



MASTER EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ESPACE

Promotion 2013 - 2015

OPTION : Télédétection et Système d'Information Géographique

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

INTITULE :

Evaluation de la caractérisation des nuages par les sondeurs infrarouges hyperspectraux IASI

Présenté par : Imane FAROUK

Effectué au : CNRM-GAME/Météo France et CNRS

Soutenu publiquement en Septembre 2015 devant le Jury composé de :

Grade/Nom&prénom	Institution	Qualité (Président /Encadrant/Examinateur)
Dr.Nadia FOURRIE	CNRM-GAME/Météo France et CNRS	Encadrante
Dr.Vincent GUIDARD	CNRM-GAME/Météo France et CNRS	Co-encadrant
Pr.Anas EMRAN	Institut Scientifique	Encadrant interne



Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements, à ceux qui m'a beaucoup appris au cours de ce stage, et à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable.

Je tiens à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique du Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en langue française CRASTE-LF, l'institut scientifique, et la faculté des sciences de Rabat, Université Mohammed V - (Maroc), et les intervenants professionnels responsables de la formation Sciences et Technologies de l'Espace pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci, et qui m'ont aidé dans la démarche administrative pour la réalisation de ce stage.

Je remercie chaleureusement mes encadrants de stage : Nadia Fourrié et Vincent Guidard, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage, je les remercie pour le temps qu'ils m'ont consacré, leurs disponibilités, leurs gentillesse et sans oublier leurs participation au cheminement de ce rapport.

Je tiens à remercier tout particulièrement Anas EMRAN, mon professeur encadrant du CRASTE-LF, pour m'avoir suivie tout au long de mon stage. Je le remercie pour son soutien, ses conseils pertinents, et ses corrections de ce rapport.

Je remercie également Jean Maziejewski qui s'est occupé de ma venue sur Toulouse, Javier Andrey Andres pour son soutien technique qui m'a beaucoup aidé.

Un grand merci à tous les membres de l'équipe du GMAP pour m'avoir accueillie, intégrée dans l'équipe, ce qui a contribué à ce que mon stage se passe dans les meilleures conditions.

Ma gratitude va ensuite aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Résumé

Les données satellitaires représentent aujourd'hui la vaste majorité des observations assimilées dans les modèles de prévision numérique du temps. Leur exploitation reste cependant sous-optimale, seulement 10% du volume total est assimilé en opérationnel. Environ 80% des données infrarouges étant affectées par les nuages, il est primordial de développer l'assimilation des observations satellitaires dans les zones nuageuses. Ainsi les modèles de prévision de Météo-France utilisent depuis février 2009 des observations nuageuses AIRS¹ et depuis 2012 pour IASI². L'exploitation du sondeur hyperspectral infrarouge IASI a déjà permis une amélioration des prévisions météorologiques grâce à sa précision et son contenu en information jamais égalés. Son utilisation dans les zones nuageuses reste cependant très complexe à cause de la forte non-linéarité des processus nuageux dans l'infrarouge. La méthode d'assimilation des radiances nuageuses en Météo France repose sur la caractérisation nuageuse du CO_2 -Slicing, cette méthode consiste à partir de simulations de températures de brillance en ciel clair et en ciel nuageux et des observations, à restituer une pression de sommet de nuage et une fraction nuageuse. Cette étude consiste à évaluer la performance de l'algorithme dans la caractérisation des nuages dans ARPEGE³ et dans AROME⁴. Nous avons vérifié la capacité de cet algorithme par deux approches. Une première étude idéalisée a été réalisée avec un modèle uni-dimensionnel, la deuxième étude porte sur des observations réelles, en utilisant deux périodes, entre le 21 et 28 Novembre 2014, et entre le 1^{er} et le 8 Février 2015. Notre validation nous a donné des résultats encourageants qui nous permettent d'identifier les faiblesses de l'algorithme ainsi que ses points forts. L'algorithme a du mal à détecter des nuages bas, les corrélations entre l'algorithme et la donnée de validation sont meilleures de jour que de nuit. Cette étude nous a permis de révéler des lacunes dans la gamme d'assimilation des radiances nuageuses utilisées pour les nuages situés entre 650 et 900 hPa, puisque pour toutes les fractions nuageuses, les très bons résultats sont trouvés entre 400 et 600 hPa dans la majorité des situations (mer/terre, jour/nuit).

1. Atmospheric Infra-Red Sounder

2. Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

3. Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

4. Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle

Table des matières

Introduction	12
1 Généralités	14
1.1 Les satellites météorologiques	14
1.1.1 Les satellites géostationnaires	14
1.1.2 Les satellites défilants	15
1.1.3 Les sondeurs atmosphériques	16
1.2 Transfert radiatif	18
1.2.1 Le rayonnement atmosphérique	18
1.2.2 Théorie du corps noir	19
1.2.3 Principes fondamentaux du transfert radiatif	19
1.3 Les nuages	23
1.3.1 Classification des nuages	23
1.3.2 Observation des nuages	25
1.4 L'assimilation des données	26
1.4.1 Assimilation des radiances nuageuses	27
1.4.2 Le modèle ARPEGE	30
1.4.3 Le modèle AROME	30
2 Cadre du projet de stage	32
2.1 Présentation de l'organisme d'accueil	32
2.2 Problématique	33
2.3 Matériels et Méthodes	33
2.3.1 Données et logiciels	33
2.3.2 Méthodologie du travail	35
3 Expériences de simulation des observations	37
3.1 Cas des profils clairs	37
3.2 Cas des profils nuageux	38
4 Evaluation de la détection avec les produits SEVIRI	42
4.1 Cas du 28 Novembre 2014 : Comparaison de la restitution des pressions de som- met de nuages entre IASI et SEVIRI dans ARPEGE	42

4.2	Evaluation de la détection nuageuse d'IASI dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans ARPEGE	44
4.2.1	Efficacité de la détection	46
4.2.2	Précision de la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing	47
4.3	Evaluation de la détection nuageuse de IASI dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans AROME	54
4.3.1	Efficacité de détection	55
4.3.2	Précision de la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing	56
4.3.3	Comparaison des détections nuageuses AROME/ARPEGE sur le domaine AROME	63
4.4	Comparaison de la détection nuageuse de IASI MetopA et MetopB dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans ARPEGE	64
4.5	Evaluation de la qualité de la détection nuageuse à une autre saison	68
4.5.1	Résultats dans ARPEGE	68
4.5.2	Resultats dans AROME	71
5	Synthèse et perspectives	73
	Références	75

Liste des tableaux

4.1	Tableau de contingence	44
4.2	Tableau de contingence représentant les résultats d'IASI pour les situations de jour (du 21 au 28 Novembre 2014)	44
4.3	Tableau de contingence représentant les résultats de IASI pour les situations de nuit (du 21 au 28 Novembre 2014)	45
4.4	Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 pour les situations de jour(mer/terre) et de nuit (mer/terre).	46
4.5	Tableau de contingence représentant les résultats du IASI pour la situation du jour (du 21 au 28 Novembre 2014)	54
4.6	Tableau de contingence représentant les résultats du IASI pour la situation de la nuit (du 21 au 28 Novembre 2014)	55
4.7	Scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 pour les situations de jour(mer/terre) et de nuit (mer/terre).	55
4.8	Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 sur mer (MetopA/MetopB) et sur terre (MetopA/MetopB).	65
4.9	Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 01 au 08 Février 2015 pour les situations de jour (mer/terre) et de nuit (mer/terre).	69

Table des figures

1.1	Exemple de constellation partielle des satellites géostationnaires et défilants . . .	15
1.2	principe de l'acquisition des données IASI, par balayage transversal la trace du satellite. source : http://eduscol.education.fr	17
1.3	Bilan énergétique annuel terrestre moyen. Unités en $W.m^{-2}$	19
1.4	Transmission de l'atmosphère jusqu'à $15 \mu m$, ainsi que les principales molécules responsables de l'absorption de la lumière.	20
1.5	Fonction-poids de 36 canaux de IASI utilisés pour la détection nuageuse.	21
1.6	Les principaux types de nuages suivant leur altitude de base	23
2.1	Produit de classification nuageuse MSG plein disque du 28 Novembre 2014 entre 00 :00 UTC et 00 :15 UTC	34
2.2	Dégâts des Pluies torrentielles et oueds en furie au sud du Maroc en Novembre 2014	35
2.3	Des arbres arrachés après les vents violents en France en Février 2015	36
3.1	Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP) et des fractions nuageuses (Ne), du 04 Février et 06 Mai 2013	38
3.2	Biais et l'écart type des pressions de sommet des nuages, du 04 Février 2013	39
3.3	Biais et l'écart type des fractions nuageuses, du 04 Février 2013	39
3.4	Comparaison entre PTOp imposé (axe X) et PTOp restitué (axe Y) en fonction des Ne imposés, du 04 Février 2013	40
4.1	Carte des pressions de sommet de nuages (PTOP en hPa) d'IASI et de SEVIRI du 28 Novembre 2014 à 12 :00 UTC	43
4.2	classification nuageuse du SEVIRI du 28 Novembre 2014 à 12 :00 UTC	43
4.3	Comparaison de la pression de sommet des nuages(PTOP) calculée à partir de IASI (axe X) et de SEVIRI (axe Y) sur mer pour les situations de jour et de nuit pour la période de 21 au 28 Novembre 2014.	47
4.4	Cartes de la pression de sommet des nuages en hPa de IASI et SEVIRI sur mer pour la période de 21 au 28 Novembre 2014.	48
4.5	Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP)en hPa sur mer de jour et de nuit sur la période de 21 au 28 Novembre 2014.	49

4.6	Répartition de pression de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI sur terre pour les situations du jour (a) et de nuit (b) sur la période du 21 au 28 Novembre 2014.	50
4.7	Biais et écart type de PTOP entre IASI et SEVIRI sur la période du 21 au 28 Novembre 2014	51
4.8	Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP) en hPa de nuit sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014. . .	52
4.9	Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI de nuit sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014. . .	53
4.10	Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI de jour sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014 pour les pressions de sommets de nuage de IASI comprises entre 650 et 900 hPa. . .	53
4.11	Comparaison de la pression de sommet des nuages(PTOP) calculée à partir de IASI (axe X) et SEVIRI (axe Y) sur mer pour les situations de jour (a) et les situations de nuit (b) (validation du 21 au 28 Novembre 2014).	56
4.12	Carte de pression de sommet des nuages en hPa sur mer obtenu par IASI et SEVIRI sur mer du 21 au 28 Novembre 2014.	57
4.13	Répartition des pression de sommet des nuages (PTOP) en hPa sur mer de jour (a) et de nuit (b), validation du 21 au 28 Novembre 2014.	57
4.14	Répartition des pressions de sommet des nuages(PTOP)en hPa sur terre de jour (a) et de nuit (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014. . .	58
4.15	Biais et ecart type de PTOP s différences moyennes entre PTOP IASI et SEVIRI sur la période du 21 au 28 Novembre 2014	59
4.16	Répartition des pression de sommet des nuages(PTOP)en hPa de nuit sur mer (a) et sur terre (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014.	60
4.17	Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI du 21 au 28 Novembre 2014.	61
4.18	Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI de nuit sur mer (a) et sur terre (b) (validation du 21 au 28 Novembre 2014).	62
4.19	Biais et ecart type de PTOP des différences moyennes entre PTOP IASI et SEVIRI sur mer de la période du 21 au 28 Novembre 2014	63
4.20	Biais et ecart type de PTOP des différences moyennes entre PTOP IASI et SEVIRI sur terre de la période du 21 au 28 Novembre 2014	64
4.21	Histogrammes de différence des (PTOP) d'IASI MetopA et MetopB sur mer (a) et sur terre (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014.	65
4.22	Répartition des PTOP d'IASI (MetopA/MetopB) et SEVIRI sur mer pour les situations du jour (a) et de nuit (b).(validation du 21 au 28 Novembre 2014). . .	67
4.23	Répartition des PTOP d'IASI (MetopA/MetopB) et SEVIRI sur terre pour les situations du jour (a) et de nuit (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014. . .	67

4.24	Comparaison des PTOPIASI (axe X) et SEVIRI (axe Y) sur mer, pour la période du 01 au 08 Février 2015.	70
4.25	Carte de pression de sommet des nuages (PTOP) sur mer le jour de la période du 01 au 08 Février 2015 pour IASI à gauche et SEVIRI à droite.	70
4.26	Répartition des PTOPIASI et SEVIRI sur mer dans AROME (validation du 01 au 08 Février 2015).	71

Glossaire

AIRS Atmospheric Infra-Red Sounder

IASI Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

ARPEGE Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

AROME Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle

TAS Transmit Antenna Selection

TIROS Television InfraRed Observation Satellite

CrIS Cross-track Infrared Sounder

SEVIRI Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

CNES Centre National d'Etude Spatiale

EUMETSAT European Organisation for the Exploitation of METeorological SATellites

RTTOV Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder

TOVS TIROS Operational Vertical Sounder

SAFNWC Satellite Application Facility on support to NoWCasting and very-short range forecasting

Introduction

Les observations satellitaires constituent aujourd'hui une source importante d'information, les trois quarts, dans les systèmes de prévision numérique du temps (PNT). Elles sont utilisées ainsi que les observations in-situ à travers une composante essentielle de la prévision numérique, l'analyse de l'atmosphère, qui est une étape nécessaire à la définition des conditions initiales de la prévisions. Cette analyse consiste à trouver un état de l'atmosphère, qui soit compatible avec les différentes sources d'observations, la dynamique de l'atmosphère et un état antérieur du modèle.

Une partie de ces observations provient des sondeurs infrarouges hyperspectraux, dont l'instrument IASI se trouvant à bord des satellites européens Metop A et Metop B. Ces instruments permettent selon les fréquences d'observation le sondage de la température et/ou de l'humidité ainsi que la restitution de paramètres de surface en ciel clair ou de paramètres nuageux. Cette nouvelle génération de sondeurs infrarouges avancés constitue une des composantes les plus importantes d'observation dans le système d'assimilation de données de la PNT de Météo-France. Cependant la richesse d'informations fournies par ce type de capteur avec leur grand nombre de canaux ou radiances (8461 dans le cas de IASI) et leur couverture globale (2 fois par jour pour un satellite et 12 km de résolution environ) est loin d'être complètement exploitée. En effet, la présence de nuages dans le champ de vision de l'instrument, qui affecte la majorité des observations, est l'une des raisons pour lesquelles les centres de PNT n'utilisent qu'une faible quantité des observations de ces sondeurs.

Depuis quelques années, les centres de PNT ont commencé à assimiler au dessus des océans les radiances affectées par les nuages. Ils utilisent un modèle de transfert radiatif simple avec un nuage à une seule couche représenté par sa pression de sommet et sa fraction nuageuse effective. A Météo-France, la technique du CO₂-slicing est utilisée pour retrouver ces deux paramètres.

De ce fait l'objectif principal de mon stage consiste à réévaluer la caractérisation nuageuse par CO₂-Slicing dans ARPEGE et dans AROME. Un autre objectif est de voir si nous pouvons faire évoluer la gamme de pression utilisé dans l'assimilation (actuellement entre 650 et 900 hPa) des radiances nuageuses IASI.

Cette évaluation a été réalisée par une étude idéalisée en utilisant un modèle uni-dimensionnel, et une étude avec des observations réelles, en utilisant la donnée de validation de SEVIRI. L'étude a fait recours à plusieurs situations (mer/terre; jour/nuit) et méthodes d'évaluation, afin de déterminer la performance de cet algorithme de CO₂-Slicing.

Le chapitre 1 de ce rapport, met en évidence les concepts théoriques. Une description de

l'environnement et le développement du projet sont décrits dans le chapitre 2. L'évaluation de la détection par CO_2 -Slicing dans un cadre idéalisé est exposé dans le chapitre 3. Ensuite on s'intéressera à la comparaison de la détection nuageuse par CO_2 -Slicing et la donnée de validation SEVIRI, d'autre part à la détection nuageuse des deux Metop A et B dans le chapitre 4. Dans la dernière partie on étudiera l'influence de la saison sur le résultat de la détection nuageuse. Finalement ce rapport s'achève par une synthèse des résultats et quelques perspectives.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Les satellites météorologiques

Un satellite météorologique est un satellite artificiel envoyé dans l'espace en orbite plus ou moins basse, dans le but de recueillir des données utiles à l'observation de l'atmosphère ou de la surface et à la prévision de la météorologie. Ces satellites permettent de prévoir, en temps réel le temps et les intempéries terrestres et d'étudier les climats et leur évolution, Ils utilisent aussi bien les caméras infrarouges que les caméras dans les gammes d'onde visibles ou micro-onde. Le premier satellite météorologique, TIROS-1¹, a été lancé par les Américains en 1960. Les images de l'atmosphère qu'il transmettait n'étaient pas vraiment exploitables. Mais, depuis cette date, la technique a beaucoup progressé. De nos jours, il existe deux familles de satellites météorologiques : les satellites géostationnaires et les satellites défilants.

1.1.1 Les satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires tournent autour de la Terre sur une orbite située dans le plan de l'équateur, à 36 000 km d'altitude. Leur mouvement étant synchronisé avec la rotation de la Terre autour de l'axe des pôles, ils surplombent toujours la même partie de notre globe terrestre. Pour les applications météorologiques, le principal instrument utilisé sur les satellites géostationnaires est le radiomètre-imageur, ou imageur. Cet instrument mesure le rayonnement arrivant au satellite et provenant d'un élément de la surface et de l'atmosphère terrestres. (Renaut (2004)). L'image complète du disque terrestre est obtenue par un balayage combinant la rotation du satellite sur lui-même et l'orientation de l'imageur suivant une direction perpendiculaire au plan de l'équateur (figure 1.1).

1. Television InfraRed Observation Satellite

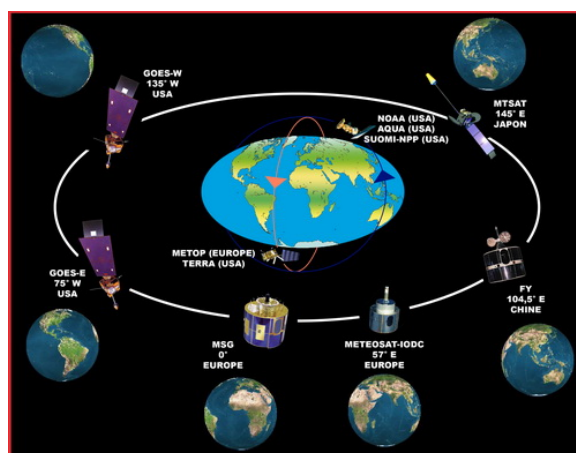


FIGURE 1.1 – Exemple de constellation partielle des satellites géostationnaires et défilants

Source : <http://www.meteofrance.fr>

Le satellite géostationnaire constitue pour les météorologistes un formidable outil de surveillance et de prévision immédiate du temps. Il surveille toujours la même partie du globe terrestre, on peut « animer » une séquence d'images, ce qui donne une idée très précise de l'évolution et du déplacement des masses nuageuses. Les données des satellites géostationnaires sont essentielles pour le suivi des cyclones également.

1.1.2 Les satellites défilants

Les satellites défilants utilisés en météorologie tournent autour de la Terre sur une orbite quasi circulaire passant près des pôles, à une altitude un peu inférieure à 800 km. Ils font le tour de la Terre en près de deux heures. Pour la majeure partie d'entre eux, l'orbite est "héliosynchrone", ce qui signifie que le plan de l'orbite suit le déplacement apparent du Soleil autour de la Terre (figure 1.1). Ainsi, les points de la Terre situés sur un même parallèle sont tous survolés à la même heure solaire.

Comme les satellites géostationnaires, les satellites défilants météo sont munis d'instruments qui visent la surface de la Terre. L'image d'une partie du globe terrestre est obtenue en combinant la progression du satellite sur son orbite et le balayage de l'imageur dans la direction perpendiculaire à sa trajectoire. L'imageur permet de surveiller les masses nuageuses sur l'ensemble de la Terre et notamment dans les régions polaires (la Scandinavie, par exemple) qui échappent à la vue des satellites géostationnaires. En revanche, comme les satellites défilants ne survolent une région de moyenne latitude que deux fois par jour, on ne peut pas " animer " leurs images pour suivre le mouvement des masses nuageuses. Mais, pour les météorologistes, le principal atout des satellites défilants est ailleurs : ceux-ci sont munis d'autres instruments, les radiomètres-sondeurs, ou sondeurs. Ces instruments mesurent, comme l'imageur, le rayonnement arrivant au satellite et provenant d'un élément de la surface et/ou de l'atmosphère terrestres. Mais il possède un grand nombre de canaux, ce qui permet d'analyser finement la répartition du rayon-

nement selon la longueur d'onde. De cette analyse en longueur d'onde, on peut déduire le profil vertical de la température et de l'humidité dans l'atmosphère. Le champ de visée du sondeur est beaucoup plus grand que celui de l'imageur ; les profils mesurés sont donc représentatifs d'une région assez large de l'atmosphère (typiquement 50 km avec les sondeurs actuels)(Renaut (2004)).

1.1.3 Les sondeurs atmosphériques

Le domaine de la détection et de l'optique est toujours en progrès technique afin d'améliorer la résolution spectrale et la précision radiométrique des sondeurs atmosphériques. L'instrument principal du troisième satellite Meteosat de seconde génération (MSG-3), le radiomètre imageur SEVIRI transmet des images du disque terrestre tous les quarts d'heure dans douze bandes spectrales différentes, du visible à l'infrarouge thermique. L'arrivée récente de sondeurs infrarouges hyperspectraux, qui bénéficient d'une haute résolution spectrale tels que CrIS² (1305 canaux spectraux), AIRS (2378 canaux spectraux) et IASI(8461 canaux spectraux), ont permis d'obtenir davantage, des fonctions de poids relativement plus fines et donc une meilleure résolution verticale.

L'instrument SEVIRI

L'instrument SEVIRI³ est un imageur qui fournit toutes les 15 minutes une image de l'hémisphère observée par le satellite dans 12 bandes spectrales.

SEVIRI a un canal solaire à large bande spectrale HRV (0.3-1.1 μm) à haute résolution spatiale de 1km et 11 canaux de plus faible résolution spatiale (3km) ; 3 canaux solaires (0.6, 0.8 et 1.6 μm), 8 canaux thermiques infrarouges (3.9, 6.2, 7.3, 8.7, 9.7, 10.8, 12.0 et 13.4 μm). (Bernard *et al.* (2010)) Les performances de cet instrument, à la fois sur la résolution temporelle, la résolution spectrale et la résolution spatiale ont permis aux météorologistes de décrire plus précisément les processus atmosphériques et de déceler plus aisément les phénomènes localisés à évolution rapide ou violente, tels que les orages, les tempêtes de neige ou le brouillard. De même, une résolution au sol de 1 km dans le spectre visible autorise l'observation et le suivi de phénomènes localisés.

L'instrument IASI

L'Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge (Cayla (2001)), est un élément clé de la charge utile de la série Metop de satellites météorologiques européens en orbite polaire. Il est développé par le CNES⁴ dans le cadre d'une coopération avec EUMETSAT⁵. Le premier modèle de vol a été lancé en 2006 à bord du premier satellite météorologique Européen en orbite polaire, Metop-A. Le deuxième instrument, monté sur le satellite Metop-B, a été lancé en septembre

2. Cross-track Infrared Sounder

3. Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

4. Centre National d'Etude Spatiale

5. EUROpean Organisation for the Exploitation of METeorological SATellites

2012. Le troisième instrument sera monté sur le satellite Metop-C dont le lancement est prévu en octobre 2018. La résolution spatiale de l'instrument est 12 km avec 8461 canaux, IASI a été conçu pour des sondages météorologiques opérationnels avec une très grande précision puisqu'il mesure des profils atmosphériques avec une résolution verticale de 1 à 2 km et une précision de l'ordre de 1°C pour la température et 10% pour l'humidité. Il est aussi conçu pour la chimie de l'atmosphère dans le but d'estimer et de suivre différents gaz traces tels que l'ozone, le méthane ou le monoxyde de carbone à l'échelle mondiale.

L'instrument IASI est constitué :

- d'un miroir de balayage offrant une fauchée de 48° de part et d'autre de la trace du satellite.
- d'un télescope afocal.
- d'un interféromètre de Michelson.
- d'un détecteur refroidi à 100 K (figure 1.2).

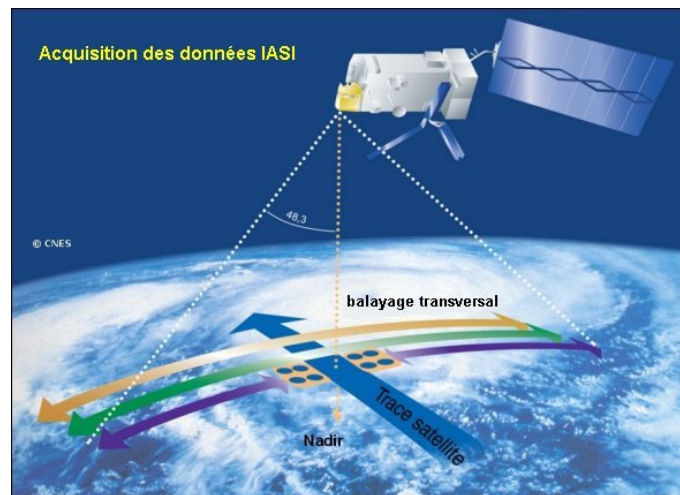


FIGURE 1.2 – principe de l'acquisition des données IASI, par balayage transversal la trace du satellite. source :<http://eduscol.education.fr>

La charge utile météorologique des satellites Metop-A et Metop-B comprend, en plus de IASI, les instruments suivants :

- AMSU : Advanced Microwave Sounding Unit sondeur de température micro-ondes à 15 canaux. Le rôle principal de cet instrument est de produire des sondages de température dans des zones complètement nuageuses. Le sondage de température exploite la bande de l'oxygène à 50 GHz.
- MHS : Microwave Humidity Sounder. Cet instrument à cinq canaux est sensible à l'eau liquide dans les nuages. Il peut également fournir une évaluation qualitative du taux de précipitation.
- HIRS : High Resolution Infrared Radiation Sounder : sondeur à 19 canaux dans l'infrarouge et 1 canal dans le domaine spectral visible. Il fournit des profils de température et d'humidité.
- AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer : imageur multispectral à 6 canaux dans le domaine spectral visible et infrarouge. Son objectif principal est la caractérisation des nuages (distribution, hauteur du sommet, émissivité, etc.), la température des mers et la couverture de glace, neige et végétation (<http://smc.cnes.fr/>).

1.2 Transfert radiatif

1.2.1 Le rayonnement atmosphérique

La Terre reçoit en permanence le rayonnement solaire direct (rayonnement en ondes courtes). Environ 59% de l'énergie solaire incidente parvient jusqu'à la surface et est soit absorbée par celle-ci (49%) soit réfléchi vers l'espace (10%). Le reste de l'énergie (soit l'énergie qui ne parvient pas à la surface, 41%) peut être absorbé par l'atmosphère (19%) ou réfléchi par les hydrométéores, les aérosols ou l'atmosphère (22%).

Par la suite, l'énergie absorbée par la surface est intégralement ré-émise sous forme d'un rayonnement infrarouge (rayonnement en ondes longues) : elle se décompose entre le rayonnement tellurique émis par la surface et les flux de chaleurs sensibles et latentes. L'énergie absorbée par les nuages est ré-émise vers l'espace et vient ainsi se cumuler à celle émise par la surface (dont une grande partie est à nouveau absorbée par les nuages et les divers gaz constitutifs de l'atmosphère). Finalement, 69% du rayonnement sortant vers l'espace provient des processus d'absorption et d'émission dûs à la surface et à l'atmosphère et ses constituants gazeux (Kiehl and Trenberth (1997)). Le schéma proposé dans la figure 1.3 résume les principaux processus décrits ci-dessus.

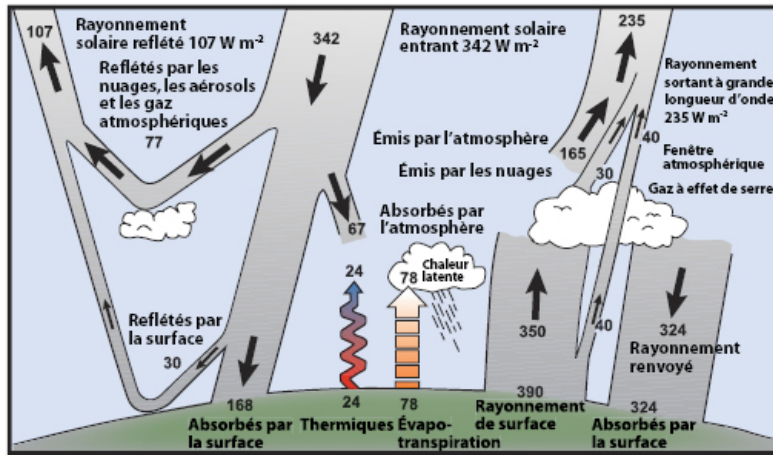


FIGURE 1.3 – Bilan énergétique annuel terrestre moyen. Unités en $W.m^{-2}$.

source : www.sciences.e-noria.fr, figure adaptée de Kiehl and Trenberth (1997)

1.2.2 Théorie du corps noir

Un corps noir est un corps idéal en équilibre thermodynamique avec son environnement. Il absorbe totalement le rayonnement qu'il reçoit et émet un rayonnement maximum à toutes les longueurs d'onde. Planck a montré que le corps noir est lambertien, sa luminance à une longueur d'onde donnée est fonction uniquement de la température (température en Kelvin). (Emran (2007))

$$B_v[T] = \frac{2hv^3c}{\exp(\frac{hvc}{kT}) - 1}$$

avec

- B_v : Brillance spectrale de Planck ;
- T : Température en Kelvin (K) ;
- v : Fréquence du signal en Hertz (Hz) ;
- h : Constante de Planck ($6,6237 \cdot 10^{-34}$ J.s) ;
- c : Vitesse de la lumière dans le vide (299792458 m.s⁻¹) ;
- k : Constante de Boltzman ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹).

1.2.3 Principes fondamentaux du transfert radiatif

L'équation du transfert radiatif est fondée principalement sur deux concepts constitutifs : la transmittance et la fonction de poids.

Transmittance

La transmission du rayonnement se produit quand le rayonnement traverse une surface sans atténuation significative.

Tout corps qui reçoit une certaine quantité d'énergie rayonnante peut en transmettre une partie. Le rapport entre l'énergie transmise ou réfractée et l'énergie incidente est appelé coefficient de transmission, ou transmittance τ . $0 < \tau < 1$.

La transmittance (τ) dépend de l'épaisseur ou la profondeur d'une substance, et surtout de sa capacité à transmettre l'énergie.

Un objet transparent a une transmittance élevée pour le rayonnement visible. La somme des énergies réfléchies, absorbées et transmises est égale à l'énergie incidente (émise au départ). A chaque instant, $\alpha + \rho + \tau = 1$

Une grande partie du rayonnement est absorbé par l'atmosphère et il n'atteindra pas la surface de la terre.

La télédétection ne peut pas donc utiliser toutes les régions du spectre électromagnétique, puisque l'atmosphère agit comme un filtre sur le rayonnement électromagnétique.

L'absorption du rayonnement par l'atmosphère, qui commande sa capacité de transmission, est due aux transitions électroniques des atomes et molécules dans le visible et le proche infrarouge ainsi qu'aux transitions de rotation et vibration des molécules dans les hyperfréquences et l'infrarouge lointain.

Dans l'IR thermique le phénomène atmosphérique qui domine est l'absorption du rayonnement émis par divers gaz comme le CO_2 , l' O_3 et l' H_2O . Cette absorption se traduit en général par une diminution en valeur absolue de la température de brillance perçue par le capteur parce que l'émission propre de l'atmosphère ne la compense pas entièrement.

La présence du CO_2 dans l'atmosphère affecte l'absorption d'énergie dans les deux fenêtres IR thermiques, entre 4,2 et 4,5 μm entre 14 et 15 μm .

On appelle fenêtre atmosphérique les zones du spectre où l'atténuation atmosphérique est relativement faible qui se traduit par une certaine "transparence" vis à vis du rayonnement électromagnétique.

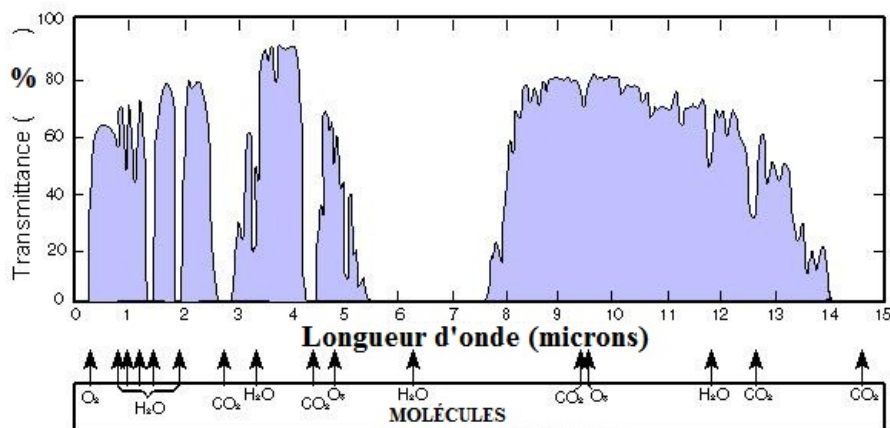


FIGURE 1.4 – Transmission de l'atmosphère jusqu'à 15 μm , ainsi que les principales molécules responsables de l'absorption de la lumière.

Fonction de poids

Pour les couches élevées de l'atmosphère, le rayonnement émis vers l'espace est faible, en raison de la faible densité moléculaire, même en cas de forte transmittance. À l'inverse, les basse couches émettent davantage que les couches élevées mais leur signal rayonné doit traverser une partie plus grande de l'atmosphère pour atteindre l'espace et l'absorption s'en trouve accrue. La couche d'origine du rayonnement observé depuis l'espace est un compromis entre ces deux phénomènes antagonistes qui entrent en compétition dans la formulation finale de la transmittance observée. Afin de déterminer la couche d'origine du rayonnement observé, il est donc nécessaire de connaître la fonction de poids. Celle-ci est définie pour chaque canal comme la dérivée de la transmittance par rapport à l'altitude (Kaplan *et al.* (1977)). Ces fonctions de poids présentent des pics de sensibilité à une (ou plusieurs) altitude(s) Z_{max} correspondant à une (ou plusieurs) absorption(s) maximale(s) pour des paramètres physiques spécifiques.(figure 1.5)

$$K_v(z) = \frac{d\tau_v(z, \theta)}{dz}$$

36 canaux

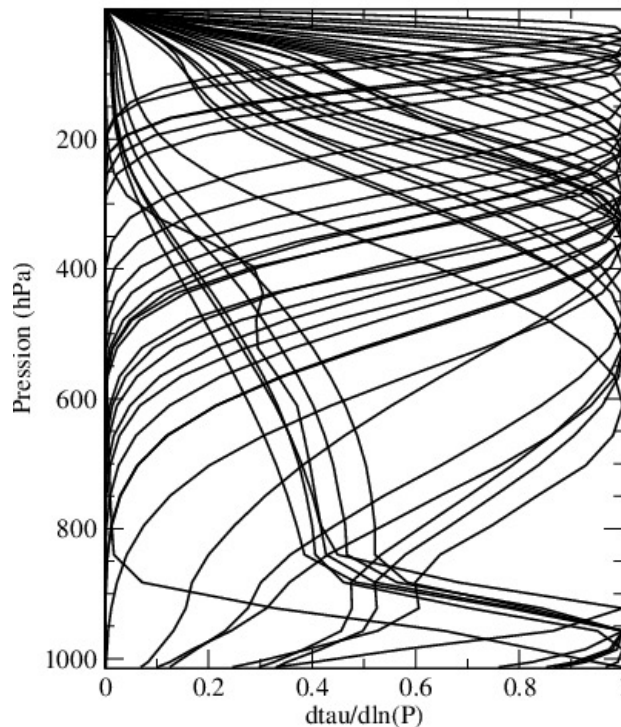


FIGURE 1.5 – Fonction-poids de 36 canaux de IASI utilisés pour la détection nuageuse.

L'équation du transfert radiatif

Le transfert radiatif tend à formuler la relation existant entre l'état de l'atmosphère et la radiance atteignant le sommet de l'atmosphère. Cette radiance est calculée à partir de la

fonction de Planck, de la transmission et de la fonction de poids pour chacun des gaz traversés. Dans le cas du ciel clair la radiance monochromatique de fréquence ν quittant l'atmosphère vers l'espace avec un angle d'incidence θ est obtenue grâce à l'équation du transfert radiatif :

$$R_\nu = \epsilon_\nu(\theta) B_\nu[T(z_0)] \underbrace{\tau_\nu(z_0, \theta)}_{\text{transmittance}} + \underbrace{\int_{z_0}^{+\infty} B_\nu[T(z)]}_{\text{fonction de planck}} \underbrace{\frac{d\tau_\nu(z, \theta)}{dz}}_{\text{fonction poids}} dz + \psi$$

où (z_0) désigne l'altitude du sol, ϵ_ν l'émissivité de surface à la fréquence ν , $B_\nu[T(z)]$ la fonction de Planck, $\tau_\nu(z_0)$ la transmittance à la fréquence ν entre la couche z et l'espace. ψ représente un ensemble de processus complexes comprenant la réflexion des rayonnements solaires et atmosphériques, l'atténuation par les nuages ou encore la diffusion. Ce terme est ignoré dans la plupart des cas.

En conditions nuageuses les radiances sont calculées, en simulant une seule couche nuageuse opaque dont l'altitude du sommet z_{cld} est fournie en entrée à travers l'équation suivante :

$$R_\nu^{cld}(\theta) = B_\nu[T(z_{cld})\tau_\nu(z_{cld}, \theta) + \int_{z_{cld}}^{\infty} B_\nu[T(z)] \frac{d\tau_\nu(z, \theta)}{dz} dz$$

avec $\tau_\nu(z_{cld}), \theta$ qui représente la transmittance entre le sommet du nuage et l'espace et $T(z_{cld})$ la température du sommet du nuage. L'émissivité du nuage est supposée être égale à 1. Dans le spectre infrarouge, cette hypothèse est vérifiée pour les nuages opaques mais pas pour les nuages fins ni pour tous les types de nuages dans le spectre micro-onde. (Pangaud (2009)).

Modèle du transfert radiatif RTTOV

Le modèle du transfert radiatif RTTOV⁶ a été initialement développé et maintenu par le SAF (Sattelite Application Facility) pour la prévision numérique du consortium d'EUMETSAT pour les instruments TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder). Il est utilisé par les principaux centres de PNT européens. Il traite actuellement de nombreux instruments radiométriques dans le spectre infrarouge (entre 3 et 20 μm) et micro-onde (entre 10 et 20 GHz). Les variables d'entrée sont : le profil de température et d'humidité, l'émissivité de surface et éventuellement les concentrations de certaines espèces chimiques : l'ozone, le dioxyde de carbone, le protoxyde d'azote, le méthane et le monoxyde du carbone. Le RTTOV est conçu de calculer les radiances en ciel clair et en ciel nuageux tout en appliquant les deux équations citées ci-dessus. Dans la pratique, de nombreux points d'observations ne sont que partiellement nuageux, RTTOV combine alors les radiances claires et nuageuses. Dans le cas d'un nuage monocouche, la radiance partiellement nuageuse $R_\nu(\theta)$ émise au sommet de l'atmosphère à la fréquence ν est calculée selon la formule :

$$R_\nu(\theta) = (1 - N)R_\nu^{clr}(\theta) + NR_\nu^{cld}(\theta)$$

6. Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder

où $R_v^{clr}(\theta)$ et $R_v^{cld}(\theta)$ représentent respectivement les radiances émises au sommet de l'atmosphère en ciel clair et en ciel totalement nuageux. N représente la couverture nuageuse. Dans le cas des nuages multicouches nous pouvons appliquer le modèle RTTOVCLD (Chevallier *et al.* (2001)) de RTTOV qui simule un nuages sur plusieurs niveaux verticaux et pour les différentes phases de l'eau nuageuse (liquide et glace).

Cette paramétrisation multicouches plus réaliste des nuages s'effectue à partir des profils d'humidité et de température fournis en entrée du modèle du transfert radiatif mais aussi à partir des profils des paramètres nuageux (couverture nuageuse et contenus en eau et glace nuageuse) qui devront aussi être fournis en entrée du modèle du transfert radiatif.

1.3 Les nuages

Un nuage est un amas de minuscules gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace, ou des deux à la fois, en suspension dans l'air. La frontière basse de l'amas s'appelle la base du nuage. En météorologie, on parle de nuage uniquement lorsque la base d'un amas de particules d'eau en suspension dans l'air ne touche pas le sol, sinon il s'agit de brume ou de brouillard. (Malardel (2006)).

1.3.1 Classification des nuages

Les nuages peuvent être classés en fonction de plusieurs facteurs. Une classification générale et précise de chaque type de nuage permet ainsi d'identifier les nuages dans le ciel. Cependant, il est utile de préciser que, lors de son cycle de vie, un nuage peut évoluer d'une espèce ou d'un genre à l'autre. La première classification aurait été tentée par le naturaliste Lamarck, mais elle fût rapidement remplacée par celle de Luke Howard en 1803 (Howard (1803)). Beaucoup d'autres chercheurs ont ensuite ajouté d'autres éléments à cette classification qui est toujours utilisée aujourd'hui et est publiée par l'Organisation Météorologique Mondiale.

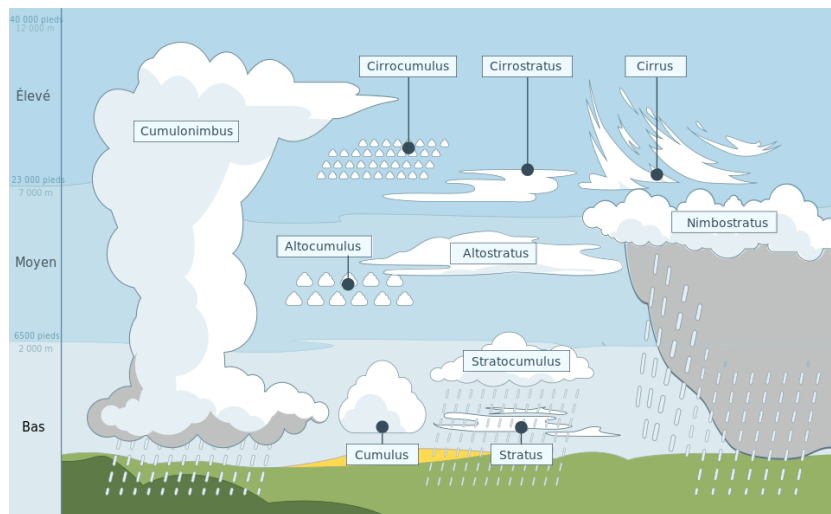


FIGURE 1.6 – Les principaux types de nuages suivant leur altitude de base

source : WWW.wikipedia.fr

Nuages hauts

Ils se forment au-dessus de 5 000 mètres dans la région froide de la troposphère. Ils sont classés en utilisant le préfixe cirro- ou cirrus. À cette altitude, l'eau gèle quasiment toujours : les nuages sont donc composés de cristaux de glace. Le genre de ces nuages sont :

Cirrus : Nuages séparés, en forme de filaments blancs et délicats ou de bancs ou de bandes étroites, blancs ou en majeure partie blancs. Ces nuages ont un aspect fibreux (chevelu) ou un éclat soyeux, ou les deux.

Cirrocumulus : Banc, nappe ou couche mince de nuages blancs, sans ombres propres, composés de très petits éléments en forme de granules, de rides, etc..., soudés ou non, et disposés plus ou moins régulièrement.

Cirrostratus : Voile nuageux transparent et blanchâtre, d'aspect fibreux (chevelu) ou lisse, couvrant entièrement ou partiellement le ciel, et donnant généralement lieu à des phénomènes de halo.

Nuages intermédiaires

Ils se développent entre 2 000 et 5 000 mètres et sont classés en utilisant le préfixe alto-. Ils sont formés de gouttelettes d'eau. Le genre de ces nuages sont :

Altostratus : Nappe ou couche nuageuse grisâtre ou bleuâtre, d'aspect strié, fibreux ou uniforme, couvrant entièrement ou partiellement le ciel, et présentant parfois des parties suffisamment minces pour laisser voir le soleil au moins vaguement, comme au travers d'un verre dépoli. L'Altostratus ne présente pas de phénomènes de halo et peut être accompagné de pluie ou de neige.

Alto cumulus : Banc, nappe ou couche de nuages blancs ou gris, ou à la fois blancs et gris, ayant généralement des ombres propres, composés de lamelles, galets, rouleaux, etc., d'aspect parfois partiellement fibreux ou diffus, soudés ou non.

Nimbostratus : Couche nuageuse grise, souvent sombre, dont l'aspect est rendu flou par des chutes plus ou moins continues de pluie ou de neige qui, dans la plupart des cas, atteignent le sol. L'épaisseur de cette couche est partout suffisante pour masquer complètement le soleil. Il existe fréquemment, au-dessous de la couche et la rendant difficilement visible, des nuages bas déchiquetés.

Nuages bas

Ce sont des nuages de basses altitudes (jusqu'à 2 000 mètres) qui incluent les stratus. Lorsque ces derniers rencontrent la terre, on les appelle brouillard. Le genre de ce type de nuages sont :

Stratocumulus : Banc, nappe ou couche de nuages gris ou blanchâtres, ayant presque toujours des parties sombres, composés de dalles, galets, rouleaux, etc., d'aspect non fibreux, soudés ou non.

Stratus : Couche nuageuse généralement grise, à base assez uniforme, pouvant donner lieu à de la bruine ou à de la neige en grains. Lorsque le soleil est visible au travers de la couche,

son contour est nettement discernable. Le Stratus ne donne pas lieu à des phénomènes de halo sauf à de très basses températures. Le Stratus peut aussi se présenter sous la forme de bancs déchiquetés.

Nuages verticaux

Ces nuages peuvent avoir de forts courants verticaux et s'élèvent bien au-dessus de leur base. Ils se forment à différentes altitudes. Le genre des nuages verticaux sont :

Cumulus : Nuages séparés, généralement denses et à contours blancs bien délimités, se développant verticalement en forme de mamelons, de dômes ou de tours, dont la région supérieure bourgeonnante ressemble souvent à un chou-fleur. Les parties de ces nuages éclairées par le soleil sont, le plus souvent, d'un blanc éclatant ; leur base, relativement sombre, est sensiblement horizontale.

Cumulonimbus : Nuage dense et puissant, à extension verticale considérable, en forme de montagne ou d'énormes tours. Une partie au moins de sa région supérieure est généralement lisse, fibreuse ou striée, et presque toujours visible ; cette partie s'étale en forme d'enclume ou de vaste panache. Au-dessous de la base de ce nuage, souvent très sombre, il existe fréquemment des nuages bas déchiquetés, soudés ou non avec elle, et des précipitations de tous genres.

Pyrocumulus : Nuage très rare de type Cumulus qui se développe à partir d'un feu (éruption volcanique, incendie de forêt...). (<http://www.meteo45.com>).

1.3.2 Observation des nuages

Observation visuelle des nuages

Depuis de très longues années et jusqu'à nos jours, l'observation visuelle des nuages depuis la surface est considérée comme une tâche routinière des réseaux d'observation météorologique. L'expérience de l'observateur, la position des nuages par rapport au site d'observation, l'éclairage du ciel, la hauteur et la fréquence des nuages constituent des éléments clé de la qualité de cette méthode d'observation.

La bonne observation dépend évidemment de plusieurs variables telles que le genre de nuages, la hauteur de la base des nuages et la nébulosité.

La quantité de nuages (nébulosité) est observée et renseignée en nombre de huitièmes de ciel (octa) couvert par chaque couche nuageuse et par l'ensemble des nuages.

La nébulosité est donc déterminée par l'observation au sol en divisant mentalement le ciel en huit parties et en estimant le nombre de parties couvertes par les nuages.

Le genre de chaque couche de nuages, de même que l'espèce et la variété éventuelles sont déterminés par l'observation en fonction des descriptions complètes de chaque genre, espèce et variété.

La hauteur de la base des nuages peut être estimée visuellement. On peut également utiliser un ballon profond, procédé qui consiste à mesurer le temps mis par celui-ci, à une vitesse ascensionnelle connue, pour s'élever du sol jusqu'à la base des nuages.

Observation des nuages par satellite

La physique de l'atmosphère, la télédétection en particulier, comme les autres sciences, est tributaire de la technique. Les phénomènes étudiés nécessitent des moyens d'observation adaptés aux questions posées ainsi qu'aux différentes échelles spatiales et temporelles concernées. Au cours des dernières décennies, les avancées dans le domaine de l'instrumentation, en particulier, la télédétection spatiale, ont permis l'accès aux grandes échelles d'observation. Les physiciens de l'atmosphère ont pendant longtemps travaillé à l'échelle locale. Puis, le développement des moyens d'observation spatiaux a profondément modifié l'échelle et la fréquence des mesures envisageables, ainsi que les méthodes de travail.

Les satellites d'observation sont maintenant indispensables pour mettre en évidence les changements dans l'occupation et l'organisation de la couverture nuageuse. Les satellites ont ainsi permis d'atteindre un nouveau niveau de perception des nuages et grandement accru l'intérêt scientifique au sujet de l'organisation nuageuse aux échelles moyennes et synoptiques, précisément celles où les études "pré-satellites" étaient incomplètes.

Il faut rappeler ici que des différences existent entre l'observation par satellite et l'observation depuis la surface. Un satellite est incontestablement en mesure d'acquérir une connaissance plus complète de la répartition et la structure horizontale des nuages, et de l'aspect de leurs régions supérieures.

Lorsqu'on observe les nuages par satellite (Scorer (1986)), on observe des hétérogénéités sur une grande gamme d'échelles. L'aspect des champs nuageux dépend alors essentiellement de la nature, des dimensions, du nombre et de la répartition dans l'espace de ses particules constitutives ; il dépend aussi de l'intensité du rayonnement reçu par le nuage, ainsi que des positions relatives du satellite et de la source du rayonnement par rapport au nuage.

Dans le spectre visible, la luminance reçue ne dépend que de la réflectivité du nuage. Cette réflectivité dépend de la composition du nuage (gouttelettes d'eau, cristaux), et de son épaisseur. Ainsi, des nuages constitués de cristaux de glace épais apparaîtront blancs. Dans l'infrarouge thermique, plus un nuage a un sommet élevé, plus la température du sommet est basse. Le radiomètre mesure alors l'émittance, qui est ensuite convertie en luminance, et éventuellement en température de brillance. Ainsi les images infrarouges peuvent permettre la détermination des types (ou genres) des nuages grâce à la séparation en différents niveaux d'altitude et ce, grâce à la température.

1.4 L'assimilation des données

L'assimilation de données est une technique d'analyse permettant, en météorologie, de fabriquer une image de l'état de l'atmosphère à un instant donnée qui soit la plus proche possible de l'état réel de l'atmosphère à cet instant, elle consiste à combiner de manière optimale les propriétés de l'évolution du système atmosphérique et une séquence d'observations, en y associant leurs statistiques respectives d'erreurs associées. A Météo-France, le système d'assimilation mis en place opérationnellement depuis juin 2000 pour initier le modèle global ARPEGE, est le sys-

tème d'assimilation variationnel quadri-dimensionnel (4D-Var) (Rabier *et al.* (2000)), quant au modèle AROME, il possède son propre système d'assimilation vibrationnelle tri-dimensionnel (3D-var) (Seity *et al.* (2011)).

Les algorithmes de fabrication de l'état initial ont connu une évolution considérable en passant des algorithmes par interpolation optimale aux systèmes d'assimilation variationnelle. Le principe de l'assimilation variationnelle est de modifier l'état du modèle pour minimiser les écarts à l'ébauche et aux observations. Le principe variationnel est fondé sur la théorie de l'optimisation. Elle traite ainsi le problème sous la forme de la minimisation d'une fonctionnelle mesurant l'écart aux observations et l'éloignement à l'ébauche de la condition initiale tout en considérant les équations du modèle de dynamique atmosphérique. Cette fonctionnelle, appelée fonction-coût J, combine deux contributions distinctes : les écarts à l'ébauche J_b et les écarts aux observations J_o . A Météo-France, l'assimilation de données utilise ce principe variationnel depuis mai 1997.

La fonction coût mesure les distances respectives de l'estimateur à l'ébauche(J_b) et aux observations(J_o). Le meilleur estimateur de l'état de l'atmosphère est alors obtenu en cherchant à annuler la valeur du gradient de J par rapport à X.

Pour un état de l'atmosphère X, la fonction-coût peut alors se formuler ainsi :

$$J(X) = \underbrace{1/2(X - X_b)^t B^{-1}(X - X_b)}_{J_b} + \underbrace{1/2(H(X) - Y)^t R^{-1}(H(X) - Y)}_{J_o} + J_c$$

Où :

- \mathbf{X} : le vecteur d'état de l'atmosphère ;
- X_b : le vecteur d'état ⁷ caractérisant l'ébauche du modèle de PNT ;
- \mathbf{Y} : le vecteur d'observations ;
- \mathbf{B} : la matrice de covariances d'erreurs de l'ébauche ;
- \mathbf{R} : la matrice de covariances d'erreurs des observations ;
- \mathbf{H} : l'opérateur d'observation permettant de passer de l'espace du modèle de PNT (X). Le

terme J_c est une contrainte dynamique sur l'analyse qui est utilisée pour assurer un meilleur équilibre aux incréments d'analyse ainsi que pour contrôler l'amplitude des ondes de gravité et filtrer l'analyse afin d'obtenir des champs plus lisses. L'exposant -1 indique l'inverse, et l'exposant t indique la transposée. (Ide *et al.* (1997))

1.4.1 Assimilation des radiances nuageuses

L'assimilation des radiances nuageuses est un enjeu crucial pour les centres de PNT. Tout d'abord, le rejet des observations nuageuses représente une sous-exploitation des sondeurs hyperspectraux très coûteux comme AIRS ou IASI. D'autre part, les études de McNally (2002) () et Fourrié and Rabier (2004) () ont démontré la forte corrélation entre les zones météorologiques sensibles et la couverture nuageuse. Ces zones sensibles correspondent à des domaines où une

7. Le vecteur X_b c'est le vecteur d'état c'est à dire un vecteur regroupant les variables décrivant l'atmosphère dans l'espace du modèle

légère perturbation des conditions initiales peut se transformer en forte erreur de prévision, alors si on veut diminuer ces erreurs de prévision, il est important de contraindre l'analyse dans les zones nuageuses, cette dernière qui a beaucoup progressé ces dernières années dans les centres de PNT, l'approche la plus utilisée repose de l'utilisation de deux paramètres (pression de sommet de nuages et la fraction nuageuse). (McNally (2009), Pavelin *et al.* (2008), Guidard *et al.* (2011)) .

L'assimilation des radiances nuageuses à Météo France repose à la fois sur le schéma de détection du CEPMMT de McNally et Watts (2003) en complément de la caractérisation des nuages par une pression de sommet de nuage PTOP et d'une fraction nuageuse effective Ne par la méthode de CO_2 -Slicing Pangaud *et al.* (2009) et Guidard *et al.* (2011). Nous présentons maintenant le schéma de détection nuageuse et l'algorithme du CO_2 -Slicing respectivement.

Schéma de détection du CEPMMT

Le schéma du CEPMMT a pour objectif, comme tous les algorithmes de détection nuageuse, de détecter toute contamination par les nuages des radiances observées par les sondeurs avancés. Sa spécificité vient du fait qu'au lieu de chercher à localiser les pixels clairs, il identifie, pour un spectre observé, les canaux non contaminés par les nuages. La détection se fait en plusieurs étapes :

1. le calcul des différences de température de brillance, observées et simulées et le stockage dans un tableau.
2. la classification verticale des canaux en fonction de leurs sensibilité à la présence des nuages, cette sensibilité est définie par un niveau de pression P_i , en coordonnées verticales RTTOV, assigné à chaque canal, correspondant au niveau le plus bas pour lequel l'effet radiatif dû à la présence d'un nuage opaque $\frac{|R_{clear} - R_{cld}^{p_i}|}{R_{clear}}$, est inférieur à un seuil fixé (un seuil de 1% est choisi par les auteurs). R_{clear} représente la radiance claire simulée et $R_{cld}^{p_i}$ représente la radiance simulée en présence d'un nuage opaque au niveau p_i .
3. le regroupement des canaux ordonnés en cinq ensembles suivant leur appartenance aux bandes spectrales dans l'espace des canaux ordonnés (du plus haut au plus bas).
4. l'application d'un filtre 'passe-bas' aux tableaux des δTB afin de filtrer la partie du signal causé par le bruit instrumental, les erreurs des profils atmosphériques et les erreurs de RTTOV.
5. La recherche du canal à partir duquel les valeurs δTB croissent de manière monotone. Cette recherche s'effectue du haut vers le bas. La première position pour lequel le gradient des δTB filtré est supérieur à un seuil prédéfini est considérée comme le début du signal du nuage. Tous les canaux situés en bas sont contaminés et ceux situés en haut sont considérés comme clairs.

L'algorithme de détection et de caractérisation du CO_2 -Slicing

L'algorithme du CO_2 -Slicing, basé sur les principes du transfert radiatif, est utilisé pour détecter mais également pour caractériser les nuages Menzel *et al.* (1983). Pour cela, cet algorithme extrait la pression de sommet P_{TOP} et l'émissivité nette Ne du nuage à partir des radiances infrarouges observées d'un ensemble de canaux sélectionnés dans la bande d'absorption du CO_2 très sensible à la température et donc à la présence de nuages. Cet algorithme utilise un schéma de nuage simplifié : le nuage est considéré comme un nuage mono-couche et d'émissivité constante. Ainsi, pour chaque pixel et pour chacun des canaux sélectionnés, la fonction suivante est calculée pour chaque canal et pour chaque niveau de pression du modèle RTTOV selon l'expression suivante :

$$F_{k,P} = \frac{R_{clear}^k - R_{meas}^k}{R_{clear}^{k_{ref}} - R_{meas}^{k_{ref}}} - \frac{R_{clear}^k - R_{cld}^{k,P}}{R_{clear}^{k_{ref}} - R_{cld}^{k_{ref},P}}$$

avec :

- p : niveau de pression.
- k : numéro du canal dans la bande CO_2
- k_{ref} : canal fenêtre de référence. le canal 867 (861,50 cm^{-1}) est utilisé pour IASI.
- R_{meas}^k : radiance mesurée pour le canal k.
- R_{clear}^k : radiance claire simulée pour le canal k.
- $R_{cld}^{k,P}$: radiance simulée d'un corps noir pour le canal k en considérant un nuage opaque au niveau P.

Cette fonction $F_{k,p}$ est évaluée pour les 43 niveaux de pression P RTTOV et l'on retient, pour chaque canal k, le niveau de pression $P_{c,k}$ qui minimise la fonction $F_{k,p}$.

Un filtre est par la suite appliqué par l'algorithme afin de discriminer les canaux présentant une différence entre les radiances observées et les radiances simulées inférieures au bruit radiométrique. Si tous les canaux sont filtrés, le pixel est déclaré clair. Si le pixel est contaminé par un nuage, la pression de sommet de nuage P_{TOP} associée au pixel est obtenue à partir des niveaux de pression P_k calculés précédemment pour chaque canal, à l'aide de la formule :

$$P_{TOP} = \frac{\sum W_k^2 P_{c,k}}{\sum W_k^2}$$

Où w_k représente la dérivée par rapport à la pression de la fonction $F_{k,p}$ ($w_k = \delta F_{k,p} / \delta \ln p$). Dans un second temps, le canal de référence est utilisé par l'algorithme pour déterminer l'émissivité nette Ne à l'aide de la formule :

$$Ne = \frac{R_{clear}^{k_{ref}} - R_{meas}^{k_{ref}}}{R_{clear}^{k_{ref}} - R_{cld}^{k_{ref}}}$$

Dans le cas où l'algorithme produit une Ne inférieure à 0,1, le pixel est déclaré clair. Par ailleurs, si l'algorithme produit une Ne non physique (inférieure à 0 ou supérieure à 1), nous considérons que la méthode a échoué.

1.4.2 Le modèle ARPEGE

ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) est le modèle global de prévision numérique du temps à Météo-France utilisé opérationnellement depuis le début des années 1990 (Courtier *et al.* (1991)). Il permet de prévoir l'évolution temporelle des principaux champs météorologiques grâce à la résolution des équations primitives qui régissent l'atmosphère. Il fait partie intégrante du logiciel ARPEGE-IFS (Integrated Forecasting System) conçu, développé et maintenu en coopération avec le CEPMMT. Avec une nouvelle version tous les ans environ, ce code est en constante évolution afin d'exploiter au mieux la puissance des supercalculateurs, assimiler les données des nouveaux systèmes d'observation et améliorer les composantes du modèle de prévision. Ce modèle couvre l'ensemble du globe avec une maille de 10 km sur la France et de 60 km aux antipodes. Sa résolution verticale est de 70 niveaux, avec un premier niveau à 17 m au dessus de la surface et un niveau supérieur à 70 km environ. Une nouvelle version du modèle ARPEGE avec une résolution horizontale de 7 Km environ sur la France, 35 km aux antipodes, 105 niveaux verticaux et un premier niveau situé à 10 mètres au dessus de la surface est en place depuis le 13 avril 2015.

ARPEGE fournit quatre prévisions par jour réalisées à 0, 6, 12 et 18h UTC. Ces prévisions servent de conditions aux limites latérales aux modèles de prévision à aire-limitée à plus fine résolution AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) et ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational). Les conditions initiales du modèle ARPEGE sont déterminées par une assimilation variationnelle quadri-dimensionnelle (4D-Var) intégrant une très grande quantité et variété d'observations conventionnelles (radio-sondage, mesures avion, station terrestres, bateaux, bouées, etc) et issues de la télédétection (AIRS, IASI, SEVIRI, GPS sol, etc).

1.4.3 Le modèle AROME

AROME (Seity *et al.* (2011)) est un modèle méso-échelle de prévision numérique du temps utilisé en opérationnel au sein de Météo France depuis décembre 2008. Sa maille de 2.5 km de résolution est composée de 739×709 points de grilles et recouvre la France ainsi que la partie nord du bassin Méditerranéen. Ce modèle a pour but d'améliorer la description des phénomènes convectifs dangereux (orages, rafales, précipitations intenses), les événements locaux et la météorologie de basses couches (vent, température, turbulence, visibilité...). Sa résolution, quatre fois supérieure à celle d'ALADIN, a notamment permis une résolution explicite de la convection. Afin de fournir les conditions atmosphériques situées en bord de domaine, AROME est couplé toutes les heures avec le modèle à échelle globale ARPEGE. Il comporte 60 niveaux verticaux espacés de manière inégale entre la troposphère et la stratosphère, le niveau le plus bas étant situé à 10 m. Sa résolution à 2.5 km rend impossible l'utilisation de l'approximation hydrostatique. En effet, cette approximation repose sur le fait que pour les phénomènes d'échelle supérieure à 10 km, l'accélération verticale peut être négligée par rapport à l'accélération horizontale. Ceci n'est plus le cas pour certains phénomènes locaux résolus par la maille d'AROME.

La dynamique d'AROME est basée sur les équations non-hydrostatiques du modèle ALADIN. Sa microphysique prend en compte six espèces différentes (vapeur d'eau, eau nuageuse, pluie, cristaux de glace, neige et graupel).

Une nouvelle version d'AROME a été mise en place le 13 avril 2015 avec un nouveau saut en résolution du modèle puisqu'il est passé à 1.3 km sur l'horizontale avec une résolution verticale 1.5 fois plus fine.

Chapitre 2

Cadre du projet de stage

2.1 Présentation de l'organisme d'accueil

Le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est une unité Mixte de Recherche, constituée par le CNRS et Météo-France, il assure l'essentiel des activités de recherche, et coordonne l'ensemble des actions de recherche/développement conduites au sein de Météo-France, service météorologique national français.

Les missions du CNRM concernent la prévision du temps et l'évolution du climat qui se nourrissent de la synergie et de l'enrichissement réciproque entre la recherche et l'application opérationnelle. Les actions de recherche et développement du CNRM portent principalement sur la prévisibilité des phénomènes atmosphériques, l'étude du climat et du changement climatique, le cycle de l'eau, l'étude des échanges océan/atmosphère, la physico-chimie atmosphérique et météorologie urbaine, l'assimilation et la modélisation pour la prévision numérique du temps, les développements instrumentaux et la micro-structure du manteau neigeux.

Le CNRM est reconnu comme un des leaders mondiaux de la recherche météorologique.

Le Centre National de Recherches Météorologiques est constitué de huit unités de recherche et d'un ensemble de services communs répartis sur plusieurs sites en France (le site de la Météo-pole toulousaine représentant environ 80% de ce potentiel).

- Le Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision (GMAP, Toulouse) ;
- Le Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle (GMME, Toulouse) ;
- Le Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale (GMEI, Toulouse) ;
- Le Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat (GMGEC, Toulouse) ;
- le Centre d'Aviation Météorologiques (CAM, Toulouse-Francazal) ;
- le Centre d'Études de la Neige (CEN, Grenoble) ;
- le Centre de Météorologie Marine (CMM, Brest) ;
- le Réseau d'Études et de Transfert Interne des Connaissances (RETIC, Toulouse) ;

Le GMAP est chargé de la recherche et des développements conduisant à de nouveaux modèles numériques opérationnels de prévision météorologique, incluant à la fois la dynamique, les paramétrisations physiques et les techniques d'assimilation des données ; nous avons effectué notre projet au sein de ce groupe dans l'équipe OBS (Observations pour l'Assimilation des Données).

2.2 Problématique

L'instrument IASI constitue une des composantes les plus importantes d'observation dans le système d'assimilation de données de la PNT de Météo-France. Malgré sa richesse en terme des canaux ou radiances et sa couverture globale, la présence de nuages dans le champ de vision de l'instrument, qui affecte la majorité des observations, limite l'utilisation de toutes les informations fournies par cet instrument par les centres de PNT.

Les centres de PNT ont commencé à assimiler au-dessus des océans les radiances affectées par les nuages. Ainsi les modèles de prévision de Météo-France utilisent depuis février 2009 des observations nuageuses AIRS et depuis 2012 celle de IASI. Cependant l'utilisation des observations nuageuses dans l'assimilation est restreinte aux nuages opaques moyens et bas. En effet l'assimilation des radiances nuageuses repose sur la caractérisation et la restitution des nuages.

De ce fait plusieurs questions se posent : quelle est l'efficacité de l'algorithme de la détection nuageuse CO_2 -Slicing ? Quels sont les facteurs qui peuvent influencer le résultat de la restitution nuageuse ? Est ce que la performance de l'algorithme est lié au modèle de prévision ?

La problématique ci-dessus nous amène à mettre l'accent sur les objectifs suivants :

- Vérifier que les paramètres nuageux imposés lors de la simulation des observations satellitaires sont bien retrouvés lors du processus de restitution des paramètres nuageux en utilisant le modèle variationnel 1D-VAR.
- Evaluer la qualité des paramètres nuageux restitués par CO_2 -slicing à partir d'IASI en utilisant le produit nuageux de SEVIRI comme données de validation.
- Utiliser différents périodes afin d'évaluer l'impact de la saison sur la qualité de la détection nuageuse et sa restitution.
- Vérifier la qualité de la restitution des cas nuageux sélectionnés (entre 650 et 900 hPa) utilisés dans l'assimilation.

2.3 Matériels et Méthodes

2.3.1 Données et logiciels

Données utilisées

Les données utilisées pour cette étude sont comme suit :

Les produits nuageux de IASI issues des bases d'observation utilisés dans la chaîne opérationnelle des modèles de PNT, qui comprennent des données de pression de sommet des nuages (PTOP), Fraction nuageuse (NE) et la couverture nuageuse qui se présente par le pourcentage du pixel AVHRR nuageux dans l'empreinte IASI.

Dans le cadre du SAFNWC¹ d'EUMETSAT, des produits de classification nuageuse et de température et hauteur du sommet des nuages sont élaborés par le CMS de Météo-France. Les

1. Satellite Application Facility on support to NoWCasting and very-short range forecasting

produits de classification nuageuse ont pour objectif principal de fournir une analyse détaillée des nuages. Ils contiennent pour cela des informations sur les principales classes nuageuses. Ces produits de classification nuageuse sont générés à partir des images SEVIRI du satellite géostationnaire MSG.

Neuf canaux SEVIRI sont utilisés pour élaborer les produits de classification nuageuse et les produits du masque nuageux : 0,6 et 0,8 μm (visible) ; 1,6 μm (proche infrarouge) ; 3,9 ; 7,3 ; 8,7 ; 10,8 ; 12,0 et 13,4 μm (infrarouge thermique). Un atlas caractérisant le relief et comprenant un masque terre / mer, des cartes climatologiques renseignant les températures de surface de la mer et l'albédo continental, ainsi que certains champs de prévision numérique (température de surface et contenu en eau précipitable de l'atmosphère) sont aussi utilisés en entrée du produit de classification nuageuse MSG. La figure 2.1 présente un exemple de ce produit.

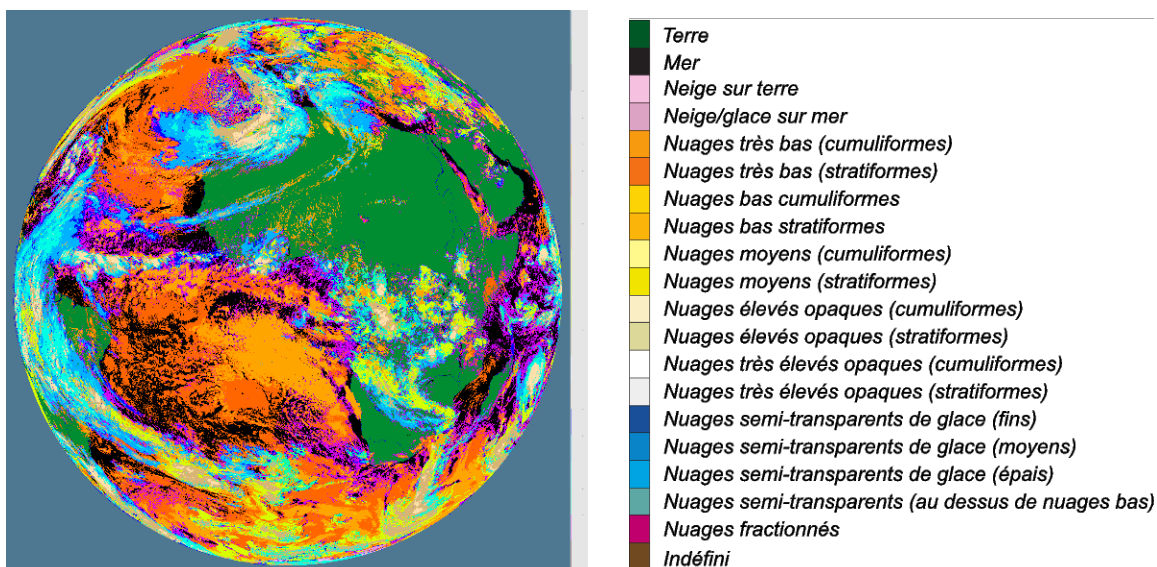


FIGURE 2.1 – Produit de classification nuageuse MSG plein disque du 28 Novembre 2014 entre 00 :00 UTC et 00 :15 UTC

Logiciels utilisés

Avant d'entamer le travail sur l'analyse des données, nous avons commencé d'abord à manipuler le système d'exploitation LINUX, installé sur notre PC personnel, pour nous familiariser avec les différentes commandes disponibles. Nous nous sommes intéressés ensuite à certains outils nécessaires pour notre projet :

- Mandalay : logiciel qui permet d'explorer le contenu des fichiers d'observations au format ODB (Observation Data Base) en entrée ou en sortie de l'analyse.
- R2 : Logiciel permettant de rechercher, visualiser et traiter des paramètres météo,
- METVIEW : outil de visualisation, qui permet le tracé des différents champs météorologiques (analysés ou prévus), et le pointage des observations.
- Xmgrace : logiciel interactif de plot x,y. Il permet d'ouvrir des fichiers colonnes et de sélectionner des couples x,y par numéros de colonnes pour une visualisation graphique et/ou la création d'un fichier postscript (.ps).

2.3.2 Méthodologie du travail

Après le choix des données ainsi que les logiciels utilisés, il est nécessaire de penser à la méthodologie du travail afin de garantir son bon cheminement.

Recherche bibliographique

En premier lieu nous avons commencé par une étude bibliographique par laquelle nous avons développé quelques théories et concepts nécessaires à la bonne compréhension de ce travail.

Choix des dates

Pour appréhender cette problématique, le choix des dates est indispensable car l'état de l'atmosphère n'est pas homogène sur l'ensemble du globe. la planète est toujours exposée à des variations climatiques différentes, et pour différencier entre la fiabilité des instruments de mesure il faut une variation en terme de phénomène et de zone d'étude. Pour cette raison que nous avons mis l'accent sur deux périodes différentes qui témoignent des événements météorologiques importantes :

- Du 21 au 28 Novembre 2014 : Durant cette période le Maroc a subi des pluies orageuses diluviennes. Les orages ont entraîné la crue de plusieurs oueds (rivières) près des Haut et Anti-Atlas dans les secteurs de Guelmim, Tiznit, Agadir, Ouarzazate et Marrakech (figure 2.2). Une centaine de maisons en pisé ont été totalement ou partiellement détruites et plusieurs routes ont été coupées à la circulation suite aux précipitations exceptionnelles jusqu'à 230 mm dans 24h dans quelques régions du sud du royaume. Le bilan de ces inondations qui ont touché le Maroc illustre une véritable catastrophe nationale puisque plusieurs morts et blessés ont été dénombrés lors de ce désastre ainsi que tous les secteurs ont été touchés par les destructions.



FIGURE 2.2 – Dégâts des Pluies torrentielles et oueds en furie au sud du Maroc en Novembre 2014
source : <http://www.lemonde.fr>

– Du 01 au 08 Février 2015 : C'est une période qui est marquée par une ambiance hivernale avec de fréquentes gelées, des vents violents et de la neige qui a touché plusieurs régions de la France. Au début de cette période la France a connu une dépression circulant du golfe de Gascogne vers la Méditerranée associée à de l'air froid venu d'Europe du Nord qui a engendré un épisode de neige conséquent sur le sud de l'Aquitaine. Après cet épisode de neige, la tramontane a soufflé violemment les 4 et 5 février avec 123 km/h enregistré à Perpignan, 136 km/h à Leucate et jusqu'à 185 km/h au cap Béar (pas loin du record de 191 km/h observé en janvier 2009 lors du passage de la tempête Klaus). A noter que dans le Massif-Central, la Bure a soufflé fort occasionnant d'importantes congères sur les plateaux de l'Ardèche, de la Lozère et de Haute-Loire.

Le 8 février c'est le mistral qui a soufflé en tempête en moyenne et basse vallée du Rhône. On a battu des records de vent à Avignon et Nîmes avec respectivement 137 et 141 km/h. Des dégâts importants liés aux chutes d'arbres (figure 2.3) ont été signalés dans le Vaucluse, l'Ardèche, le Gard et les Bouches-du-Rhône. Plus de 10000 foyers ont été privés d'électricité.



FIGURE 2.3 – Des arbres arrachés après les vents violents en France en Février 2015
source : <http://france3-regions.francetvinfo.fr>

Evaluation de la performance de schéma du CO_2 -slicing

Pour évaluer la performance du schéma du CO_2 -Slicing, nous avons commencé par une validation qualitative de la pression du sommet des nuages de IASI et en se référant aux masques nuageux et la classification nuageuse produits à partir des données de l'imageur SEVIRI pour la date du 28 Novembre 2014.

Ensuite nous avons abordé des méthodes quantitatives, à travers la co-localisation des observations simulés par le schéma de détection nuageux CO_2 -Slicing et le produit nuageux de SEVIRI. Dans cette partie nous avons étudié les différents cas possibles de IASI nuageux et clairs pour l'épisode du 21 au 28 Novembre 2014.

Evaluation de l'impact saisonnier sur la caractérisation des nuages

Dans cette étape nous avons essayé de valider des données d'une période tout à fait différente de la première (période d'automne) en choisissant une période hivernale du 1 au 8 Février 2015.

Chapitre 3

Expériences de simulation des observations

Dans ce chapitre nous avons effectué des expériences de simulation en utilisant le modèle uni-variationnel 1D-Var, cette démarche vise à évaluer la qualité d'inversement des paramètres nuageux via CO_2 -Slicing qui fait partie de la restructuration de ce modèle. Les input du modèle 1D-Var ce sont les observations et l'ébauche, mais pour étudier la capacité du modèle, nous avons adopté une approche idéalisée dont la réalité est connue, à partir des données réelles dont on dispose. Nous avons utilisé le modèle de transfert radiatif RTTOV qui nous a permis d'extraire la température de brillance des observations IASI, et nous avons utilisé la matrice R (matrice de covariances d'erreurs des observations) afin de les bruite. Par le même principe nous avons extrait l'ébauche en utilisant la matrice B (matrice de covariances d'erreurs de l'ébauche). Nous avons sélectionné 436 profils atmosphériques (6 Mai 2013) et 455 profils atmosphériques (2 Février 2013) répartis que les latitudes polaires, tropicales et des moyennes latitudes afin qu'ils soient bien représentatifs de l'état de l'atmosphère.

Dans nos expériences nous avons imposé à chaque fois des différentes N_e et P_{TOP} en entrée du modèle tout en vérifiant la capacité de ce dernier à bien restituer nos paramètres nuageux. Cette évaluation s'applique à chaque fois sur deux dates différentes ; 04 Février 2013 et 06 Mai 2013, afin de confirmer le résultat obtenu.

3.1 Cas des profils clairs

Dans notre première évaluation, nous avons mis l'accent sur les cas clairs, où la fraction nuageuse égale 0. La figure 3.1 nous présente la répartition des N_e qui s'étale de -0.1 à 1.1, la grande partie des pixels pour les deux dates ont des N_e égale à 1.1 (175 pour Mai et 165 pour Février), alors que les autres pixels se répartissent entre les différentes valeurs de N_e , mais juste 15 pixels en Mai et 11 pixels en Février qui ont un N_e égale 0.

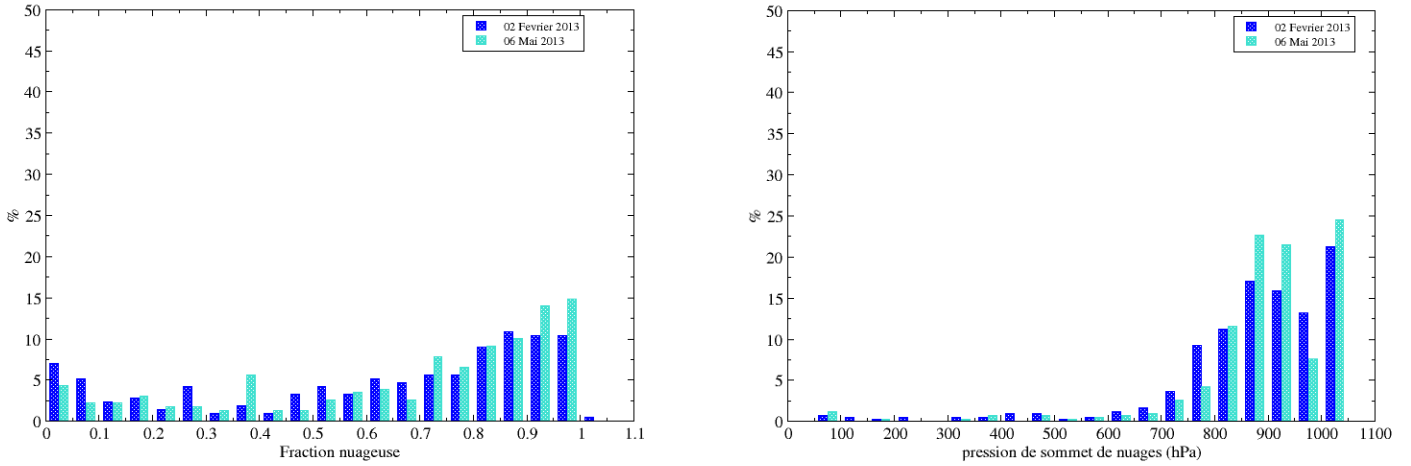


FIGURE 3.1 – Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP) et des fractions nuageuses (Ne), du 04 Février et 06 Mai 2013

A travers l’histogramme de répartition des Ne (figure 3.1), nous observons que la fréquence des Ne entre 0.9 et 1 est plus élevée (15% pour mai et 10% pour Février), alors que juste 7% des pixels en Février et 4% en Mai qui ont des Ne = 0. La répartition des P_{TOP} nous montre que l’ensemble des pixels ont des P_{TOP} entre 700 et 1000 hPa, ce dernier marque le plus grand pourcentage dans les deux dates (25% en Mai et 20% en Février)

De ce fait, l’algorithme *CO₂-Slicing* met plus des fractions nuageuses différentes de 0, alors il détecte toujours des nuages même en ciel clair, alors la détection nuageuse de cet algorithme n’est pas fiable en ciel clair.

3.2 Cas des profils nuageux

Après notre première expérience du ciel clair, nous avons évalué aussi les cas nuageux dont la fraction nuageuse est supérieure à 0. Différentes valeurs de Ne et de P_{TOP} sont testées dont le but étant d’extraire le type de nuage qu’on retrouve le mieux avec *CO₂-Slicing*.

Les analyses que nous avons effectuées sur les P_{TOP} nous a montré une asymétrie entre les courbes de biais ainsi que l’écart type (figure 3.2). Lorsque Ne=1 nous observons que les P_{TOP} 200 d’une part et entre 400 et 700 hPa d’autre part ont donné un bon résultat, puisque leurs biais est environ 10 hPa, et de -10 hPa entre 700 et 800 hPa. Pour le Ne = 0.75 le biais est plus proche de la première situation (Ne=1) entre 400 et 600 hPa, et moins bonne entre 600 et 800 hPa (-35 hPa), pour les situations où Ne = 0.5 et Ne = 0.25 le biais est très important pour l’ensemble des P_{TOP} et qui a augmenté jusqu’à 70 hPa pour le P_{TOP} égale 800 hPa lorsque Ne = 0.5 et jusqu’à -110 hPa pour le P_{TOP} de 700 lorsque Ne=0.25.

En ce qui concerne l’écart type, nous observons que dans la situation de Ne = 1 les P_{TOP} 500 et 600 ont un écart type faible de 10 hPa, plus en s’éloignant de ces derniers l’écart type augmente jusqu’au 200 hPa pour le P_{TOP} égale à 1000, pour la situation de Ne=0.75 présente un résultat plus proche du précédent, pour Ne=0.5 et Ne=0.25 l’écart type présente une dispersion très

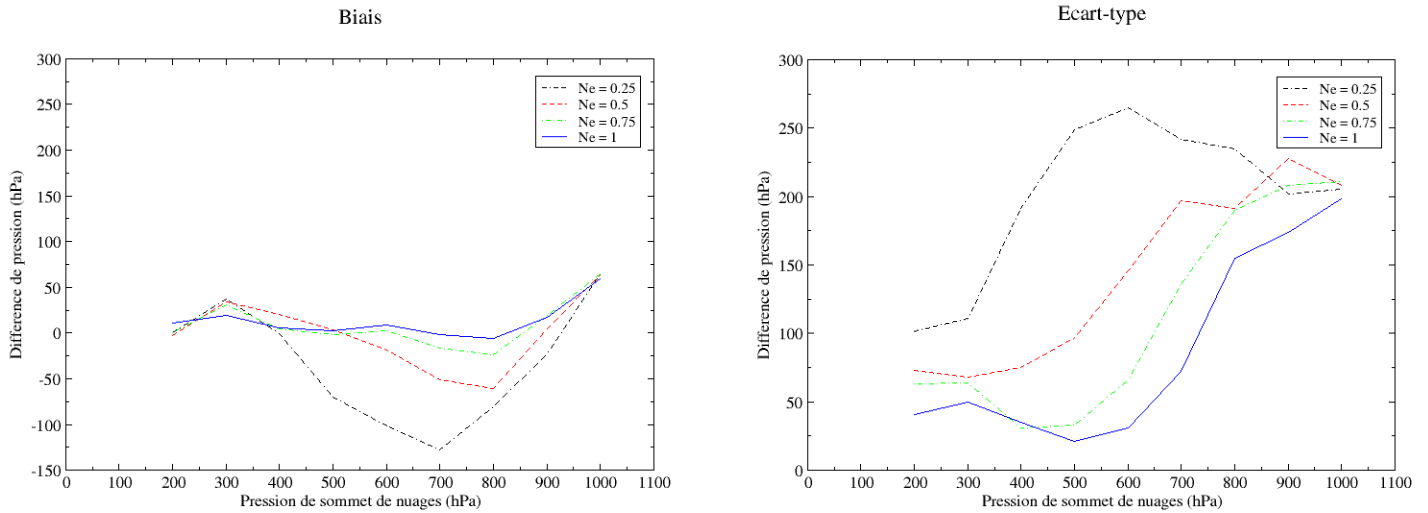


FIGURE 3.2 – Biais et l'écart type des pressions de sommet des nuages, du 04 Février 2013

élevée autour de la moyenne. Alors pour les deux paramètres statistiques, nous observons que toujours les nuages bas présentent des mauvais résultats, ainsi que plus le Ne diminue plus la capacité de la détection des PTOp diminue.

Pour se rapprocher du comportement de la fraction nuageuse restituée nous avons procédé de la même manière en calculant la différence moyenne et l'écart type (figure 3.3).

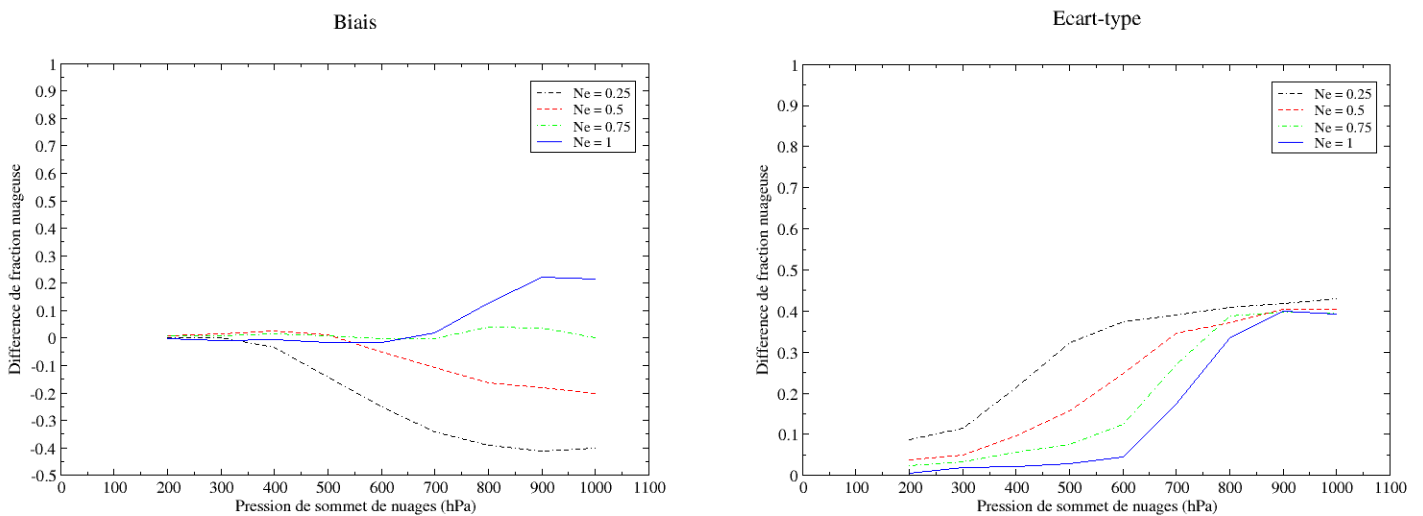


FIGURE 3.3 – Biais et l'écart type des fractions nuageuses, du 04 Février 2013

Le cas de $Ne=1$ nous avons des bons résultats entre 200 et 600 hPa, puisque les deux paramètres sont plus proches à 0 par rapport aux autres situations. Pour le cas de $Ne = 0.75$ nous avons un bon résultat de biais pour la totalité des PTOp. Pour les autres situations le biais est moins bon. En ce qui concerne l'écart type, il est plus proche de 0 entre 200 et 600 hPa lorsque $Ne=1$, et plus de 0.3 pour le cas de $Ne = 0.25$, dans le cas des nuages bas et surtout au delà de 800 hPa, l'écart type augmente (entre 0.3 et 0.4) pour tous les cas des Ne.

Cependant la remarque relevée auparavant est encore valable, puisque plus la valeur de Ne augmente, plus nous avons un bon résultat.

Les mêmes calculs sont effectués sur la date de 06 Mai 2015, le résultat obtenu pour le PTOP est le même que celui obtenu par ladite date.

Le résultat obtenu nous a amené à penser à l'intensité de la liaison qui peut exister entre les paramètres imposés et ceux restitués, pour ce faire nous avons étudié leur corrélation.

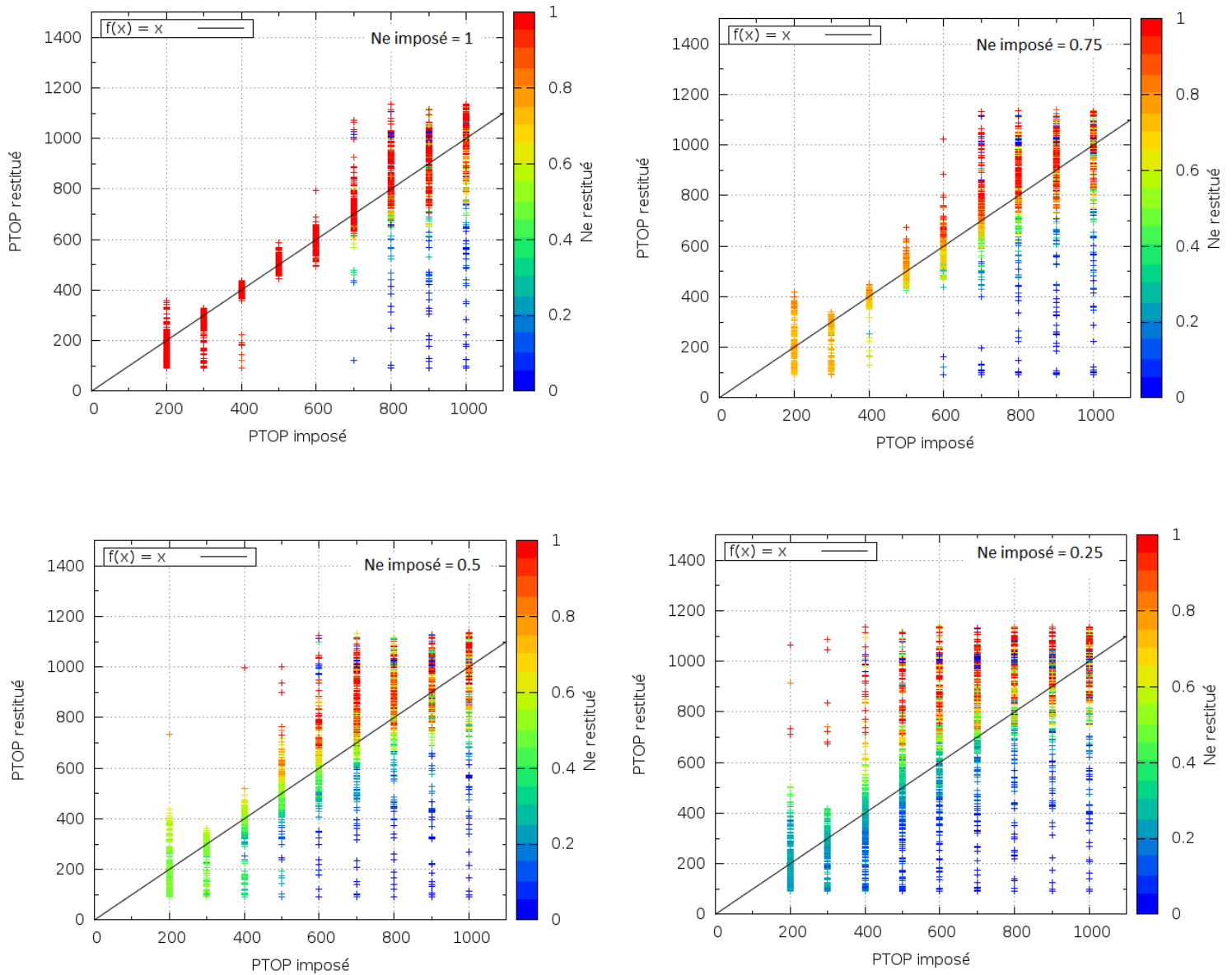


FIGURE 3.4 – Comparaison entre PTOP imposé (axe X) et PTOP restitué (axe Y) en fonction des Ne imposés, du 04 Février 2013

La figure 3.4 nous montre la relation linéaire entre les P_{TOP} imposés et restitués en fonction des N_e imposés, le résultat obtenu nous a permis de relever plusieurs constats :

Lorsque N_e imposé égale 1, la corrélation est très importante par rapport aux autres cas de N_e imposés. Au niveau de la diagonale nous observons que une partie de toutes les P_{TOP} imposés sont restitués (200 à 1000 hPa) alors que pour les autres cas nous observons qu'au delà de 800 hPa la restitution se fait par des N_e différentes de celles imposées.

La corrélation est meilleure lorsque le P_{TOP} imposé est entre 400 et 600 hPa, et cette forte corrélation diminue en passant d'un N_e imposé égale 1 à N_e imposé égale 0.25.

Pour le N_e imposé = 1 nous avons un meilleur coefficient de corrélation (0.91), par rapport aux autres cas de N_e imposés, 0.85 pour les $N_e = 0.75$, et $N_e = 0.5$, alors que dans le cas de $N_e = 0.25$ nous avons un coefficient de corrélation qui vaut 0.77.

Quelque soit le N_e imposé, l'algorithme restitue des P_{TOP} inférieurs à ceux imposés lorsque le N_e diminue par rapport à celui imposé, au contrepartie lorsque l'algorithme restitue des P_{TOP} supérieur aux celles imposés, nous trouvons que les N_e restitués augmente par rapport au N_e imposé.

Finalement ces expériences nous ont montré que l'algorithme *CO₂-Slicing*, détecte toujours des nuages même au ciel clair, et plus le pixels est nuageux plus la restitution par l'algorithme s'améliore ce qui est montré par le calcul de biais et de l'écart type qui augmente avec l'élévation de la fraction nuageuse. En moyennant les résultats obtenus nous trouvons qu'entre 400 et 600 hPa se concentre les meilleurs résultats des paramètres calculés, ce qui veut dire que l'algorithme trouve ces meilleurs conditions de la détection dans le cas des pixels nuageux avec des P_{TOP} moyennes voir élevés. Cette étude comme nous avons expliqué au debut de ce chapitre est une étude idéalisée, dont le nombre des situations est limité sur mer, nous allons maintenant étudier la restitution des paramètres nuageux pour des situations réelles.

Chapitre 4

Evaluation de la détection avec les produits SEVIRI

Ce chapitre consiste à fournir une évaluation de l'algorithme de détection CO_2 -Slicing. Dans un premier temps nous commencerons par une comparaison qualitative des données IASI et SEVIRI pour une date donnée. Dans un second temps, une comparaison quantitative sera effectuée, en se référant aux données de validation de SEVIRI et de sa classification nuageuse.

4.1 Cas du 28 Novembre 2014 : Comparaison de la restitution des pressions de sommet de nuages entre IASI et SEVIRI dans ARPEGE

Avant de co-localiser nos observations IASI et le produit nuageux de SEVIRI, nous avons essayé de décrire la situation météorologique de la journée du 28 Novembre 2014 tout en comparant la restitution nuageuse de IASI avec le produit de validation de SEVIRI.

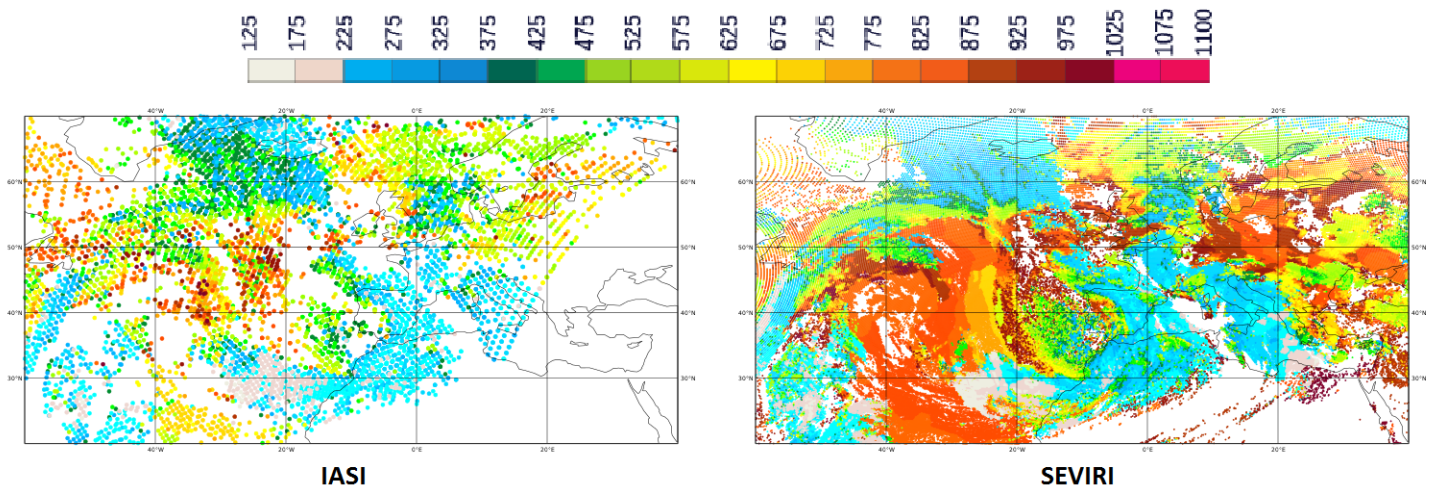


FIGURE 4.1 – Carte des pressions de sommet de nuages (PTOP en hPa) d’IASI et de SEVIRI du 28 Novembre 2014 à 12 :00 UTC

Les figures 4.1 et 4.2 représentent respectivement la répartition de la pression de sommet de nuages calculée par IASI et SEVIRI, et la classification des nuages pour la situation météorologique de la journée du 28 Novembre 2014 à 12h.

Dans la partie centrale (20E-20W et 20N-50N) (figure 4.1.b), nous observons une perturbation intense d’origine atlantique qui a abordé le Maroc par le Nord-Ouest et qui se généralise par la suite sur l’ensemble du territoire marocain.

Nous remarquons que cette partie est remplie par des nuages opaques élevés voire très élevés (4.2) entre 175 et 275 hPa, qui sont concentrés d’avantage dans la partie sud, qui sont associés avec le phénomène d’inondation qui a touché cette zone durant cette période.

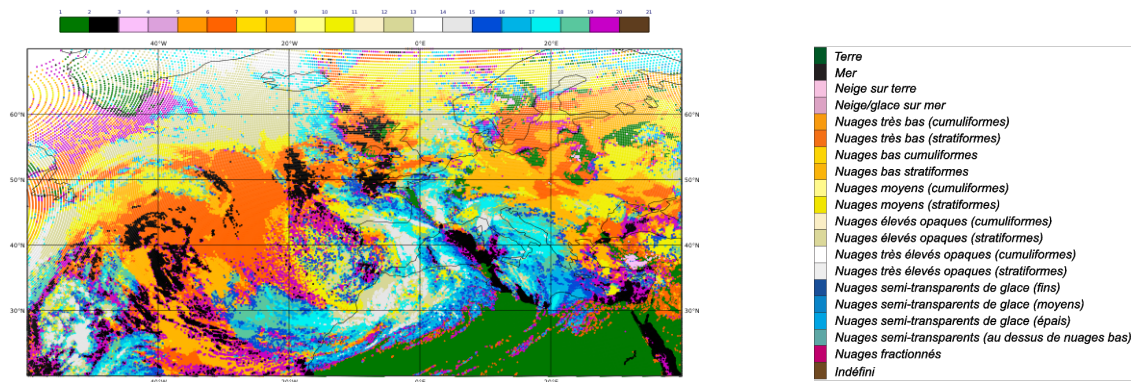


FIGURE 4.2 – classification nuageuse du SEVIRI du 28 Novembre 2014 à 12 :00 UTC

L’analyse visuelle montre quelques points communs entre les deux images IASI et SEVIRI, puisqu’elles présentent parfaitement les nuages opaques élevés à très élevés de type stratiforme. Mais IASI est moins précis dans la détection des nuages cumuliformes très élevés présentant une légère confusion avec les nuages moyens ce qui apparaît dans la zone 20-40W et 60-70N. Pour les nuages très bas, nous trouvons un écart entre les deux instruments puisque IASI n’arrive pas toujours à bien détecter ce type de nuages, et il les met un peu plus élevés par exemple au niveau de l’Atlantique et spécifiquement dans la zone (30W-40W et 20N-30N) ou bien il n’arrive pas complètement à les détecter (50-60W et 20-30N). En se référant à la classification nuageuse

de SEVIRI (figure 4.2) nous observons qu'il s'agit dans ce cas de nuages fractionnaires qui sont difficiles à détecter pour IASI, vu sa résolution spatiale moins bonne que SEVIRI.

Après cette évaluation qualitative, basée sur l'observation et la comparaison visuelle, nous avons pu extraire quelques similitudes et écarts dans la détection nuageuse des deux instruments IASI et SEVIRI, ce qui nous a amené à quantifier cette différence dans les sections suivantes.

4.2 Evaluation de la détection nuageuse d'IASI dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans ARPEGE

Avant d'entamer les différents cas (cas nuageux et cas clair) et de les développer distinctement, nous avons effectué une comparaison statistique des valeurs obtenues par le CO_2 -Slicing d'IASI avec les valeurs observées par l'imageur SEVIRI afin d'évaluer la performance de cet algorithme. Pour ce faire nous avons utilisé des tableaux de contingence (tableau 4.1), Ebert (2008) qui séparent les résultats obtenus en quatre groupes "HITS", "MISSES", "CORRECT REJECTIONS" et "FALSE ALARMS" (réussite, échecs, rejet correcte et fausse alarme).

N=total	Nuages observés(SEVIRI)	Nuages non observés(SEVIRI)
Nuages diagnostiqués(IASI)	HITS(H)	FALSE ALARMS (FA)
Nuages non diagnostiqués (IASI)	MISSES (M)	CORRECT REJECTIONS (CR)

TABLE 4.1 – Tableau de contingence

Les tableaux 4.2, 4.3 présentent respectivement les résultats obtenus de jour (angle zénithal inférieur à 90°) et de nuit (angle zénithal supérieur à 90°). Chaque tableau représente à son tour les résultats sur mer et sur terre pour le CO_2 -Slicing pendant notre période d'étude. Les situations de jour ont été distinguées des situations de nuit afin d'évaluer la performance de l'algorithme dans un cycle journalier complet.

N(mer)=246972	Nuages observés(SEVIRI)	Nuages non observés(SEVIRI)
N(terre)=112893		
Nuages observés (IASI)	H(mer)=115238(46.66%)	FA(mer)=4067(1.64%)
	H(terre)=30522(27.03%)	FA(terre)=6843(0.95%)
Nuages non observés (IASI)	M(mer)=52300(21.17%)	CR(mer)=75367(30.51%)
	M(terre)=64891(25.82%)	CR(terre)=68601(46.18%)

TABLE 4.2 – Tableau de contingence représentant les résultats d'IASI pour les situations de jour (du 21 au 28 Novembre 2014)

Le tableau 4.2 représente les résultats de détection de IASI pour la situation du jour Sur mer, nous remarquons que le taux de réussite 'HITS' présente un pourcentage plus élevé (46.66%) par rapport aux données sur terre (27.99%), alors que ce dernier se caractérise par un taux de rejet correct plus élevé par rapport aux données sur mer. Le taux de fausse alarme est plus élevé sur mer que sur terre avec un taux de 0.51%, le taux d'échec sur terre est plus élevé que sur mer avec un taux de 4.65%.

N(mer)=245082	Nuages observés(SEVIRI)	Nuages non observés(SEVIRI)
N(terre)=119112		
Nuages observés (IASI)	H(mer)=104747(42.73%)	FA(mer)=6843(2.79%)
	H(terre)=34721(29.14%)	FA(terre)=3432(2.88%)
Nuages non observés (IASI)	M(mer)=64891(26.47%)	CR(mer)=68601(27.99%)
	M(terre)=27756(23.30%)	CR(terre)=53203(44.66%)

TABLE 4.3 – Tableau de contingence représentant les résultats de IASI pour les situations de nuit (du 21 au 28 Novembre 2014)

Les résultats de détection du IASI pour la situation de nuit sont différents de ceux obtenus le jour (tableau 4.3) : le taux de réussite est plus élevé sur mer que sur terre. le taux de rejet correct et de fausse alarme présentent un taux plus élevé sur terre que sur mer, ainsi que ce dernier est plus élevé la nuit que le jour. De nuit le taux d'échec présente un résultat différent par rapport au jour puisque les données sur mer sont plus élevées que sur terre avec 3.17%.

Les tableaux de contingence permettent de calculer les scores de vérification suivants (Ebert (2008)) :

- BIAS : représente le biais en fréquence des cas nuageux. Il donne le rapport entre la fréquence des cas nuageux prévus (par l'algorithme CO_2 -Slicing) et la fréquence des cas nuageux observés(par SEVIRI) :

$$BIAS = \frac{HITS + FALSEALARMS}{HITS + MISSES}$$

Un biais en fréquence supérieur à 100% indique que l'algorithme prévoit plus de nuages que ce qui est réellement observé (par la donnée vérifiante). À l'inverse, si le biais en fréquence est inférieur à 100%, l'algorithme prévoit moins de nuages que ce qui est réellement observé.

- PC (Proportion of Correct) : représente la proportion de cas clairs et nuageux correctement prévus par rapport à tous les cas (N) :

$$PC = \frac{HITS + CORRECTREJECTIONS}{N}$$

- POD (Probability Of Detection) : mesure le rapport de cas nuageux observés par SEVIRI qui ont été correctement prévus par l'algorithme CO_2 -Slicing :

$$POD = \frac{HITS}{HITS + MISSES}$$

- POD' (Probability Of Detection) : mesure le rapport de cas clairs observés par SEVIRI qui ont été correctement prévus par l'algorithme CO_2 -Slicing :

$$POD' = \frac{CORRECTREJECTIONS}{CORRECTREJECTIONS + FALSEALARMS}$$

- FAR (False Alarm Ratio) : représente la proportion de cas nuageux non observés par SEVIRI parmi les cas où un nuage est prévu par l'algorithme CO_2 -Slicing :

$$FAR = \frac{FALSEALARMS}{HITS + FALSEALARMS}$$

- NDR (Non Detection Rate) : représente le taux de non-détection des pixels nuageux.

$$NDR = 1 - POD$$

4.2.1 Efficacité de la détection

Les scores de vérification obtenus de jour (mer/terre) et de nuit(mer/terre) pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI sont résumés dans le tableau 4.4 :

	Jour		Nuit	
	Mer	Terre	Mer	Terre
BIAIS	71.21%	52.94%	65.78%	61.06%
PC	77.17%	73.22%	70.73%	73.81%
POD	68.78%	51.14%	61.74%	55.57%
POD'	94.88%	97.98%	90.92%	93.94%
FAR	3.40%	3.39%	6.13%	8.99%
NDR	31.22%	48.86%	38.26%	44.43%

TABLE 4.4 – Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 pour les situations de jour(mer/terre) et de nuit (mer/terre).

- Un petit pourcentage de fausses alertes (FAR) est visible pour l'algorithme CO_2 -Slicing pendant le jour sur mer ainsi que sur terre (environ 3,40%). Durant la nuit le pourcentage de FAR est deux fois plus élevé que le jour (sur terre 8,99% et 6,13% sur mer).

- Le taux de non-détection des pixels nuageux (NDR) est compris entre 31,22% sur mer et 48,86% sur terre le jour et entre 38,26% sur mer et 44,43% sur terre la nuit. Ce taux de non détection des pixels nuageux a certainement plusieurs origines. Tout d'abord, la plus faible résolution spatiale de IASI par rapport à SEVIRI (12 km pour IASI au nadir contre 3 km pour SEVIRI) rend la détection des nuages fractionnés délicate dans certains cas. Ce taux de non détection des pixels nuageux pourrait aussi être expliqué par la difficulté de CO_2 -Slicing à détecter certains nuages bas, et surtout sur terre dans lequel la température du surface peut influencer le fonctionnement de l'algorithme.

- Les biais en fréquence pour les cas nuageux (BIAIS) sont inférieurs à 100% pour toutes les situations, indiquant qu'IASI prévoit moins de nuages que ce qui est observé par SEVIRI, surtout sur terre plus que sur mer.

- Le taux de bonne détection des pixels nuageux (POD) est compris entre 68,78% sur mer et 51,14% sur terre pendant le jour et entre 61,74% sur mer et 55,7% sur terre la nuit. Ces taux sont largement inférieurs au taux de bonne détection des pixels clairs POD' (compris entre

94,88 sur mer et 97,98% sur terre durant le jour ; entre 90,92% sur mer et 93,94% sur terre, la nuit.

- L'algorithme de détection CO_2 -slicing est plus performant le jour que la nuit et sur mer plus que sur terre pour des 5 paramètres étudiés, seul le POD' présente de meilleurs résultats sur terre que sur mer.

4.2.2 Précision de la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing

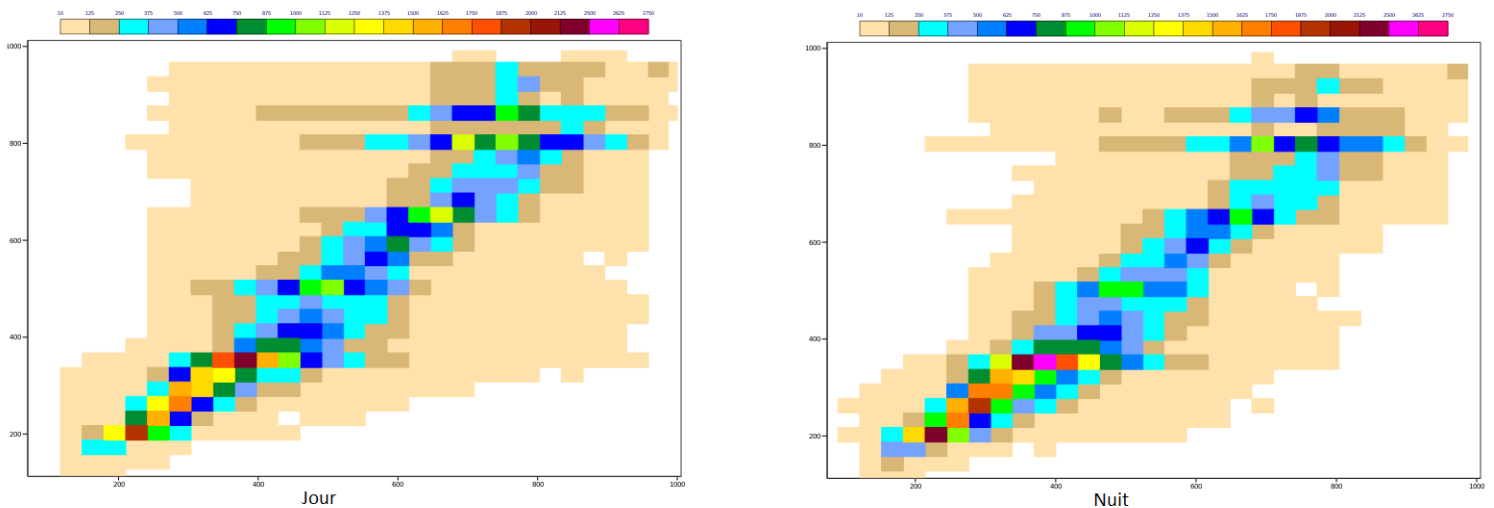


FIGURE 4.3 – Comparaison de la pression de sommet des nuages(PTOP) calculée à partir de IASI (axe X) et de SEVIRI (axe Y) sur mer pour les situations de jour et de nuit pour la période de 21 au 28 Novembre 2014.

La figure 4.4 présente une comparaison des PTOp calculés par le CO_2 -Slicing et ceux dérivés de SEVIRI pour chacun des pixels déclarés nuageux par le CO_2 -Slicing ($Ne > 0$) sur mer pour les situations de jour et celles de nuit. Une assez bonne concordance est visible dans l'estimation du sommet du nuage par le CO_2 -Slicing et par SEVIRI au niveau de la diagonale avec un indice de corrélation de 0.79 pour les situations de jour et 0.83 pour les situations de nuit. Le grand nombre de population est concentré dans le point 375 hPa pour IASI et SEVIRI pendant le jour alors que durant la nuit cette concentration a été décalée vers 350 hPa pour IASI. Pour les nuages élevés (nuages dont le PTOp est compris entre 150 et 250 hPa) la caractérisation issue du CO_2 -Slicing présente un très bon accord avec celle issue de SEVIRI de jour comme de nuit. La concordance est moins précise pour les nuages moyens et des nuages bas. Par exemple des nuages dont le PTOp IASI est égal à 650 hPa sont présentés par SEVIRI par des PTOp de 900 hPa du jour comme la nuit. Cela est bien illustré au niveau de l'Atlantique (0-30S et 15E-20W, figure 4.4) du jour et de nuit.

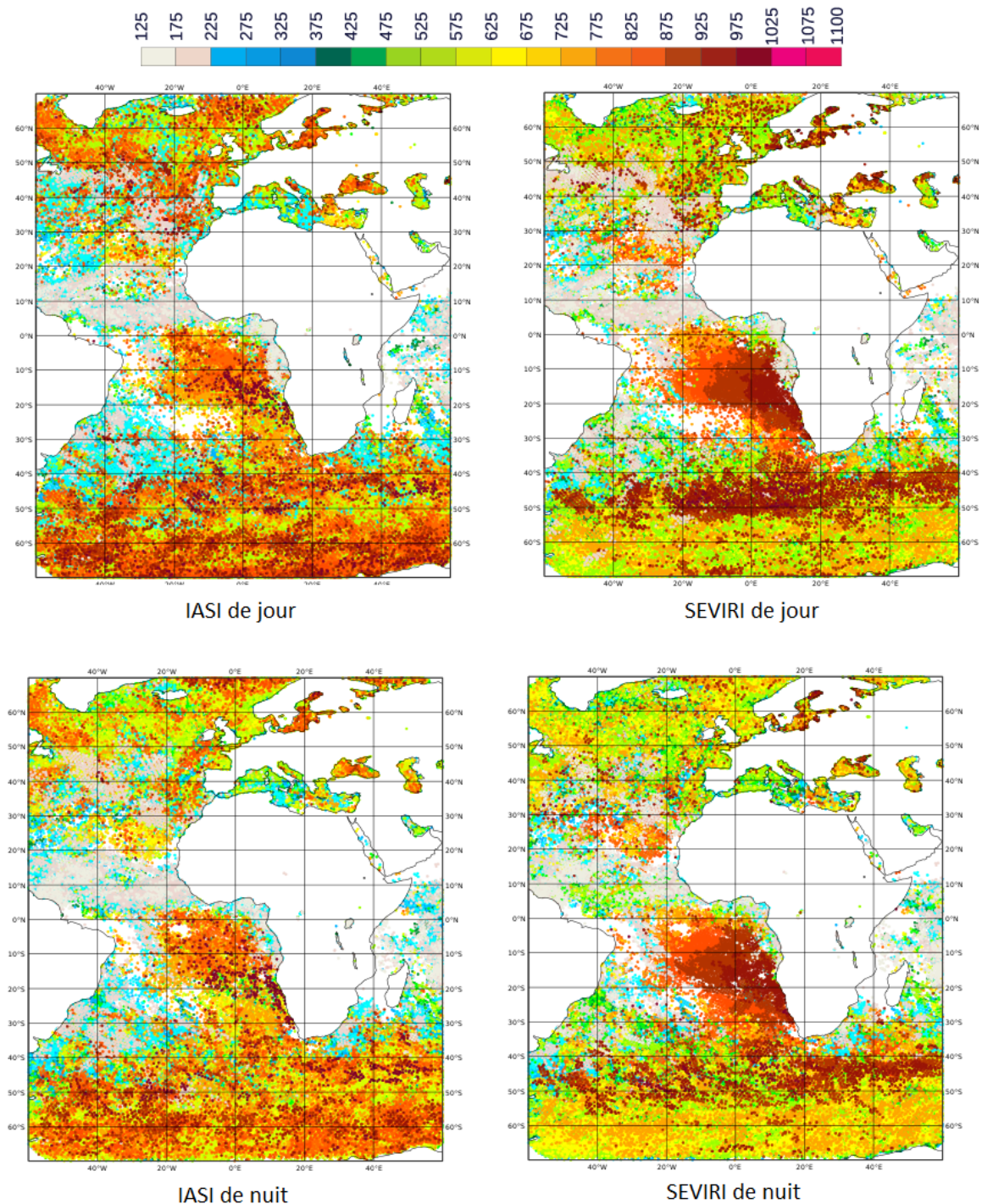


FIGURE 4.4 – Cartes de la pression de sommet des nuages en hPa de IASI et SEVIRI sur mer pour la période de 21 au 28 Novembre 2014.

Nous avons aussi le cas inverse dans lequel IASI indique des nuages moins élevés que SEVIRI sur la zone 60-70S et le nord Ouest de l’atlantique (figure 4.4)

Les nuages élevés sont placés de la même manière par les deux instruments IASI et SEVIRI bien que quelques différences légères apparaissent au niveau de la Méditerranéenne pendant le jour, et dans la partie 30-45W et 20-40S durant la nuit.

Ces différences sont liées généralement aux zones des nuages semi transparents et fractionnés.

Les mêmes comparaisons ont été effectuées sur terre et pour les situations de jour et de nuit. L’indice de corrélation des P_{TOP} entre IASI et SEVIRI est meilleur que sur mer, nous avons 0.82 le jour et 0.84 pendant la nuit. L’évaluation sur terre nous a permis de remarquer

que les différences entre SEVIRI et IASI se représente par des nuages qui sont mis par IASI avec des P_{TOP} plus élevés que SEVIRI, sont des nuages de type semi transparents, bas et très bas, durant le jour et la nuit.

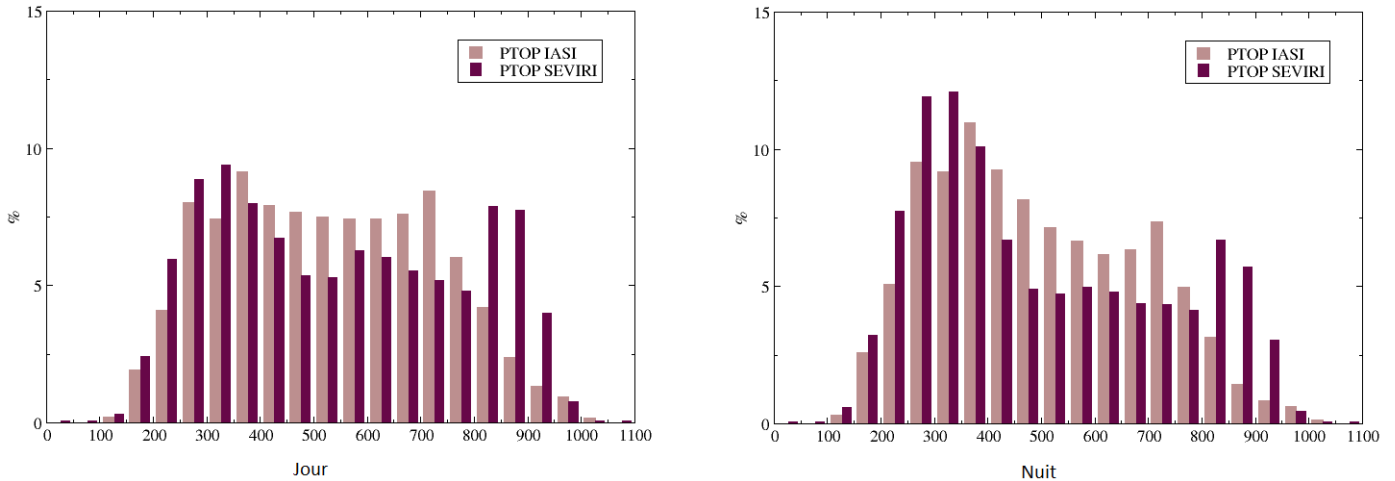


FIGURE 4.5 – Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP) en hPa sur mer de jour et de nuit sur la période de 21 au 28 Novembre 2014.

La répartition des P_{TOP} calculés par le CO_2 -Slicing et par SEVIRI (figure 4.5) est relativement en bon accord mais nous avons quelques remarques à signaler. Pour les situations de jour, les nuages dont le P_{TOP} est compris entre 375 et 400 hPa d’une part et 675 et 725 hPa sont plus nombreux avec IASI (environ 9%), alors que SEVIRI présente un plus grand pourcentage pour les nuages dont le P_{TOP} est égal à 325 hPa (vers 10%) et entre 825 et 875 hPa (9%). Quant aux situations de nuit nous avons un excès remarquable des nuages dont le P_{TOP} est égal à 375 hPa pour IASI (10.5%) alors que SEVIRI présente le plus grand pourcentage pour les P_{TOP} 275 et 325 hPa (11%).

Nous avons aussi calculé la répartition des Ne d’IASI et nous avons observé que 25% des pixels ont des Ne compris entre 0.9 et 1 du jour comme la nuit.

En se basant sur la donnée AVHRR que dispose l’observation IASI, nous avons remarqué que plus de 55% des pixels sont déclarés totalement recouverts par des nuages lorsque IASI est nuageux le jour et la nuit alors que 80% des pixels sont déclaré nuageux par AVHRR lorsque SEVIRI est nuageux le jour et 70% la nuit.

Sur terre nous avons remarqué que l’algorithme et la donnée de validation présentent leur plus grand pourcentage pour les nuages élevés dont le P_{TOP} égale à 275 hPa (IASI 11% et SEVIRI 13%) pendant le jour et entre 175 et 275 hPa la nuit. (figure 4.6).

Nous avons ainsi relevé de cette situation que IASI n’arrive pas à détecter les nuages bas qui sont présents dans SEVIRI durant le jour.

En ce qui concerne la répartition des Ne d’IASI nuageux nous avons 20% des pixels ont des Ne entre 0.9 et 1 du jour et de nuit (non montré).

Nous avons aussi utilisé l’information de l’imageur AVHRR qui est colocalisé avec IASI sur la

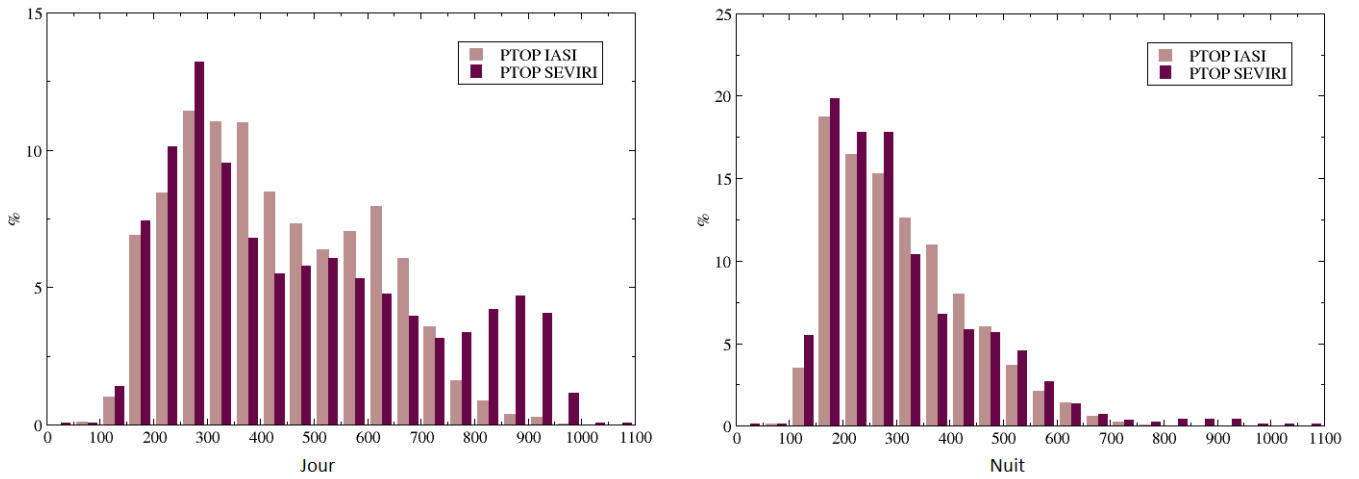
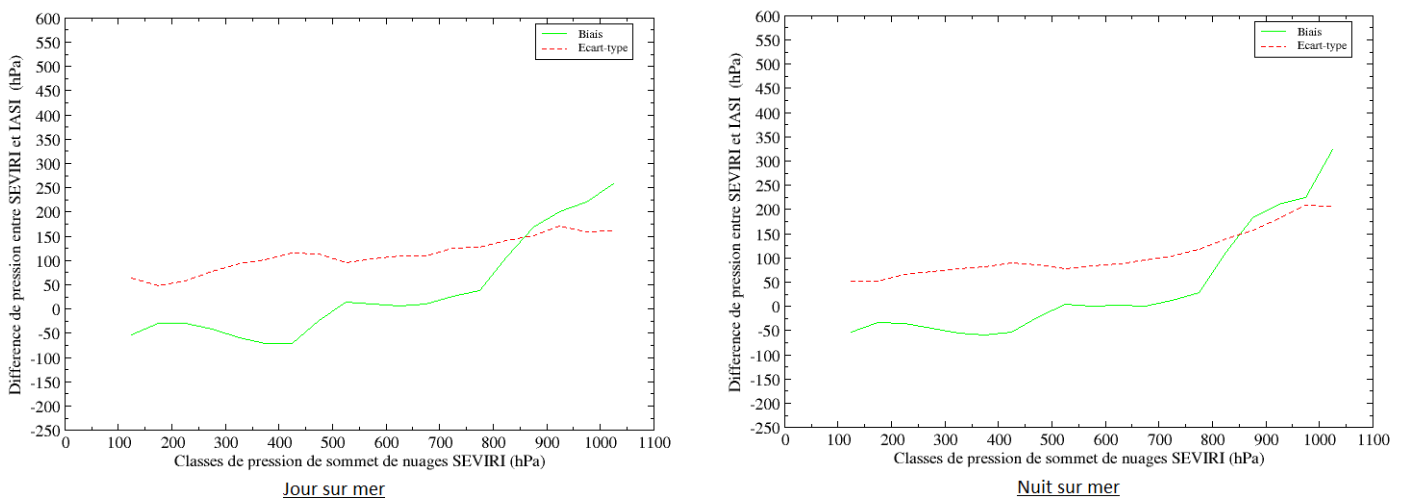


FIGURE 4.6 – Répartition de pression de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI sur terre pour les situations du jour (a) et de nuit (b) sur la période du 21 au 28 Novembre 2014.

plateforme Metop. La résolution spatiale des observations AVHRR est d'environ 1 km. Cette dernière nous donne le pourcentage de pixels AVHRR nuageux dans l'empreinte IASI. Cependant la couverture nuageuse de AVHRR vaut plus de 40% des pixels de jour et 45% de nuit lorsque IASI est nuageux, alors AVHRR nous donne une information supplémentaire de la couverture nuageuse qui présente une correspondance avec la fraction nuageuse d'IASI.

En complément de notre évaluation, nous avons réparti les PTOPI de SEVIRI en classes de 50 hPa et nous avons calculé le biais des PTOPI SEVIRI et IASI et l'écart type.

Les situations de jour et de nuit sur mer (figure 4.7) présentent un biais négatif des PTOPI en dessous de 500 hPa ce qui veut dire que IASI met des nuages moins élevés que SEVIRI. Entre 500 et 800 hPa le biais se rapproche plus à 0. Les deux instruments détectent d'une façon presque équivalente cette gamme de pression. Finalement au delà de 800 hPa nous observons que le biais ne cesse d'augmenter, puisque IASI ici détecte des nuages toujours plus élevés que SEVIRI.



Sur terre, de jour et de nuit (figure 4.7), la courbe de biais tend vers les valeurs négatives au dessous de 350 hPa. Les nuages dont les PTOPI est entre 350 et 600 hPa leurs Biais est plus proche de 0, alors qu'au delà de 600 hPa le biais augmente beaucoup plus ; de 50 à 350 hPa le

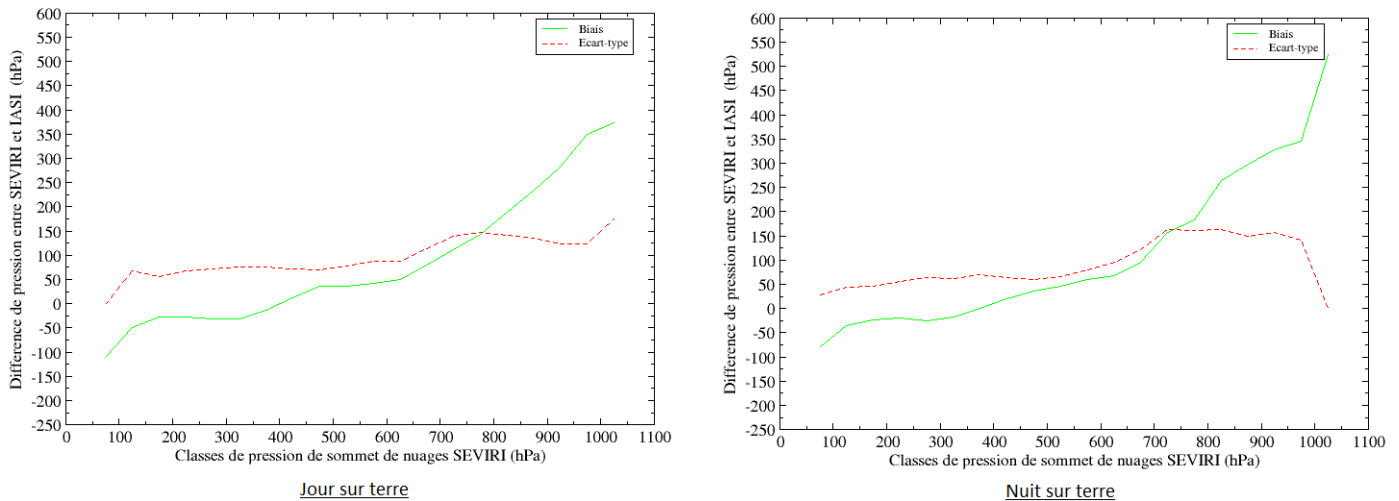


FIGURE 4.7 – Biais et écart type de PTOp entre IASI et SEVIRI sur la période du 21 au 28 Novembre 2014

jour, et de 50 à 500 hPa la nuit.

La courbe de l'écart-type sur mer et sur terre pour les situations de jour et de nuit augmente en passant des nuages élevés aux nuages très bas. Ainsi toutes les valeurs sont relativement élevées (supérieures à 50hPa) sauf pour les nuages entre 100 et 150 hPa sur terre pour lesquels la dispersion autour de la moyenne est faible par rapport aux autres classes de PTOp.

Cas des pixels avec une fraction nuageuse égale à 0

L'évaluation des cas clairs de IASI ou pour lesquels l'algorithme n'arrive pas à détecter les nuages, est indispensable pour vérifier la capacité de l'algorithme à détecter des pixels clairs. SEVIRI détecte un pourcentage très élevé de nuages bas sur mer le jour (12% pour le PTOp égale 825 et 11% pour le PTOp égale 875 hPa (figure non montrée)) et la nuit (13% pour le PTOp est égal à 825 et 14% pour le PTOp égal à 875 hPa, figure 4.8.a). En se basant sur la classification de SEVIRI nous avons plus de 26% des pixels clairs sur mer le jour et 35% la nuit, les autres pixels sont contaminés principalement par des nuages bas (22% le jour et 30% la nuit) et fractionnés (30% le jour et 16% la nuit).

Sur terre l'histogramme de répartition des PTOp de SEVIRI est différent de celui de mer puisqu'il varie entre la détection des différentes pressions de sommet des nuages, mais pendant la nuit nous avons une élévation légère pour les nuages moyens (figure 4.8.b). La classification de SEVIRI indique que la majorité des pixels sont des pixels clairs sur terre (55% le jour et 62% la nuit) et des nuages bas et fractionnés (9%) le jour. De nuit nous avons plus des nuages bas (11%), moyens et des nuages semi transparents (7%).

La donnée AVHRR fournit des informations supplémentaires, ainsi sur mer environ 34% des pixels sont considérés par AVHRR comme clairs le jour, et 30% la nuit. Sur terre nous observons que AVHRR est plus cohérent avec le CO_2 -Slicing puisque 44% des pixels sont totalement clairs le jour et 58% la nuit.

Ces résultats montre que la majorité des pixels pour lesquels la méthode du CO_2 -Slicing produit

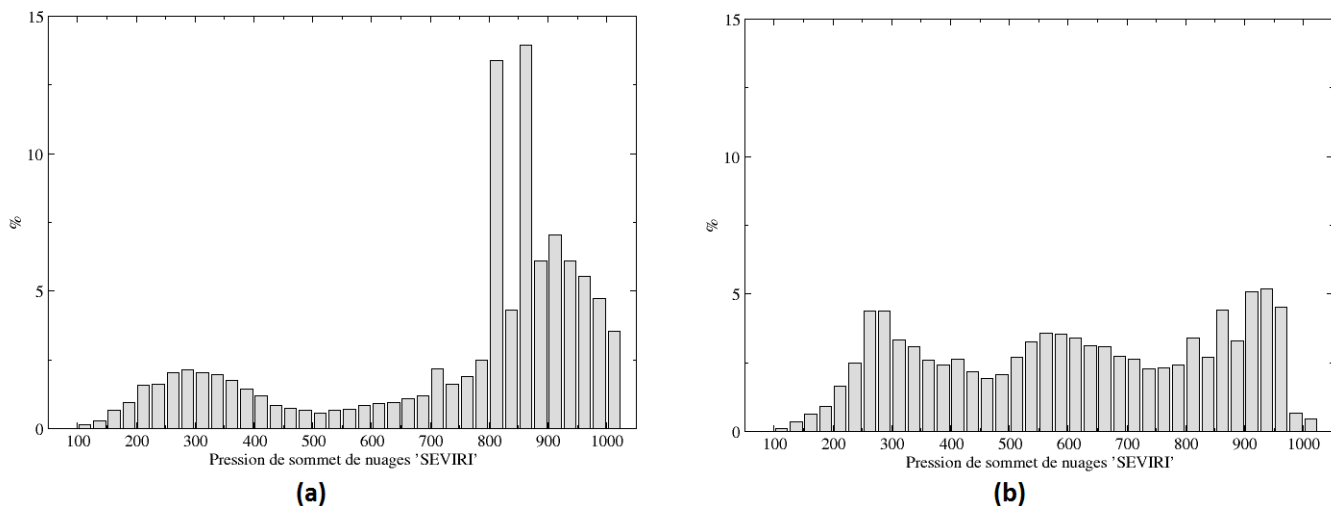


FIGURE 4.8 – Répartition des pressions de sommet des nuages (PTOP) en hPa de nuit sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014.

une fraction nuageuse nulle, sont des pixels clairs selon la classification de SEVIRI. Le reste des pixels est majoritairement représenté par des pixels contaminés par un nuage fractionné, ou par des nuages bas, très bas, voire semi-transparents.

L'algorithme de détection du CO_2 -Slicing, sur mer considère les pixels affectés par des nuages bas et fractionnés comme clairs. Sur terre bien que SEVIRI détecte des nuages avec différents PTOp il s'agit toujours des nuages bas, fractionnés et semi transparents. Ce constat semble normal vu la difficulté de l'algorithme à détecter des nuages bas, on a mal à distinguer le signal de la surface de celui d'un nuage bas.

Cas des pixels avec une fraction nuageuse égale à 1

L'assimilation des radiances nuageuses d'IASI dans le modèle de prévision numérique utilisant des données dont le $Ne=1$ et la pression de sommet de nuages comprise entre 650 hPa et 900 hPa, nous avons d'abord évalué la détection nuageuse de tous les nuages avec $Ne=1$ quel que soit leurs PTOp, puis nous avons restreint l'échantillon aux données dont le PTOp se situe entre 650 et 900 hPa.

La comparaison des populations présentant une $Ne=1$ met en évidence des résultats très différents sur mer et sur terre. Le coefficient de corrélation est meilleur sur terre (0.92 le jour et 0.94 la nuit) que sur mer (0.74 le jour et 0.83 la nuit). De nuit sur mer, nous remarquons que les deux instruments détectent davantage de nuages moyens et bas. En effet IASI présente le plus grand pourcentage pour les nuages dont le PTOp est égal à 725 hPa (19%) alors que SEVIRI détecte 20% des nuages dont le PTOp est égal à 825hPa (figure 4.9.a). De jour les résultats sont identiques sur mer.

Pour déterminer le type de nuage qui caractérise cette situation nous avons utilisé la classification de SEVIRI (figures non présentées) : la majorité des pixels est contaminée par des nuages bas et très bas de type stratiformes.

Pour la situation de jour sur terre (figure non présentée), nous remarquons que les deux instruments arrivent à détecter moins des nuages bas avec une augmentation des nuages élevés

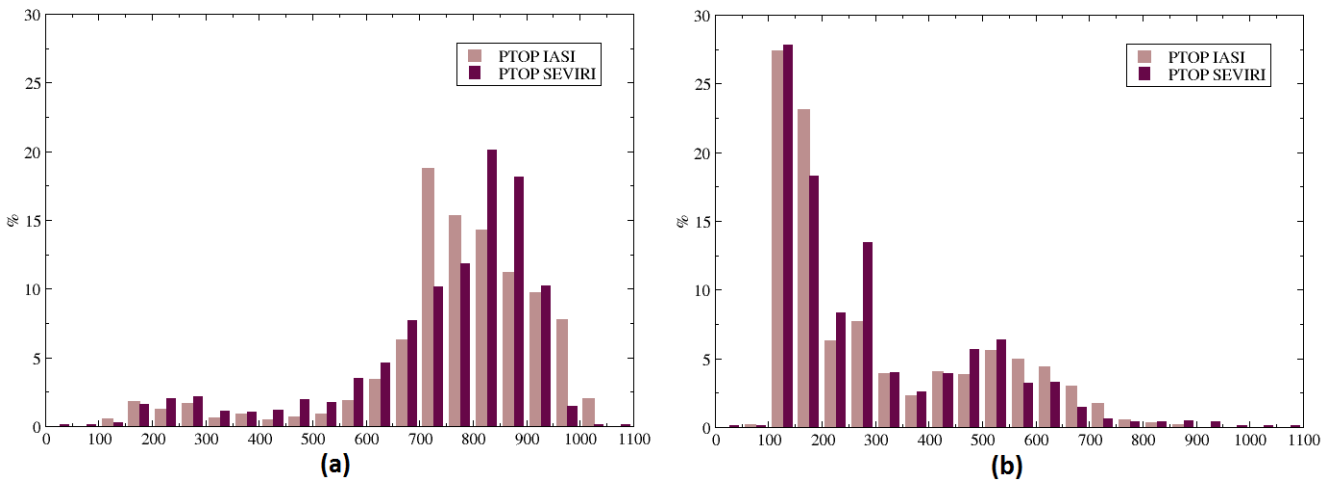


FIGURE 4.9 – Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI de nuit sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014.

alors que pendant la nuit (figure 4.9.b) les deux instruments détectent plus de nuages élevés vers 125hPa environ 25% de type très élevés opaques (58%) et des nuages semi transparents.

Après l'évaluation de tous les pixels avec $Ne=1$ nous avons focalisé sur les pixels avec des PTOP entre 650 et 900 hPa.

SEVIRI détecte ainsi plus des nuages entre 650 et 900 hPa mais nous avons des différences à signaler. De jour IASI met un peu plus de nuages bas que SEVIRI. Par exemple IASI met 30% des nuages dont le PTOP est égal à 725 hPa alors que SEVIRI ne détecte que 15% avec un pourcentage plus élevé pour les nuages très bas (vers 900 hPa, 20% pour SEVIRI et 10% pour IASI, figure 4.10.a). Ces pixels correspondent principalement à des nuages bas (45%) et très bas (38%). De jour sur terre nous observons d'une part que IASI met 50% des nuages dont le PTOP est égal à 675 hPa alors que SEVIRI n'en met que 10%. SEVIRI met des nuages plus bas que IASI. En se basant sur la classification des nuages de SEVIRI ces pixels sont contaminés par des nuages bas (60%) et très bas (30%).

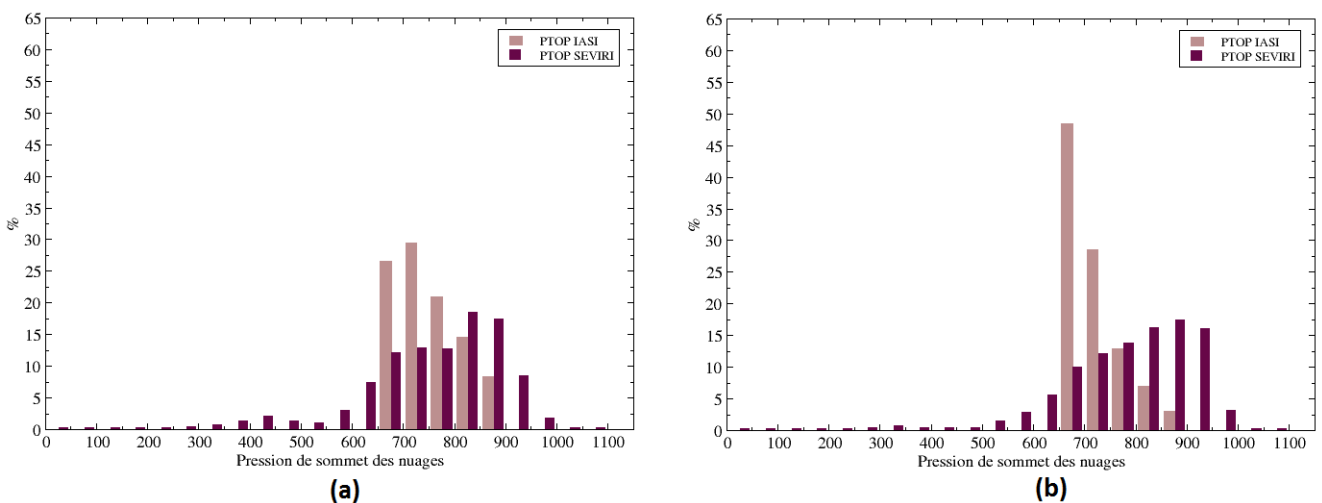


FIGURE 4.10 – Répartition de sommet des nuages (PTOP) d'IASI et SEVIRI de jour sur mer (a) et sur terre (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014 pour les pressions de sommets de nuage de IASI comprises entre 650 et 900 hPa.

Pendant la nuit, les résultats sont identiques à ceux obtenus le jour sur mer et sur terre, mais cette fois les pixels sur terre sont contaminés aussi par des nuages semi-transparents. L'évaluation de la détection nuageuse de l'algorithme CO_2 -Slicing dans ARPEGE nous a permis de relever plusieurs constats. Les cas nuageux présentent certainement des différences par rapport aux données de validation surtout pour les nuages très bas. IASI met toujours des nuages plus élevés ou il considère ces pixels comme clairs ou non-détecté, ce qui est clairement indiqué par l'analyse des pixels clairs. En se basant sur les paramètres de POD' calculé précédemment nous trouvons que le CO_2 -Slicing détecte plus de pixels clairs dans ARPEGE.

Les nuages élevés sont représentés par IASI par des nuages plus bas, (biais négatif 4.7), ainsi les nuages dont le P_{TOP} supérieur à 800 hPa sur mer et 600 hPa sur terre sont présentés par IASI par des nuages plus élevés.

En se concentrant sur l'efficacité de détection des nuages au dessous de 650 hPa, le meilleur résultat a été obtenu entre 550 et 650 puisque la détection des pixels nuageux (POD) sur mer est de 99,64 % le jour et 99,87% la nuit, et sur terre le jour 95,41% et 98,13% la nuit, ainsi le taux de fausse alarme est très faible sur mer 0,36% le jour et 0,13%.

4.3 Evaluation de la détection nuageuse de IASI dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans AROME

L'évaluation de la détection nuageuse de IASI dans le modèle AROME est pour la première a été abordé, dans Pangaud *et al.* (2009) et Guidard *et al.* (2011) la comparaison a été faite que dans ARPEGE. La démarche utilisée pour AROME est la même que celle utilisée pour ARPEGE.

N(mer)=21428	Nuages observés(SEVIRI)	Nuages non observés(SEVIRI)
N(terre)=34170		
Nuages observés (IASI)	H(mer)=8818(41,15%)	FA(mer)=297(1,38%)
	H(terre)=12783(37,41%)	FA(terre)=68(1,99%)
Nuages non observés (IASI)	M(mer)=7501(35,00%)	CR(mer)=4812(22,45%)
	M(terre)=15206(44,50%)	CR(terre)=6113(17,88%)

TABLE 4.5 – Tableau de contingence représentant les résultats du IASI pour la situation du jour (du 21 au 28 Novembre 2014)

Pour la situation du jour (Tableau 4.5), nous remarquons que sur mer les cas de réussites et des rejets corrects présentent un pourcentage plus élevé (22.45%) par rapport aux données sur terre (17.88%). Par contre, le taux de fausse alarme et le taux d'échecs sont plus importants sur terre (FA=1.99% et M=44.55%) que sur mer (FA=22.45% et M=35%).

De nuit, le résultat est différent à celui de jour car cette fois le taux de réussite et de fausse alarme sur mer sont plus élevés (H=44.52% et FA=1.91%) par rapport aux données sur terre (H=38.23% et FA=0.93%) (tableau 4.6).

N(mer)=17198	Nuages observés(SEVIRI)	Nuages non observés(SEVIRI)
N(terre)=26955		
Nuages observés (IASI)	H(mer)=7658(44,52%)	FA(mer)=330(1,91%)
	H(terre)=10307(38,23%)	FA(terre)=251(0,93%)
Nuages non observés (IASI)	M(mer)=5330(30,99%)	CR(mer)=3880(22,56%)
	M(terre)=9930(36,83%)	CR(terre)=6467(23,99%)

TABLE 4.6 – Tableau de contingence représentant les résultats du IASI pour la situation de la nuit (du 21 au 28 Novembre 2014)

4.3.1 Efficacité de détection

	Jour		Nuit	
	Mer	Terre	Mer	Terre
BIAIS	55.85%	45.91%	61.50%	52.17%
PC	63.60%	55.29%	67.08%	62.22%
POD	54.03%	45.67%	58.96%	50.93%
POD'	94.18%	98.89%	92.16%	96.26%
FAR	3.25%	0.52%	4.13%	2.37%
NDR	45.97%	54.33%	41.04%	49.07%

TABLE 4.7 – Scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 pour les situations de jour(mer/terre) et de nuit (mer/terre).

Le tableau 4.7 nous permet de déduire plusieurs constats : • L'algorithme CO_2 -Slicing prévoit moins des nuages que ce qui est réellement observé par SEVIRI avec un BIAIS inférieur à 100% dans toutes les situations, mais ce dernier est un peu plus élevé la nuit par rapport au jour et sur mer que sur terre.

- Le taux de bonne détection des pixels nuageux (POD) est compris entre 54,03% sur mer et 45.67% sur terre pendant le jour et entre 58.96% sur mer et 50.93% sur terre la nuit. L'algorithme détecte mieux les nuages sur mer que sur terre. Ces taux sont inférieurs au taux de bonne détection des pixels clairs (POD') (compris entre 94,18 sur mer et 92.16% sur terre durant le jour et entre 98.89% sur mer et 96.26% sur terre la nuit). L'algorithme détecte plus de cas clairs sur terre que sur mer.

- Le pourcentage de fausses alertes (FAR) est généralement plus élevé de nuit que de jour, mais dans les deux situations, l'algorithme met un pourcentage plus élevé sur mer que sur terre.

- Le taux de non-détection des pixels nuageux (NDR) est compris entre 45.97% sur mer et 41.04% sur terre le jour et entre 54.33% sur mer et 49.07% sur terre la nuit.

- La conclusion est identique à celle obtenue avec ARPEGE : l'algorithme est ainsi plus performant la nuit que le jour et sur mer que sur terre pour la plupart des paramètres étudiés, avec une exception pour le POD' qui présente de meilleurs résultats sur terre que sur mer.

4.3.2 Précision de la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing

La concordance dans l'estimation du sommet du nuage par IASI et par SEVIRI sur mer, est exprimée avec un indice de corrélation de 0.82 pendant le jour et 0.84 pendant la nuit, (corrélation meilleure que ARPEGE).

Le grand nombre de population est concentré dans le point 325 hPa pour IASI et SEVIRI pendant le jour (figure 4.11.a) alors que pendant la nuit cette concentration est de 350 hPa pour IASI et SEVIRI à la fois (figure 4.11.b).

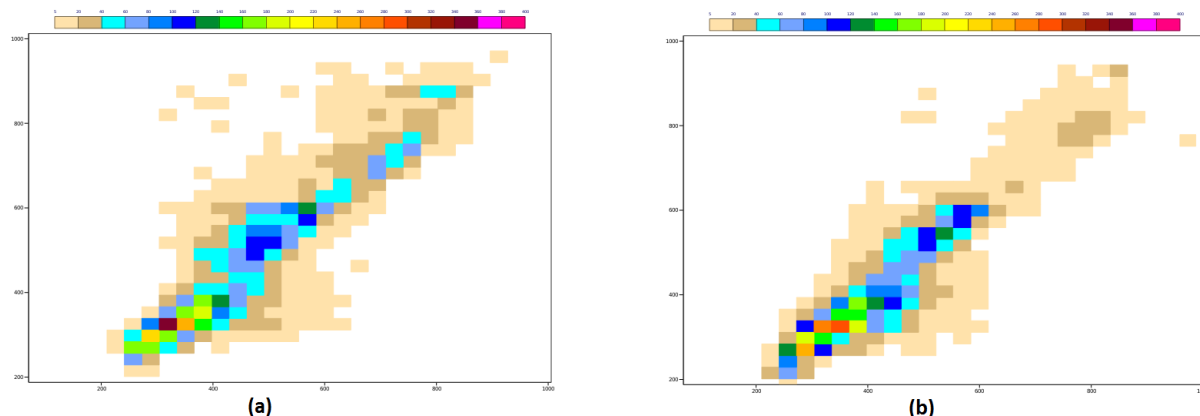


FIGURE 4.11 – Comparaison de la pression de sommet des nuages(PTOP) calculée à partir de IASI (axe X) et SEVIRI (axe Y) sur mer pour les situations de jour (a) et les situations de nuit (b) (validation du 21 au 28 Novembre 2014).

Pour les situations du jour et de nuit nous observons qu'il n'y a pas une grande différence entre eux puisque dans les deux situations de jour et de nuit, nous avons quelques pixels qui sont classés par IASI comme des nuages avec des PTOp de 725 hPa alors que SEVIRI a attribué pour ces même nuages des PTOp de 900 hPa (figure 4.11). Cela est bien défini dans la région de la Méditerranéenne ainsi que dans le nord ouest de l'Atlantique tout en ajoutant la zone du 45-50N et 0-10W de la situation du jour (figure 4.12).

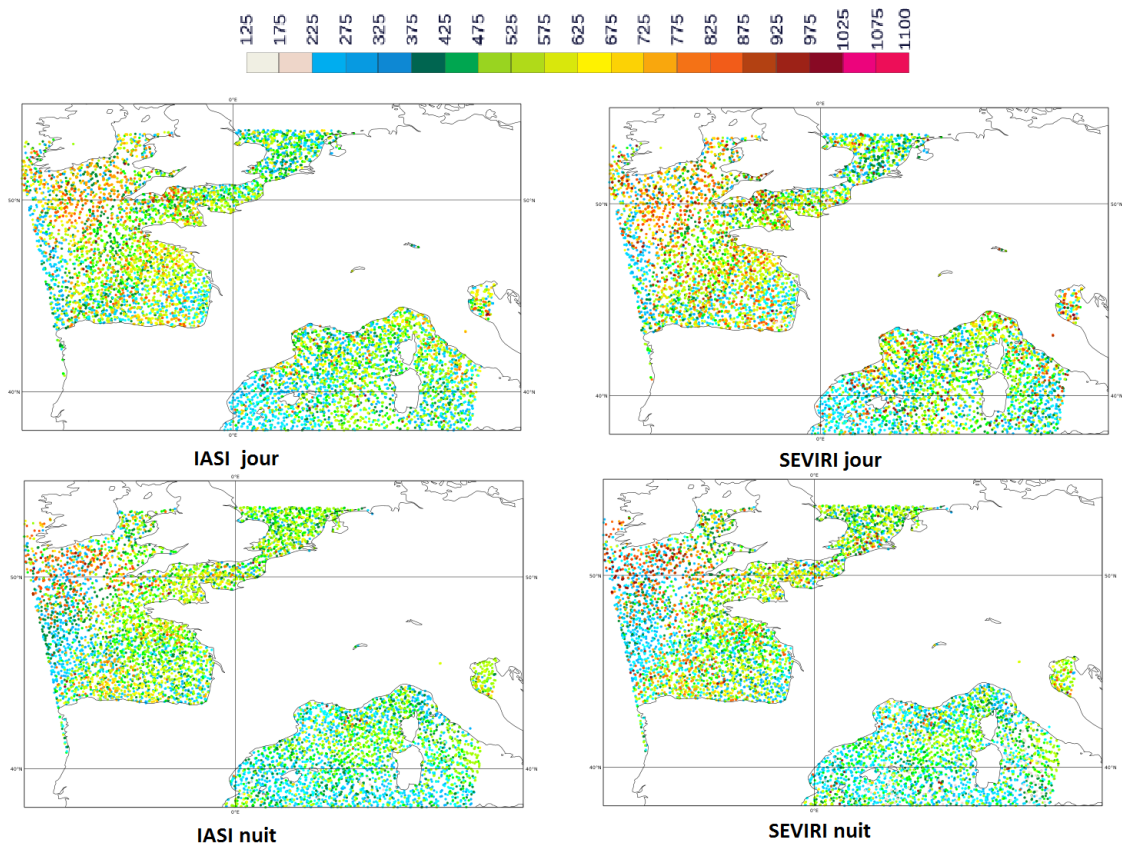


FIGURE 4.12 – Carte de pression de sommet des nuages en hPa sur mer obtenu par IASI et SEVIRI sur mer du 21 au 28 Novembre 2014.

Ces zones de désaccord présentent généralement des nuages bas et très bas et quelques pixels sont contaminés par des nuages fractionnaires.

Sur terre, le résultat obtenu est moins bon que sur mer avec un indice de corrélation plus faible ; 0.74 pendant le jour et 0.78 pendant la nuit (corrélation moins bonne que dans ARPEGE).

Pour les situations de nuit nous avons quelques points où IASI met des nuages un peu plus élevés que SEVIRI qu'il s'agit de zones contaminées par des nuages bas.

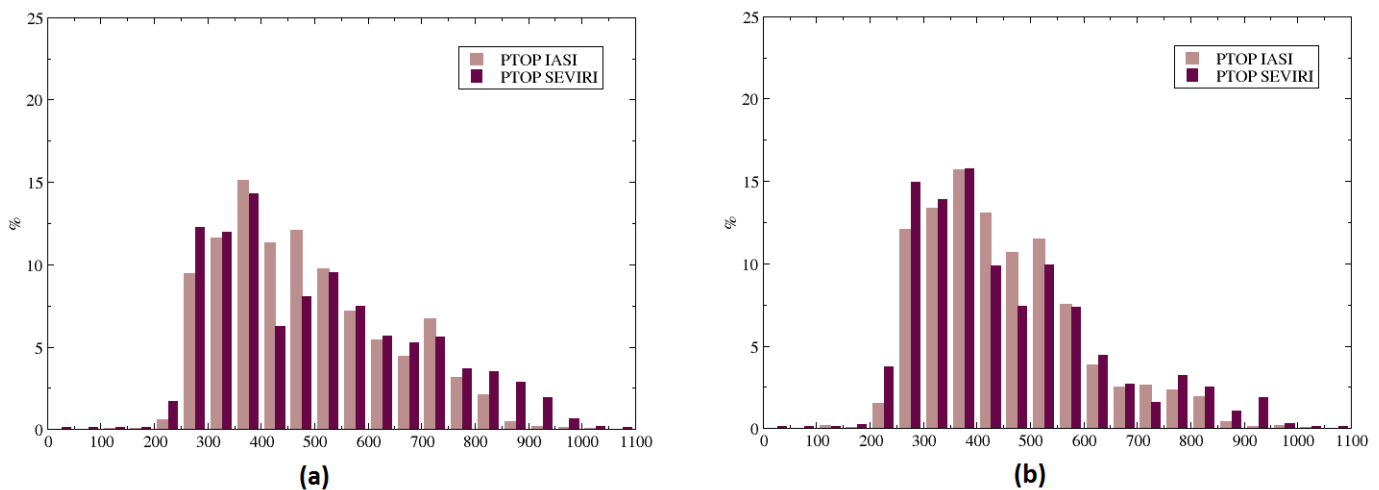


FIGURE 4.13 – Répartition des pression de sommet des nuages (PTOP) en hPa sur mer de jour (a) et de nuit (b), validation du 21 au 28 Novembre 2014.

La figure 4.13 montre que les nuages dont le PTOPI est égal à 375 hPa sont plus nombreux pour les deux instruments IASI et SEVIRI aux alentours de 15% pour IASI et 14% pour SEVIRI

pendant le jour (figure 4.13.a) et de 16% pour la nuit pour IASI et SEVIRI (figure 4.13.b). Les histogrammes présentent une sorte de similarité des PTOPIASI et SEVIRI, puisque la majorité des pixels sont concentrés entre 300 et 600 hPa, avec une absence de nuages très élevés dans les deux situations de jour que de nuit. Pour les nuages très bas, IASI a marqué une absence de ce type de nuages alors que SEVIRI a détecté quelques nuages au delà de 900 hPa dans les deux situations jour/nuit.

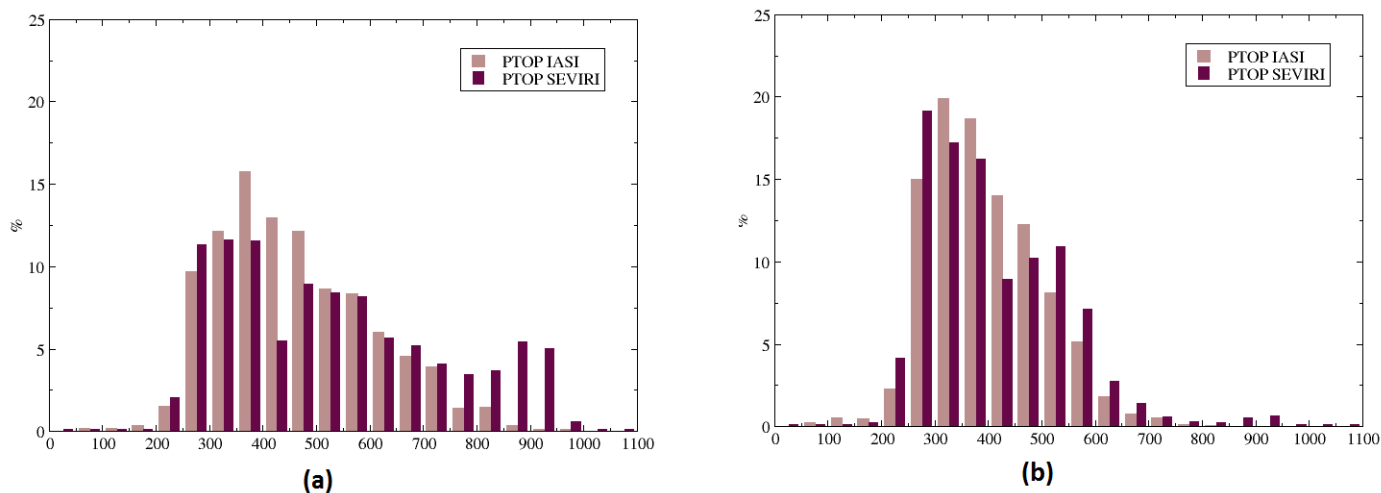


FIGURE 4.14 – Répartition des pressions de sommet des nuages(PTOP)en hPa sur terre de jour (a) et de nuit (b) pour la période de validation du 21 au 28 Novembre 2014.

Sur terre la situation de jour (figure 4.14.a), IASI présente un pourcentage plus élevé (16%) de PTOPIASI à 375hPa, il trouve moins de nuages bas et aucun nuage très bas alors que SEVIRI présente presque un pourcentage de 11% pour les PTOPIASI compris entre 275 et 375 hPa.

De nuit (figure 4.14.b) IASI présente un excès des nuages dont le PTOPIASI égal à 325 hPa (20 %), par contre SEVIRI dispose de plus grand pourcentage pour les PTOPIASI égal à 325 hPa (19%) Nous remarquons ainsi que les nuages bas sont absents dans la détection des deux instruments IASI et SEVIRI. Par contre IASI présente quelques nuages tres élevées qui sont absents au niveau de SEVIRI.

Pour bien compléter notre comparaison nous avons vérifié la répartition de Ne d'IASI. Sur mer nous avons plus de 25% des pixels ont des Ne qui valent 0.9 le jour et 30% la nuit, alors que sur terre de jour et de nuit nous avons 20% des pixels qui ont des Ne égales à 0.9 et 17% des Ne égales à 0.8.

Pour les cas nuageux de IASI nsur mer de jour et de nuit nous avons 50% des pixels sont déclarés totalement recouverts par des nuages par la couverture nuageuse AVHRR, alors que sur terre 60% sont déclaré nuageux par AVHRR pendant le jour et 50% durant la nuit.

Le calcul de biais et de l'écart-type des PTOPIASI et SEVIRI a abouti au résultat suivant :

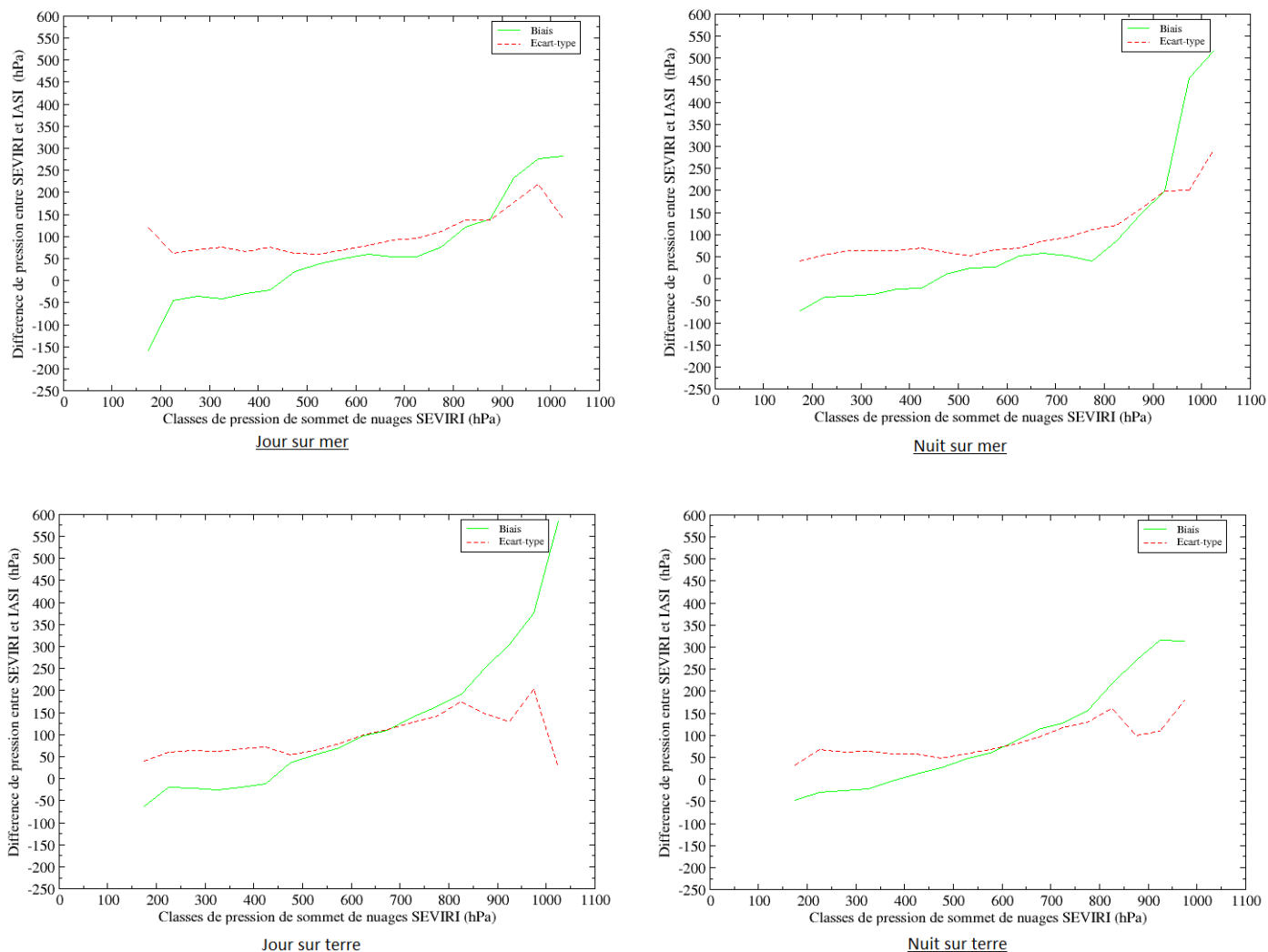


FIGURE 4.15 – Biais et écart type de P_{TOP} s différences moyennes entre P_{TOP} IASI et SEVIRI sur la période du 21 au 28 Novembre 2014

Nous remarquons qu'il n'y a pas de biais pour les valeurs de P_{TOP} inférieure à 170 hPa, ce qui montre que dans AROME la détection des nuages très élevés est limitée.

Pour les situations de jour et de nuit sur mer (figure 4.15) nous remarquons que le biais est négatif lorsque le P_{TOP} est entre 170 et 450 hPa, c'est à dire que IASI met des nuages moins élevés que SEVIRI. D'autre part le biais moyen se situe entre 0 et 50 hPa dans la gamme des P_{TOP} entre 450 et 750 hPa, alors qu'au delà de 750 hPa nous remarquons une augmentation du biais ce qui illustre que IASI met des nuages plus hauts que SEVIRI dans cette situation.

Sur terre nous retrouvons les mêmes résultats que sur mer, mais cette fois durant le jour nous avons une grande valeur de biais (jusqu'à 600 hPa pour les nuages très bas).

L'écart-type des différences présente des valeurs plus faibles sur terre que sur mer, mais toujours supérieures à 50 hPa.

Après l'évaluation des cas nuageux nous allons nous intéresser aux cas où IASI est clair.

cas des pixels avec une fraction nuageuse égale à 0

Comme dans ARPEGE nous avons étudié les cas clairs d'IASI dont le Ne=0, en se basant sur les histogrammes de répartition de P_{TOP} de SEVIRI, nous observons que le pourcentage

le plus élevés du jour sur mer dans la détection de SEVIRI est celui des nuages élevés, dont le P_{TOP} égale 350 hPa (7.5%) alors que la nuit ce pourcentage a été attribué au nuages dont le P_{TOP} égale 375 hPa.(figure 4.16.a)

La classification de SEVIRI indique que pour la nuit ce sont des des pixels clairs sur mer (26%),des nuages bas (18.5%) des nuages semi-transparents (15%)et des nuages fractionnés (20%). On restitue le jour le même type de nuages.

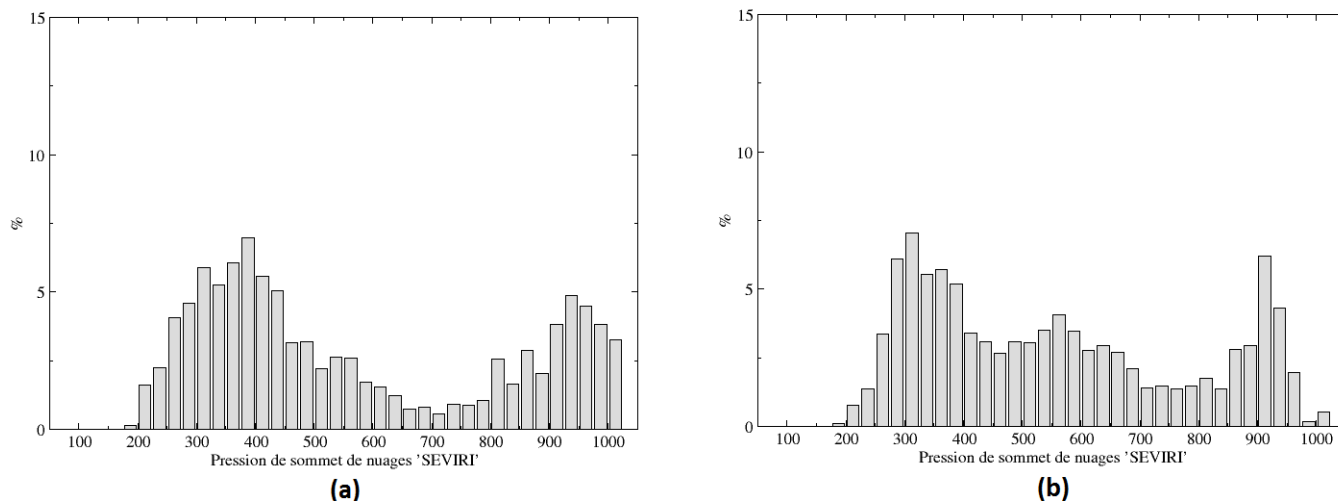


FIGURE 4.16 – Répartition des pression de sommet des nuages(P_{TOP})en hPa de nuit sur mer (a) et sur terre (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014.

Sur terre de nuit (figure 4.16.b) SEVIRI détecte plus des nuages élevés égal à 275 hPa (7%), ainsi que des nuages très bas dont le P_{TOP} égale 925 hPa. La classification de SEVIRI montre qu'il s'agit de 35% des pixels clairs sur terre, 20% des nuages tres bas et semi-transparents. De jour SEVIRI détecte aussi des nuages avec des P_{TOP} égal à 275 hPa (7%), de type nuages très bas et semi transparents (figure non présentée).

La couverture nuageuse AVHRR indique sur mer 54% des pixels clairs le jour et 44% durant la nuit, alors que sur terre nous avons 51% des pixels clairs le jour et 48% pendant la nuit.

La couverture AVHRR confirme que presque la moitié des cas est clair, alors que le reste des pixels sont contaminés principalement par des nuages bas, très bas et fractionnés ce qui reste toujours difficile à détecter pour IASI.

Cas des pixels avec une fraction nuageuse égale à 1

La comparaison des populations présentant une Ne=1 nous donne des résultats très différents de ceux obtenus dans ARPEGE, commençant par l'indice de corrélation, qui vaut 0.97 le jour sur mer et 0.96 la nuit alors que sur terre est 0.95 le jour et 0.93 la nuit. Ces indices nous permettent de dire que les données sont en corrélation entre elles.

Pour la situation de jour sur mer nous remarquons que IASI et SEVIRI marquent des pourcentages plus élevés (31% pour IASI et 21% pour SEVIRI) pour les nuages bas (dont le P_{TOP} égale 725hPa) (figure 4.17.a). Durant la nuit le pic (22% pour IASI et 23% pour SEVIRI)

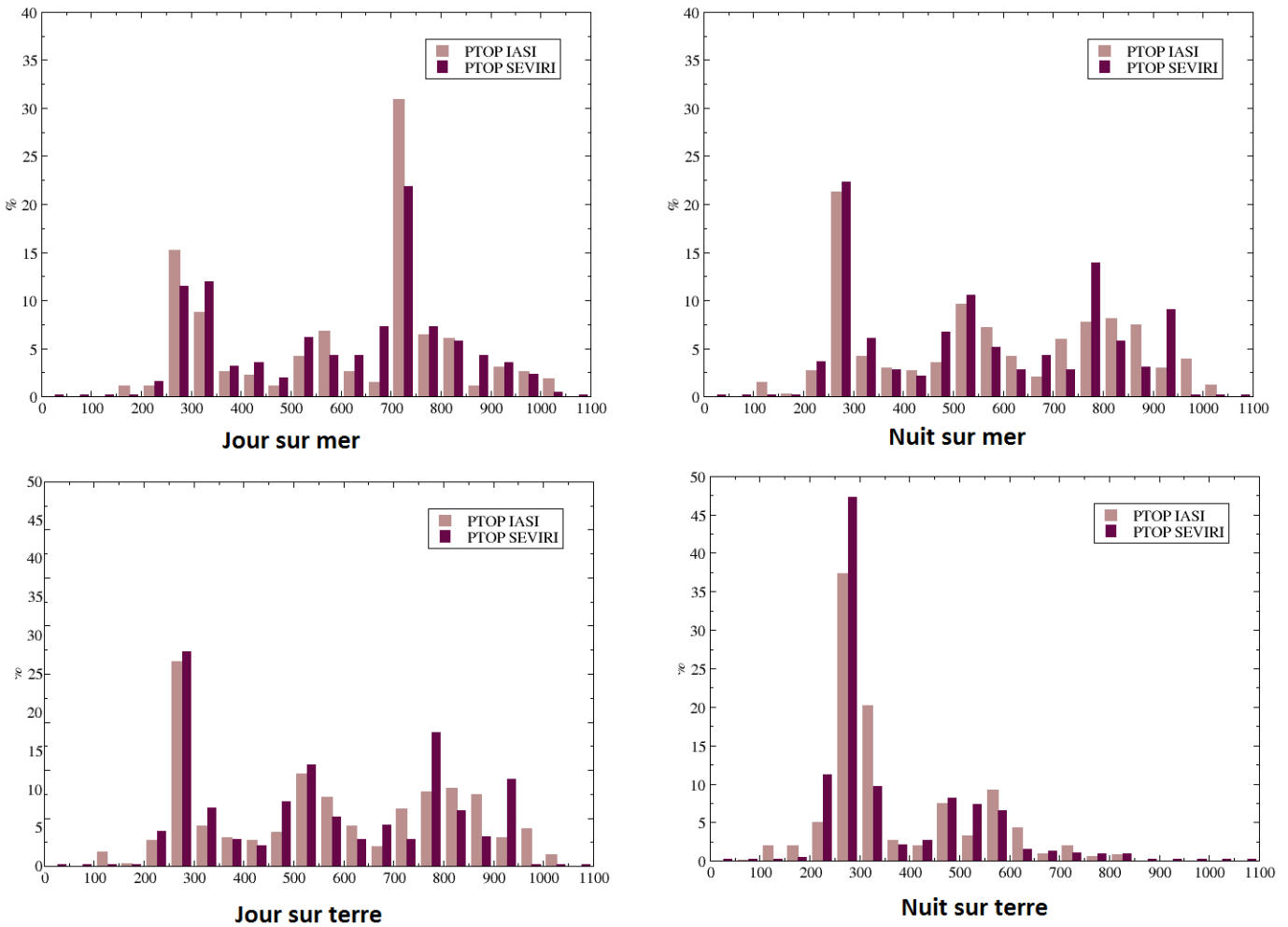


FIGURE 4.17 – Répartition de sommet des nuages (PTOP) d’IASI et SEVIRI du 21 au 28 Novembre 2014.

a été décalé vers les nuages élevés (dont le PTOPI égal à 275 hPa figure 4.17.b).

La classification de SEVIRI montre que la majorité des pixels sur mer de jour et de nuit sont des pixels clairs sur mer ou contaminés par des nuages bas, des nuages fractionnés et des nuages semi transparents.

Pour la situation de jour sur terre (figure 4.17.c) nous remarquons que les deux instruments arrivent à détecter plus de nuages élevés (dont le PTOPI égale à 275 hPa) car IASI a marqué un pourcentage de 18% et SEVIRI 17%. Pendant la nuit, l’histogramme présente un résultat très important puisque les deux instruments détectent plus de nuages élevés avec un PTOPI de 275 hPa (37% par IASI et 46% par SEVIRI). Ainsi nous avons de nuit, une absence des nuages bas et très bas pour IASI ainsi que SEVIRI (figure 4.17.d). Le type de nuages qui caractérise les pixels sur terre de jour et de nuit sont des pixels clairs sur terre, des nuages très bas et des nuages semi transparents.

A l’instar de ce que nous avons cité précédemment l’assimilation des radiances nuageuses d’IASI dans le modèle de prévision numérique utilise des données dont le $Ne=1$ et le $PTOP$ $650 \text{ hPa} < PTOPI < 900 \text{ hPa}$, de ce fait nous avons étudié ce cas ainsi dans le modèle AROME.

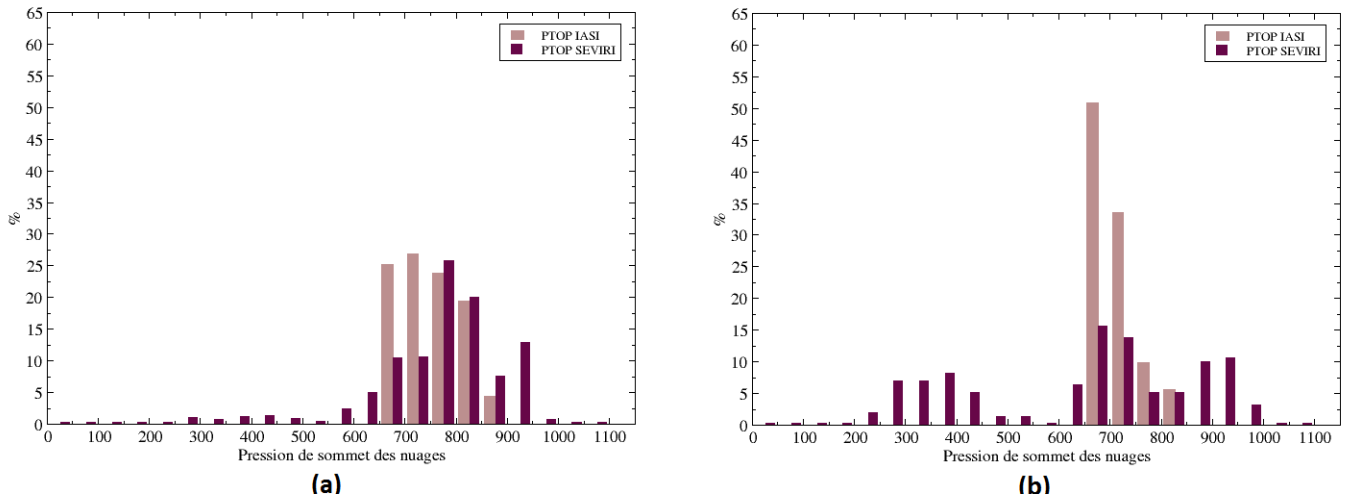


FIGURE 4.18 – Répartition de sommet des nuages (PTOP) d’IASI et SEVIRI de nuit sur mer (a) et sur terre (b) (validation du 21 au 28 Novembre 2014).

SEVIRI détecte ainsi plus de nuages entre 650 et 900 hPa, la nuit sur mer IASI met beaucoup des nuages avec un PTOp de 675 hPa (40% pour IASI et 10% pour SEVIRI) (figure 4.18.a), durant le jour nous avons la même remarque, mais le pourcentage de détection a été diminué pour IASI vers 25%. Nous remarquons aussi que SEVIRI met quelques nuages beaucoup plus bas que IASI, vers 925 hPa.

La classification des nuages de SEVIRI indique que ces pixels correspondent à des nuages bas (40% le jour et 57% la nuit) et des nuages très bas (53% le jour et 43% la nuit).

Sur terre le jour nous observons que IASI met toujours plus des nuages dont le PTOp égal à 675 hPa (40%) alors que SEVIRI met des nuages plus bas (PTOP égale à 900 hPa (20%)). Durant la nuit (figure 4.18.b) le pourcentage des nuages des PTOp égal à 675 hPa continue d’augmenter pour IASI (50%) alors que SEVIRI détecte aussi des nuages élevés jusqu’à 225 hPa.

La classification de SEVIRI nous a montré que pendant le jour nous avons plus des nuages très bas et des nuages bas alors que la nuit les pixels sont contaminés par des nuages très bas et des nuages semi transparents. L’évaluation de la détection nuageuse de l’algorithme CO_2 -Slicing dans AROME a permis de dégager plusieurs informations. À partir des tables de contingence et le calcul des paramètres, ainsi que la répartition des PTOp, le CO_2 -Slicing détecte plus des pixels nuageux que dans ARPEGE, mais dans ce dernier l’algorithme arrive à détecter plus des pixels clair. Le calcul du biais et l’écart-type nous a montré que AROME n’est pas capable de bien restituer les nuages très élevés, par contre on trouve des nuages bas qui sont bien représenté par rapport à ARPEGE.

Nous avons ainsi relevé que les nuages dont le PTOp entre 450 et 700 hPa leurs biais et écart type qui sont faibles par rapport aux autres classes de pression, idem pour AROME nous avons pensé aux critères de l’assimilation ($Ne=1$ et $650 < PTOp < 900$ hPa), nous avons évalué la capacité de la détection des différentes gammes de pression mais les bons scores sont atteints par le PTOp entre 550 et 650 hPa, puisque le taux de la détection des pixels nuageux ‘POD’ est de 100 % le jour et la nuit sur mer, st sur terre 99,24 % le jour et 99,30 % la nuit. et le PTOp entre 650 et 800 hPa, avec un POD de 100% sur mer de jour et de nuit, et 99,06 % de

jour et 96,20 % de nuit sur terre. pour le taux de fausse alarme présente de meilleurs résultats sur terre que sur mer.

4.3.3 Comparaison des détections nuageuses AROME/ARPEGE sur le domaine AROME

Après avoir évalué la détection d'IASI par rapport à SEVIRI dans le modèle ARPEGE et dans AROME, nous avons fait la comparaison de la détection nuageuse d'IASI pour les pixels communs à ARPEGE et à AROME. Cette dernière nous permettra d'extraire les différences qui pourraient affecter l'assimilation des données en fonction du modèle de prévision.

Pour ce faire nous avons commencé par la colocalisation des observations d'IASI dans AROME et dans ARPEGE avant de réaliser nos calculs.

Sur mer on a trouvé un coefficient de corrélation de 0.98 le jour et la nuit, alors que sur terre le coefficient a baissé jusqu'au 0.94 le jour et 0.93 la nuit. On a procédé de la même manière en effectuant un test de comparaison de biais et de l'écart type pour toutes les situations.

D'après la figure 4.19 le biais est plus proche à 0 entre 250 hPa et 700 hPa le jour et entre 250 et 600 la nuit, au-delà de 900 hPa nous le biais est tres important, ce qui signifie qu'ARPEGE mis des nuages plus élevés qu'AROME

En ce qui concerne la dispersion des données pendant le jour l'écart-type est généralement faible mais il s'élève dans la classe de pression entre 800 et 1000 hPa (entre 50 et 250 hPa), pendant la nuit l'écart-type est toujours élevé entre 800 hPa et 1000 hPa et pour les nuages élevés dont le P_{TOP} inférieur à 150 hPa (50 hPa).

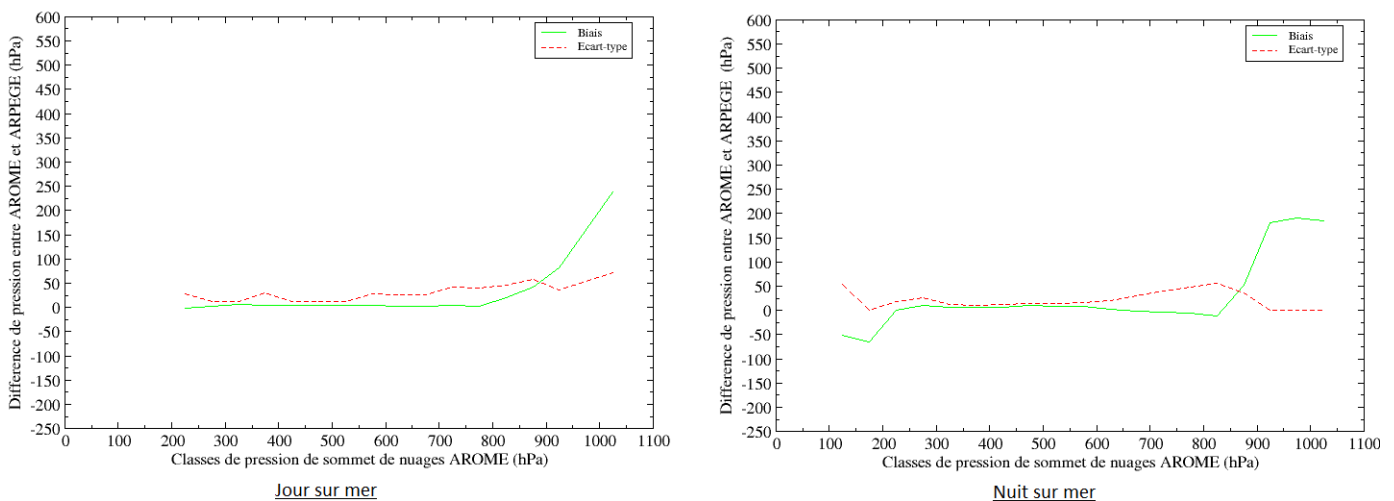


FIGURE 4.19 – Biais et ecart type de P_{TOP} des différences moyennes entre P_{TOP} IASI et SEVIRI sur mer de la période du 21 au 28 Novembre 2014

Sur terre (figure 4.20) le biais est toujours négatif pour les nuages élevés (-100 hPa) le jour, les nuages bas aussi ont un biais tres élevé, l'écart-type est important (plus de 50 hPa) pour les nuages dont le P_{TOP} est inférieur à 150 hPa et les nuages entre 600 hPa et 900 hPa. De nuit ARPEGE met plus des nuages dont le P_{TOP} égale à 825 hPa plus que AROME ce qui est illustré par un biais jusqu'au 100 hPa pour ce type de nuage, l'écart-type aussi ne présente

pas une stabilité en terme des valeurs puisqu'il varie entre 50 et 150 hPa pour les classes entre 200 et 400 hPa d'une part et entre 700 et 800 hPa d'autre part.

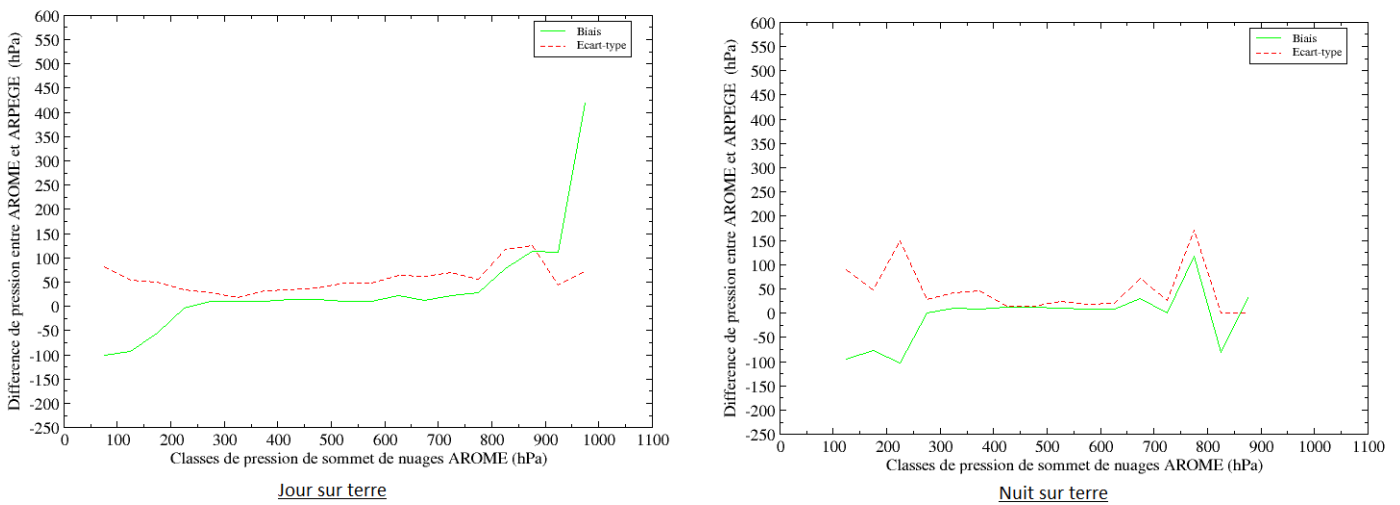


FIGURE 4.20 – Biais et écart type de PTOPTOP des différences moyennes entre PTOPTOP IASI et SEVIRI sur terre de la période du 21 au 28 Novembre 2014

Ce qu'on peut tirer de cette comparaison, d'une part la caractérisation nuageuse d'IASI est fortement corrélée entre ARPEGE et AROME sur mer plus que sur terre. D'autre part IASI dans AROME arrive à détecter plus des nuages bas voire très bas par rapport à ARPEGE alors que dans ce dernier IASI met des nuages plus élevés entre 200 et 300 hPa que dans AROME. Ce constat pourrait être expliqué par la bonne résolution verticale de AROME dans les basses couches (niveau inférieur à 1.5 km). Cette dernière nous permettra d'avoir la température de brillance qui nous servira par la suite à l'entrée de l'algorithme de CO_2 -Slicing, au contraire nous avons ARPEGE qui a une bonne résolution verticale dans les couches élevées au niveau de la tropopause.

4.4 Comparaison de la détection nuageuse de IASI MetopA et MetopB dans la semaine du 21 au 28 Novembre 2014 dans ARPEGE

Même si le capteur IASI est en théorie identique sur les deux Metop A et B, dans cette étape on cherche à vérifier que la détection nuageuse de IASI MetopA et MetopB sont identiques malgré leur déphasage de 50 minutes.

Pour vérification nous avons évalué l'efficacité de détection de MetopA et MetopB.

Les scores de vérification de MetopA et MetopB, généralement sont proches pour la majorité des paramètres étudiés mais nous avons quelques différences à signaler :

- le résultat de BIAS nous permet de déduire que l'algorithme CO_2 -Slicing dans MetopA prévoit plus des nuages que MetopB sur mer par 1.52% et sur terre par 1.32%.
- Le taux de bonne détection des pixels nuageux POD présente aussi un meilleur résultat dans MetopA (66% sur mer et 54.63% sur terre) par rapport au MetopB (64.58% sur mer et

	mer		terre	
	MetopA	MetopB	MetopA	MetopB
BIAIS	69.29%	67.77%	57.82%	56.50%
PC	74.54%	73.46%	76.64%	72.60%
POD	66%	64.58%	54.63%	52.41%
POD'	92.92%	92.98%	96.51%	95.38%
FAR	4.47%	4.70%	5.51%	7.24%
NDR	34%	35.42%	45.37%	47.59%

TABLE 4.8 – Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 21 au 28 Novembre 2014 sur mer (MetopA/MetopB) et sur terre (MetopA/MetopB).

52.41% sur terre), alors que l'algorithme CO_2 -Slicing dans MetopB détecte un taux un peu élevé des pixels clairs sur mer POD' (92.98%) que dans MetopA (92.92%) et inversement sur terre (95.38% pour MetopB et 96.51% pour MetopA)

- Les pourcentages de fausses alertes FAR et de non-détection des pixels nuageux sont plus élevés dans MetopB par rapport au MetopA dans toutes les situations ce qui montre que ce dernier est moins bon dans la détection nuageuse. La précision de la caractérisation des nuages issu des deux Metop A et B a été ensuite évalué par des histogrammes de différence des pressions de sommet des nuages issues de MetopA et MetopB.

Sur mer (figure 4.21.a) nous observons une bonne corcordance entre MetopA et MetopB malgré une légère différence dans les nuages élevés (PTOP entre 250 et 300 hPa) puisque MetopB détecte environ 1% de plus, et dans les nuages bas (PTOP entre 800 et 900 hPa) MetopA détecte 0.5% de plus des nuages que MetopB.

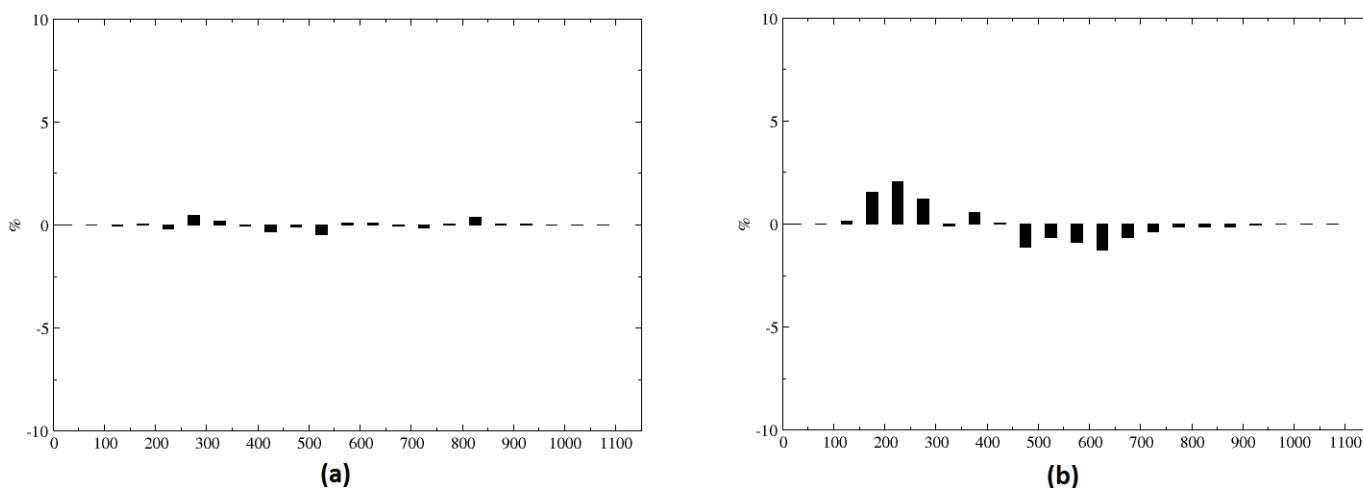


FIGURE 4.21 – Histogrammes de différence des (PTOP) d'IASI MetopA et MetopB sur mer (a) et sur terre (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014.

Sur terre (figure 4.21.b) le degré de différence est accentué, MetopA détecte plus des nuages élevés (PTOP entre 100 et 400 hPa), entre 0.5 et 2% que MetopB, alors que plus des nuages moyens et bas (PTOP entre 450 et 800 hPa) sont détecté par MetopA (entre 1 et 2%) que par MetopB.

Ces différences que nous avons relevées nous ont amenés à effectuer une comparaison des Metop

en fonction du jour et de nuit pour tenter de comprendre.

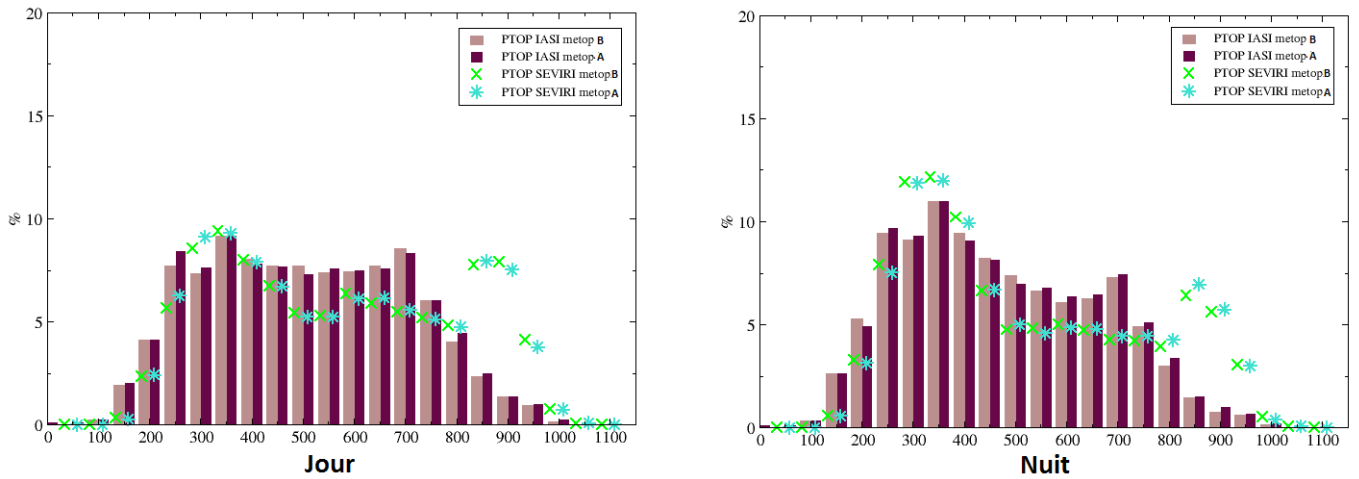


FIGURE 4.22 – Répartition des PTOPI d'IASI (MetopA/MetopB) et SEVIRI sur mer pour les situations du jour (a) et de nuit (b).(validation du 21 au 28 Novembre 2014).

Généralement, nous trouvons un bon accord entre les deux Metop A et B. Toutefois pour la situation du jour (figure 4.22.a) MetopA a mis plus des nuages élevés (PTOP entre 250 et 300 hPa) et des nuages bas (PTOP entre 800 et 1000 hPa) que MetopB. Ce dernier détecte quelques fois plus de nuages moyens que MetopA. De nuit (figure 4.22.b) nous avons remarqué que MetopA détecte toujours plus des nuages par rapport au MetopB, hormis dans le cas des PTOPI égales à 200, 400 et 500 hPa. Dans les cas (jour et nuit) MetopA et MetopB mettent plus de nuages moyens et élevés que SEVIRI alors que ce dernier détecte plus des nuages bas.

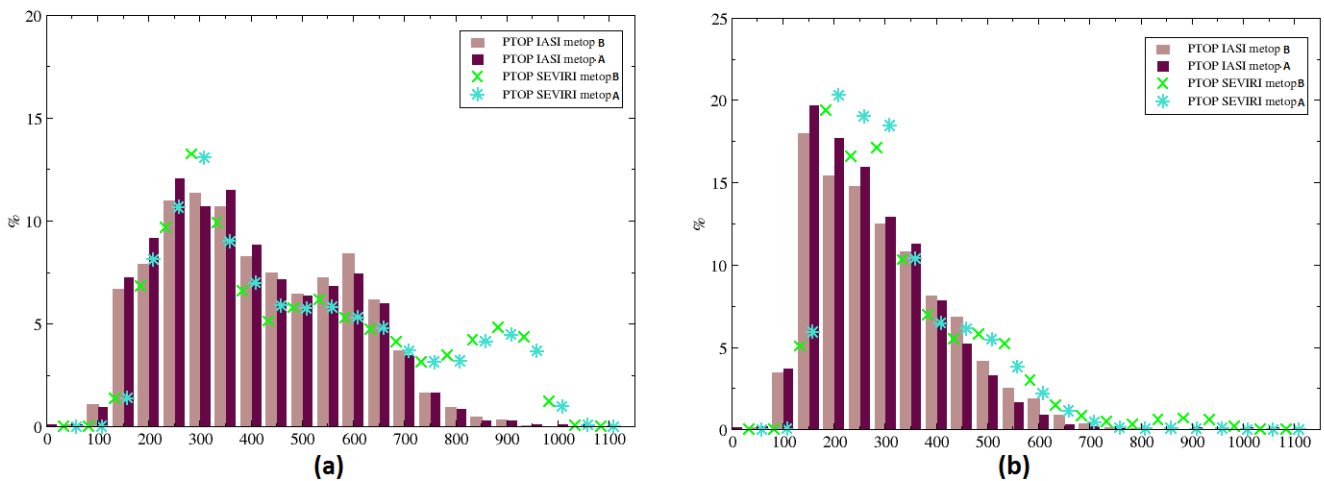


FIGURE 4.23 – Répartition des PTOPI d'IASI (MetopA/MetopB) et SEVIRI sur terre pour les situations du jour (a) et de nuit (b).validation du 21 au 28 Novembre 2014.

Le jour sur terre (figure 4.23.a) MetopA détecte plus de nuages élevés (PTOP entre 150 et 400 hPa) alors que plus de nuages bas (PTOP entre 450 et 850 hPa) sont plus détectés par MetopB que MetopA. La situation de nuit (figure 4.23.b) est plus proche de celle de jour. MetopB détecte aussi plus de nuages de 500 hPa que MetopA. La donnée de validation SEVIRI présente une adéquation avec IASI selon chaque Metop mais ces derniers détectent toujours plus des nuages élevé et moyens que SEVIRI. Cependant SEVIRI présente des nuages bas (750 - 1000 hPa).

De nuit nous remarquons que SEVIRI a mis plus des nuages élevés dont le P_{TOP} entre 200 et 300 hPa et très peu des nuages bas. Dans AROME nous avons réalisé les mêmes histogrammes et dans toutes les situations sur mer et sur terre nous avons remarqué que MetopA détecte toujours plus des nuages bas par rapport au MetopB même ce dernier a pu détecter plus des nuages élevés sur mer.

Malgré la petite différence entre les deux MetopA et MetopB nous ne pouvons pas négliger que la différence est plus accentuée sur terre que sur mer. Ainsi MetopA détecte plus des nuages bas, alors que MetopB détecte plus des nuages moyens. Pour les nuages élevés on n'a pas pu identifier une différence puisque dans chaque cas (mer/terre) nous trouvons un Metop qui met plus des nuages que l'autre.

Le MetopB est moins bon dans la détection nuageuse, mais il est meilleur dans la détection des pixels clairs (POD'). Cette différence pourrait être expliquée par le décalage temporel et spatial qui existent entre les deux Metop A et B. Ce déphasage peut augmenter ou diminuer la chance d'un Metop de détecter un phénomène météorologique qui progresse avec le temps, on peut parler ici de cycle diurne des nuages convectifs, nous pouvons aussi attribuer cette différence à l'utilisation des méthodes de correction de biais différentes, en effet cette dernière a pour but d'utiliser des observations non biaisées dans l'assimilation.

4.5 Evaluation de la qualité de la détection nuageuse à une autre saison

Dans cette approche nous avons utilisé une autre période de données afin d'examiner la capacité de la détection de l'algorithme *CO*₂-Slicing dans différentes saisons. Nous avons choisi une période de plein hiver, du 01 au 08 Février 2015.

4.5.1 Résultats dans ARPEGE

Evaluation de la détection nuageuse

Dans un premier temps on souhaite montrer l'efficacité de détection nuageuse dans le modèle ARPEGE qui a été faite à la base des tables de contingence.

Le tableau 4.9 illustre les constats suivants :

- Le taux de détection des pixels nuageux POD est plus élevé le jour que la nuit sur mer et inversement sur terre mais la différence entre le jour et la nuit du POD est plus grande sur mer (11.13%) que sur terre (1.31%).
- Le taux de détection des pixels clairs POD' est plus élevé le jour (95.78% sur mer et 98.02% sur terre) que la nuit (92.18% sur mer et 93.75% sur terre), nous remarquons aussi que le POD' est largement supérieur au POD dans toutes les situations.
- Le taux de non-détection des pixels nuageux (NDR) et le pourcentage de fausse alarme FAR présentent de meilleurs résultats le jour que la nuit et sur mer que sur terre, avec une exception

	Jour		Nuit	
	Mer	Terre	Mer	Terre
BIAIS	74.46%	63.21%	68.58%	72.16%
PC	80.08%	79.48%	73.88%	79.81%
POD	72.40%	61.27%	64.64%	65.95%
POD'	95.78%	98.02%	92.18%	93.75%
FAR	2.77%	3.07%	5.74%	8.60%
NDR	27.60%	38.73%	35.36%	34.05%

TABLE 4.9 – Résultats des scores de vérification obtenus pour le CO_2 -Slicing sur les données d'IASI du 01 au 08 Février 2015 pour les situations de jour (mer/terre) et de nuit (mer/terre).

pour le NDR qui est plus grand le jour que la nuit sur terre.

- Dans toutes les situations l'algorithme prévoit moins de nuages que la réalité (BIAIS inférieur à 100%).

Les résultat de cette période nous donnent des paramètres améliorés par rapport à la période de Novembre. Le seul taux qui est moins bon est le taux de non détection des pixels (NDR) mais la situation de nuit sur Terre est encore meilleure que la période de Novembre.

Les résultats trouvés dans ARPEGE sont similaires à ce qu'on a relevé dans AROME puisque les scores de vérification sont toujours meilleurs le jour que la nuit et sur mer plus que sur terre. Mais en comparant le résultat dans AROME de cette période avec la période de Novembre nous remarquons que le taux de fausse alarme FAR, le taux de non détection des pixels NDR et la détection des pixels clairs POD' sont moins bons dans cette période alors que le taux de détection des pixels nuageux POD, le BIAIS sont meilleurs dans la période de Février (voir tableaux 4.4).

Après avoir évalué l'efficacité de détection nuageuse nous sommes passés à la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing dans ARPEGE.

Précision de la caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing

Dans les cas nuageux d'IASI ($Ne > 0$) l'estimation de la pression de sommet des nuages présente un meilleur accord sur terre (0.85 le jour et 0.86 la nuit) que sur mer (0.82 le jour 0.85 la nuit). Ces coefficients de corrélation sont meilleurs que ceux obtenus dans la période de Novembre.

Nous montrons ici un exemple sur mer pendant le jour (figure 4.24). Un grand nombre de population est concentré dans le point 700 hPa pour IASI et 800 hPa pour SEVIRI pendant le jour (figure 4.24.a). Durant la nuit, la population est concentrée dans le point 300 hPa pour les deux instruments (figure 4.24.b).

Pendant le jour nous remarquons que IASI met des nuages bas (dont le P_{TOP} égale 800 hPa) alors que SEVIRI met à leur place des nuages moyens, ce qui apparait par exemple dans le sud de l'Atlantique (figure 4.25), IASI quant à lui met des nuages plus élevés que SEVIRI dans la zone 20W-10E et 0-30S. Nous avons aussi des zones où SEVIRI met des nuages plus élevés que IASI par exemple vers 20W-20E et 60-70N, cette zone correspond à des nuages fractionnés

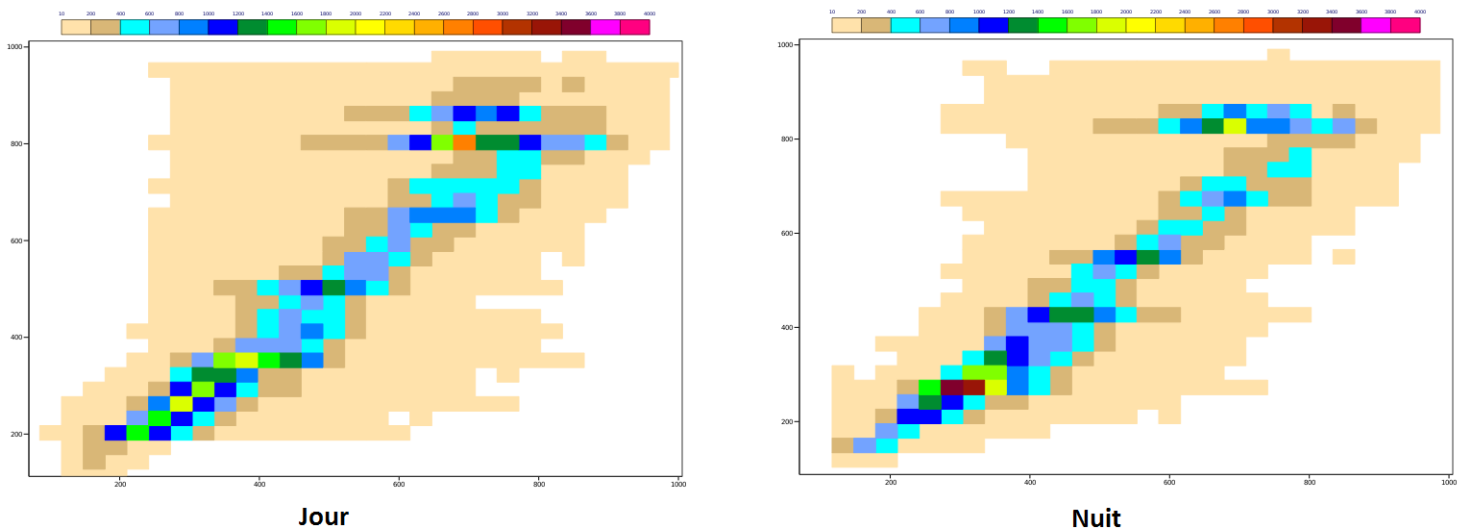


FIGURE 4.24 – Comparaison des PTOPIASI (axe X) et SEVIRI (axe Y) sur mer, pour la période du 01 au 08 Février 2015.

et semi transparents.

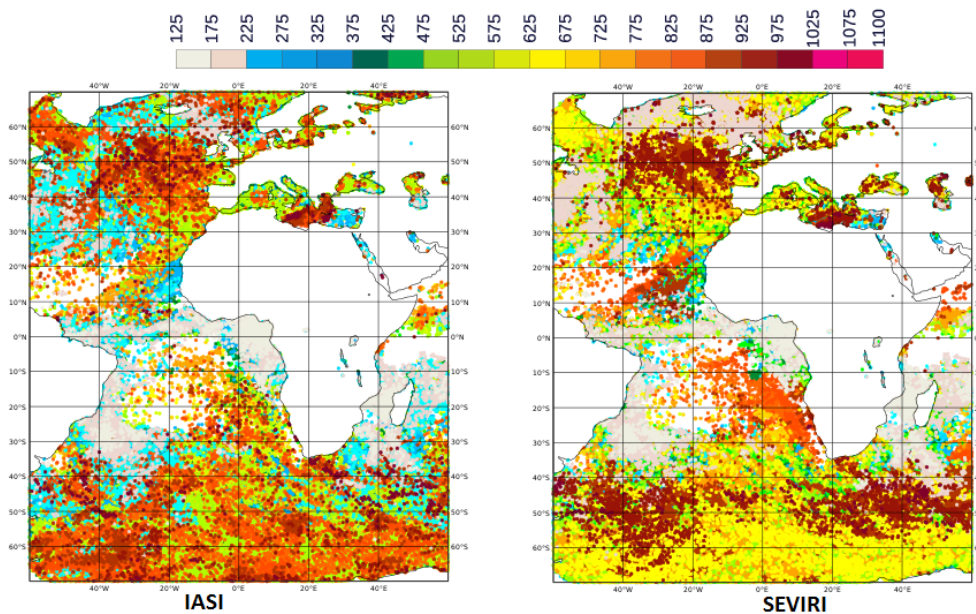


FIGURE 4.25 – Carte de pression de sommet des nuages (PTOP) sur mer le jour de la période du 01 au 08 Février 2015 pour IASI à gauche et SEVIRI à droite.

Durant la nuit IASI a toujours des nuages plus bas que SEVIRI dans le sud de l'Atlantique et des nuages plus élevés que SEVIRI dans plusieurs zones par exemple au centre de l'Atlantique et vers 40E-60E et 0-20S (figure non représentées). En se basant sur la classification de SEVIRI, ces zones de différence correspondent à des nuages fractionnés et des nuage bas.

Sur terre nous avons trouvé que IASI met des nuages plus élevés que SEVIRI dans plusieurs pixels. Ces derniers sont contaminés par des nuages fractionnés et semi-transparentes pour les situations du jour et de nuit. Dans ARPEGE les cartes de pressions de sommet de nuage sont similaires à celles que nous avons trouvées dans la période de Novembre.

4.5.2 Resultats dans AROME

Dans AROME, le coefficient de corrélation présente aussi un meilleur résultat par rapport à la période de Novembre. Sur mer nous avons en effet 0.84 le jour et 0.83 la nuit et sur terre 0.78 le jour et 0.86 la nuit. La corrélation de nuit sur mer est moins bonne que le jour, contrairement à ce qui est relevé dans la période de Novembre.

Les histogrammes de répartition des PTOp sur mer présentent des constats similaires à la période de Novembre. Par exemple, IASI le jour sur mer détecte plus de nuages entre 675 et 725 hPa (10%) alors que SEVIRI a plus de nuages avec des PTOp de 825 hPa (12%).

Sur terre c'est un peu différent de Novembre, puisque IASI de jour détecte plus de nuages dont le PTOp égale 175 hPa que SEVIRI .

Dans AROME, nous avons remarqué que la répartition des PTOp est différente de Novembre. Sur mer le jour (figure 4.26) le plus grand pourcentage de IASI et SEVIRI est trouvé pour les nuages avec un PTOp de 425 hPa.

Durant la nuit (figure 4.26) IASI détecte plus de nuages dont le PTOp égale à 475 hPa alors que SEVIRI détecte plus des nuages avec des PTOp de 425 hPa. IASI détecte aussi des nuages très élevés qui sont absents dans la période de Novembre, et plus des nuages bas, alors que SEVIRI détecte aussi plus de nuages très bas que dans la période du Novembre.

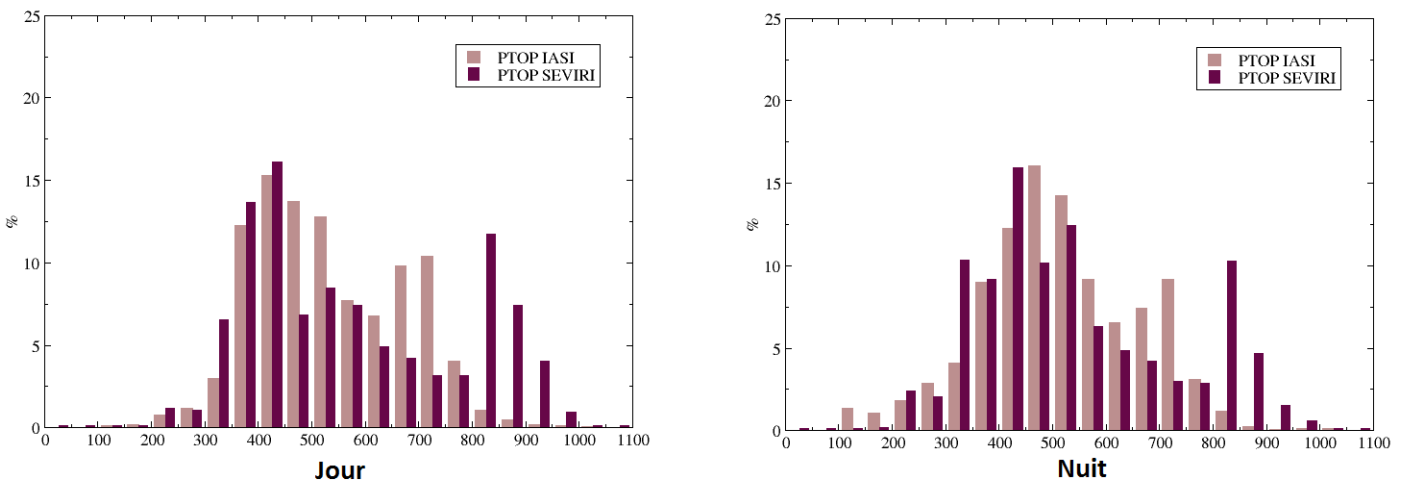


FIGURE 4.26 – Répartition des PTOp IASI et SEVIRI sur mer dans AROME (validation du 01 au 08 Février 2015).

Dans les cas de non détection, nous avons relevé des résultats similaires aux résultats de la période de Novembre. SEVIRI détecte ainsi plus de nuages bas sur mer le jour et la nuit (15%). L'analyse de la classification de SEVIRI montre que la majorité des pixels correspondent à des pixels clair sur mer (34% le jour et 40% la nuit), des nuages bas (20% le jour et 26% la nuit) et des nuages fractionnés (31% le jour et 15% la nuit).

Sur terre SEVIRI détecte aussi plus des nuages élevés pendant la nuit, le résultat de la classification de SEVIRI nous a montré que ce sont des pixels clair sur terre (62% le jour et 68% la nuit). Nous avons des nuages bas et fractionnés (9%) le jour alors que la nuit nous avons plus des nuages bas (9%) ce qui nous confirme que ces types de nuages où IASI met des fractions nuageuses égale à 0.

Dans les cas de fractions nuageuses égales à 1, le coefficient de corrélation est meilleur que celui obtenu pour la semaine de Novembre, (sur mer 0.81 le jour et 0.84 la nuit) et (sur terre (0.93 le jour et la nuit)).

Dans les situations de jour sur mer, nous remarquons encore que les deux instruments détectent plus des nuages moyens et bas, ainsi IASI et SEVIRI détectent plus des nuages avec les P_{TOP} 725 hPa pour IASI (43%) et 825hPa pour SEVIRI(37%) (P_{TOP} les plus détectés dans la semaine du novembre). De nuit, IASI détecte toujours des nuages bas à 725 hPa, alors que SEVIRI arrive à détecter des nuages élevés à 325 hPa (37%). Sur terre pendant le jour IASI et SEVIRI arrivent à détecter plus de nuages élevés et durant la nuit ils ont marqué un pourcentage très élevé pour les nuages avec un P_{TOP} égale à 325 hPa (30% pour IASI et 53% pour SEVIRI). De ce fait la répartition des pressions de sommet des nuages dans AROME est similaire aux résultats de la période de Novembre.

En conclusion, dans cette partie, nous avons montré que les paramètres nuageux retrouvés par IASI et SEVIRI sont plus corrélés que pour la semaine de Novembre, à partir des paramètres calculés (tableau 4.9). Nous avons trouvé que la semaine de Février présente des meilleurs taux que la semaine du Novembre, puisque la majorité des scores sont améliorés. Cependant la répartition des P_{TOP} est similaire à la période de Novembre en terme de type des nuages détectés. Par exemple IASI met toujours des nuages plus élevés que SEVIRI, IASI n'arrive pas à retrouver des nuages bas.... Cependant la valeur du pourcentage est plus grande qu'en Novembre. A travers ces deux semaines de comparaison, il est difficiles de dire si la qualité de la détection dépend de la saison.

Chapitre 5

Synthèse et perspectives

L'assimilation des radiances nuageuses nécessite une bonne simulation des radiances nuageuses à partir des paramètres nuageux (pression de sommet de nuages et fraction nuageuse). Ces paramètres sont calculés par l'algorithme CO_2 -Slicing. À Météo France, les radiances nuageuses IASI sont ensuite assimilées pour les pressions comprises entre 650 et 900 hPa. C'est dans ce contexte qu'a été réalisée notre étude, dont l'objectif était l'évaluation de la performance de cet algorithme. Nous avons d'abord effectué une étude idéalisée en utilisant un modèle unidimensionnel, et une étude avec des observations réelles, dans laquelle nous avons examiné les différents cas (mer/terre et jour/nuit).

L'évaluation des résultats de la détection nuageuse par l'algorithme CO_2 -Slicing, dans un contexte idéalisé, sur mer cherche à vérifier que les paramètres nuageux imposés sont bien restitués. Nous avons montré que l'algorithme met des nuages dans le cas clair, ce qui montre qu'il n'est pas capable de détecter correctement dans les cas clairs. Pour les cas nuageux le biais et l'écart type sont faibles entre 400 et 600 hPa, au-delà de 800 hPa l'algorithme n'arrive pas à retrouver les mêmes paramètres imposés, Cependant lorsque la fraction nuageuse est égale à 1, le résultat est relativement amélioré par rapport aux autres cas de fraction nuageuse.

L'évaluation du CO_2 -Slicing par rapport à la donnée de validation SEVIRI dans ARPEGE, a montré une meilleure corrélation, sur terre que sur mer, ainsi de jour plus que de nuit sur mer. Il arrive à bien placer les nuages moyens et élevés. Les nuages bas sont faiblement détectés par le CO_2 -Slicing, bien que ce dernier puisse détecter des nuages de moins de 800 hPa s'il s'agit des nuages stratiformes, ce qui était bien le cas lorsque la fraction nuageuse égale à 1. Dans le cas clair ou de non détection, les nuages observés par SEVIRI sont principalement des nuages fractionnés et semi transparents ce qui est difficile à détecter pour IASI .

On s'est ensuite intéressé au cas des pressions de sommet des nuages potentiellement utilisées dans l'assimilation (650-900 hPa), le biais et l'écart type les plus faibles sont toujours associés à des nuages entre 650 et 800 hPa pour toutes les situations (jour/nuit et mer/terre). Plus la fraction nuageuse diminue, plus l'algorithme a du mal à bien détecter des nuages ce qui est montré par le résultat de la corrélation.

Dans AROME la corrélation entre IASI et la donnée de validation est meilleure que dans ARPEGE. L'algorithme détecte aussi plus des nuages bas et moins des nuages élevés avec une

plus forte corrélation sur mer que sur terre et la nuit plus que le jour, contrairement à ce qu'on a trouvé dans ARPEGE. Dans la comparaison de IASI dans AROME/ARPEGE, nous avons toujours des différences dans les nuages bas et très élevés, ce qui peut être dû à la résolution verticale différente des deux modèles de prévision, ce qui influence la nature de la détection nuageuse.

Nous avons ensuite comparé la détection nuageuse entre le MetopA et le MetopB d'IASI. MetopA présente des scores de vérification meilleurs que MetopB par rapport au SEVIRI. Il met aussi plus de nuages bas que MetopB, alors que ce dernier met plus des nuages élevés. Pour les nuages élevés on n'a pas pu identifier une différence puisque dans chaque cas (mer/terre) nous trouvons un Metop qui met plus de nuages que l'autre. La différence de résultat de Metop pourrait être expliquée par le déphasage de 50 minutes qui existe entre les deux satellites. La différence pourrait être affectée par le cycle diurne des nuages convectifs, mais cela reste à confirmer.

La saisonnalité, quant à elle, peut être un facteur qui influence la qualité de la détection. Nous avons effectué une autre étude sur une semaine du 1^{er} au 8 Février 2015. La semaine hivernale a montré de meilleurs résultats dans la majorité des scores de vérifications (POD, POD', FAR). La corrélation est meilleure dans cette période par rapport à celle de novembre, cependant dans la nature de la répartition des P_{TOP} nous n'avons pas une différence nette par rapport à celle de la période de Novembre.

A la lumière des résultats obtenus avec l'évaluation de la détection nuageuse de CO_2 -Slicing, ce dernier n'est pas fiable pour la détection de nuages, puisque il en détecte aussi dans les cas clairs. Dans la chaîne opérationnelle, les paramètres du CO_2 -Slicing ne sont utilisés que si la couverture nuageuse de l'imageur AVHRR est totale dans le pixel IASI. Notre étude nous a montré une bonne corrélation entre AVHRR et la donnée de validation SEVIRI, ce qui encourage encore son utilisation.

La caractérisation des nuages par le CO_2 -Slicing est limitée pour les nuages fractionnés et des nuages très bas, ce qui pourrait engendrer des erreurs par la suite. Cependant lorsque une fraction nuageuse est égale à 1, le résultat obtenu est satisfaisant, La gamme de pression qui présente le meilleur résultat se situe entre 550 et 600 hPa, alors que les mauvais résultats sont associés aux pressions en dessus de 800 hPa. De ce fait il faut penser à changer la gamme de pressions de sommet des nuages utilisée dans l'assimilation. Il faudrait l'augmenter vers les 550 hPa afin de profiter de la bonne détection de l'algorithme dans cette partie de l'atmosphère.

La validation de l'algorithme du CO_2 -Slicing par le sondeur infrarouge SEVIRI reste toujours relatif, puisque ce dernier peut aussi être entaché d'erreur. Il faudrait alors évaluer avec une autre source de validation telle que MODIS.

La deuxième période utilisée (entre le 1^{er} et 8 Février 2015) ne nous a pas permis de tirer de conclusions nettes sur l'influence de la saison sur la détection nuageuse. Il faudrait étendre l'étude avec une autre période de l'année (par exemple l'été).

Enfin à terme, la modélisation des effets radiatifs des nuages pourrait utiliser des paramètres nuageux plus proches de la physique tels que les profils d'eau nuageux liquides, glacés et le

profil de fraction nuageuse.

Par l'intermédiaire de ce stage qui a duré cinq mois au sein du GMAP/CNRM, j'ai pu acquérir une expérience professionnelle tant dans le domaine de la météorologie, que dans celui de la manipulation des programmes informatiques. Tout mon stage s'est déroulé sous l'environnement Linux, environnement que je ne maîtrisais guère auparavant ce qui m'a donné l'occasion de renforcer mes capacités dans ce sens. J'ai aussi manipulé des logiciels, Metview, XMGRACE...J'ai découvert le langage LaTeX pour la rédaction de mon rapport. Outre le développement de mes capacités informatiques, j'ai eu l'occasion d'apprendre davantage dans le domaine de la météorologie en particulier sur les sondeurs infrarouges, la détection nuageuses et l'assimilation des radiances nuageuse. J'ai eu de la chance de travailler sur un sujet passionnant par lequel j'ai découvert le monde de la recherche que j'ai aimé, et du travail à la fois, et développer mon esprit d'analyse et les capacités de persévérance, d'autonomie, de gestion de temps et de détermination. À la fin de mon stage j'ai été très contente que mon travail aboutisse à un résultat et de nouvelles conclusions constructives pour l'équipe observations en radiances infrarouges .

Finalement je peux dire qu'à travers ce stage j'ai pris conscience de l'importance de savoir être dynamique, motivé . . . et des relations humaines capables de favoriser le climat de travail d'une part, d'autre part ce stage a été une expérience déterminante dont je pourrais certainement profiter dans le futur.

Références

- Bernard, B., Derrien, M., Le Gléau, H., et Raoul, M.-P. (2010). Exemple de fusion en traitement des données de l'imagerie satellitaire msg. *METEO-FRANCE, Centre de Météorologie spatiale, FRANCE*.
- Cayla, F. (2001). L'interféromètre iasi ; un nouveau sondeur satellitaire à haute résolution. *La météorologie 8ème série*, 32 :23–39.
- Chevallier, F., Bauer, P., Kelly, G., Jakob, C., et McNally, T. (2001). Model clouds over oceans as seen from space : Comparison with hirs/2 and msu radiances. *Journal of climate*.
- Courtier, P., Freydl, C., Rabier, F., et Rochas, M. (1991). The ARPEGE Project at Météo-France. *ECMWF Seminar Proceedings*, 7 :193–231.
- Ebert, E. E. (2008). Fuzzy verification of high resolution gridded forecast : a review and proposed framework. *Meteorological applications*, 15 :51–64.
- Emran, A. (2007). Interaction du rayonnement électromagnétique avec l'atmosphère notion du spectre électromagnétique. *GEF-TF 023494 MOR*.
- Fourrié, N. et Rabier, F. (2004). Cloud characteristics and channel selection for IASI radiances in meteorologically sensitive areas. *Q. J. R. Met. Soc.*, 130 :1839–1856.
- Guidard, V., Fourrié, N., Brousseau, P., et Rabier, F. (2011). Impact of iasi assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(661) :1975–1987.
- Howard, L. (1803). On the modifications of clouds. *International Cloud Atlas*, I and II.
- Ide, K., Courtier, P., et Ghil, M. and Lorenc, A. (1997). Unified notation for data assimilation : operational, sequential and variational. *J. Meteorol. Soc. Japan.*, 75 :181–189.
- Kaplan, L., Chahine, M., Susskind, J., et Searl, J. (1977). Spectral band passes for a high precision satellite. *Applied Optics*, 16 :322–325.
- Malardel, S. (2006). *"Fondamentaux de météorologie : À l'école du temps"*.
- McNally, A. (2002). A note on the occurrence of cloud in meteorologically sensitive areas and the implications for advanced infrared sounders. *Q. J. R. Met. Soc.*, 128 :2551–2556.
- McNally, A. et Watts, P. (2003). A cloud detection algorithm for high spectral resolution infrared sounders. *Q. J. R. Met. Soc.*, 129 :3411–3423.
- McNally, A. P. (2009). The direct assimilation of cloud-affected infrared satellites radiances for numerical weather prediction. *Q. J. R. Met. Soc.*, 135 :1214–1229.

- Menzel, W., Smith, T., et Stewart, T. (1983). Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *J. appl. Meteorol*, 22 :377–384.
- Pangaud, T. (2009). Assimilation des radiances des sondeurs infrarouges hyperspectraux en condition nuageuse : application à des cyclogénèses extratropicales. *Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier*.
- Pangaud, T., Fourrie, N., Guidard, V., Dahoui, M., et Rabier, F. (2009). Assimilation of airs radiances affected by mid-to low-level clouds. *Monthly Weather Review*, 137(12) :4276–4292.
- Pavelin, E., English, S., et Eyre, J. (2008). The assimilation of cloud-affected infrared satellite radiances for numerical weather prediction. *Q. J. R. Met. Soc.*, 134 :737–749.
- Rabier, F., Järvinen, H., Klinker, E., Mahfouf, J.-F., et Simmons, A. (2000). The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I : Experimental results with simplified physics. . *Q. J. R. Met. Soc.*, 126 :1143–1170.
- Renaut, D. (2004). Les satellites météorologiques. *Société météorologique de France, Paris (FRA)*.
- Scorer, R. S. (1986). Cloud investigation by satellite. *Ellis Horwood Chichester*.
- Seity, Y., Brousseau, P., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., et Masson, V. (2011). The arome-france convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*.