions des erreurs relatives pour des simulations effectuées à des vitesses de vent V, telles que :

$$V = v_{wind} + b \tag{34}$$

où : v_{wind} est la vitesse du vent de surface donnée par ECMWF (considérée "vraie") et b un biais constant ajouté à chaque point simulé. Sur l'axe des abscisses, de gauche à droite, le biais varie de -2 à +2 m/s, par pas de 2 m/s. Autrement dit, nous représentons

la différence relative entre la mesure et la simulation pour les vitesses de vent $v_{wind} - 2$, v_{wind}, et $v_{wind} + 2$, respectivement. Le graphique inférieur montre la distribution des erreurs relatives obtenues en utilisant la valeur du vent non-biaisée (b=0 ou "valeur vraie"). La médiane de la différence relative y est également notée en vert. Une distribution normale est également représentée en pointillés par dessus l'histogramme des valeurs. Cette dernière est produite en utilisant la moyenne et l'écart type des erreurs relatives.

Nous nous limiterons à une comparaison purement visuelle (qualitative) des différences observées entre la distribution des erreurs relatives (histogrammes) et la distribution normale associée (produite en utilisant la moyenne et écart type de R_{err}). Le but n'est pas d'obtenir une étude détaillée via un test d'hypothèses pour déterminer un écart plus quantitatif des distributions par rapport à une loi normale.

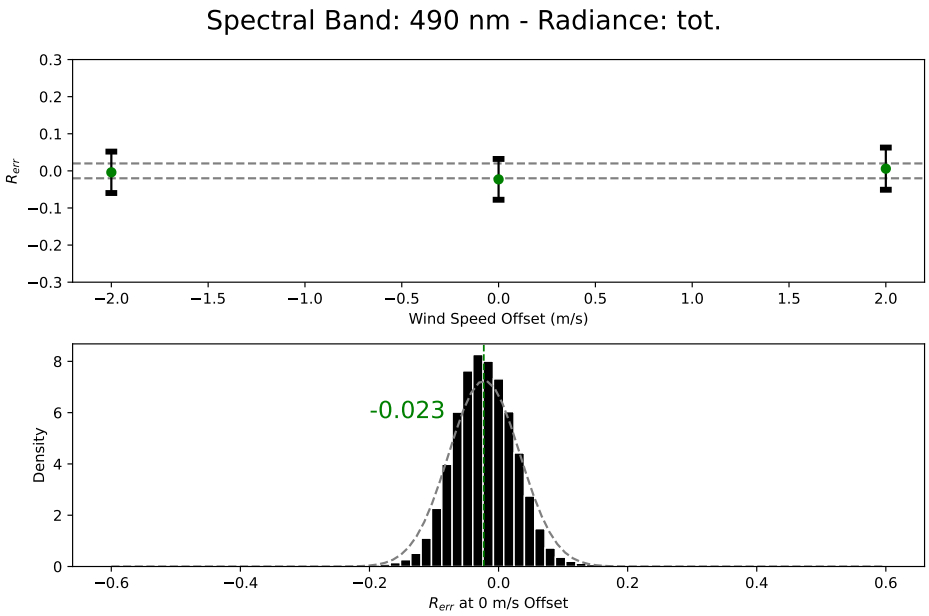


FIGURE 48 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 490 nm

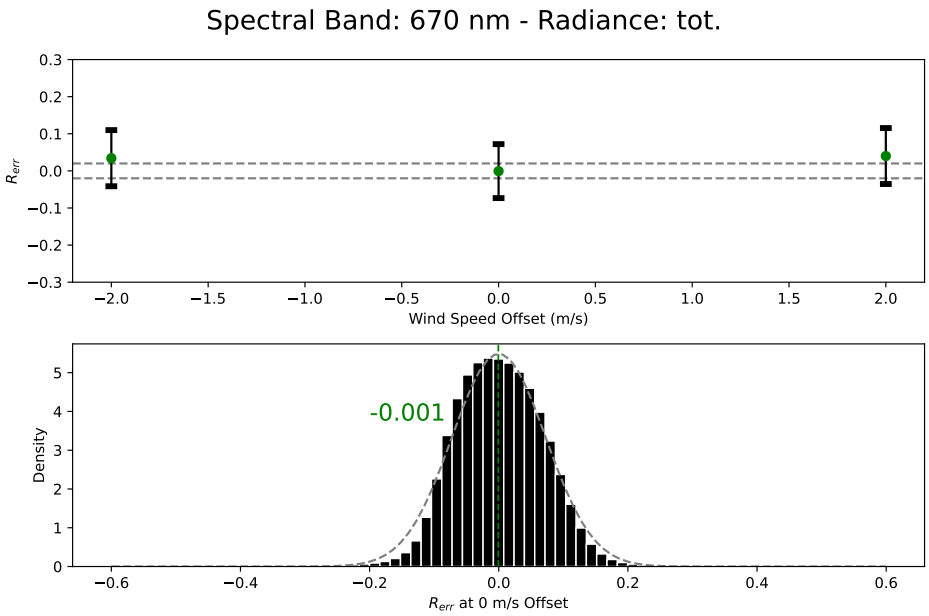


FIGURE 49 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 670 nm

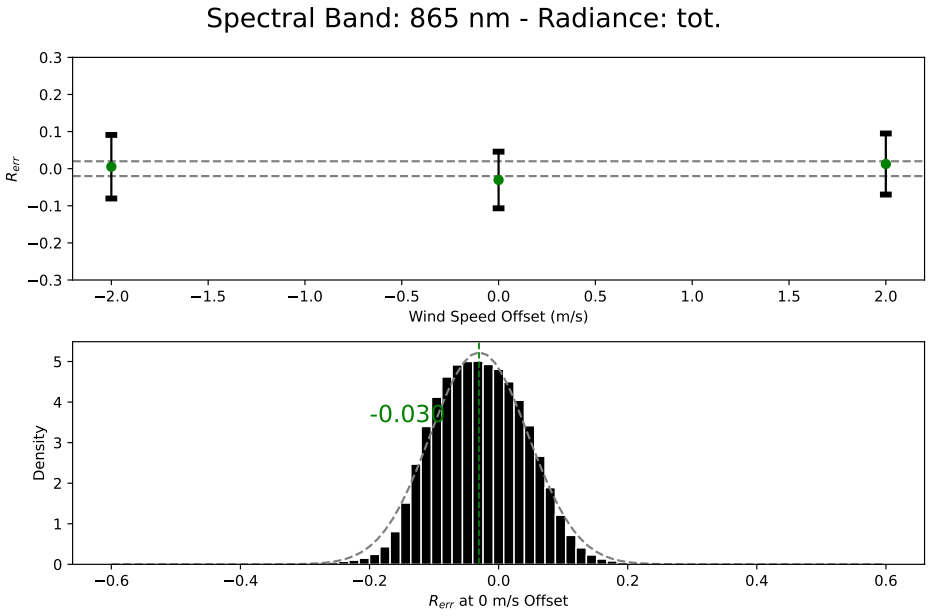


FIGURE 50 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 865 nm

On remarque par une analyse visuelle que la distribution de la Figure 48 a un kurtosis positif et supérieur à celui d'une distribution normale tandis que sa valeur moyenne semble proche de la médiane. Pour les distributions visibles dans les deux figures 49 et 50,

on observe que les valeurs semblent se rapprocher davantage d'une distribution normale par rapport à la distribution vue à 490 nm. Cette analyse visuelle servira principalement à discuter l'asymétrie observée en luminance polarisée (sera discutée dans les sous-sections suivantes).

1.2 Diagrammes polaires des erreurs relatives

Dans cette partie, nous allons discuter les résultats en observant les erreurs relatives sous un angle différent. En effet, au lieu de visualiser des histogrammes tels que dans la sous-section précédente, nous allons le faire grâce à des diagrammes polaires. Ces derniers permettent d'observer les erreurs relatives telles que vues au dessus d'une image d'un *glitter* reprojetée de sorte que le centre du diagramme polaire soit le point spéculaire. L'idée est d'analyser les erreurs relatives de manière à vérifier leur distribution en terme de géométries d'observation. À cet effet, nous présentons dans les figures suivantes (numérotées de 51 à 53) les erreurs relatives en diagramme polaire pour les canaux non polarisés de POLDER centré à 490, 670, et 865 nm, respectivement. On définit également l'angle d'écart au point spéculaire θ_{glint} tel que :

$$\theta_{glint} = 180 - \arccos\left(-\mu_s.\mu_v - \cos(\phi_r).\sqrt{(1-\mu_s^2).(1-\mu_v^2)}\right) \tag{35}$$

$$\text{où :} \begin{cases} \mu_s = \cos(\theta_s) \\ \mu_v = \cos(\theta_v) \\ \phi_r = \phi_s - \phi_v \end{cases}$$

De plus, on définit un azimut de *glitter*, noté ϕ_{glint}, tel que :

$$\phi_{glint} = arctan2(OSy, OSx) \tag{36}$$

$$\text{où :} \begin{cases} \text{OSx} = \tan(\theta_s) - \tan(\theta_v).\cos(\phi_r) \\ OSy = \tan(\theta_v).\sin(\phi_r) \end{cases}$$

θ_s et θ_v sont les angles zénithaux solaires et de visée, respectivement. ϕ_s et ϕ_v sont les angles azimutaux solaires et de visée, respectivement, et sont définis dans la convention POLDER, par rapport au nord (Bréon, 2016). OSx et OSy sont les composantes (X, et Y, respectivement) du vecteur $\overrightarrow{OS}$, vecteur dirigé du point observé (O) vers le point spéculaire (S).

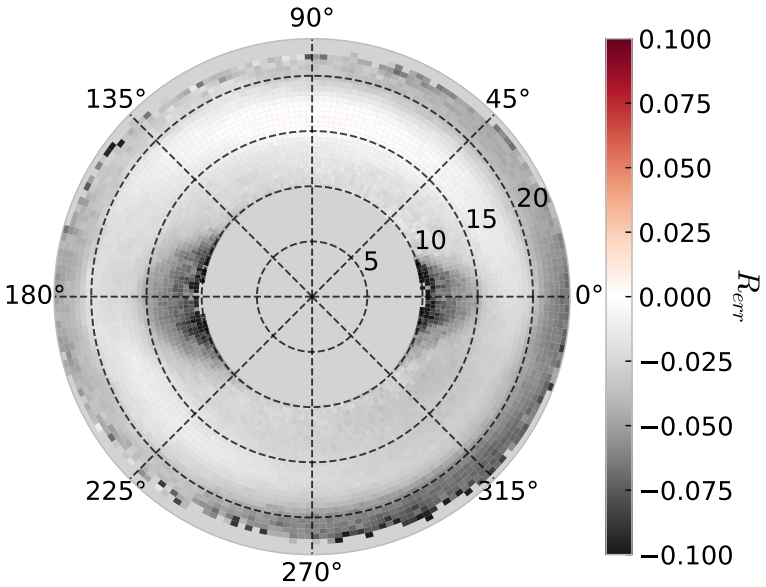


FIGURE 51 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 490 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF)

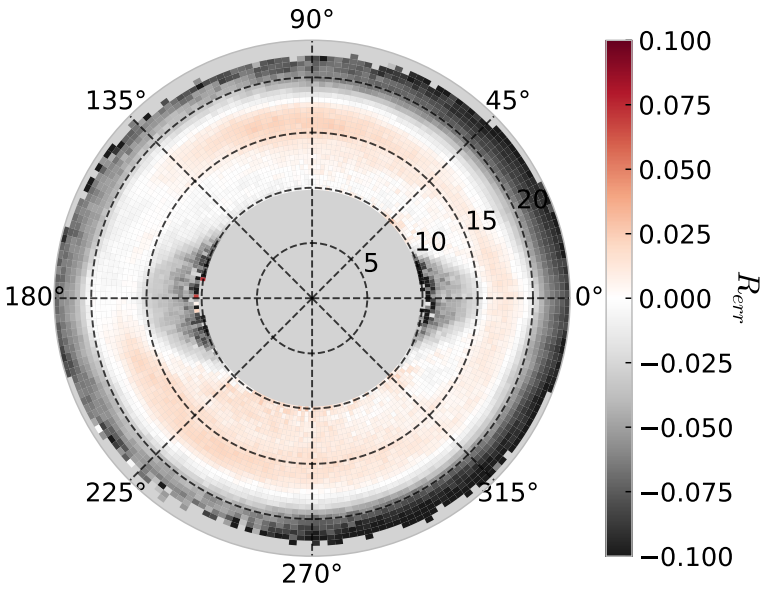


FIGURE 52 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 670 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF)

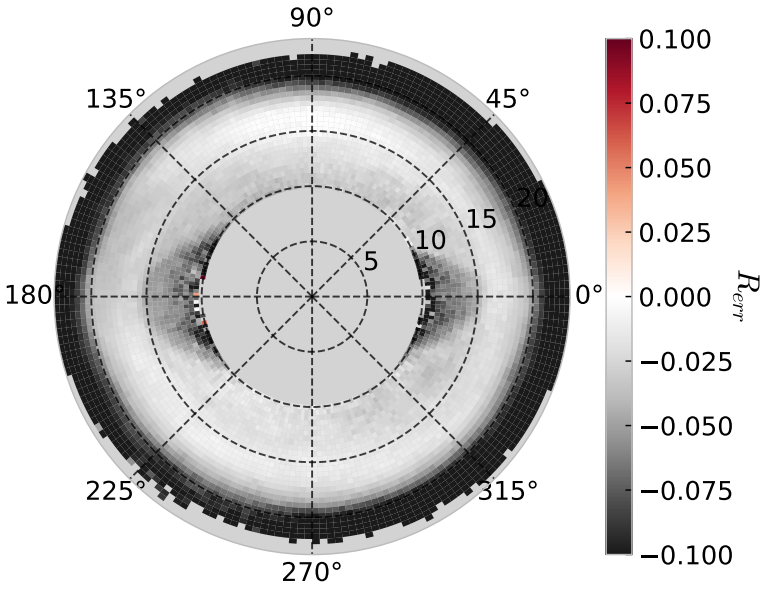


FIGURE 53 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 865 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF)

On remarque que la distribution des valeurs de R_{err} à 490 nm est plus uniforme au niveau du *glitter* (distribution plus piquée) avec des valeurs en moyenne plus proches du zéro. À 670 nm, on observe la présence d'une zone d'erreurs relatives positives pour un angle θ_{glint} entre 15 et 20 degrés. On notera également que R_{err} est négative en moyenne pour θ_{glint} entre 20 et 25 degrés, et ce, pour les bandes spectrales à 670 et 865 nm ; avec un biais négatif plus important à 865 nm. À titre informatif, les figures 54 à 59, représentent les valeurs de l'inéquation 30 permettant de définir le critère de sensibilité à la vitesse du vent - rappelons cette dernière :

$$\frac{|I_{v-\sigma} - I_{v+\sigma}|}{2I_v} \leq 0.02 \tag{37}$$

Cependant, nous remplaçons I_v (la réflectance simulée à la vitesse de vent v) par I_{mes} : la réflectance mesurée (c-à-d. provenant de POLDER). Cela nous permettra de visualiser l'efficacité du critère de sélection en comparant les valeurs réelles aux simulations biaisées (de ± 2 m/s).

On réécrit donc, en incluant également $\sigma = 2$:

$$\frac{|I_{v-2} - I_{v+2}|}{2I_{mes}} \leq 0.02 \tag{38}$$

où :
- $I_{v\pm2}$ est la réflectance simulée (totale ou polarisée) avec une vitesse de vent biaisée de $\pm 2 m/s$;
- I_{mes} est la réflectance mesurée (totale ou polarisée).

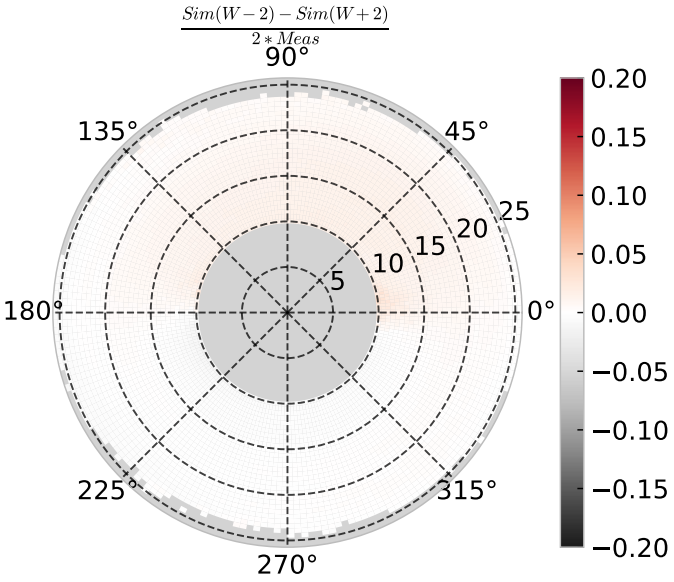


FIGURE 54 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 490 nm.

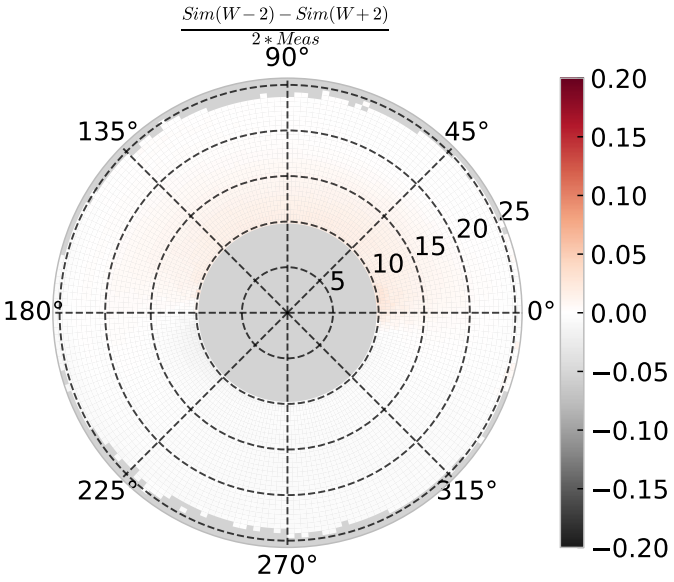


FIGURE 55 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 490 nm.

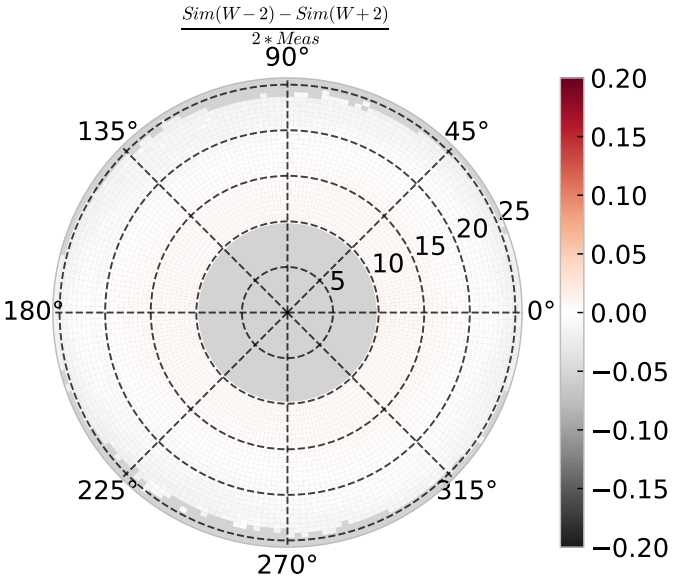


FIGURE 56 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 670 nm.

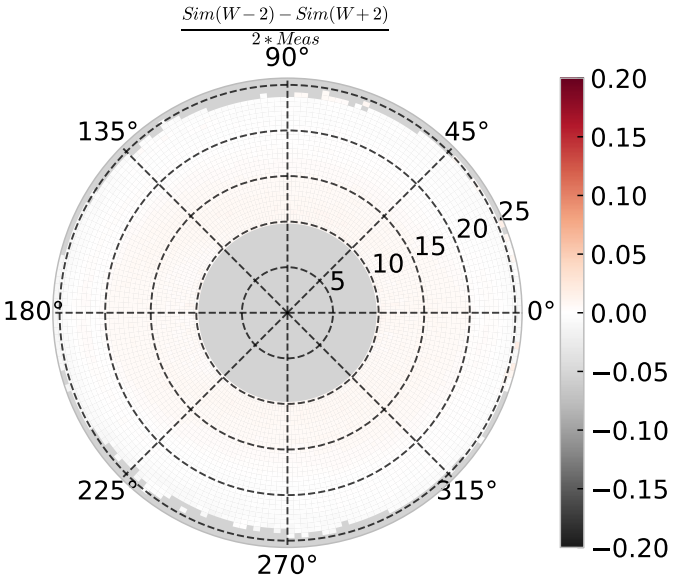


FIGURE 57 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 670 nm.

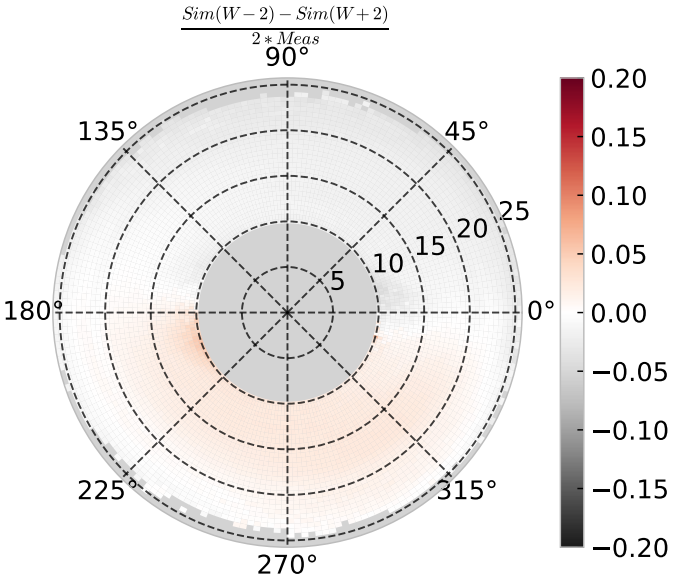


FIGURE 58 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 865 nm.

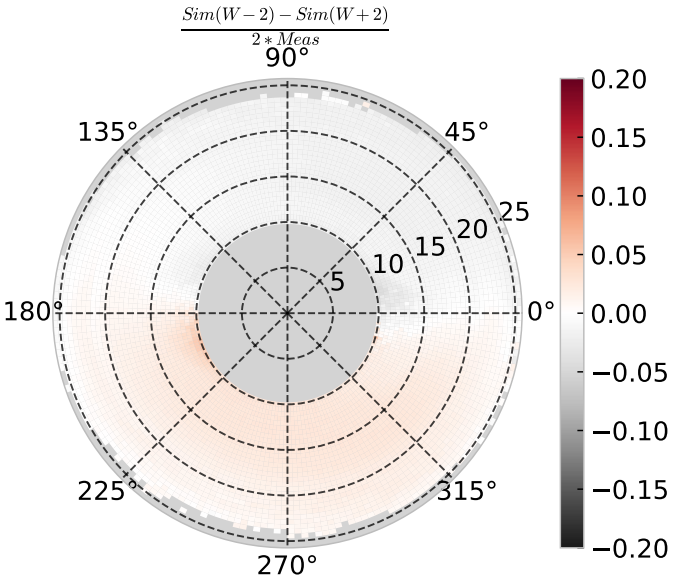


FIGURE 59 – Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 865 nm.

Nous remarquons que la majorité des points respectent le critère de sensibilité (on rappelle ici que le dénominateur est la mesure). On peut donc conclure que la sélection

donne bel et bien des points de faible sensibilité à la vitesse du vent de surface, et ce, malgré un écart de vitesse du vent de $4m/s$ entre les simulations effectuées (I_{v-2} et I_{v+2}). Pour davantage d'information, et un regard plus quantitatif, le lecteur est invité à observer les figures 117 à 122 présentes en annexe.

1.3 Étude des résultats par régression linéaire

Dans cette partie, nous allons étudier les résultats de la régression linéaire appliquée aux graphiques représentant la fonction suivante :

$$mesure = f(simulation) \tag{39}$$

Cette approche nous permettra l'étude de la composante linéaire reliant nos simulations aux mesures. Il est raisonnable de supposer une relation linéaire entre les valeurs des simulations et celles obtenues par les mesures POLDER. Nous aborderons cette étude par le calcul d'une régression linéaire que l'on peut assimiler à l'équation 39. Les coefficients de régression linéaire sont visibles sur les figures 60 à 62 pour les canaux non-polarisés de POLDER à 490, 670, et 865 nm, respectivement.

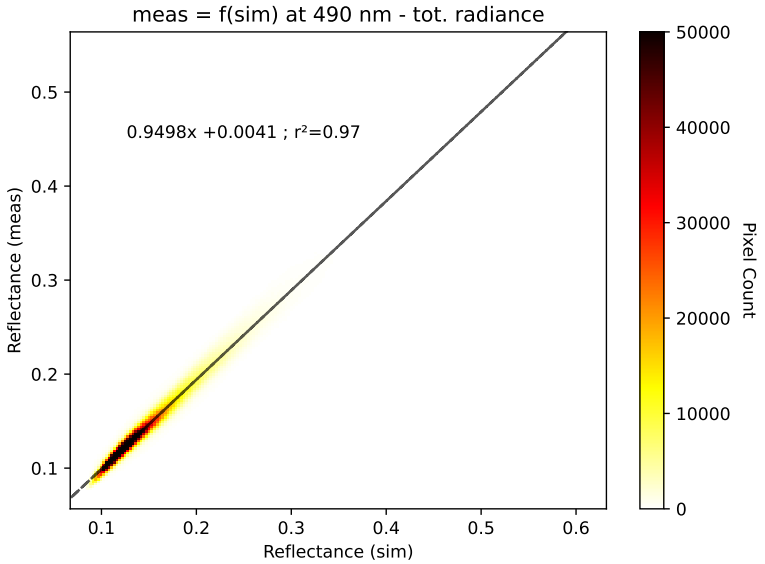


FIGURE 60 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 490 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

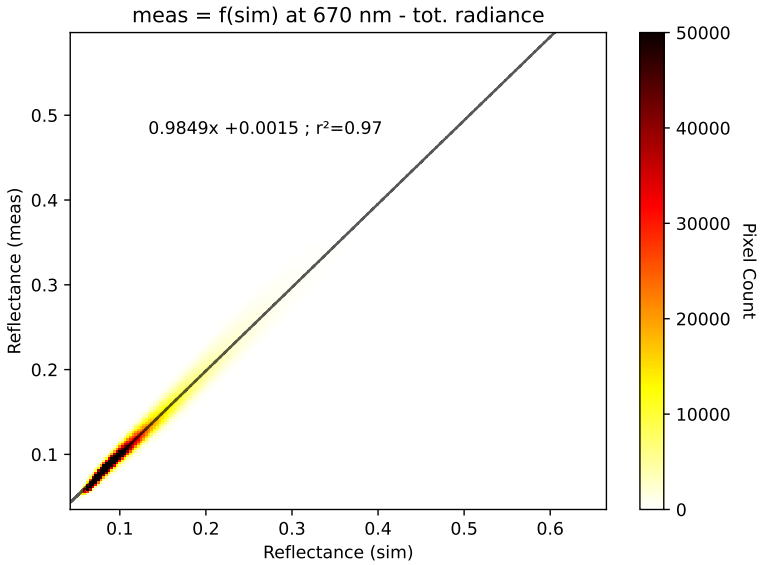


FIGURE 61 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 670 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

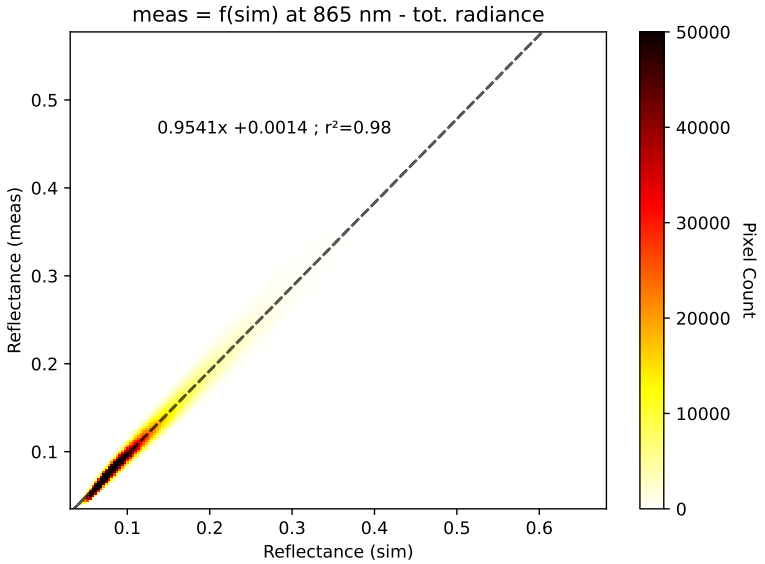


FIGURE 62 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 865 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

Des précédentes figures nous pouvons noter que la valeur de pente la plus proche de 1 est celle obtenue pour la bande spectrale à 670 nm avec une valeur de $a \approx 0.985$, suivie de celle à 865 nm avec $a \approx 0.954$ puis celle à 490 nm avec $a \approx 0.950$. Il est également intéressant de noter que la valeur de l'ordonnée à l'origine pour la fonction de régression est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, avec une valeur à 490 nm (0.0041) environ trois fois supérieure à celle observée à 670 (0.0015) ou 865 nm (0.0014). On considérera la valeur de l'ordonnée à l'origine comme un indicateur simple de la non-linéarité de la dépendance entre les simulations et les mesures étalonnées. Cette considération s'avérera d'autant plus intéressante pour l'étude des valeurs en luminance polarisée.

2 Résultats pour les canaux polarisés

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus pour les canaux polarisés de POLDER. Par souci de facilité pour le lecteur, nous omettrons de répéter les définitions déjà faites dans la section sur les résultats des canaux non polarisés. Également, pour la même raison, nous ne discuterons en détail que les différences majeures entre les

résultats obtenus avec les réflectances polarisées par rapport à ceux en réflectance totale.

2.1 Asymétrie des résultats en luminance polarisée

L'une des différences majeures que nous avons pu observer lors de l'analyse des erreurs relatives entre les mesures et les simulations en luminance polarisée ont pu être reliées aux valeurs de la réflectance polarisée ainsi que du degré de polarisation linéaire. Tout d'abord, illustrons cet effet : les figures 63 à 65 montrent la distribution des erreurs relatives observées pour le canal polarisé à 490 nm.

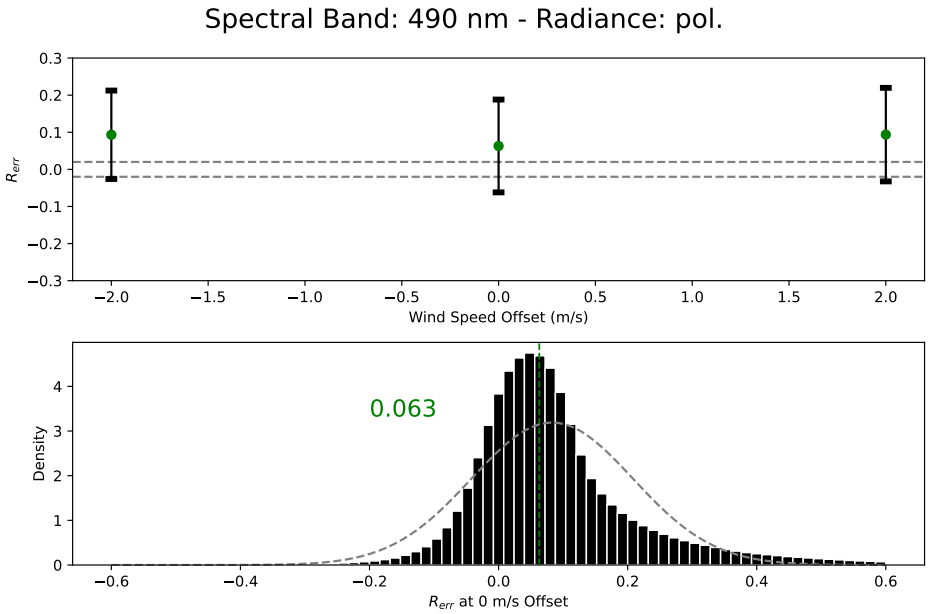


FIGURE 63 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation

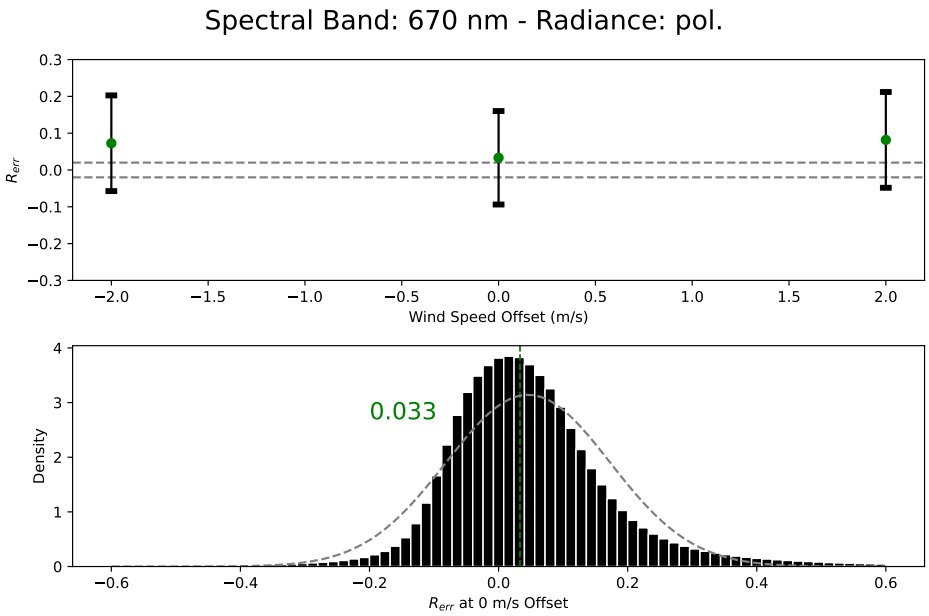


FIGURE 64 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation

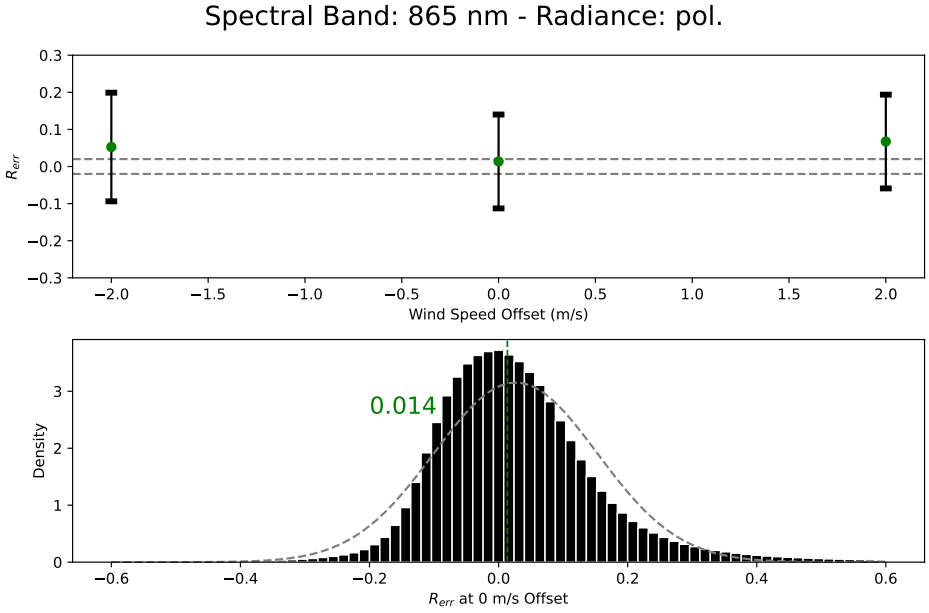


FIGURE 65 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation

Pour essayer de déterminer la cause de la forte asymétrie observée dans les figures 63 à 65, étudions les figures 66 à 68. Ces dernières montrent l'erreur relative en fonction

de la réflectance polarisée mesurée par POLDER (sous-figures supérieures) ainsi qu'en fonction du degré de polarisation linéaire (sous-figures inférieures), à 490, 670, et 865 nm, respectivement.

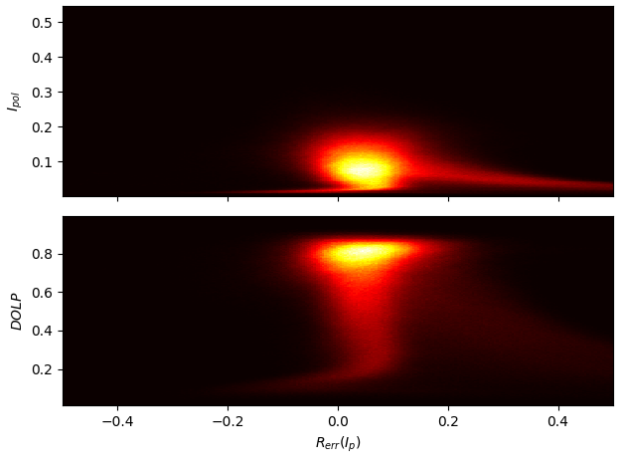


FIGURE 66 – Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 490 nm. En axe des abscisses, la valeur de la différence relative R_{err}. En axe des ordonnées (de haut en bas) : la réflectance polarisée (I_{pol}) mesurée par POLDER, le degré de polarisation linéaire ($DOLP$) des mesures POLDER.

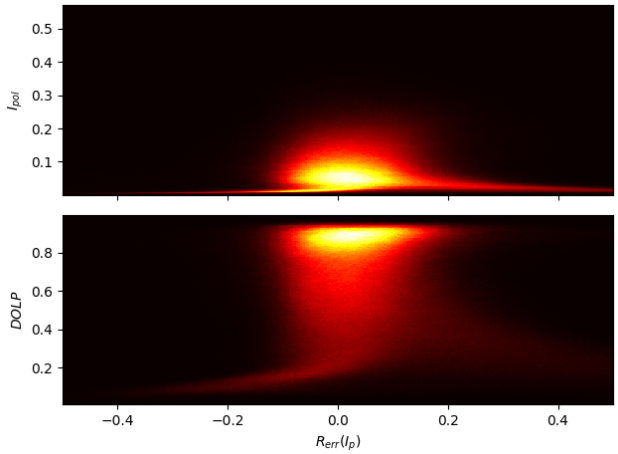


FIGURE 67 – Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 670 nm. En axe des abscisses, la valeur de la différence relative R_{err}. En axe des ordonnées (de haut en bas) : la réflectance polarisée (I_{pol}) mesurée par POLDER, le degré de polarisation linéaire ($DOLP$) des mesures POLDER.

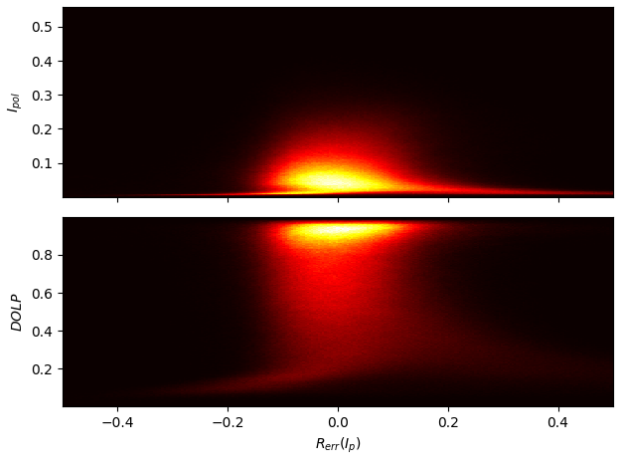


FIGURE 68 – Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 865 nm. En axe des abscisses, la valeur de la différence relative R_{err}. En axe des ordonnées (de haut en bas) : la réflectance polarisée (I_{pol}) mesurée par POLDER, le degré de polarisation linéaire ($DOLP$) des mesures POLDER.

Nous remarquons que l'asymétrie semble être corrélée aux éléments suivants :

— Les valeurs de la luminance polarisée inférieures à 0.05 ;

— Les valeurs du degré de polarisation linéaire inférieures à 80%.

On peut donc supposer que la combinaison d'un faible signal et/ou d'un faible taux de polarisation puisse contribuer à fortement biaiser les résultats des erreurs relatives. On peut noter quelques hypothèses / causes potentielles à ce problème (liste non-exhaustive) :

— Incapacité du modèle de transfert radiatif à proprement simuler les points considérés par manque de paramètres précis ;

— Limitations dues à la précision même du modèle de transfert radiatif ;

— Limitations dues à la précision de l'instrument POLDER ;

— Présence de facteurs introduisant une erreur systématique aux mesures et/ou simulations (par exemple, une dépolarisation non-prise en compte).

Une bonne hypothèse à tester est de supposer que le problème soit causé par certaines géométries d'observation du *glitter*. Cela est relativement simple à tester grâce aux représentations en diagrammes polaires, tels que présentés dans la sous-section

précédente dédiée aux mesures en luminance totale. Les figures 69 à 71 montrent l'erreur relative en diagramme polaire, dans la géométrie du *glitter*.

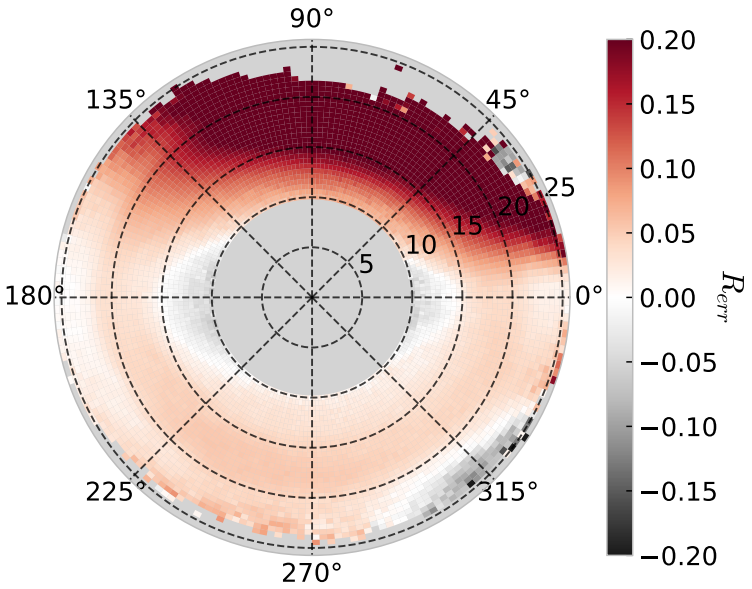


FIGURE 69 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF) - exemple montrant l'asymétrie

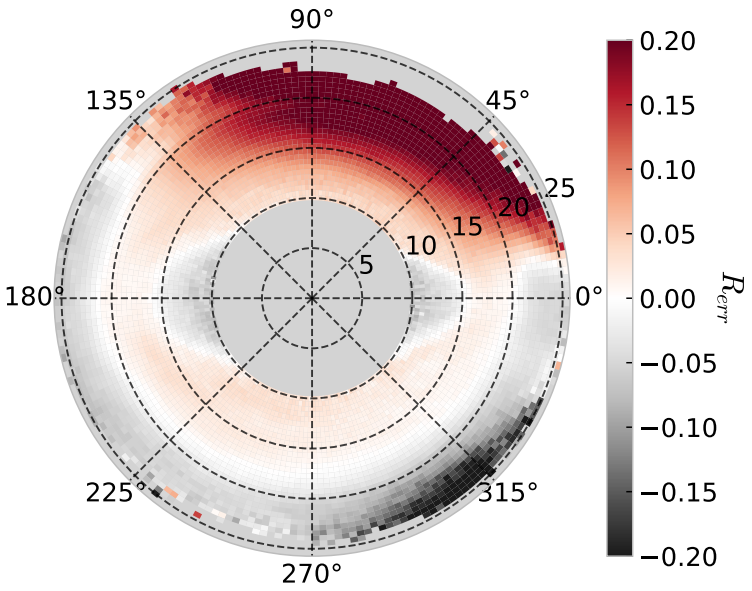


FIGURE 70 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF) - exemple montrant l'asymétrie

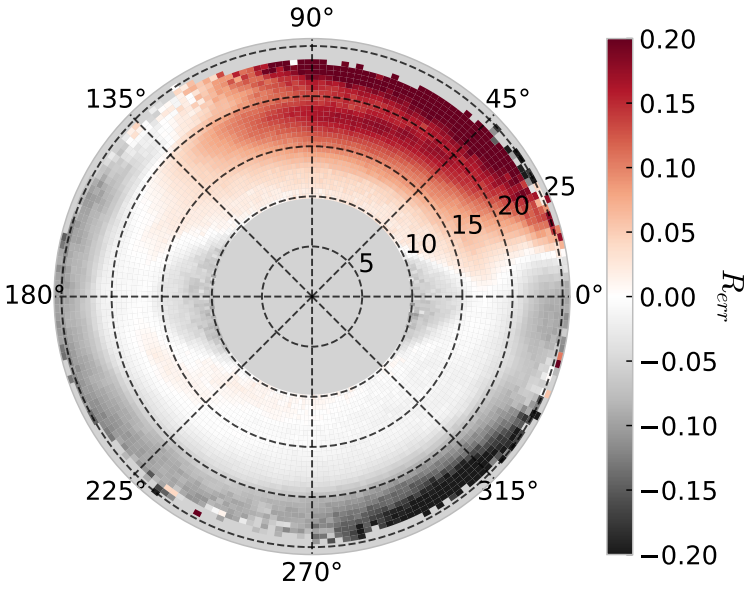


FIGURE 71 – Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm. L'échelle de couleur représente la valeur de R_{err} à une vitesse de vent de surface non biaisée (i.e. telle que donnée par ECMWF) - exemple montrant l'asymétrie

On peut remarquer que l'asymétrie de R_{err} est principalement localisée entre les valeurs -90 (270) et 135 degrés d'azimut relatif *glitter* (GAA : *Glint Azimuth Angle*). Autrement dit, les valeurs semblent plus homogènes entre 135 et 270 degrés.

Les premières conclusions que l'on peut tirer des résultats obtenus en étudiant l'asymétrie de la distribution des erreurs relatives en luminance polarisée se résument en ces points :

— Corrélation entre les faibles valeurs de la luminance polarisée et du degré de polarisation linéaire et l'asymétrie de la distribution des valeurs de R_{err} ;

— L'asymétrie est localisée entre -90 (270) et 135 degrés d'azimut *glitter*.

Pour tester les résultats de nos hypothèses, appliquons un filtre aux mesures POLDER. Les conditions suivantes seront donc ajoutées aux mesures d'intérêt :

— La valeur de la luminance polarisée doit être supérieure à 0.05 ;

— La valeur du degré de polarisation linéaire doit être supérieur à 80% ;

— Les points doivent être situés entre 135 et 270 degrés d'azimut *glitter*.

2.2 Distributions des erreurs relatives

Après applications des filtres utilisant les conditions dérivées des tests sur l'asymétrie de l'erreur relative en luminance polarisée, nous obtenons les figures 72 à 74.

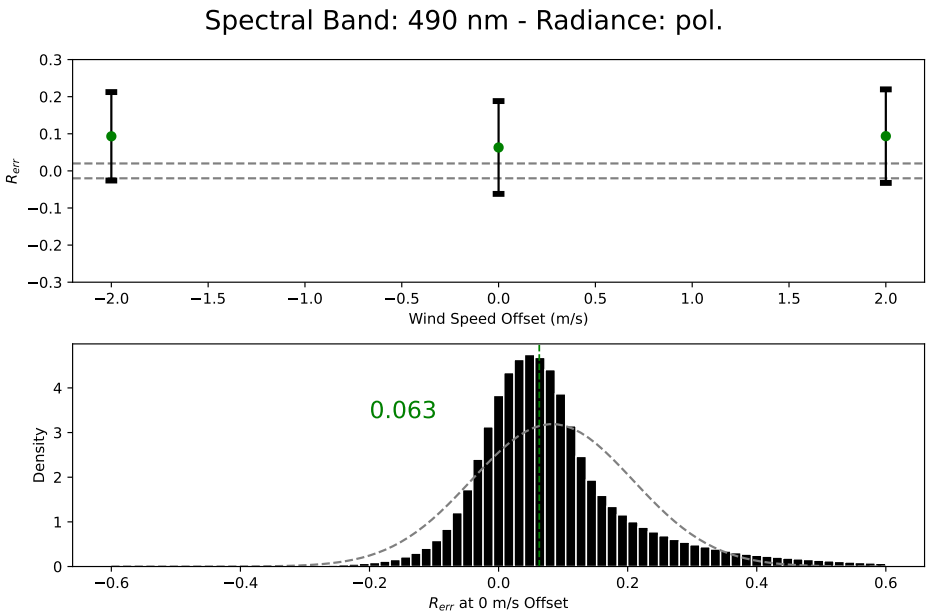


FIGURE 72 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm

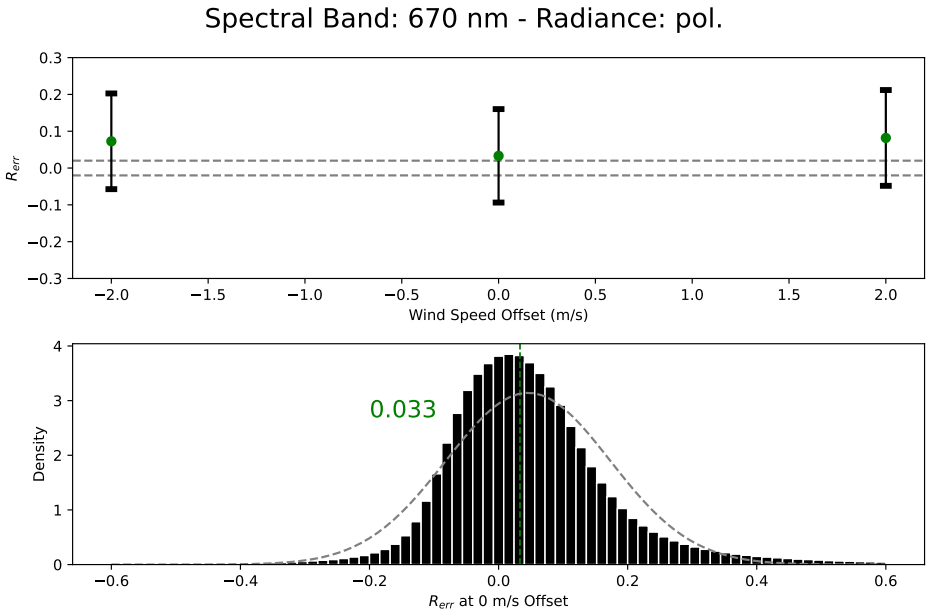


FIGURE 73 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm

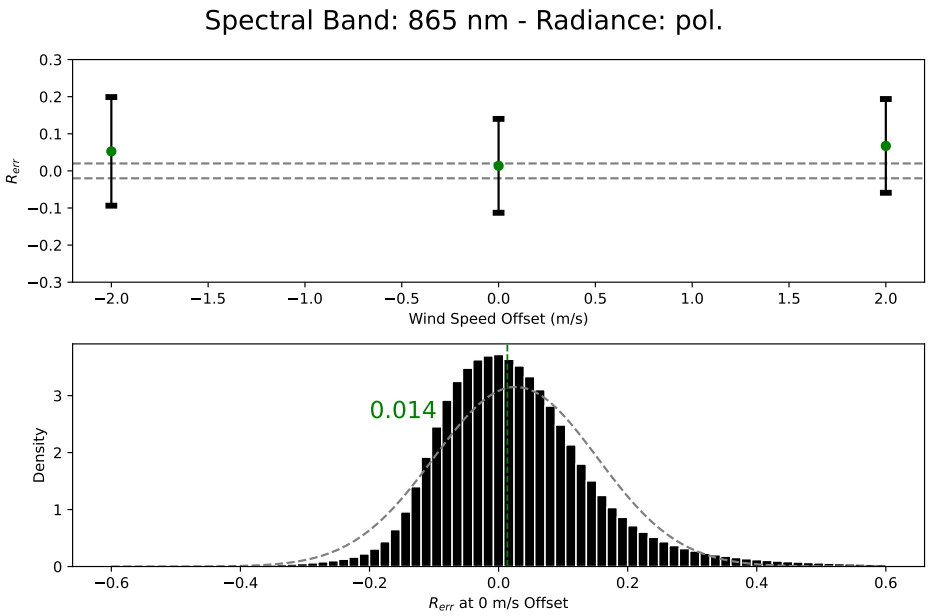


FIGURE 74 – Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm

Comme nous pouvons le remarquer, l'asymétrie des valeurs de l'erreur relative a été réduite de manière significative, nous rapprochant des formes de distributions obtenues pour la luminance totale. Cependant, on peut noter que les valeurs des médianes des distributions de R_{err} sont supérieures (et positives) à celles observées avec les canaux polarisés, avec des valeurs respectives de 0.071, 0.038, et 0.009 contre -0.022, -0.005, et -0.037 pour les valeurs obtenue en luminance totale. Rappelons la définition de R_{err} :

$$R_{err} = \frac{I_{mes} - I_{sim}}{I_{sim}} \tag{40}$$

On remarque donc qu'en luminance polarisée, on tend à systématiquement sous-estimer la valeur de la luminance.

2.3 Distribution géographique des erreurs relatives

La corrélation entre l'asymétrie observée pour les valeurs en polarisation ainsi que la présence de valeurs simulées systématiquement biaisées dans certaines géométries d'observation est un indice particulier. En effet, les zones de *glitter* dont les simulations

ont un biais significatif étant présentes pour des valeurs similaires d'angle d'écart au point spéculaire, il est raisonnable de supposer que ces erreurs sont dues à une mauvaise représentation de certains paramètres géophysiques dans certaines zones géographiques. Pour tester cette hypothèse, observons la distribution géographique des valeurs des erreurs relative R_{err} (cf. figures 75 à 77).

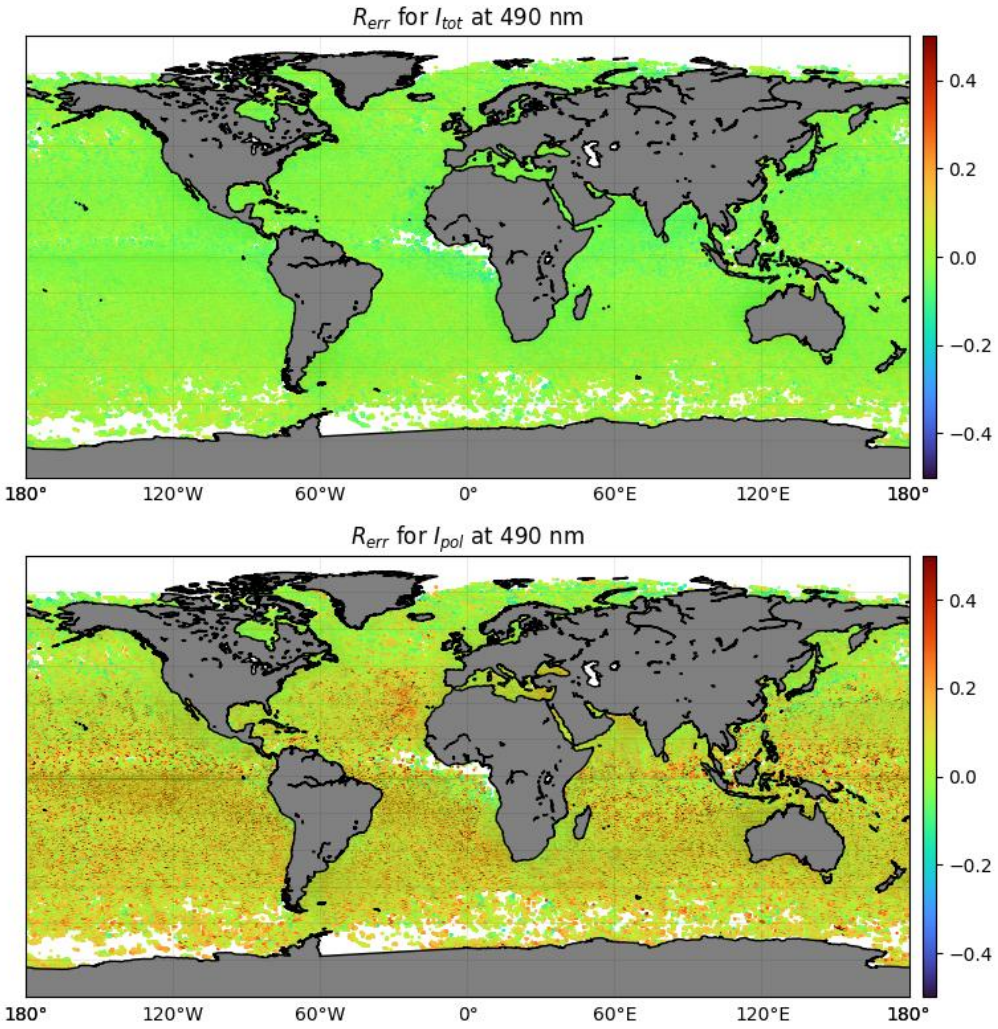


FIGURE 75 – Distribution géographique des erreurs relatives R_{err} à 490 nm en luminance totale (haut) et polarisée (bas).

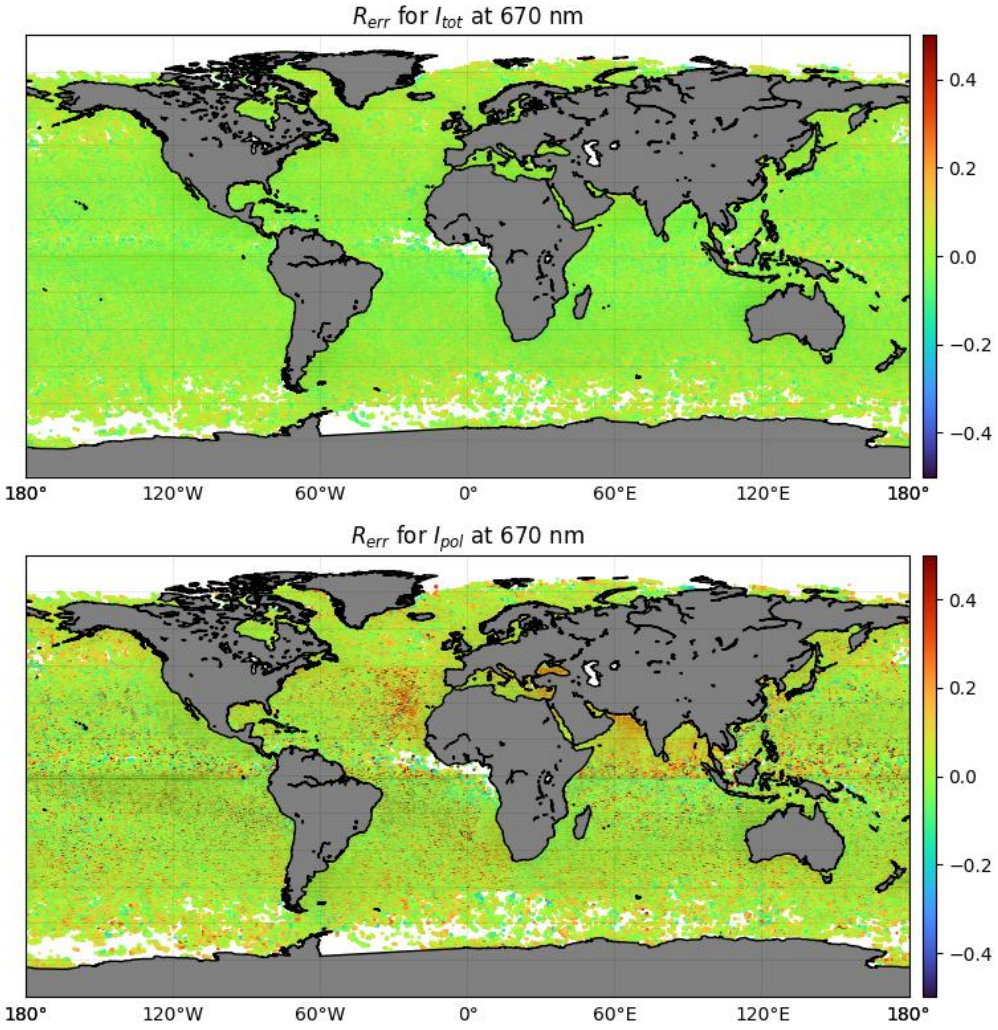


FIGURE 76 – Distribution géographique des erreurs relatives R_{err} à 670 nm en luminance totale (haut) et polarisée (bas).

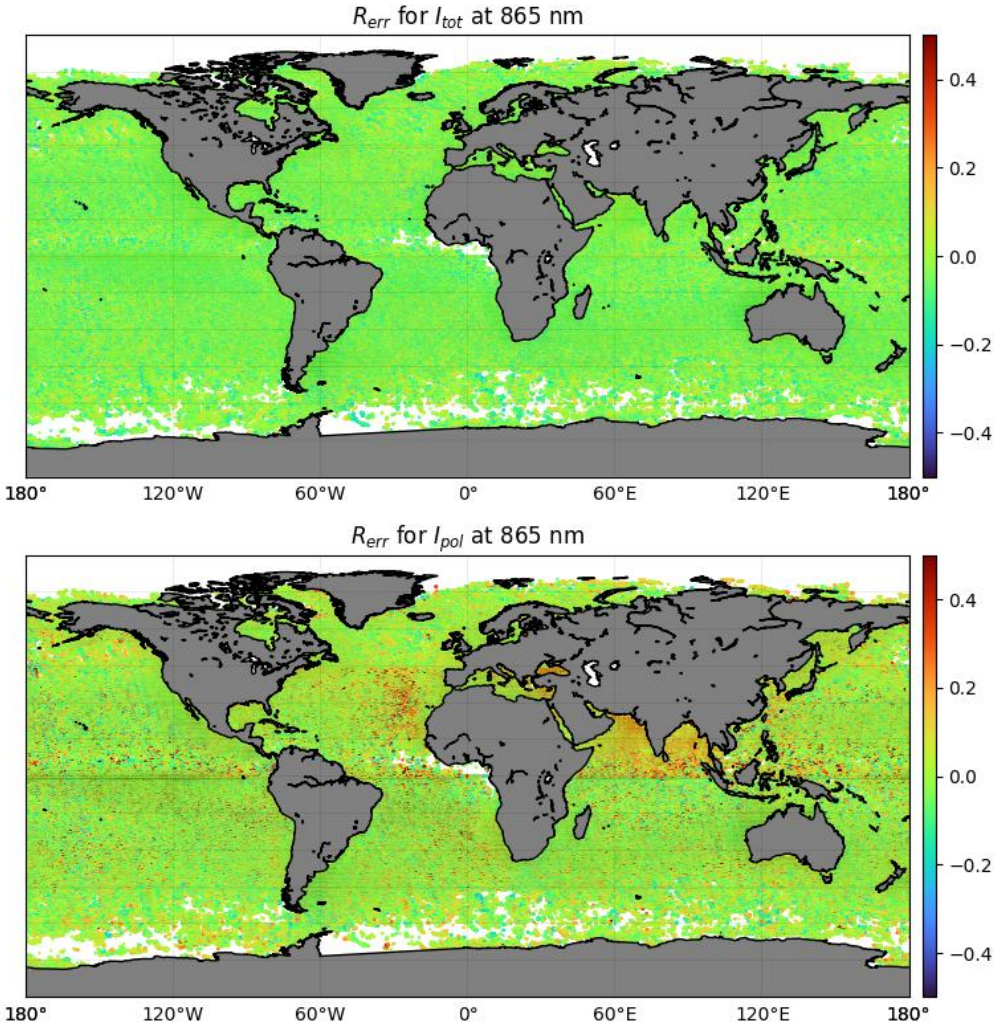


FIGURE 77 – Distribution géographique des erreurs relatives R_{err} à 865 nm en luminance totale (haut) et polarisée (bas).

On remarque qu'en luminance totale, les erreurs relatives semblent uniformément distribuées au niveau du globe. Cependant, les valeurs en luminance polarisée exhibent un comportement particulier, avec notamment des zones spécifiques où les valeurs sont systématiquement biaisées, et ce, pour les trois longueurs d'onde étudiées : au niveau de l'Atlantique nord et l'océan Indien. On remarque également que les valeurs fortement positives de R_{err} à 490 nm (de l'ordre de 40%) sont quant à elles présentent de manière globale, en plus des zones précédemment mentionnées. Ces zones correspondent à des zones de transport d'aérosols désertiques que nous avons initialement choisi d'ignorer en

supposant systématiquement un modèle d'aérosols marins (*Maritime Clean*).

2.4 Étude des résultats par régression linéaire

Comme nous avons déjà présentés les résultats en diagramme polaires en luminance polarisée pour décrire puis étudier le problème d'asymétrie, nous passons donc directement à l'étude des résultats par régression linéaire. Nous utiliserons les valeurs sur lesquelles les conditions visant à minimiser l'asymétrie ont été appliquées. Les figures 78 à 80 montrent les résultats obtenus via la régression linéaire entre les mesures et les simulations en luminance polarisée, à 490, 670, et 865 nm, respectivement.

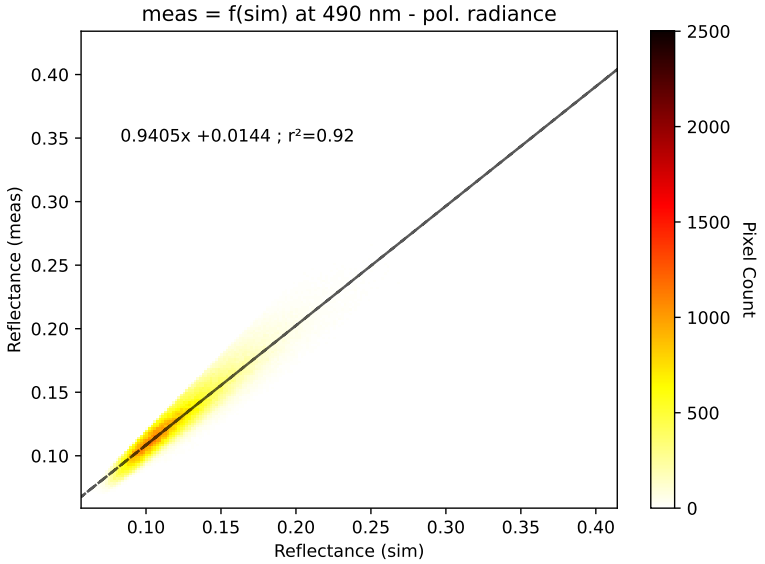


FIGURE 78 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 490 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

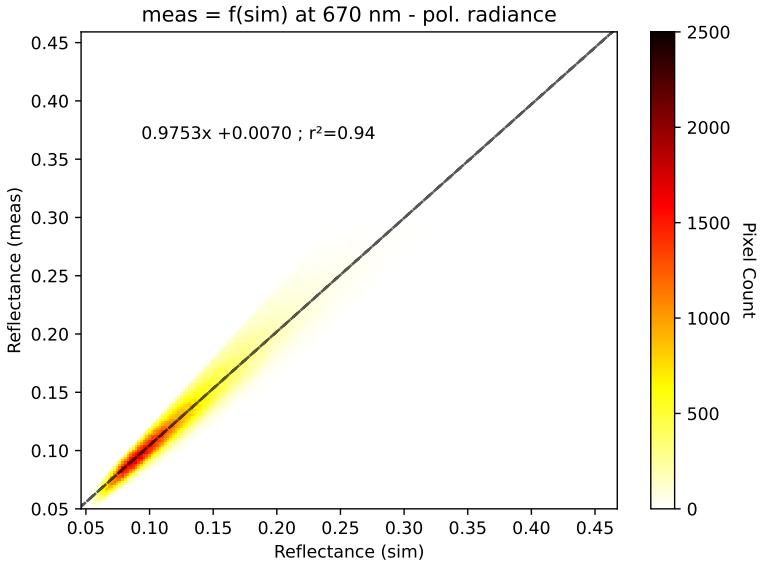


FIGURE 79 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 670 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

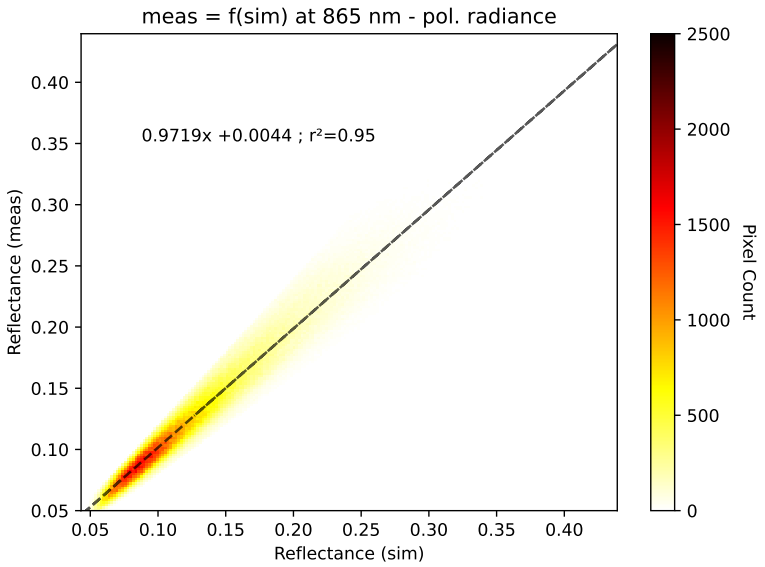


FIGURE 80 – Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 865 nm. En axe des abscisses, les réflectances simulées, en axe des ordonnées, la réflectance POLDER.

De manière similaire aux observations en luminance totale, nous notons que la valeur de pente la plus proche de 1 (pour la régression linéaire) est obtenue à 670 nm (≈ 0.975),

suivie de la valeur à 865 nm (≈ 0.972) puis par celle à 490 nm (≈ 0.941). Également, la valeur de l'ordonnée à l'origine est la plus élevée à 490 nm (≈ 0.144), cependant la dépendance à la longueur d'onde de cette dernière diffère. En effet, la valeur minimale de l'ordonnée à l'origine est obtenue à 670 nm (≈ 0.007), suivie de celle obtenue à 865 nm (≈ 0.0044) ; les valeurs de cette dernière sont également supérieures à celles observées en luminance totale.

IV SUIVI TEMPOREL DE L'ÉTALONNAGE DE POLDER-3

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus pour chaque canal de POLDER (polarisés et non polarisés) pour chaque mois de données entre 2006 et 2010. Le but de cette analyse est de vérifier le comportement de l'instrument le long de sa durée de vie. Une telle approche permet de suivre l'état de l'étalonnage d'un instrument et sa variation dans le temps. La figure 81 montre les médiannes des distributions d'erreurs relatives calculées pour chaque mois de la mission entre 2006 et 2010 et pour chacune des bandes spectrales précédemment étudiées.

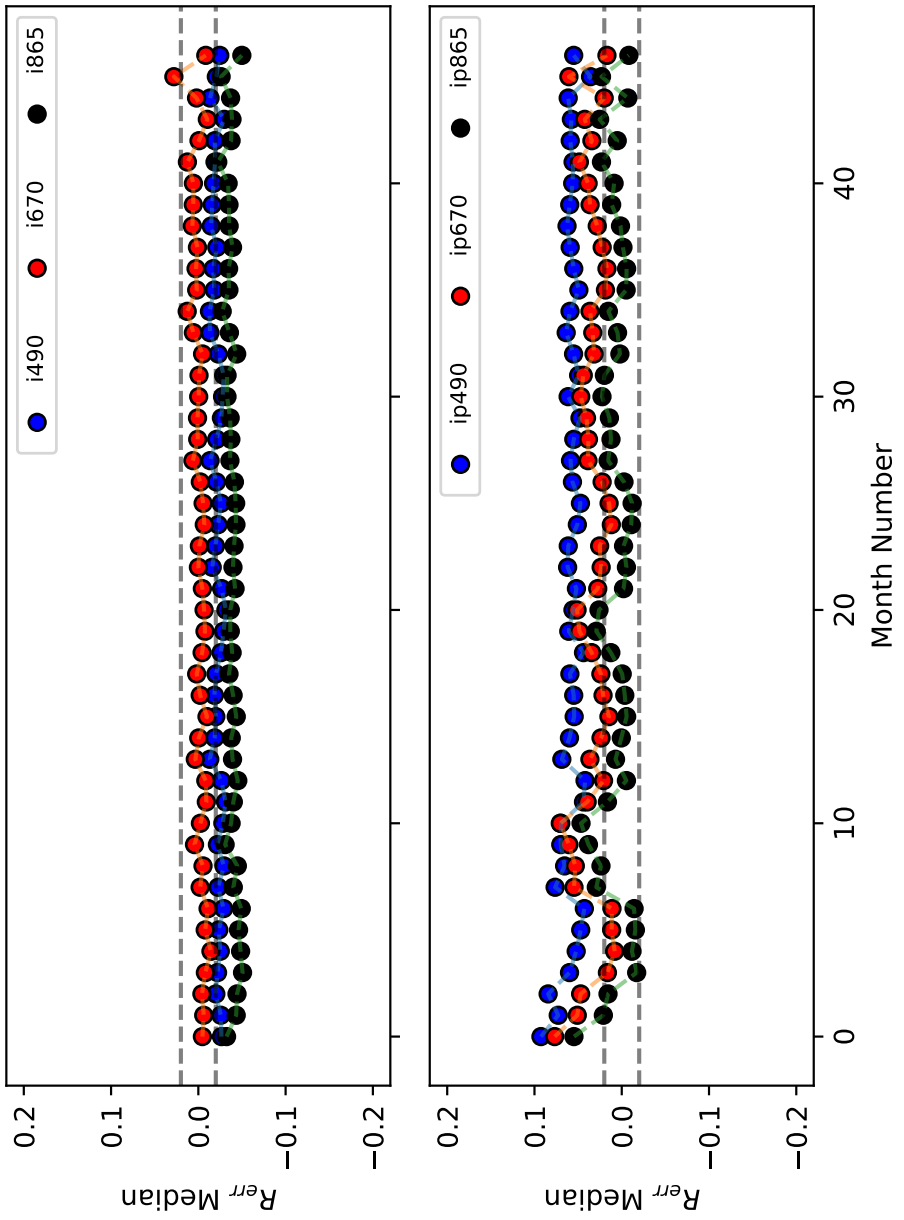


FIGURE 81 – Série temporelle des erreurs relatives en réflectance totale (i490, i670, i865) et polarisée (ip490, ip670, ip865) entre 2006 et 2010. Les lignes en pointillés représentent les valeurs de ±0.02, en référence aux 2% de justesse exigés pour les mesures POLDER/PARASOL ainsi que 3MI.

Pour les valeur en luminance totale, on remarque que les valeurs de R_{err} varient entre ±2% pour la bande à 670 nm. Les bandes spectrales à 490 nm et 865 nm ont des valeurs de l'erreur relative négative en moyenne, sur toute la durée des mois analysés. En luminance

polarisée, ce sont les valeurs de la bande spectrale à 865 nm qui oscillent le plus entre ±2%, tandis que celles à 490 nm et 670 nm montrent un biais positif en moyenne. On note également que les variations mensuelles sont plus importantes en luminance polarisée - on peut voir une oscillation plus importante des valeurs d'un mois à l'autre.

Pour étudier les variations de l'erreur relative d'un mois à l'autre, introduisons un calcul de régression linéaire sur ces dernières, pour chaque bande spectrale. Les figures 82 et 83 montrent les valeurs de R_{err} par bande spectrale, avec leur régression linéaire associée.

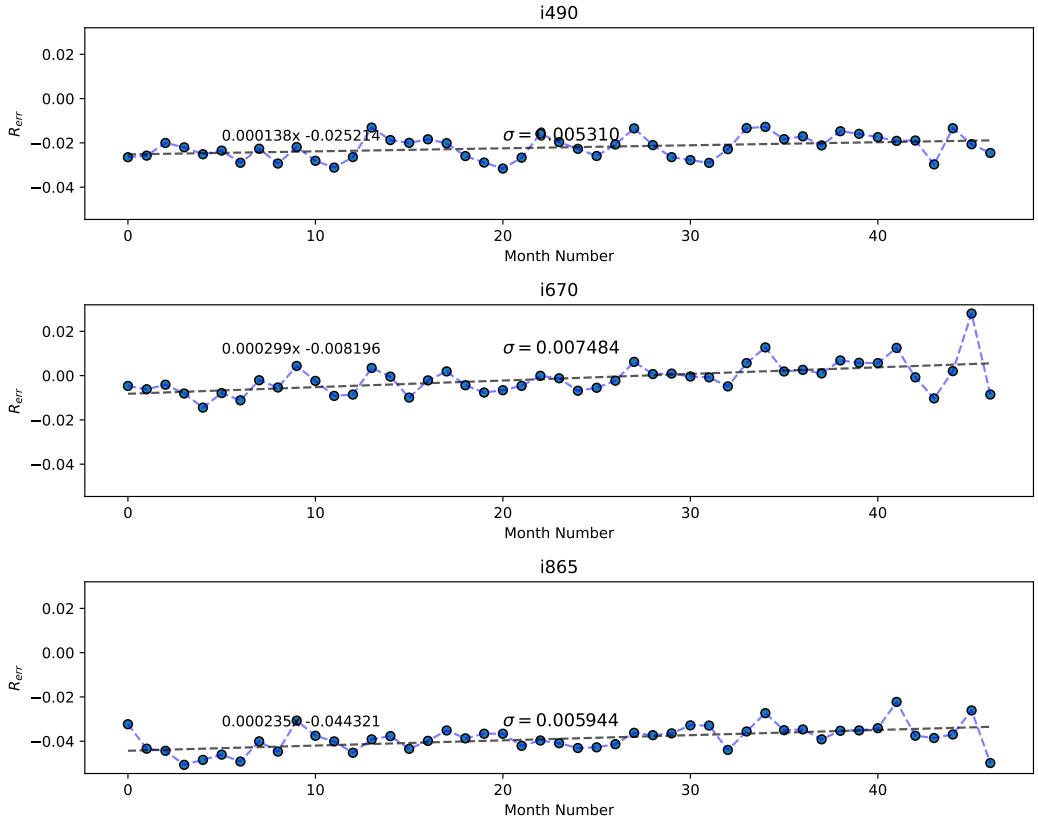


FIGURE 82 – Série temporelle des erreurs relatives en réflectance totale (i490, i670, i865) entre 2006 et 2010. Une régression linéaire est calculée pour chaque série temporelle associée à une longueur d'onde.

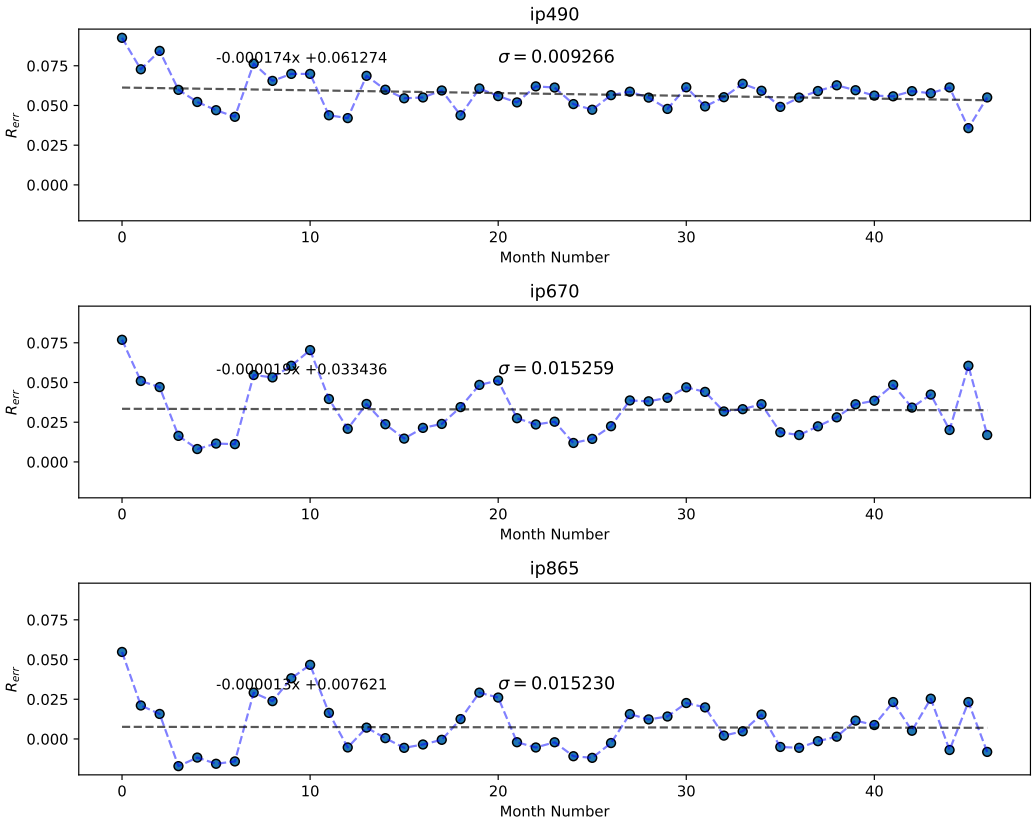


FIGURE 83 – Série temporelle des erreurs relatives en réflectance polarisée (ip490, ip670, ip865) entre 2006 et 2010. Une régression linéaire est calculée pour chaque série temporelle associée à une longueur d'onde.

Appelons a_w le coefficient directeur de la régression linéaire calculée sur les valeurs de R_{err} pour la bande spectrale w.

En luminance totale, on observe une valeur positive de a à toutes les longueurs d'onde, avec des ordres de grandeur similaires. En luminance polarisée, les valeurs de a sont toutes négatives. L'ordre de grandeur de a_{ip490} est similaire aux valeurs en luminance totale. Cependant, a_{ip670} et a_{ip865} sont un ordre de grandeur en dessous, donnant ainsi une dérive des valeurs négligeables sur toute la durée étudiée. Comme noté par une première observation qualitative de la Figure 81, on remarque que les valeurs de l'écart type σ (visible sur chaque graphe des figures 82 et 83) est en moyenne deux fois supérieur pour la luminance polarisée.

V CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de validation de la méthode d'étalonnage absolu utilisant la réflexion spéculaire à la surface de l'océan. Tout d'abord, nous avons montré la distribution des pixels choisis par l'algorithme de sélection via une application de filtres sur les données exogènes ainsi que la sélection des géométries les moins sensibles à la vitesse du vent de surface (déterminées par le modèle de Cox et Munk). On a pu remarquer que les points d'intérêts étaient présents de manière globale. Quelques zones montrant une densité supérieure à la moyenne ont été observées au niveau de l'océan pacifique proche de l'équateur ainsi qu'au niveau de zones côtières (côtes ouest des États-Unis d'Amérique, Mexique, Australie, et en mer d'Arabie). Il est également intéressant de noter que les valeurs de l'AOT à 550 nm des pixels sélectionnés peuvent être considérées faibles, et relativement proche des conditions pour l'étalonnage absolu utilisant la diffusion Rayleigh (cf. Chapitre II sous-section 1.1). Cette similarité pourra potentiellement servir à maximiser les points d'étalonnage pouvant bénéficier d'une application de plusieurs méthodes d'étalonnage. Par la suite, nous avons pu simuler avec une précision acceptable les observations en luminance totale, et ce, sans ajustements particuliers. Les distributions des erreurs relatives R_{err} calculées étaient satisfaisantes en terme de symétrie et de degré de voussure. Les médianes de R_{err} pour les simulations avec une vitesse de vent biaisée de ± 2 m/s sont également relativement proches de la valeur simulée en utilisant la valeur "vraie", indiquant la présence d'une zone d'invariance, comme les tests de sensibilités l'avaient montrés. L'une des observations les plus notables concerne les résultats pour les canaux polarisés. En effet, nous avons observé de fortes asymétries sur les mesures simulées. Nos tests ont pu déterminer un lien entre ces dernières aux faibles valeurs de la luminance polarisée et du degré de polarisation linéaire. Nous avons également déterminé que certaines géométries d'observation du *glitter* contribuaient systématiquement à l'asymétrie observée. Un simple filtre sur les valeurs de luminance polarisée, du $DOLP$, ainsi que sur l'angle d'écart au *glitter* (θ_{glint}) suffit à grandement réduire l'asymétrie observée. L'analyse de la distribution géographique

des erreurs relatives nous a également montré que les biais étaient principalement reliés à certaines zones géographiques où la présence d'aérosols désertiques est importante. D'après les tests de sensibilités (cf. Chapitre IV), on peut émettre l'hypothèse que certains paramètres géophysiques (en particulier le modèle d'aérosol) sont encore mal pris en compte et pourraient donc être mieux représentés. Il est également probable qu'une meilleure détection de la contamination sous-pixel permettrait d'améliorer encore nos résultats. Dans cette perspective, la synergie entre 3MI et l'instrument VII à plus haute résolution spatiale (500 m) sera sans doute très utile lors de la mise en oeuvre de notre méthode pour l'étalonnage de 3MI.

Cependant, nous ne pouvons pas exclure à ce stade que des défauts résiduels dans le modèle du *glitter* ou dans l'étalonnage de POLDER soient responsables des asymétries observées. L'orbite héliosynchrone de POLDER conduit en effet à observer systématiquement certaines géométries du *glitter* sur des zones spécifiques du détecteur. Il est donc possible que des défauts mal caractérisés de la sensibilité de l'optique à la polarisation soient responsables des anomalies d'asymétrie observées. Ceci nécessiterait un travail plus approfondi qui reposerait sur l'analyse des résidus obtenus dans la géométrie du détecteur.

Finalement, nous avons abordé l'étude de la dérive temporelle de l'étalonnage en analysant les valeurs de l'erreur relative calculée mensuellement, pour les mois allant de 2006 à 2010. De cette étude, nous avons pu mettre en évidence une légère dérive positive (pente positive sur la régression linéaire) pour les valeurs de l'erreur relative en luminance totale. Si l'explication la plus probable est une dérive résiduelle mal prise en compte dans l'étalonnage de POLDER-3, il n'est pas possible d'exclure totalement sur la base de nos analyses, qu'une tendance pluriannuelle d'un paramètre géophysique d'influence sur la simulation du *glitter* puisse en être responsable. Pour les canaux polarisés, la dérive est légèrement négative à 490 nm, et négligeable à 670 et 865 nm. Cependant, l'écart type sur les variations mensuelles est plus important pour les canaux polarisés (les valeurs oscillent davantage d'un mois à l'autre par rapport aux canaux non-polarisés). Il conviendrait ici

d'étudier plus précisément la raison de cette variabilité inter-mensuelle et notamment la possibilité d'un cycle saisonnier associé aux paramètres géophysiques influençant la simulation du *glitter*.

Chapitre VII

Conclusion générale et perspectives

Au fil des années, depuis l'avènement de la télédétection spatiale, une multitude de satellites d'observation ont été lancés. Ces derniers sont équipés d'instruments variés offrant des performances radiométriques accrues pour l'étude de l'atmosphère terrestre. En parallèle avec les avancées scientifiques et technologiques permettant d'acquérir davantage d'informations sur les systèmes observés, les problématiques et exigences en termes d'étalonnage ont également augmenté. Dans les travaux présentés dans cette thèse, nous avons exposé l'état de l'art en matière d'étalonnage en vol des instruments, en mettant un accent particulier sur les radiomètres imageurs. Parmi les cibles naturelles modélisables utilisées pour étalonner les instruments en orbite autour de la Terre, nous nous sommes focalisés sur le phénomène de la réflexion spéculaire à la surface de l'océan, ou *glitter*.

L'étalonnage à partir de la réflexion spéculaire (*glitter*) s'est révélé être une méthode particulièrement efficace ; elle offre plusieurs avantages, notamment le fait que le signal réfléchi soit fortement polarisé, avec des intensités élevées. Cependant, le principal paramètre limitant cette méthode est l'incertitude sur la vitesse du vent de surface. De plus, la connaissance du modèle d'aérosol est également un élément non négligeable dans les incertitudes de simulation du signal au sommet de l'atmosphère. Ces dépendances ont jusqu'à présent limité l'utilisation du *glitter* pour l'étalonnage absolu, et son usage a été privilégié pour les méthodes d'étalonnage relatif (inter-bande, *cross-calibration*, etc.). Cependant, une méthode d'étalonnage absolu utilisant le *glitter* de manière opérationnelle pourrait offrir un nombre important d'avantages notamment en termes de couverture spectrale de la méthode et de statistique des observations utilisables. Ceci a motivé, dans le cadre de la mission 3MI, à revisiter les possibilités d'utiliser le glitter pour l'étalonnage absolu en mettant à profit l'amélioration des connaissances concernant les paramètres d'influence dans la simulation de son signal, en particulier les propriétés des aérosols et de la vitesse du vent.

À cet effet, nous avons entamé nos recherches par des analyses de sensibilité aux principaux paramètres géophysiques (cf. Chapitre IV). Nous en avons tiré la conclusion

que l'incertitude sur la vitesse du vent de surface reste le paramètre principal à maîtriser pour obtenir des simulations de qualité suffisante pour l'étalonnage en vol. Cependant, nous avons également noté qu'une mauvaise représentation du modèle d'aérosol (par exemple, supposer des aérosols marins lorsqu'il s'agit d'aérosols désertiques) a des effets drastiques sur la réflectance du *glitter* observée au TOA, et ce malgré des valeurs d'AOT de l'ordre de 0.10. Nous avons aussi observé une sensibilité non négligeable à la couleur (contenu en chlorophylle-a) et à la salinité de l'eau (principalement dans le SWIR). Les différents tests de sensibilité réalisés nous ont menés vers une hypothèse qui a fini par devenir le concept clé sur lequel reposent les travaux et les résultats novateurs de cette thèse. Ce concept est celui de l'utilisation d'une zone de faible sensibilité à la vitesse du vent au niveau du *glitter*. La nature de la distribution des valeurs de réflectances *glitter* déterminée par le modèle de Cox et Munk est telle qu'il existe un nombre de directions dans chaque plan de réflexion où la variation relative de la réflectance en fonction de la vitesse du vent est faible (cf. Figure 37). La zone de faible sensibilité à la vitesse du vent est particulièrement utile car elle permet de sélectionner des points d'observation où l'incertitude sur la vitesse du vent a un impact minimal sur les réflectances mesurées ou simulées. Les résultats ont montré qu'il est possible dans cette zone de faible sensibilité à la vitesse du vent de simuler les mesures de luminance (totale et polarisée) avec une précision satisfaisante, c'est-à-dire avec des incertitudes inférieures à 2%.

Cependant, nous avons découvert bien plus tard lors de l'élaboration de ces travaux que l'hypothèse que nous émettions pour la définition du critère de sélection, et selon laquelle la variation monotone de la réflectance TOA en fonction de la vitesse du vent aurait un impact minimal est fausse. En effet, nous avons par la suite découvert qu'il est nécessaire de définir un autre critère pour sélectionner les directions les moins sensibles à la vitesse du vent. Ceci étant, nos tests (cf. Figure 41 ainsi que les figures 123, 124, 125) ont montré que les directions définissant la zone dite optimale ne changent pas si on définit d'autres critères de sélection (qui prennent en considération la non-monotonie de la réflectance). De plus, supposer une incertitude de 1 m/s sur la vitesse du vent devient

nécessaire pour la redéfinition du critère car il est impossible d'atteindre une précision suffisante avec 2 m/s si on prend en considération la non-monotonie de la réflectance spéculaire au TOA. Nous avons pu tester l'effet de la prise en compte du critère défini dans l'équation 32 qui va définir une zone en utilisant le rapport entre l'écart-type des valeurs de la réflectance utilisées et leur moyenne. Cet estimateur a d'ores et déjà permis d'observer un effet drastique sur la dispersion des valeurs de la différence relative. La Figure 84 montre les différences relatives obtenues en affinant la sélection via le critère précédemment mentionné.

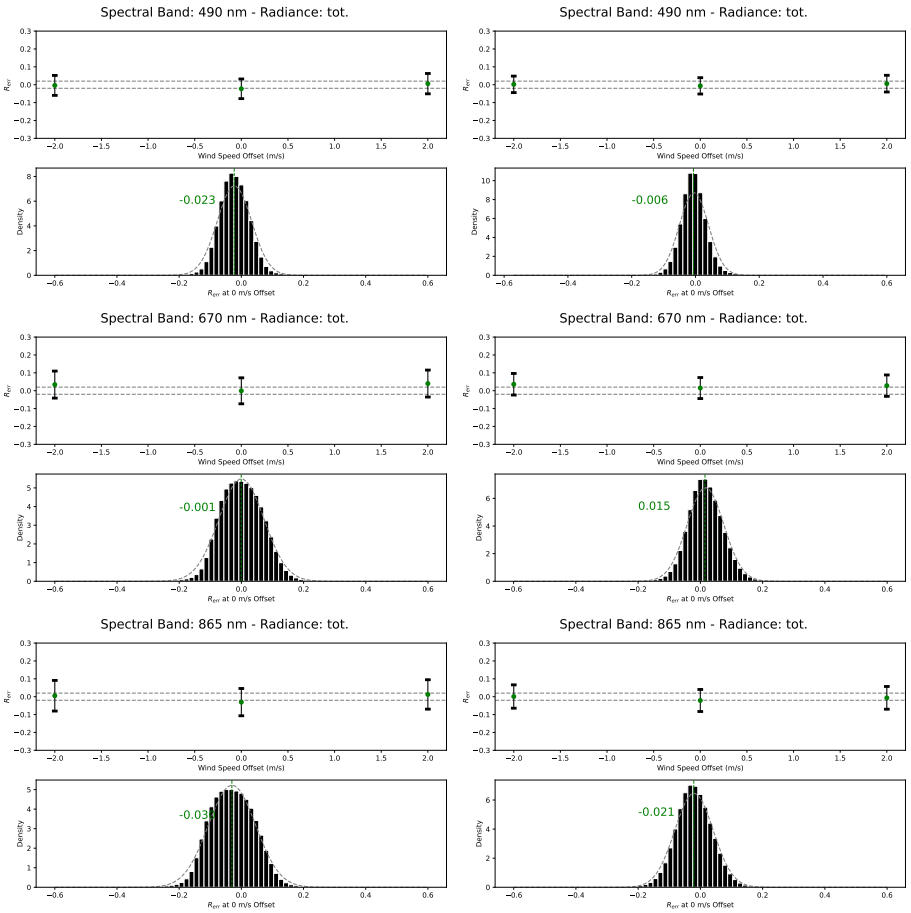


FIGURE 84 – Erreurs relatives avec un critère ne supposant pas la monotonie de la réflectance TOA du *glitter*. La colonne de gauche montre les résultats déjà présentés dans le précédent chapitre. La colonne de droite montre les différences relatives avec le critère de sélection défini par l'équation 32.

Le critère qui a été sélectionné limite le ratio de l'équation 32 à 0.5 % pour une

incertitude sur la vitesse du vent de surface de 1 m/s. Autrement dit, l'écart-type entre les réflectances à $I_{v-1m/s}$, I_v, et $I_{v+1m/s}$ divisé par la moyenne de ces valeurs doit être inférieur à 0.5 %. Ceci est un test préliminaire que nous avons effectué pour quantifier l'impact d'une approche prenant en considération la non-monotonie de la réflectance *glitter* TOA. Comme le montre la Figure 84, on a observé une réduction de la dispersion des valeurs de la différence relative. Cependant, nous n'avons à ce stade pas effectué de tests plus approfondis. En effet, bien que l'effet sur les distributions soit indéniable, nous ne pouvons pas conclure sur ces résultats, notamment à cause du fait que l'effet d'une meilleure sélection des pixels en général doit également être quantifié (par exemple : réduction de la proportion de pixels proches des zones oligotrophes, ou encore mieux filtrer les géométries potentiellement affectées par la couverture nuageuse).

Cependant, l'application de la méthode aux données de la mission POLDER3/PARASOL, prises comme référence, a permis de confirmer la capacité à simuler la réflectance TOA avec une sensibilité à la vitesse du vent significativement réduite. L'analyse statistique des différences entre données POLDER et nos simulations dans la zone de faible sensibilité à la vitesse du vent a en effet permis de démontrer l'excellente corrélation entre celles-ci. Les très faibles biais résiduels observés sont tout à fait compatibles avec les incertitudes subsistantes concernant l'étalonnage de l'instrument POLDER3. Par ailleurs, la stabilité temporelle des résultats obtenus pour chaque mois de la période considérée, permet de conforter la validité de la méthode. Cette analyse temporelle a également mis en évidence une très légère dérive pour certains canaux qu'il conviendrait d'analyser plus en détail pour confirmer un potentiel léger défaut de l'étalonnage POLDER3.

Les résultats en luminance polarisée sont ceux qui ont été les moins satisfaisants même s'ils ouvrent des perspectives très intéressantes pour l'étalonnage en polarisation. Nous avons observé une asymétrie au niveau des valeurs de l'erreur relative. Cette observation a été reliée à des valeurs faibles de la luminance polarisée et du $DOLP$. Par la suite, nous avons remarqué que les points problématiques étaient corrélés avec certaines zones géographiques (notamment certaines zones côtières) et une part importante des

incertitudes observées sur ces régions est probablement liée à la présence d'aérosols absorbants et/ou non sphériques naturellement mal représentés par le modèle d'aérosol océanique retenu pour nos traitements. Cependant, nous n'avons pas approfondi l'investigation à ce sujet. Il est également possible que ces différences soient dues à une mauvaise représentation d'autres paramètres géophysiques ou à des défauts de la caractérisation de la sensibilité à la polarisation de l'optique de l'instrument POLDER3. Il conviendrait là aussi d'étendre les investigations pour mieux identifier les limites et possibilités offertes par notre méthode pour le suivi en vol de la sensibilité à la polarisation d'instruments imageurs.

De plus, la qualité de la sélection de la zone géométrique due à notre critère de base (variation monotone de I_v et incertitude de 2 m/s sur la vitesse du vent) est probablement directement liée à ces observations ; cela est d'autant plus probable que les mesures en polarisation seront davantage sensibles à cette sélection au vu de la nature du phénomène observé (le *glitter* est très directionnel et polarisé).

Néanmoins, La méthode que nous proposons devrait contribuer à améliorer les capacités d'étalonnage de 3MI, mais également celles des autres instruments capables d'observer le *glitter*. La force de l'approche réside dans la possibilité d'obtenir des simulations précises avec un minimum d'hypothèses. Les résultats décrits dans cette thèse utilisent un nombre limité de filtres sur les données exogènes et les incertitudes retenues pour ces paramètres sont très largement compatibles avec les capacités actuelles d'observation ou de modélisation de ces paramètres.

Les travaux de cette thèse représentent donc une avancée significative dans le domaine des méthodes d'étalonnage en vol des instruments de télédétection. Nous avons montré, et ce malgré l'utilisation d'hypothèses fortes, qu'il est possible d'utiliser la réflexion spéculaire à la surface de l'océan de manière opérationnelle pour étalonner les radiomètres imageurs. Nous avons décrit une approche novatrice ayant un fort potentiel. En effet, bien que nécessitant de claires améliorations, elle pourrait tout à fait devenir une méthode efficace et robuste permettant de répondre aux exigences en termes de

précision d'étalonnage, ainsi qu'une possibilité de suivi temporel de celui-ci. Le concept de zone de faible sensibilité à la vitesse du vent au niveau du *glitter* offre une base solide pour améliorer et étendre les capacités d'étalonnage des futurs instruments spatiaux. En plus d'être utile pour l'étalonnage, ce concept pourra être exploité en synergie avec les algorithmes d'inversion des propriétés des aérosols et des nuages, augmentant ainsi leur efficacité.

L'une des prochaines étapes cruciales sera de tester plus en profondeur la méthode d'étalonnage par réflexion spéculaire à travers des campagnes de validation plus vastes, en utilisant plusieurs instruments différents, en tenant compte des variations saisonnières et géographiques des paramètres géophysiques. De plus, il sera crucial de proprement quantifier l'effet des zones oligotrophes et leur impact sur les pixels sélectionnés, voire de les éviter de manière systématique. Également, et comme nous l'avons plus tard découvert, un meilleur estimateur pour la définition de la zone de faible sensibilité à la vitesse du vent doit être défini. Les tests préliminaires ont montré que le critère se basant sur l'écart-type des réflectances pourrait être une piste envisageable, mais davantage de tests devront être effectués. L'optimisation des algorithmes pour un traitement en temps réel ou quasi temps réel constituera également une étape clé pour répondre aux besoins opérationnels des missions futures.

Les méthodes et résultats de cette thèse ont des implications significatives pour les futures missions de télédétection. L'adoption de la méthode du *glitter* pour l'étalonnage en vol pourrait devenir une norme pour les instruments de nouvelle génération destinés à des applications climatiques et environnementales, notamment grâce à la simplicité de son implémentation ainsi qu'à la robustesse des hypothèses qui la sous-tendent.

Enfin, l'amélioration continue des algorithmes et des modèles, en parallèle avec les avancées technologiques des instruments, permettra de relever de nouveaux défis scientifiques et opérationnels. Les connaissances acquises dans cette thèse contribueront non seulement à l'amélioration de l'étalonnage en vol, mais aussi à une meilleure compréhension des processus atmosphériques et océaniques étudiés par les missions de

télédétection.

Annexe

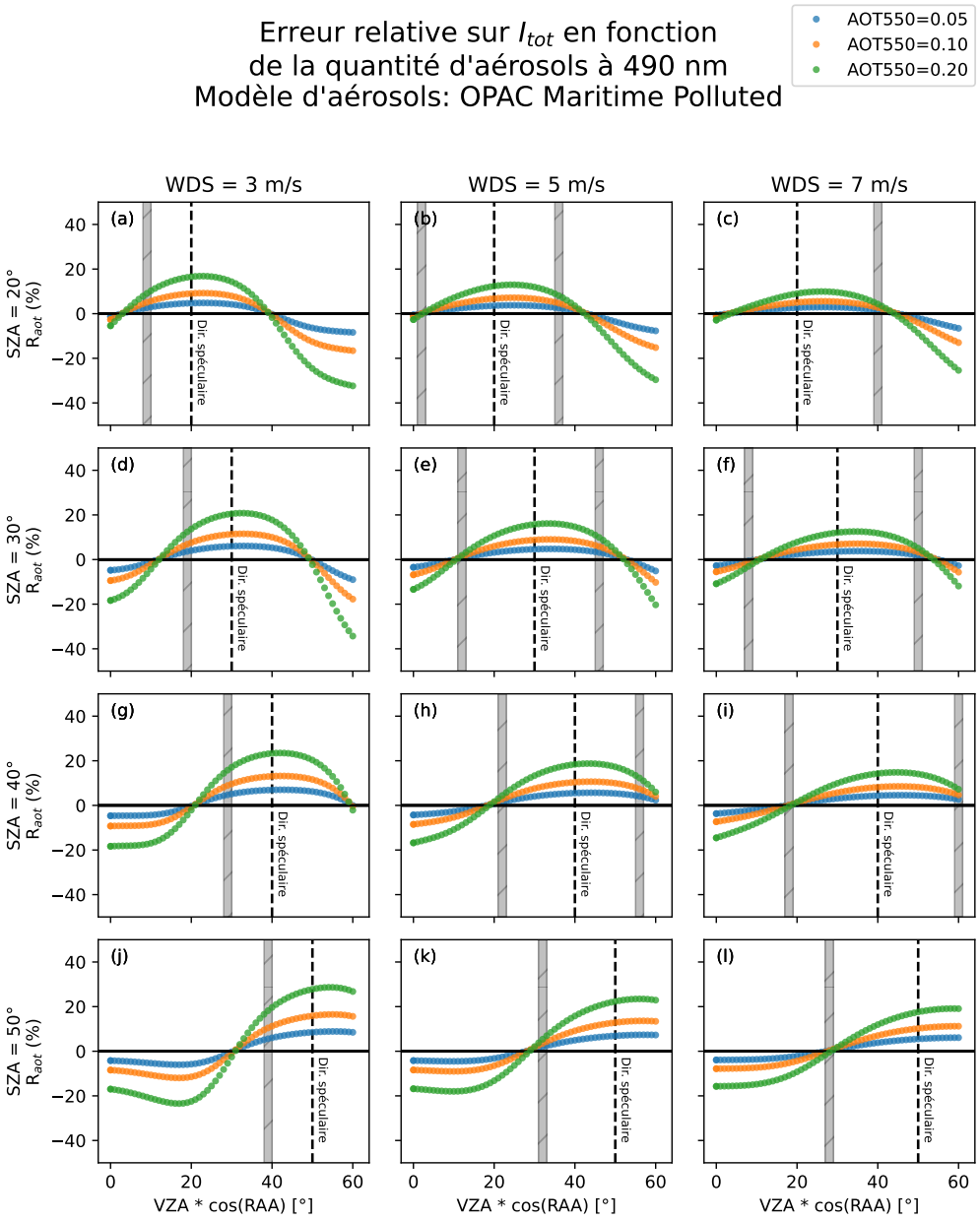


FIGURE 85 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

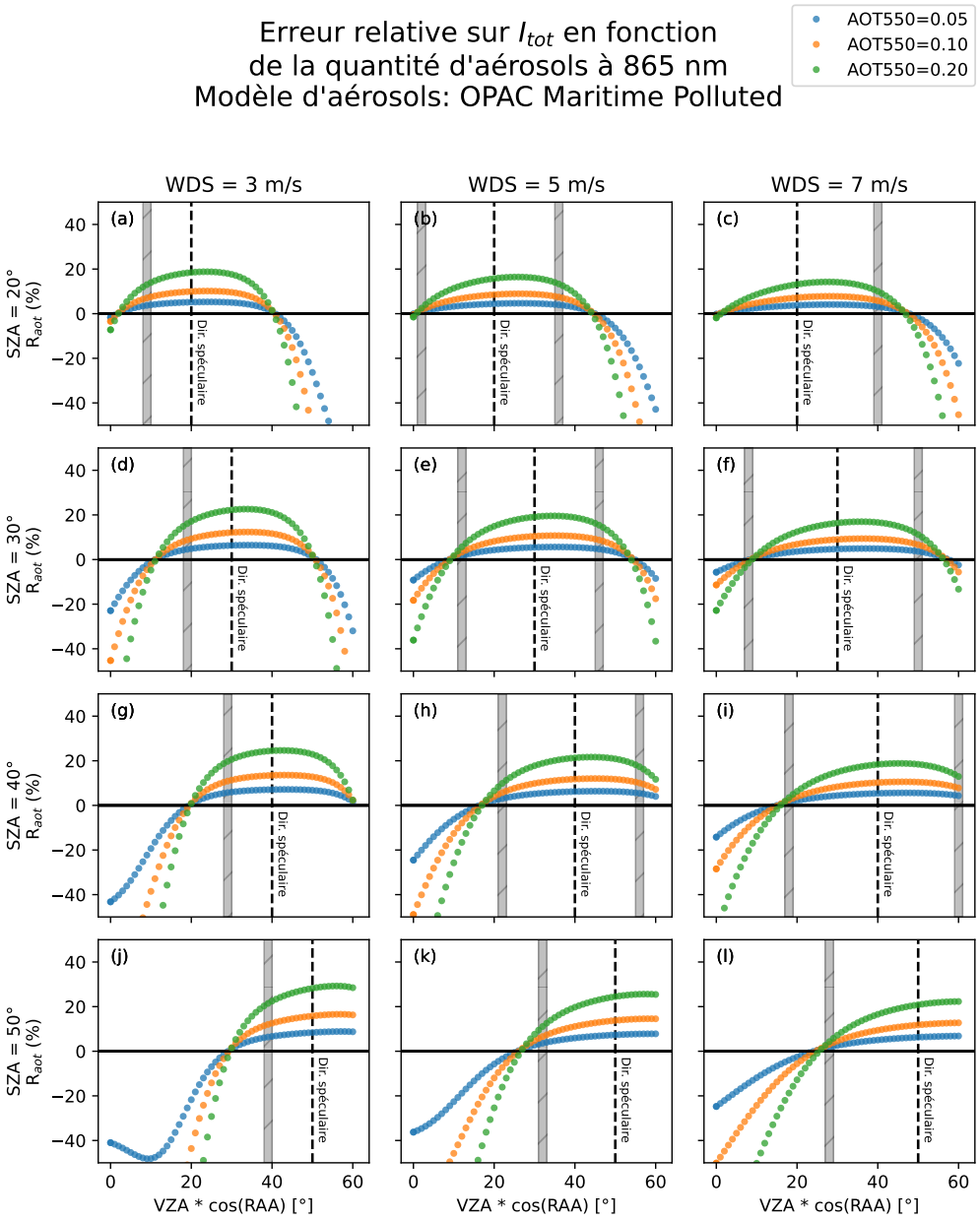


FIGURE 86 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

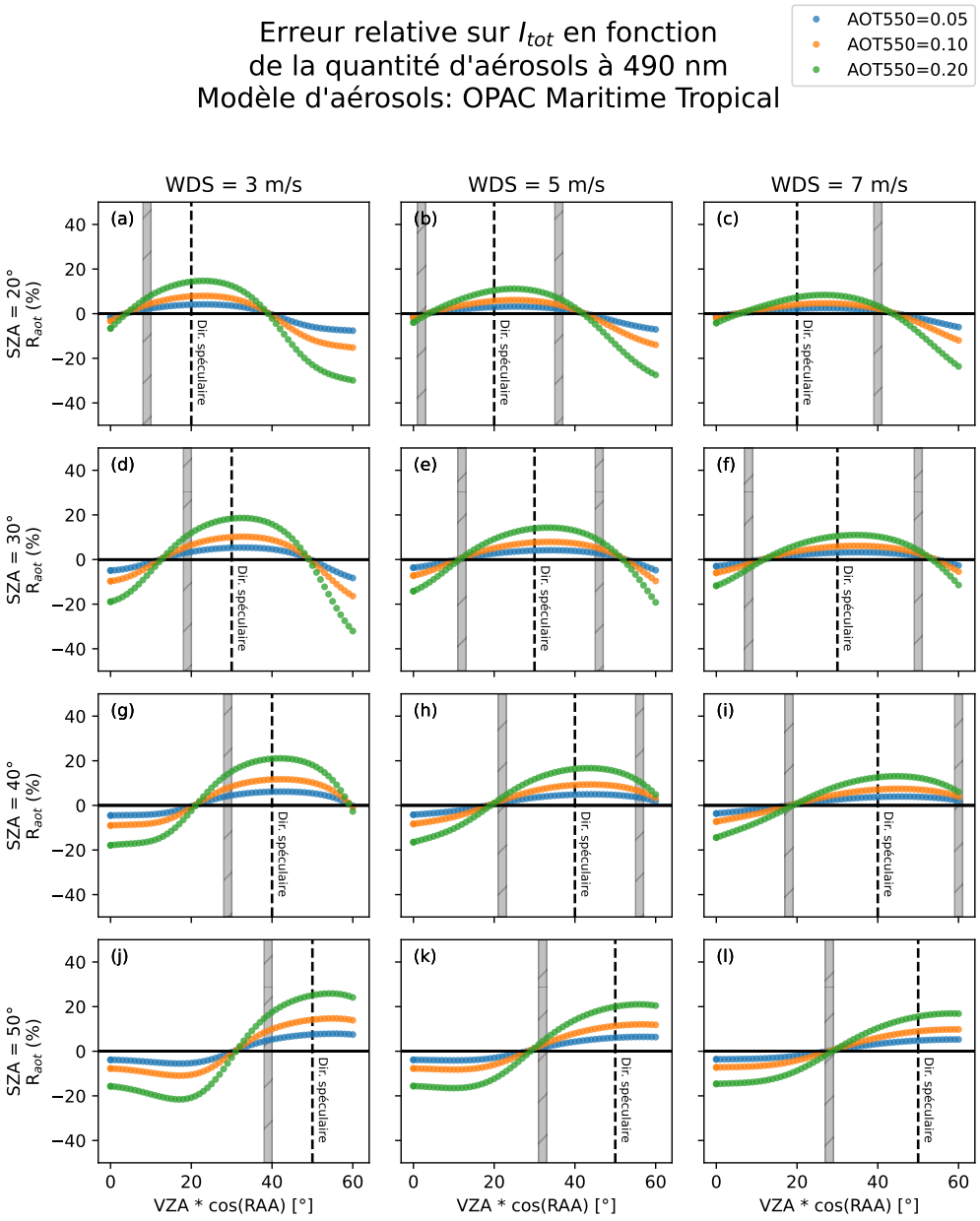


FIGURE 87 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Tropical*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

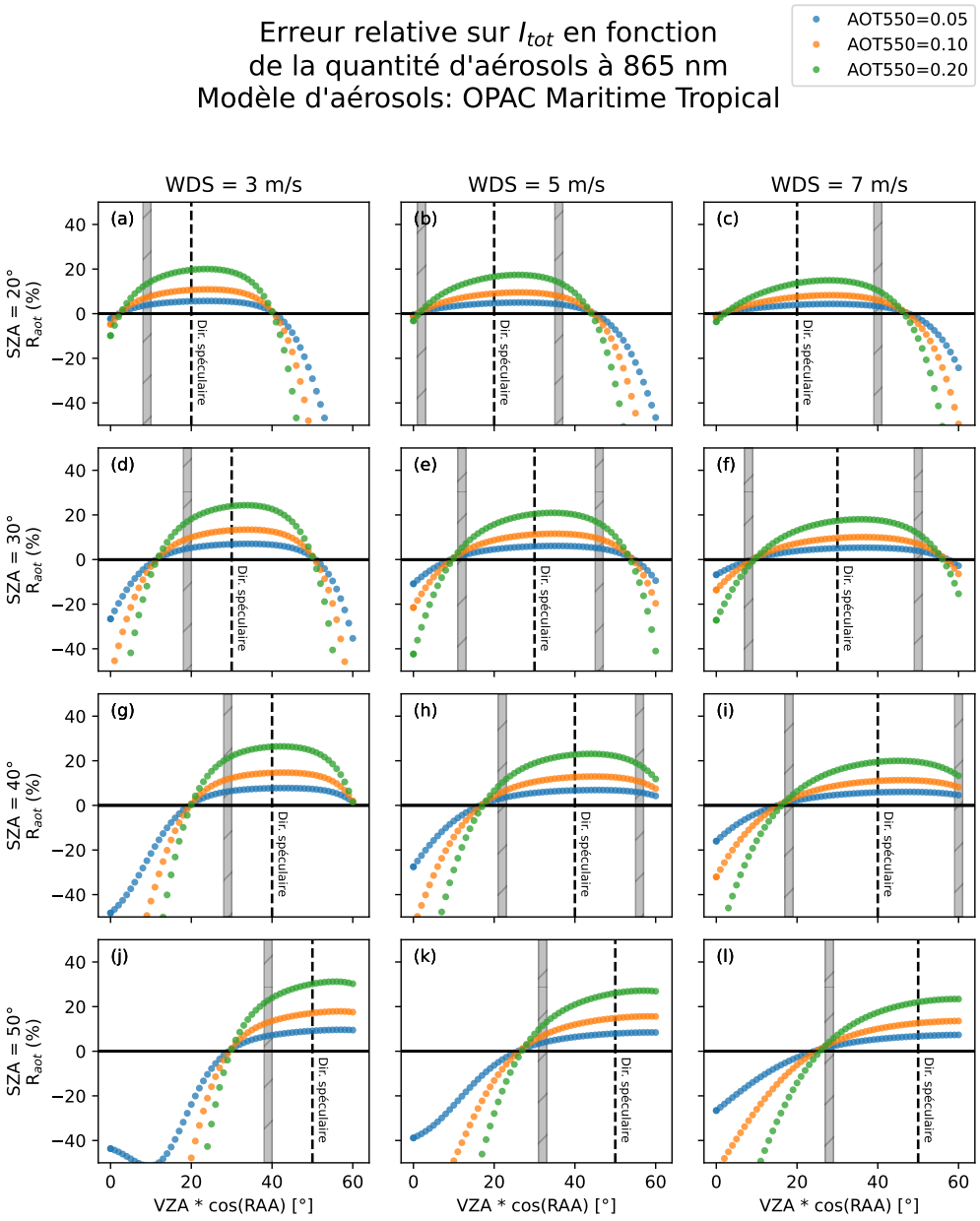


FIGURE 88 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Tropical*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

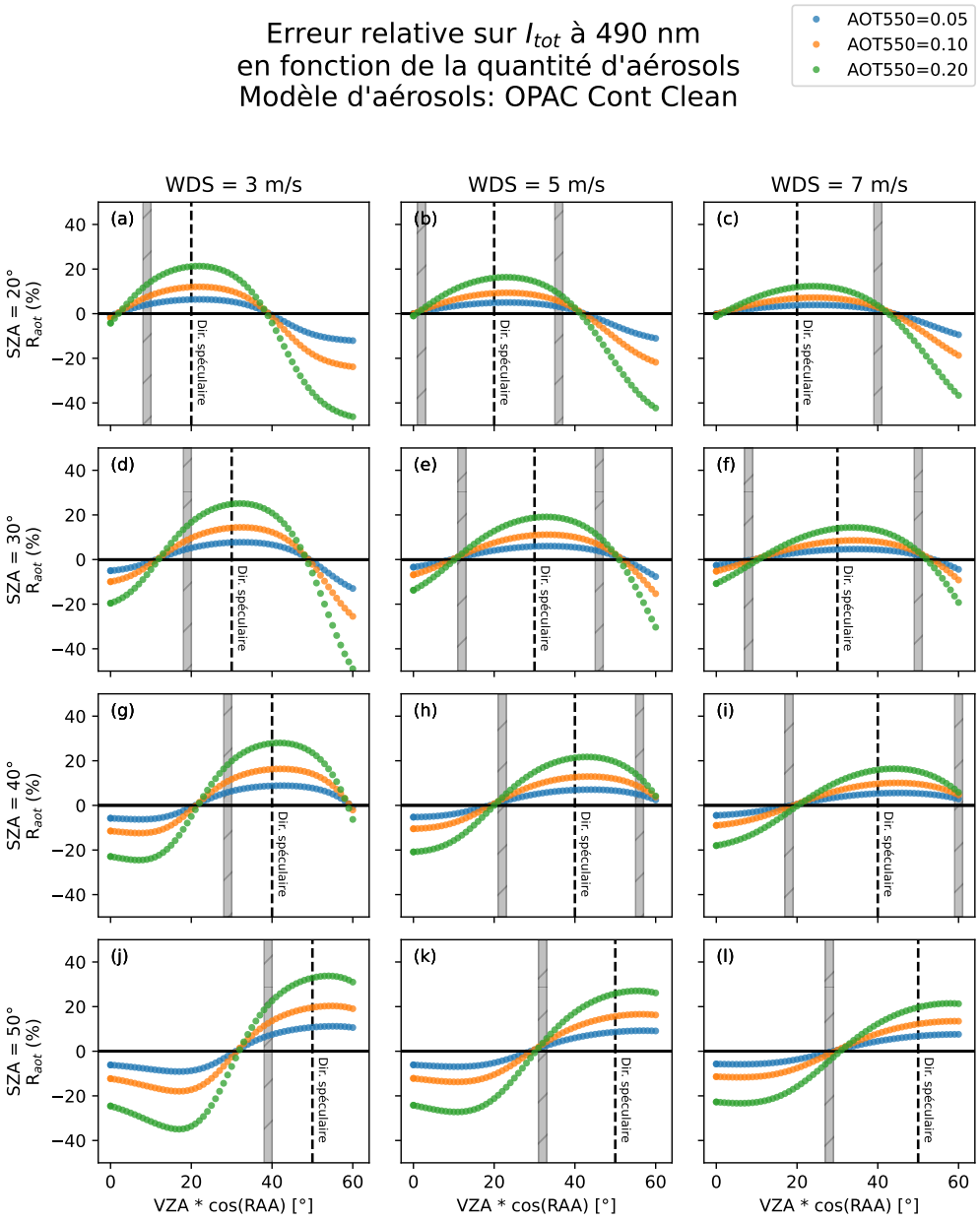


FIGURE 89 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

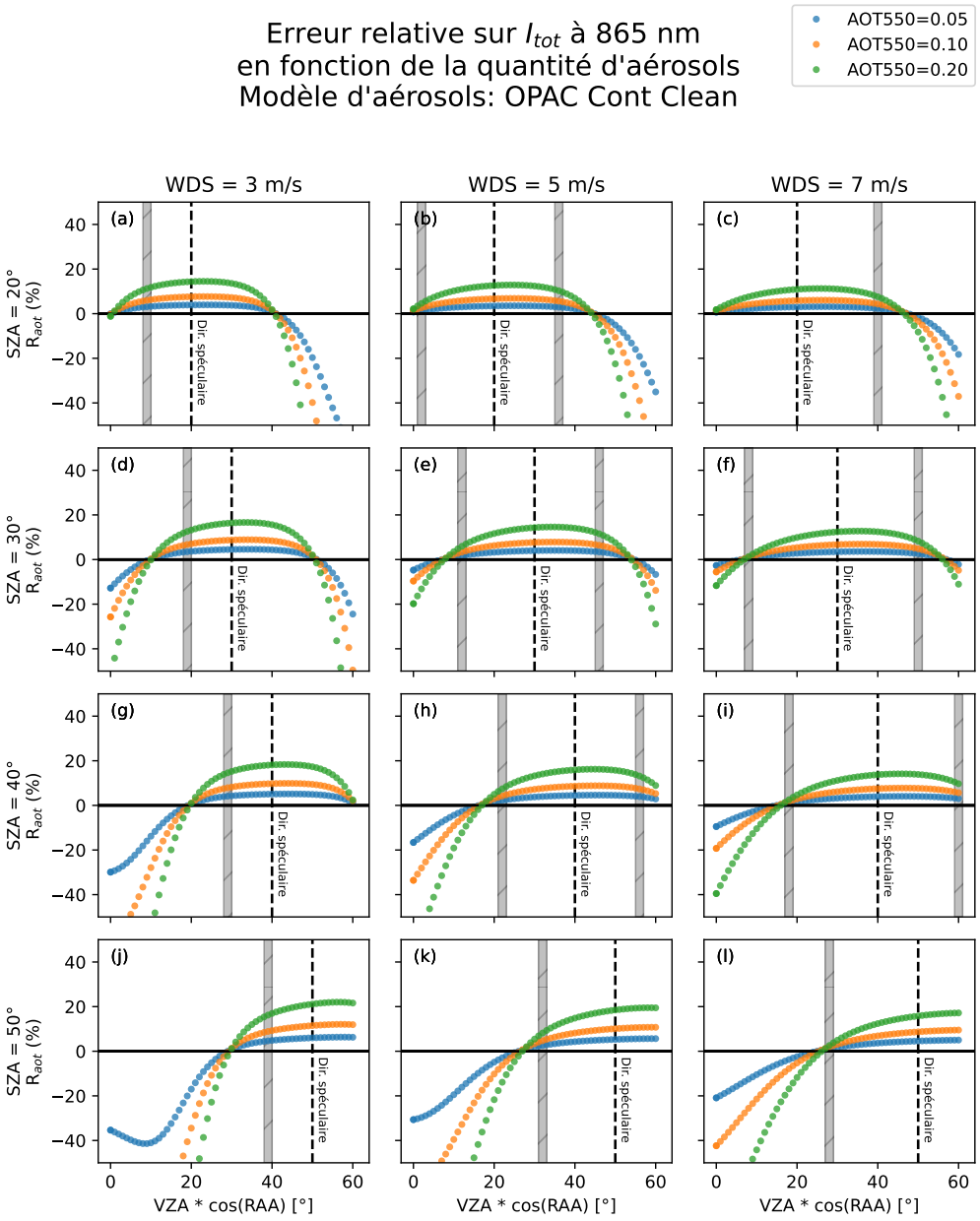


FIGURE 90 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

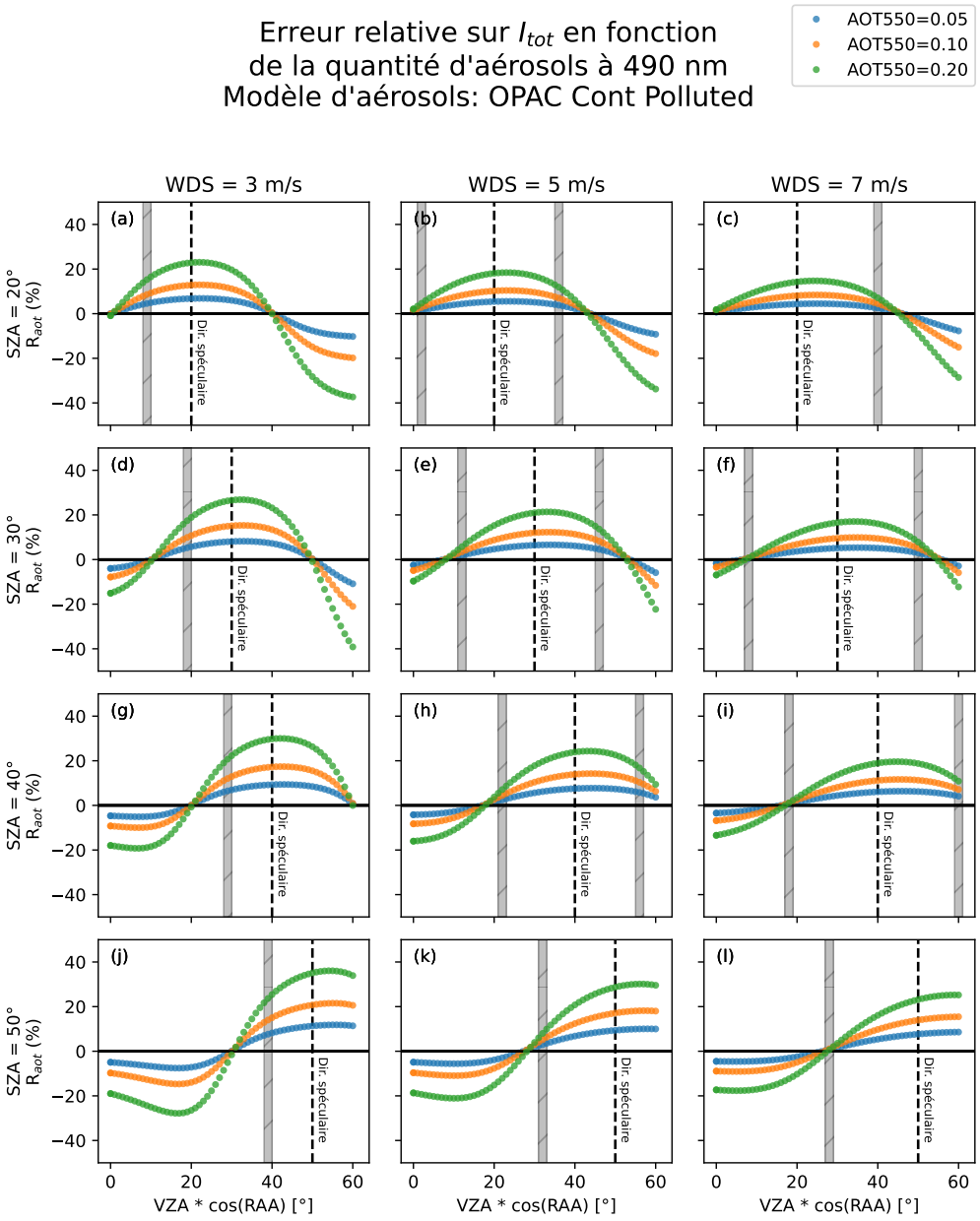


FIGURE 91 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

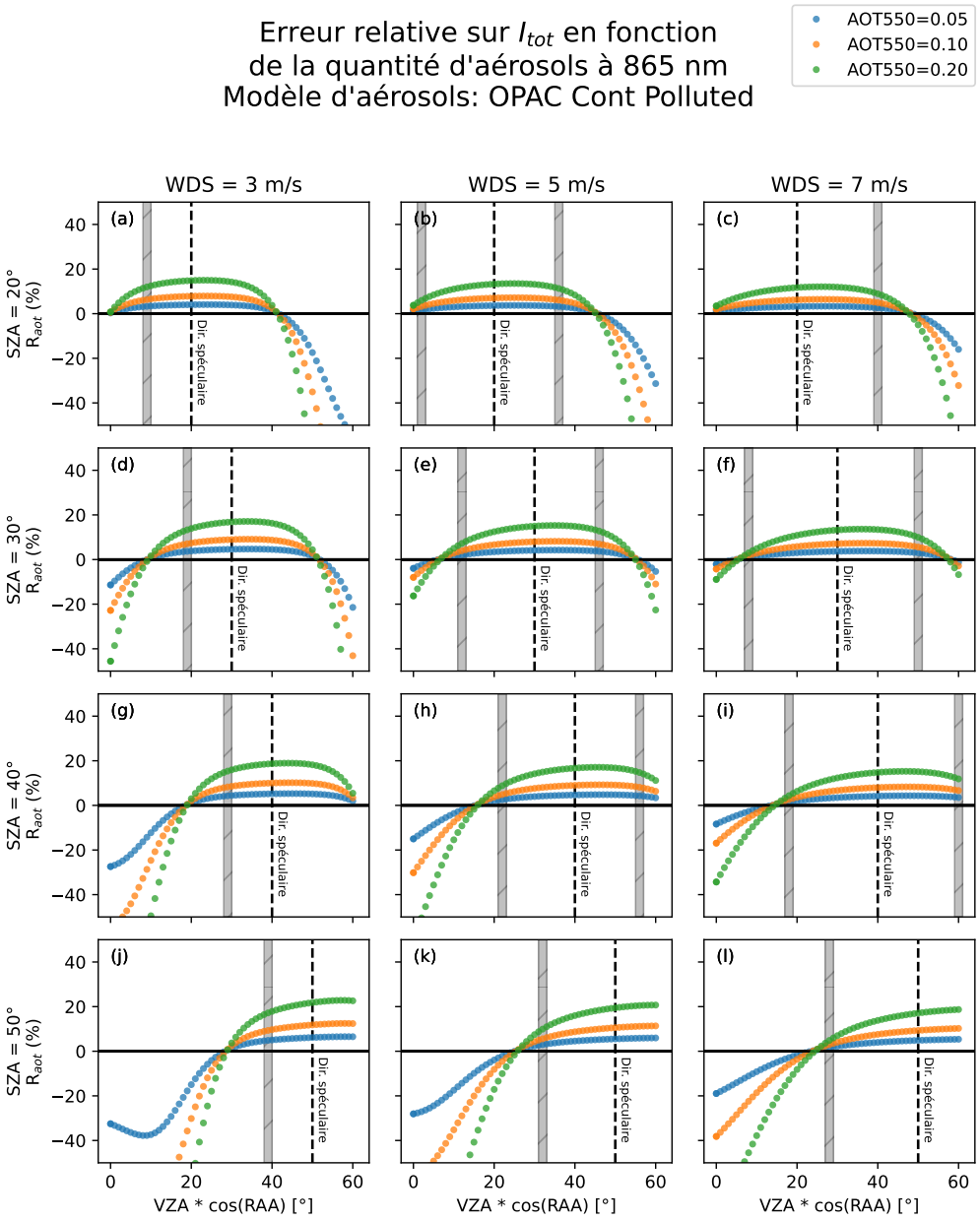


FIGURE 92 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

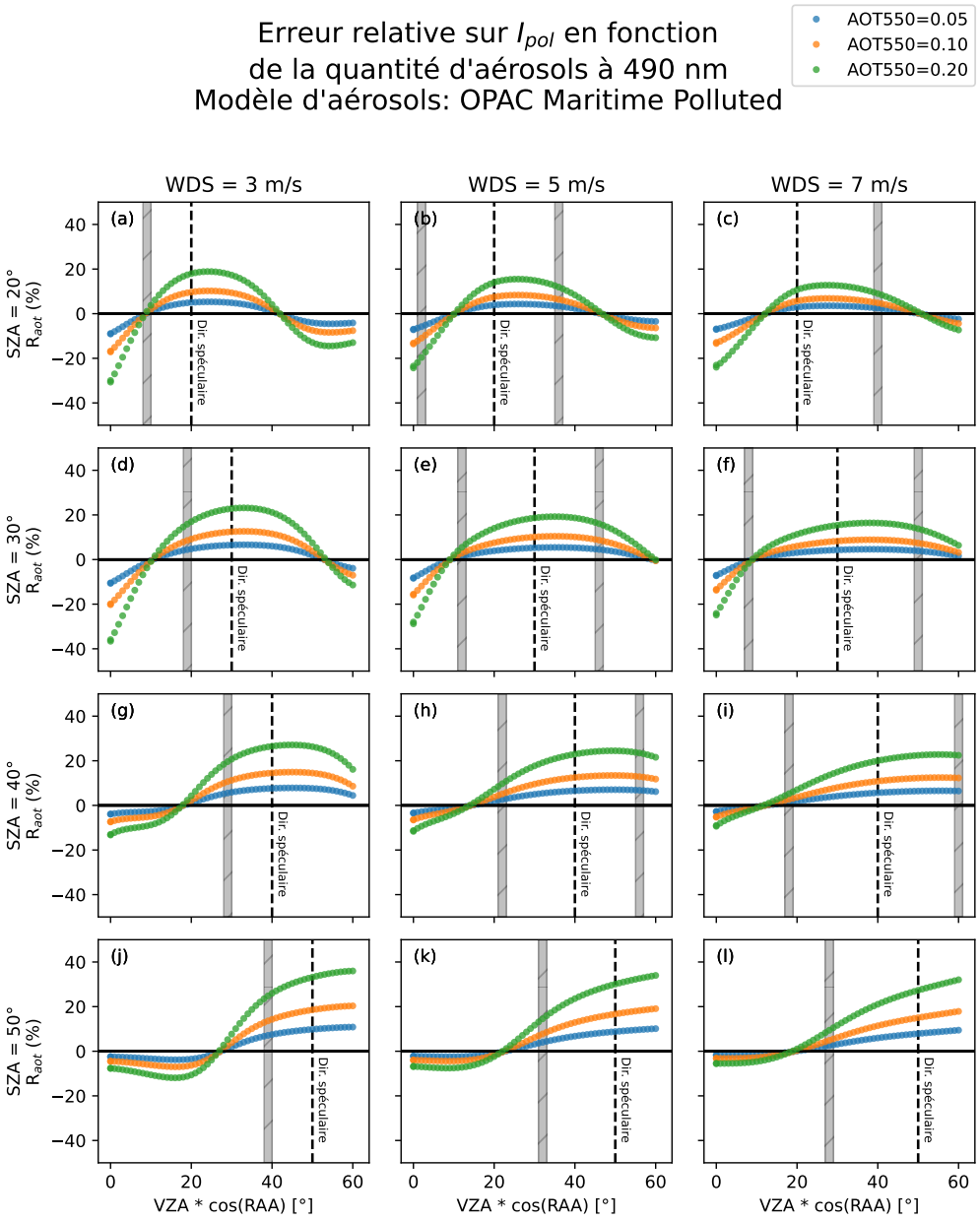


FIGURE 93 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

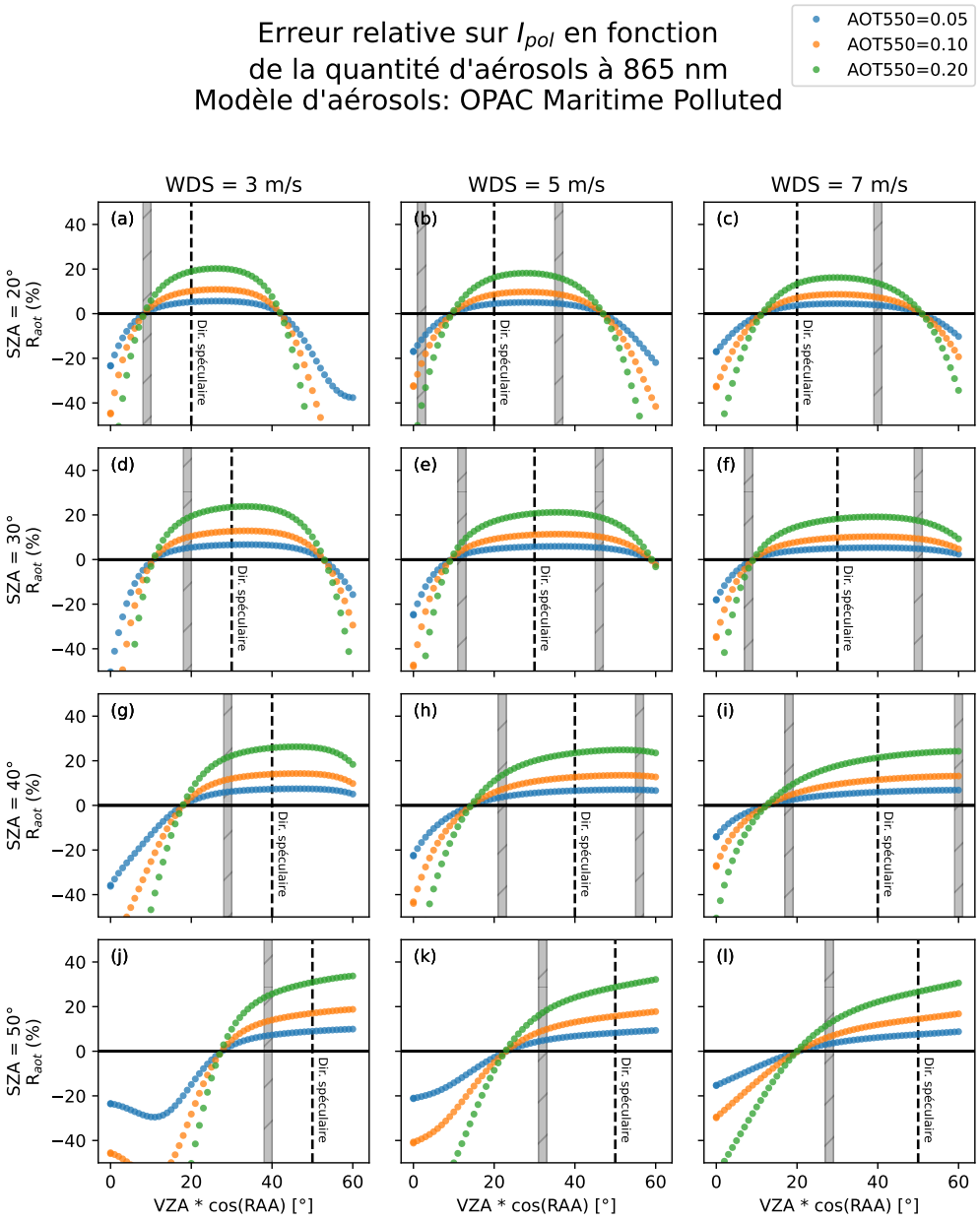


FIGURE 94 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

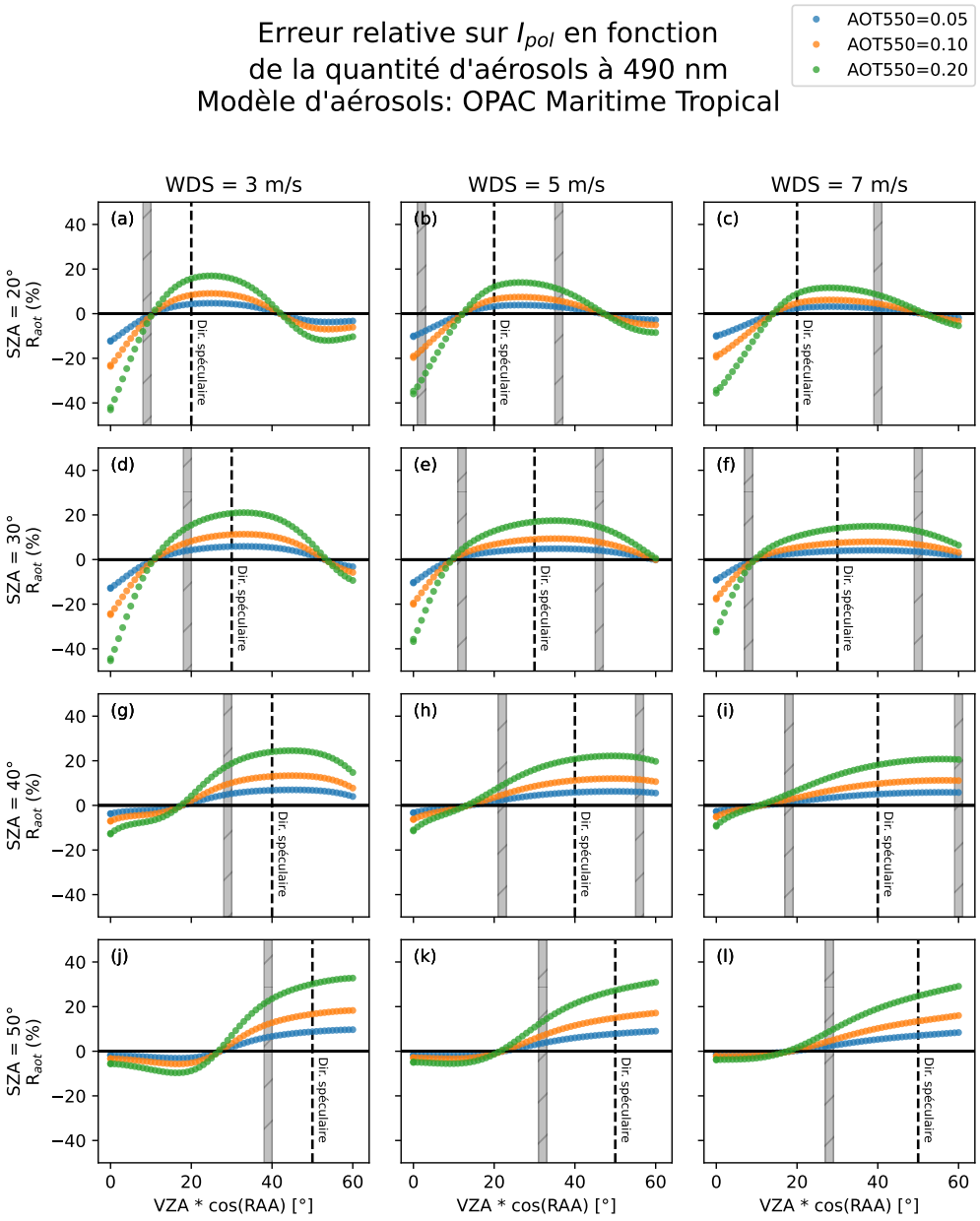


FIGURE 95 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Tropical*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

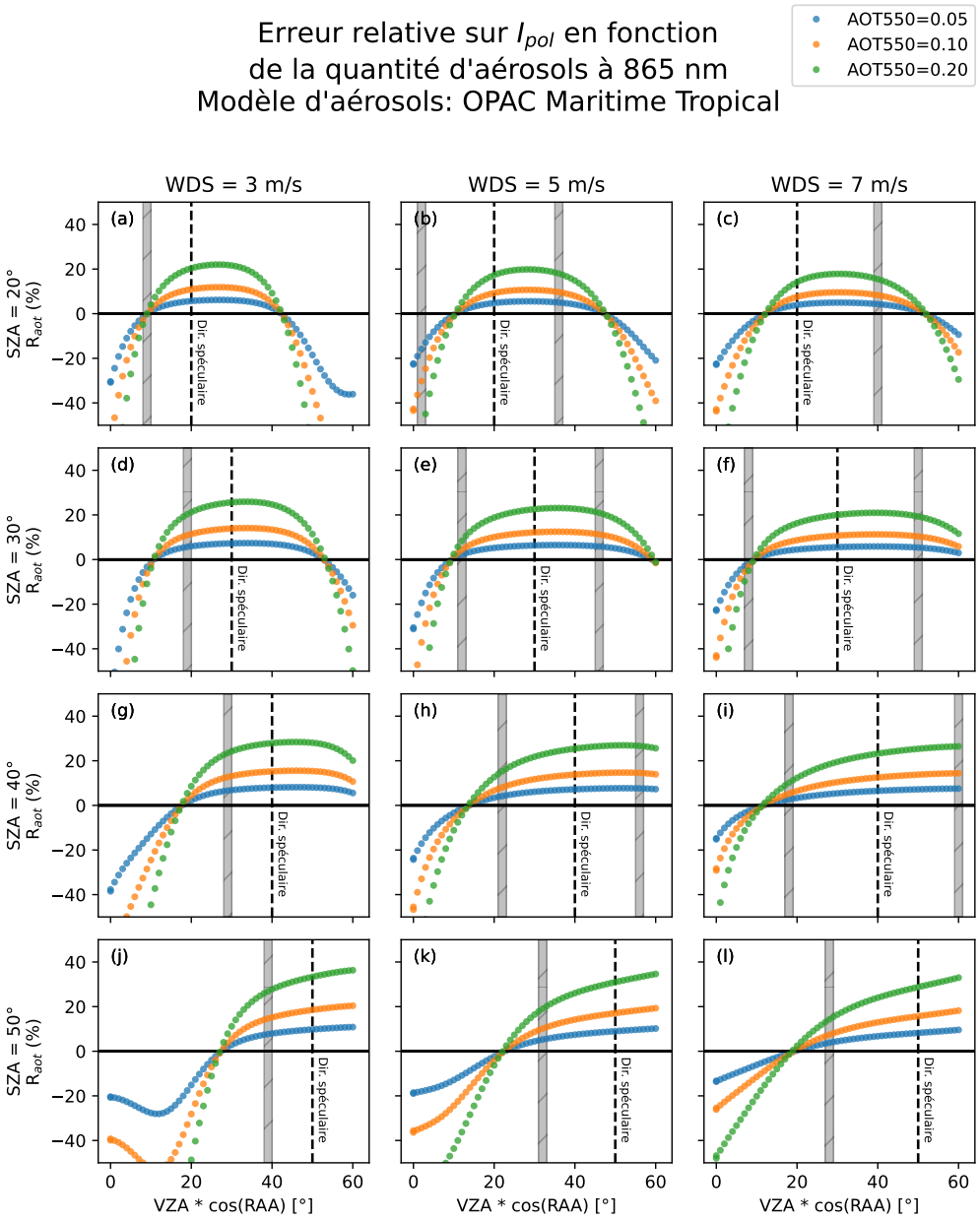


FIGURE 96 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Maritime Tropical*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

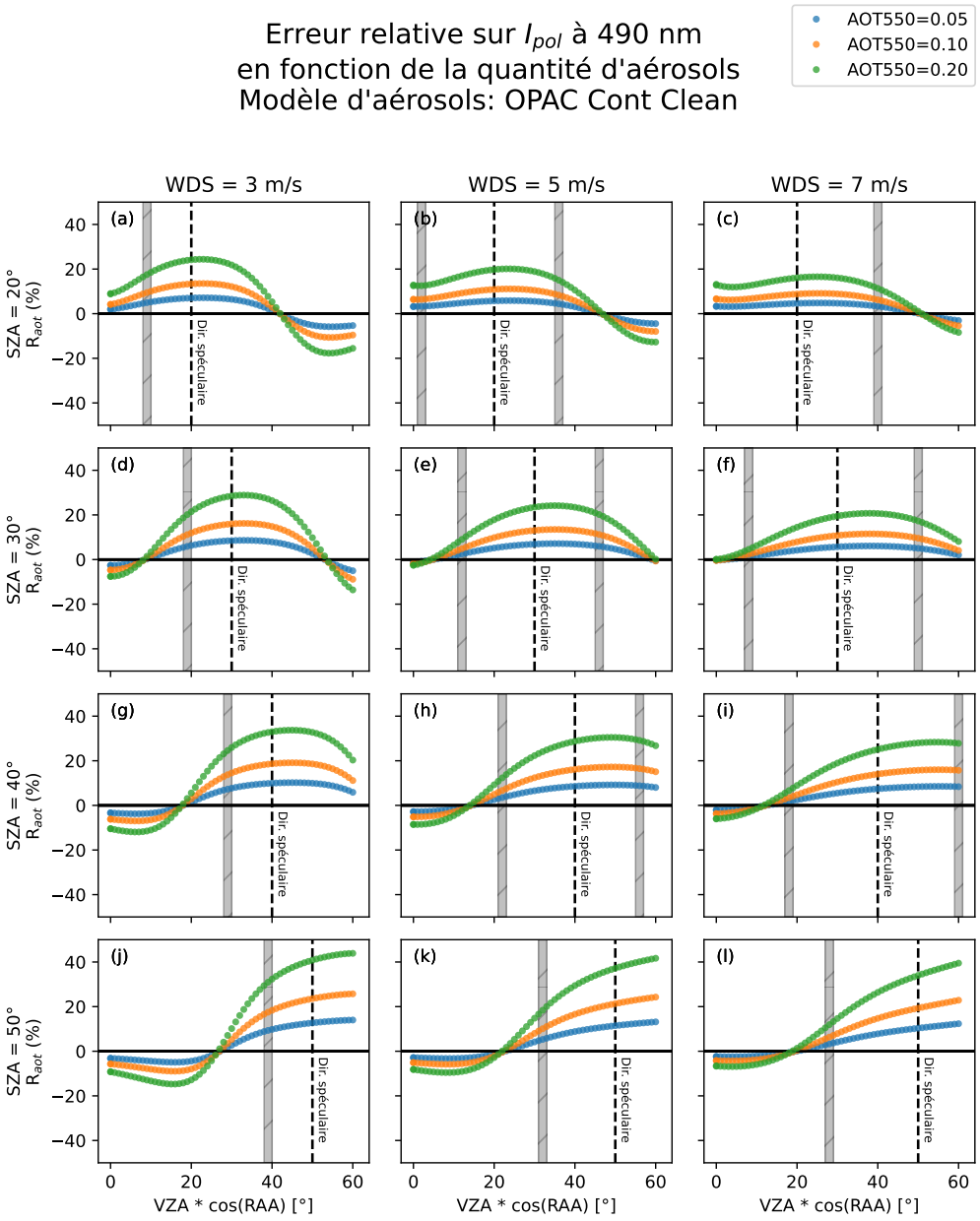


FIGURE 97 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

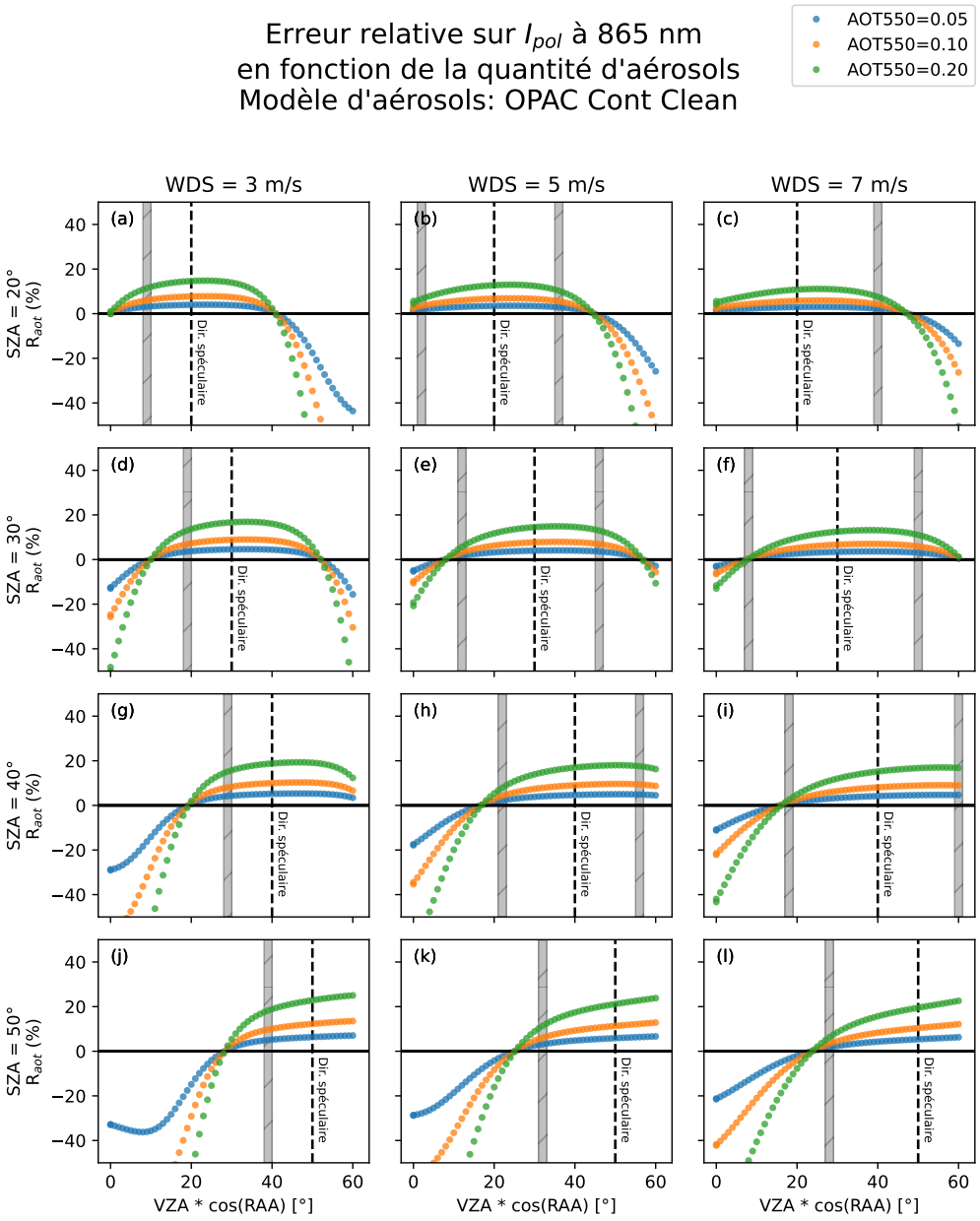


FIGURE 98 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Clean*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

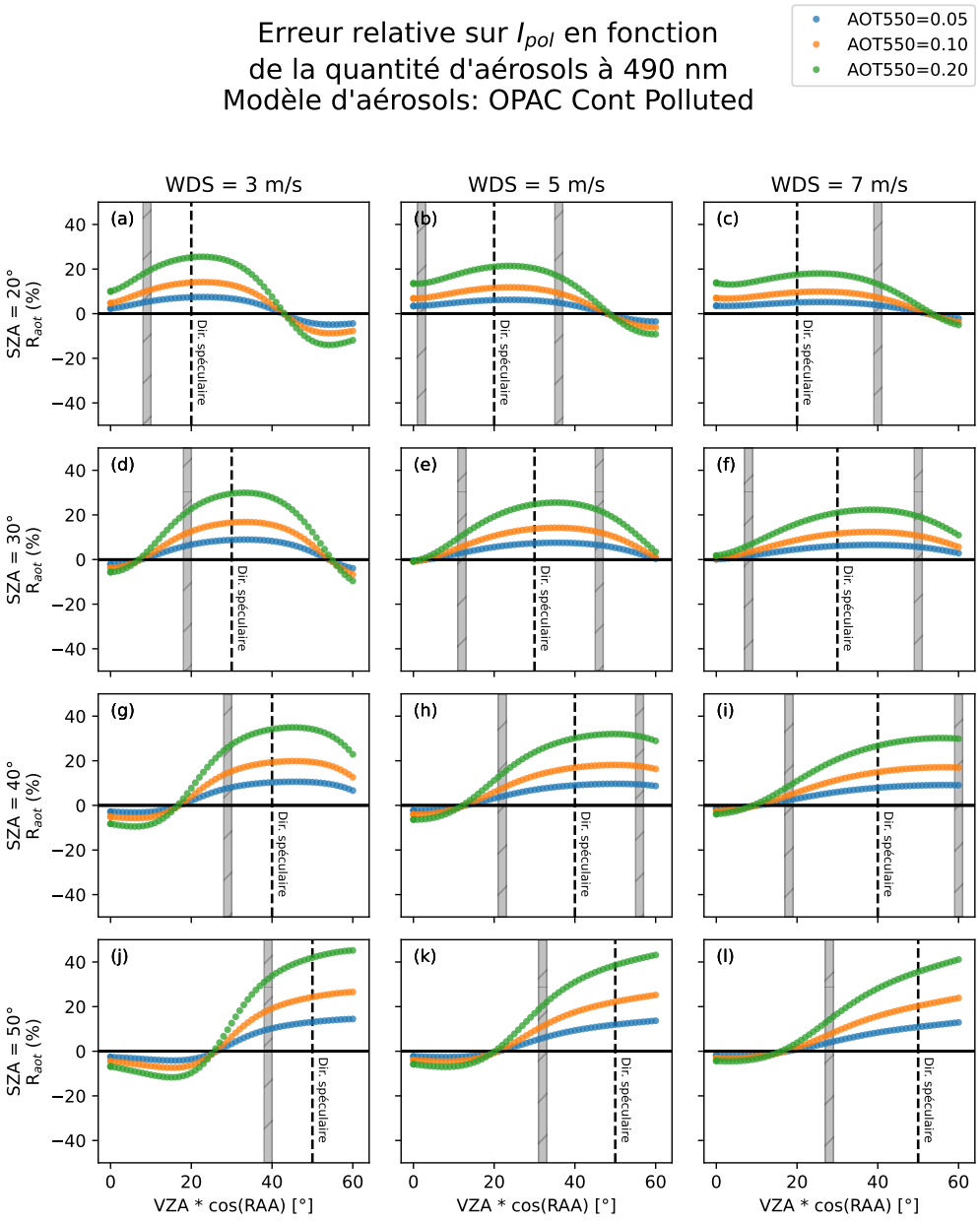


FIGURE 99 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

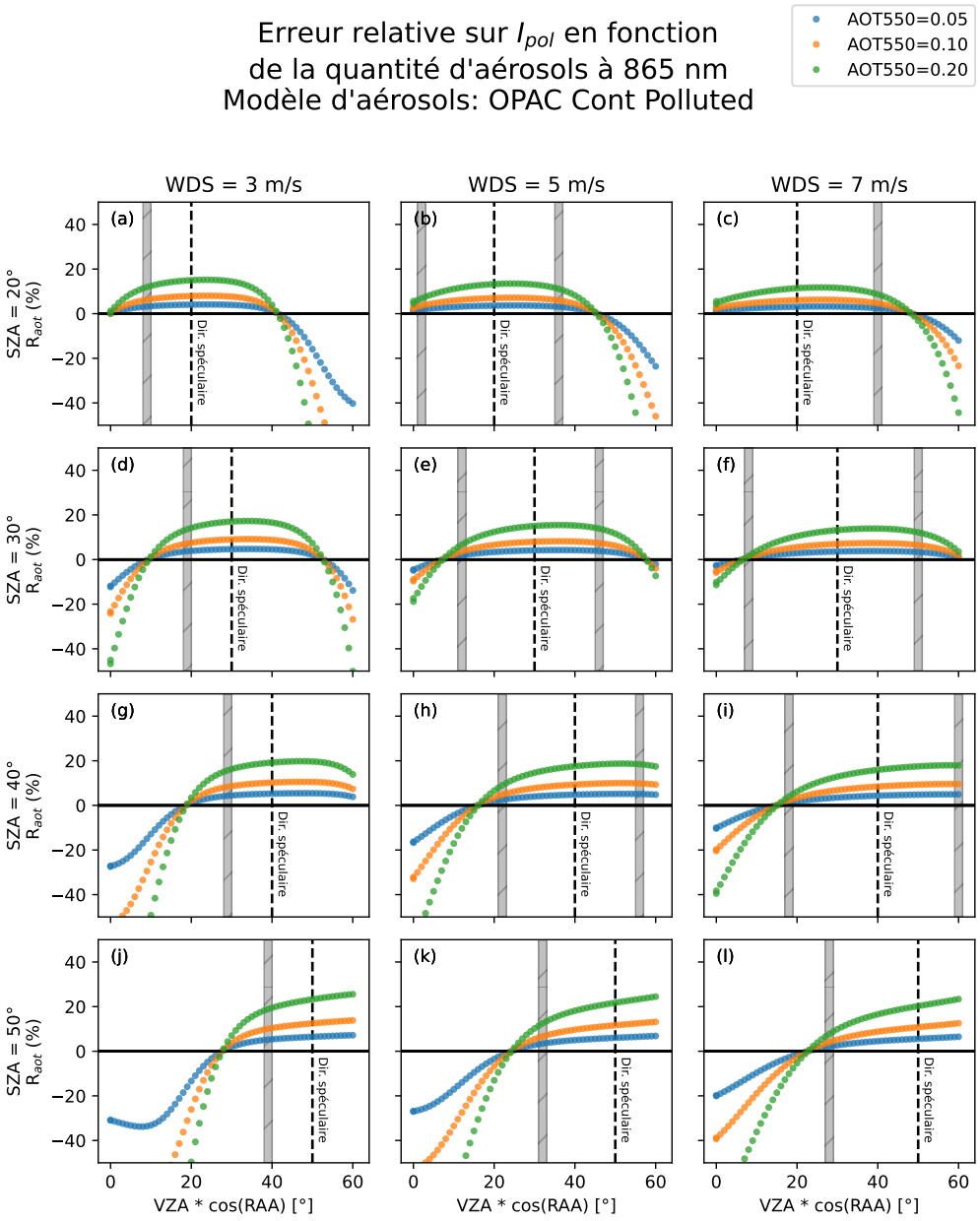


FIGURE 100 – Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée pour le modèle d'aérosols *OPAC Continental Polluted*. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{aot} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

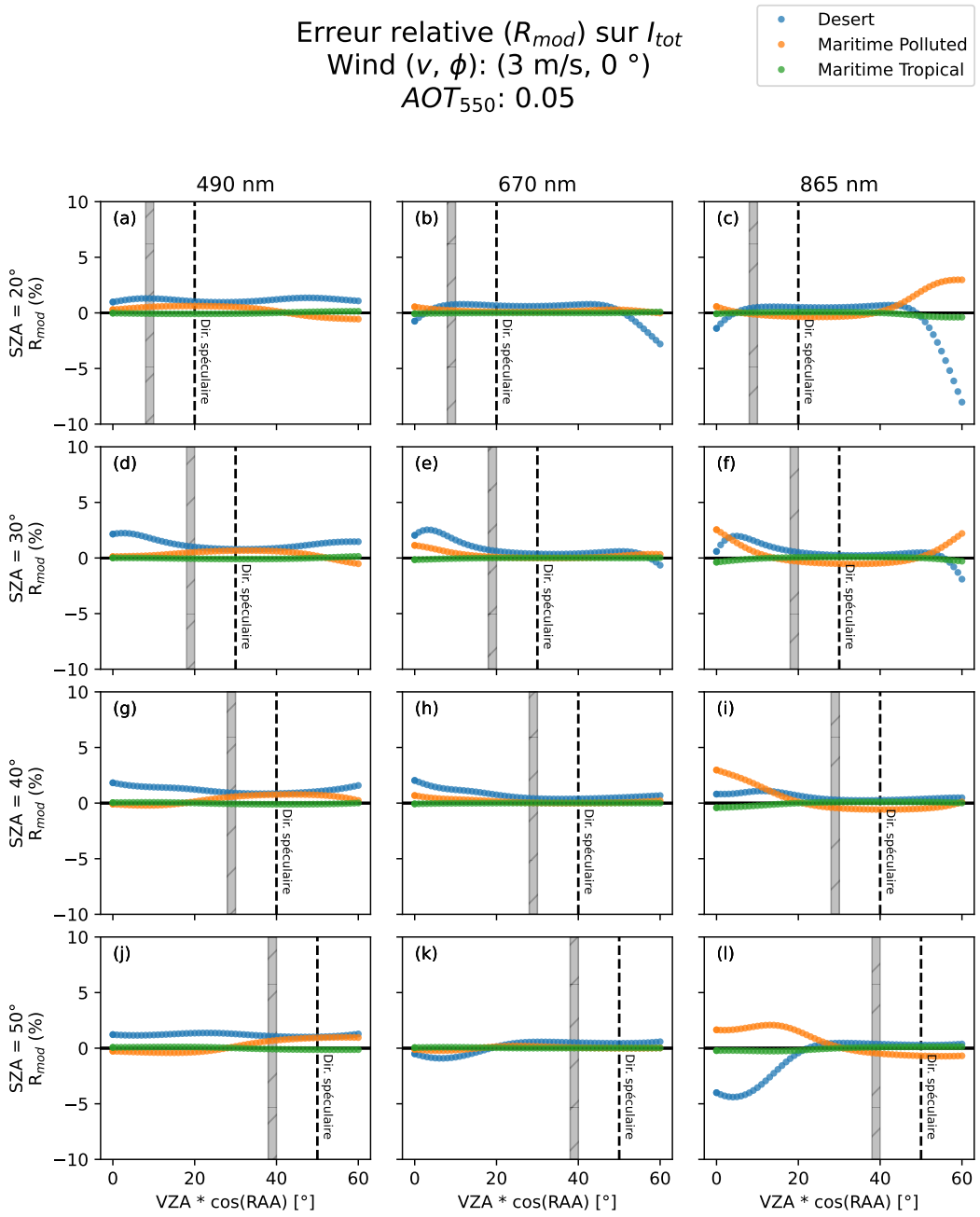


FIGURE 101 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

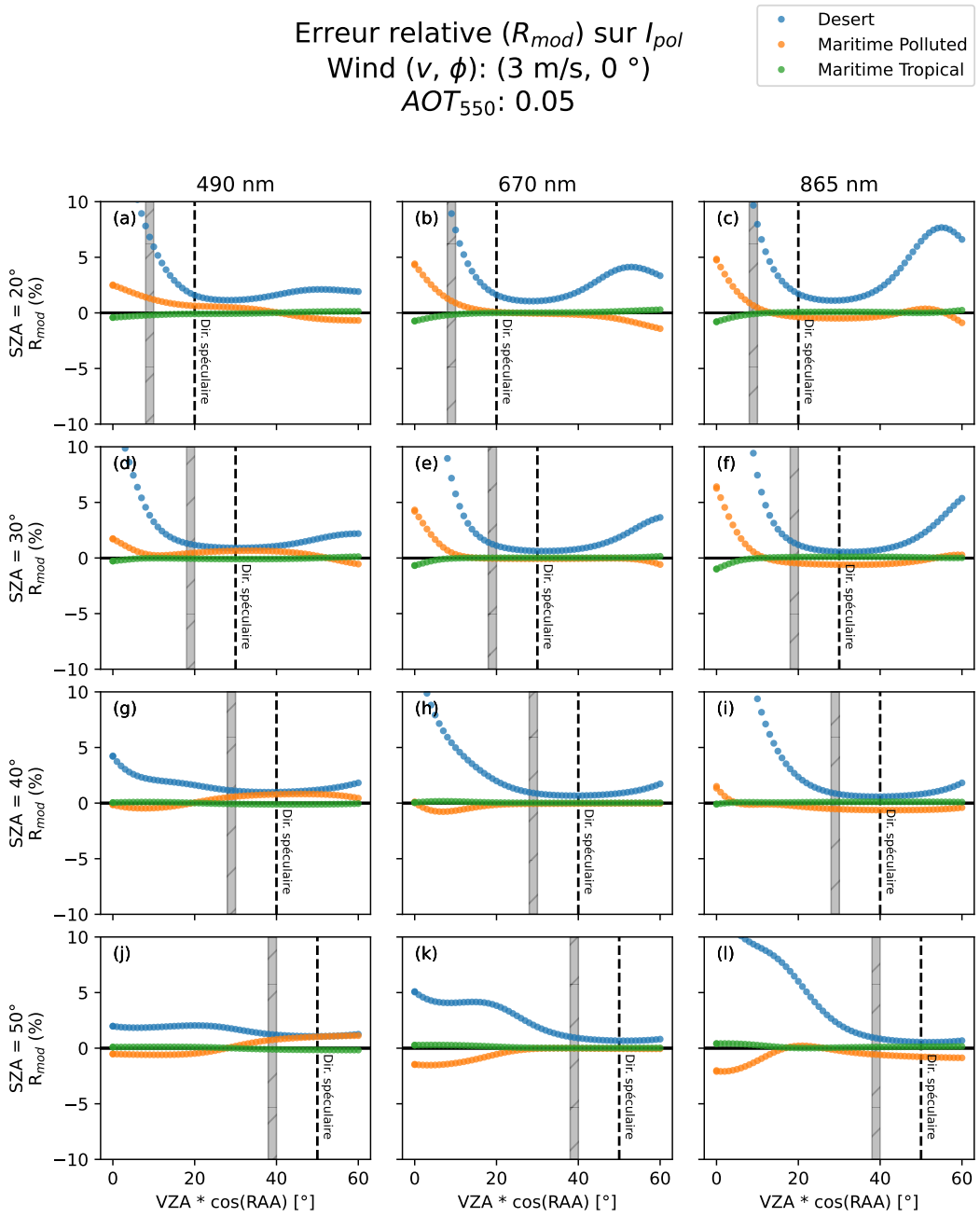


FIGURE 102 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

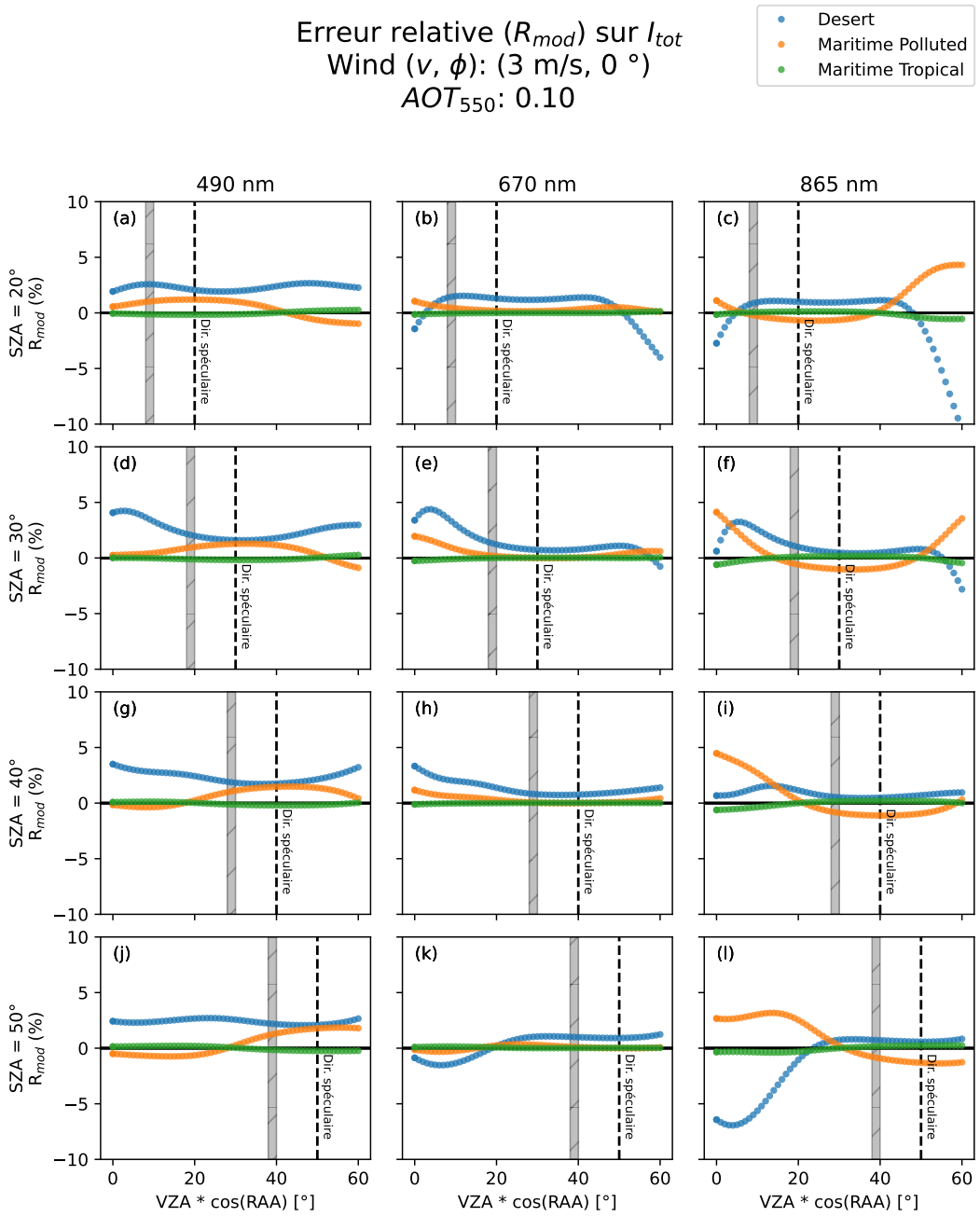


FIGURE 103 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

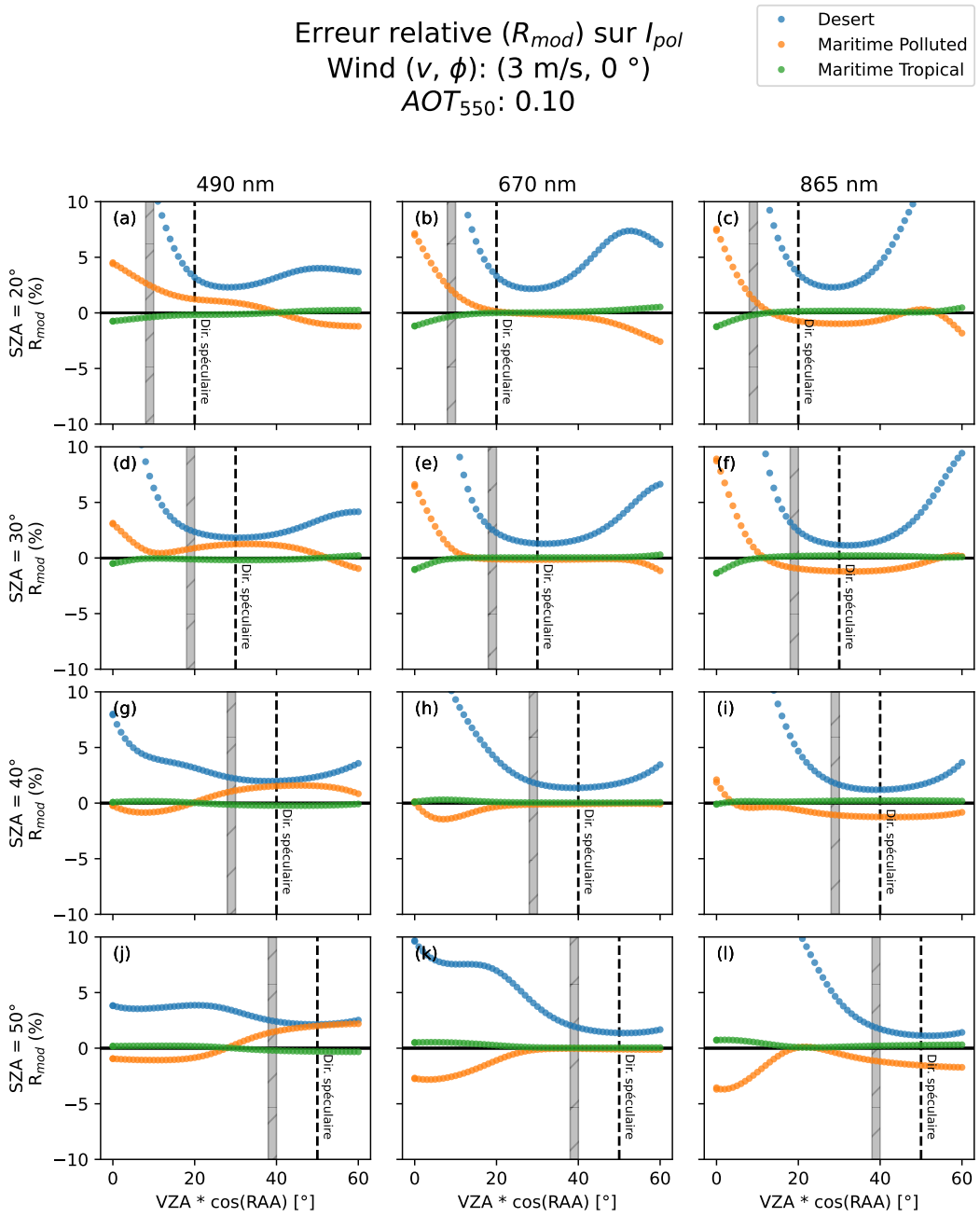


FIGURE 104 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

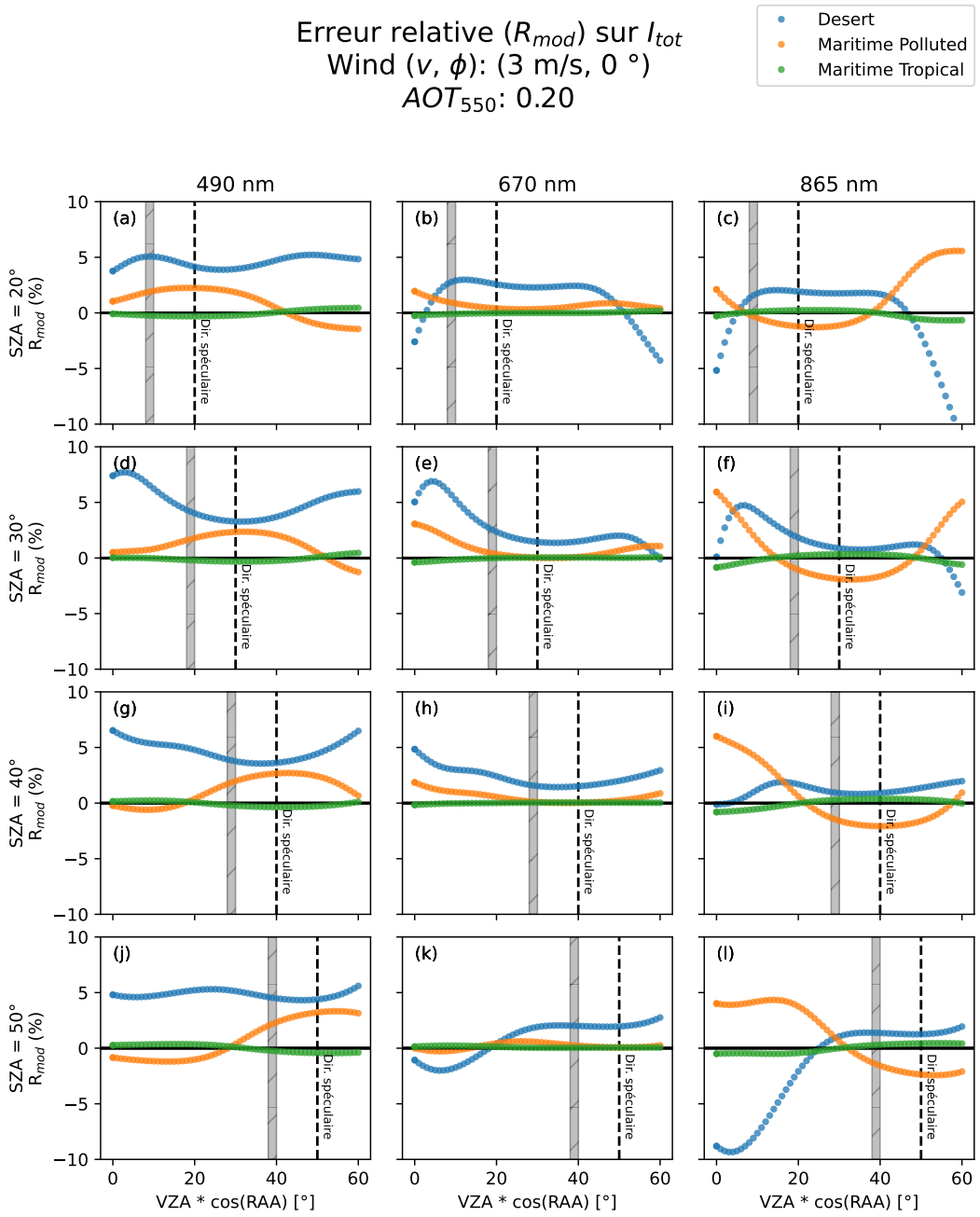


FIGURE 105 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

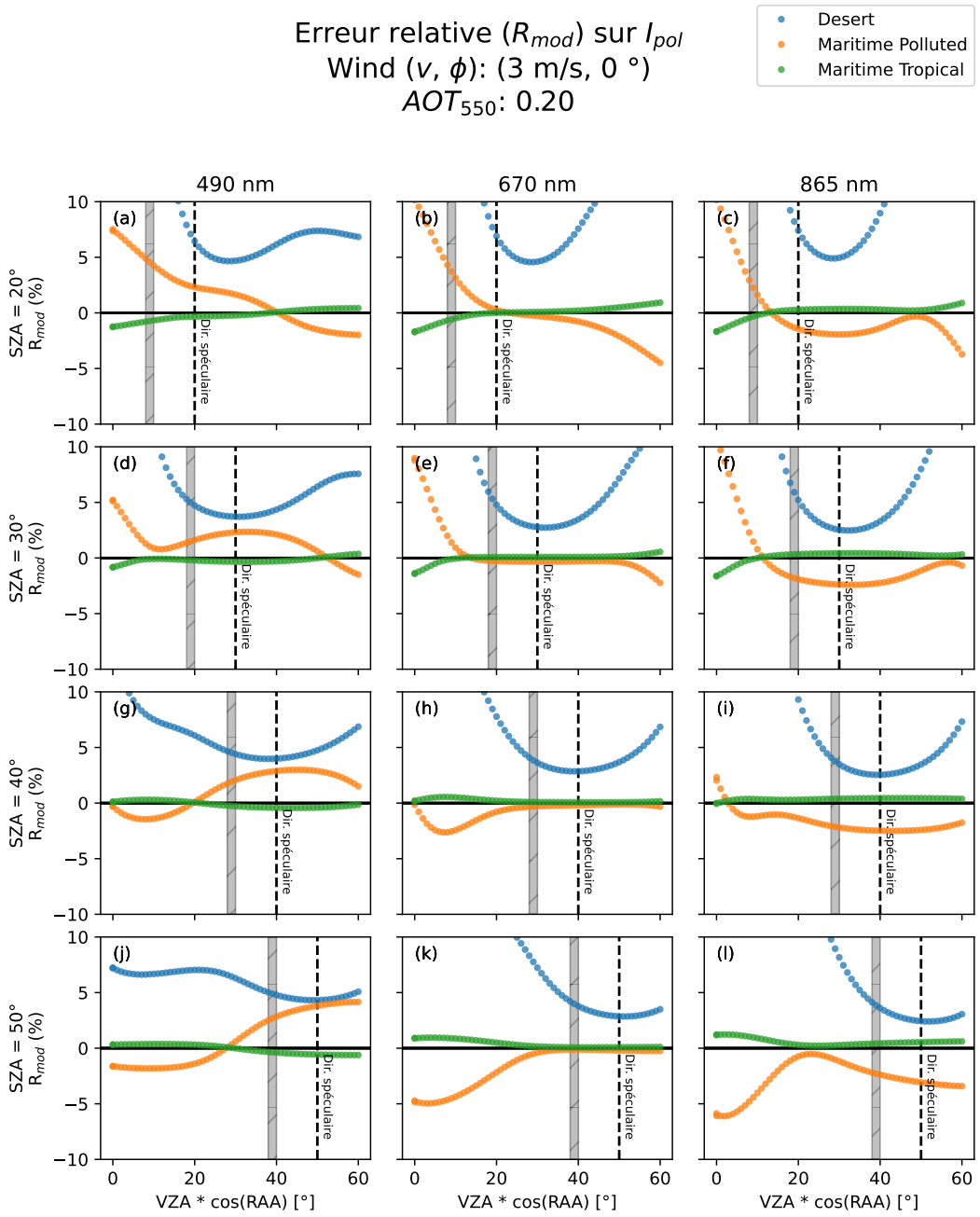


FIGURE 106 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 3 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

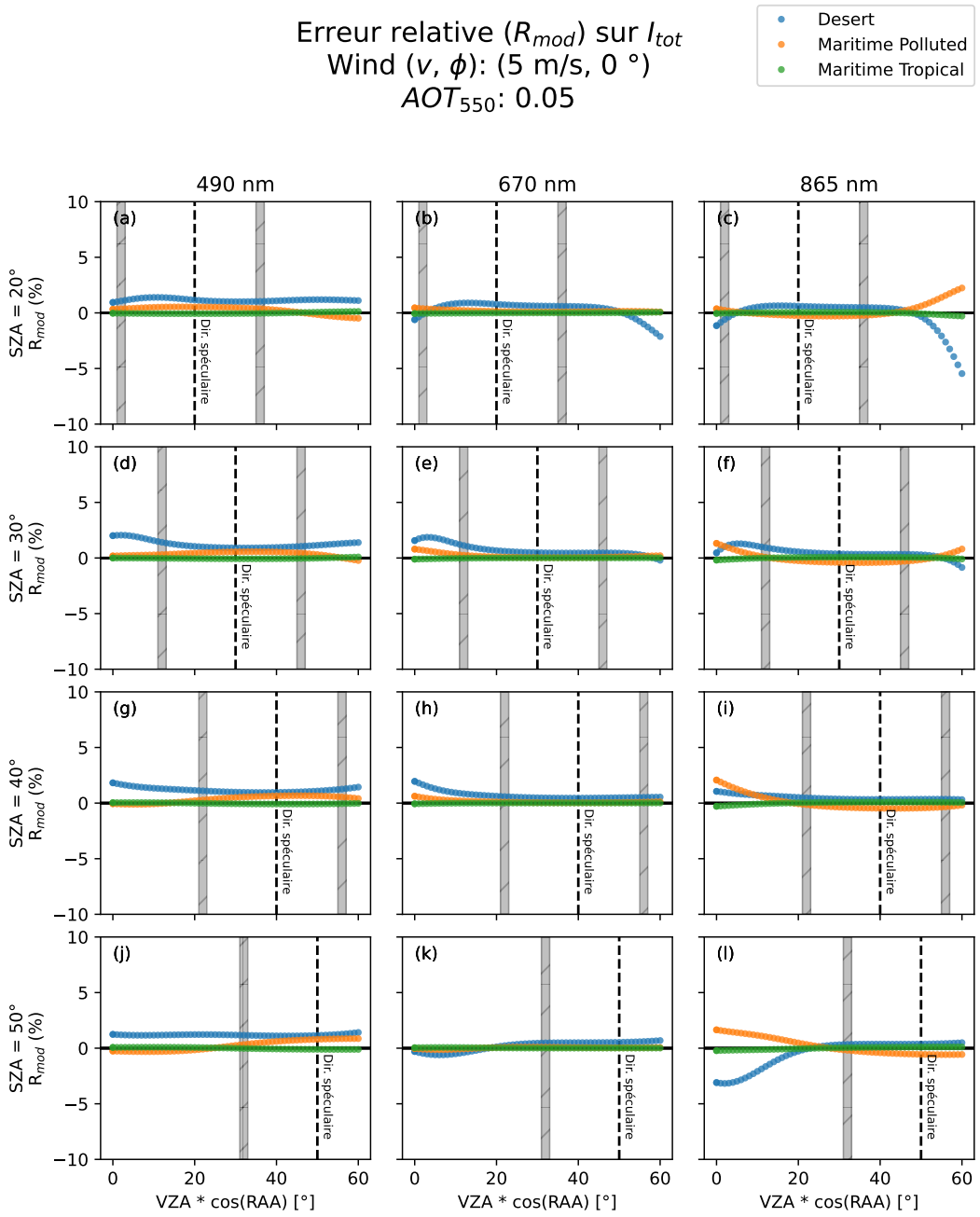


FIGURE 107 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

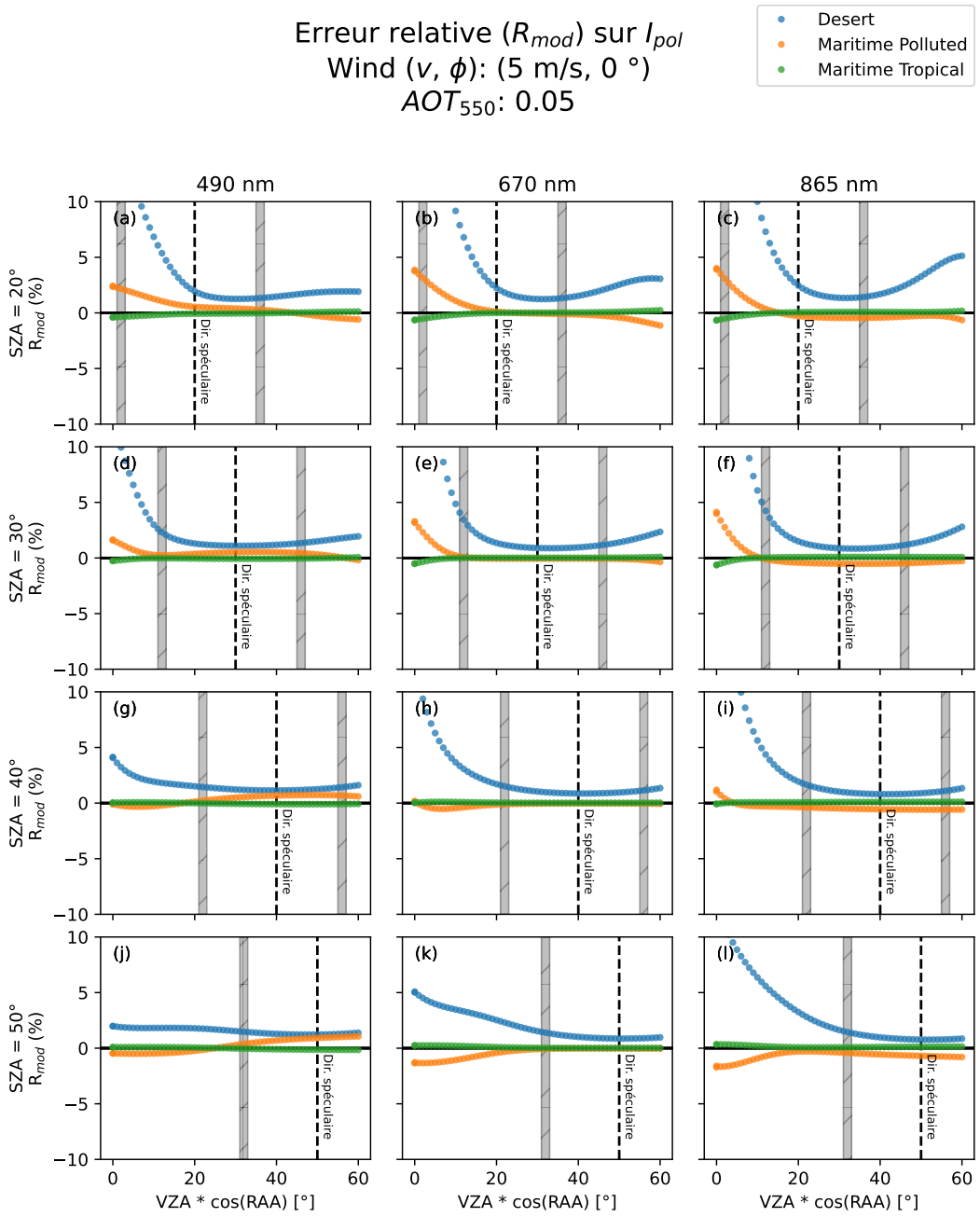


FIGURE 108 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

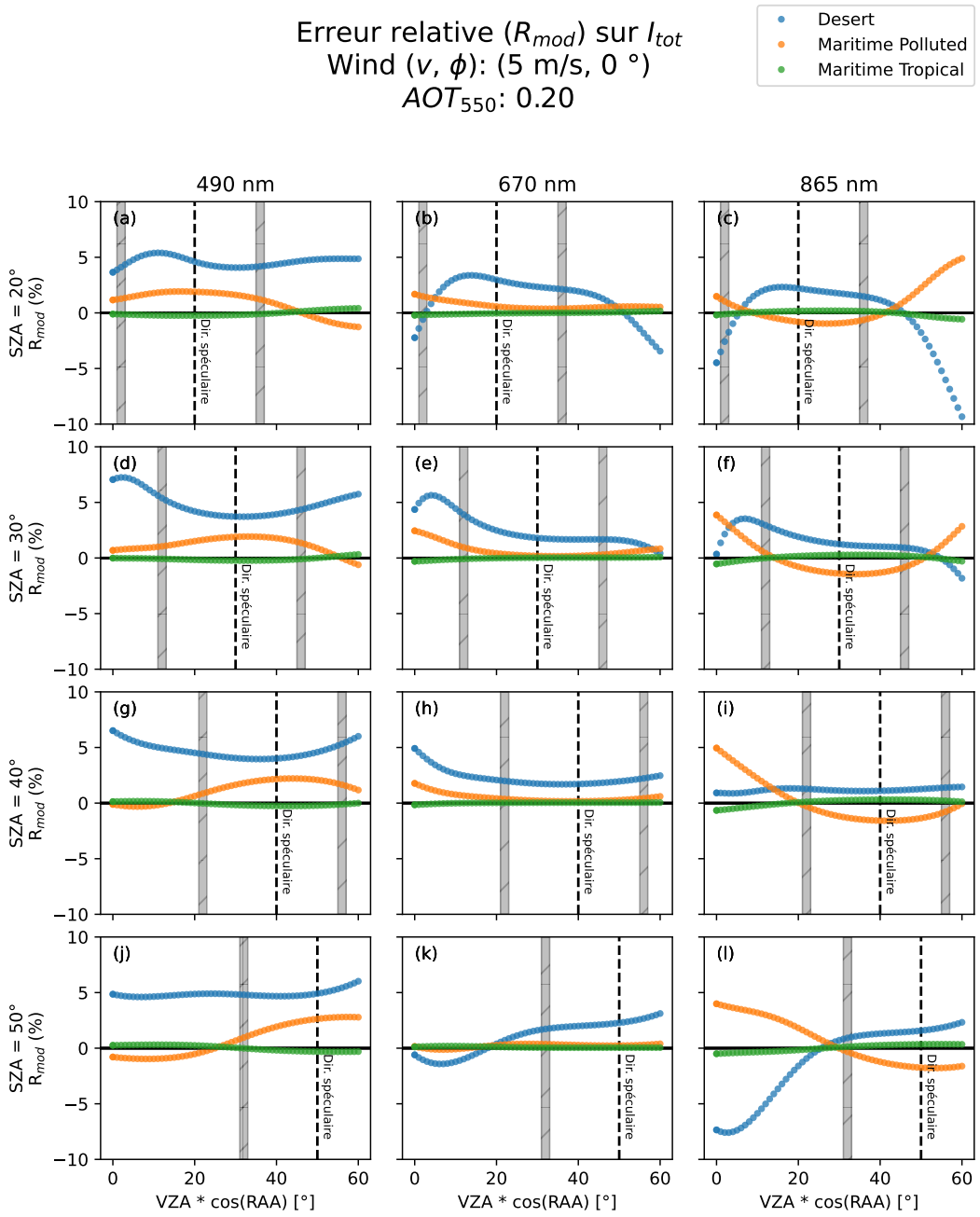


FIGURE 109 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

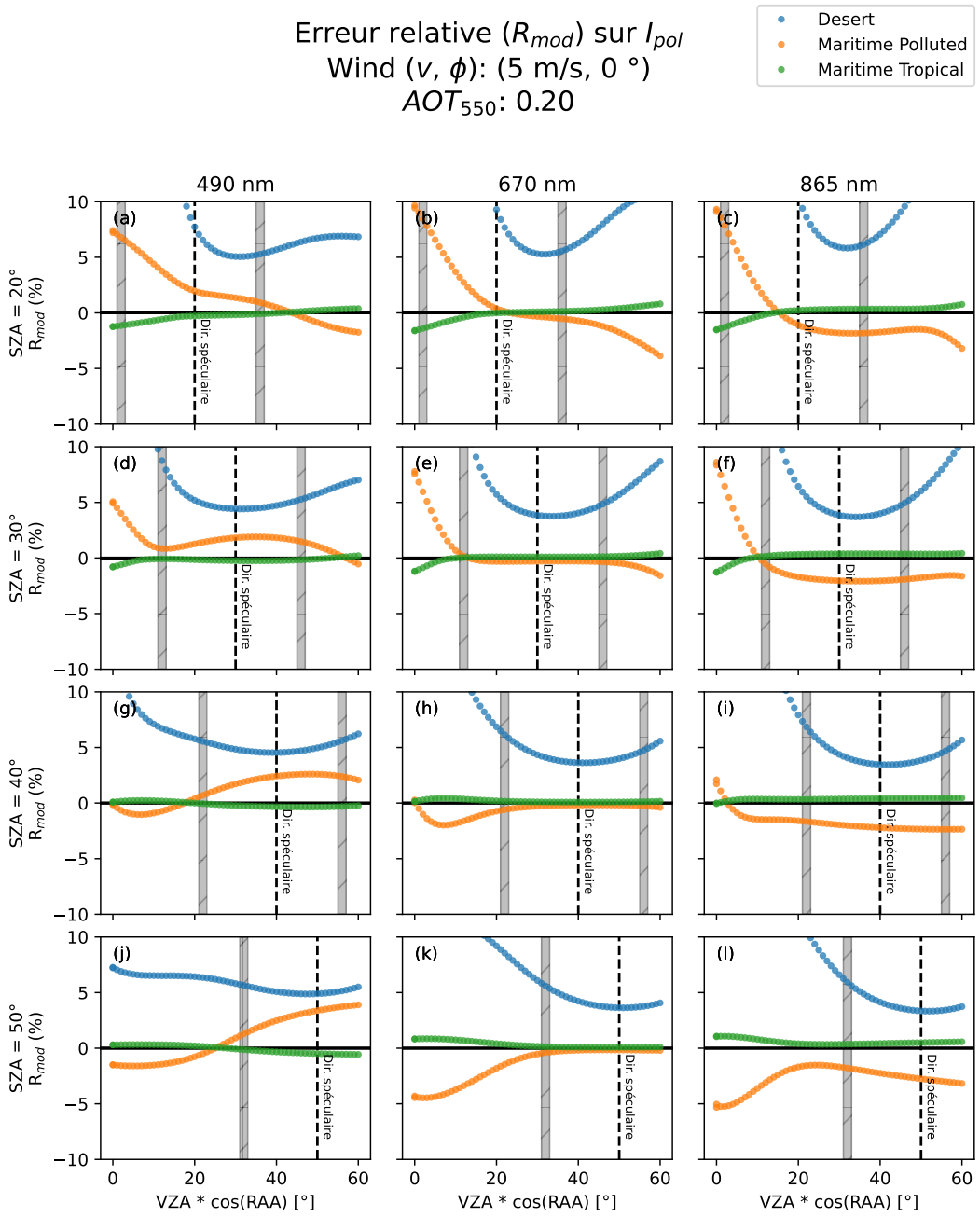


FIGURE 110 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 5 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

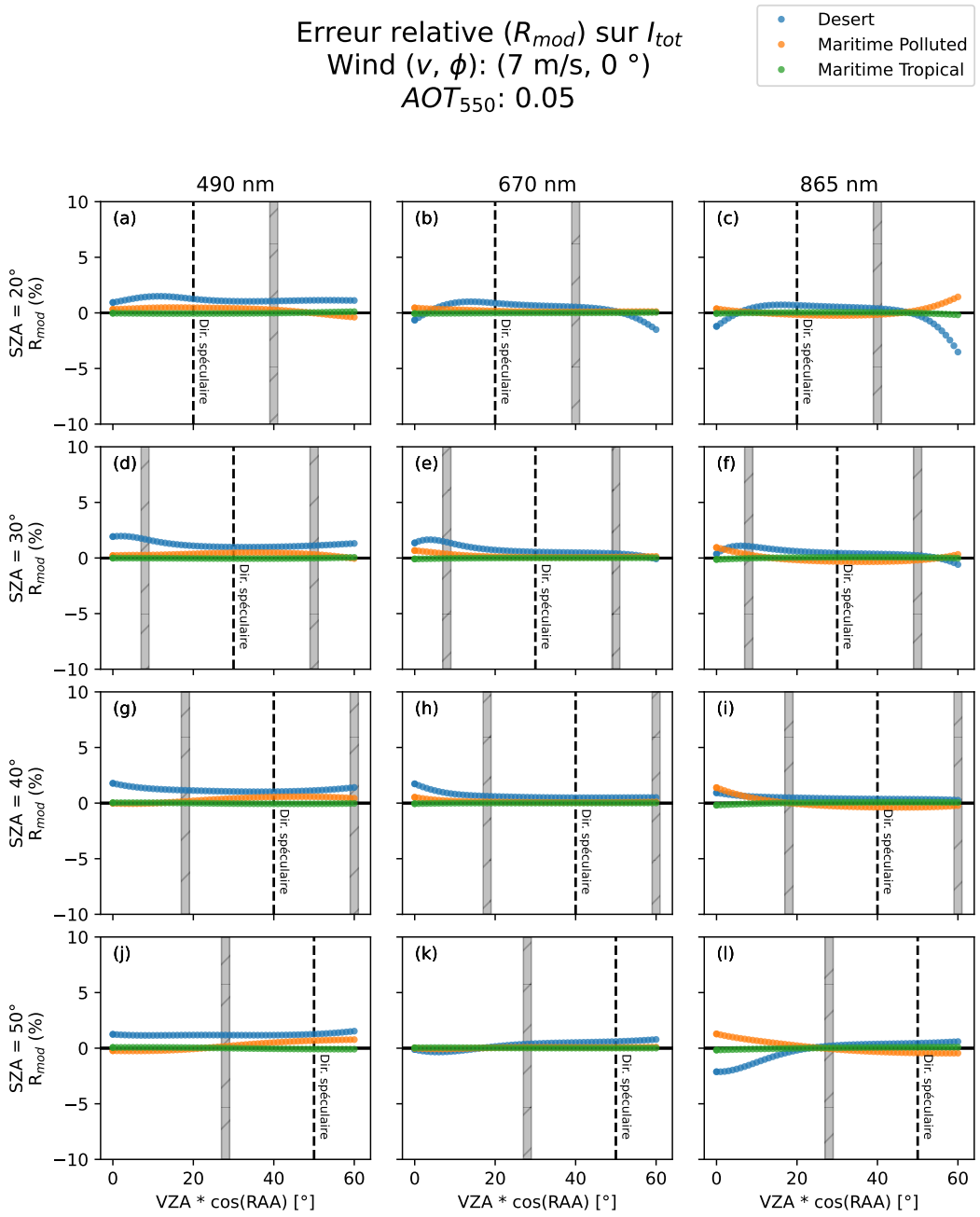


FIGURE 111 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

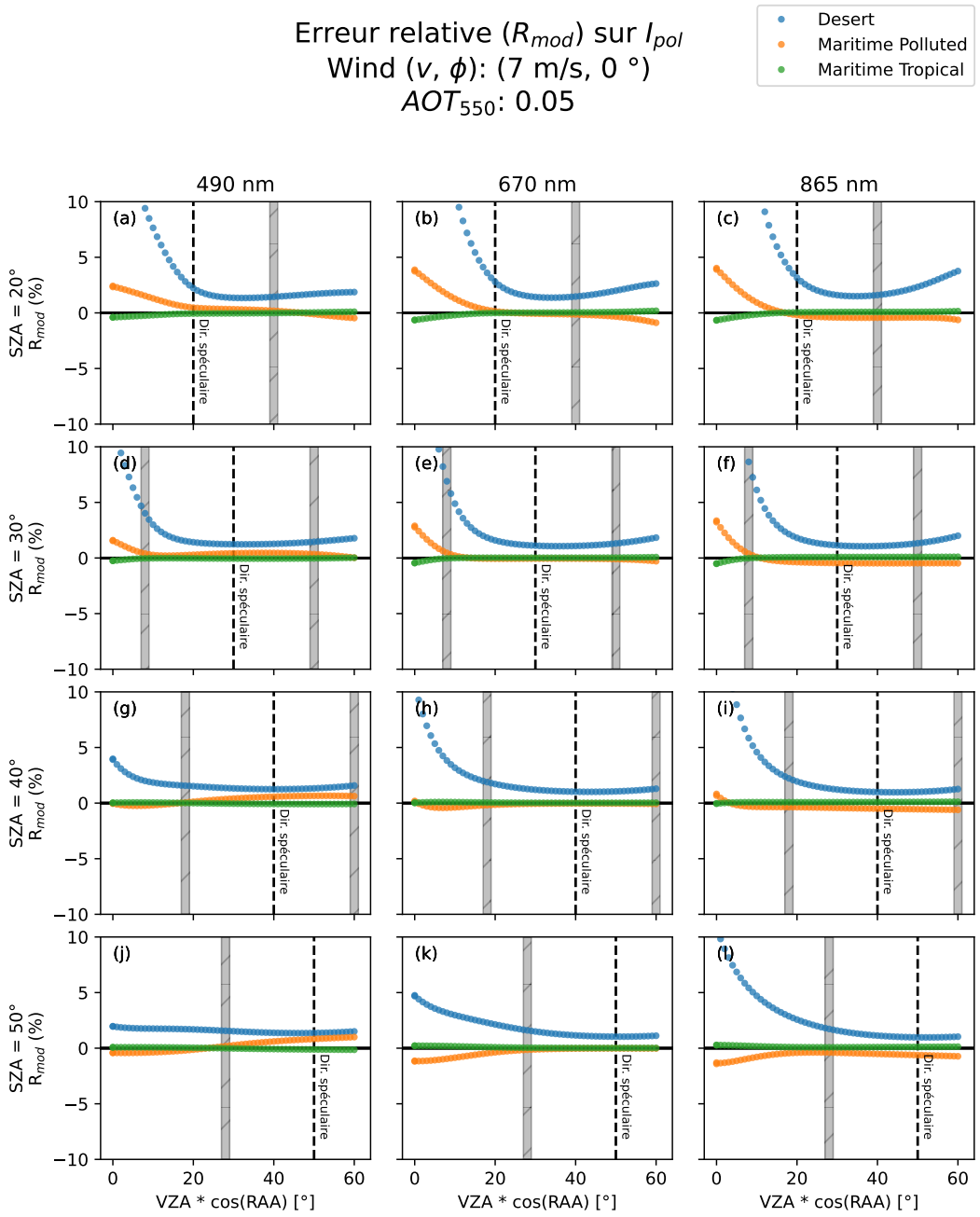


FIGURE 112 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.05 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

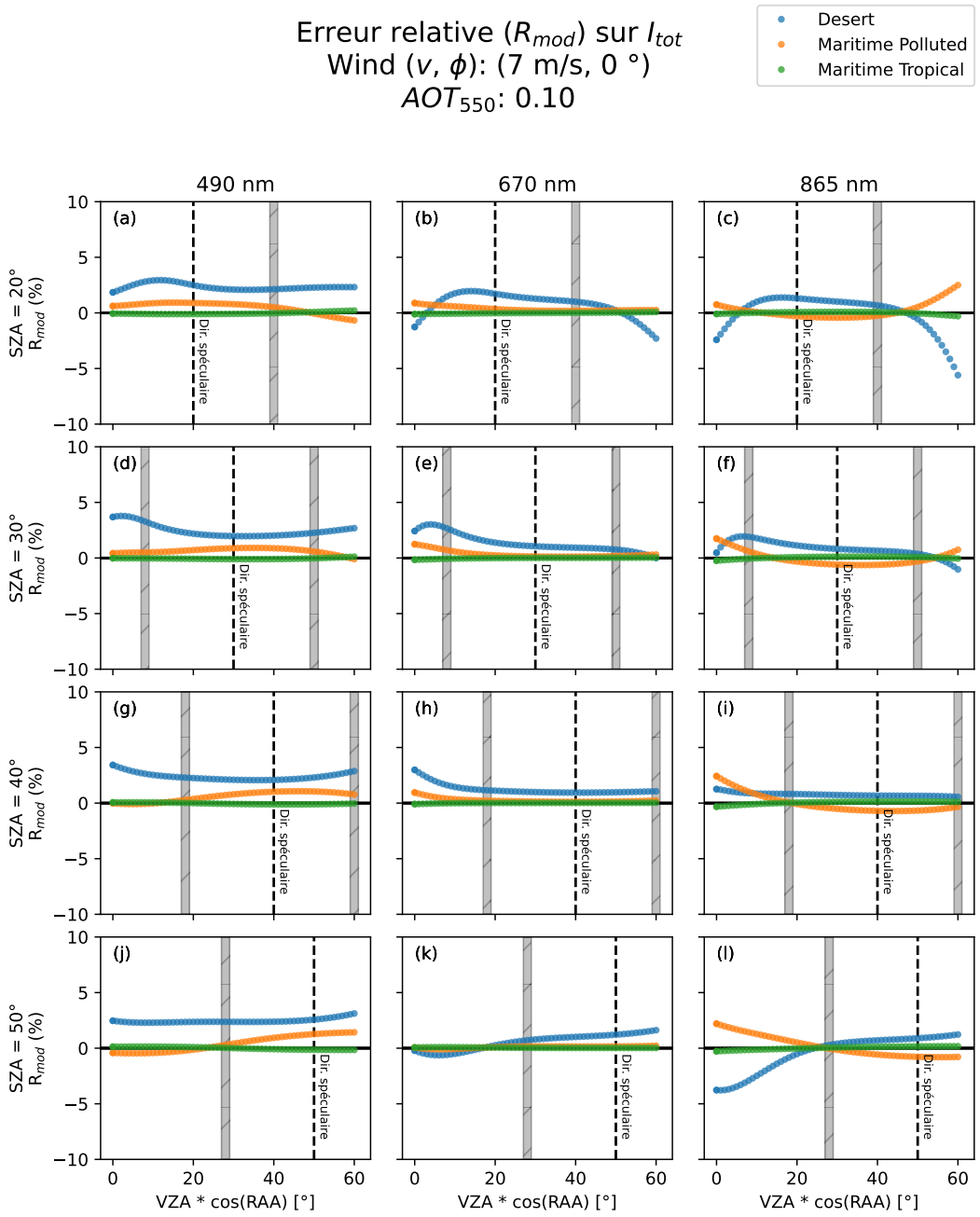


FIGURE 113 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

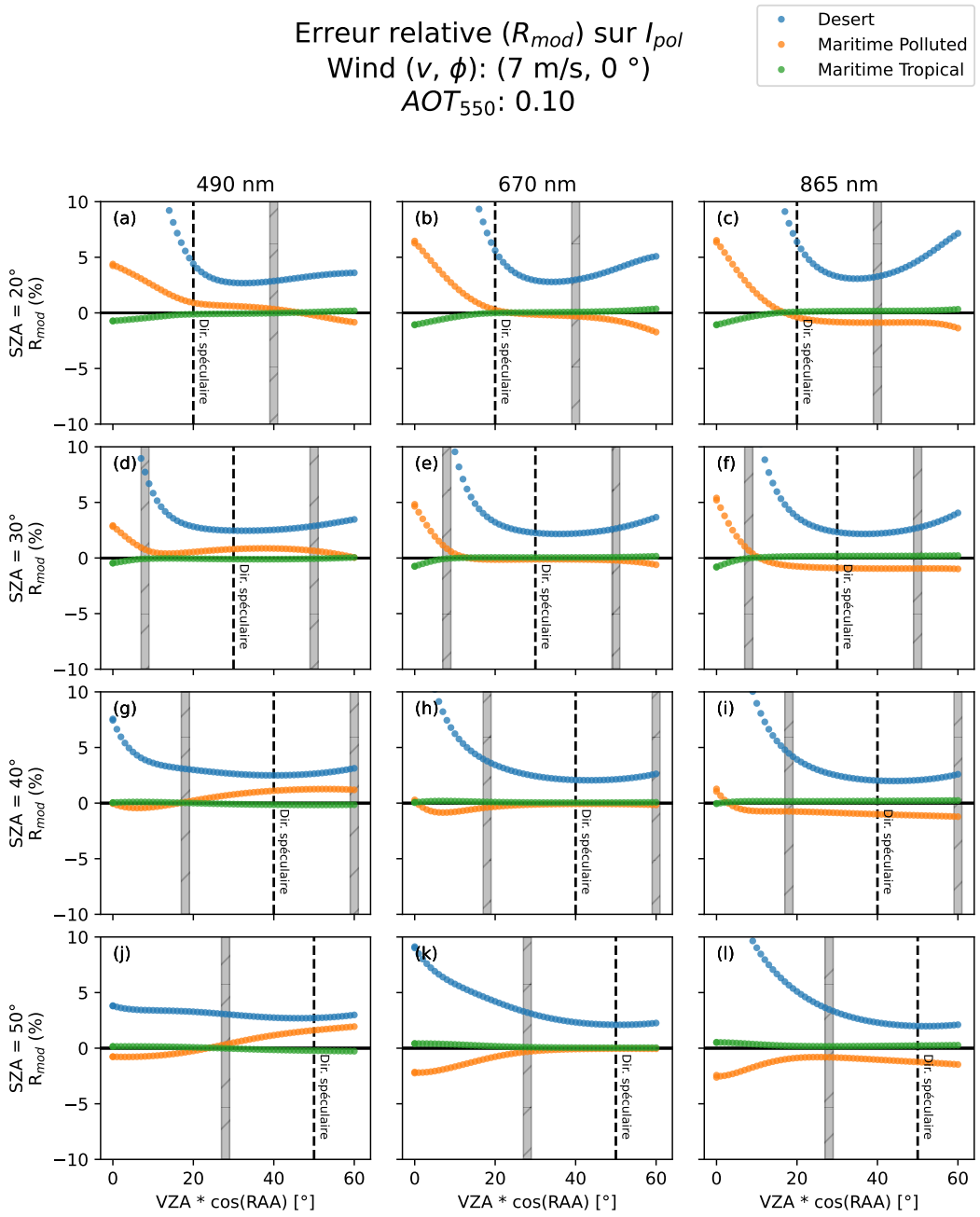


FIGURE 114 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.10 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

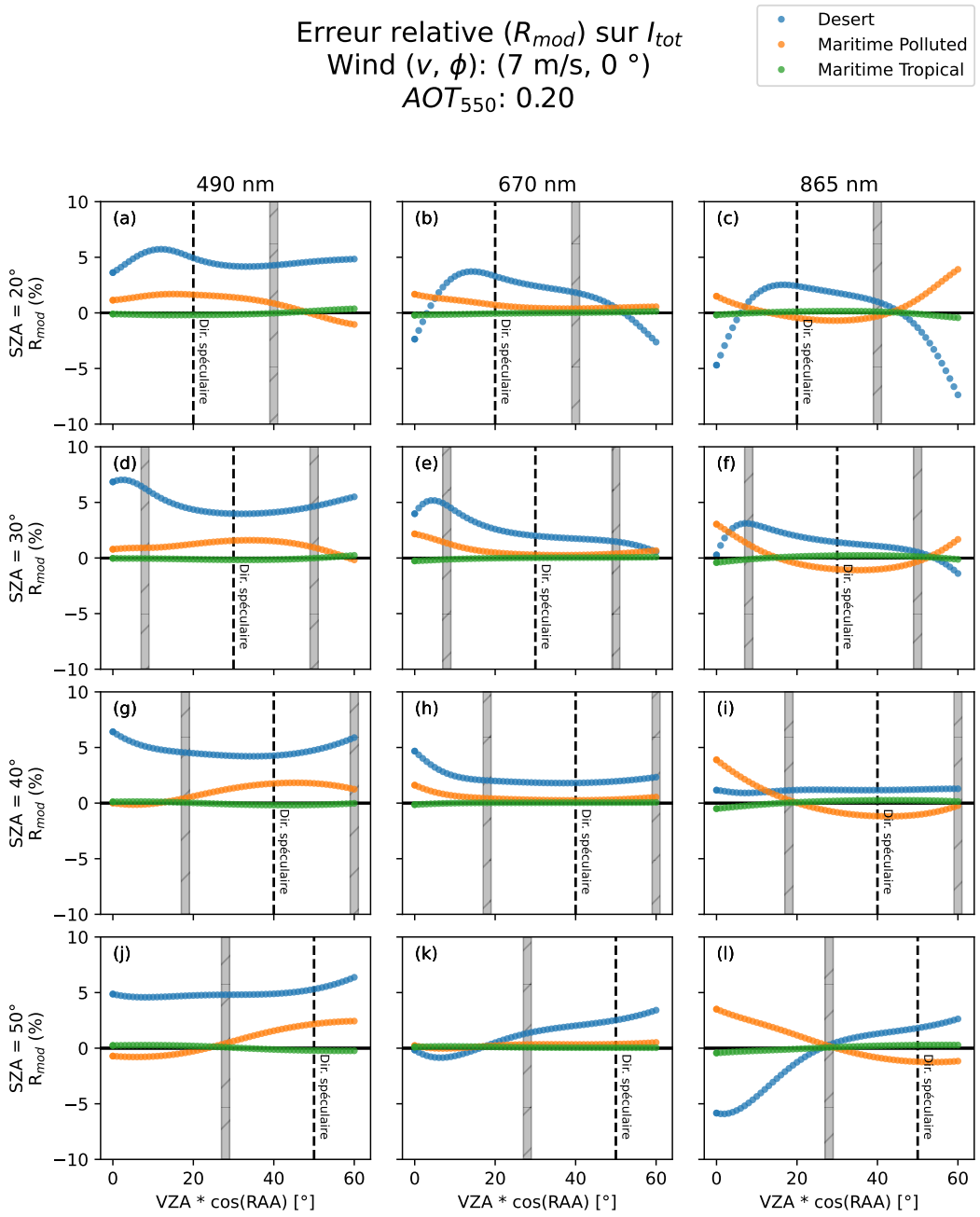


FIGURE 115 – Erreur relative R_{mod} en réflectance totale pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

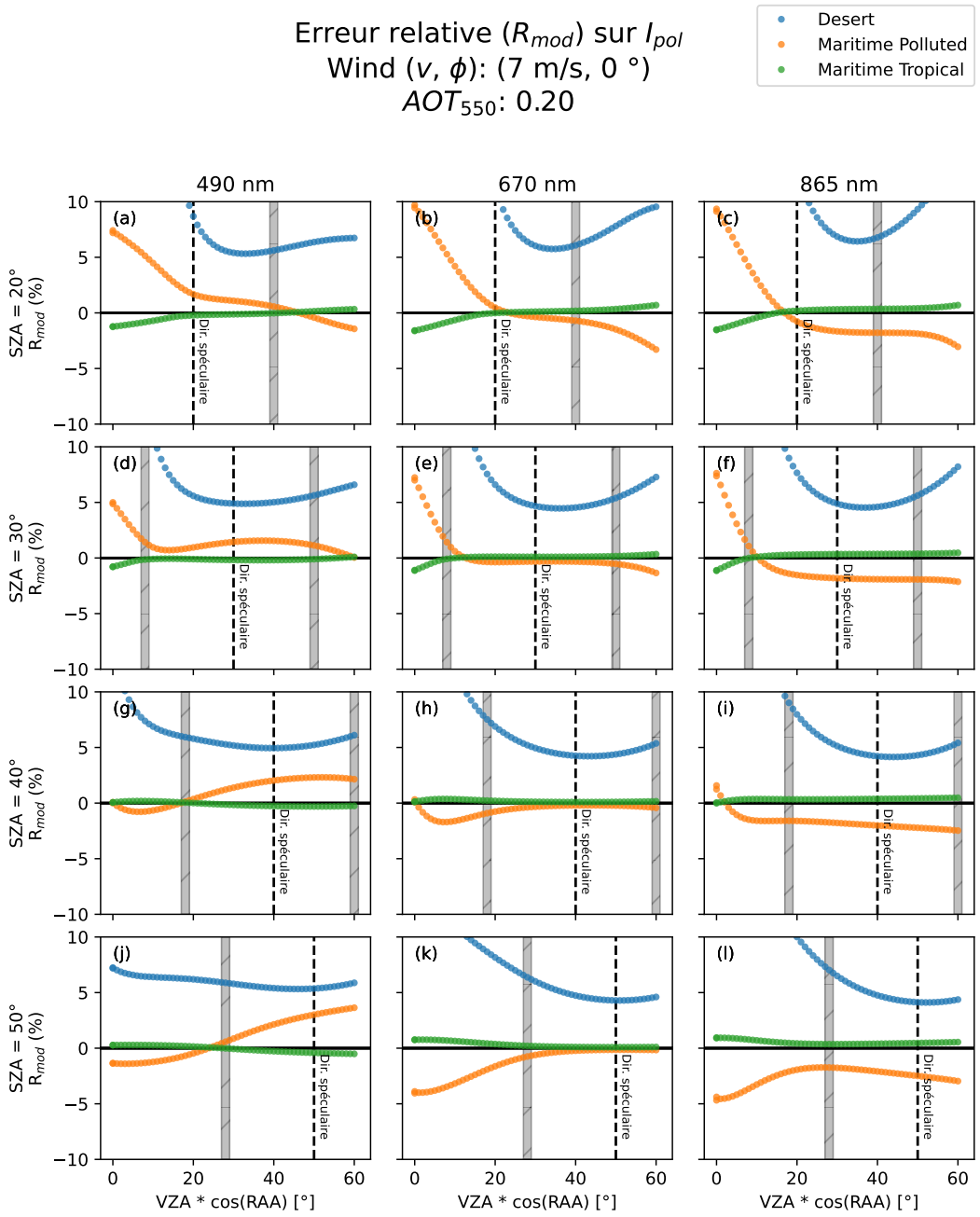


FIGURE 116 – Erreur relative R_{mod} en réflectance polarisée pour une AOT_{550} de 0.20 et une vitesse du vent V_{wind} de 7 m/s. En axe des abscisses : le produit de l'angle zénithal de visée (VZA) avec l'angle azimutal relatif (RAA). En axe des ordonnées : erreur relative R_{mod} (cf. équation 18) exprimée en pourcentage. La ligne verticale en pointillés représente la direction spéculaire. La zone hachurée représente la zone d'invariance à la vitesse du vent. Les paramètres WDS, W. Azm, SZA, représentent, respectivement, la vitesse du vent, l'azimut (direction) du vent, et l'angle zénithal solaire.

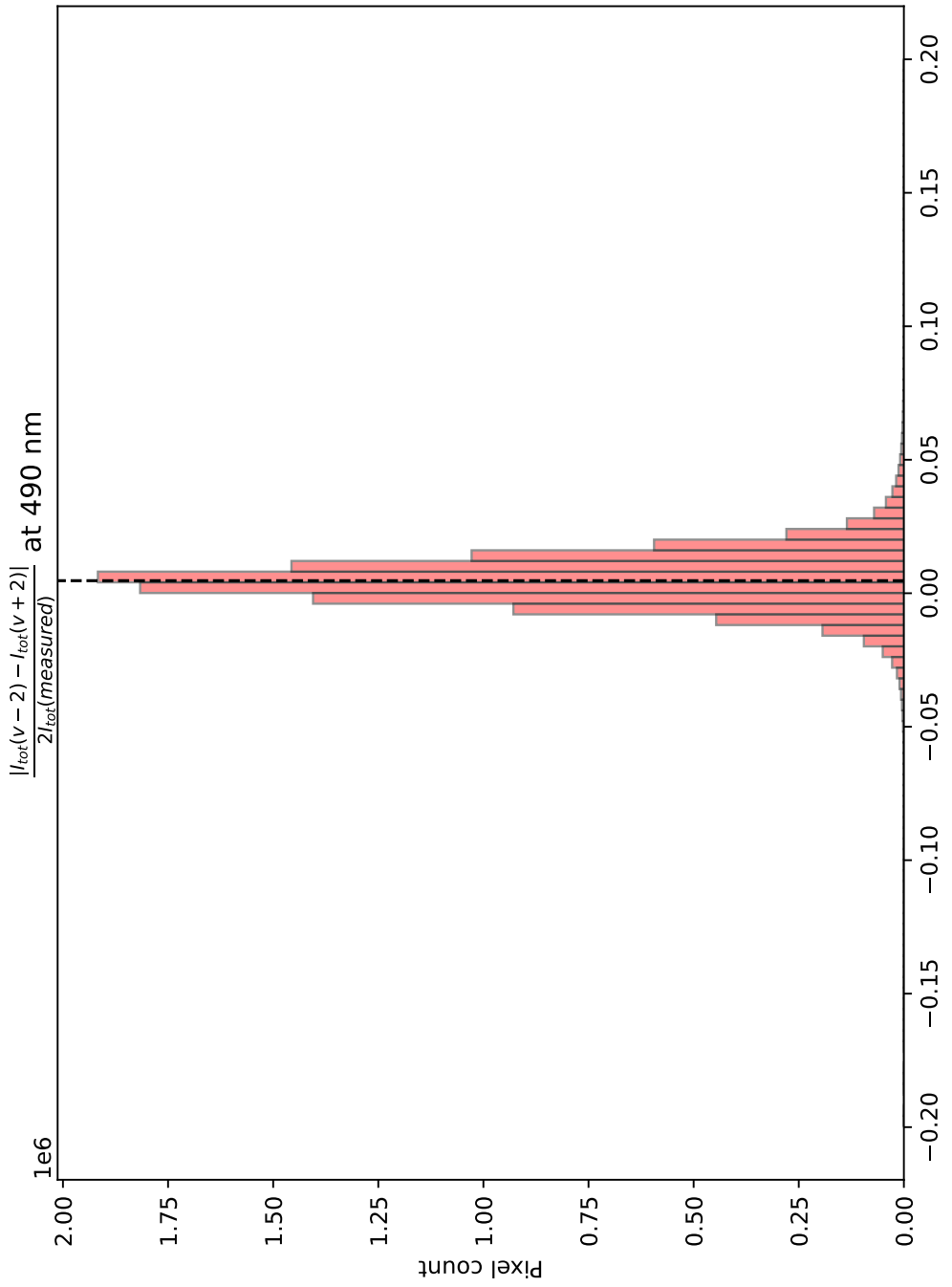


FIGURE 117 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 490 nm.

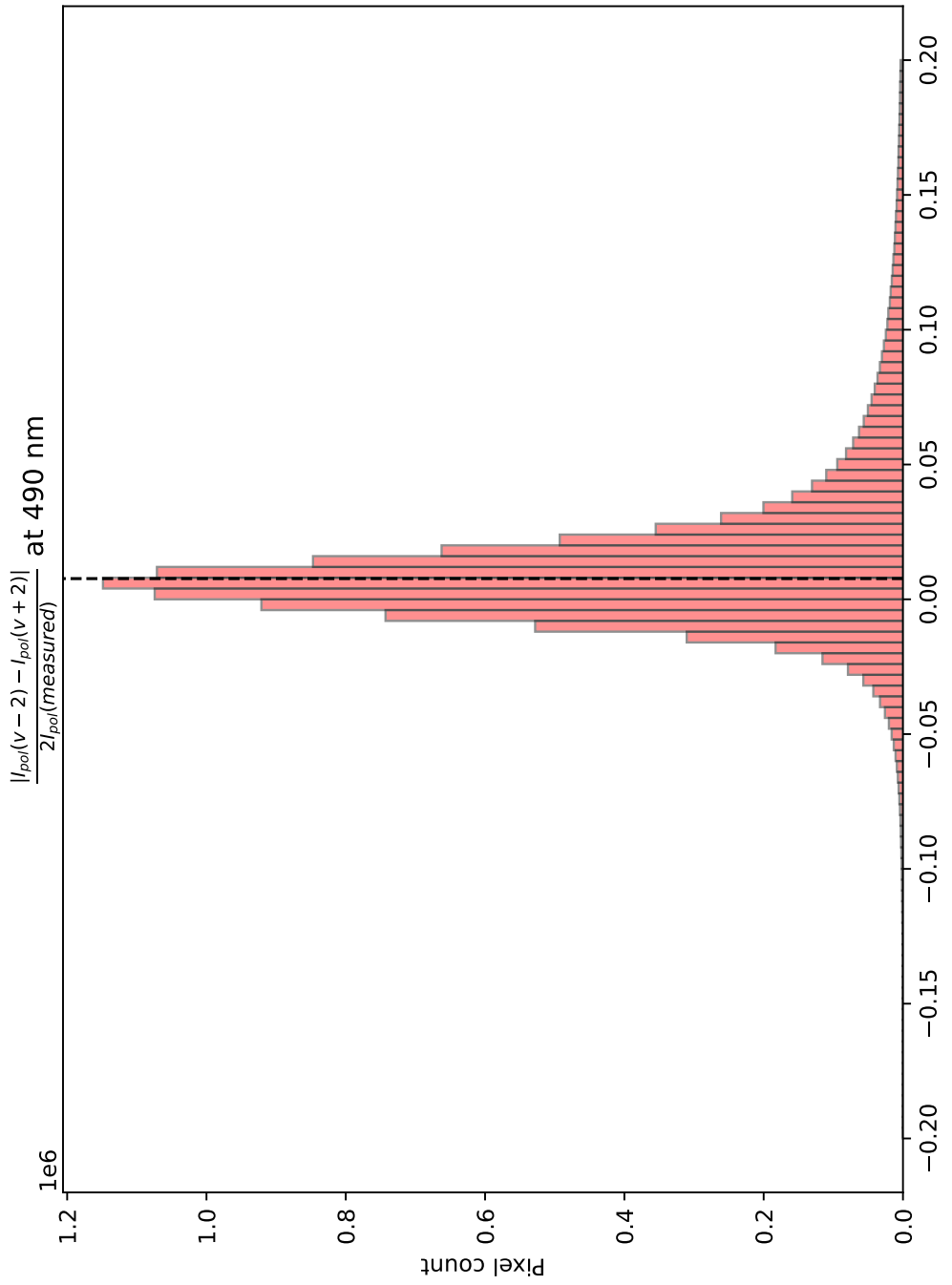


FIGURE 118 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 490 nm.

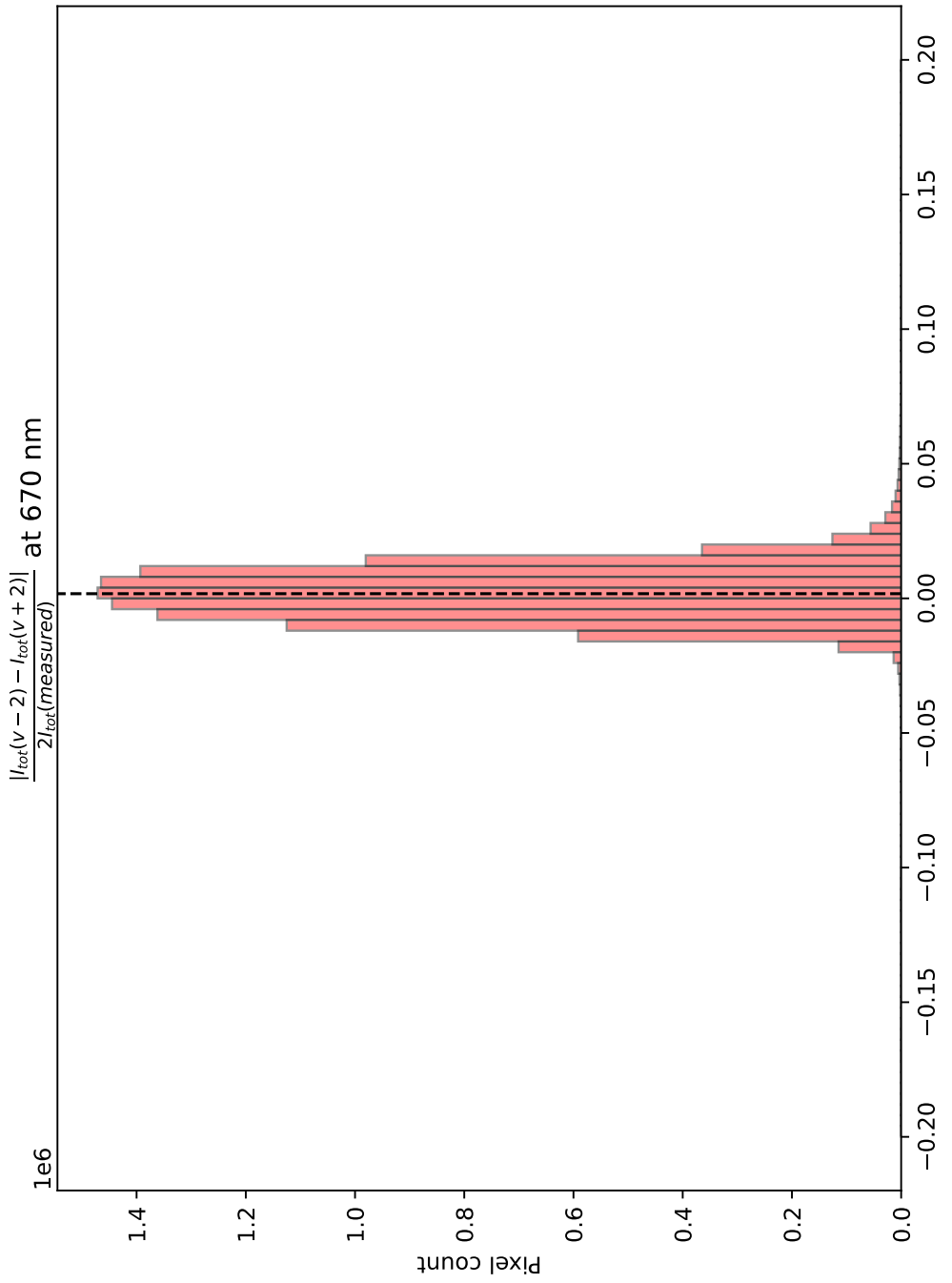


FIGURE 119 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 670 nm.

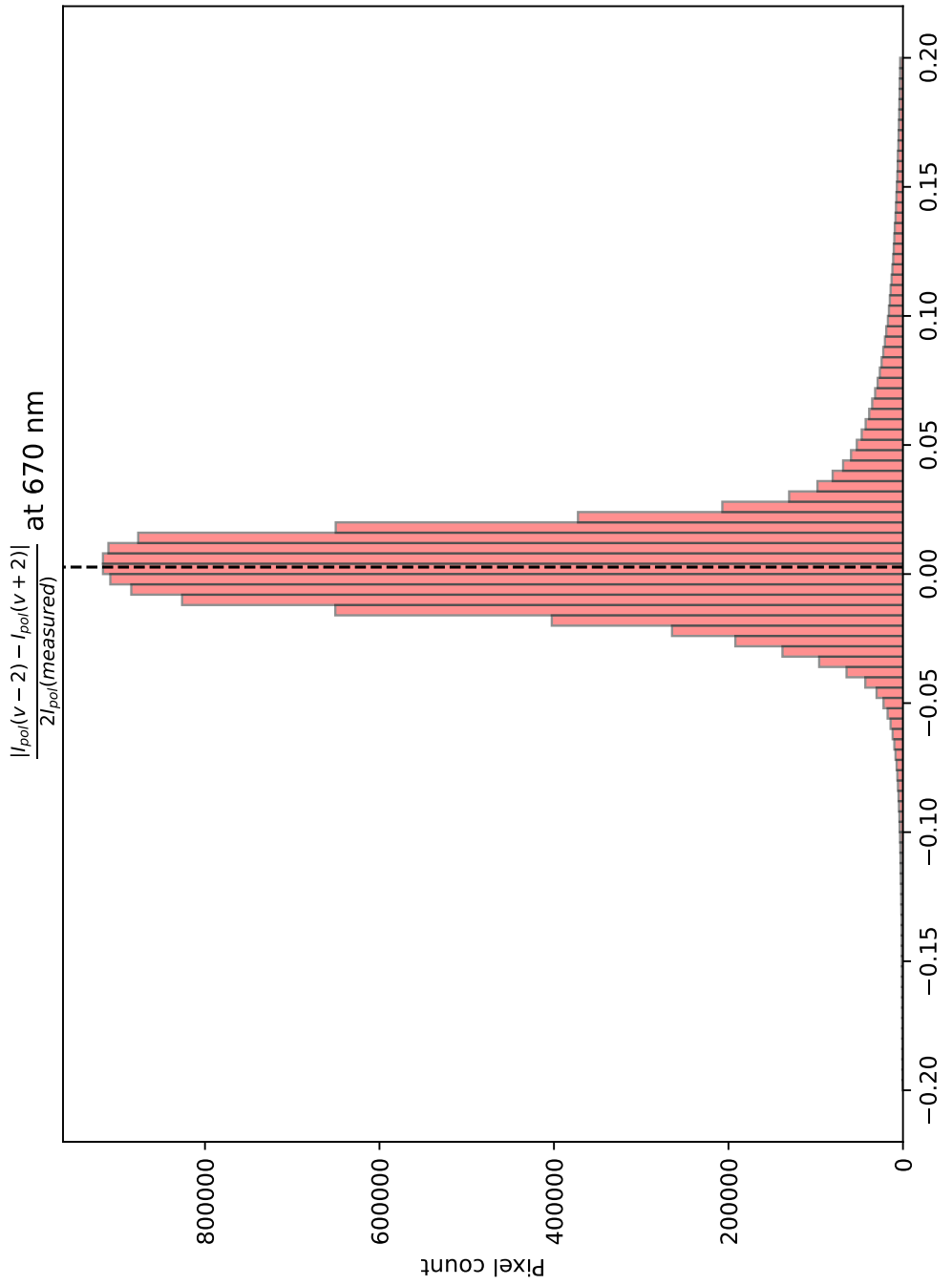


FIGURE 120 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 670 nm.

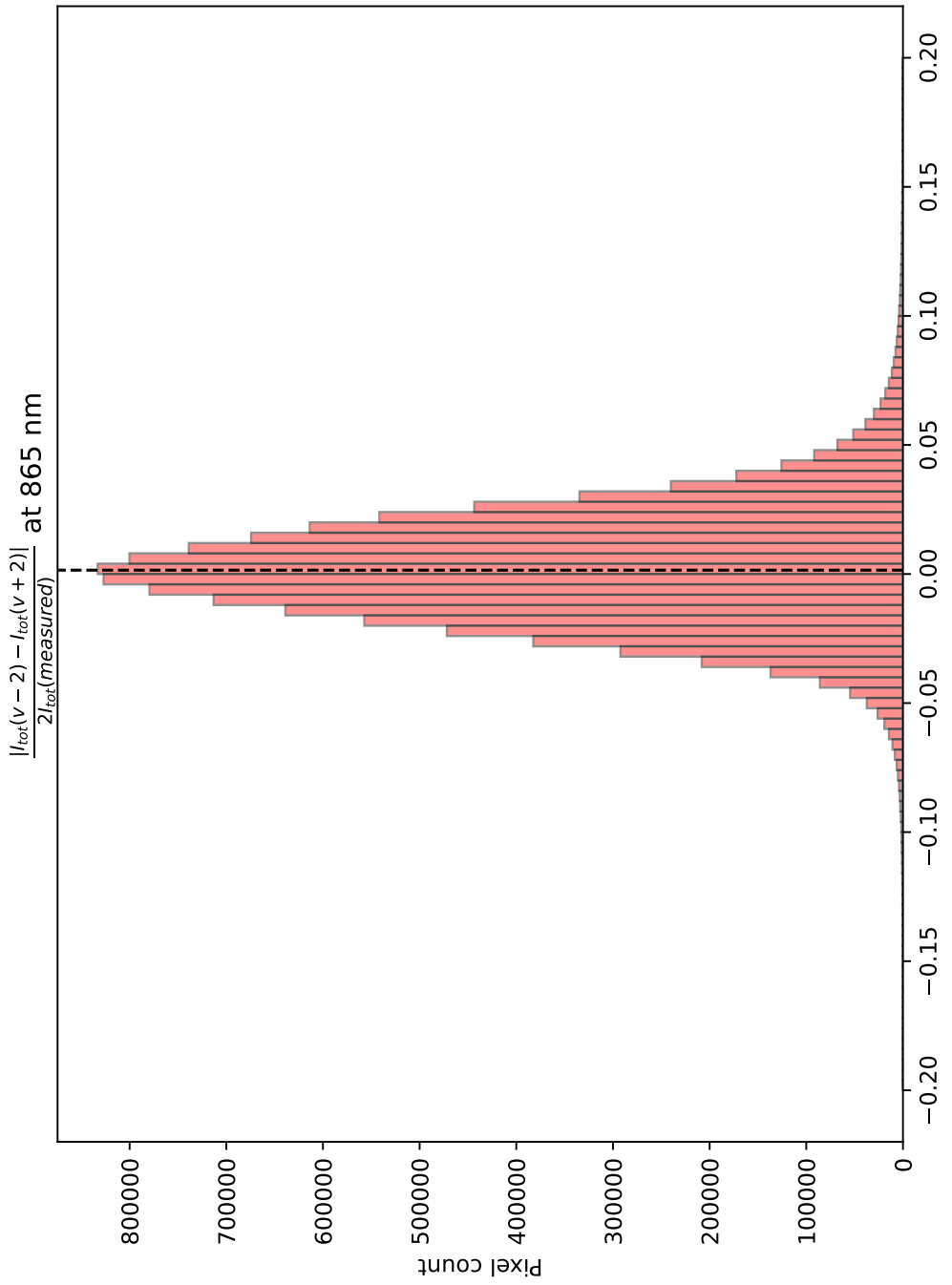


FIGURE 121 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 865 nm.

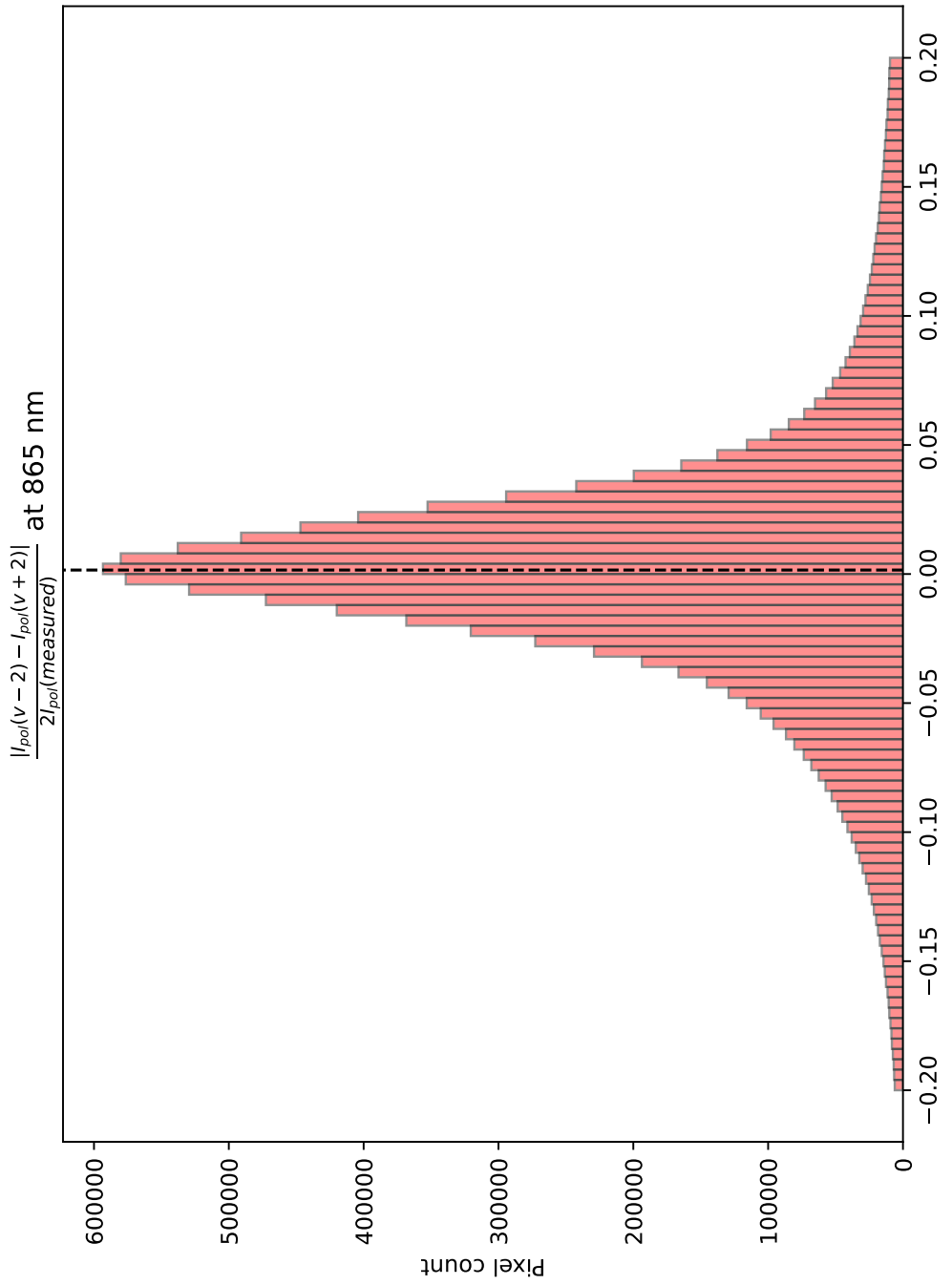


FIGURE 122 – Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 865 nm.

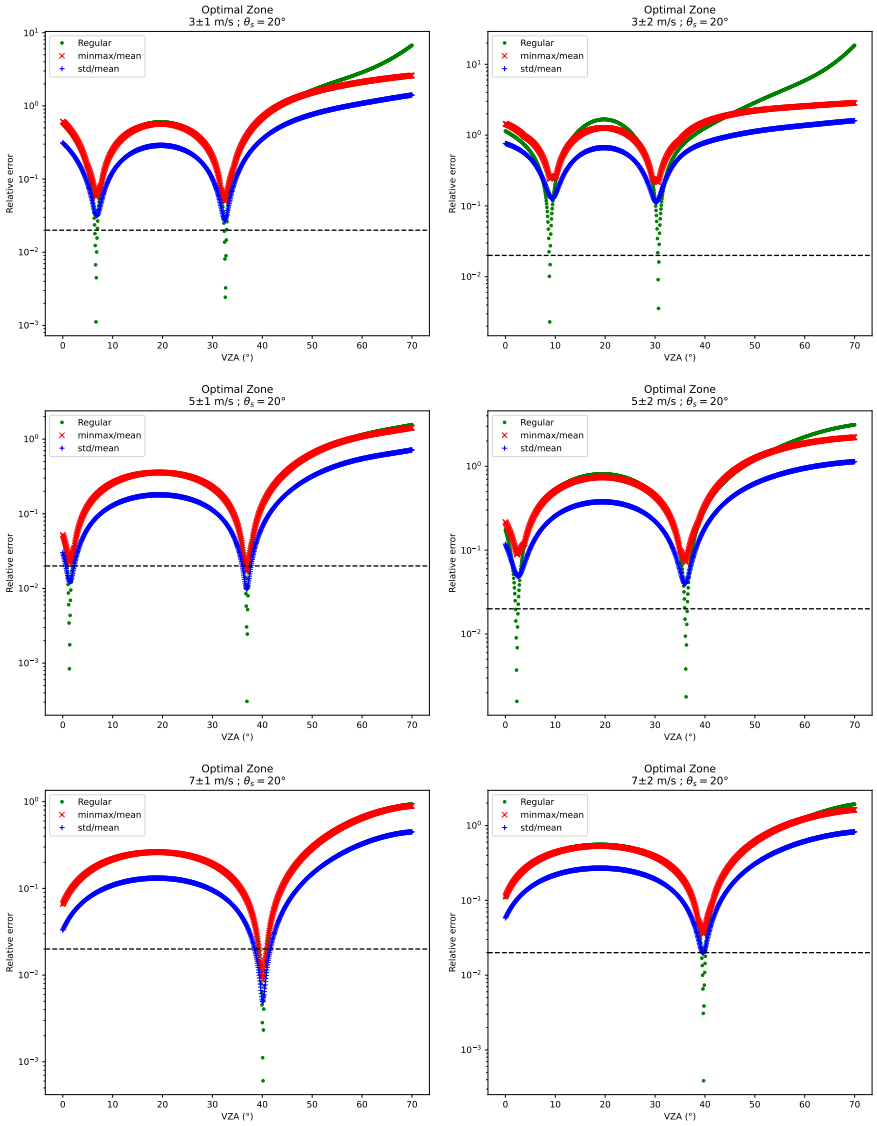


FIGURE 123 – Réflectance spéculaire dans le plan principal. En axe des abscisses : l'angle zénithal de visée. En axe des ordonnées : la valeur de la différence relative en échelle logarithmique ; la ligne horizontale en pointillés dénote la valeur 2 %. De gauche à droite : définition de la zone géométrique pour 1 m/s et 2 m/s d'incertitude sur la vitesse du vent, respectivement. De haut en bas : la vitesse de vent pour laquelle on définit la zone, ici de 3, 5, et 7 m/s, respectivement. L'angle zénithal solaire est de 20 degrés.

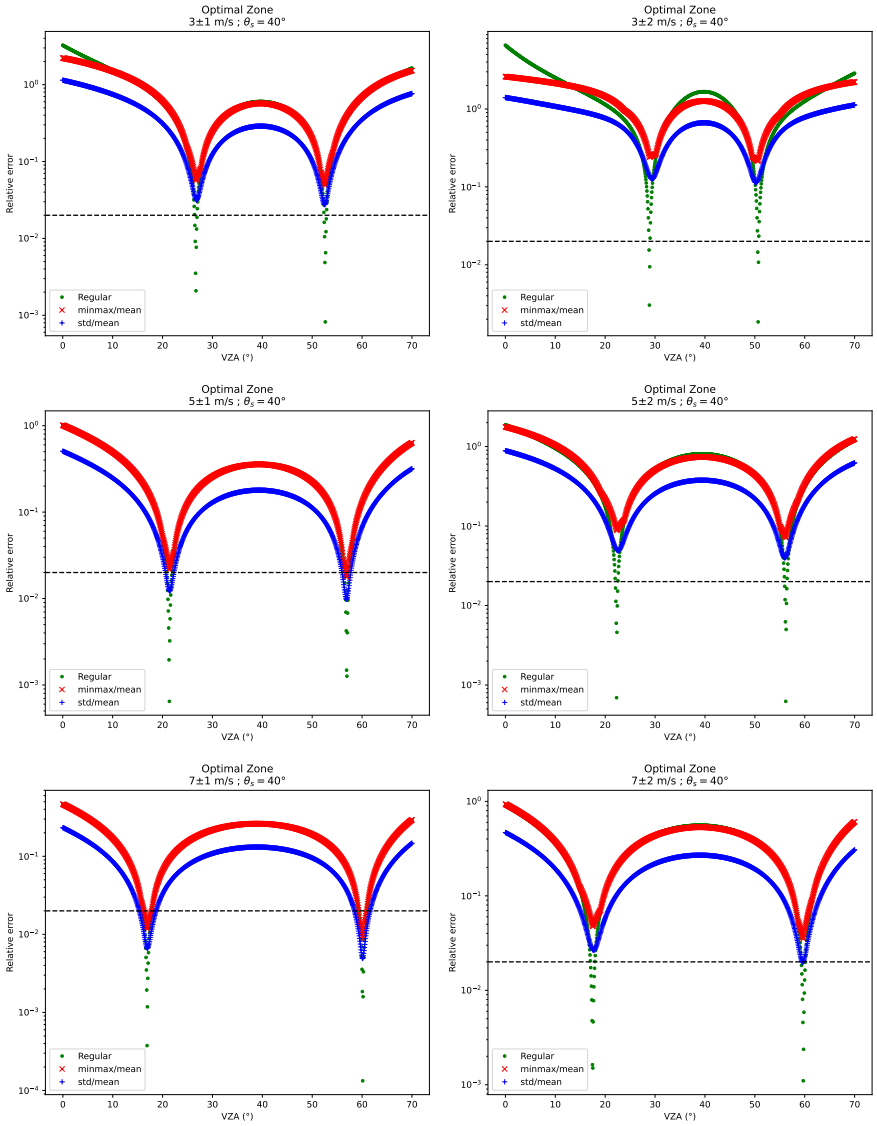


FIGURE 124 – Réflectance spéculaire dans le plan principal. En axe des abscisses : l'angle zénithal de visée. En axe des ordonnées : la valeur de la différence relative en échelle logarithmique ; la ligne horizontale en pointillés dénote la valeur 2 %. De gauche à droite : définition de la zone géométrique pour 1 m/s et 2 m/s d'incertitude sur la vitesse du vent, respectivement. De haut en bas : la vitesse de vent pour laquelle on définit la zone, ici de 3, 5, et 7 m/s, respectivement. L'angle zénithal solaire est de 40 degrés.

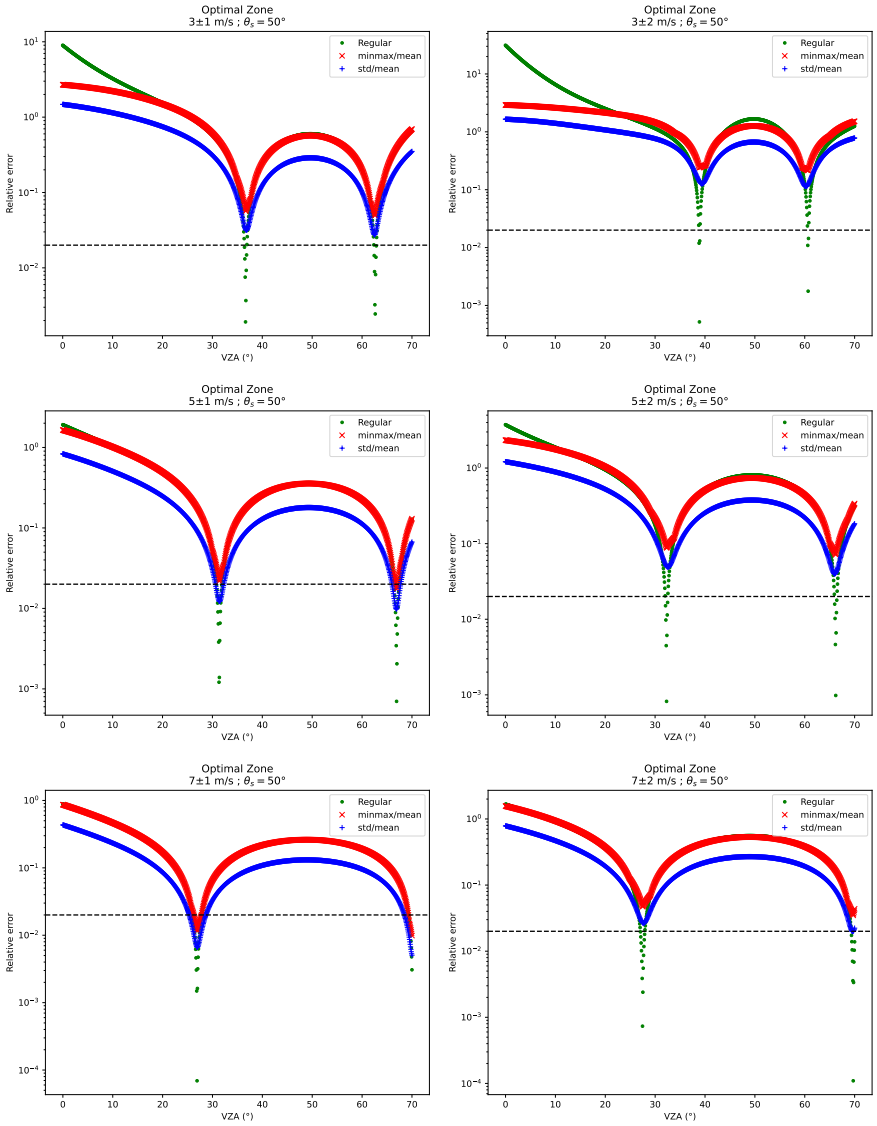


FIGURE 125 – Réflectance spéculaire dans le plan principal. En axe des abscisses : l'angle zénithal de visée. En axe des ordonnées : la valeur de la différence relative en échelle logarithmique ; la ligne horizontale en pointillés dénote la valeur 2 %. De gauche à droite : définition de la zone géométrique pour 1 m/s et 2 m/s d'incertitude sur la vitesse du vent, respectivement. De haut en bas : la vitesse de vent pour laquelle on définit la zone, ici de 3, 5, et 7 m/s, respectivement. L'angle zénithal solaire est de 50 degrés.

Liste des figures

1 Distribution des sites recommandés par le CEOS 23
2 Rendu 3D de 3MI 29
3 Le concept 3MI 29
4 Géométrie d'observation dans le référentiel terrestre 32
5 Représentation schématique du principe de l'objectif télécentrique 33
6 Référentiel instrumental et positionnement des pixels sur la matrice 35
7 Référentiel instrumental et positionnement des pixels sur la matrice 36
8 Représentation schématique d'une observation du phénomène du *glitter*. . 45
9 Simulations dans le plan principal à 490 nm en réflectance totale 53
10 Simulations dans le plan principal à 490 nm en réflectance polarisée 54
11 Simulations dans le plan principal à 865 nm en réflectance totale 55
12 Simulations dans le plan principal à 865 nm en réflectance polarisée 56
13 Sensibilité à la direction du vent - 865 nm en réflectance totale 58
14 Sensibilité à la direction du vent - 865 nm en réflectance polarisée 59
15 Erreur relative sur la luminance totale à 865 nm 60
16 Erreur relative sur la luminance polarisée à 865 nm 61
17 Distribution des valeurs l'AOT à 550 nm (PML2 2006-2010) 64
18 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 66
19 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 67
20 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 68
21 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 69

22 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 71
23 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 72
24 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 73
25 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 74
26 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance totale 77
27 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance polarisée 78
28 Distribution des valeurs de chlorophylle-a (MODIS 2006-2010) 81
29 Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 490 nm en réflectance totale . . 83
30 Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 555 nm en réflectance totale . . 84
31 Sensibilité à la quantité de chlorophylle-a à 670 nm en réflectance totale . . 85
32 Données L2 de SMOS pour la salinité de l'eau 87
33 Sensibilité à la salinité de l'eau à 490 nm en réflectance totale 89
34 Sensibilité à la salinité de l'eau à 865 nm en réflectance totale 90
35 Sensibilité à la salinité de l'eau à 1650 nm en réflectance totale 91
36 Sensibilité à la salinité de l'eau à 2130 nm en réflectance totale 92
37 Réflexion spéculaire dans le plan principal 97
38 Réflexion spéculaire représentée en diagramme polaire 99
39 Valeur absolue de l'erreur relative R_{abc} dans le plan principal 100
40 Valeur absolue de l'erreur relative R_{abc} dans le plan principal en luminance polarisée 100
41 Comparaison entre critères de sélection 106
42 Distribution géographique des pixels 113
43 Valeurs de la vitesse du vent de surface 114
44 Valeurs de l'épaisseur optique aérosol 116
45 Distributions des valeurs de réflectances et du DoLP à 490 nm 118
46 Distributions des valeurs de réflectances et du DoLP à 670 nm 119

47 Distributions des valeurs de réflectances et du DoLP à 865 nm 120
48 Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 490 nm 124
49 Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 670 nm 125
50 Valeurs des erreurs relatives en réflectance totale à 865 nm 125
51 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 490 nm . . . 127
52 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 670 nm . . . 128
53 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance totale à 865 nm . . . 128
54 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 490 nm 130
55 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 490 nm 130
56 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 670 nm 131
57 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 670 nm 131
58 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 865 nm 132
59 Diagramme polaire du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 865 nm 132
60 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 490 nm 134
61 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 670 nm 134
62 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance totale à 865 nm 135
63 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation 136

64 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation 137
65 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm - exemple de l'asymétrie en polarisation 137
66 Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 490 nm 138
67 Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 670 nm 138
68 Erreur relative en fonction de Lp et DOLP à 865 nm 139
69 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm - exemple asymétrie 140
70 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm - exemple asymétrie 141
71 Diagramme polaire des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm - exemple asymétrie 141
72 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 490 nm 143
73 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 670 nm 143
74 Valeurs des erreurs relatives en réflectance polarisée à 865 nm 144
75 Distribution géographique des erreurs relatives à 490 nm 145
76 Distribution géographique des erreurs relatives à 670 nm 146
77 Distribution géographique des erreurs relatives à 865 nm 147
78 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 490 nm 148
79 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 670 nm 149
80 Calcul de la régression linéaire entre les simulations et les mesures POLDER en réflectance polarisée à 865 nm 149
81 Série temporelle des erreurs relatives en réflectance totale 151
82 Série temporelle des erreurs relatives en réflectance totale 152
83 Série temporelle des erreurs relatives en réflectance totale 153

84 Erreurs relative avec un critère ne supposant pas la monotonie de la réflectance TOA du *glitter* 160
85 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 166
86 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 167
87 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 168
88 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 169
89 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 170
90 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 171
91 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance totale 172
92 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance totale 173
93 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 174
94 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 175
95 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 176
96 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 177
97 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 178
98 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 179
99 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 490 nm en réflectance polarisée 180
100 Sensibilité à la quantité d'aérosols à 865 nm en réflectance polarisée 181
101 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance totale 182
102 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance polarisée 183
103 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance totale 184
104 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance polarisée 185
105 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance totale 186

106 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 3 m/s) en réflectance polarisée . . . 187
107 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance totale . . . 188
108 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance polarisée . . . 189
109 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance totale . . . 190
110 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 5 m/s) en réflectance polarisée . . . 191
111 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance totale . . . 192
112 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.05 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance polarisée . . . 193
113 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance totale . . . 194
114 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.10 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance polarisée . . . 195
115 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance totale . . . 196
116 Sensibilité à aux types d'aérosols (AOT_{550} = 0.20 et V_{wind} = 7 m/s) en réflectance polarisée . . . 197
117 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 490 nm . . . 198
118 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 490 nm . . . 199
119 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 670 nm . . . 200

120 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 670 nm 201
121 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance totale à 865 nm 202
122 Histogramme du critère de sélection / sensibilité en réflectance polarisée à 865 nm 203
123 Comparaison entre critères de sélection 204
124 Comparaison entre critères de sélection 205
125 Comparaison entre critères de sélection 206

Liste des tableaux

1 Canaux de 3MI et leurs principales utilisations 31

2 Canaux de 3MI et leurs principales propriétés 34

3 Quelques valeurs statistiques décrivant la distribution de la vitesse du vent de surface pour les points d'étalonnage pré-sélectionnés. 114

4 Quelques valeurs statistiques décrivant la distribution de l'AOT à 550 nm pour les points d'étalonnage pré-sélectionnés. 116

5 Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 45 121

6 Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 46 121

7 Quelques valeurs statistiques décrivant les valeurs des distributions visibles dans la Figure 47 121

Liste des acronymes

3MI	Multi-viewing, Multi-channel, Multi-polarisation Imager
6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
ARTDECO	Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth Climate Observation
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
COT	Cloud Optical Thickness
DCC	Deep Convective Clouds
DoLP	Degree of Linear Polarization
ECV	Essential Climate Variables
EPS-SG	EUMETSAT Polar System - Second Generation
FWHM	Full Width at Half Maximum (largeur à mi-hauteur)
GAA	Glint Azimuth Angle
IFOV	Instantaneous Field Of View
LOA	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
LUT	Look-Up Table
METOP-SG	Meteorological Operational Satellite - Second Generation

MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRI	Modèle Radiométrique Instrumental
OPAC	Optical Properties of Aerosols and Clouds
OSIRIS	Observing System Including PolaRisation in the Solar Infrared Spectrum
PARASOL	Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Science Coupled with Observations from a Lidar
PICS	Pseudo-Invariant Calibration Sites
PML2	POLDER-MODIS Level-2
POLDER	Polarization and Directionality of Earth Reflectances
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity satellite
SNO	Simultaneous Nadir Overpass
SNR	Signal to Noise Ratio
SPOT	Satellites Pour l'Observation de la Terre
SWIR	Short-Wave Infrared
TOA	Top Of Atmosphere
VII	Visible Infrared Imager
VNIR	Visible Near-Infrared

Références

Monique F. M. A. Albert, Magdalena D. Anguelova, Astrid M. M. Manders, Martijn Schaap, and Gerrit de Leeuw. Parameterization of oceanic whitecap fraction based on satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(21) :13725–13751, November 2016. ISSN 1680-7324. doi : 10.5194/acp-16-13725-2016. URL https://acp.copernicus.org/articles/16/13725/2016/.

F Auriol, J.-F. Léon, J.-Y. Balois, C Verwaerde, P François, J Riedi, F Parol, F Waquet, D Tanré, and P Goloub. Multidirectional visible and shortwave infrared polarimeter for atmospheric aerosol and cloud observation : OSIRIS (Observing System Including PolaRisation in the Solar Infrared Spectrum). 7149 :71491D, 2008. ISSN 0277786X. doi : 10.1117/12.806421. URL http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.806421. ISBN : 9780819473912.

Carla Barroso, I. F. Trigo, F. Olesen, C. Dacamara, and M. P. Queluz. Intercalibration of NOAA and Meteosat window channel brightness temperatures. *International Journal of Remote Sensing*, 26(17) :3717–3733, 2005. ISSN 13665901. doi : 10.1080/01431160500159834.

D. R. Bates. Rayleigh scattering by air. *Planetary and Space Science*, 32(6) :785–790, 1984. ISSN 00320633. doi : 10.1016/0032-0633(84)90102-8.

Bertrand Fougnie and Patrice Henry. Absolute Calibration Using Rayleigh Scattering. Technical report, 2015. Volume : 1.

Stephan Bojinski, Michel Verstraete, Thomas C. Peterson, Carolin Richter, Adrian Simmons, and Michael Zemp. The Concept of Essential Climate Variables in Support of Climate Research, Applications, and Policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9) :1431–1443, September 2014. ISSN 1520-0477, 0003-0007. doi : 10.1175/BAMS-D-13-00047.1. URL https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-13-00047.1.

Marc Bouvet. Radiometric comparison of multispectral imagers over a pseudo-invariant calibration site using a reference radiometric model. *Remote Sensing of Environment*, 140, 2014. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2013.08.039. ISBN : 0034-4257.

F. M. Bréon. Parasol Level 2 Data Format. Technical, December 2016. URL https://www.icare.univ-lille.fr/asd-content/parasol/docs/Parasol_Level-2_format_latest.pdf.

F. M. Bréon and N. Henriot. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 111(6), 2006. ISSN 21699291. doi : 10.1029/2005JC003343.

François-Marie Bréon. Comment on Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, 37(3) :428, 1998. ISSN 0003-6935. doi : 10.1364/ao.37.000428.

Anthony Bucholtz. Response to comment on Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, 37(3) :430, 1998. ISSN 0003-6935. doi : 10.1364/ao.37.000430.

J. C. Buriez, C. Vanbauce, F. Parol, P. Goloub, M. Herman, B. Bonnel, Y. Fouquart, P. Couvert, and G. Seze. Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER. *International Journal of Remote Sensing*, 18(13) :2785–2813, 1997. ISSN 13665901. doi : 10.1080/014311697217332.

Changyong Cao and Andrew K. Heidinger. Inter-comparison of the longwave infrared channels of MODIS and AVHRR/NOAA-16 using simultaneous nadir observations at orbit intersections. *Earth Observing Systems VII*, 4814 :306, 2002. ISSN 0277786X. doi : 10.1117/12.451690.

Changyong Cao, Michael Weinreb, and Hui Xu. Predicting simultaneous nadir overpasses among polar-orbiting meteorological satellites for the intersatellite calibration of radiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(4) :537–542, 2004. ISSN 07390572. doi : 10.1175/1520-0426(2004)021<0537:PSNOAP>2.0.CO;2.

Changyong Cao, Fuzhong Weng, Mitch Goldberg, Xiangqian Wu, Hui Xu, and Pubu Ciren. Intersatellite calibration of Polar-orbiting radiometers using the SNO/SCO method. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1 :109–112, 2005. doi : 10.1109/IGARSS.2005.1526116. ISBN : 0780390504.

Changyong Cao, Aisheng Wu, Xiaoxiong Xiong, and Xiangqian Wu. Intercalibrating MetOP/AVHRR and AQUA/MODIS with improved SNO accuracy. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pages 2260–2263, 2007. doi : 10.1109/IGARSS.2007.4423290. ISBN : 1424412129.

Changyong Cao, Xiaoxiong Xiong, Aisheng Wu, and Xiangqian Wu. Assessing the consistency of AVHRR and MODIS L1B reflectance for generating Fundamental Climate Data Records. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(9) :1–10, 2008. ISSN 01480227. doi : 10.1029/2007JD009363.

Changyong Cao, Ruiyue Chen, and Laury Miller. Monitoring the Jason-2/AMR Stability Using SNO Observations from AMSU on MetOp-A. *Marine Geodesy*, 34(3-4) :431–446, 2011. ISSN 01490419. doi : 10.1080/01490419.2011.584829.

Gyanesh Chander, Xiaoxiong (Jack) Xiong, Taeyoung (Jason) Choi, and Amit Angal. Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, 114(4) :925–939,

2010. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2009.12.003. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.003. Publisher : Elsevier Inc.

Gyanesh Chander, Tim J. Hewison, Nigel Fox, Xiangqian Wu, Xiaoxiong Xiong, and William J. Blackwell. Overview of intercalibration of satellite instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3) :1056–1080, 2013. ISSN 01962892. doi : 10.1109/TGRS.2012.2228654. ISBN : 0196-2892.

Lionel Clermont, Céline Michel, Emmanuel Mazy, Yvan Stockman, Charlotte Pachot, Carmine Mastrandread, and Niccolo Daddi. Stray-light calibration and correction for the MetOp-SG 3MI mission. In Alison B. Peck, Chris R. Benn, and Robert L. Seaman, editors, *Observatory Operations : Strategies, Processes, and Systems VII*, page 7, Austin, United States, July 2018. SPIE. ISBN 978-1-5106-1961-6 978-1-5106-1962-3. doi : 10.1117/12.2314208. URL https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10704/2314208/Stray-light-calibration-and-correction-for-the-MetOp-SG-3MI/10.1117/12.2314208.full.

Charles Cox and Walter Munk. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter. *Journal of the Optical Society of America*, 44(11) :838, 1954. ISSN 0030-3941. doi : 10.1364/JOSA.44.000838. URL https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-44-11-838.

Charles Cox and Walter Munk. Some Problems in Optical Oceanography. *Journal of Marine Research*, (14, Jan. 1955) :63–78, 1955.

Charles Cox and Walter Munk. Deduced From Photographs. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, pages 401–488, 1956.

Audrey Crespin and Bruno Lafrance. 3MI calibration concept radiometric instrument model and pre-flight characterizations. Technical report, 2013.

Guillaume D'Almeida, Peter Koepke, and Eric P. Shettle. *Atmospheric Aerosols : Global Climatology and Radiative Characteristics*. Studies in geophysical optics and remote sensing. A. Deepak Pub., 1991. ISBN 978-0-937194-22-5. URL https://books.google.fr/books?id=C1wRAQAAIAAJ.

J. De Haan, P. Bosma, and J. Hovenier. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light. *Astronomy and astrophysics (Berlin. Print)*, 183(2) :371–391, 1987. ISSN 0004-6361.

M. Desmons, N. Ferlay, F. Parol, J. Riédi, and F. Thieuleux. A global multilayer cloud identification with POLDER/PARASOL. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(4) :1121–1139, 2017. ISSN 15588432. doi : 10.1175/JAMC-D-16-0159.1.

J. L. Deuzé, M. Herman, and R. Santer. Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 41(6) :483–494, 1989. ISSN 00224073. doi : 10.1016/0022-4073(89)90118-0.

Mohamed S. Djellali. *Caractérisation expérimentale de l'instrument aéroporté OSIRIS destiné à l'étude des nuages et des poussières atmosphériques*. PhD thesis, Université de Lille 1, 2017.

Mohamed Salah Djellali, Jérôme Riedi, Sébastien Marcq, Bertrand Fougnie, Souichiro Hioki, and Jean-Marc Nicolas. Development of calibration methods using specular reflection over the ocean for the Multiviewing, Multichannel, Multipolarization Imager (3MI) of the EUMETSAT Polar System – Second Generation (EPS-SG). volume 1115504, page 3, 2019. doi : 10.1117/12.2532501. Issue : October.

Bertrand Fougnie. Temporal decrease of the PARASOL radiometric sensitivity : in-flight characterization of the multi-angular aspect. 2010. ISBN 978-0-8194-8303-4. doi : 10.1117/12.859814. ISSN : 0277786X.

Bertrand Fougnie. Improvement of the PARASOL radiometric in-flight calibration based on synergy between various methods using natural targets. *IEEE Transactions on*

Geoscience and Remote Sensing, 54(4) :2140–2152, 2016. ISSN 01962892. doi : 10.1109/TGRS.2015.2496322.

Bertrand Fougnie and Régis Bach. Monitoring of radiometric sensitivity changes of space sensors using deep convective clouds : Operational application to PARASOL. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3) :851–861, 2009. ISSN 01962892. doi : 10.1109/TGRS.2008.2005634. ISBN : 0196-2892.

Bertrand Fougnie, Guillaume Bracco, Bruno Lafrance, Caroline Ruffel, Olivier Hagolle, and Claire Tinel. PARASOL in-flight calibration and performance. *Applied Optics*, 46 (22) :5435, 2007. ISSN 0003-6935. doi : 10.1364/AO.46.005435. URL https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-46-22-5435.

Bertrand Fougnie, Jérome Llido, Lydwine Gross-Colzy, Patrice Henry, and Denis Blumstein. Climatology of oceanic zones suitable for in-flight calibration of space sensors. page 78070S, San Diego, California, United States, August 2010. doi : 10.1117/12.859828. URL http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.859828.

Bertrand Fougnie, Camille Desjardins, Bruno Besson, Véronique Bruniquel, Naceur Meskini, Jens Nieke, and Marc Bouvet. Results from the radiometric validation of Sentinel-3 optical sensors using natural targets. 2016. ISBN 978-1-5106-0335-6. doi : 10.1117/12.2237575. ISSN : 1996756X.

Bertrand Fougnie, Thierry Marbach, Antoine Lacan, Ruediger Lang, Peter Schlüssel, Gabriele Poli, Rosemary Munro, and André B. Couto. The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager – Overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 219 :23–32, 2018. ISSN 00224073. doi : 10.1016/j.jqsrt.2018.07.008. URL https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.07.008. Publisher : Elsevier Ltd.

P Goloub, J L Deuzé, Maurice Herman, and Yves Fouquart. Analysis of the POLDER Polarization Measurements Performed Over Cloud Covers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(1) :78–88, 1994. ISSN 15580644. doi : 10.1109/36.285191.

Olivier Hagolle, Agnes Guerry, Laurent Cunin, Bruno Millet, and Jacqueline Perbos. POLDER level 1 processing algorithms. *Proceedings of SPIE*, 2758(2) :308 – 319, 1996. ISBN : 0819421391.

Olivier Hagolle, Philippe Goloub, Pierre Yves Deschamps, Hélène Cosnefroy, Xavier Briottet, Thierry Bailleul, and Jean Marc Nicolas. Results of polder in-flight calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3 II) :1543–1549, 1999. ISSN 01962892. doi : 10.1109/36.763265. ISBN : 0196-2892.

Olivier Hagolle, Jean Marc Nicolas, Bertrand Fougnie, Francis Cabot, and Patrice Henry. Absolute calibration of VEGETATION derived from an interband method based on the sun glint over ocean. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7) : 1472–1481, 2004. ISSN 01962892. doi : 10.1109/TGRS.2004.826805. ISBN : 0196-2892.

Tristan Harmel and Malik Chami. Influence of polarimetric satellite data measured in the visible region on aerosol detection and on the performance of atmospheric correction procedure over open ocean waters. *Optics Express*, 19(21) :20960, 2011. ISSN 1094-4087. doi : 10.1364/oe.19.020960.

Andrew K. Heidinger, Changyong Cao, and Jerry T. Sullivan. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(23) :AAC 11–1–AAC 11–10, 2002. ISSN 01480227. doi : 10.1029/2001JD002035.

Patrice Henry, Magdeleine Dinguirard, and Madeleine Bodilis. SPOT multitemporal calibration over stable desert areas. 1938 :67–76, 1993.

M. Hess, P. Koepke, and I. Schult. Optical Properties of Aerosols and Clouds : The Software

Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5) :831–844, 1998. ISSN 00030007. doi : 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2.

Yoram J. Kaufman. Satellite sensing of aerosol absorption. *Journal of Geophysical Research*, 92(D4) :4307, 1987. ISSN 0148-0227. doi : 10.1029/JD092iD04p04307. URL http://doi.wiley.com/10.1029/JD092iD04p04307.

Susan Kay, John D. Hedley, and Samantha Lavender. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes : A review of methods for visible and near-infrared wavelengths. *Remote Sensing*, 1(4) :697–730, 2009. ISSN 20724292. doi : 10.3390/rs1040697. ISBN : 2072-4292.

Peter Koepke. Effective reflectance of oceanic whitecaps. *Applied Optics*, 23(11) :1816, 1984. ISSN 0003-6935. doi : 10.1364/ao.23.001816.

Svetlana Y Kotchenova and Eric F Vermote. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Applied optics*, 46(20) :4455–64, 2007. ISSN 1559-128X. URL http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17579701.

Svetlana Y. Kotchenova, Eric F. Vermote, Raffaella Matarrese, and Frank J. Klemm. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I : Path radiance. *Applied Optics*, 45(26) :6762–6774, 2006. ISSN 15394522. doi : 10.1364/AO.45.006762.

Labsphere. Technical Guide : Integrating Sphere Theory and Applications. *MANUAL for Integration Sphere*, pages 1–19, 2011. ISSN 1542-2224. URL http://www.labsphere.com/.

S. Lachérade, S. Fourest, P. Gamet, and L. Lebègue. Pleiades Absolute Calibration : Inflight Calibration Sites and Methodology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1(September) :549–554, 2012. ISSN 1682-1750. doi : 10.5194/isprsarchives-xxxix-b1-549-2012.

Robert A. Lacovazzi and Chang Yong Cao. Reducing uncertainties of SNO-estimated intersatellite AMSU-A brightness temperature biases for surface-sensitive channels. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(6) :1048–1054, 2008. ISSN 07390572. doi : 10.1175/2007JTECHA1020.1.

Bruno Lafrance, Olivier Hagolle, Bernard Bonnel, Yves Fouquart, and Gérard Brogniez. Interband calibration over clouds for POLDER space sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(1) :131–142, 2002. ISSN 01962892. doi : 10.1109/36.981355.

Jacqueline Lenoble, Lorraine Remer, and Didier Tanre, editors. *Aerosol Remote Sensing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-17724-8 978-3-642-17725-5. doi : 10.1007/978-3-642-17725-5. URL https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17725-5.

Zhenyi Lin, Wei Li, Charles Gatebe, Rajesh Poudyal, and Knut Stamnes. Radiative transfer simulations of the two-dimensional ocean glint reflectance and determination of the sea surface roughness. *Applied Optics*, 55(6) :1206, 2016. ISSN 0003-6935. doi : 10.1364/ao.55.001206.

K. N. Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. 2002. ISBN 978-0-12-451451-5. URL https://www.elsevier.com/books/an-introduction-to-atmospheric-radiation/liou/978-0-12-451451-5.

Hubert Loisel, Lucile Duforet, David Dessailly, Malik Chami, and Phillippe Dubuisson. Investigation of the variations in the water leaving polarized reflectance from the POLDER satellite data over two biogeochemical contrasted oceanic areas. *Optics Express*, 16(17) :12905, August 2008. ISSN 1094-4087. doi : 10.1364/OE.16.012905. URL https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-17-12905.

Gunnar Luderer, James A Coakley, and William R Tahnk. Using sun glint to check the

relative calibration of reflected spectral radiances. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(10) :1480–1493, 2005. ISSN 07390572. doi : 10.1175/JTECH1774.1.

F. Maignan, F. M. Bréon, and R. Lacaze. Bidirectional reflectance of Earth targets : Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot. *Remote Sensing of Environment*, 90(2) :210–220, 2004. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2003.12.006.

Fabienne Maignan, François Marie Bréon, Emilie Fédèle, and Marc Bouvier. Polarized reflectances of natural surfaces : Spaceborne measurements and analytical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 113(12) :2642–2650, 2009. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2009.07.022. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.022. Publisher : Elsevier Inc.

T. Marbach, P. Phillips, A. Lacan, and P. Schlüssel. The Multi-Viewing, -Channel, -Polarisation Imager (3MI) of the EUMETSAT Polar System - Second Generation (EPS-SG) dedicated to aerosol characterisation. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII*, 8889 :88890I, 2013. ISSN 0277-786X. doi : 10.1117/12.2028221. URL http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2028221. ISBN : 9780819497581.

Brian L. Markham, Julia A. Barsi, Dennis L. Helder, Kurtis J. Thome, and John L. Barker. Evaluation of the Landsat-5 TM radiometric calibration history using desert test sites. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X*, 6361 :63610V, 2006. ISSN 0277786X. doi : 10.1117/12.690065. ISBN : 0819464562.

Hugh J Mclellan. *Physical Oceanography*. Pergamon Press, Inc., 1965.

Carl A. Mears and Frank J. Wentz. Construction of the RSS V3.2 lower-tropospheric temperature dataset from the MSU and AMSU microwave sounders. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(8) :1493–1509, 2009. ISSN 07390572. doi : 10.1175/2009JTECHA1237.1.

Edward C. Monahan and Iognáid O. Muircheartaigh. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed. *J. PHYS. OCEANOGR.*, 10(12 , Dec. 1980) :2094–2099, 1980. ISSN 00223670. doi : 10.1175/1520-0485(1980)010<2094:opldoo>2.0.co;2.

Karl D Moore, Kenneth J Voss, and Howard R Gordon. Spectral reflectance of whitecaps : Their contribution to water-leaving radiance. page 7, 2000.

Daniel L. Morstad and Dennis L. Helder. Use of pseudo-invariant sites for long-term sensor calibration. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1(1) :253–256, 2008. doi : 10.1109/IGARSS.2008.4778841. ISBN : 9781424428083.

F. Mélin, G. Sclep, T. Jackson, and S. Sathyendranath. Uncertainty estimates of remote sensing reflectance derived from comparison of ocean color satellite data sets. *Remote Sensing of Environment*, 177, 2016. ISSN 00344257. doi : 10.1016/j.rse.2016.02.014. ISBN : 0034-4257.

F. Parol, J. C. Buriez, C. Vanbauce, J. Riedi, L. C.-Labonnote, M. Doutriaux-Boucher, M. Vesperini, G. Sèze, P. Couvert, M. Viollier, and F. M. Bréon. Review of capabilities of multi-angle and polarization cloud measurements from POLDER. *Advances in Space Research*, 33(7) :1080–1088, 2004. ISSN 02731177. doi : 10.1016/S0273-1177(03)00734-8.

P Pinson and R Hagedorn. Ensemble Forecasts of Wind Speed Against Observations. Technical report, 2011. URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.283/full. Publication Title : Meteorological Applications Volume : 20 Issue : March.

Zegbeu Poussi. POLDER HDF Atmosphere Product Data Format. Technical, October 2005. URL https://www.icare.univ-lille.fr/asd-content/parasol/docs/POLDER_HDF_atmosphere_product.pdf.

J. Riedi, B. Marchant, S. Platnick, B. A. Baum, F. Thieuleux, C. Oudard, F. Parol, J. M. Nicolas, and P. Dubuisson. Cloud thermodynamic phase inferred from merged POLDER and

MODIS data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(23) :11851–11865, 2010. ISSN 16807316. doi : 10.5194/acp-10-11851-2010.

R. Santer, X. F. Gu, G. Guyot, J. L. Deuzé, C. Devaux, E. Vermote, and M. Verbrugghe. SPOT calibration at the La Crau test site (France). *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3) : 227–237, 1992. ISSN 00344257. doi : 10.1016/0034-4257(92)90080-4.

F. C. Seidel and C. Popp. Critical surface albedo and its implications to aerosol remote sensing. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(7) :1653–1665, July 2012. ISSN 1867-8548. doi : 10.5194/amt-5-1653-2012. URL https://amt.copernicus.org/articles/5/1653/2012/.

Hilawe Semunegus, Wesley Berg, John J. Bates, Kenneth R. Knapp, and Christian Kummerow. An extended and improved special sensor microwave imager (ssm/i) period of record. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(3) :424–436, 2010. ISSN 15588424. doi : 10.1175/2009JAMC2314.1.

Lei Shi and John J. Bates. Three decades of intersatellite-calibrated high-resolution infrared radiation sounder upper tropospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(4) :1–13, 2011. ISSN 01480227. doi : 10.1029/2010JD014847.

Malgorzata Stramska and Dariusz Stramski. Variability of particulate organic carbon concentration in the north polar Atlantic based on ocean color observations with Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS). *Journal of Geophysical Research C : Oceans*, 110(10) :1–16, 2005. ISSN 01480227. doi : 10.1029/2004JC002762.

H. U. Sverdrup, R. C. Murphy, Martin W. Johnson, and Richard H. Fleming. The Oceans : Their Physics, Chemistry, and General Biology. *Geographical Review*, 34(1) :1094, 1944. ISSN 00167428. doi : 10.2307/210609.

Didier Tanré, F. M. Bréon, J. L. Deuzé, O. Dubovik, F. Ducos, P. François, P. Goloub, M. Herman, A. Lifermann, and F. Waquet. Remote sensing of aerosols by using polarized,

directional and spectral measurements within the A-Train : the PARASOL mission. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 4(2) :2037–2069, 2011. ISSN 1867-8610. doi : 10.5194/amtd-4-2037-2011.

Bébé Toubbé. *Etalonnage en vol sur le glitter des canaux polarisés de l'instrument POLDER. Analyse d'images aéroportées.* PhD thesis, 1996.

Bébé Toubbé, Thierry Bailleul, Jean Luc Deuzé, Philippe Goloub, and Olivier Hagolle. In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the sun's glitter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 II) :513–525, 1999. ISSN 01962892. doi : 10.1109/36.739104. ISBN : 0196-2892.

E. Vermote, R. Santer, P. Y. Deschamps, and M. Herman. In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering. *International Journal of Remote Sensing*, 13(18) :3409–3429, 1992. ISSN 13665901. doi : 10.1080/01431169208904131. ISBN : 0143116920890.

Eric F. Vermote, Didier Tanré, Jean Luc Deuzé, Maurice Herman, and Jean Jacques Morcrette. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s : an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3) :675–686, 1997. ISSN 01962892. doi : 10.1109/36.581987. ISBN : 0196-2892.

Menghua Wang. Rayleigh radiance computations for satellite remote sensing : accounting for the effect of sensor spectral response function. *Optics Express*, 24(11), 2016. ISSN 1094-4087. doi : 10.1364/OE.24.012414.

F. Waquet, C. Cornet, J. L. Deuzé, O. Dubovik, F. Ducos, P. Goloub, M. Herman, T. Lapyonok, L. C. Labonnote, J. Riedi, D. Tanré, F. Thieuleux, and C. Vanbauce. Retrieval of aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(4) :991–1016, 2013. ISSN 18671381. doi : 10.5194/amt-6-991-2013.

A. Wu, X. Xiong, and C. Cao. Terra and Aqua MODIS inter-comparison of three reflective solar bands using AVHRR onboard the NOAA-KLM satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 29(7) :1997–2010, 2008a. ISSN 13665901. doi : 10.1080/01431160701355272.

Aisheng Wu, Xiaoxiong Xiong, Changyong Cao, and Amit Angal. Monitoring MODIS calibration stability of visible and near-IR bands from observed top-of-atmosphere BRDF-normalized reflectances over Libyan Desert and Antarctic surfaces. *Earth Observing Systems XIII*, 7081 :708113, 2008b. ISSN 0277786X. doi : 10.1117/12.795296. ISBN : 9780819473011.

Xiaoxiong Xiong. Using the Sonoran and Libyan Desert test sites to monitor the temporal stability of reflective solar bands for Landsat 7 enhanced thematic mapper plus and Terra moderate resolution imaging spectroradiometer sensors. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4(1) :043525, 2010. ISSN 1931-3195. doi : 10.1117/1.3424910.

Feng Xu, Oleg Dubovik, Peng Wang Zhai, David J. Diner, Olga V. Kalashnikova, Felix C. Seidel, Pavel Litvinov, Andrii Bovchaliuk, Michael J. Garay, Gerard Van Harten, and Anthony B. Davis. Joint retrieval of aerosol and water-leaving radiance from multispectral, multiangular and polarimetric measurements over ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(7), 2016. ISSN 18678548. doi : 10.5194/amt-9-2877-2016.

Guoqing Zhou, Chenyang Li, Tao Yue, Linjun Jiang, Na Liu, Yue Sun, and Mingyan Li. An overview of in-orbit radiometric calibration of typical satellite sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(7W4) :235–240, 2015. ISSN 16821750. doi : 10.5194/isprsarchives-XL-7-W4-235-2015.