



Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans les régions tropicales: préparation à la mission Megha-Tropiques

Thomas Fiolleau

► To cite this version:

Thomas Fiolleau. Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans les régions tropicales: préparation à la mission Megha-Tropiques . Climatologie. Ecole Polytechnique X, 2010. Français. NNT: . pastel-00576870

HAL Id: pastel-00576870

<https://pastel.hal.science/pastel-00576870>

Submitted on 15 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE de DOCTORAT de l'ECOLE POLYTECHNIQUE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'ECOLE DOCTORALE POLYTECHNIQUE

SPECIALITÉ : Mécanique

présentée et soutenue publiquement par

Thomas FIOLEAU

CYCLE DE VIE DES SYSTÈMES CONVECTIFS DE MOUSSON

DANS LES RÉGIONS TROPICALES :

PRÉPARATION À LA MISSION MEGHA-TROPIQUES

Soutenue le 16 décembre 2010 devant le jury composé de :

M. Vincent Cassé	Président
M. Jean-Pierre Chaboureau	Rapporteur
M. Hervé Roquet	Rapporteur
Mme. Laurence Picon	Directrice de Thèse
M. Rémy Roca	Co-directeur de Thèse
M. Jean-Philippe Duvel	Examineur
M. Jean-Philippe Lafore	Examineur
M. Régis Borde	Examineur
Mme. Anne Lifermann	Invité

Thèse préparée au Laboratoire de Météorologie Dynamique
Ecole Polytechnique

Mon arrivée au Laboratoire de Météorologie Dynamique est la conséquence d'un heureux concours de circonstances et je tiens avant tout à remercier Hervé Le Treut et Vincent Cassé qui se sont succédés à la direction du laboratoire de m'y avoir accueilli.

Juillet 2005, 6 mois après la fin de mes études dans le domaine du traitement d'images et toujours sans emploi, mon ami Michel Auger, alors ingénieur au LMD me propose d'envoyer ma candidature à Rémy Roca afin de travailler en qualité d'ingénieur d'études dans le cadre de la mission Megha-Tropiques. L'objectif du poste était de "manipuler des codes de suivi nuageux à partir de satellites météorologiques géostationnaires et de les interfacer avec les orbites de la mission Megha-Tropiques". Les domaines de la climatologie et des satellites m'étaient alors inconnus. Qui aurait pu croire que cinq années plus tard, je soutiendrais une thèse de l'école doctorale de Polytechnique sur ces thèmes ?

Rémy y a cru et m'a encouragé à poursuivre et à approfondir mes travaux entrepris durant ces deux années "ingénieur" dans le cadre d'une thèse cofinancée CNES/CNRS. Je lui dois aujourd'hui toute ma reconnaissance pour avoir encadré ma thèse et avoir eu la patience de m'inculquer les problématiques climatiques et plus particulièrement celles concernant les systèmes convectifs. Je dois avouer que sa rigueur et son exigence scientifique, son recul et son expertise du domaine m'ont particulièrement aidé à appréhender les aspects de la convection et de l'observation satellitaire. Mais par dessus tout, son dynamisme et son enthousiasme pour la recherche climatique, l'observation satellitaire et les régions tropicales, m'ont permis d'avancer dans mes travaux, même dans les moments difficiles. Rémy m'a non seulement accueilli dans son équipe "Cycle de l'Eau et de l'Energie dans les Tropiques", mais il m'a également accordé un soutien sans failles et sa confiance tout au long de ces années, me permettant notamment de voyager à travers le monde, de Las Vegas à Tokyo en passant par Bangalore afin de présenter mes résultats scientifiques.

Je souhaite remercier chaleureusement Laurence Picon pour sa disponibilité, son écoute et ses conseils. Elle m'a apporté une vision complémentaire dans l'encadrement de ma thèse.

Merci à Hervé Roquet et Jean-Pierre Chaboureau pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et d'évaluer ainsi mon travail. Je suis extrêmement sensible de l'intérêt porté par mon jury à mes travaux.

Cette thèse a été en majeure partie réalisée au préfabriqué de l'école Polytechnique. Je voudrais remercier l'ensemble des personnes qui travaillent ou ont travaillé en ce lieu et qui font du préfa "The Place To Be" du LMD. J'ai passé des moments très agréables en leur compagnie. La bonne ambiance se mérite et gravir les centaines de marches menant au temple de la bonne humeur ne m'ont jamais fait peur. Merci à Karim Ramage, Olivier Chomette, André Szantaï, Isabelle Jobard, Patrick Raberanto, Nicolas Gif, Michel Capderou, Chantal Claud, Sophie Cloché, Julien Lenseigne, Philippe Chambon, Paul-Etienne Mallet, Bahjat Alhammoud et je n'oublie pas mon ami Pierre-Willy Lopes.

J'aimerais en particulier remercier Sophie Cloché pour sa disponibilité et sa gestion Megha-Tropicale. Merci à Michel Capderou, mon mentor de l'orbitographie. Ses récits de voyages tous

aussi incroyables les uns que les autres, son savoir et ses connaissances, ont éclairé ma vie. Mais quel bonheur de l'entendre parler de ses aventures !! J'adresse également mes remerciements à Nicolas Gif et Audrey Pellet pour leur soutien et leur compétence en ingénierie. Sans eux, il m'aurait été difficile d'élaborer un produit "système convectif" pour la mission Megha-Tropiques. Merci à Geneviève Sèze pour avoir toujours gentillelement répondu à mes questions concernant les satellites géostationnaires. Merci également à Hélène Brogniez, Nicolas Viltard du LATMOS et à son équipe pour BRAIN et ses estimations de précipitation.

Cette thèse n'aurait pu être accomplie sans le soutien logistique des informaticiens du LMD et de l'IPSL. Merci à Karim Ramage, l'homme qui parle aux oreilles de Climserv, pour le tact avec lequel il fait fonctionner les machines de calcul et les bases de données. Merci à Julien Lenseigne (tu seras toujours Mister Flag à mes yeux) pour la patience qui le caractérise et qui a toujours su résoudre mes nombreux problèmes informatiques. Je n'oublie pas Christophe Boitel et Robert Franchisseur sur lesquels on peut toujours compter.

Les démarches administratives ne sont pas mon fort, et j'ai beaucoup apprécié la compétence, l'aide et la gentillesse de Stéphane Sportouch, Martine Maherou, Stephanie Lekieffre et Eliane Rier dans ce domaine.

Patrick Raberanto, Jean-Yves Grandpeix et Alain Lahellec ont été mes colocataires de bureaux pendant ces trois années de thèse, que ce soit à l'école Polytechnique ou à Jussieu. J'espère que je n'ai pas été un "coloc" trop pénible, mais les discussions scientifiques ou autres au sein de ces bureaux m'ont énormément enrichis et aidés lors de la rédaction de mon manuscrit.

Le LMD a une âme et il le doit beaucoup à ses thésards, post-docs, etc... Ils sont pour la plupart devenus bien plus que des collègues. J'aimerais adresser mes remerciements à Philippe Chambon, mon ami thésard de l'équipe CEET. Merci pour ces innombrables repas à la pizzeria "Marco Polo", autrement nommé Yalta, où l'on s'est évertué à refaire le monde. Et merci pour tous ces bons moments passés, en particulier ce voyage à travers l'Inde. Merci à Nicolas Rochetin pour sa présence de tous les instants, à Christelle Castet pour son "American Way Of Life" et ses friendly improvements on google translations, à Ara Arakelian pour les animations commandées au dernier moment, à Virginie Guemas pour ses aides multiples et pour les fous rires, à Nathalie Bertrand et sa bonne humeur, et à Jessica Vial dont on attend toujours avec impatience qu'elle revienne de "Blairwitch". Merci à Rodrigo Guzman, Isabelle Tobin, Romain Pilon, Paul-Etienne Mallet, Jean Baptiste Madeleine, Alberto Casado, Mohamed Ly, Abdoul-Khadre Traore, Youssouph Sané, Florent Briant, Mélanie Vangvichith, Benjamin Charnay, Jingmei Yu, Aymeric Spiga, Josefine Ghattas, Romain Roherig, Julien Lemond. Merci également à Virginie Poulain du LATMOS. J'en oublie certainement, mais je suis extrêmement reconnaissant envers l'ensemble des personnes que j'ai pu cotoyer au cours de cette thèse.

Je terminerai en remerciant ma famille et mes amis, Michel, Pierre-Willy, Séverine, Yves, Aurore, Elise pour leur aide et pour avoir pris leur RTT pour venir m'écouter soutenir ma thèse à l'école Polytechnique.

Table des matières

1	Contexte et importance de l'étude du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson	1
2	Une nouvelle méthode de détection et de suivi des systèmes convectifs de méso-échelle	5
2.1	Introduction aux systèmes convectifs de méso-échelle	5
2.2	Historique sur l'observation spatiale des phénomènes convectifs de méso-échelle	10
2.3	Etat de l'art sur les méthodes de suivi des systèmes convectifs de méso-échelle .	13
2.3.1	La détection des systèmes convectifs de méso-échelle	13
2.3.1.1	Détection par seuillage en température de brillance	13
2.3.1.2	Détection par seuillage thermique adaptatif	15
2.3.1.3	Détection par l'utilisation des multi-canaux	18
2.3.2	Suivi des systèmes convectifs de méso-échelle	19
2.3.2.1	Suivi par la méthode de recouvrement	19
2.3.2.2	Suivi par utilisation des champs de déplacements apparents . .	21
2.3.2.3	Minimisation d'une fonctionnelle	22
2.3.2.4	Suivi par la méthode des modèles déformables	22
2.3.2.5	Conclusion	23
2.4	Introduction à l'algorithme de suivi des systèmes convectifs TOOCAN	23
2.4.1	Méthodologie de l'algorithme de détection et de suivi TOOCAN	24
2.4.1.1	Distribution des clusters dans l'imagerie infrarouge	24
2.4.1.2	Fonctionnement de la segmentation 3D de l'algorithme TOOCAN	25

2.4.1.3	Les paramètres des systèmes convectifs déterminés par l'algorithme TOOCAN	33
2.5	Conclusion	34
3	Evaluation des résultats issus du nouvel algorithme de suivi TOOCAN	35
3.1	Introduction	35
3.2	Sensibilité de l'algorithme aux pas de détections : cas d'étude	36
3.3	Analyse statistique des sorties de l'algorithme TOOCAN	38
3.4	Comparaison des sorties de la méthode TOOCAN avec l'algorithme de suivi basé sur le "recouvrement"	39
3.4.1	Introduction	39
3.4.2	Comparaison basée sur des études de cas	39
3.4.2.1	Cas d'étude en Afrique de l'Ouest	39
3.4.2.2	Cas d'étude dans la région indienne	43
3.4.3	Comparaison statistique	46
3.5	Conclusion	52
4	Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans les régions indiennes et ouest africaines	55
4.1	Introduction	55
4.2	Données et méthodologie	57
4.2.1	Détection et suivi des systèmes convectifs de mousson	57
4.2.2	Le cycle de vie des systèmes convectifs de mousson	58
4.2.2.1	Classification	58
4.2.2.2	Technique de normalisation	58
4.3	Résultats	59
4.4	Simplification du cycle de vie des MCS	65
4.4.1	Modèle linéaire d'accroissement/décroissance (LGD : Linear Growth/Decay)	65

4.4.2	Evaluation de la pertinence du modèle LGD	66
4.4.3	Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson de la classe 2a	70
4.5	Discussion	72
4.6	Conclusion	80
5	Fusion des données issues des satellites orbite basse et des caractéristiques des systèmes convectifs de mousson	83
5.1	Introduction	83
5.2	Les estimations des taux de précipitation par micro-ondes	85
5.2.1	Introduction aux méthodologies de restitution des précipitations	85
5.2.2	L'algorithme de restitution des précipitations BRAIN	86
5.3	L'échantillonnage dynamique des systèmes convectifs de mousson par les instruments micro-ondes	87
5.3.1	Introduction	87
5.3.2	Colocalisation spatio-temporelle des données micro-ondes avec l'imagerie infrarouge issue des géostationnaires	88
5.4	Elaboration des composites des précipitations le long du cycle de vie des MCS .	93
5.5	Le cycle de vie des précipitations au sein des MCS : dans le domaine entier d'étude	97
5.5.1	Les composites continentaux/océaniques	97
5.5.1.1	Sensibilité des composites de précipitations aux algorithmes BRAIN et 2A12	100
5.6	Régionalisation des composites de précipitation	102
5.7	Conclusion	108
6	Conclusion et perspectives	111
6.1	Résumé des travaux entrepris	111
6.2	Perspectives	115

A Les satellites météorologiques	119
A.1 METEOSAT	119
A.1.1 Introduction	119
A.1.2 Description générale de METEOSAT	120
A.1.2.1 Caractéristiques de vol	120
A.1.2.2 Caractéristiques spectrales de l'instrument	120
A.1.2.3 Géométrie de l'acquisition des images	122
A.1.3 Exploitation des données METEOSAT	124
A.1.3.1 Navigation des images	124
A.1.3.2 La calibration opérationnelle	124
A.2 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	126
A.2.1 Les instruments	126
A.2.1.1 Visible and Infrared Scanner : VIRS	127
A.2.1.2 Precipitation Radar : PR	128
A.2.2 TRMM Microwave Imager : TMI	129
A.2.3 L'orbitographie de TRMM	131
A.3 Les produits TRMM	132
A.3.1 Le produit 2A12	133
A.4 Megha-Tropiques	134
A.4.1 Historique	134
A.4.2 Les instruments	134
A.4.2.1 Madras	135
A.4.2.2 Scarab	136
A.4.2.3 Saphir	138
A.4.3 L'échantillonnage	139
A.5 Les produits Megha-Tropiques	141

A.5.1	Terminologie	141
A.5.2	Produit de niveau 2 "ciel précipitant"	141
A.5.3	Produit de niveau 2 "ciel non précipitant"	141
A.5.4	Produit de niveau 2 "Bilan Radiatif"	142
A.5.5	Produit de niveau 2 "masque nuage global"	143
A.5.6	Produit de niveau 3/4 "précipitation accumulée"	144
A.5.7	Produit de niveau 3/4 "Cycle de vie des systèmes convectifs"	144
A.6	la mission GPM (Global Precipitation Mission)	145
A.6.1	Les satellites de la mission GPM	145
A.6.1.1	Le satellite "GPM Core"	147
A.6.1.2	Le satellite LIO (Low Inclinaison Observatory)	147
A.6.2	Les instruments	148
A.6.2.1	Dual frequency Precipitation Radar (DPR)	148
A.6.2.2	Le radiomètre micro-ondes GPM Microwave Imager (GMI)	149
A.6.3	L'échantillonnage	149
B	Summertime Climatology of Mesoscale Convective Systems over West Africa from 24-years of METEOSAT observations	151
C	DPC	179
	Bibliographie	205

Chapitre 1

Contexte et importance de l'étude du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson

Le cycle de l'eau et de l'énergie dans les tropiques est un élément central du climat de la Terre (figure 1.1). En effet, dans les régions intertropicales, le système terre-océan-atmosphère reçoit en moyenne plus d'énergie du Soleil qu'il n'en renvoie vers l'espace, impliquant alors des cycles très actifs.

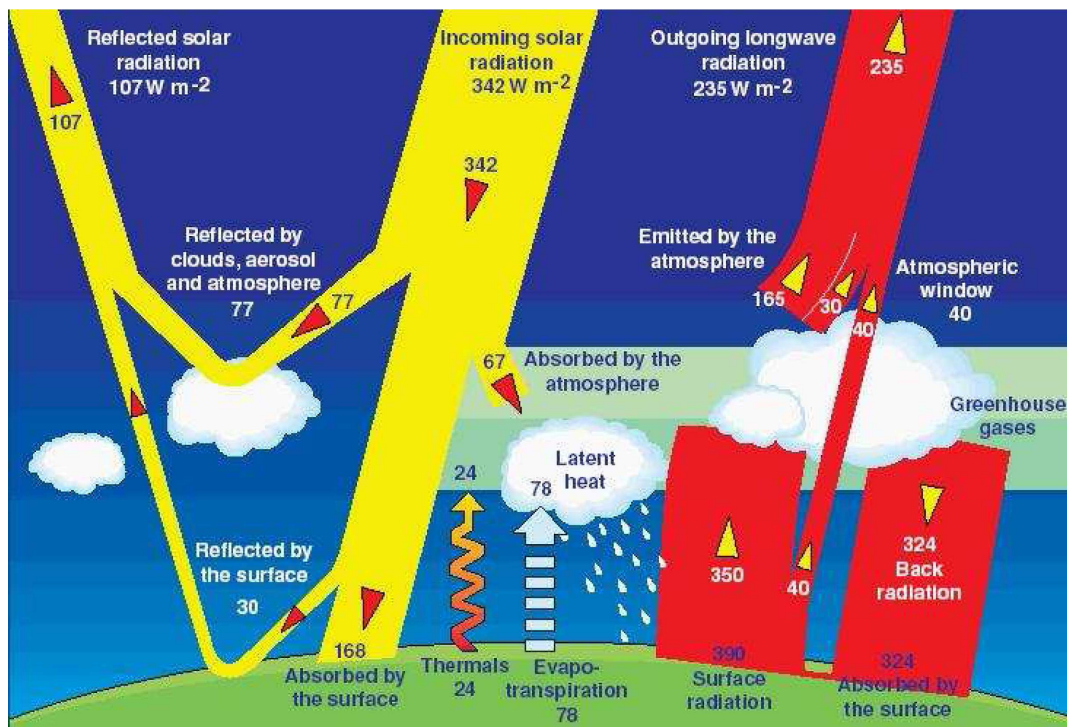


FIGURE 1.1 – Bilan d'énergie annuel global exprimé en W.m^{-2} (Kiehl et Trenberth [2000])

L'excès d'énergie est alors transporté vers les régions de plus hautes latitudes par des circulations atmosphériques sous forme de chaleur latente et sensible mais également par des circulations océaniques. Toute modification du bilan d'énergie des zones tropicales a donc des conséquences sur le climat de la planète toute entière. En dehors de cet effet de redistribution de l'énergie à l'échelle du globe, les échanges énergétiques à l'intérieur du système tropical terre-atmosphère lui-même sont complexes. L'évaporation sur les surfaces océaniques de part et d'autre de la zone de convergence intertropicale correspond à un flux de chaleur latente, permettant d'évacuer vers l'atmosphère une partie de la chaleur apportée essentiellement par le flux solaire descendant. La libération de cette chaleur latente se fait par condensation de la vapeur d'eau dans les zones de précipitations, beaucoup moins étendues. Ainsi, bien que 60% des précipitations globales tombent dans les tropiques, la surface qu'elles couvrent n'est que de quelques pourcents.

Le rôle des systèmes convectifs dans ces régions est alors crucial et les processus d'interaction entre flux radiatifs, flux de vapeur d'eau, nuages, précipitations, dynamique déterminent au final le déroulement des moussons, les inondations ou les sécheresses mais également le cycle de vie des systèmes nuageux. Ces systèmes convectifs produisant une large proportion de précipitations sur le globe sont donc d'une importance majeure d'un point de vue climatologique.

Les questions scientifiques fondamentales sur le cycle de l'eau et de l'énergie, initiées voilà une cinquantaine d'années, sont toujours d'actualité. Grâce notamment à l'avènement des satellites météorologiques d'observation spatiale, les récentes décennies sont témoins d'avancées importantes, concernant la documentation des précipitations, des systèmes convectifs, de la vapeur d'eau et du rayonnement au sommet de l'atmosphère. Cependant, le cycle de l'eau et de l'énergie dans les tropiques aux différentes échelles spatio-temporelles reste encore méconnu et mal représenté par les modèles de climat et météorologiques, limitant ainsi les capacités de prévisions aux différentes échelles de temps. La figure 1.2 illustre les variations de précipitations annuelles moyens à la fin du 21^e siècle (2090-2099) par rapport à l'époque actuelle (2000-2009) simulées par le modèle IPSL-CM4 et le modèle CNRM-CM3 dans le scénario SRES-A2 dans le cadre du quatrième rapport du GIEC. De manière générale, les résultats s'accordent sur la répartition des précipitations mais sont en désaccord sur certaines régions, comme par exemple dans les régions tropicales d'Amérique du Sud, d'Afrique de l'Ouest et de l'Ouest de l'Inde. Dans ces régions tropicales, alors que le modèle de l'IPSL simule une diminution des précipitations, celui du CNRM simule une augmentation. Si l'on considère un plus grand ensemble de modèles climatiques, on obtient également des résultats très contrastés.

Dans ce contexte de réchauffement climatique, il revêt alors d'une importance majeure d'approfondir notre connaissance du cycle de l'eau et de l'énergie dans les tropiques, nécessitant en particulier de préciser le rôle des systèmes convectifs organisés dans ce cycle et dans la circulation de mousson et de documenter leurs propriétés. Dans le cadre de la mission satellitaire Megha-Tropiques, nous chercherons au cours de cette thèse, à évaluer le cycle de vie des systèmes convectifs de mousson et à quantifier la durée des différentes phases de ce cycle en analysant d'une part

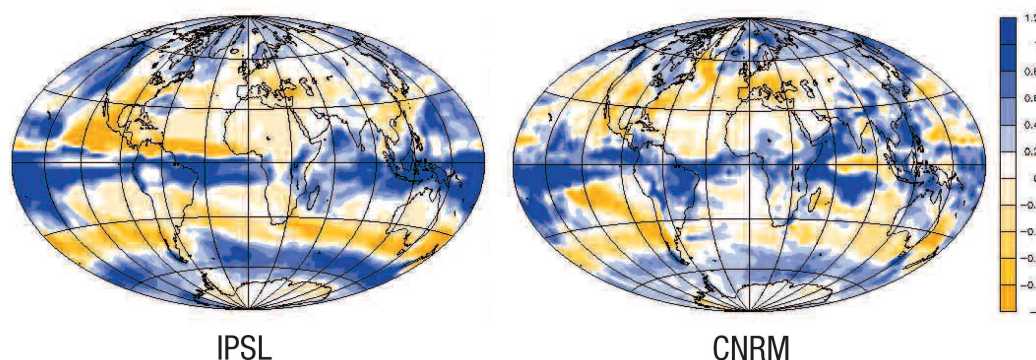


FIGURE 1.2 – Variation des précipitations annuelles moyennes à la fin du 21^e siècle (2090-2099) par rapport à l'époque actuelle (2000-2009) simulées par le modèle IPSL-CM4 (à gauche) et par le modèle CNRM-CM3 (à droite) dans le scénario SRES-A2 dans le cadre du 4^e rapport du GIEC

leurs caractéristiques morphologiques, et d'autre part en estimant l'évolution de leurs précipitations.

Afin de répondre à ces problématiques de cycle de vie des systèmes convectifs de mousson, cette étude s'articule en quatre chapitres, avec comme fil conducteur l'utilisation des observations infrarouges issues des satellites géostationnaires ainsi que des données précipitations issues du satellite TRMM.

- Dans le chapitre 2, les systèmes convectifs de méso-échelle sont brièvement introduits, suivi d'un historique des moyens satellitaires développés permettant leur observation. Différentes méthodes de détection et de suivi des systèmes convectifs à partir d'observations géostationnaires et développées depuis une trentaine d'années, sont alors décrites. Les forces et les faiblesses de chacune de ces méthodes dans leur capacité à décrire dans l'espace et dans le temps les caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs sont analysées. Les limitations de ces algorithmes nous conduisent alors à introduire une nouvelle méthodologie de détection et de suivi des systèmes convectifs basée sur une segmentation en 3 dimensions dans l'espace et dans le temps des systèmes convectifs de façon à caractériser de manière cohérente leur cycle de vie. Ce nouvel algorithme développé au cours de cette thèse a pour nom TOOCAN (Tracking Of Organized Convection using a 3 dimensional segmentationN).
- Afin d'évaluer la capacité du nouvel algorithme TOOCAN à décrire le cycle de vie de manière cohérente des systèmes convectifs et d'estimer ainsi l'apport de cette nouvelle méthodologie, le chapitre 3 propose une comparaison des résultats de l'algorithme TOOCAN avec les systèmes convectifs segmentés par une méthodologie de détection et de suivi d'ancienne génération. Cette comparaison est réalisée d'une part en analysant des cas d'études en Afrique de l'Ouest et dans la région indienne, et d'autre part de manière statistique en utilisant des données infrarouges issues de METEOSAT Seconde Génération pour le mois de juillet 2006.

- Le chapitre 4 est dédié à l'application de l'algorithme TOOCAN sur des données géostationnaires METEOSAT-5 et 7 afin d'analyser les caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs de mousson au cours de leur cycle de vie des régions ouest africaines et indiennes. Pour cela, une méthodologie de normalisation du cycle de vie des systèmes convectifs est introduite de manière à pouvoir comparer facilement les caractéristiques morphologiques de l'ensemble des systèmes convectifs de mousson. Les résultats sont alors présentés de manière globale sur l'ensemble de la zone de mousson et sont ensuite régionalisés.
- Le chapitre 5 a pour objectif d'analyser le cycle de vie des précipitations au sein des systèmes convectifs de mousson de la région d'étude Afrique de l'Ouest-Inde. Pour cela les précipitations estimées à partir de l'instrument TMI embarqué à bord du satellite défilant TRMM sont utilisées. Le satellite TRMM n'observant pas de manière continue une même zone géographique, le cycle de vie des précipitations des systèmes convectifs ne peut alors être résolu individuellement à l'échelle des systèmes convectifs. Une méthodologie permettant une analyse statistique du cycle de vie des précipitations d'un système convectif type est alors introduite et les résultats sont déterminés de manière globale sur l'ensemble de la région de mousson Afrique de l'Ouest-Inde puis de manière régionalisée. Ce chapitre permet de faire ressortir un modèle conceptuel des processus humides le long du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson.
- Les différents satellites et instruments utilisés au cours de cette étude sont présentés dans l'annexe A. Dans un premier temps, la série des satellites géostationnaires METEOSAT nécessaires à la détection et au suivi des systèmes convectifs de mousson est introduite. Les caractéristiques de vol, les caractéristiques spectrales des instruments ainsi que l'exploitation des données METEOSAT sont alors détaillées. Dans un deuxième temps, les caractéristiques de vol ainsi que les produits algorithmiques des missions satellitaires orbite basse TRMM, Megha-Tropiques et GPM sont présentées. Ces missions satellitaires permettent la mesure de paramètres géophysiques tels que les précipitations ou les flux radiatifs.
- En annexe B est présenté un rapport au projet européen AMMA concernant une climatologie des systèmes convectifs rencontrés dans la région d'Afrique de l'Ouest pour les mois de mousson juin, juillet, août, septembre entre 1983 et 2006. Cette climatologie a été élaborée à partir de la série longue des METEOSAT (de METEOSAT-2 à METEOSAT Seconde Génération) en appliquant un algorithme de détection et de suivi des systèmes convectifs d'ancienne génération. Une classification des systèmes est alors proposée et est basée sur des critères tels que la durée de vie et la vitesse de propagation.
- En annexe C est introduit le Data Product Catalogue rédigé dans le cadre de la mission Megha-Tropiques et dont l'objectif est de détailler le fonctionnement du produit de niveau 3 "MCS composite" d'un point de vue algorithmique. Ce produit, par l'utilisation des données infrarouges des satellites géostationnaires et des données micro-ondes issues des satellites défilants va permettre de déterminer statistiquement l'évolution des précipitations associées aux systèmes convectifs sur l'ensemble de la bande inter-tropicale et pour différentes périodes d'études.

Chapitre 2

Une nouvelle méthode de détection et de suivi des systèmes convectifs de méso-échelle

2.1 Introduction aux systèmes convectifs de méso-échelle

On distingue deux types de convection : la convection locale et la convection organisée. La convection locale prend la forme d'orages cellulaires. La convection organisée correspond aux systèmes convectifs de méso-échelle qui se forment lorsque ces cellules orageuses, en réponse à une instabilité convective, s'agrègent et s'organisent en un système nuageux de taille beaucoup plus importante présentant ainsi une surface pluvieuse importante. Ces systèmes produisent une large proportion de précipitations sur le globe et sont donc d'une importance majeure d'un point de vue climatologique. Le terme méso-échelle décrit les phénomènes qui se passent à une échelle plus petite que l'échelle synoptique, mais plus grande que celle des nuages individuels traités par la micro-échelle. Les systèmes convectifs de méso-échelle interviennent dans la partie haute de l'échelle meso-beta et à l'échelle meso-alpha ($200 \text{ km} < l < 2\,000 \text{ km}$) (Orlanski [1975]). Plus généralement, et selon une définition établie par Houze [1993], un Système Convectif de Méso-échelle (MCS) peut être défini comme étant un système nuageux apparaissant en association avec des orages produisant une zone continue de précipitations d'extension horizontale de l'ordre de 100 km ou plus dans au moins une direction (figure 2.1 et 2.3).

La figure 2.2 montre un exemple de température de brillance rencontrée à l'intérieur d'un MCS. La surface de nuage froid présentant une température de brillance inférieure à -70°C est de l'ordre de 10^5 km^2 . Cette taille de système nuageux dépasse celle d'un cumulonimbus d'un facteur 2-3. Comme définies dans Houze [1993], les précipitations sont continues le long d'une région d'au minimum 100 km. Les mesures radars ont montré que ces précipitations pouvaient être séparées en une partie convective et en une partie stratiforme (Houze [1977], McAnelly et Cotton [1989], Houze [1993]). Les régions convectives consistent en des colonnes d'ascendance s'éten-

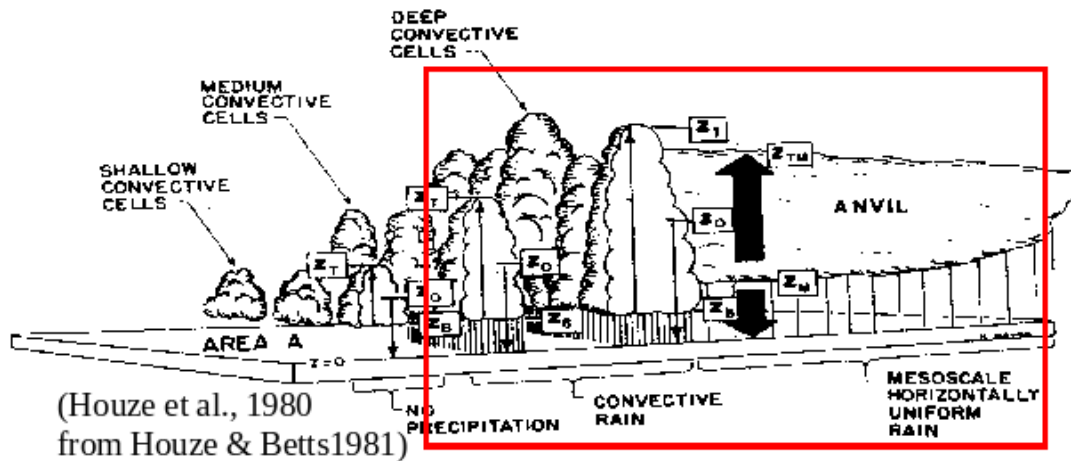


FIGURE 2.1 – Modèle conceptuel d'un MCS en phase de maturité d'après Houze et Betts [1981].

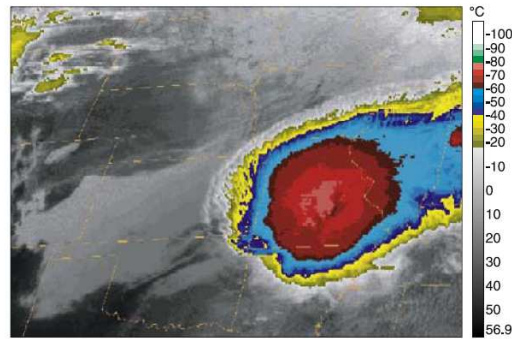


FIGURE 2.2 – Image Infrarouge d'un système convectif de méso-échelle au dessus de l'état du Missouri.

dant verticalement sur toute ou partie de la troposphère et présentant des précipitations intenses. La région stratiforme est une région en partie produite par la dissipation des cellules convectives et produisant des précipitations plus uniformes et moins intenses que dans les régions convectives. La relation entre la partie convective et stratiforme d'un MCS varie au cours de son cycle de vie et est ainsi un indicateur de sa dynamique interne.

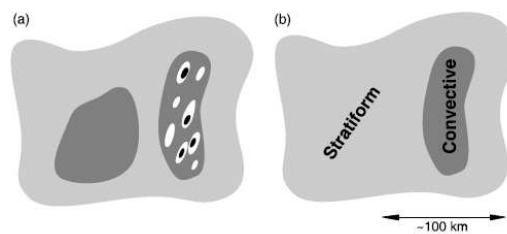


FIGURE 2.3 – Idéalisation d'un MCS tel qu'observé par radar. Division du MCS en région convective et stratiforme.

Les MCS sont des phénomènes convectifs persistants et leur cycle de vie sont bien appréhendus. La figure 2.4 illustre un modèle conceptuel de cycle de vie d'un système convectif établi à partir de mesures radars dans les années 80 (Houze [1982]).

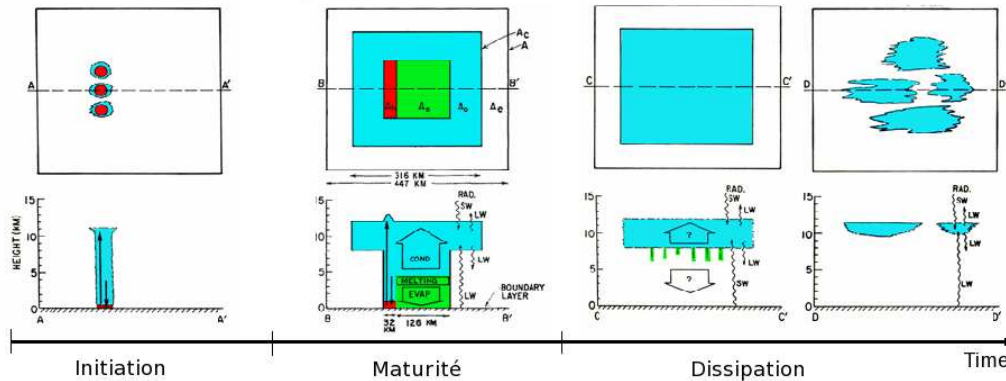


FIGURE 2.4 – *Idéalisation du cycle de vie d'un système convectif de mousson en quatre étapes. a- une étape de d'initiation consistant en des tours de précipitation convective ; b- une étape de maturité durant laquelle la partie stratiforme du MCS se développe ; c- une étape de dissipation durant laquelle les tours convectives ont disparus ; l'intensité des précipitations diminuent jusqu'à disparaître, le nuage haut se transforme en nuage fin et se dissipe. d'après Houze [1982]*

Les précipitations convectives sont représentées par la couleur rouge, les précipitations stratiformes correspondent à la couleur verte, alors que la couleur bleue indique le nuage haut non précipitant associé au système convectif. Ce schéma idéalisé montre que le cycle de vie des MCS peut être décomposé en trois phases :

- Une phase d'initiation au cours de laquelle les cellules convectives se développent. Ce déclenchement de la convection est un phénomène complexe dont les causes peuvent être variées. Il peut ainsi être expliqué par des instabilités dans l'atmosphère dues à des systèmes nuageux pré-existants, à la présence d'un mécanisme de soulèvement dans les basses couches, à des effets orographiques, à des contrastes de terrains forts (contraste terre-mer) etc... Ces cellules convectives qui grossissent finissent par s'agréger. Il en résulte une zone continue de précipitations intenses et l'établissement de circulations méso-échelle permettant aux MCS de durer plusieurs heures.
- Une phase de maturité est atteinte lorsqu'une large partie stratiforme se développe à partir d'anciennes cellules convectives donnant des précipitations stratiformes. Chaque cellule convective possède en effet son propre cycle de vie, s'affaiblissant et devenant ainsi une composante de la partie stratiforme du MCS. Aussi longtemps que des cellules convectives se développent, le MCS reste dans cette phase de maturité et est alors composé de cellules actives, de cellules en phase de dissipation et de précipitations stratiformes.

- Une phase de dissipation correspondant à la fin de vie d'un MCS. De moins en moins de cellules convectives se développent à l'intérieur du MCS, la région stratiforme, n'étant plus alimentée par les cellules se dissipant, s'estompe et le système convectif disparaît.

Cependant, ce schéma conceptuel, bien qu'indiquant les trois phases du cycle de vie des MCS, ne permet pas de quantifier la durée de ses différentes phases. Une connaissance de l'évolution du bouclier nuageux est d'une importance majeure pour l'étude du bilan radiatif. De même, une connaissance de l'évolution des précipitations convectives et stratiformes associées aux systèmes convectifs permettrait d'améliorer notre compréhension du bilan de chaleur.

Si le cycle de vie des systèmes convectifs, la dynamique méso-échelle ainsi que l'évolution des fractions convectives/stratiformes sont relativement bien appréhendés et communs à l'ensemble des cas rencontrés, la définition d'un MCS par Houze reste cependant floue. De nombreuses études ont en effet mis en évidence différents types de systèmes convectifs de méso-échelle : les lignes de grains, les Complexes Convectifs de Méso-échelle (MCC), les Systèmes Convectifs Organisés (OCS), les systèmes convectifs en forme de V etc... Les différences entre ces différents types de systèmes résident en particulier dans la propagation, dans l'évolution de l'organisation ainsi que dans l'interaction des MCS avec leur environnement.

– Les lignes de grains

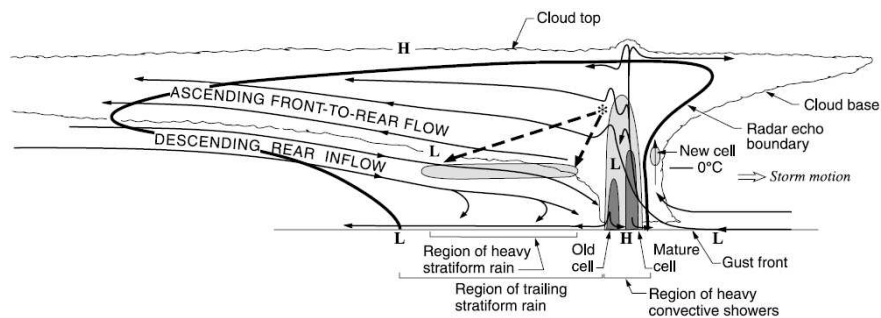


FIGURE 2.5 – Modèle conceptuel d'une ligne de grains d'après Houze et al. [1989].

Les lignes de grains peuvent se retrouver aussi bien dans les latitudes moyennes (Houze et al. [1989]), que dans les tropiques (Zipser [1977]). Grâce aux campagnes de mesures dans les régions tropicales (GATE, TOGA/COARE), ces systèmes ont pu être largement étudiés. Une définition a été proposée par Zipser [1977] : "Nuages de type cumulonimbus, organisés en ligne, associés à un front froid en surface, se déplaçant plus vite que l'air environnant de basses couches et dans la direction du vent dans l'air froid juste à l'arrière du bord d'attaque de la ligne de grains". La ligne de grains est constituée de deux parties : le front ou bord d'attaque correspondant à une zone de forte convection dans laquelle se forment de nouvelles cellules convectives. A l'arrière de ce bord se forme une zone de précipitations stratiformes de faible intensité, composée des cellules convectives se dissipant et pouvant s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres. La figure 2.5 illustre le modèle conceptuel d'un tel système convectif en phase de maturité. Zipser [1977] a mis en évidence l'existence au sein des lignes de grains de courants descendants croisant

des courants ascendants, alimentant ainsi le bord d'attaque convectif du système (figure 2.6). Ainsi par l'intermédiaire de ces courants descendants et ascendants, la partie convective du système subit l'influence de la région stratiforme. On parle alors de systèmes auto-entretenus.

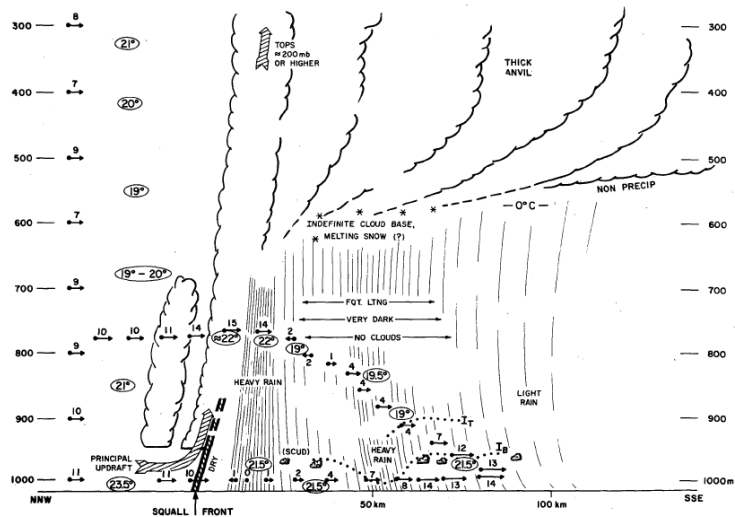


FIGURE 2.6 – Modèle conceptuel d'une ligne de grains d'après Zipser (1977).

– Les complexes convectifs de méso-échelle (MCC)

Les complexes convectifs de méso-échelle ont été introduits par Maddox [1980] afin d'étudier les très gros MCS se produisant sur les grandes plaines des Etats-Unis. Maddox a ainsi défini une classe de MCS selon des critères de durée de vie, de taille et de forme de systèmes (tableau 2.1).

Physical characteristics	
Size:	A—Cloud shield with continuously low IR temperature $\leq -32^{\circ}\text{C}$ must have an area $\geq 100\,000\text{ km}^2$ B—Interior cold cloud region with temperature $\leq -52^{\circ}\text{C}$ must have an area $\geq 50\,000\text{ km}^2$
Initiate:	Size definitions A and B are first satisfied
Duration:	Size definitions A and B must be met for a period $\geq 6\text{ h}$
Maximum extent:	Contiguous cold cloud shield (IR temperature $\leq -32^{\circ}\text{C}$) reaches maximum size
Shape:	Eccentricity (minor axis/major axis) ≥ 0.7 at time of maximum extent
Terminate:	Size definitions A and B no longer satisfied

TABLEAU 2.1 – Tableau résumant les caractéristiques physiques d'un MCC définies par Maddox [1980].

Selon la définition donnée par Maddox, les MCC font partie des systèmes convectifs de méso-échelle possédant la taille la plus importante : une surface nuageuse supérieure à $100\,000\text{ km}^2$ au seuil de température de 241 K , et supérieure à $50\,000\text{ km}^2$ au seuil de 221 K pendant 6 h au minimum. De plus, le MCC doit présenter une forme circulaire lorsque le système atteint sa taille

maximale au cours de son cycle de vie. Il a été montré que les MCCs se forment en particulier en fin de journée, atteignent leur maximum de surface au cours de la nuit générant de fortes précipitations, et ne durent qu'une dizaine d'heures (Laing et Michael Fritsch [1997]).

Une multitude de climatologies de MCC a été réalisée dans de nombreuses régions du monde : Velasco I. [1987] en Amérique du Sud, Augustine et Howard [1991] aux Etats-Unis, Miller et Fritsch [1991] sur le Pacifique, Laing et Fritsch [1993] en Asie. Laing et Michael Fritsch [1997] ont généralisé l'étude des MCCs à l'ensemble du globe. 400 MCCs environ ont été répertoriés pour chaque année d'étude, sur toutes les régions continentales et tous les océans tropicaux.

– Les Systèmes Convectifs Organisés (SCO)

Plus régionalement, et dans un objectif de documenter les systèmes convectifs de méso-échelle sur l'Afrique de l'Ouest, Mathon et Laurent [2001] ont défini une nouvelle classe de systèmes convectifs : les Systèmes Convectifs Organisés (SCO). Ces systèmes correspondent aux systèmes convectifs les plus précipitants, caractérisés par un fort développement vertical et une vitesse de propagation importante de leur partie la plus active (plus de 10 m/s). La classe des SCO comprend l'essentiel des MCC et des lignes de grains. Ces systèmes convectifs expliquent 93% des précipitations de la région de l'Afrique Soudano-Sahélienne. Mathon et Laurent [2001] ont dénombré 237 SCO en moyenne par an sur la zone du Sahel central, expliquant 80% de la couverture nuageuse au seuil 233 K.

Toutes ces études des systèmes convectifs de méso-échelle n'auraient pu être réalisées sans l'avènement des satellites d'observation spatiale dédiés à la météorologie.

2.2 Historique sur l'observation spatiale des phénomènes convectifs de méso-échelle

Les cycles de l'eau et de l'énergie (systèmes convectifs, distribution de la vapeur d'eau et du bilan radiatif) ont été parmi les premières priorités dans l'Histoire de l'observation terrestre depuis l'espace. Il apparaissait notamment crucial de documenter ces problématiques dans les régions tropicales continentales et océaniques pour lesquelles la connaissance des phénomènes climatiques restait méconnue. Le potentiel de l'observation spatiale apparaît dès 1948 avec un programme de recherche de l'US Air Force opérant par des tirs de fusées V2 et Aerobee afin d'étudier la haute atmosphère. Les premières photographies des systèmes convectifs vus depuis l'espace ont été publiées dans un papier de Delbert Crowson intitulé *Cloud Observations from rockets*.

Les premiers satellites américains Vanguard 2 (1959) et Tiros I (1960) embarquaient des appareils photos dédiés à l'observation de la couverture nuageuse. Les données collectées par les satellites Tiros ont permis les premières études sur les systèmes convectifs. Sadler [1964] a ainsi



FIGURE 2.7 – Photographie d'un système convectif par une fusée V-2 le 26 Juillet 1948.

compris le potentiel des satellites Tiros dans l'observation des régimes de circulations atmosphériques dans les régions tropicales. En particulier, le satellite TIROS I a permis les premiers suivis de cyclones et de systèmes convectifs dans les tropiques. La figure 2.7 illustre le suivi d'un cyclone entre le 13 et le 19 mai 1960 dans la mer d'Arabie. Grâce à ces observations spatiales, les chercheurs en climatologie ont ainsi pu s'intéresser au cycle de vie des orages tropicaux dès le début des années 1960. Les figures 2.8 et 2.9 montrent les différentes phases du cycle de vie d'un cyclone, avec ses phases d'initiation, de maturité et de dissipation (Fritz et Winston [1962]).

Ces résultats ont ouvert la voie au développement de l'observation spatiale dédiée à la météorologie et le premier satellite géostationnaire ATS-1 (Applications Technology Satellite) lancé en 1966, embarquait un instrument dédié à l'étude météorologique parmi d'autres instruments de télécommunication. La "spin scan cloud camera" fournissait alors des images pleine résolution de la terre et de sa couverture nuageuse toutes les 20 minutes. Dès lors l'étude des systèmes nuageux nécessita la mise en place d'outils dédiés. Fujita fut un pionnier dans ce domaine. Fujita et Bohan ont ainsi produit une première animation montrant le déplacement des systèmes convectifs. Fujita appliqua une analyse des champs de déplacements des nuages aux données ATS afin d'investiguer la formation des structures nuageuses, ainsi que les structures de circulations atmosphériques à différentes échelles. En particulier, il montra comment l'écoulement du jet stream était modifié par la formation des orages convectifs. Ces calculs de champs de déplacement nuageux ont également permis une avancée notable dans les prévisions météorologiques (Leese et al. [1971]) .

En 1974, Fujita calcula les mouvements nuageux sur l'océan Atlantique tropical pendant la campagne de mesure GATE. Pour cette campagne la technologie des satellites ATS était remplacée par le satellite SMS1-GOES permettant, outre un suivi des nuages convectifs à haute résolution, une estimation de leur hauteur, grâce à une imagerie infrarouge embarquée. Durant cette campagne de mesure, grâce aux données de GOES-1 et à un suivi manuel des systèmes convectifs à partir de ces données (Aspliden et al. [1976]), différentes études ont permis un saut dans la compréhension

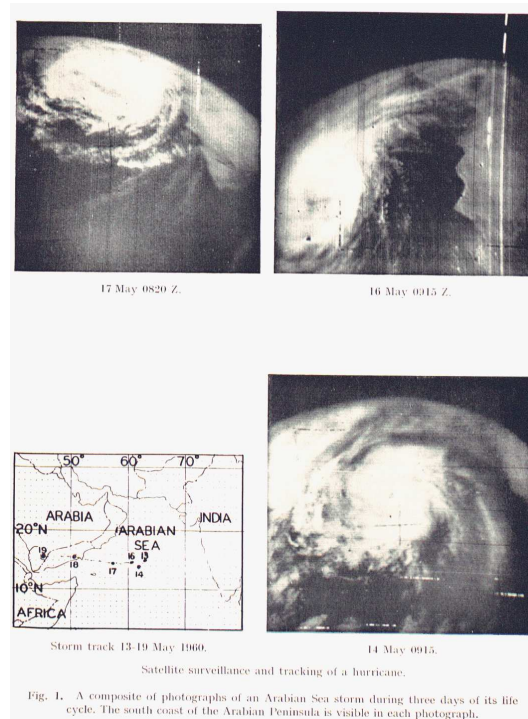


Fig. 1. A composite of photographs of an Arabian Sea storm during three days of its life cycle. The south coast of the Arabian Peninsula is visible in each photograph.

FIGURE 2.8 – *a- Photographie d'un cyclone à partir de Tiros-I sur la mer d'Arabie pendant 3 jours de son cycle de vie. b- Trajectoire du cyclone*

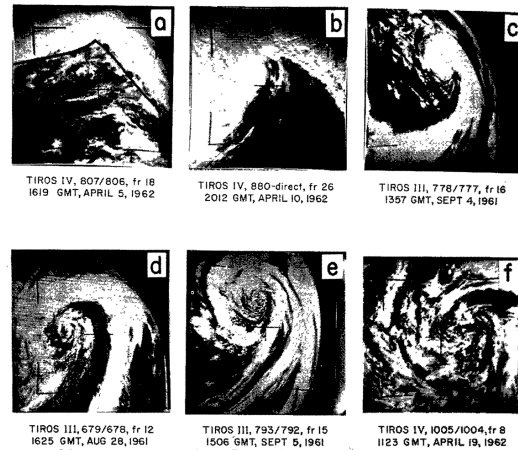


Fig. 6. Cloud pictures of several cyclones in various stages of development over the Atlantic Ocean. (a) and (b) open wave stage; (c) early occlusion stage; (d) and (e) mature occlusion; (f) decaying stage. The pictures in (c) and (e) are cloud patterns of the same storm about 25 hours apart in time (After Fritz, 1963a).

FIGURE 2.9 – *Photographies à partir de Tiros-III de différents cyclones à divers phases de développements sur l'océan Atlantique Fritz et Winston [1962].*

des systèmes convectifs. L'imagerie de GOES pendant l'expérience GATE en 1974, puis Meteosat-1 lancé 3 ans plus tard, ont alors permis de suivre de manière semi-automatique des systèmes convectifs de méso-échelle au cours de leur cycle de vie, ouvrant la voie à de multiples études sur ces événements convectifs.

2.3 Etat de l'art sur les méthodes de suivi des systèmes convectifs de méso-échelle

Durant l'expérience GATE, Aspliden et al. [1976] ont suivi manuellement les lignes de grains sur l'ensemble de leur cycle de vie dans l'objectif de préciser le nombre de lignes de grains survenant en Afrique de l'Ouest pendant la période de mousson. Cette étude permet de caractériser les paramètres de ces lignes de grains : leurs lieux ainsi que les instants de déclenchement et de dissipation, leur durée de vie, leur vitesse de propagation etc... Martin et Schreiner [1981] ont généralisé ce suivi manuel à l'ensemble des systèmes convectifs d'Afrique de l'Ouest et de l'océan Atlantique Est durant l'expérience GATE. Dans cette étude, les systèmes convectifs sont définis comme étant des systèmes nuageux présentant une zone de convection profonde au cours de leur cycle de vie. Desbois et al. [1988] ont également utilisé une méthode de suivi manuel des systèmes convectifs en Afrique de l'Ouest à partir de l'imagerie METEOSAT pour les mois de juillet 1983, 1984 et 1985. Ces études ont permis d'obtenir des premiers résultats sur l'observation des systèmes convectifs par satellite géostationnaire. Cependant, les méthodes de suivi manuel sont difficilement reproductibles, sont dépendantes d'un opérateur et ne peuvent être réalisées que sur de petits jeux de données. Afin de s'affranchir de ces problèmes, différentes méthodes de détection et de suivi automatiques des systèmes convectifs ont été élaborées afin de caractériser de manière reproductible les aspects morphologiques (taille, température minimum, vitesse de propagation...) des systèmes convectifs sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les algorithmes de suivis automatiques des systèmes convectifs reposent sur deux principales étapes :

- Une étape de détection des systèmes convectifs, consistant en une segmentation ou clusterisation des nuages convectifs dans l'imagerie infrarouge des satellites géostationnaires. Cette opération va permettre de définir l'ensemble des pixels représentant les amas nuageux ou clusters nuageux.
- Une étape de suivi afin de créer un lien entre les clusters appartenant à un même système convectif dans une séquence d'images infrarouges. Ainsi, chaque système convectif détecté peut être défini le long de son cycle de vie par ses caractéristiques morphologiques, sa trajectoire, sa vitesse de propagation etc...

2.3.1 La détection des systèmes convectifs de méso-échelle

2.3.1.1 Détection par seuillage en température de brillance

Une des méthodes de détection la plus fréquemment utilisée consiste à appliquer un seuil en température de brillance sur l'imagerie infrarouge. Dans ce type de méthodologies, deux critères sont définis en fonction du type de systèmes convectifs étudiés et de la latitude de la zone observée : un seuil en température de brillance Tb_{seuil} et un seuil de surface minimum S_{seuil} . Ainsi, les objets convectifs sont alors définis comme étant les zones connexes de pixels de température de brillance inférieure ou égale à Tb_{seuil} dont la taille est supérieure à S_{seuil} . Duvel [1989a] et Duvel

[1989b] ont établi une classe de nuages hauts correspondant à l'ensemble des pixels de l'imagerie infrarouge METEOSAT pour lesquels la température de brillance est inférieure à 253 K. Pour ce seuil de 253 K, l'altitude au sommet du nuage est de 8 km environ selon le modèle de transfert radiatif LOWTRAN (Kneizys et al. [1983]) pour une atmosphère tropicale standard (tableau 2.10).

R (W m ⁻² sr ⁻¹)	EBBT (K)	z (km)	P (mb)
1	207	14.7	139
2	233	10.8	255
3	252	8.1	373
4	267	5.5	525
5	280	3.1	707

FIGURE 2.10 – *Tableau des équivalences entre les radiances infrarouges, les températures de brillance et l'altitude correspondante des émissions calculées en utilisant le modèle de transfert radiatif de LOWTRAN pour une atmosphère tropicale standard.*

Williams et Houze [1987], dans leur étude de la convection se produisant dans la région de Bornéo, ont élaboré une segmentation des systèmes convectifs par un seuil en température de brillance de 213 K appliqué à l'imagerie infrarouge et respectant une taille minimum de 5 000 km². Le seuil de température de brillance a été fixé à 213 K car il permet une segmentation des surfaces nuageuses précipitantes observées pendant l'expérience WMOMEX (Winter Monsoon Experiment). Maddox [1980], dans son étude des complexes convectifs de méso-échelle a utilisé un seuil de 241 K pour l'identification des nuages hauts associés à la convection. Arnaud et al. [1992], Miller et Fritsch [1991], Mapes et Houze [1993] et Laing et Michael Fritsch [1997] ont utilisé des seuils en température similaires dans leurs études de systèmes convectifs. Machado et al. [1998] ont proposé un seuil de détection en température de 245 K équivalent à une hauteur de nuage de 9 km. De leur côté, Velasco and Necco [1980] ont établi un intervalle de température de brillance entre 235 K et 238 K afin de définir les situations convectives. Machado et al. [1992] ont étudié la dépendance des surfaces des systèmes convectifs pour différentes régions tropicales et saisons. Il apparaît que les seuils en température de brillance dans un intervalle de 240 K à 255 K affectent peu la surface couverte des systèmes convectifs, ainsi que leur durée de vie.

Mathon et Laurent [2001] utilisent une méthode d'identification des systèmes convectifs similaire, en appliquant 3 seuils de température sur l'imagerie infrarouge : un seuil de température de 213 K pour discriminer la convection très profonde, un seuil de 233 K couramment utilisé pour l'estimation des précipitations dans les tropiques (Arkin [1979]) et un seuil de 253 K pour l'observation des cumulonimbus, des cirrus plus ou moins transparents et de nuages épais dont le sommet se situe dans les niveaux moyens de l'atmosphère. Cette méthodologie permet d'étudier les inclusions existant entre les clusters convectifs détectés par ces 3 seuils et ainsi d'avoir accès à une analyse volumique des systèmes convectifs. Pope et al. [2008] dans une analyse de la convection dans le nord de l'Australie pendant la période de mousson (septembre-avril), ont appliqué une

même méthodologie mais en utilisant des seuils en température de brillance de 208 K et 235 K. Rowell et Milford [1993] proposent des critères objectifs pour détecter des lignes de grains :

- existence d’une aire du système convectif présentant une température de brillance inférieure à 213 K.
- distance séparant les contours avant du nuage au seuil définis à 233 K et 213 K inférieure à 40 km, permettant de traduire physiquement la condition de bord d’attaque de la ligne de grains.

2.3.1.2 Détection par seuillage thermique adaptatif

Dans un objectif de détecter le plus précocement possible les phases de développement vertical des systèmes convectifs, des techniques de seuillages adaptatifs ou segmentation par seuillage hiérarchique des images infrarouges ont été élaborées. Le principe de ces méthodes est d'utiliser un seuil de température dépendant du stade de développement vertical de chacun des systèmes.

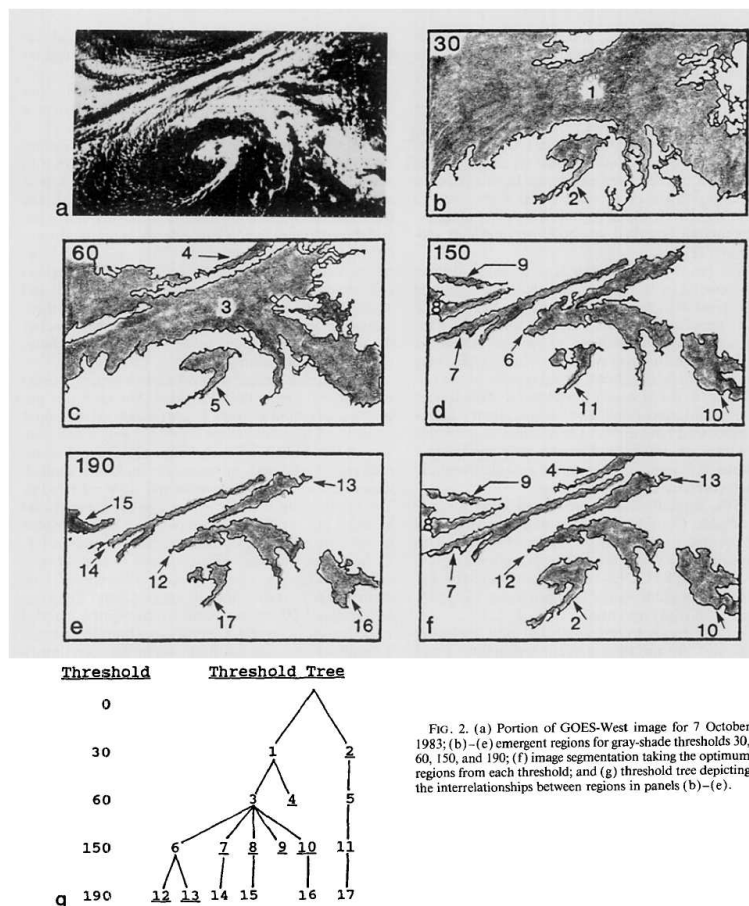


FIGURE 2.11 – Illustration de l’arbre descriptif des inclusions entre les cellules détectées à un seuil de température donné et au seuil immédiatement plus froid.

Peak et Tag [1994] ont ainsi développé une approche de segmentation hiérarchique consistant à seuiller les images IR sur une grande plage de température de brillance et de construire un arbre descriptif des inclusions existant entre les cellules détectées à un seuil de température donné et au seuil immédiatement plus froid. Les cellules utilisées pour représenter les systèmes nuageux observés dans une image donnée sont alors celles correspondant à des branches simples. La figure 2.11 illustre cette méthode pour une image IR du 7 octobre 1983 issue de GOES-West. Différents seuils en niveau de gris (30, 60, 150 et 190) ont été appliqués sur cette image. Les auteurs proposent une amélioration de cette méthode en utilisant un réseau de neurones afin de décider s'il est préférable de définir un seul nuage à un seuil donné, ou s'il est préférable de diviser ce nuage en plusieurs nuages au seuil immédiatement plus froid. C'est le cas du système 6 au seuil de niveau de gris de 150 et des systèmes 12 et 13 au seuil de niveau de gris de 190 (figure 2.11).

Lakshmanan et al. [2009] ont élaboré un algorithme du même ordre. Cependant, le seuil de température initial n'est pas fixé mais correspond au seuil de température le plus froid rencontré dans l'imagerie IR permettant de détecter au moins 1% des pixels, dans une limite d'une température de 255 K. Le seuillage adaptatif est alors réalisé par un pas de température de 2 K.

Morel et al. [2000] se sont inspirés de la méthode développée par Peak et Tag [1994] pour développer une méthode de segmentation automatique des systèmes convectifs européens appelée RDT (Rapid Developing thunderstorm), afin de suivre les cellules convectives en utilisant un seuil de plus en plus froid à mesure que les systèmes convectifs se développent verticalement. Cette méthodologie repose sur 4 paramètres principaux :

- Un seuil de température chaud correspondant à la limite chaude des seuils de température possible fixé à 263 K.
- Un seuil de température froid correspondant à la limite froide des seuils de température possible fixé à 218 K.
- Un pas de température qui est l'incrément de température séparant les seuils de température possibles de 5 K.
- Un seuil de surface de 30 km².

Cette méthode permet de détecter un système nuageux dès l'instant où sa surface au seuil de température chaud est supérieure au seuil de surface. La température de seuillage est alors fonction du type de nuage rencontré. Afin de choisir le seuil de température pour détecter chaque système nuageux, Morel et al. [2000] introduisent une règle basée sur la méthode des tours. Un nouveau paramètre, Δ_{Tour} , est alors défini à 3 K. Le seuil de température utilisé pour détecter un système nuageux donné est alors le seuil de température le plus froid pour lequel l'écart entre ce seuil et le minimum de température de la cellule est supérieur ou égal à Δ_{Tour} .

Afin d'identifier les cellules convectives, Lanza et Conti [1995] segmentent l'imagerie infra-rouge par un seuil de 253 K, puis utilisent la méthode des K-Means afin d'identifier les systèmes convectifs. L'algorithme est basé sur une procédure itérative :

1. Initialiation des germes correspondant aux centres de gravité initiaux des clusters.

2. Assignment de chaque pixel libre au cluster possédant le germe le plus proche par une méthode de distance euclidienne géométrique.
3. Identification du nouveau germe de chaque cluster nuageux en calculant leur centre de gravité.
4. Répétition de l'opération jusqu'à ce que deux itérations successives se répètent.

Une distance minimum d_{min} représentant la valeur maximale des distances euclidiennes acceptables a été introduite ainsi qu'un critère de compacité maximum du cluster segmenté.

Boer et Ramanathan [1997] ont élaboré un algorithme appelé 'Detect and Spread' dans un objectif de classification des systèmes nuageux. Cet algorithme permet ainsi d'analyser la contribution des différents types de nuages à la couverture nuageuse, l'étude du cycle diurne de chacune des classes des systèmes ainsi que les caractéristiques des systèmes nuageux. Cet algorithme repose sur l'hypothèse que des pixels voisins à un noyau convectif dans une image satellite appartiennent au même système physique et que la profondeur optique de la couverture nuageuse décroît entre le noyau convectif jusqu'aux limites du système nuageux. Cette méthodologie va permettre de partager une couverture nuageuse définie par un seuil chaud par des systèmes nuageux identifiés en son sein.

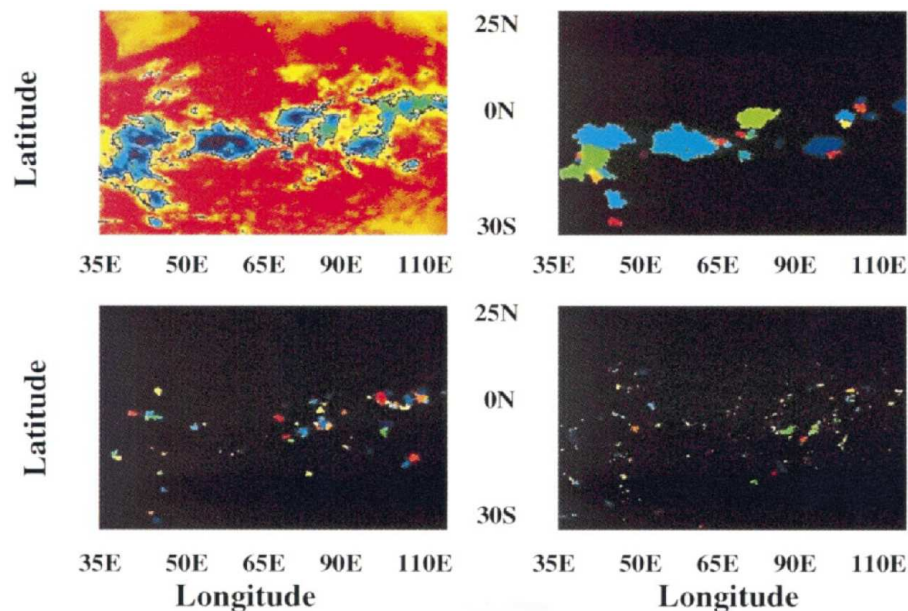


FIGURE 2.12 – Illustration de la segmentation de l'imagerie infrarouge par la méthode DAS : (a) Image Infrarouge INSAT-1B du 1^{er} Janvier 1989 à 0000 UTC, avec le seuil de 255K déterminant les limites du nuage haut, (b) classe I correspondant à la convection très profonde pénétrant la haute troposphère, classe II correspondant aux nuages hauts dans la haute troposphère, et (d) la classe III représentant les débris convectifs. Une couleur arbitraire est attribuée à chaque nuage individuel.

Pour cela, et afin de n'être que peu dépendant d'un seuil de détection arbitraire, l'algorithme 'Detect and Spread' possède 2 étapes principales appelées itérativement :

- Une étape de détection des nuages à un seuil donné.
- Une étape de dilatation des nuages déjà segmentés dans l'étape 1 jusqu'à un seuil plus chaud. Cette étape va permettre d'associer l'ensemble des pixels voisins à un cluster.

La première détection des premières cellules convectives ou graines est effectuée au seuil de 240 K. Puis les germes identifiés sont dilatés en 3 étapes jusqu'au seuil de 260 K (246,6 K, 253,2 K, 260 K). L'introduction de nouveaux germes est assurée en appliquant un seuil de 255 K sur l'imagerie infrarouge. L'ensemble des germes est alors dilaté jusqu'au seuil de 275 K etc... ainsi de suite jusqu'au seuil de 285 K. Ce seuil chaud a été établi dans un objectif de classification ciel clair/ciel nuageux. Cette méthodologie a été utilisée et modifiée par Roca et Ramanathan [2000] et Roca et al. [2005] afin de se limiter à la segmentation des systèmes convectifs tropicaux (figure 2.12). En utilisant les satellites géostationnaires METEOSAT et INSAT, la couverture nuage haut a été délimitée par un seuil chaud fixé à 255 K.

2.3.1.3 Détection par l'utilisation des multi-canaux

D'autres méthodes de détection des nuages convectifs sont basées sur l'utilisation de plusieurs canaux des géostationnaires. Ainsi, dans un effort d'analyse des cellules convectives générant de fortes précipitations en Grèce, Feidas et Cartalis [2001] appliquent un algorithme de classification des cellules convectives en utilisant les canaux visibles, vapeur d'eau et infrarouge de METEOSAT. Les cellules convectives classifiées "nuage convectif" correspondent à des amas nuageux présentant des comptes numériques inférieurs à 130 dans le canal visible, 213 dans le canal infrarouge et 202 dans le canal vapeur d'eau.

Zinner et al. [2007] ont développé un algorithme de détection et de suivi, appelé Cb-TRAM (Cumulonimbus TRacking And Monitoring), avec pour objectif de suivre les cellules convectives des régions de latitude moyennes de l'initiation à leur phase de maturité en utilisant les informations des canaux visibles, vapeur d'eau ($6,2 \mu\text{m}$) et infrarouges ($10,8 \mu\text{m}$) de l'instrument SEVIRI embarqué à bord de METEOSAT Second Generation. En plus des données satellitaires, l'algorithme prend également en compte les données issues des analyses de modèles de l'ECMWF concernant les températures de la tropopause. Trois phases de la convection sont identifiées de manière indépendante :

- **La phase d'initiation de la convection dans les basses couches** : pour la détection de l'initiation, un champ de disparité est appliqué sur l'imagerie HRV afin d'obtenir une première estimation des structures nuageuses à l'instant $t+1$. Une image HRV_{fg} est alors créée. La différence de champ $\Delta\text{HRV} = \text{HRV} - \text{HRV}_{fg}$ permet alors de rechercher les cellules qui ont perdu ou gagné en surface nuageuse entre l'image à l'instant t et l'image estimée à l'instant $t+1$. Le champ de disparité ne permet pas seulement de détecter les déplacements de structures nuageuses mais permet également d'identifier l'évolution de surfaces des cellules. Un ΔHRV positif indique alors une croissance des cellules, alors qu'un ΔHRV négatif indique une décroissance des cellules. Pour s'assurer de la détection des cellules convectives en

phase de développement dans les basses couches, le ΔHRV positif doit être accompagné d'un refroidissement dans l'imagerie vapeur d'eau.

- **La phase de refroidissement rapide** : l'étape 2 consiste à détecter le développement vertical rapide de la convection à partir des données vapeur d'eau. Les nuages détectables dans ce canal correspondent à des nuages hauts et leur refroidissement rapide entre deux images vapeur d'eau est expliquée par un accroissement rapide des cellules convectives. Comme pour l'étape précédente, une estimation de l'image vapeur d'eau est calculée et soustraite à l'image courante pour obtenir ΔWV . Un seuil est alors appliqué sur ΔWV afin de ne sélectionner que les cellules présentant un développement vertical important.
- **La phase de maturité des cumulonimbus** : les phases de maturité de la convection correspondent ici à des nuages dont la température de brillance est proche de la température de la tropopause. Un seuil est alors appliqué sur les images vapeur d'eau correspondant à $T_{trop}-1,5$ K. La température de tropopause T_{trop} est obtenue par les analyses en sortie des modèles de l'ECMWF à 0000 UTC, 0600 UTC, 1200 UTC et 1800 UTC tous les jours.

Les trois phases de développement de la convection sont alors combinées afin de créer un masque décrivant l'ensemble des développements des cellules convectives. Cet algorithme, à finalité météorologique, a pour objectif de détecter au plus tôt l'initiation de la convection. Cependant, un tel algorithme n'est pas adapté à des études climatologiques, notamment dans un objectif de caractérisation du cycle de vie des systèmes convectifs.

2.3.2 Suivi des systèmes convectifs de méso-échelle

Des méthodologies de suivi manuel des systèmes convectifs ont été élaborées par Aspliden et al. [1976], Desbois et al. [1988]. Cependant, ces méthodes impliquent un coût d'exploitation peu en accord avec une utilisation opérationnelle ainsi qu'une forte dépendance des systèmes convectifs détectés et suivis liée à l'opérateur. Pour palier les inconvénients des méthodes de suivi manuels, différentes méthodologies de suivi automatiques des systèmes convectifs ont été élaborées. On peut distinguer deux grandes classes de suivi : la première classe s'appuie sur une utilisation de critères géométriques, et la deuxième utilise l'information de déplacement des structures nuageuses. Dans la première classe, on trouve la méthode basée sur une analyse de recouvrement entre systèmes nuageux. Cette méthodologie est la plus fréquemment utilisée dans les algorithmes de suivi. Les méthodologies basées sur l'utilisation de champs de déplacements apparents, sur les suivis de points particuliers dans les images, ou sur les maxima de vorticit   appartiennent à la deuxième catégorie de suivi.

2.3.2.1 Suivi par la méthode de recouvrement

Williams et Houze [1987], Arnaud et al. [1992] ont élaboré une méthode de suivi basée sur le recouvrement géographique entre clusters. Ces méthodes font l'hypothèse que les systèmes convectifs observés dans une séquence d'images infrarouges se déplacent suffisamment lentement

pour que les systèmes détectés dans deux images successives et représentant un même système se recouvrent géographiquement.

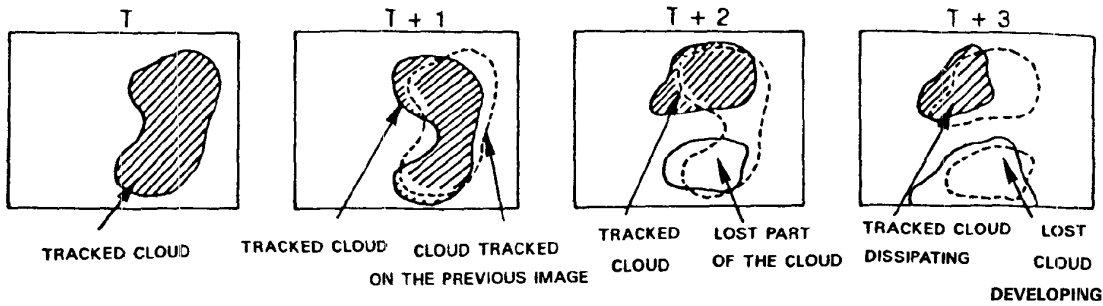


FIGURE 2.13 – Illustration de la méthode de suivi par recouvrement entre clusters aux instants t et $t+dt$ (Arnaud et al. [1992]).

Dans cette méthode, l'initiation et la dissipation d'un système convectif correspondent à des clusters ne possédant aucun recouvrement avec un cluster dans l'image précédente et dans l'image suivante respectivement. Afin de prendre en compte les différents cas possibles, une recherche "directe" et "inverse" des correspondances est appliquée. La recherche des correspondances 'directe' consiste à rechercher le système convectif au pas de temps $t+dt$ possédant le recouvrement maximum avec un système convectif au pas de temps t . La recherche des correspondances "inverses" va rechercher le système convectif au pas de temps t ayant la surface de recouvrement maximum avec un système convectifs au pas de temps $t+dt$. Le suivi d'un système convectif est établi lorsque ces deux analyses respectent un certain critère de recouvrement minimum afin de ne pas produire de liens entre des cellules qui n'ont pas lieu d'être. Ce critère est dépendant du type (cellules convectives, complexes convectifs de méso-échelle, lignes de grains) et de la taille des systèmes étudiés, de la résolution temporelle des satellites géostationnaires. Machado et al. [1998] concluent ainsi que le suivi des systèmes convectifs d'une taille inférieure à $10\,000\text{ km}^2$ n'est pas satisfaisant avec ces méthodes lorsque la résolution temporelle des images géostationnaires est supérieure à 3h. Dans le cadre de la campagne de mesure WMOMEX, Williams et Houze [1987], la résolution temporelle du satellite GMS-1 utilisé était de 3h. Le critère de recouvrement entre deux clusters convectifs a alors été fixé à 50% de leur surface. Cependant, si le recouvrement des clusters dépasse $10\,000\text{ km}^2$, le suivi du système convectif peut être effectué. Mathon et Laurent [2001], pour l'étude des systèmes convectifs d'Afrique de l'Ouest réalisée à l'aide de METEOSAT utilisent les mêmes critères de recouvrement. En fonction du type de système étudié, ce critère peut varier suivant les études : ainsi, Machado et al. [1998] utilisent un critère de recouvrement minimum de 15%, Arnaud et al. [1992] de 50%, Feidas et Cartalis [2001] de 30% pour un suivi des cellules convectives et Evans et Shemo [1996] de 40%.

Cependant, comme l'illustre la figure 2.13, cette méthodologie peut donner lieu à des divisions et de fusions des systèmes convectifs générées artificiellement. Si dans la recherche 'directe', l'algorithme trouve une correspondance entre deux clusters convectifs A et B distincts à l'instant t et un seul et même cluster à l'instant $t+1$, le cluster possédant la taille la plus petite disparaîtra par

fusion à l'instant t . Inversement, dans une recherche "inverse", l'algorithme trouve une correspondance entre un cluster à l'instant t et deux clusters distincts à l'instant $t+1$. La recherche "inverse" indiquera que ces deux clusters à l'instant $t+1$ ne faisaient qu'un au pas de temps précédant. Dans ce cas, arbitrairement, il est décidé que le plus petit des clusters naît à cet instant $t+1$. Boer et Ramanathan [1997], dans l'élaboration de "Detect And Spread", proposent une approximation elliptique des systèmes convectifs. Le suivi des systèmes convectifs est alors basé sur l'inclusion des centres de gravité dans ces ellipses. Les phénomènes de fusion et de division des systèmes convectifs sont également pris en compte dans cet algorithme.

Ces divisions et de fusions des systèmes convectifs posent problème notamment lorsqu'on veut s'intéresser à l'étude du cycle de vie des systèmes convectifs. Ces problèmes seront étudiés en détail dans le chapitre 3 par des analyses statistiques.

Pour palier ces problèmes de divisions et de fusions, Yang et al. [2004] proposent une méthode basée sur un critère de recouvrement entre cellules convectives couplé à un critère basé sur les paramètres morphologiques des MCS. Les paramètres morphologiques des MCS utilisés sont les suivants : la surface, la compacité (description de la déformation du nuage), un historique de la trajectoire du nuage, une description de Fourier du nuage, ainsi qu'un indice de description de la texture du nuage. Ces indices descriptifs sont ensuite combinés et représentés par un vecteur. L'idée de cette méthodologie repose sur l'idée que les paramètres morphologiques d'un même système évoluent relativement lentement entre deux pas de temps. Pour s'assurer d'un bon suivi, le critère de recouvrement et le critère de similarité doivent alors être inférieurs à un seuil fixé. Cependant, même si cette méthode semble améliorer les statistiques de systèmes convectifs décrivant un cycle de vie cohérent, les problèmes de divisions et de fusions des MCS restent entiers.

Le suivi des cellules convectives dans un cadre météorologique peut poser problème lorsque la taille des cellules est faible. Dans l'algorithme Cb-TRAM (Zinner et al. [2007]), la taille minimum des cellules convectives est de 50 km^2 . Pour pouvoir suivre de si petits objets, Zinner et al. [2007] utilisent une combinaison de deux méthodes de suivi. Dans un premier temps, des champs de déplacements apparents sont calculés pour chaque pixel d'une image permettant d'approximer les changements de comportements et de surfaces des cellules convectives. Pour chacune des cellules convectives détectées, une méthode de recouvrement est alors appliquée permettant de rechercher le recouvrement maximum entre une cellule détectée à un instant t avec les cellules extrapolées à l'instant $t-1$.

2.3.2.2 Suivi par utilisation des champs de déplacements apparents

Au début des années 1970, Endlich et al. [1971], et Leese et al. [1971] ont procédé à des calculs de déplacement de structures nuageuses à partir d'images visibles. L'apparition des canaux infrarouges ayant permis d'estimer la hauteur des nuages, Endlich et Wolf [1981] ont proposé une méthode appelée SATS (SRI Automatic Cloud Tracking) permettant d'estimer les vents troposphériques et de rechercher ainsi les meilleurs appariements possibles entre des amas de nuages hauts

détectés à 2 instants successifs. Le suivi élaboré est appliqué à des fenêtres de taille 7x7 pixels extraites d'images GOES, et est basé sur une technique de corrélation croisée (Leese et al. [1971]). Le suivi d'une fenêtre s'effectue en maximisant la corrélation calculée entre cette fenêtre et une fenêtre 7x7 centrée sur le même point à l'image $t+1$. Cette méthode a été reprise par Carvalho et Jones [2001] pour leur algorithme appelé MASCOTTE (Maximum Spatial Correlation Tracking Technique) en utilisant le satellite géostationnaire GOES-8 à la résolution temporelle de 1h. Le suivi d'un système convectif est alors effectué lorsque le cluster convectif à l'instant t possède le coefficient de corrélation spatial maximum et supérieur à 0,3 avec un cluster convectif à l'instant $t+1$. Cette valeur minimum de coefficient de corrélation assure selon les auteurs les meilleurs statistiques d'appariement entre clusters convectifs pour une fréquence temporelle de 1 h. Hongping et al. [2008] ont élaboré un algorithme appelé TRACER (Tracking and Recognition Algorithm for Thunderstorm Cloud-Cluster) utilisant la méthode du quad-tree. Cette technique permet de diviser un nuage en parts équivalentes et d'extraire pour chaque partie leurs paramètres morphologiques. Le suivi est alors établi par corrélation croisée. Cette méthode permet ainsi d'améliorer le suivi des systèmes nuageux de petites tailles possédant des vitesses de déplacement élevées.

2.3.2.3 Minimisation d'une fonctionnelle

Une autre méthodologie consiste à suivre des points caractéristiques (minimum de température de brillance, maxima de vorticité) d'une image à l'autre (Hodges [1994]-Hodges [1995]). Hodges et Thorncroft [1997] ont appliqué cette méthodologie au suivi des systèmes convectifs d'Afrique de l'Ouest. Le suivi des points particuliers est dépendante de deux contraintes : la première consiste à définir une distance de déplacement maximale physiquement autorisée. La deuxième exprime le fait que le déplacement et la direction des points caractéristiques ne subissent pas de variations brutales. Le suivi des points caractéristiques est alors effectuée en minimisant une fonction de coût. Cette méthode a  t e mise au point initialement pour le suivi de points caractéristiques dans des champs de modèles numériques et son application au suivi des MCS a nécessité un lissage des images infrarouges, dégradant ainsi la résolution spatiale de METEOSAT de 5 km à 150 km.

2.3.2.4 Suivi par la méthode des modèles déformables

Le caractère hautement déformable des structures convectives ont amené Papin et al. [2000] ont élaboré une méthodologie de suivi basée sur l'évolution d'un contour fermé en s'appuyant sur le formalisme des "ensembles de niveaux". Les déformations du contour de chaque système nuageux sont régies par une équation d'évolution agissant sur les points d'une surface implicite associée. Cette méthodologie de suivi se décompose en deux étapes : une première étape permet d'estimer les champs de déplacement 2D des contours du système nuageux entre deux instants successifs. Ainsi, l'ensemble des points du contour d'un nuage sont propagés dans le sens du flot estimé. La seconde étape utilise les informations radiométriques. Afin de rechercher le plus précisément possible les frontières du système nuageux, le contour du nuage est déformé en comparant

les températures de brillance internes avec les températures de brillance autour de ce système. Le signe de la différence entre ces deux températures à un point donné du contour détermine ainsi l'expansion ou la contraction du nuage. Cette méthodologie a l'avantage d'être peu dépendante du choix d'un critère et Papin et al. [2000] ont montré qu'elle permettait un suivi des systèmes convectifs cohérent dans le temps. Cependant, peu de situations convectives ont été analysées et les problèmes de divisions et de fusions des systèmes convectifs n'ont pas été résolus par cet algorithme.

2.3.2.5 Conclusion

Au cours de ce paragraphe, un large panel de méthodes de détection et de suivi des systèmes convectifs de méso-échelle a été présenté. Selon le type de systèmes convectifs étudié et selon la finalité d'utilisation, les techniques employées peuvent varier. Ainsi, alors qu'un simple seuil en température de brillance est largement utilisé pour une étude climatique des systèmes convectifs (à l'exception de la méthode "Detect And Spread" Boer et Ramanathan [1997]), les méthodologies ayant une finalité météorologique vont privilégier des techniques plus complexes afin de détecter le plus précocement possible la formation des systèmes convectifs. L'ensemble de ces méthodes ont permis une amélioration de notre compréhension des phénomènes météorologiques que sont les systèmes convectifs et de nombreuses climatologies régionales ou globales ont ainsi pu être établies. Cependant, dans le cas de l'étape de suivi des systèmes convectifs, on a pu observer que quelle que soit la méthodologie employée (recouvrement, corrélation, minimisation d'une fonctionnelle, modèle déformable), les algorithmes génèrent des divisions et de fusions artificielles des systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie engendrant alors une caractérisation instable de leur paramètre morphologique. Certaines études ont essayé d'y répondre, avec peu de succès, en proposant divers techniques de traitement d'images. L'objectif de notre étude étant de caractériser le bilan d'énergie le long du cycle de vie des systèmes convectifs, un nouvel algorithme de détection et de suivi des MCS basé sur une segmentation 3D de l'imagerie infrarouge a donc été élaboré permettant de répondre à cette problématique.

2.4 Introduction à l'algorithme de suivi des systèmes convectifs TOOCAN

Au cours de ce paragraphe et afin d'explicitier la méthodologie de l'algorithme TOOCAN (Tracking Of Organized Convection Algorithm using a 3 dimensional segmentatioN), les données issues du canal $10,8\ \mu\text{m}$ de METEOSAT Seconde Génération sont utilisées. Ces données possèdent une résolution spatiale de 3 km et temporelle de 15 minutes. L'annexe A présente les caractéristiques techniques de la série des satellites METEOSAT et de MSG en particulier. L'étude est alors réalisée pour la période de mousson juin, juillet, août, septembre 2006 pour la région d'Afrique de l'Ouest.

2.4.1 Méthodologie de l'algorithme de détection et de suivi TOOCAN

2.4.1.1 Distribution des clusters dans l'imagerie infrarouge

Comme il a été vu dans le paragraphe précédent, les systèmes convectifs de méso-échelle peuvent être identifiés dans l'imagerie infrarouge par leur température de brillance correspondant à leur température de sommet de nuage. En appliquant un seuil de température de brillance à l'imagerie infrarouge, il est ainsi facile de segmenter les systèmes convectifs. L'analyse de la distribution des clusters convectifs dans l'imagerie infrarouge doit permettre de mieux appréhender statistiquement l'impact de la segmentation de l'imagerie infrarouge par différents seuils en température de brillance sur la taille et la durée de vie des systèmes convectifs, et ainsi d'introduire la segmentation 3D élaborée pour l'algorithme TOOCAN (paragraphe suivant). Pour cela, l'imagerie infrarouge de la période de juillet 2006 est segmentée en utilisant cinq seuils en température de brillance différents : 190 K, 200 K, 210 K, 220 K, 235 K.

La figure 2.14 illustre des distributions cumulées et normalisées de la population ainsi que de la fraction de couvert nuage haut en fonction des tailles des clusters convectifs segmentés par les différents seuils. La distribution des populations montre qu'il y a peu de dépendance du nombre de clusters segmentés au seuil en température de brillance, à l'exception du seuil 190 K. Ainsi, dans l'intervalle 200 K-235 K, 50% de la population est expliquée par des clusters de taille inférieure à 10 pixels. Pour le seuil 190 K, les clusters de moins de 3 pixels expliquent 50% de la population. De plus, on peut observer qu'aucun cluster convectif segmenté par ce seuil de 190 K ne dépasse une taille de 500 pixels. Contrairement à la distribution des populations, la distribution cumulée de la fraction de couverture nuage haut montre une dépendance au seuil en température de brillance.

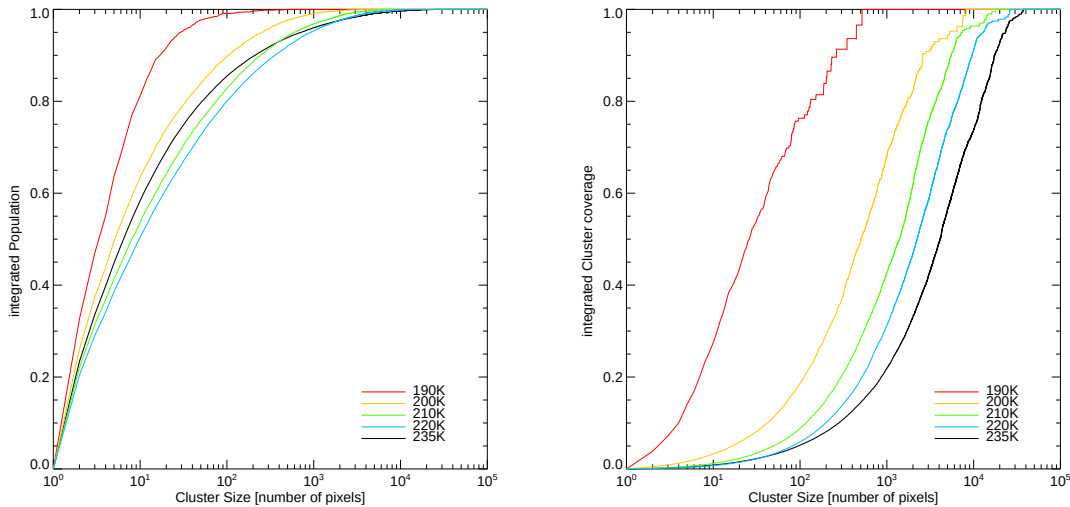


FIGURE 2.14 – *a- Distribution cumulée et normalisée de la population en fonction des surfaces des clusters convectifs segmentés par différents seuils en température. b- Fraction de la couverture nuage haut.*

Ainsi, 50% de la fraction nuage haut est expliquée par des clusters convectifs possédant une taille inférieure à 350 pixels pour un seuil de 200 K, alors que pour un seuil de 235 K, elle est expliquée par des clusters convectifs de taille inférieure à 2 100 pixels. En comparant les deux distributions, on peut également observer que moins de 1% des clusters convectifs dont la surface définie par le seuil 235 K dépasse une taille de 10 000 km² mais compte pour 20% de la couverture nuage haut.

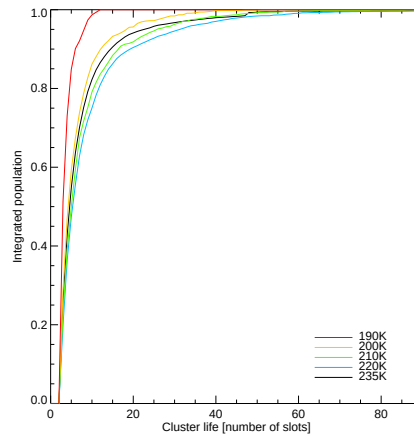


FIGURE 2.15 – *Distribution cumulée et normalisée de la population en fonction des durées de vie des graines convectives segmentées par différents seuils en température.*

Dans un objectif d'évaluer la sensibilité des durées de vie des systèmes convectifs aux différents seuils en température de brillance, une segmentation simple en 3D de l'imagerie infrarouge est réalisée sur la période de juillet 2006. La figure 2.15 illustre une distribution cumulée et normalisée de la population des graines convectives en fonction de leur durée de vie. La distribution montre que 50% des graines convectives segmentées dans un intervalle 200 K-235 K sont expliquées par des durées de vie inférieures à 5 images. Pour cet intervalle, les durées de vie des graines convectives ne semblent pas dépendantes d'un seuil en température de brillance. Cependant, pour le seuil de 190 K, les graines convectives de durée de vie inférieure à 3 images comptent pour 50% de la population totale. Enfin, toujours pour ce seuil de 190 K, aucune graine convective ne dure plus de 12 images.

2.4.1.2 Fonctionnement de la segmentation 3D de l'algorithme TOOCAN

On a pu voir dans la partie consacrée à l'introduction au cycle de vie des systèmes convectifs, qu'une multitude de définitions existait concernant les systèmes convectifs (MCC, MCS, lignes de grains, SCO...). Afin d'élaborer un algorithme de détection et de suivi des systèmes convectifs, permettant de décrire efficacement leur évolution morphologique au cours de leur cycle de vie, il est nécessaire d'en donner une définition simple et reproductible pour l'ensemble des cas rencontrés. Un système convectif est ainsi défini comme possédant un noyau convectif de température de brillance froid auquel lui est associé sa partie stratiforme dans un domaine spatiotemporel. Pour

cela l'algorithme TOOCAN a été développé en prenant en compte une méthodologie de segmentation de l'imagerie infrarouge avec peu ou pas de dépendance à un seuil en température de brillance donné. L'algorithme Detect And Spread développé par Boer et Ramanathan [1997] et restreinte à la couverture nuage haut (Roca et Ramanathan [2000]) permet une segmentation de ce type dans l'imagerie infrarouge 2D. "Detect And Spread" est basé sur la méthode de croissance de régions (Salembier [2001]). Cette méthodologie détecte dans un premier temps des graines identifiant l'intérieur des régions et dans un deuxième temps étend ces graines jusqu'à occuper l'ensemble de l'espace disponible. L'ensemble des pixels voisins à une graine identifiée initialement est donc assigné à celle-ci en respectant des critères d'homogénéité.

La figure 2.16 schématise une coupe d'un cluster convectif dans une imagerie satellitaire 2D. On peut observer que le système est composé d'un noyau convectif associé à une partie stratiforme, se traduisant par un accroissement de la température de brillance au sein du système. En respectant ce critère d'accroissement de température, l'algorithme DAS va être ainsi capable, par un processus itératif de détection et de dilatation, d'associer le noyau convectif à sa partie stratiforme. La figure 2.16 illustre ce processus itératif.

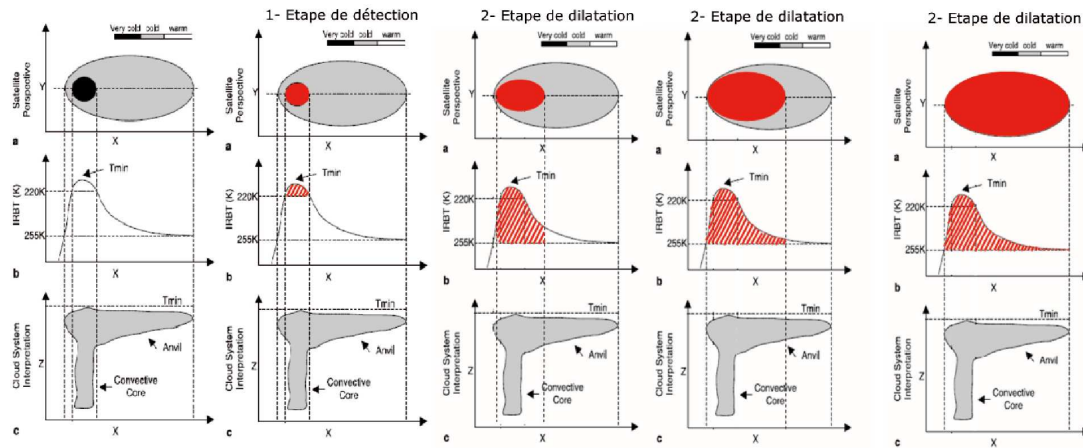


FIGURE 2.16 – Illustration des étapes de détection et de dilatation de la méthode "Detect And Spread" appliquée à un cluster convectif. La ligne du haut schématise une coupe d'un nuage convectif observé depuis l'imagerie infrarouge. La partie la plus convective du cluster convectif est représenté par la couleur rouge. La ligne du milieu correspond à la distribution de la température de brillance à l'intérieur de ce nuage convectif. La ligne du bas représente une coupe verticale de la structure du cluster convectif

Grâce à cette méthodologie de segmentation 2D de l'imagerie infrarouge, la couverture nuage haut peut être partagée par différents clusters convectifs.

Cependant la méthode de suivi des systèmes convectifs de l'algorithme DAS est basée sur la méthode de recouvrement, conduisant à des divisions et des fusions artificielles des systèmes convectifs. L'évolution des paramètres morphologiques d'un grand nombre de systèmes convectifs est alors affecté par ces problèmes méthodologiques. Dans l'objectif de dépasser ces problèmes,

nous avons été amenés à élaborer une méthodologie de suivi des systèmes convectifs en mouvement basée sur une segmentation 3D. La méthode DAS est dans ce cas toujours restreinte à la couche de nuages hauts opaques, mais est étendue dans le temps de manière à travailler dans un espace spatiotemporel 3D (2D + temps). L'objectif de cette technique de segmentation dans le domaine spatiotemporel de l'imagerie infrarouge est de permettre de décrire de façon cohérente le cycle de vie des systèmes convectifs, tout en s'affranchissant des étapes traditionnelles de suivi (méthodes de recouvrement, de déplacement de champs apparents etc...). La figure 2.17 montre une schématisation d'un système convectif observé par satellite pour des pas de temps successifs. Ce schéma montre ainsi l'évolution de la partie convective (rouge) et du nuage haut associé au MCS.

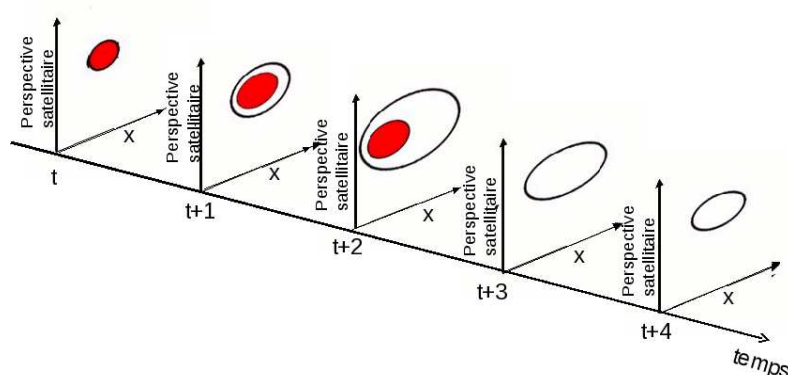


FIGURE 2.17 – Schématisation de l'évolution d'un système convectif tel qu'observé par l'imagerie satellitaire pour des pas de temps successifs. La partie rouge représente la zone convective du système alors que le nuage haut associé au MCS est représenté par le trait noir.

Une image spatio-temporelle est alors générée par les 96 images journalières de METEOSAT Seconde Génération (figure 2.18-a). L'objectif de l'algorithme TOOCAN va alors être de fragmenter la couverture nuage haut définie par un seuil de 235K dans l'espace et dans le temps afin d'identifier des systèmes convectifs. La figure 2.18-b montre la segmentation du volume d'images infrarouges par un seuil de 235K. Les couleurs représentent ici les différents boucliers nuage haut que l'algorithme TOOCAN va s'appliquer à fragmenter.

Partant du principe que les pixels voisins à un noyau convectif détecté dans l'imagerie infrarouge appartiennent au même système physique et que la profondeur optique de la couverture nuageuse décroît du noyau convectif jusqu'aux frontières du nuage haut (cirrus fin) dans le domaine spatiotemporel, la méthodologie de l'algorithme TOOCAN va alors rechercher le nuage haut associé au noyau convectif par une multitude d'étapes itératives de détections combinées à des croissances de régions. Les trois étapes de détection, d'identification de l'enveloppe nuage haut et de dilatation appelées itérativement sont décrites ci-dessous :

1. Une Détection 3D des noyaux convectifs individuels dans le domaine spatiotemporel est dans un premier temps effectuée. Cette étape implique de rechercher l'ensemble des pixels

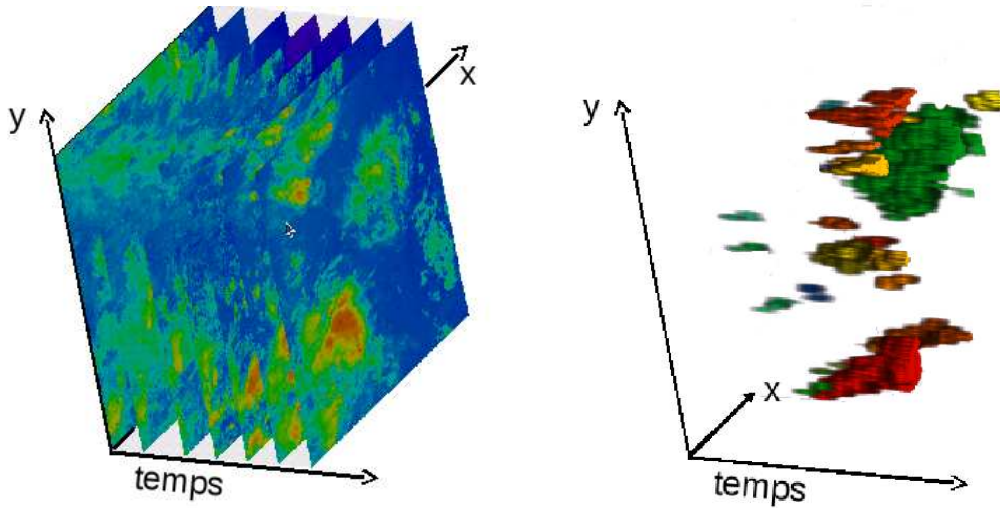


FIGURE 2.18 – a- Illustration d'une imagerie infrarouge 3D dans le domaine spatio-temporel. b- Segmentation de l'imagerie infrarouge 3D dans le domaine spatio-temporel par un seuil de 235K.

dont la température de brillance n'excède pas un certain seuil en température et n'appartenant pas à un nuage déjà identifié. Chaque nouveau noyau convectif reçoit un label qui lui est propre.

2. Une identification 3D de l'enveloppe nuage haut 5K plus chaude.
3. Une dilatation 3D des noyaux convectifs dans le domaine spatiotemporel jusqu'à atteindre les limites de l'enveloppe nuage haut. Cette étape assigne l'ensemble des pixels disponibles aux noyaux convectifs initialement détectés dans l'étape 1. Cette étape est arrêtée lorsque l'ensemble des pixels appartenant à l'enveloppe nuage haut sont assignés à un noyau convectif. La croissance des graines convectives est réalisée en utilisant un opérateur morphologique 3D 10-connectivité (figure 2.19) ; 8-connectivités pour le domaine spatial et 2-connectivité pour le domaine temporel (1 pour le passé et 1 pour le futur). Ici, on utilise le terme de pixel même si l'opérateur morphologique 3D est appliqué à un voxel (pixel en 3 dimensions). Chaque pixel de la graine convective est alors dilaté par cet opérateur.

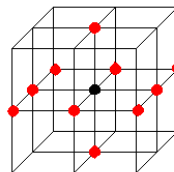


FIGURE 2.19 – Illustration de l'opérateur morphologique 10-connectivité utilisé pour l'étape de dilatation

Une première détection des noyaux convectifs est réalisée à un seuil de T_b de 190 K dans l'imagerie spatio-temporelle. Une fois que les noyaux convectifs sont identifiés, les frontières de

la graine convective sont étendues jusqu'à atteindre les limites de l'enveloppe nuage haut opaque définie par un seuil de température de brillance plus élevé. Un processus itératif de détection et de dilatation des systèmes convectifs débute alors. Les noyaux convectifs sont identifiés par des étapes multiples de détection partant d'un seuil de 190 K à 235 K avec un pas de détection de 5 K. Ainsi, l'introduction de nouveaux noyaux convectifs est assurée à chaque pas de détection. Pour chacune des étapes de détection, un seuil de température de brillance 5 K plus chaud est appliqué à l'imagerie IR, permettant d'identifier l'enveloppe nuage haut. Chaque noyau convectif initialement détecté est alors étendu dans le domaine spatiotemporel jusqu'à atteindre les frontières de cette couverture nuage haut (figure 2.20). Le processus itératif s'arrête lorsque le seuil de température de 235K est atteint. L'algorithme TOOCAN possède deux critères discriminants lors de l'étape de détection :

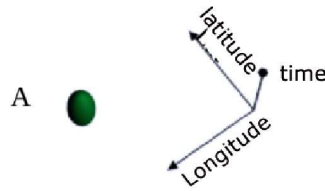
- un critère sur la durée de vie minimum que peut atteindre un noyau convectif appliqué lors des étapes détection. Le seuil de durée de vie a été établi à 3 images (45min dans l'imagerie MSG), dans l'objectif de suivre des systèmes convectifs possédant un cycle de vie complet, avec une phase d'initiation, une phase de maturité et une phase de dissipation.
- un critère basé sur la surface minimum atteinte par le noyau convectif est appliqué également lors des étapes de détection dans le domaine spatiotemporel et a été fixé à 75 pixels, c'est-à-dire 25 pixels par images, dans un objectif de ne segmenter que des systèmes possédant un certain degré d'organisation. Ce seuil est sélectionné sur les éléments robustes établis dans le paragraphe 2.4.1.1. Ainsi, si l'on se réfère à la figure 2.14, entre 30% et 40% de la population des clusters convectifs est expliquée par une taille des clusters supérieure à 25 pixels, pour un intervalle de température de brillance compris entre 200 K et 235 K, soit plus de 90% de la couverture nuage haut. Pour un seuil de 190 K, seul 7% de la population des clusters convectifs est expliquée par ce seuil de 25 pixels. Une dilatation appliquée à un objet de 25 pixels par un opérateur morphologique 8-connectivité va impliquer une croissance de cet objet de 24 pixels. Une dilatation d'objets de plus petite taille impliquerait au minimum un doublement de leurs tailles, ce qui pourrait être préjudiciable en terme de segmentation de la couverture nuage haut.

Il est à noter qu'aucun critère discriminant n'est appliqué lors de l'étape de dilatation des noyaux convectifs, de telle sorte que cette étape de dilatation dans l'espace spatiotemporel va permettre d'aller rechercher les phases d'initiation des systèmes convectifs et les phases de dissipation avec une grande précision.

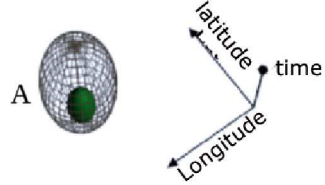
La figure 2.20 illustre de façon schématique les étapes de segmentation spatio-temporelle des systèmes convectifs par l'algorithme TOOCAN. Les graines convectives détectées dans l'imagerie spatio-temporelle sont représentées par les couleurs. La partie grillagée représente les limites du nuage haut à chaque étape itérative correspondant à la zone dans laquelle les graines convective préalablement détectées vont être étendues. Afin de simplifier le propos, seules deux étapes itératives sont représentées dans cette illustration. A la première étape de détection des graines convectives à 190 K, seule une graine est détectée, la graine A. Un seuil de température de brillance 5 K plus élevée, soit 195 K, est alors appliqué afin de déterminer les limites du nuage haut. La graine A

Etape n°1 du processus itératif

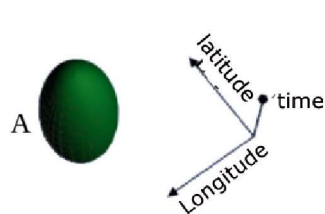
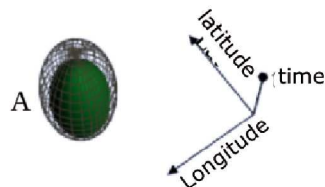
a- Détection des graines convectives à 190K



b- Identification de l'enveloppe nuage haut 5K plus chaude

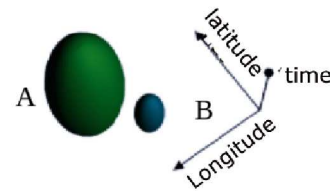


c- Dilatation 3D des graines convectives jusqu'à atteindre les frontières de l'enveloppe nuageuse

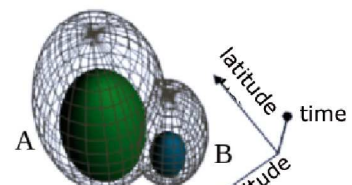


Etape n°2 du processus itératif

a- Détection 3D des graines convectives à 195K



b- Identification 3D de l'enveloppe nuage haut 5K plus chaude



c- Dilatation 3D des graines convectives jusqu'à atteindre les frontières de l'enveloppe nuageuse

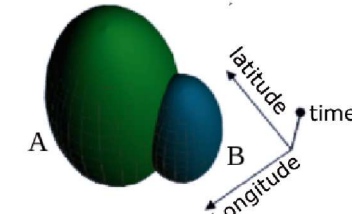
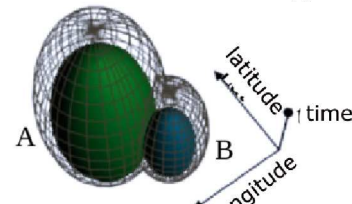


FIGURE 2.20 – Illustration de la méthodologie itérative de détection et de dilatation de l'algorithme TOOCAN ; chaque couleur représente une graine convective détectée par l'algorithme TOOCAN. L'enveloppe représentée par une grille représente les limites du nuage haut dans lequel les graines convectives vont être dilatées.

est alors étendue spatio-temporellement lors de l'étape de dilatation dans cet espace défini comme nuage haut. A l'étape de détection suivante établie par un seuil de 195 K, une deuxième graine, la graine B, est détectée en plus de la graine A déjà traitée. Un seuil de 200 K, 5 K plus élevé, est alors appliqué à l'imagerie infrarouge afin de déterminer les nouvelles limites du nuage haut. Les deux graines A et B sont alors dilatées simultanément dans cet espace nuage haut jusqu'à atteindre ses frontières. De cette manière, les graines A et B se partagent une enveloppe commune définie comme nuage haut dans l'espace et dans le temps.

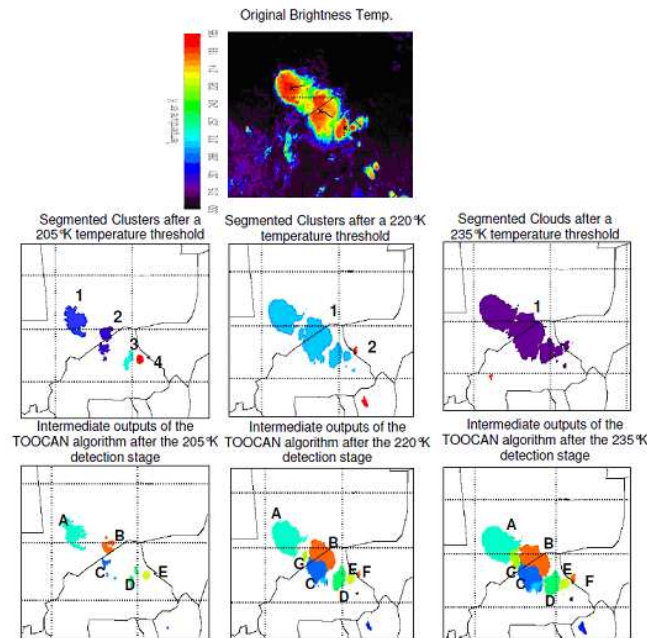


FIGURE 2.21 – *Haut en bas : image de température de brillance à 1600 UTC le 11 septembre 2006 ; clusters convectifs segmentés par un simple seuillage en température de brillance à 205 K, 220 K, et 235 K ; sorties intermédiaires de l'algorithme TOOCAN représentant les clusters convectifs après les étapes de détection à 205 K, 220 K et 235 K*

La figure 2.21 illustre une situation convective de septembre 2006 à 1600 UTC dans la région de Niamey. Afin d'analyser l'apport de la segmentation 3D de la méthodologie TOOCAN, les sorties intermédiaires de l'algorithme aux étapes de détection 205 K, 220 K et 235 K, sont comparées à une segmentation 3D de la situation convective réalisée par un simple seuil de détection en température de brillance à 205 K, 220 K et 235 K. A l'étape 205 K, on peut observer que la segmentation établie par un simple seuil identifie quatre graines convectives, alors que l'algorithme TOOCAN, pour un même seuil de détection a permis d'en segmenter cinq. A l'étape de détection de 220 K, une segmentation par simple seuil donne naissance à seulement deux clusters convectifs. De son côté, l'algorithme TOOCAN a permis de partager la couverture nuage haut définie à 220 K en six clusters convectifs. Au final, à l'étape 235 K, seul un cluster est identifié par la méthode de simple seuillage, alors que l'algorithme TOOCAN a permis d'identifier sept clusters convectifs. La figure 2.21 montre ainsi la segmentation de l'imagerie infrarouge par l'algorithme TOOCAN, en terme de systèmes individuels associant leurs noyaux convectifs à leur partie stratiforme.

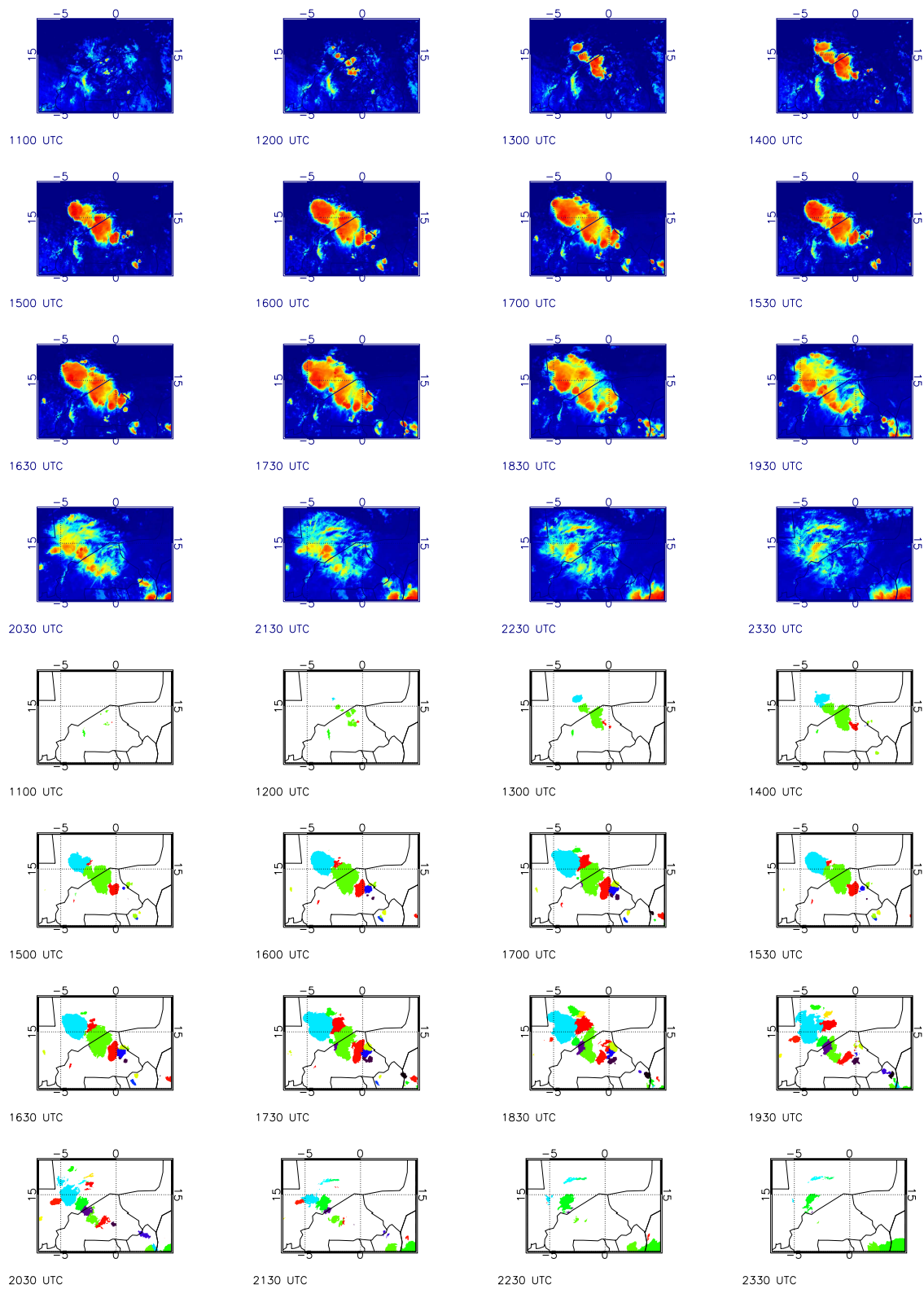


FIGURE 2.22 – haut : Imagerie infrarouge issue de MSG entre 1100 UTC et 2330 UTC le 11 septembre 2006 ; systèmes convectifs identifiés à partir de la segmentation effectuée par l'algorithme TOOCAN de l'imagerie infrarouge MSG (bas).

La détection et le suivi de cette situation convective du 11 septembre 2006 est illustrée figure 2.22 entre 1100 UTC et 2330 UTC. Les quatre premières lignes de la figure correspondent aux images infrarouges issues de METEOSAT Seconde Génération, alors que les quatre dernières lignes représentent les résultats de la segmentation de l'imagerie infrarouge par l'algorithme TOOCAN. Chaque couleur correspond à un système convectif individuel.

2.4.1.3 Les paramètres des systèmes convectifs déterminés par l'algorithme TOOCAN

En plus de sauvegarder l'ensemble des images segmentées, l'algorithme TOOCAN détermine un fichier de sortie comportant l'ensemble des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs. D'une part, les caractéristiques morphologiques intégrées des systèmes convectifs le long de leur cycle de vie sont déterminées et résumées dans le tableau 2.2 :

paramètres	grandeur physique
label du MCS dans l'image segmentée	
jours de début/fin de vie du MCS	(jour julien depuis le 1 ^{er} janvier de l'année de traitement)
heure locale de début/fin de vie du MCS	(h)
longitude de début/fin de vie du MCS	(degré)
latitude de début/fin de vie du MCS	(degré)
température minimum rencontrée au cours du cycle de vie du MCS	(K)
taille maximale rencontrée au cours du cycle de vie du MCS	(km ²)
taille cumulée du MCS le long de son cycle de vie	(km ²)

TABLEAU 2.2 – Description des paramètres morphologiques intégrés des systèmes convectifs déterminés par l'algorithme TOOCAN.

D'autre part les caractéristiques des systèmes convectifs sont déterminés pour chaque pas de temps de leur cycle de vie (tableau 5.1) :

paramètres	grandeur physique
jour	(jour julien depuis le 1 ^{er} janvier de l'année de traitement)
numéro de l'image	
heure locale	(h)
longitude/latitude du barycentre du MCS	(degré)
vitesse de déplacement du barycentre du MCS	(m/s)
température minimum du MCS	(K)
taille du MCS	(km ²)

TABLEAU 2.3 – Description des paramètres morphologiques des systèmes convectifs déterminés par l'algorithme TOOCAN au cours de leur cycle de vie.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire les systèmes convectifs de méso-échelle. Nous avons pu constater qu'une grande diversité de ces systèmes existait et avait pu être étudiée dans différentes régions du globe grâce notamment aux campagnes de mesures GATE et TOGA/COARE et à l'avènement des satellites. Un état de l'art des différentes méthodes de détection et de suivi de ces systèmes a été présenté dans le paragraphe 2.3. Il a permis de montrer qu'un grand nombre de méthodologies avait été élaboré en fonction du type de système étudié et de la finalité d'utilisation de ces algorithmes, qu'elle soit climatique ou météorologique. Ces méthodes de suivi ont permis des avancées importantes dans la compréhension des phénomènes météorologiques que sont les MCS, et de nombreuses climatologies ont ainsi pu être établies qu'elles soient régionales ou globales. Cependant, ces méthodes de suivi souffrent de limitations et ne permettent pas de caractériser de manière cohérente le cycle de vie de l'ensemble des systèmes convectifs. En effet, des divisions et des fusions artificielles des systèmes convectifs sont inhérentes à l'ensemble des méthodologies existantes et sont la cause d'instabilité concernant l'évolution des paramètres morphologiques des MCS au cours de leur cycle de vie. Notre étude ayant pour objectif de caractériser le cycle de vie des systèmes convectifs de mousson, il nous est donc apparu indispensable d'élaborer un nouvel algorithme permettant un suivi cohérent des systèmes convectifs. Pour cela, une nouvelle méthodologie appelée TOOCAN a été développée. TOOCAN est basée sur une segmentation spatio-temporelle de l'imagerie infrarouge. La détection et le suivi des systèmes convectifs sont alors réalisés dans une seule et unique étape. Cette méthode est ainsi capable de fragmenter une couverture nuage haut en systèmes convectifs dans un domaine 3D. De plus, elle permet d'aller rechercher le plus précocement possible l'initiation des systèmes convectifs et le plus tardivement possible leur phase de dissipation. Enfin, grâce à cette segmentation 3D, l'algorithme est capable de détecter et suivre l'ensemble des systèmes convectifs sans générer des divisions et des fusions artificielles. Le chapitre suivant propose une évaluation de cet algorithme TOOCAN sous forme de cas d'études et d'analyses statistiques.

Chapitre 3

Evaluation des résultats issus du nouvel algorithme de suivi TOOCAN

3.1 Introduction

Le caractère subjectif du suivi des systèmes convectifs de mousson révèle la difficulté à valider une nouvelle méthodologie de suivi. Cependant, il est important d'être en mesure d'évaluer sa capacité à segmenter ce pour quoi elle a été développée, et d'avoir ainsi une mesure de son efficacité et de sa fiabilité. (Bellerby [2006]). Diverses techniques peuvent être employées pour réaliser cette évaluation. Une nouvelle méthodologie de suivi peut ainsi être évaluée en comparant ses performances avec une méthode plus conventionnelle. Lakshmanan et al. [2003] et Han et al. [2009] dans l'évaluation d'une version améliorée de l'algorithme TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting), utilisent ainsi une méthodologie de prévision à court terme permettant de comparer le cluster segmenté par l'algorithme à un instant t avec le cluster issu de la prévision. Cependant, la prévision de la trajectoire d'un système convectif étant directement liée à la qualité de l'algorithme lui-même, cette analyse ne permet qu'une mesure approximative de l'efficacité d'une méthodologie de suivi. Une autre méthode d'évaluation consiste à mettre en comparaison les objets convectifs segmentés par un algorithme automatique de suivi avec une analyse humaine. Cette analyse humaine reste fastidieuse et ne peut être effectuée que sur un faible nombre de cas d'études. Ainsi, Johnson et al. [1998] ne procèdent à un calcul de pourcentage de correspondances correctes entre l'algorithme et l'analyse humaine que sur quatre cas de systèmes convectifs. De plus, cette technique ne permet pas de mesurer la robustesse de l'algorithme à traiter l'ensemble des cas pouvant être rencontrés. Machado et al. [1998] ont comparé plusieurs milliers de systèmes convectifs identifiés par son algorithme de suivi automatique avec une analyse produite par un météorologue. Ils en concluent ainsi à une difficulté des algorithmes de suivi basés sur une méthodologie de recouvrement à pouvoir identifier et suivre des systèmes convectifs de tailles inférieures à 100 km, soit environ 314 000 km². Ces systèmes contribuent pourtant fortement à la population totale des MCS, et également à la couverture nuage haut totale. Lakshmanan et Smith [2010], dans une problématique de prévision des systèmes convectifs, ont proposé

un calcul d'indice de qualité sur différentes méthodes de suivi des systèmes orageux. Cet indice prend en compte la durée de vie des systèmes convectifs, la linéarité des trajectoires des systèmes orageux ainsi qu'une 'préservation' des caractéristiques morphologiques des systèmes au cours du temps. Cette évaluation porte essentiellement sur la capacité des algorithmes de suivi à rechercher les bonnes correspondances entre clusters convectifs dans des cas de division ou de fusion.

Dans le cas de l'évaluation de la méthode TOOCAN, nous allons dans un premier temps nous appuyer sur une analyse statistique afin de mieux appréhender la faculté de TOOCAN à fragmenter une couverture nuage haut définie par un seuil de 235 K. Dans un deuxième temps, la sensibilité de segmentation de l'imagerie infrarouge au paramètre Δt correspondant aux pas de détections est mesurée. L'apport de la méthodologie TOOCAN est enfin discutée grâce à une comparaison des sorties de l'algorithme TOOCAN avec un suivi des systèmes convectifs basé sur la méthode de "recouvrement" (Mathon et Laurent [2001]).

3.2 Sensibilité de l'algorithme aux pas de détections : cas d'étude

Les paramètres de taille minimum et de durée de vie minimum ayant été fixés dans le chapitre précédent à 75 pixels et 3 images respectivement, la sensibilité de la segmentation de l'imagerie infrarouge par l'algorithme TOOCAN ne peut être évaluée que sur le critère des pas de détection. L'impact des différentes valeurs de Δt sur la qualité de la segmentation de l'imagerie infrarouge est mesuré par une analyse d'une situation convective ayant eu lieu le 11 septembre 2006 dans la région de Niamey. Les conditions météorologiques et nuageuses de ce cas d'étude ont été pleinement discutées dans l'article de Bouniol et al. [2010]. La figure 3.1 illustre cette situation convective. La première ligne correspond aux images infrarouges issues de MSG à 1300 UTC, 1530 UTC, 1800 UTC, et 2000 UTC. La seconde ligne représente les résultats d'une segmentation 3D de l'imagerie infrarouge par un simple seuil en température de brillance à 235 K. Les trois dernières lignes illustrent enfin les résultats d'une segmentation par TOOCAN pour des pas de détections de 2 K, 5 K et 10 K. Les différentes couleurs sont représentatives des différents systèmes convectifs identifiés et les lignes noires correspondent à leur trajectoire au cours de leur cycle de vie. Dans un premier temps, on peut observer qu'une segmentation par un simple seuil ne permet d'identifier qu'un seul système convectif tout au long de la séquence. Dans le cas de l'algorithme TOOCAN, et quel que soit le pas de détection utilisé, on peut observer que la couverture nuageuse est segmentée et partagée en une multitude de systèmes convectifs. On peut noter que chacun des pas de détection donne une segmentation cohérente de la couverture nuageuse et permet ainsi de retrouver les grandes structures de l'organisation convective. On peut néanmoins observer que plus le pas de détection est petit, plus le nombre de systèmes convectifs segmentés est important. Un pas de 2 K permet ainsi la détection de 41 systèmes convectifs, un pas de 5 K identifie 32 systèmes alors que le pas de 10 K segmente 26 systèmes. La variation du nombre de graines détectées selon le pas de détection utilisé implique alors une agrégation différente des pixels lors des étapes de dilatation. Pour la suite de l'étude, le pas de détection sera fixé à 5 K. En effet, pour des régions

d'études étendues et sur des périodes de plusieurs mois, un pas de détection de 2 K nécessite des temps de traitements trop importants, alors qu'un pas de détection de 5 K permet une segmentation cohérente des systèmes convectifs tout en respectant un temps de calcul raisonnable.

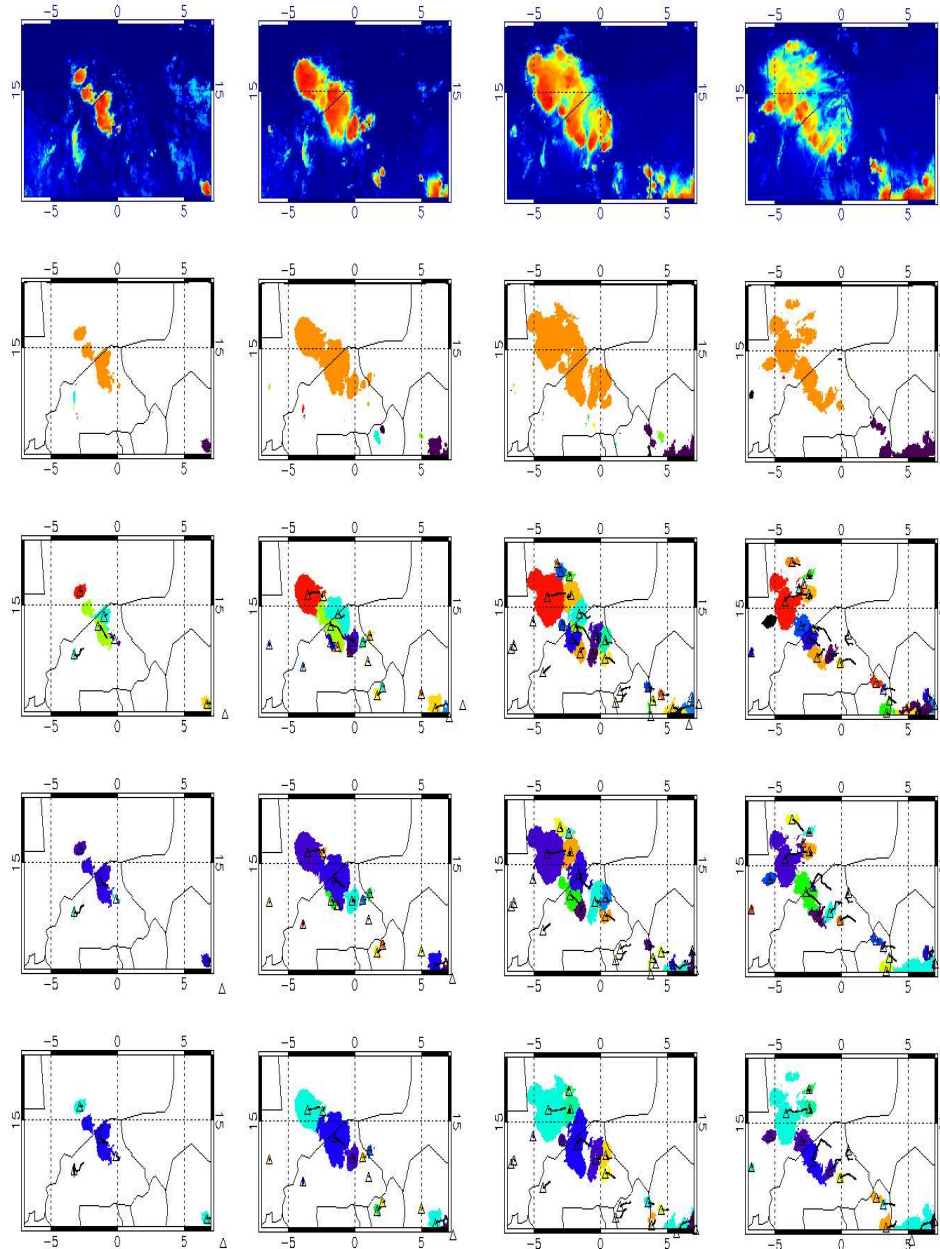


FIGURE 3.1 – Séquence d'images issues de l'imagerie satellitaire du 11 septembre 2006 montrant une situation convective au dessus de la région de Niamey. De haut en bas : images de température de brillance issues de MSG ; images segmentées issues de TOOCAN ; images segmentées issues de l'algorithme par "recouvrement".

3.3 Analyse statistique des sorties de l'algorithme TOOCAN

Afin d'affiner notre compréhension de la segmentation des systèmes convectifs de mousson par TOOCAN dans l'espace et dans le temps, une analyse statistique de la population des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN est réalisée et comparée aux résultats basés sur un simple seuil en température de brillance appliquée à l'imagerie IR 3D. L'analyse est effectuée sur la période de juillet 2006, pour la région Ouest Africaine. La figure 3.2 illustre le rapport de populations entre les clusters segmentés par TOOCAN et les clusters segmentés par un simple seuil de 235 K, en fonction de leur taille exprimée en pixels. La figure montre que pour des clusters de taille inférieure à 30 pixels, la population des clusters segmentée par un simple seuil domine. En revanche dans un intervalle de taille [30-10 000 pixels], un nombre plus important de clusters est segmenté par TOOCAN. Le maximum du rapport est atteint pour la classe 1 000-2 000 pixels, pour laquelle TOOCAN permet de segmenter 12 fois plus de clusters convectifs qu'une méthodologie simple seuil. Pour des clusters de surface supérieure à 20 000 pixels, le rapport des populations indique un plus grand nombre de clusters segmentés par la méthode de simple seuil en température de brillance. L'analyse est répétée, mais cette fois le rapport des populations est fonction des durées de vie des systèmes convectifs. La figure 3.2 montre qu'un plus grand nombre de systèmes convectifs de durée de vie inférieure à 8 images est segmenté par la méthode de simple seuil en Tb. La population des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN domine pour un intervalle de durée de vie compris entre 8 images et 72 images. Le maximum du rapport est atteint pour la classe [24 images - 28 images], pour laquelle TOOCAN segmente 6 fois plus de systèmes convectifs.

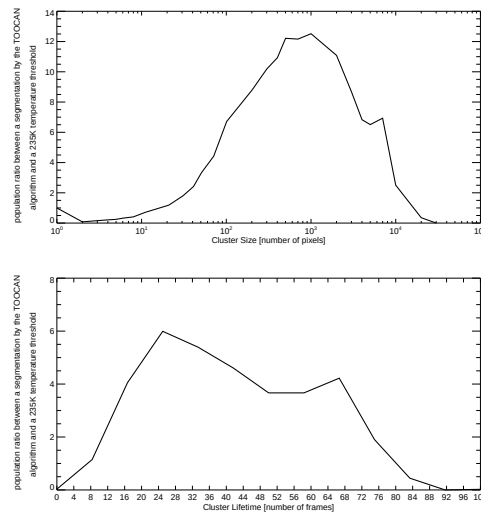


FIGURE 3.2 – Rapport de population entre les clusters convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN et les clusters segmentés par un simple seuil à 235K appliqué à l'imagerie infrarouge pour la période de juillet 2006 en fonction de la surface froide des clusters (haut) ; des durées de vie (bas).

Cette étude statistique nous a montré de quelle manière l'algorithme TOOCAN était capable de fragmenter une couverture nuage haut définie à 235 K en une multitude de systèmes convectifs.

3.4 Comparaison des sorties de la méthode TOOCAN avec l'algorithme de suivi basé sur le "recouvrement"

3.4.1 Introduction

La validation et l'évaluation d'un algorithme de suivi de systèmes convectifs sont rendues difficile par le caractère subjectif de la définition des systèmes convectifs. Cependant, nous avons défini dans le chapitre précédent un système convectif par son noyau convectif de température de brillance froide auquel lui est associé sa partie stratiforme dans un domaine spatiotemporel. La cohérence des systèmes convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN vis-à-vis de cette définition doit être évaluée. Dans les chapitres 4 et 5, cette cohérence sera mise en évidence par l'étude des propriétés climatiques des MCS. Une analyse de l'apport de la méthodologie TOOCAN par rapport à des algorithmes existants pour la caractérisation des systèmes convectifs est alors réalisée. Pour cela, les résultats de l'algorithme sont comparées aux systèmes convectifs identifiés par l'algorithme de 'recouvrement' (Mathon et Laurent [2001]) fréquemment utilisé dans les diverses études des systèmes convectifs. Pour rappel, la méthode de suivi par "recouvrement" consiste à délimiter un cluster convectif en appliquant un simple seuil de température de brillance (233 K) à l'imagerie infrarouge 2D. En utilisant une hypothèse de recouvrement, une recherche de correspondance entre clusters convectifs est effectuée d'une image à l'autre. Le suivi d'un système convectif est réalisé lorsque l'hypothèse de recouvrement est validée et dépasse un certain seuil (50% de la surface d'un cluster convectif). Dans un premier temps, une analyse de deux cas d'études est réalisée en Afrique et dans la région de la baie du Bengale. L'analyse de ces deux cas d'étude nous mènera ensuite à une étude plus systématique des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs pour des périodes et des régions étendues en Afrique de l'Ouest et en Inde.

3.4.2 Comparaison basée sur des études de cas

3.4.2.1 Cas d'étude en Afrique de l'Ouest

La figure 3.3 illustre une situation convective dans la région de Niamey en septembre 2006, pour les heures 1230 UTC, 1300 UTC, 1530 UTC, 1800 UTC, 2000 UTC, et 2030 UTC. La colonne de gauche correspond aux données infrarouges de MSG à ces différentes heures. La colonne au centre représente les images segmentées en sortie de l'algorithme TOOCAN, tandis que celle de droite illustre les images segmentées par l'algorithme de recouvrement. Chaque nuage convectif est représenté par une couleur qui lui est propre. Une ligne noire indique l'historique de leur trajectoire et le barycentre des systèmes est représenté par une croix.

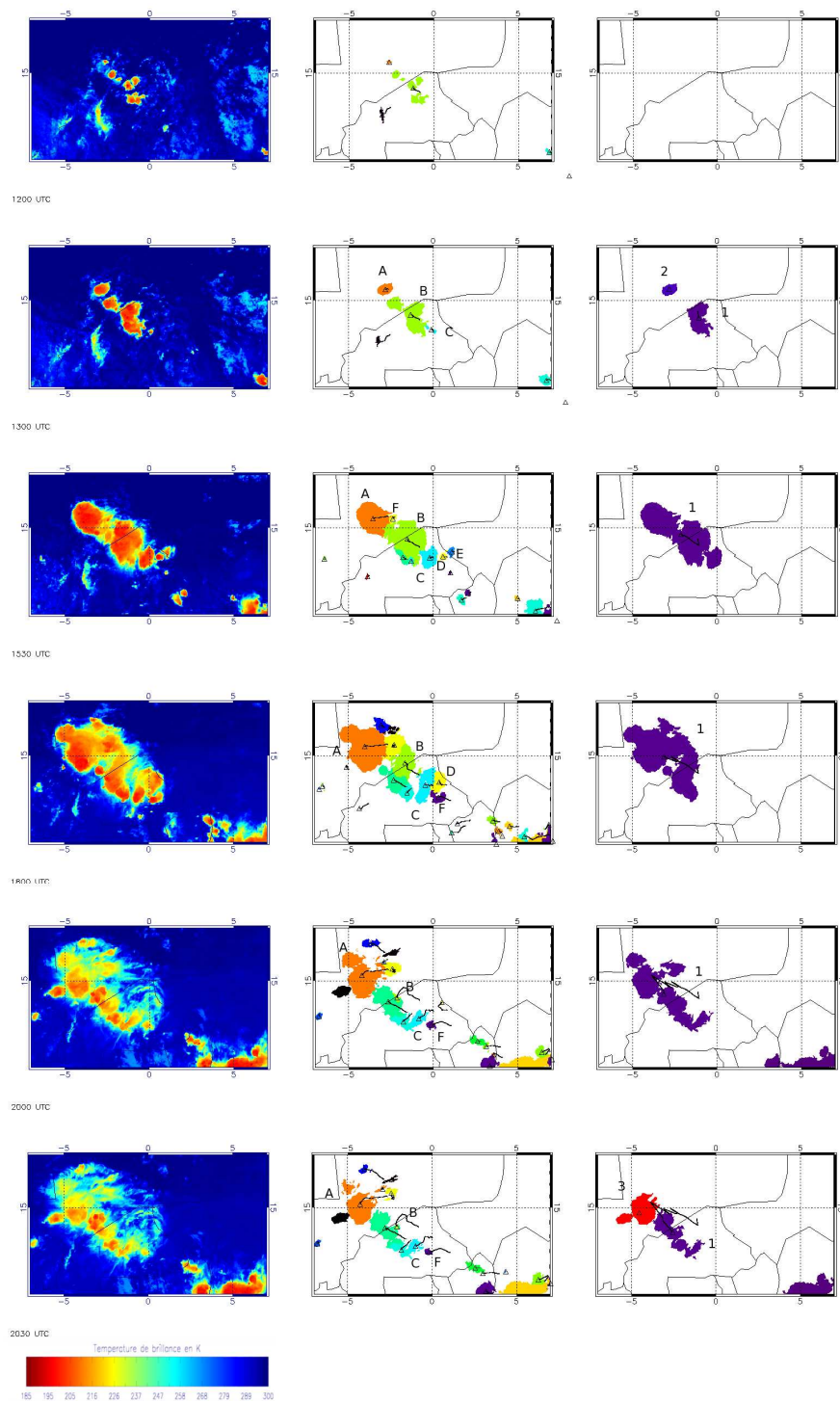


FIGURE 3.3 – Séquence d'images issues de l'imagerie satellitaire du 11 Septembre 2006 montrant une situation convective au dessus de la région de Niamey. De gauche à droite : Images de température de brillance issues de MSG ; images segmentées issues de TOOCAN ; images segmentées issues de l'algorithme par "recouvrement".

Avant de procéder à une analyse plus en profondeur, il est à noter que la segmentation proposée par l'algorithme TOOCAN semble être en accord avec ce que l'oeil humain ferait. Pour ce cas d'étude, TOOCAN segmente 32 systèmes convectifs (5 pour la méthode de recouvrement). Aucun de ces systèmes n'apparaît suite à des divisions ni ne disparaît suite à des fusions (2 cas de divisions et de fusions pour la méthode de recouvrement). Si l'on considère les sorties de l'algorithme de recouvrement, on peut observer au premier pas de temps à 1230 UTC, qu'aucun système convectif n'a pu être segmenté. Il faut attendre le pas de temps suivant (1300 UTC) pour que l'algorithme identifie deux systèmes convectifs. Au pas de temps suivant, on peut cependant observer que le système n° 2 est absorbé par le système n° 1. Enfin, entre 2000 UTC et 2030 UTC, un système n° 3 apparaît suite à une division du système n° 1.

Si l'on s'intéresse aux sorties de l'algorithme TOOCAN, et au système A en particulier, on peut observer que ce système correspond au système n° 2 détecté par l'algorithme de recouvrement à 1300 UTC, une partie du système n° 1 entre 1530 UTC et 2000 UTC et enfin au système n° 3 à 2030 UTC. De plus, on peut observer que l'algorithme TOOCAN réussit à détecter le système à 1230 UTC. Cette segmentation du système A permet de montrer que l'algorithme TOOCAN est capable de gérer des cas complexes de convection en éliminant les divisions et les fusions artificielles des systèmes convectifs de mousson. De plus les systèmes convectifs sont détectés plus tôt dans leur phase d'initiation et plus tard dans leur phase de dissipation (systèmes A et B). Dans le cas du système B, on peut noter que l'algorithme TOOCAN est capable d'agréger des cellules convectives indépendantes dans une image 2D (1230 UTC et 1300 UTC), mais qui se révèlent faire partie d'une même organisation convective. On peut enfin observer que les systèmes de petites tailles C, D, E et F segmentés par TOOCAN, ne peuvent être détectés par l'algorithme de recouvrement à cause du critère en taille ($5\,000\text{ km}^2$) inhérent à ce type de méthodologie.

Ces systèmes sont pourtant d'un intérêt spécial puisqu'ils ont été pénétrés par un avion de recherche lors de la campagne AMMA en 2006 (Bouniol et al. [2010]). Dans ce cas d'étude, on a pu observer que l'algorithme TOOCAN était capable de segmenter la convection tel que l'oeil le ferait à partir de l'imagerie spatiale. De plus, on a montré la capacité de l'algorithme à détecter très tôt l'initiation de la convection et très tard la dissipation, à segmenter les systèmes convectifs de petite taille, et à opérer un suivi de systèmes convectifs sans divisions ni fusions.

La figure 3.4 illustre une comparaison de l'évolution en taille du système convectif de mousson n° 1 déterminé par l'algorithme de recouvrement et du système convectif de mousson A déterminé par TOOCAN. Les points rouges et bleus représentent respectivement les différentes divisions et fusions qu'a rencontré le système convectif au cours de son cycle de vie. On peut constater que la surface maximum atteinte par le système n° 1 est de $160\,000\text{ km}^2$, alors que la surface maximum atteinte par le système A est deux fois plus petite ($79\,000\text{ km}^2$). La taille du système n° 1 augmente progressivement mais est bruitée par les différentes fusions et divisions rencontrées au cours de son cycle de vie. L'évolution du système A est beaucoup plus stable et est expliquée par les absences de fusions et de divisions au cours de son cycle de vie.

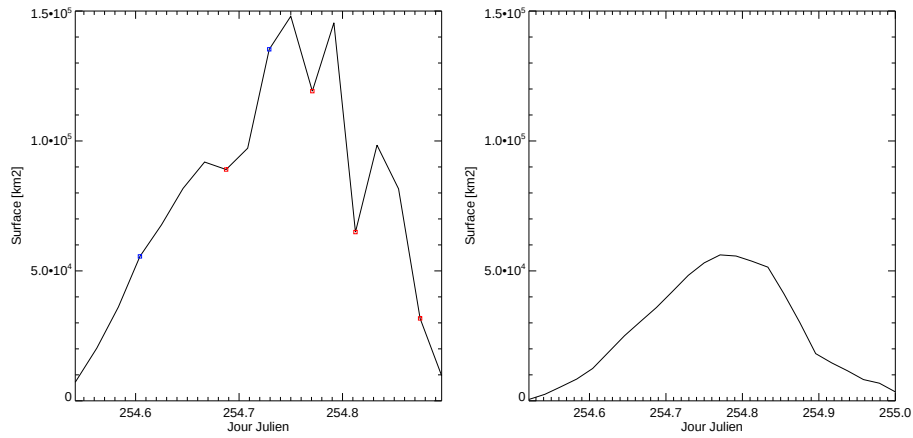


FIGURE 3.4 – Evolution en taille des systèmes convectifs n° 1 (gauche) déterminé par la méthode de recouvrement et A (droite) déterminé par la méthode TOOCAN en fonction de leur cycle de vie. Les points rouges et bleus correspondent aux divisions et aux fusions respectivement.

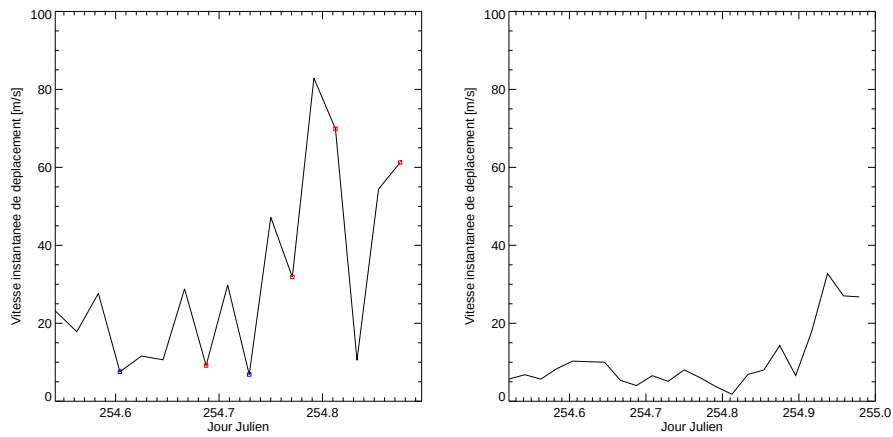


FIGURE 3.5 – Evolution des vitesses instantanées de propagation des systèmes convectifs n° 1 (gauche) déterminé par la méthode de recouvrement et A (droite) déterminé par la méthode TOOCAN en fonction de leur cycle de vie. Les points rouges et bleus correspondent aux divisions et aux fusions respectivement.

La figure 3.5 illustre une comparaison de l'évolution de la vitesse de propagation instantanée des systèmes n° 1 et A au cours de leur cycle de vie. La vitesse de propagation instantanée correspond au déplacement effectif du centre de gravité des systèmes associé à la croissance de leur surface froide. Il donne ainsi une indication sur la rugosité de la trajectoire des systèmes convectifs. On peut ainsi observer que la vitesse de propagation du système n° 1 est très bruitée du fait des fusions et divisions rencontrées au cours de son cycle de vie. Ainsi, la vitesse maximale atteinte est de 60 m/s correspondant à une vitesse aphysique, ne pouvant être rencontrée par un système convectif. Le système A possède lui une vitesse de propagation beaucoup plus lisse et atteint une vitesse maximum de 26 m/s beaucoup plus réaliste.

L'analyse de ce cas d'étude a permis de caractériser et d'illustrer les problèmes posés par les fusions et les divisions générés artificiellement par des algorithmes de type recouvrement. Elle a aussi pu souligner la réponse apportée par TOOCAN à ces problèmes, permettant ainsi une caractérisation plus cohérente du cycle de vie des systèmes convectifs.

3.4.2.2 Cas d'étude dans la région indienne

Afin d'évaluer l'algorithme TOOCAN sur des systèmes convectifs possédant une organisation convective différente, une situation convective ayant eu lieu dans la baie du Bengale en juillet 2002 est analysée (figure 3.6). Cette situation convective illustre la difficulté à segmenter une couverture nuage haut dans certaines régions tropicales et en particulier dans la baie du Bengale. Une définition simple mais précise d'un système convectif prend ici tout son sens.

On peut observer dans un premier temps que l'algorithme TOOCAN arrive à segmenter cette couverture nuage haut tout en respectant la définition d'un système convectif de mousson par un noyau froid associé à sa partie nuage haut dans le domaine spatio-temporel. La colonne de droite représente l'imagerie infrarouge issue de METEOSAT-5 pour les heures 0030 UTC, 0430 UTC, 0830 UTC, 1230 UTC, 1800 UTC, et 1930 UTC. La colonne centrale correspond aux images segmentées de TOOCAN, alors que celle de droite représente les images segmentées par l'algorithme de recouvrement. Dans ce cas d'étude, et en particulier pour cette journée du 21 juillet 2002, 340 systèmes convectifs ont été segmentés par l'algorithme TOOCAN (191 pour la méthodologie de recouvrement). Aucun de ces systèmes n'apparaît suite à une division ni ne se dissipe suite à une fusion. En ce qui concerne la méthodologie de suivi par recouvrement, sur les 191 systèmes identifiés et suivis, 101 disparaissent par fusion et 108 naissent à la suite d'une division. On peut observer, en considérant les images segmentées par la méthodologie de recouvrement que l'algorithme n'arrive à identifier que la couverture nuage haut (système n°1 en bleu) du fait de sa détection par un simple seuil de 233 K en température de brillance. Il n'est ainsi pas capable d'identifier l'organisation convective qui a lieu à l'intérieur de ce nuage haut dans l'espace et dans le temps. De plus, sa méthode de suivi basée sur un recouvrement entre deux clusters convectifs engendre des fusions (images 0430 UTC et 0830 UTC) et des divisions (1230 UTC - 1800 UTC). La figure 3.7 illustrant l'évolution en taille le long du cycle de vie indique que ce système déterminé par la méthode de recouvrement possède une durée de vie de 117 h (soit environ 5 jours) et atteint une taille maximale de 1,5 millions de km². La durée de vie de ce système est expliquée par les multiples fusions et divisions dont ce système fait l'objet et donc par un problème dans les étapes de détection et de suivi du système. La taille maximale excessive atteinte par ce système nuageux pointe en revanche les limites d'une méthodologie de segmentation des systèmes convectifs par un simple seuil en température de brillance, en particulier pour les situations convectives stationnaires et complexes rencontrées dans la baie du Bengale. Comme pour le cas d'étude africain, les évolutions de la taille et de la vitesse de propagation du système convectif sont bruitées, et sont causées par les divisions et fusions rencontrées (figure 3.8).

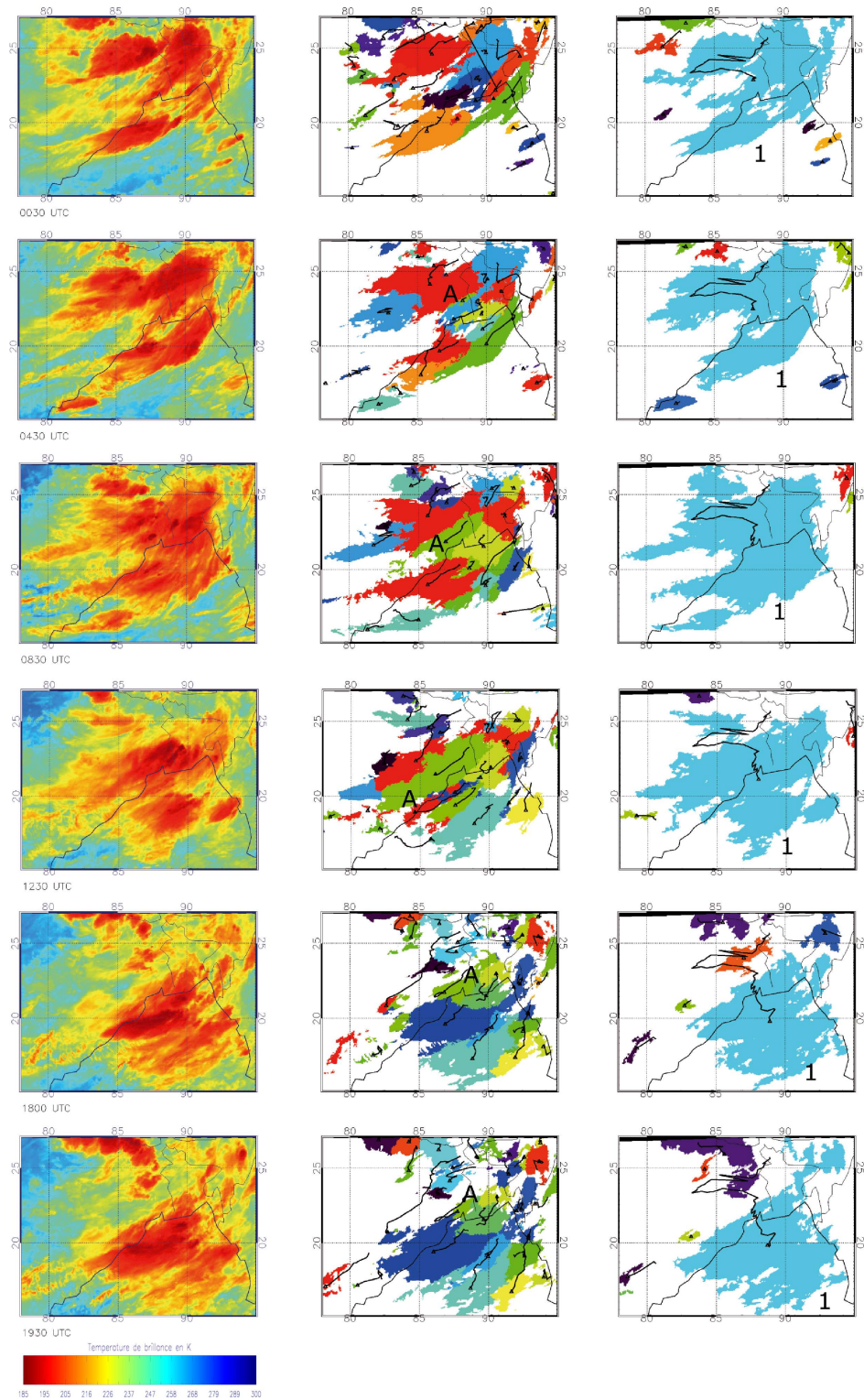


FIGURE 3.6 – Séquence d'images issues de l'imagerie satellitaire du 19 Juillet 2002 montrant une situation convective dans la baie du Bengale. De gauche à droite : images de température de brillance issues de MSG ; images segmentées issues de TOOCAN ; images segmentées issues de l'algorithme par "recouvrement".

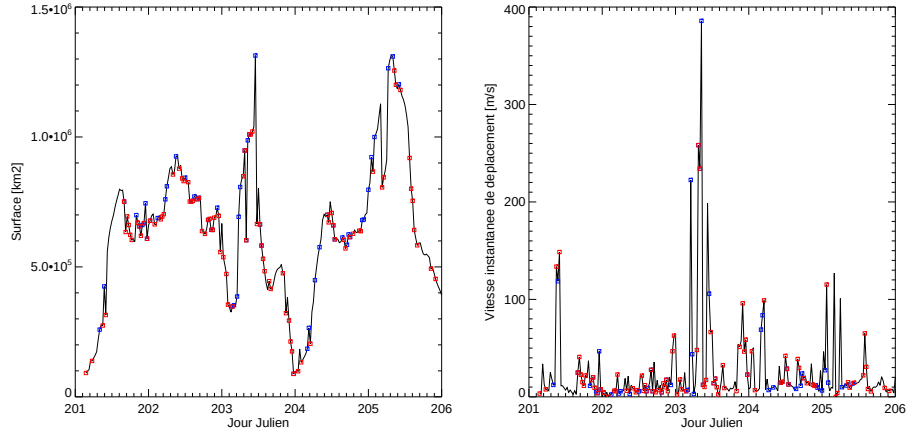


FIGURE 3.7 – Evolution de la taille et de la vitesse instantanée de propagation du système convectif n° 1 déterminé par la méthode de recouvrement. Les points rouges et bleus correspondent aux divisions et aux fusions respectivement.

Afin d'illustrer la segmentation de l'imagerie IR par la méthodologie TOOCAN, le système A (en vert) est analysé de manière détaillée. On peut déjà noter en comparant les images segmentées par TOOCAN avec les images IR que le système A semble être segmenté en accord avec notre définition d'un système convectif correspondant à un noyau convectif associé à sa partie nuage haut. En s'intéressant à la taille de ce système, on observe une évolution linéaire et non bruitée de ce paramètre au cours de son cycle de vie (figure 3.7). La taille maximale atteinte par ce système est de $210\,000\text{ km}^2$, plus en accord avec les échelles de la convection (cf chapitre 2). Sa vitesse de propagation ne dépassant pas 30 m/s (figure 3.8) au cours de son cycle de vie et sa durée de vie de 18h montrent que l'algorithme TOOCAN est capable de décrire de manière cohérente les paramètres d'un système convectif de la région de la baie du Bengale au cours de son cycle de vie.

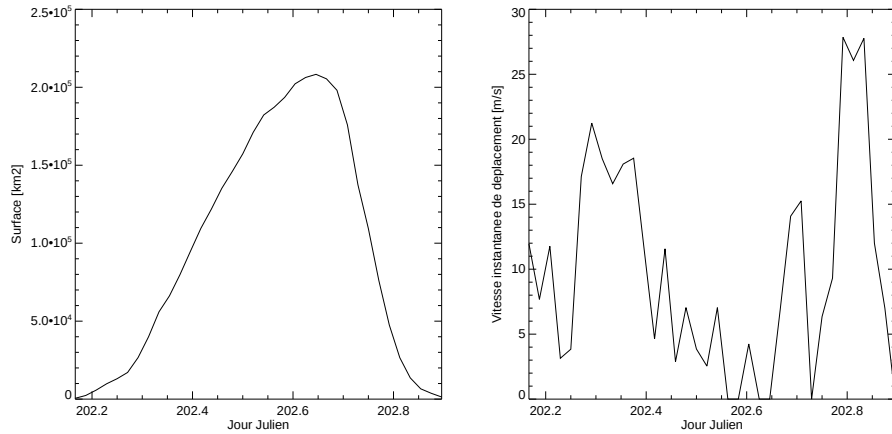


FIGURE 3.8 – Evolution de la taille et de la vitesse instantanée de propagation du système convectif A déterminé par la méthode TOOCAN.

3.4.3 Comparaison statistique

Afin de passer à une étude plus systématique des systèmes convectifs de mousson segmentés par les algorithmes TOOCAN et de "recouvrement", et de dépasser ainsi le cadre du simple cas d'étude, une analyse statistique des paramètres morphologiques des systèmes convectifs est proposée pour la région d'Afrique de l'Ouest. Les évolutions des paramètres de taille et de vitesse instantanée de propagation au cours des cycles de vie des systèmes convectifs seront également montrées de manière statistique. Ces analyses doivent ainsi nous permettre de mesurer l'importance des problèmes générés par les divisions et les fusions des systèmes convectifs segmentés par l'algorithme de recouvrement. Ainsi, nous pourrions souligner l'apport de l'algorithme TOOCAN dans sa capacité à décrire de manière cohérente le cycle de vie de l'ensemble des systèmes convectifs segmentés.

L'analyse en Afrique de l'Ouest est effectuée sur un jeu de données issu de l'imagerie IR de MSG pour la période de juillet 2006. L'algorithme TOOCAN permet d'identifier 17433 systèmes convectifs de mousson pour cette période et cette région d'étude, alors que l'algorithme de recouvrement n'en segmente que 3558, soit environ 5 fois moins de systèmes. La couverture nuageuse observée par l'algorithme TOOCAN est de $2,14 \times 10^9 \text{ km}^2$, et est plus importante que celle observée par l'algorithme de recouvrement ($1,70 \times 10^9 \text{ km}^2$). Sur les 3558 systèmes segmentés par l'algorithme de recouvrement, seuls 1269 systèmes ne présentent ni de naissance suite à une division, ni de disparition, suite à une fusion avec un autre système convectif. En ne gardant que ces systèmes convectifs présentant un cycle de vie cohérent, la couverture nuage haut observée par l'algorithme de recouvrement tombe à $7,11 \times 10^8 \text{ km}^2$, soit 33% de la couverture nuage haut totale observée par la méthode de suivi par "recouvrement".

La figure 3.9 montre la population des systèmes segmentés par l'algorithme TOOCAN et par l'algorithme par "recouvrement" en fonction de leur durée de vie. Elle montre également la distribution de la population des MCS segmentés par l'algorithme de recouvrement et ne présentant ni de fusion ni de division. Les intervalles de durée de vie de la distribution sont fixés à 2 h. Pour les deux algorithmes, la distribution des systèmes convectifs décroît avec l'augmentation de la durée de vie. Pour un intervalle de durée de vie [2 h-20 h], on observe un nombre de systèmes convectifs segmentés par TOOCAN plus important que par l'algorithme par "recouvrement". Pour la méthodologie TOOCAN, le maximum en population est atteint pour l'intervalle [3 h-4 h], avec environ 3 500 systèmes identifiés. Le nombre de systèmes segmentés par l'algorithme de recouvrement est maximum pour la classe [1 h-2 h]. Au-delà d'une durée de vie de 24 h, l'algorithme TOOCAN n'identifie que deux systèmes convectifs. La durée de vie maximum d'un système convectif identifié par TOOCAN est de 26 h. En revanche, l'algorithme par "recouvrement" segmente un nombre significatif de systèmes de durée de vie supérieure à 24 h (27 systèmes). Quatre systèmes ont alors des durées de vie supérieures à 2 jours. Le maximum de durée de vie observé est de 67,5 h, soit 2,5 fois plus long que la durée de vie maximum d'un système identifié par TOOCAN. Ceci s'explique par le fait qu'un grand nombre de ces systèmes de longue durée de vie est parvenu à se régénérer suite à de multiples fusions. En effet, en observant la distribution de la population ne présentant

ni fusion ni division, on peut observer que très peu de systèmes convectifs possèdent une durée de vie supérieure à 20 h. Le maximum de durée de vie atteinte est alors de 42 h. La distribution des durées de vie illustre alors les problèmes causés par les fusions et divisions sur les durées de vie des MCS.

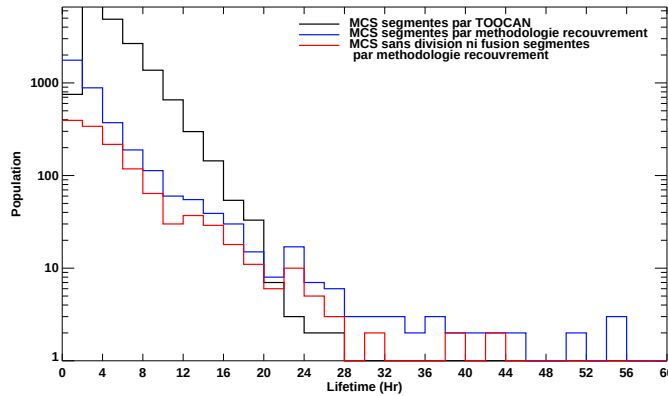


FIGURE 3.9 – *Histogramme des durées de vie (h) des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement pour la période juillet 2006 en Afrique de l'Ouest.*

La figure 3.10 montre la couverture nuageuse exprimée en $\text{km}^2/\text{images}$, représentée pour chaque intervalle de durée de vie des systèmes convectifs de mousson. La distribution de systèmes segmentés par la méthodologie de recouvrement montre que les systèmes convectifs de durée de vie élevée, bien que peu nombreux, contribuent quasiment autant que les systèmes convectifs de courte durée de vie. La présence plus longue sur la zone d'étude permet donc aux systèmes convectifs de longue durée de vie de contribuer autant qu'une population élevée de systèmes convectifs de courte durée de vie. En observant la distribution des systèmes ne présentant pas de division ni de fusion, on peut observer qu'au delà d'une durée de vie de 26 h, seuls 3 systèmes contribuent à la couverture nuageuse. Le filtrage des systèmes convectifs ne présentant pas de cycle de vie cohérent, permet de retirer des statistiques les systèmes de longue durée de vie contribuant fortement à la couverture nuage haut. La distribution des systèmes convectifs de mousson segmentée par la méthode TOOCAN montre un comportement différent. Un maximum de couverture nuageuse est atteint pour les systèmes de durée de vie compris dans l'intervalle [9 h-10 h], soit un décalage de 4 h par rapport à la distribution des durées de vie présentée figure 3.9. Puis la distribution décrit une décroissance jusqu'à une durée de vie maximum de 25 h. Contrairement aux systèmes convectifs segmentés par l'algorithme de recouvrement, les systèmes issus de TOOCAN de longue durée de vie (>20 h) ne compensent pas leur faible nombre par une présence plus longue dans la zone d'étude.

La figure 3.11 illustre une distribution cumulée et normalisée de la surface froide maximum atteinte par les MCS segmentés par les deux méthodes de suivi. On peut noter dans un premier temps qu'aucun système identifié par l'algorithme de recouvrement ne possède une surface froide maxi-

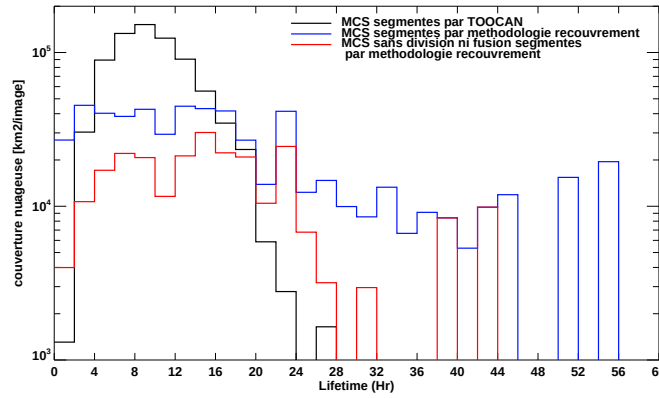


FIGURE 3.10 – Histogramme des durées de vie (h) pondérées par les tailles cumulées des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement pour la période juillet 2006 en Afrique de l'Ouest.

num inférieure à $5\,000\text{ km}^2$. Ceci s'explique par l'utilisation d'un seuil en taille de $5\,000\text{ km}^2$ appliqué lors de l'étape de détection des clusters convectifs. 50% des MCS détectés par la méthode de recouvrement sont expliqués par des MCS atteignant des tailles maximums de 10^4 km^2 . Le filtrage des MCS possédant des divisions et des fusions le long de leur cycle de vie ne modifie pas fortement la distribution. La méthode TOOCAN réussit à détecter des objets de petite taille ($<5\,000\text{ km}^2$), si bien que les systèmes de taille maximum inférieure à $2\,000\text{ km}^2$ expliquent 50% de la population totale. En revanche, la contribution des systèmes segmentés par TOOCAN et atteignant une surface froide maximum supérieure à 10^5 km^2 est faible alors qu'elle est de 5% pour les systèmes identifiés par la méthode de recouvrement. Le maximum de surface froide maximum atteinte par les systèmes segmentés par TOOCAN est de $235\,422\text{ km}^2$ alors qu'elle est de $649\,017\text{ km}^2$ (3 fois plus) pour les systèmes segmentés par la méthode de recouvrement.

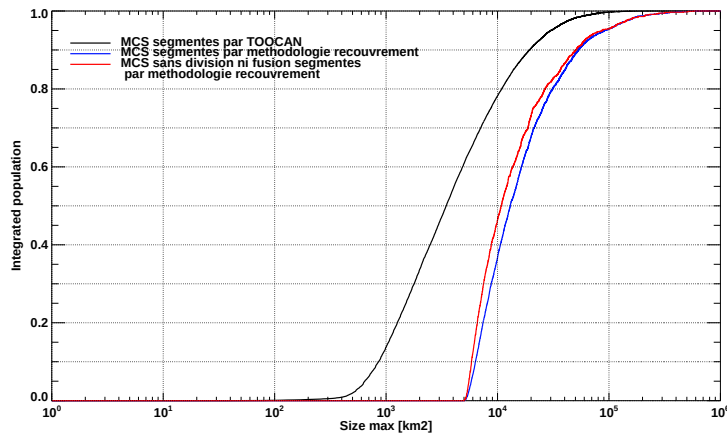


FIGURE 3.11 – Histogramme des surfaces maximum en km^2 des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement pour la période juillet 2006 en Afrique de l'Ouest.

Tomasini et al. [2006] et Fiolleau et al. [2009], dans Leurs études climatologiques des systèmes convectifs en Afrique de l'Ouest, ont répertoriées et catégorisées les systèmes convectifs en fonction de leur durée de vie et de leur vitesse moyenne de propagation. Ainsi, les lignes de grains dans la région Sahélienne correspondent à des systèmes convectifs de durée de vie supérieure à 9h et de vitesse moyenne de propagation supérieure à 10 m/s. La climatologie de Fiolleau et al. [2009] est présentée en annexe B sous forme de rapport au projet européen AMMA et a été réalisée en traitant l'imagerie METEOSAT de 1983 à 2006 par l'algorithme de "recouvrement". Une caractérisation fiable de la durée de vie et des vitesses moyennes de propagation est donc nécessaire pour un tel type de climatologie.

La figure 3.12 montre une distribution des vitesses moyennes de propagation des systèmes convectifs segmentés par la méthodologie TOOCAN (noir) et par la méthode de "recouvrement" (bleu). La courbe rouge représente la distribution des MCS segmentés par la méthode de "recouvrement" ne possédant pas de divisions ou de fusions au cours de leur cycle de vie. On peut observer que très peu de systèmes convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN ne possèdent de vitesse de propagation moyenne supérieures à 12 m/s. Cette valeur de 12 m/s correspond également au maximum de vitesse moyenne de déplacement atteinte par les systèmes convectifs ne possédant pas de divisions ou de fusions et identifiés par l'algorithme par "recouvrement". En revanche, si l'on considère l'ensemble des MCS segmentés par cette dernière méthode, on peut observer qu'un grand nombre de systèmes possèdent de grandes vitesses de propagation moyennes.

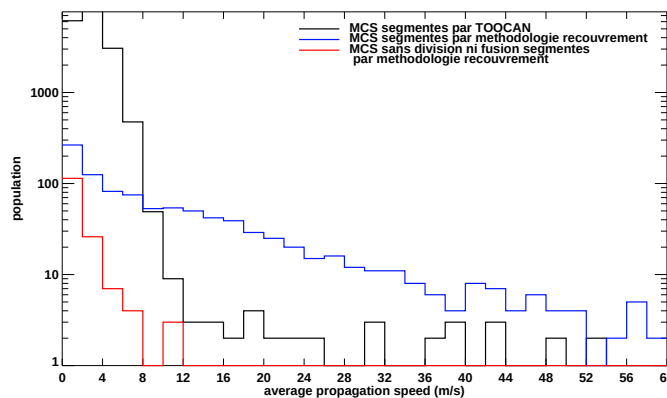


FIGURE 3.12 – Histogramme des vitesses moyennes des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement pour la période juillet 2006 en Afrique de l'Ouest.

Les trois figures suivantes vont nous permettre d'analyser statistiquement l'évolution des paramètres morphologiques (taille, vitesse instantanée de propagation) des systèmes convectifs le long de leur cycle de vie et ainsi de montrer la capacité de l'algorithme TOOCAN à décrire de manière lisse les caractéristiques morphologiques des systèmes. Afin d'évaluer la capacité des algorithmes TOOCAN et de recouvrement à décrire de manière linéaire les trajectoires des systèmes convectifs, un écart-type des vitesses instantanées est calculé pour chacun des systèmes convectifs

de la région d'étude. La figure 3.13 illustre une distribution cumulée normalisée des écart-types des vitesses instantanées. La distribution de l'algorithme TOOCAN montre que plus de 90% des systèmes convectifs possèdent un écart-type de leur vitesse instantanée inférieure à 8 m/s, alors que pour le cas de l'algorithme par "recouvrement", seuls 42% des systèmes sont expliqués par cet écart-type de 8 m/s. Là encore, les absences de divisions et de fusions inhérentes à la méthodologie TOOCAN permettent à l'algorithme de représenter de façon cohérente le déplacement des systèmes convectifs. Si l'on considère alors la distribution cumulée des systèmes convectifs possédant un cycle de vie cohérent (sans division ni fusion) et segmentés par la méthodologie par "recouvrement", on remarque que le pourcentage des systèmes convectifs possédant une vitesse instantanée inférieure à 8 m/s monte à 65%.

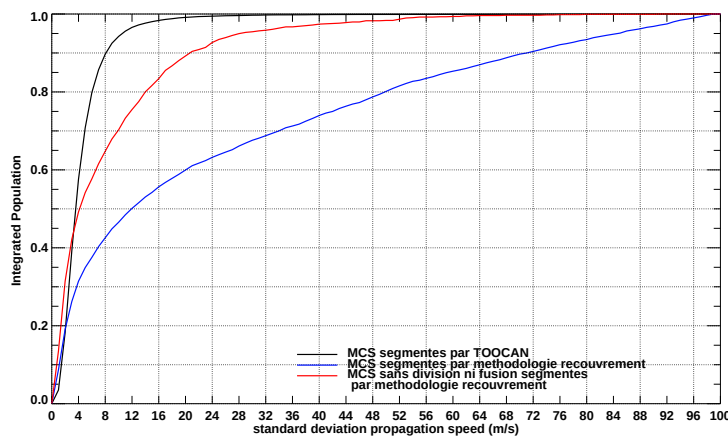


FIGURE 3.13 – *Histogramme des écart-types des vitesses instantanées des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement pour la période juillet 2006 en Afrique de l'Ouest.*

La figure 3.14 propose de comparer le cycle de vie de la taille des systèmes convectifs segmentés par les deux méthodes de suivi. Pour cela la surface de chacun des systèmes convectifs est normalisée entre 0 et 1. De même, la durée de vie des systèmes est normalisée de manière à représenter le cycle de vie de chacun des systèmes par 10 phases. Cet espace normalisé et commun à chacun des systèmes nous permet alors de calculer un composite moyen de la taille des systèmes au cours de leur cycle de vie pour la région et la période d'étude. Le résultat montre que l'évolution de la taille des systèmes convectifs segmentés par TOOCAN est décrit par un modèle linéaire avec une phase de croissance jusqu'à la moitié du cycle de vie normalisé puis une phase de décroissance. Le modèle linéaire sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant. On peut néanmoins noter que la taille normalisée en début et fin de vie du composite est nulle. En ce qui concerne le composite des systèmes déterminés par la méthode de recouvrement, on peut observer que le début du cycle de vie du modèle composite est caractérisé par une taille normalisée de 0,6. Sans avoir d'a priori sur une évolution type de la taille des systèmes convectifs, il ne semble pas correct d'observer une surface en début de cycle d'un système convectif correspondant à 60% de sa surface maximum. Aussi, un filtrage des MCS nés d'une division ou disparus suite à une fusion a été établi afin de mesurer l'impact de ces systèmes sur le cycle de vie moyen des surfaces froides. En

retirant ces systèmes, on observe sur la figure 3.14 que le composite moyen des systèmes convectifs segmentés par la méthode de recouvrement est proche de celui proposé par la méthodologie TOOCAN, et possède une taille normalisée de 0 en début et fin de cycle de vie (figure 3.14). Ce résultat illustre à quel point les MCS nés suite à une division ou disparus suite à une fusion peuvent impacter la représentation statistique du cycle de vie des surfaces froides associées aux MCS. .

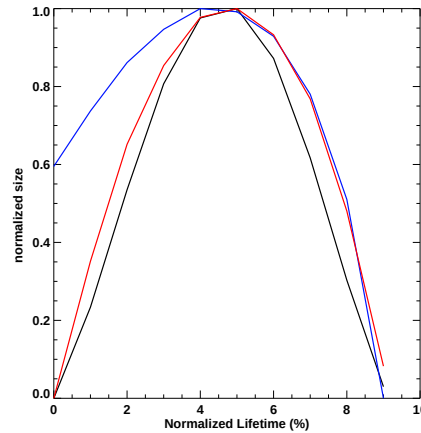


FIGURE 3.14 – Composite moyen de l'évolution des surfaces normalisées des systèmes convectifs le long de leur cycle de vie normalisé.

Afin de mesurer l'écart entre les évolutions normalisées des systèmes convectifs et le composite moyen, une RMSD est calculée pour chacun des systèmes. La formule de la RMSD sera introduite au cours du chapitre suivant. La figure 3.15 montre les histogrammes des RMSD de chacun des systèmes segmentés par TOOCAN et par l'algorithme de recouvrement.

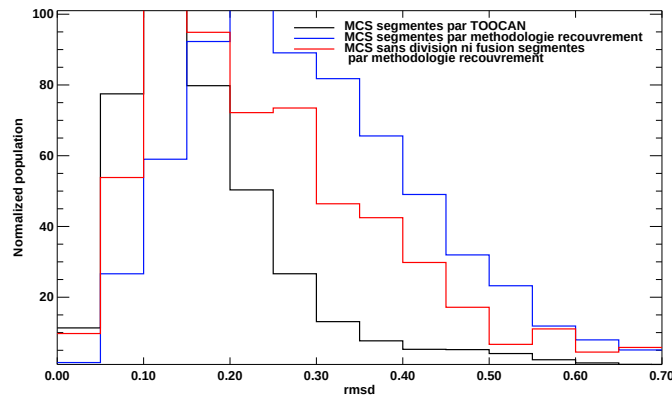


FIGURE 3.15 – Histogramme de l'écart exprimé par une RMSD de chacun des systèmes convectifs au composite moyen.

On peut observer qu'une majorité de systèmes convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN possède une RMSD inférieure à 0,1 et que très peu de systèmes dépassent une RMSD de 0,4. Cela montre que le composite calculé pour les systèmes TOOCAN est représentatif d'un

nombre significatif de systèmes. Dans le cas de l'algorithme par "recouvrement", un maximum de systèmes convectifs est représenté par une RMSD de 0,2. En revanche, un nombre significatif de systèmes possèdent une RMSD supérieure à 0,4. L'histogramme de la RMSD des systèmes convectifs présentant un cycle de vie cohérent (figure 3.15) montre qu'un maximum de systèmes est représenté par une RMSD de 0,2. Jusqu'à une RMSD de 0,25, l'histogramme semble avoir le même comportement que la distribution de la RMSD des systèmes segmentés par TOOCAN. Au-delà, il reste toujours un nombre significatif de systèmes présentant une RMSD élevée.

3.5 Conclusion

La segmentation des systèmes convectifs par l'algorithme TOOCAN a été évaluée au cours du chapitre 3. Cette évaluation a été réalisée d'une part en analysant la sensibilité du nouvel algorithme au paramètre ΔT_b et d'autre part en comparant les résultats issus de l'algorithme TOOCAN avec ceux issus de l'algorithme par "recouvrement". Des organisations convectives en Afrique de l'Ouest et en Inde traitées par les deux algorithmes ont alors été analysées et les résultats de la segmentation ont été discutés. De même, une analyse statistique a été effectuée pour la région d'Afrique de l'Ouest et pour la période de juillet 2006.

Il est apparu que la fragmentation de la couverture nuage haut par l'algorithme TOOCAN était peu sensible au pas de détection ΔT_b , indiquant alors la robustesse de la nouvelle méthode à décrire l'organisation de la convection. En effet, les MCS présentant une importante couverture nuageuse au cours de leur cycle de vie sont segmentés de la même façon quel que soit le paramètre ΔT_b . Le pas de détection ΔT_b a alors été fixé à 5K.

D'autre part, l'analyse des situations convectives Ouest africaines et indiennes présentant des organisations convectives différentes et traitées par les algorithmes TOOCAN et "recouvrement" a permis d'évaluer l'apport de la nouvelle méthode dans sa capacité à décrire les systèmes convectifs tout au long de leur cycle de vie. Dans un premier temps, il a été montré que l'algorithme par "recouvrement" pouvait générer artificiellement des divisions et des fusions des MCS lors de l'étape de suivi. De même, lors de l'étape de détection, l'identification des systèmes par l'utilisation d'un simple seuil en température de brillance appliqué à l'imagerie infrarouge ne permet pas de décrire avec précision l'organisation de la convection. De grandes avancées dans la compréhension des phénomènes convectifs ont été rendues possible grâce à l'algorithme par "recouvrement", en permettant par exemple d'établir des climatologies de MCS. Cependant, les limitations évoquées ici sont problématiques dans le cadre de l'étude du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson. En effet, le chapitre 3 a permis de souligner ces problèmes de divisions et de fusions engendrant alors des apparitions et des disparitions artificielles de MCS mais également des instabilités dans l'évolution de leurs paramètres morphologiques. Les mêmes cas d'études traités par la méthodologie TOOCAN révèlent en revanche sa capacité à caractériser cette organisation, quelle que soit son échelle, aussi bien dans l'espace que dans le temps. La méthodologie TOOCAN basée sur une segmentation 3D de l'imagerie infrarouge lui permet de fragmenter une couverture nuageuse, quel

que soit son degré de complexité, identifiant ainsi les systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie, tout en supprimant les divisions et les fusions. Les systèmes peuvent alors être identifiés au plus tôt dans leur phase d'initiation et au plus tard dans leur phase de dissipation. De même, des cellules convectives indépendantes dans une image infrarouge 2D, mais s'avérant faire partie d'une même organisation convective, peuvent être identifiées comme appartenant au même système convectif. L'algorithme répond ainsi à la définition d'un système convectif consistant en un noyau convectif associé à son bouclier nuage haut dans l'espace et dans le temps. Il en résulte des évolutions lisses des paramètres morphologiques des systèmes convectifs de mousson au cours de leur cycle de vie.

L'analyse statistique des paramètres morphologiques des systèmes convectifs traités par l'algorithme de recouvrement a mis en relief les problèmes causés par les fusions et les divisions artificielles des MCS. Ainsi, les distributions ont montré que de nombreux systèmes convectifs possédant de longues durées de vie et contribuant fortement à la couverture nuageuse totale, n'étaient en fait que des systèmes qui avaient pu se régénérer par une multitude de fusion. De même, des systèmes atteignant une surface froide maximum de plusieurs centaines de milliers de km^2 correspondent en fait à une mauvaise segmentation de la couverture nuageuse. Ces fusions et divisions sont également problématiques en ce qui concerne la caractérisation des paramètres morphologiques, telle que la taille ou la vitesse de propagation instantanée, au cours des cycles de vie des systèmes convectifs. Les résultats obtenus par l'algorithme TOOCAN, ont permis de montrer que ces problèmes de caractérisation d'une population de systèmes convectifs avaient pu être surmontés. Ainsi, la durée de vie, la surface maximum, et la vitesse moyenne de propagation semblent être plus en accord avec la littérature connue sur les MCS. De plus, aucun des systèmes convectifs traités par l'algorithme TOOCAN n'a besoin d'être filtré à cause des problèmes de fusion et de division. Enfin, l'analyse des cycles de vie de ces systèmes montre que la méthodologie TOOCAN permet de caractériser de manière cohérente les systèmes convectifs dans l'espace mais également dans le temps. Cette cohérence dans la description des systèmes convectifs individuels est d'une importance majeure dans un objectif de caractériser statistiquement un cycle de vie type de MCS. Cette analyse du cycle de vie des caractéristiques morphologiques et des précipitations associées aux systèmes convectifs sera effectuée dans les chapitres 4 et 5, dans la région de mousson Afrique de l'Ouest-Inde afin de mettre en évidence des modèles conceptuels de cycle de vie de MCS et de quantifier la durée des différentes phases de ce cycle.

Chapitre 4

Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans les régions indiennes et ouest africaines

4.1 Introduction

Au cours du chapitre précédent, l'analyse des systèmes convectifs segmentés par l'algorithme de suivi TOOCAN a permis de montrer la capacité de cette nouvelle méthodologie à identifier et suivre des systèmes convectifs sans générer artificiellement des divisions et des fusions et à caractériser alors le cycle de vie des paramètres morphologiques de ces systèmes de manière cohérente. Ainsi, les surfaces froides, les vitesses de propagation des systèmes convectifs suivent une évolution lisse tout au long de leur cycle de vie. Avec ce nouvel algorithme de suivi, aucun filtrage des systèmes convectifs n'est nécessaire. De même, les systèmes convectifs sont détectés au plus tôt dans leur phase d'initiation et au plus tard dans leur phase de dissipation. Ces quelques exemples d'améliorations de la description des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs nous donnent ainsi l'opportunité de répondre à la problématique du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson des régions tropicales.

Les systèmes convectifs jouent un rôle majeur dans le climat tropical par les processus de transfert vertical de masse d'air, d'eau et de quantité de mouvement qu'ils engendrent, permettant ainsi des échanges entre la couche limite et la troposphère libre. Le chauffage convectif, le refroidissement radiatif au sommet du nuage, ainsi que la quantité de mouvement, induits par ces MCS influencent fortement le cycle de l'eau et de l'énergie ainsi que la circulation de grande échelle. La dynamique interne des MCS par leur fraction convective/stratiforme va ainsi impacter l'environnement de grande échelle. Comme nous l'avons vu au cours du chapitre 2, la région stratiforme est constituée d'anciennes cellules convectives actives en phase de dissipation ce qui confère alors une grande importance pour la compréhension de l'évolution des paramètres morphologiques d'un système convectif au cours de son cycle de vie.

Un grand nombre d'études ont montré l'impact des MCS sur le bilan radiatif terrestre, en particulier leur interaction avec le rayonnement de courte longueur d'onde ($0,2\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$) et le rayonnement infrarouge ($4\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$) (Chen et al. [1996], Machado et al. [1998], Roca et al. [2005]). Les MCS jouent également un rôle important pour le bilan d'eau. L'analyse morphologique des MCS a par exemple montré que le taux d'accroissement des cellules convectives permettait d'améliorer les estimations de précipitation par satellite (Berges et al. [2009]). Enfin, le bilan de vapeur d'eau dans la haute troposphère est également fortement influencé par la morphologie des MCS (Roca et al. [2002]) et leur cycle de vie (Sohn et al. [2008]).

La caractérisation structurelle ou morphologique des événements convectifs organisés peut être exprimée de manière intégrée par leur durée de vie, leur vitesse moyenne de propagation, leur distance de propagation, leur couverture nuageuse intégrée le long de son cycle de vie, leur lieu et instant d'initiation ou de dissipation etc... Des climatologies de MCS ont ainsi pu être construites en utilisant ces caractéristiques intégrées (Fioleau et al. [2009]). La morphologie de la couverture nuageuse des MCS peut également être prise en compte le long de leur cycle de vie afin d'étudier l'impact des différentes phases du MCS (initiation, maturité, dissipation) sur son environnement de grande échelle. Comme nous avons noté dans le chapitre 1, les études satellitaires dans les régions tropicales ont fortement amélioré notre compréhension du rôle de la convection sur son environnement (Ruprecht [1976], Houze et Betts [1981]). Machado et Laurent [2004] ont ainsi réalisé une analyse du cycle de vie des MCS amazoniens en utilisant les données issues de GOES-8 durant la campagne WETAMC/LBA (Wet Season Amazon Mesoscale Campaign/Large Scale Biosphere Atmosphere). Les résultats montrent que le taux d'accroissement morphologique calculé en phase initiale du MCS est bien corrélé à l'ensemble de sa durée de vie et peut être ainsi utilisé dans cette région comme prévision des orages (Vila et al. [2008]). Ils soulignent également que le taux d'accroissement dans cette phase initiale est principalement expliqué par les processus de condensation/évaporation alors que la divergence dans la haute troposphère intervient pendant le reste de la phase d'expansion, impactant ainsi le bilan d'humidité dans la haute troposphère (Sohn et al. [2008]).

Les limitations d'une utilisation des seules données infrarouges pour caractériser les processus internes des MCS sont connues mais peuvent être dépassées en combinant différentes données d'humidité avec les données IR (McAnelly et Cotton [1989], Kondo et al. [2006]). Futyán et Del Genio [2007] en combinant les données IR de METEOSAT Seconde génération avec les données GERB, et en utilisant l'algorithme de segmentation nuageuse 'Detect And Spread' (Boer et Ramanathan [1997]) associé à une technique de suivi par recouvrement ont ainsi calculé des composites de cycle de vie des MCS en Afrique et dans l'océan Atlantique. Ils ont de plus utilisé les observations radars issues de TRMM pour étudier la dynamique interne des MCS le long de leur cycle de vie grâce à une technique originale de composite. Leurs résultats suggèrent de grosses différences entre les cycles de vie des systèmes convectifs océaniques et continentaux. En particulier, et contrairement aux systèmes continentaux, la fraction de pluie convective des systèmes océaniques évolue peu le long de leur cycle de vie. Ces résultats seront discutés au cours du chapitre 5 dédié à l'analyse des précipitations au sein des systèmes convectifs de mousson.

Tous ces exemples soulignent l'importance de la caractérisation morphologique des MCS par les données IR, avec ou sans l'apport de données extérieures. Dans ce chapitre, la région d'étude s'étend du bord Ouest de l'Afrique de l'Ouest jusqu'aux régions de mousson indiennes, en incluant les océans adjacents, dans le but d'identifier éventuellement un modèle générique de cycle de vie de ces systèmes convectifs de mousson. Qui plus est, cette région a été observée simultanément dans le canal infrarouge par deux plates-formes METEOSAT, offrant ainsi une qualité d'observation de la couverture nuage haut. En effet, jusqu'à récemment, la région indienne, comparativement à la région ouest africaine souffrait d'un manque de données géostationnaires, à l'exception d'un court jeu de données INSAT-1B (Smith et Mehta [1990]).

Le besoin de mieux comprendre la dynamique interne des MCS ainsi que l'influence de ces systèmes convectifs de mousson sur leur environnement de grande échelle et sur le cycle de l'eau et de l'énergie, nous amène ainsi à développer une étude sur la morphologie des MCS basée sur les seules données infrarouges issues des géostationnaires. Cette étude nourrira les prochains chapitres qui se basent sur une approche de combinaison des données issues du radiomètre TMI de TRMM avec les caractéristiques infrarouges des systèmes convectifs.

4.2 Données et méthodologie

Les images infrarouges des satellites METEOSAT-5 et METEOSAT-7 à pleine résolution (5 km ; 30 min) sont utilisées dans une bande de latitude 15°S-35°N pour les mois de mousson de juin à septembre (annexe A). La mission EUMETSAT IODC (Indian Ocean Data Coverage) située à 63°E est utilisée pour étudier le sous continent indien et les océans adjacents. Alors que l'algorithme de suivi des MCS est appliqué sur une région plus étendue, les résultats de ce suivi sont restreints à la région 40°E-105°E. De même, les données issues de METEOSAT-5 sont restreintes à une région 40°W-40°E. Il en résulte une région d'étude s'étendant de 40°W à 105°E permettant ainsi l'observation des deux régimes de mousson africain et indien. Trois années de données ont été traitées : 2002, 2003 et 2004 pour lesquelles la disponibilité des images est élevée avec moins de 5,5 % d'images manquantes (Fiolleau et al. [2009]). De plus, cette période correspond à des situations de grandes échelles variées, assurant ainsi la présence d'un large spectre de systèmes convectifs.

4.2.1 Détection et suivi des systèmes convectifs de mousson

Les systèmes convectifs sont identifiés et suivis grâce à l'algorithme TOOCAN présenté dans les chapitres précédents, nous permettant ainsi de disposer de l'ensemble des caractéristiques morphologiques des MCS que ce soit de manière intégrée, ou le long de leur cycle de vie.

4.2.2 Le cycle de vie des systèmes convectifs de mousson

Les systèmes convectifs sont classifiés et une technique de normalisation est appliquée sur leur cycle de vie permettant ainsi une inter-comparaison de l'ensemble des MCS.

4.2.2.1 Classification

Les systèmes sont classifiés en deux catégories en fonction de leur durée de vie et du comportement de la couverture nuageuse le long du cycle de vie du système. Ce cycle de vie est décomposé en 10 phases, ce qui est rendu possible uniquement sur les systèmes atteignant une durée de vie de 10 images, soit 5 h. La classe 1 est alors définie par les systèmes de durée de vie inférieure à 5 h. Cette classe ne sera pas considérée par la suite. Le cycle de vie des systèmes convectifs de durée de vie supérieure à 5 h est analysé et deux sous-classes sont alors créées selon la présence d'un seul maximum au cours du cycle de vie de la surface froide des MCS (classe 2a) ou non (classe 2b). Une telle approche permet de filtrer les systèmes convectifs présentant des cycles de vie complexes, incluant des régénérations, etc... Il est à noter qu'aucune restriction sur la durée de vie maximum des MCS est établie. Le tableau 4.1 résume les définitions des classes.

	Définitions	
classe 1	Durée de vie < 5h	
classe 2	Durée de vie > 5h	a- un seul maximum
	Durée de vie > 5h	b- les autres (plusieurs maximums, plateau)

TABLEAU 4.1 – Définitions de la classification des systèmes convectifs.

L'application de telles classes est rendue possible grâce aux résultats de l'algorithme TOO-CAN qui permet de garantir des cycles de vie lisses des systèmes convectifs, comme discuté dans le chapitre précédent. L'application de cette classification sur les résultats des autres algorithmes de suivi est cependant possible, mais nécessite un important filtrage des systèmes convectifs présentant des divisions et des fusions, impliquant alors une perte dans les représentations statistiques.

4.2.2.2 Technique de normalisation

La dernière étape de traitement consiste à normaliser le cycle de vie de la surface froide de chaque système convectif de manière à comparer facilement leur population. Ainsi, chaque cycle de vie des systèmes convectifs est décomposée en 10 étapes, de 0% à 100% de son cycle de vie. De même, la surface froide de chaque MCS est normalisée entre 0 et 1. Un nouveau paramètre descriptif des systèmes convectifs peut alors être introduit : l'instant en pourcentage (T_{max}) pour lequel le système convectif atteint sa taille maximale. Une telle normalisation a déjà été utilisée dans des formes variées (McAnelly et Cotton [1989]). La figure 4.1 illustre un système convectif appartenant à la classe 2a. Ce système a une durée de vie de 7,5 h et s'est développé le 1^{er} septembre

2004 dans la partie Est de la baie du Bengale. On peut observer que ce système ne possède qu'un seul maximum et que la représentation du cycle de vie de sa surface froide dans l'espace normalisé est en accord avec son cycle de vie réel. La figure 4.2 représente elle un système convectif appartenant à la classe 2b. Ce système qui s'est développé en Afrique de l'Ouest a une durée de vie de 10,5h et possède deux maximums au cours de son cycle de vie confirmant ainsi son appartenance à la classe 2b.

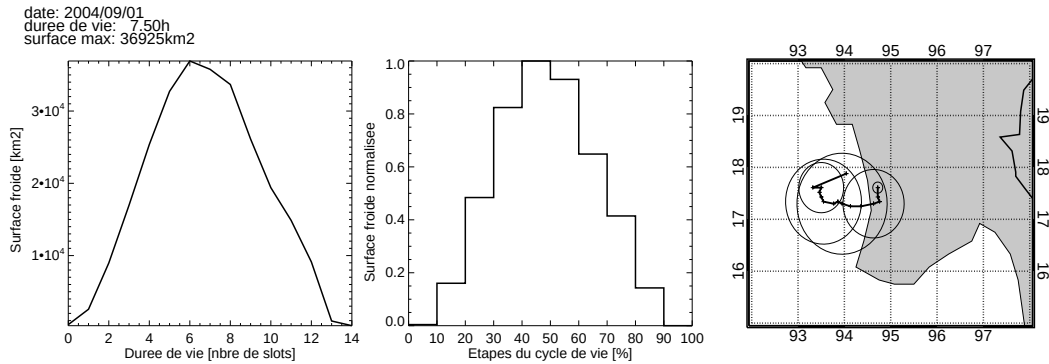


FIGURE 4.1 – Exemple d'un système convectif appartenant à la classe 2a auquel a été appliqué la méthode de normalisation.

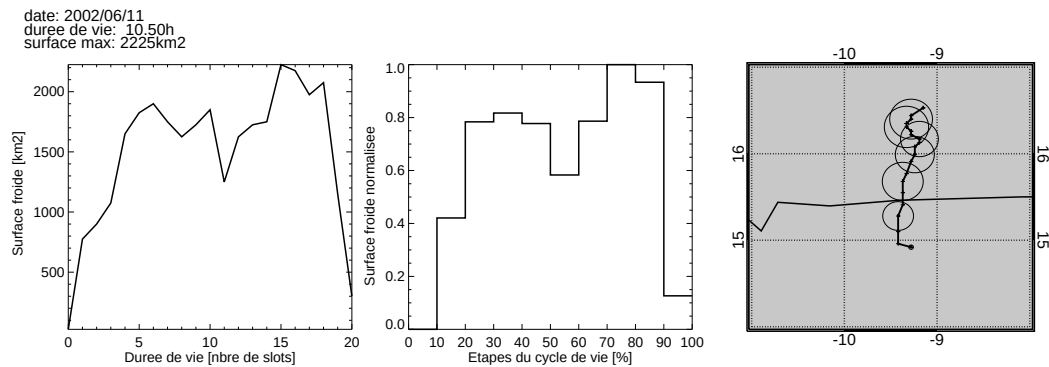


FIGURE 4.2 – Exemple d'un système convectif appartenant à la classe 2b auquel a été appliqué la méthode de normalisation.

4.3 Résultats

La figure 4.3 montre une carte de la population des systèmes convectifs rencontrés pour l'ensemble de la période 2002-2004 juin-juillet-août-septembre (JJAS), avec en correspondance une carte des précipitations issue de GPCP (Global Precipitation Climatology Project)(Huffman et al. [1997]). La couverture nuageuse associée aux MCS est accumulée pour l'ensemble des saisons et pour chaque point de grille, puis est normalisée de manière à être exprimée en heure par mois. Par exemple, une valeur de 160 observée pour un point de grille de la baie du Bengale indique que

la couverture nuageuse associée aux MCS a été observée 160 heures en moyenne par mois. Cette couverture nuage haut moyenne est illustrée figure 4.3-b.

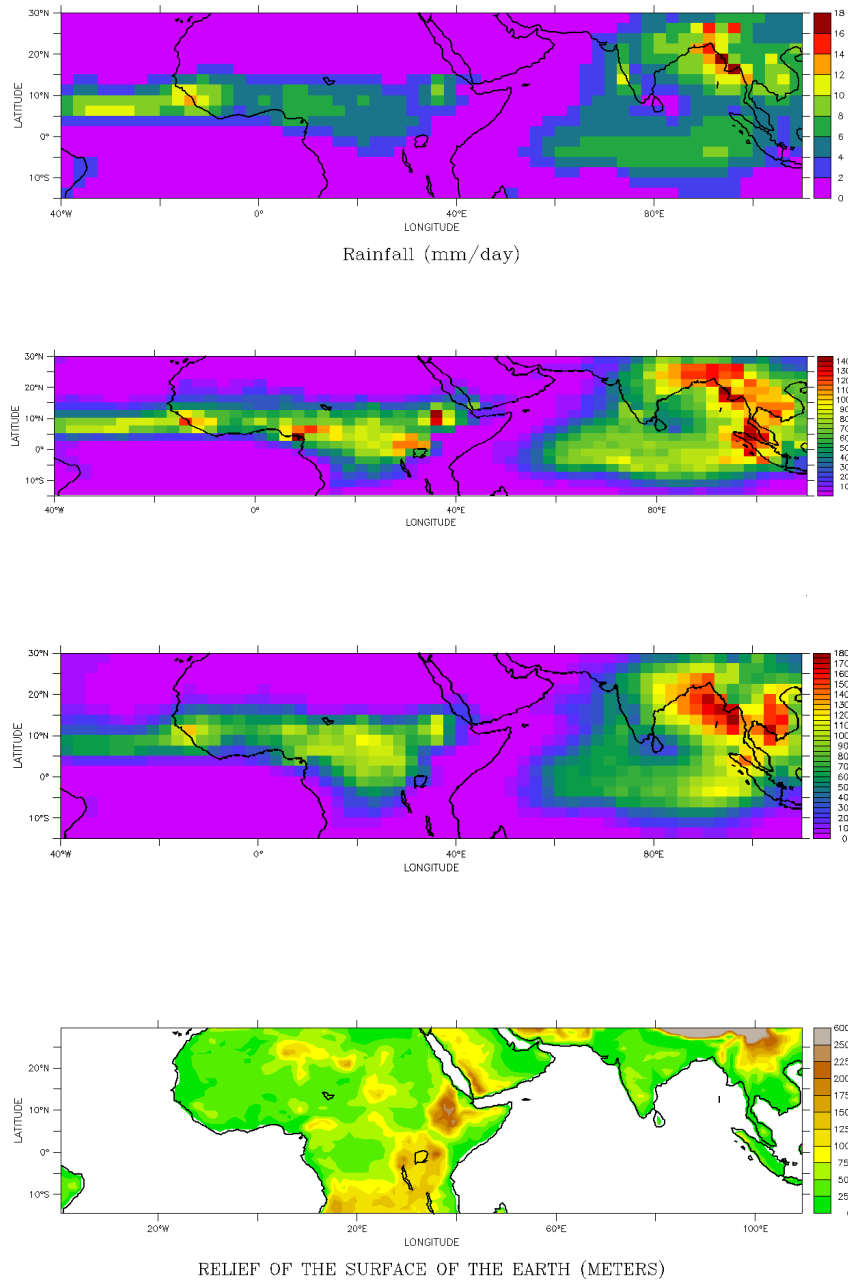


FIGURE 4.3 – a- Précipitations issues de GPCP en mm/jour pour la période 2002-2004 JJAS ; b- Population des clusters convectifs pour la période 2002-2004 JJAS ; c- Couverture nuage haut exprimée en h/mois pour la période 2002-2004 JJAS ; d- Orographie pour la zone d'étude ; point de grille de 2,5°.

Les résultats présentés ici sont en adéquation avec les précédents atlas de MCS, basés sur des définitions de MCS, des algorithmes de suivi, et des observations satellitaires différentes, qu'ils soient issues d'études locales (Tomasini et al. [2006], Fiolleau et al. [2009]), ou globales (Mohr et Zipser [1996], Liu et al. [2008]). On peut noter que le maximum d'occurrence des MCS correspond généralement avec les maximums de précipitation. Au-dessus de l'Atlantique, une structure zonale et homogène s'étend de la côte guinéenne jusqu'à la longitude 40°W (Machado et al. [1992]). Pour ce qui concerne la région indienne, trois comportements bien connus peuvent être observés dans ces cartes :

- le maximum local sur le flanc Ouest du Ghats,
- la présence d'un grand nombre de MCS sur la côte Est de la baie du Bengale (Zuidema [2003])
- la présence d'une large région structurée principalement de manière zonale et correspondant à la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) (Roca et Ramanathan [2000]) dans l'océan Indien.

Sur les continents, les distributions de MCS et de la pluie montrent des caractéristiques classiques de la mousson. Les précipitations d'Afrique de l'Ouest et les systèmes convectifs ne dépassent pas 17,5°N, mais s'étendent plus au Nord et atteignent l'Himalaya jusqu'aux environs de 27,5°N dans la région indienne. Le lien fort qui existe entre l'orographie et la présence de MCS est aussi bien observé avec des maxima locaux sur les montagnes guinéennes, le mont Cameroun et le plateau éthiopien pour l'Afrique de l'Ouest. Seuls quelques systèmes sont observés à l'Est de la vallée du grand Rift (Jackson et al. [2009]) qui constitue une barrière naturelle entre le bassin indien et ouest africain. En ce qui concerne la région de mousson indienne, on retrouve une population importante de MCS dans la région appelée "maritime continent" proche de Bornéo (Williams et Houze [1987]), avec une occurrence similaire à ce qu'on peut trouver dans la péninsule indochinoise. Les cartes révèlent également que le maximum local de couverture nuageuse observé sur le côté Est de la baie du Bengale apparaît comme étant le maximum global sur l'ensemble de la région d'étude.

La figure 4.4 illustre la distribution de la population des MCS en fonction de leur durée de vie. Le mode de la distribution est de 5 h, et bien que les systèmes plus longs que 36h soient rares (moins de 100 sur l'ensemble de la région et de la période d'étude), les MCS peuvent atteindre des durées de vie supérieures à 50 h.

La figure 4.5 montre une fonction de distribution cumulée de la couverture nuage froid des MCS en fonction de leur durée de vie. Tandis que les systèmes de courte durée de vie dominent les statistiques en terme de population, leur contribution en terme de couverture nuageuse est faible. Par exemple, les systèmes de durée de vie inférieure à 10 h contribuent jusqu'à 80% à la population totale, mais seulement 30% en terme de couverture nuage haut. De même, les systèmes durant plus de 24 h représentent 5% de la couverture nuageuse alors qu'ils comptent peu en terme de population.

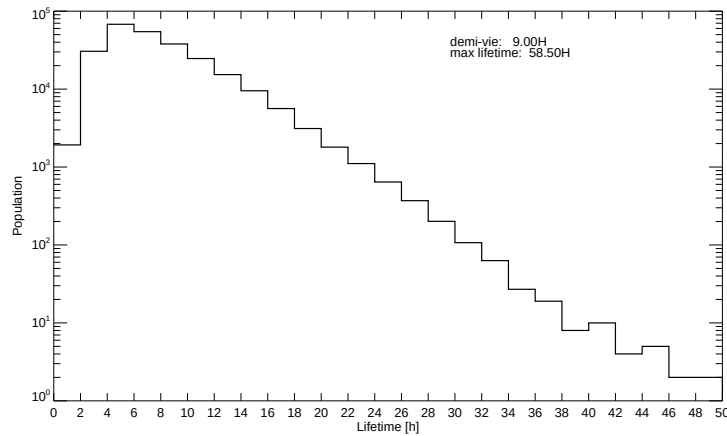


FIGURE 4.4 – Distribution de la durée de vie de l'ensemble des MCS pour l'ensemble de la région d'étude.

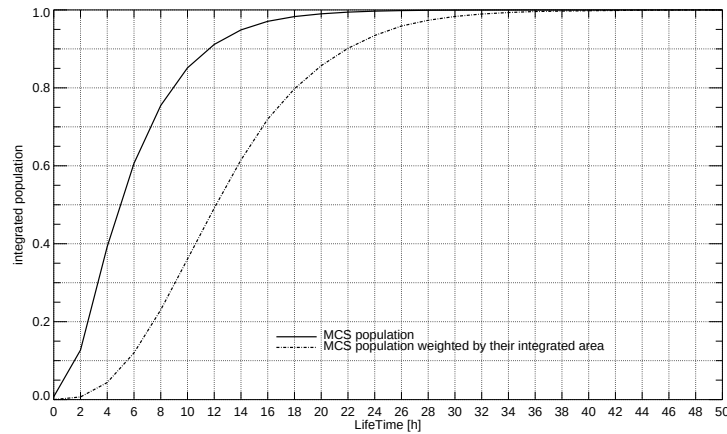


FIGURE 4.5 – Distribution cumulée et normalisée de la population des MCS (trait plein) en fonction de leur durée de vie pour l'ensemble de la région d'étude ; en fonction de la population des MCS pondérée par leur surface cumulée le long de leur cycle de vie (trait pointillé).

Ces résultats confirment les précédentes études sur la dépendance d'échelle des systèmes convectifs (Machado et al. [1992], Gambheer et Bhat [2000]). Ils montrent également que les systèmes de très longue durée de vie (150 h) segmentés par les algorithmes de suivi habituellement utilisés, ne sont pas identifiés par l'algorithme de suivi TOOCAN. Comme on a pu voir dans le chapitre précédent, la longue durée de vie de des systèmes peut être due aux techniques de détection par simple seuil en température de brillance, aux techniques de suivi par recouvrement, et aux observations géostationnaires de résolution temporelle de 3 h.

Les statistiques de taille maximum atteinte par les MCS durant leur cycle de vie sont illustrées figure 4.6. La distribution montre que les clusters convectifs présentent un large spectre de taille de 10^3 km^2 jusqu'à un million de km^2 . Une population similaire est observée pour un intervalle allant des petits systèmes (10^3 km^2) jusqu'aux systèmes de taille moyenne (10^5 km^2). Le nombre

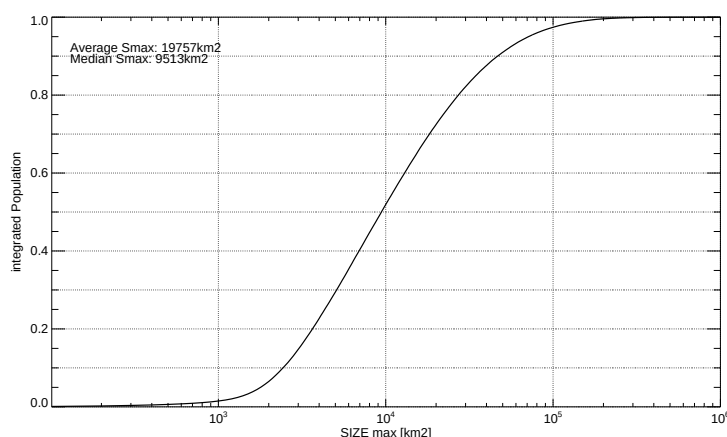


FIGURE 4.6 – Distribution cumulée et normalisée de la population des MCS en fonction de leur taille maximum pour l'ensemble de la région d'étude.

de MCS atteignant une surface supérieure à 10^5 km^2 décroît fortement avec la taille. Ainsi, 50% de la couverture nuage froid est associée à des systèmes atteignant une taille maximum de 10^4 km^2 . L'autre moitié est expliquée par les systèmes possédant une taille maximum jusqu'à 10^5 km^2 . Les plus gros mais très rares systèmes dépassant cette taille de 10^5 km^2 contribuent à 5% de la couverture nuageuse totale.

	Total		Océanique		Continental	
	Population	couverture nuage haut	Population	couverture nuage haut	Population	couverture nuage haut
classe 1	24%	1,5%	23%	1,5%	26%	2%
classe 2	76%	98,5%	77%	98,5%	74%	98%
classe 2a	76%	77%	75%	76%	77%	79%
classe 2b	24%	23%	25%	24%	23%	21%

TABLEAU 4.2 – Fraction de la population et de la couverture nuage haut pour chaque classe de systèmes exprimée en % ; les classes 2a et 2b sont relatives à la classe 2.

La contribution relative de chaque classe de MCS à la population totale et à la couverture nuage haut totale est présentée dans le tableau 4.2 pour la région globale, sa partie continentale et sa partie océanique. Avant tout, on peut observer que la classe 1 ne contribue qu'à 1,5% de la couverture nuage haut totale alors qu'elle représente 24% des systèmes convectifs. La classe 2 contribue au reste de la population et de la couverture nuageuse totale avec 76% et 98,5% respectivement. La classe 2b explique environ 24% de la population de la classe 2a et de la couverture nuageuse tandis que la classe 2a domine la population des MCS en terme de nombre et de couverture nuageuse.

Les cartes présentées figures 4.7 et 4.8 représentent la contribution relative des classes 1, 2a et 2b à la population totale et à la couverture nuage haut totale respectivement pour des points de grille de $2,5^\circ$. En ce qui concerne la classe 1, on peut observer que la contribution des MCS à la population totale ne dépasse jamais 30%. On peut cependant observer quelques particularités régionales : dans la région de l'océan Atlantique, la contribution de MCS de la classe 1 à la

population totale est au maximum de 10% pour une grande majorité des points de grille, alors que pour la région ouest africaine, cette contribution est comprise dans un intervalle [10%-30%]. En revanche, pour l'ensemble de la région d'étude, la contribution de la classe 1 à la couverture nuage haut est inférieure à 5% (figure 4.8), à l'exception de quelques points de grilles. En ce qui concerne la classe 2a, on peut noter que la contribution en terme de population est plus importante dans la région africaine que dans la région indienne. Dans l'océan indien, cette contribution à la population totale est comprise dans un intervalle [60%-70%], alors que dans l'océan Atlantique elle correspond à un intervalle [65%-70%]. La contribution relative à la couverture nuage haut de la classe 2a est plus forte sur les continents que sur les océans de l'ordre de 5 à 10%.

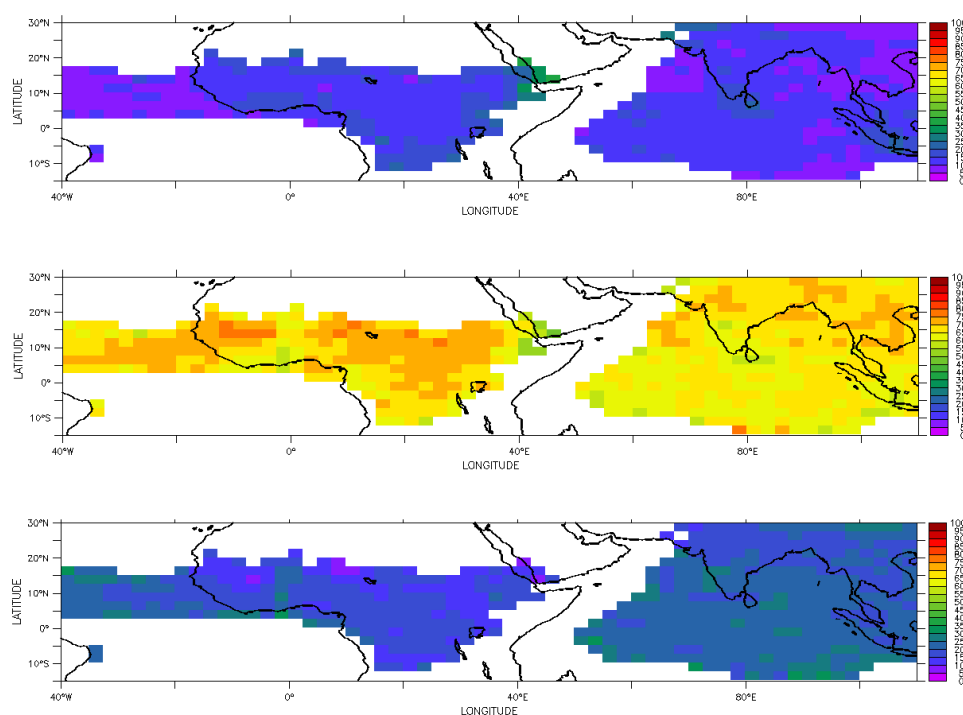


FIGURE 4.7 – Contribution des classes 1, 2a et 2b à la population totale des MCS pour des points de grille de 2,5°, exprimées en pourcentage de la population totale.

En résumé, les statistiques obtenues en utilisant ce nouvel algorithme de suivi confirment les principales caractéristiques des systèmes convectifs de mousson déjà connues mais permettent de mettre en évidence les particularités sur le cycle de vie des MCS. Ainsi, il est montré qu'une seule classe basée sur une définition simple domine la population des MCS dans les régions de mousson. Cette catégorie est analysée plus en détail dans les paragraphes suivants.

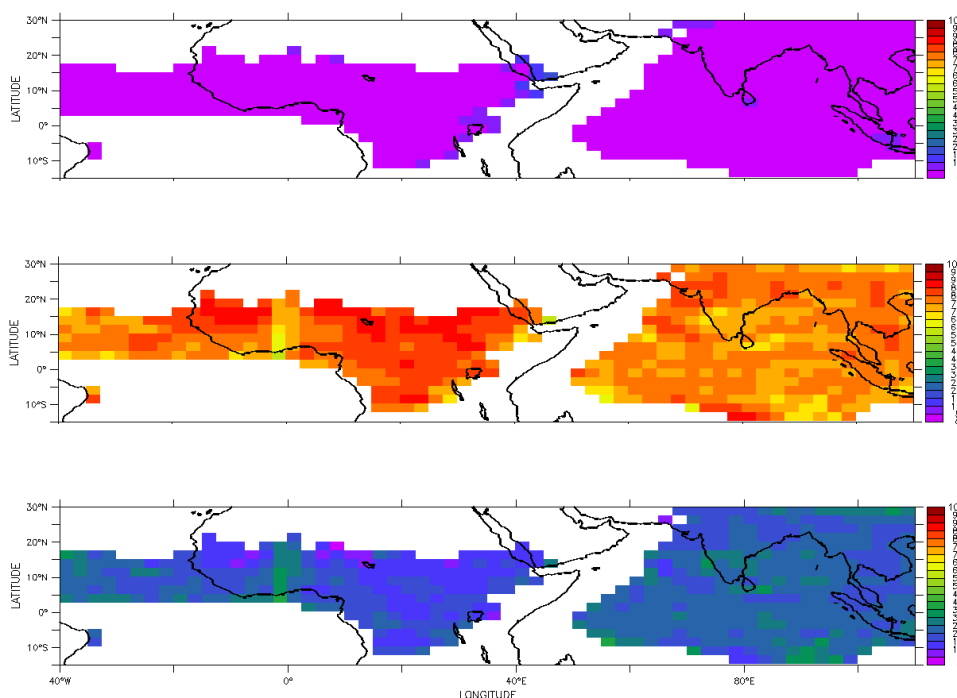


FIGURE 4.8 – Contribution des classes 1, 2a et 2b à la couverture nuage haut totale pour des points de grille de 2,5° exprimée en pourcentage de la couverture nuage haut totale.

4.4 Simplification du cycle de vie des MCS

Un exercice de simplification du cycle de vie est maintenant introduit afin d’approfondir notre étude sur l’évolution des paramètres morphologiques des MCS appartenant à la catégorie de la classe 2a sur l’ensemble de la région de mousson.

4.4.1 Modèle linéaire d’accroissement/décroissance (LGD : Linear Growth/Decay)

Dans l’espace normalisé établi, les surfaces nuages froids des systèmes de la classe 2a s’accroissent de 0 à 1 jusqu’à T_{max} , et décrivent ensuite une décroissance pour terminer à 0. Le cycle de vie de chacun des MCS est décrit par 10 étapes représentant chacune 10% du cycle de vie du MCS. Ce modèle linéaire nous permet de décomposer chaque cycle de vie des MCS en deux phases : une phase de croissance et une phase de décroissance. Ce modèle nous permet de plus d’avancer l’hypothèse que la surface froide du MCS évolue linéairement à chaque étape. La phase de croissance correspond à une augmentation de la région stratiforme qui est alimentée par les cellules convectives actives possédant une durée de vie plus courte que le taux de dissipation des matériaux composant la partie stratiforme. De même, la phase de décroissance est caractérisée par une dissipation rapide des éléments composant la partie stratiforme et par un taux faible de renou-

vement de nouvelles cellules convectives. Ainsi, ce modèle linéaire nous amène à caractériser l'évolution de la surface froide d'un MCS par trois paramètres :

- la durée de vie du MCS
- la taille maximale de la couverture nuageuse atteinte par le MCS au cours de son cycle de vie, S_{max}
- l'instant où ce maximum est atteint, T_{max} .

Le modèle linéaire basé sur une croissance et une décroissance dans un espace temps relatif (0%-100%) signifie de plus que le taux de remplacement du matériel stratiforme est constant dans chacune des deux étapes de croissance et de décroissance. Les taux de croissance et de décroissance sont respectivement de $1/T_{max}$ et $1/(1-T_{max})$ dans l'espace normalisé et peut être exprimé en utilisant les paramètres intégrés S_{max} et durée de vie des MCS par :

$$G_{rate} = \frac{1}{T_{max}} \times \frac{S_{max}}{Duration}$$

$$D_{rate} = \frac{1}{(1-T_{max})} \times \frac{S_{max}}{Duration}$$

Ces deux nouveaux paramètres seront utilisés par la suite pour caractériser les MCS. Ce modèle de MCS est beaucoup plus simple que les modèles conceptuels existants de MCS qui incluent au minimum une phase d'initiation, une phase de maturité et une phase de dissipation avec des taux de croissance et de décroissance variés. Contrairement aux descriptions plus élaborées des phases de cycle de vie des MCS, habituellement basées sur des dynamiques internes et des processus d'humidité au sein du système, le modèle présenté ici a pour objectif de décrire l'évolution dans le temps de la surface froide du système. Au cours du paragraphe suivant, nous pourrions noter que le modèle proposé est en adéquation avec l'évolution de la morphologie des systèmes au cours de leur cycle de vie.

4.4.2 Evaluation de la pertinence du modèle LGD

Une RMSD (Root Mean Square Deviation) entre le modèle paramétrique et chacun des systèmes est calculée dans le but de quantifier la pertinence du modèle :

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{1,i} - X_{2,i})^2}{n}}$$

où $X_{1,i}$ représente la surface froide normalisée du MCS, $X_{2,i}$ représente le modèle paramétrique associée et n correspond au nombre de phases du cycle de vie normalisé.

La figure 4.9 va nous permettre d'estimer la qualité du modèle LGD en montrant d'une part les trajectoires de différents cas de MCS sur l'ensemble de leur cycle de vie et d'autre part, le cycle de vie de leur surface froide dans l'espace normalisé associé au modèle LGD estimé. Cinq cas d'étude sont présentés et pour chacun des cas, une RMSD est calculée.

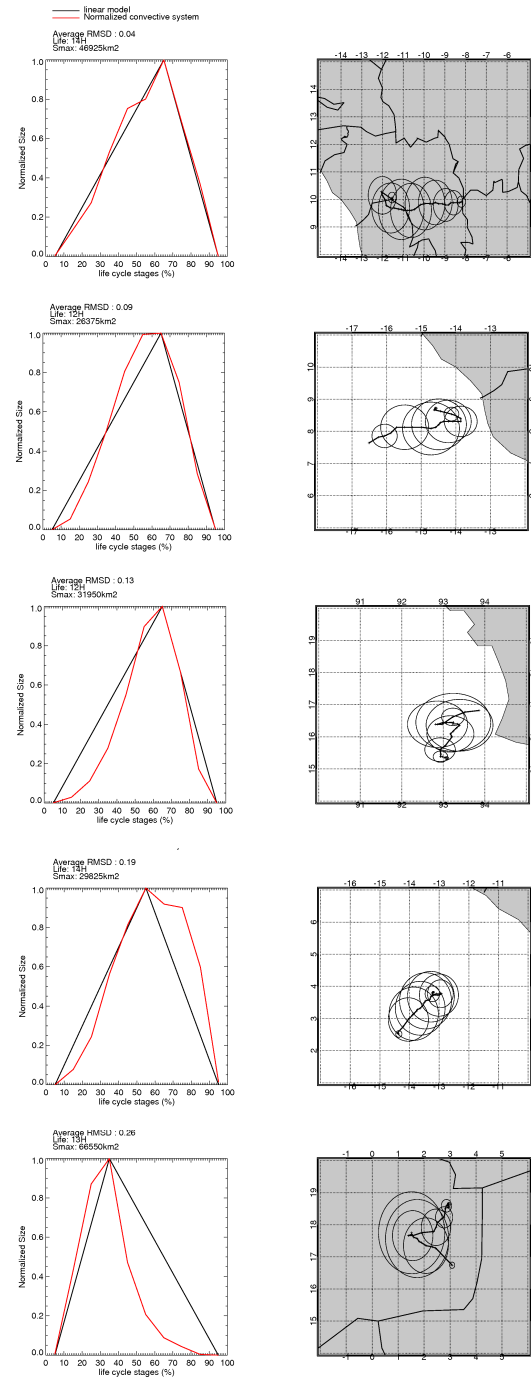


FIGURE 4.9 – Illustration des trajectoires et des ellipses équivalentes pour différents cas de systèmes convectifs de la classe 2a ; évolutions des surfaces froides des systèmes convectifs dans l'espace normalisé associées au modèle linéaire LGD.

- Le premier système a eu lieu le 15 août 2002 au-dessus de l'Afrique de l'Ouest. Il possède une durée de vie de 13 h, une taille maximum de 46 925 km² atteinte lors de la phase 60% de son cycle de vie normalisé. Le modèle LGD associé est en adéquation avec l'évolution de la surface froide du MCS au cours de son cycle de vie. Il en résulte une RMSD de 0,04.

- Le deuxième système s’est déroulé le 18 juin 2002 également en Afrique de l’Ouest. Il possède une durée de vie de 12 h, une taille maximum de 26 375 km² atteinte lors de la phase 60% de son cycle de vie. Durant le premier tiers de son cycle de vie, le modèle LGD surestime légèrement le taux d’accroissement du MCS, puis jusqu’à T_{max} , il le sous-estime légèrement. Après le maximum de surface froide, la décroissance du système est adéquation avec le modèle LGD. La RMSD qui en résulte est de 0,09.
- Le troisième cas d’étude a eu lieu le 14 juin 2002. Il possède une durée de vie de 12 h, une taille maximum de 31 950 km² atteinte lors de la phase 60% de son cycle de vie normalisé. Lors de la première moitié de son cycle de vie, le modèle a tendance à surestimer assez fortement le taux d’accroissement du système, puis lors de la phase de décroissance, le modèle LGD semble être en phase avec le taux de décroissance du système. La RMSD résultante est de 0,13.
- Le quatrième système qui s’est déroulé le 2 juin 2002 possède une durée de vie de 14 h, une taille maximum de 29 825 km² atteinte lors de la phase 50% de son cycle de vie. Le modèle LGD surestime légèrement son taux d’accroissement pendant le premier tiers de son cycle de vie, mais c’est surtout lors de la phase de décroissance que le modèle LGD surestime fortement le taux de décroissance du MCS. La RMSD résultante est alors de 0,19.
- Le cinquième système a eu lieu le 11 juillet 2003 en Afrique de l’Ouest. Il possède une durée de vie de 13 h, une taille maximum de 66 650 km² atteinte lors de la phase 30% de son cycle de vie normalisé. Lors de la phase de croissance, le modèle LGD a tendance à sous-estimer son taux d’accroissement. En revanche, le système convectif décrit une forte décroissance de sa surface froide entre les phases 30% et 60%. Le modèle LGD sous-estime alors fortement son taux de décroissance et il en résulte une RMSD de 0,26.

Une valeur de RMSD inférieure à 0,15 semble alors un bon critère afin de sélectionner des MCS décrivant un cycle de vie de leur surface froide en adéquation avec le modèle LGD.

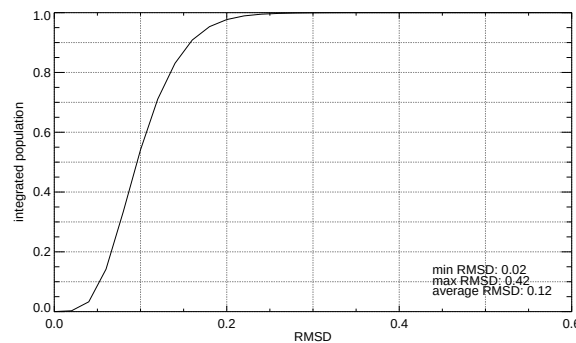


FIGURE 4.10 – Distribution cumulée et normalisée de la RMSD pour les systèmes de la classe 2a.

La figure 4.10 montre les statistiques de RMSD pour les systèmes de la classe 2a. L’histogramme de la RMSD varie entre 0,02 et 0,44. La moyenne de RMSD est de 0,12 et le mode de la PDF aux alentours de 0,1. Plus de 90% de la population des MCS est caractérisée par une RMSD

inférieure à 0,15 (figure 4.10) indiquant que ce simple modèle LGD est cohérent avec la plupart des systèmes de la classe 2a rencontrés dans les régions de mousson.

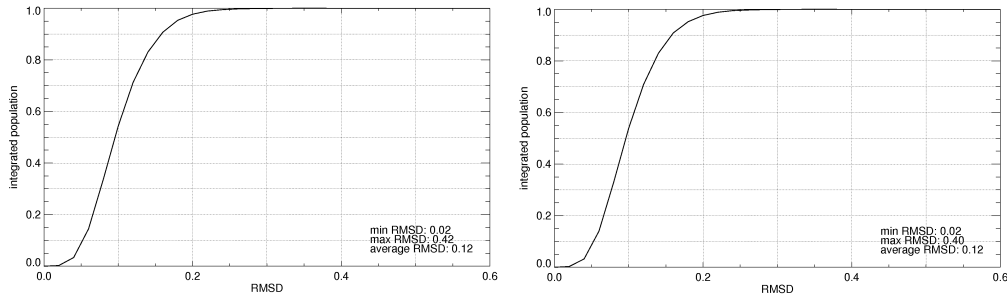


FIGURE 4.11 – Distribution cumulée et normalisée de la RMSD pour les systèmes de la classe 2a continentaux (droite) et océaniques (gauche).

De plus, la RMSD montre peu de différences entre les MCS continentaux et océaniques (figure 4.11).

Enfin, si l'on se réfère aux distributions 2D de la population des MCS en fonction de la RMSD et des durées de vie (figure 4.12), on peut observer que la RMSD montre peu de dépendance à la durée de vie. La figure 4.13 montrant une distribution 2D de la population des MCS en fonction de la RMSD et de la taille maximum permet également de conclure que la RMSD calculée est indépendante à la taille maximum des systèmes convectifs.

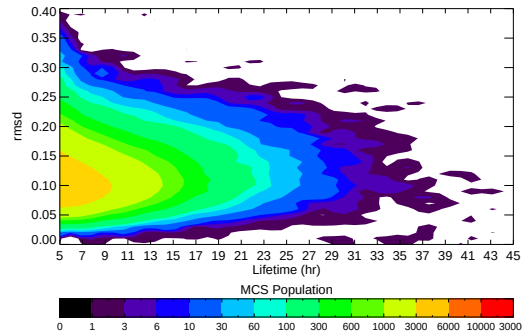


FIGURE 4.12 – Distribution 2D de la population des systèmes convectifs de la classe 2a en fonction de leur RMSD et de leur durée de vie (en h).

Ces études statistiques permettent ainsi de confirmer que le modèle paramétrique LGD est adapté à la représentation du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson et montre de plus qu'une telle approche simplifiée est valide sur un large spectre de MCS. Pour résumer, nous avons montré qu'avec une simple normalisation des MCS, il était possible de décrire le cycle de vie complet des systèmes convectifs appartenant à la catégorie principale (classe 2a) par un simple modèle linéaire de croissance et de décroissance caractérisé par trois paramètres : T_{max} , S_{max} et durée de vie.

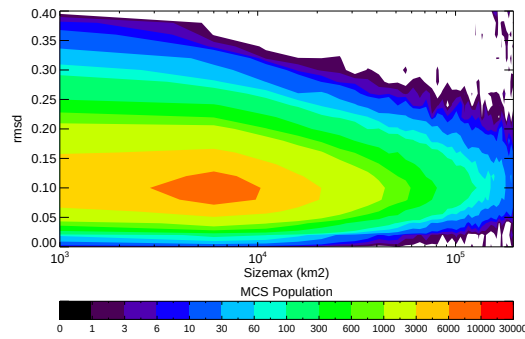


FIGURE 4.13 – Distribution 2D de la population des systèmes convectifs de la classe 2a en fonction de leur RMSD et de leur taille maximum (en km²).

4.4.3 Cycle de vie des systèmes convectifs de mousson de la classe 2a

Le modèle linéaire simplifié est maintenant utilisé pour étudier les caractéristiques du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson appartenant à la classe 2a.

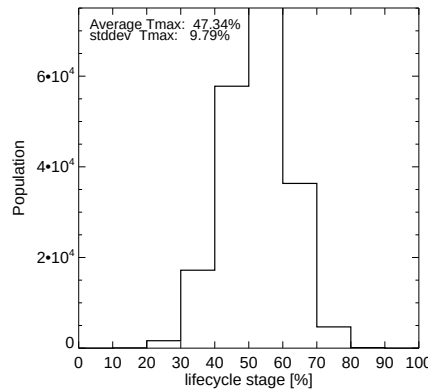


FIGURE 4.14 – Distribution de T_{max} pour les systèmes de la classe 2a.

La figure 4.14 montre la distribution de probabilité de T_{max} . Cette distribution suit une loi gaussienne de moyenne à 48% avec un faible écart-type de 10%. La majorité des systèmes présentent un T_{max} entre les phases 40% et 70%, et les systèmes asymétriques ne représentent que 12% de la population totale de la classe 2a, soit 13% de la couverture nuage haut totale de la classe 2a.

La carte présentée figure 4.15 confirme le caractère concentré de la distribution de T_{max} autour d'une moyenne de 50% environ dans l'ensemble de la région d'étude.

Les distributions 2D de la population des systèmes convectifs de mousson en fonction de T_{max} et de leur durée de vie d'une part, de leur taille maximum d'autre part, sont présentées figure 4.16 et figure 4.17. Elles montrent la non dépendance de T_{max} à la durée de vie et aux tailles maximums.

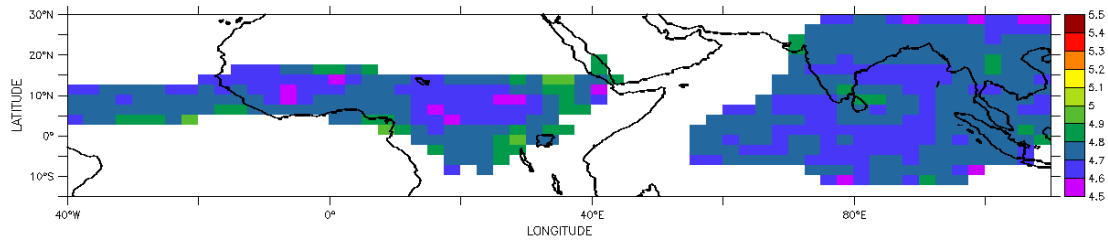


FIGURE 4.15 – T_{max} pour les systèmes de la classe 2a pour un point de grille de $2,5^\circ$.

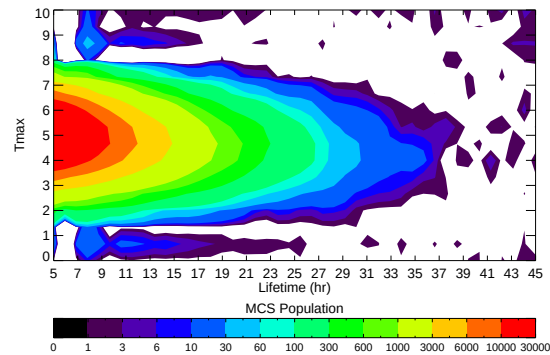


FIGURE 4.16 – Distribution 2D de la population des systèmes convectifs de la classe 2a en fonction de T_{max} et de leur durée de vie (en h).

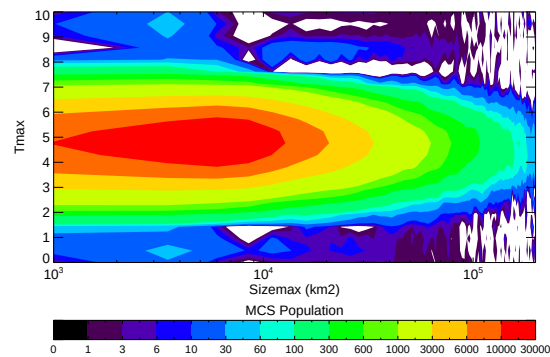


FIGURE 4.17 – Distribution 2D de la population des systèmes convectifs de la classe 2a en fonction de T_{max} et de leur taille maximum (en km^2).

Le caractère symétrique de l'évolution des surfaces froides au cours du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson a également été observé dans d'autres parties du monde. McAnelly et Cotton [1989] dans leur étude des Complexes Convectifs de Mousson (MCC) dans les plaines centrales des Etats-Unis, ont montré que le composite moyen de ces MCC (détectés par un seuil de 240 K) au cours de leur cycle de vie montrait une forte symétrie. De même, l'analyse de Sherwood

et Wahrlich [1999] des systèmes convectifs (identifiés par un seuil de 235 K) de la 'warm pool' indiquait une symétrie de la surface froide des systèmes le long de leur cycle de vie. Les raisons d'accroissement de décroissance avec une même durée, donc avec des taux d'accroissement G_{rate} et de décroissance D_{rate} des surfaces froides identiques des systèmes convectifs ne sont pas évidentes. La symétrie ne dépend pas de la région géographique (continent, océan), ni de la durée de vie des MCS ou de leur taille maximale atteinte. Cette insensibilité nous amène dans un premier temps à considérer la dynamique interne des MCS comme étant la cause principale de cette symétrie plutôt que les conditions environnementales. Cela peut être également expliqué par les caractéristiques des MCS segmentés par un seuil de 235 K sur l'imagerie infrarouge. Il est certain que l'ajout des cirrus fins non-précipitants dans la segmentation des systèmes convectifs modifierait la PDF des tailles de MCS (Roca et al. [2002]) et par conséquent l'évolution dans le temps de l'ensemble de la couverture nuage haut due aux MCS (Sherwood et Wahrlich [1999]). De plus, ces cirrus fins modifieraient également le caractère symétrique du cycle de vie des surfaces froides des MCS. Cependant, au seuil de 235 K, le rôle des systèmes convectifs présentant une symétrie dans leur cycle de vie étant prédominant, le reste de l'étude se focalisera sur les systèmes de la classe 2a présentant un T_{max} compris dans l'intervalle 40%-70%. Ce sous-jeu de données représente 88% de la population totale des systèmes convectifs appartenant à la classe2a, correspondant à 87% de la couverture nuageuse totale de la classe2a et sera noté classe2a 40-70 dans les paragraphes suivants.

4.5 Discussion

La distribution des durées de vie des MCS de la classe2a 40-70 est présentée figure 4.18. Le maximum de population est atteint pour l'intervalle [5 h-7 h] avec 60 000 MCS segmentés et la durée de vie maximum est de 48 h. La distribution semble suivre une loi exponentielle. Il est alors difficile de la caractériser par une moyenne ou son mode.

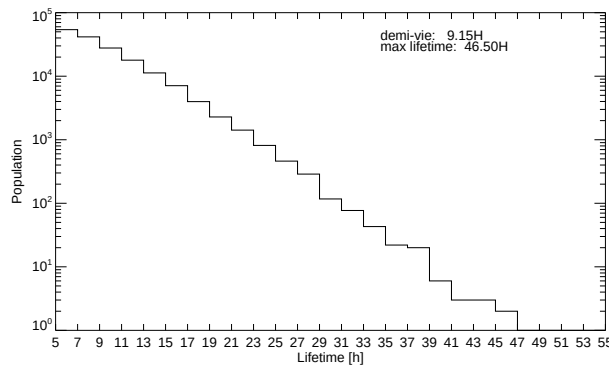


FIGURE 4.18 – Distribution de la durée de vie des MCS de la classe2a 40-70 pour l'ensemble de la région d'étude (h).

La carte des durées de vie moyennes par point de grille de $2,5^\circ$ (figure 4.22) montre effectivement peu de contraste entre les régions. Les durées de vie moyennes sont alors comprises dans un intervalle [8 h-10,6 h] pour l'ensemble de la région d'étude, excepté dans la région du grand Rift où la durée de vie moyenne n'excède pas 8 h. Avec ce seul paramètre des durées de vie moyennes, il semble alors difficile d'observer des différences marquées de régimes entre les régions.

La figure 4.19 illustre les statistiques de taille maximum atteinte par les MCS de la classe2a 40-70 durant leur cycle de vie. Le nombre de MCS atteignant une surface supérieure à 10^5 km^2 décroît fortement avec la taille. 50% de la couverture nuage haut est alors associée à des systèmes atteignant une taille maximum de $16\,044 \text{ km}^2$. La moyenne des tailles maximums pour les MCS de la classe2a 40-70 est de $28\,425 \text{ km}^2$. Bien que la moyenne ne soit pas un indicateur suffisant pour caractériser cette distribution, la carte des tailles maximums moyennes par point de grille $2,5^\circ$ (figure 4.22) permet de montrer de fortes variabilités spatiales.

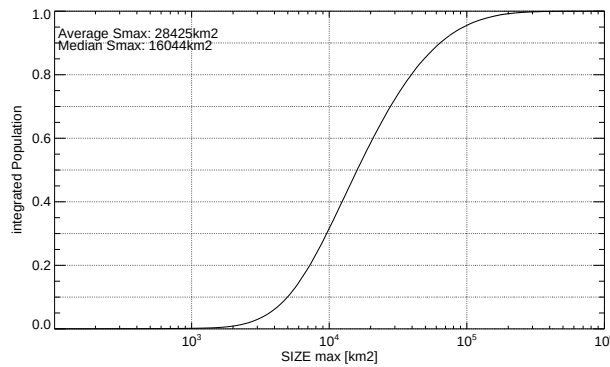


FIGURE 4.19 – *Distribution des tailles maximums des systèmes de la classe2a 40-70 (km^2).*

La figure 4.20 illustre le diagramme de dispersion de la durée de vie de de systèmes convectifs de mousson en fonction de leur surface froide maximum atteinte au cours de leur cycle de vie. Ainsi, on peut observer une corrélation forte entre ces deux variables ($>0,7$) sur l'ensemble de la région d'étude. Ces corrélations seront étudiées plus en détail figure 4.27 où la variabilité entre sept régions d'intérêt sera discutée.

En représentant le cycle de vie de la surface froide d'un système convectif par son modèle LGD, le taux d'accroissement G_{rate} a été défini comme le paramètre le plus intégré des systèmes convectifs. Il est proposé ici comme un indicateur du cycle de vie du système convectif. A une échelle individuelle, G_{rate} possède une moyenne de $1192 \text{ km}^2/\text{h}$, peut atteindre $32\,961 \text{ km}^2/\text{h}$ et est distribué selon une loi de puissance vraisemblablement (figure 4.21). Quand il est localement moyenné, le paramètre G_{rate} varie d'un facteur 2,5 entre 637 et $1\,535 \text{ km}^2/\text{h}$ (tableau 4.3).

La variabilité spatiale de G_{rate} est importante et semble être dominée par celle des tailles maximums des systèmes convectifs (figure 4.22). Cette carte indique qu'une simple séparation des systèmes convectifs continent/océan ou Afrique/Inde n'est pas adaptée pour observer des différences marquées dans les régimes de maintenance. Pour observer ces différences, il faut alors

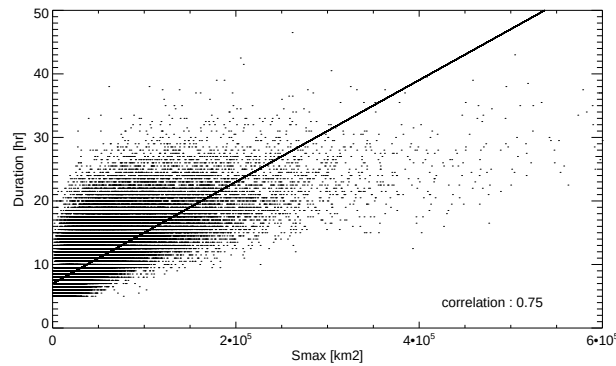


FIGURE 4.20 – Diagramme de dispersion des durées de vie en fonction des tailles maximums des MCS de la classe2a.

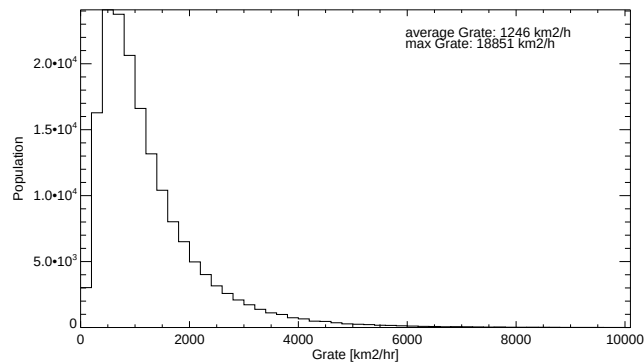


FIGURE 4.21 – Distribution des taux d'accroissements des MCS de la classe2a 40-70 (km^2/h).

prendre en compte les spécificités régionales. En effet, les cartes (figure 4.22) montrent une plus grande différence entre les systèmes de l'Atlantique ITCZ et de la baie du Bengale qu'entre les systèmes de l'Atlantique ITCZ et les systèmes continentaux de la côte guinéenne (jusqu'à 10°N). De même, les caractéristiques des systèmes de la région du Sahel semblent être proches de ceux de la baie du Bengale.

Ainsi, une catégorisation en sept régions est proposée pour étudier ces spécificités. Ces régions sont listées dans le tableau 4.3 et consistent en deux régions continentales et une région océanique pour le secteur africain et une région continentale et trois régions océaniques pour le secteur indien. Le tableau 4.3 reporte également les paramètres importants pour la caractérisation des systèmes de ces régions.

La figure 4.23 montre les distributions des durées de vie des sept régions d'intérêt normalisées par le maximum de population. La courbe rouge représente la distribution de population globale de la classe2a 40-70 normalisée également par son maximum de population. On peut observer un écart faible entre les distributions régionales et la distribution globale pour des durées de vie inférieures à 20 h, à l'exception des la baie du bengale Ouest et Est présentant un écart à la distribution

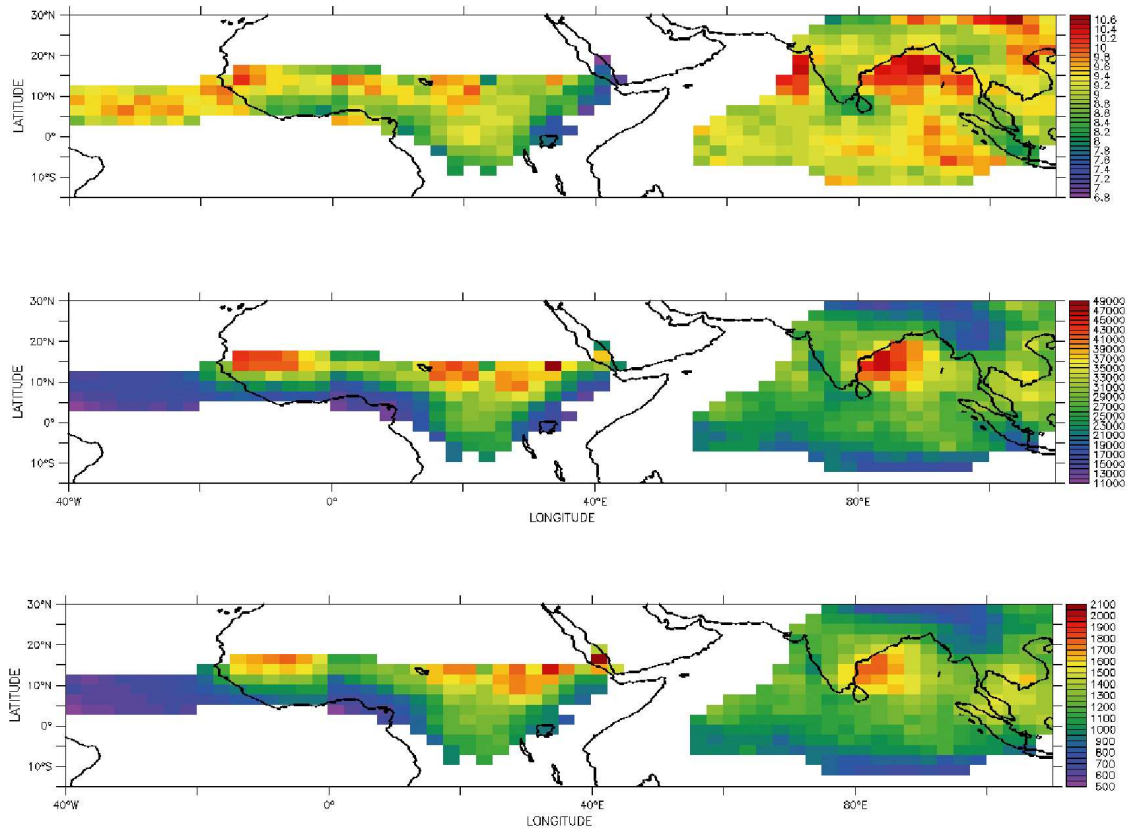


FIGURE 4.22 – a- *Durée de vie moyenne des systèmes convectifs de la classe2a 40-70 pour la période 2002-2004 JJAS exprimée en heure* ; b- *Taille maximum moyenne des systèmes convectifs de la classe2a 40-70 pour la période 2002-2004 JJAS exprimée en km²* ; c- *Taux d'accroissement moyen des systèmes convectifs de la classe2a 40-70 pour la période 2002-2004 JJAS exprimée en km²/h ; point de grille de 2,5°.*

globale plus important quel que soit l'intervalle de durée de vie. Les distributions régionales ne montrent alors des disparités que dans leur queue de distribution à partir d'une durée de vie de 20 h. Par exemple, la queue de distribution des durées de vie de la boîte "Océan Indien" est beaucoup plus longue que celles des boîtes "Côte Guinéenne" ou "Continent Indien".

Afin d'observer ces disparités régionales, les cartes présentées figure 4.24 illustrent la contribution des MCS possédant une durée de vie supérieure à 20 h à la population totale et à la couverture nuage haut. La carte de la contribution des MCS > 20 h à la population totale montre des disparités régionales. La population des MCS > 20 h de la baie du Bengale contribue pour plus de 3% à la population totale avec un maximum rencontré de 6%. Pour la zone Atlantique ITCZ, cette contribution à la population totale dépasse 2,5%. A l'inverse, la contribution des MCS de durée de vie supérieures à 20 h de la côte guinéenne ne dépasse jamais 2% et celle du continent indien 1,3%. En terme de contribution à la couverture nuage haut, les MCS de durée de vie supérieures à 20h des zones Atlantiques ITCZ et de la baie du Bengale expliquent entre 20% et 40% de la couverture

Région #	Nom de la région	Type de région	Coordonnées de la région	Durée de vie moyenne (h)	Taille maximum moyenne (km ²)	G _{rate} moyen (km ² /h)
1	Atlantique ITCZ	Océanique	40°W-20°W 5°N-15°N	9.2	14474	637
2	Côte Guinéenne	Continentale	17.5°W-17.5°E 0°N-10°N	8.9	23491	1107
3	Sahel	Continentale	17.5°W-25°E 10°N-20°N	9.0	33825	1476
4	Baie du Bengale Ouest	Océanique	80°E-90°E 10°N-25°N	9.2	33678	1535
5	Baie du Bengale Est	Océanique	90°E-105°E 10°N-25°N	9.2	24656	1120
6	Sous-continent Indien	Continentale	70°E-105°E 10°N-30°N	8.7	20777	1010
7	Océan Indien	Océanique	60°E-100°E 10°S-5°N	8.9	25204	1176

TABLEAU 4.3 – Caractéristiques des systèmes convectifs de moussons en fonction des régions d'étude.

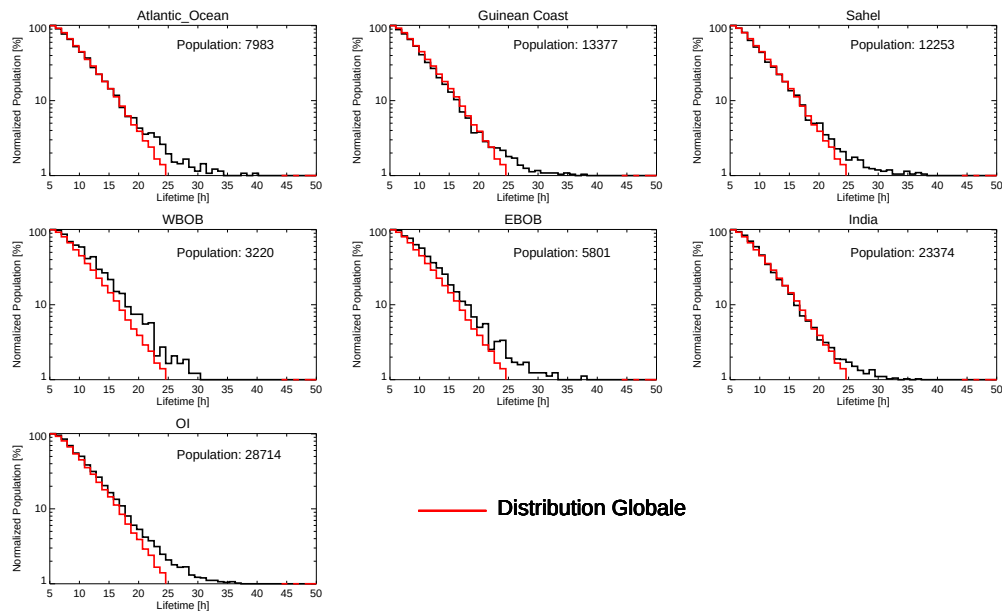


FIGURE 4.23 – Histogrammes des durées de vie des MCS de la classe 2a 40-70 pour chacune des régions d'intérêt normalisés par leur population maximum. La courbe rouge représente la distribution de population globale de la classe 2a 40-70 normalisée également par son maximum de population.

nuage haut, alors que la contribution de ces MCS à la couverture nuage haut de la Côte guinéenne et du continent indien ne dépasse qu'à de rares exceptions les 20%.

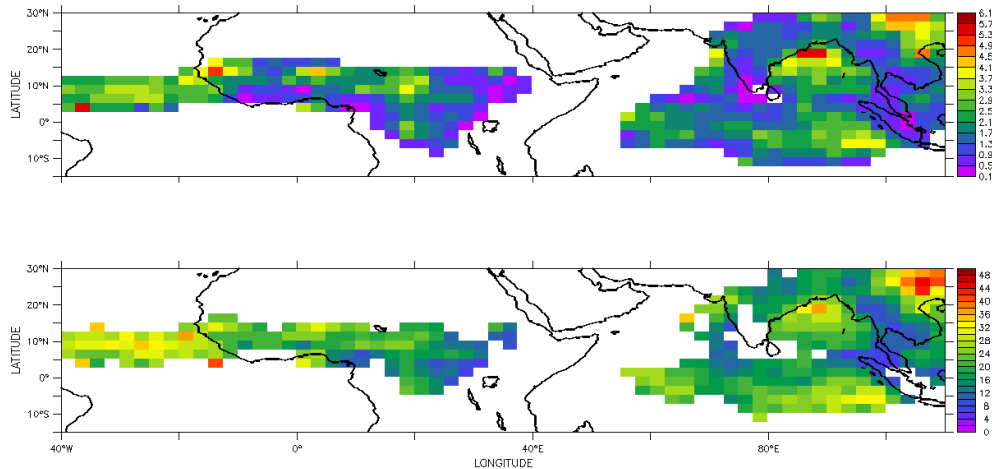


FIGURE 4.24 – a- Cartes des contributions des MCS de durée de vie $> 20h$ à la population totale de la classe 2a 40-70 exprimées en % de la population totale ; b- à la couverture nuage haut de la classe 2a 40-70 exprimée en % de la couverture nuage haut totale.

Les statistiques de taille maximum des MCS sont présentées figure 4.25 pour chacune des sept régions d'intérêt. On peut observer dans un premier temps que les distributions des systèmes convectifs de la zone sahélienne et de la baie du Bengale semblent similaires. C'est dans ces deux régions que l'on retrouve le plus grand nombre de systèmes convectifs atteignant des tailles maximums supérieurs à 10^5 km^2 . Ainsi 5% de la population totale est expliquée par ces gros systèmes. Cette similarité entre ces deux régions se retrouve dans la distribution des taux d'accroissement (figure 4.26) où l'on observe un nombre significatif de MCS possédant des G_{rate} supérieurs à $6\,000 \text{ km}^2/\text{h}$.

Des sept régions d'intérêt, c'est dans la boîte Atlantique ITCZ que l'on retrouve les MCS possédant des tailles maximums les plus petites. Ainsi, 50% de la population des MCS de cette région est expliquée par des MCS de taille maximum inférieure à $8\,930 \text{ km}^2$. De même 95% de la population de cette région correspond à des MCS de taille maximum inférieure à $30\,000 \text{ km}^2$. Cette particularité se retrouve dans la distribution des taux d'accroissement de cette région, ou peu de systèmes dépassent un G_{rate} de $6\,000 \text{ km}^2$.

La figure 4.27 montre des diagrammes de dispersion pour chacune des régions permettant d'indiquer le degré de corrélation existant entre les durées de vie des MCS et leur taille maximum. Elle montre ainsi que pour chacune des régions considérées, la corrélation entre ces deux paramètres est particulièrement forte ($> 0,73$).

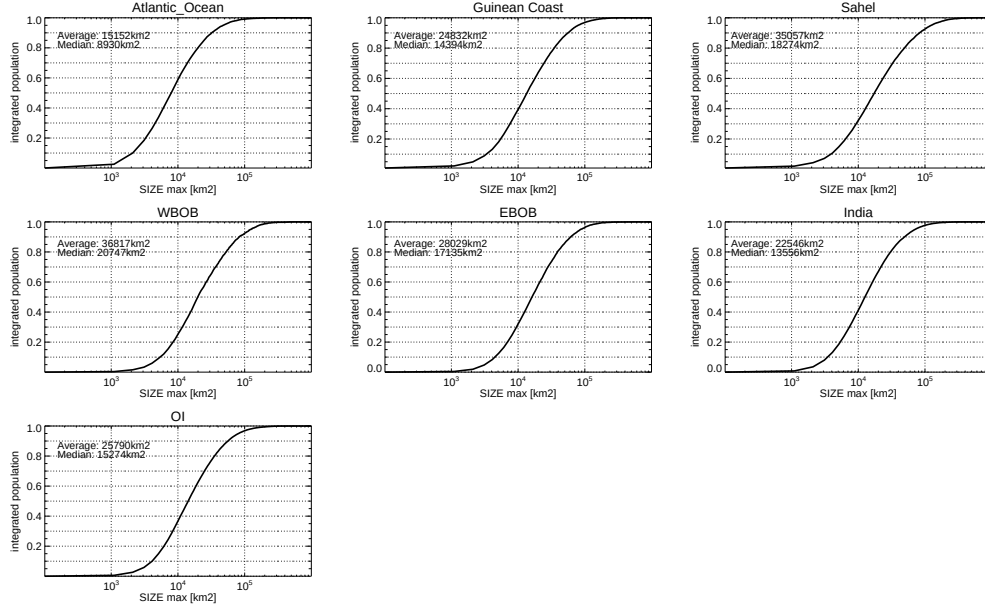


FIGURE 4.25 – Fonction de distribution cumulée et normalisée des tailles maximums des MCS de la classe 2a 40-70 pour chacune des régions d'intérêt.

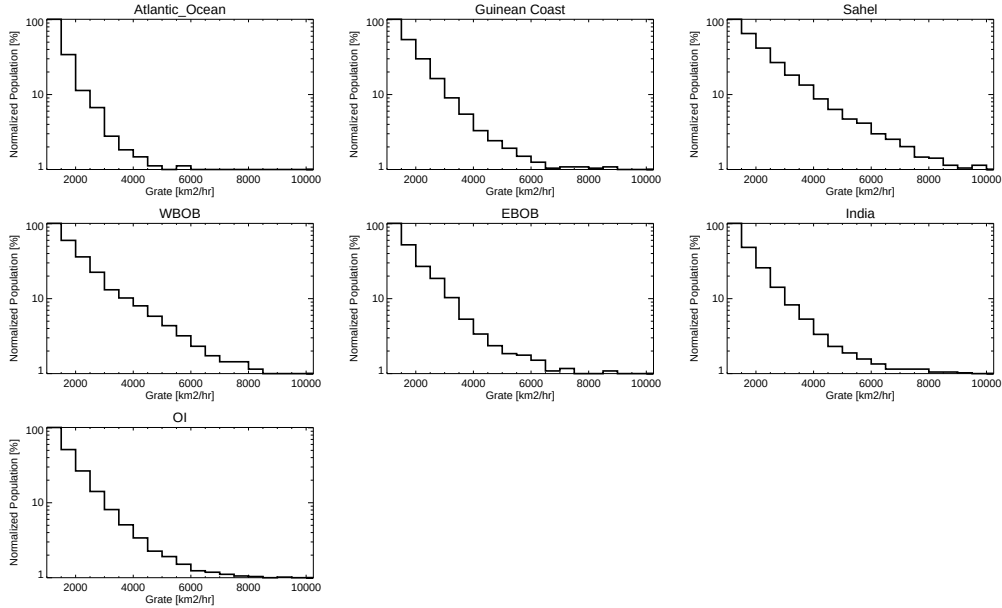


FIGURE 4.26 – Histogramme des Grates des MCS de la classe 2a 40-70 pour chacune des régions d'intérêt (km²/h).

Une conséquence importante du lien fort qui existe entre le maximum de taille et la durée de vie des systèmes convectifs de mousson réside dans le fait que le cycle de vie morphologique des MCS est dépendant de moins de degrés de liberté. Ainsi, étant donné que T_{max} est constant et égale à 50%, que la durée de vie et la taille maximum des systèmes est fortement corrélée, nous pouvons en conclure que l'évolution de la surface froide des systèmes convectifs du début à la fin de son cycle de vie est entièrement résumée par un seul paramètre. L'ensemble du problème

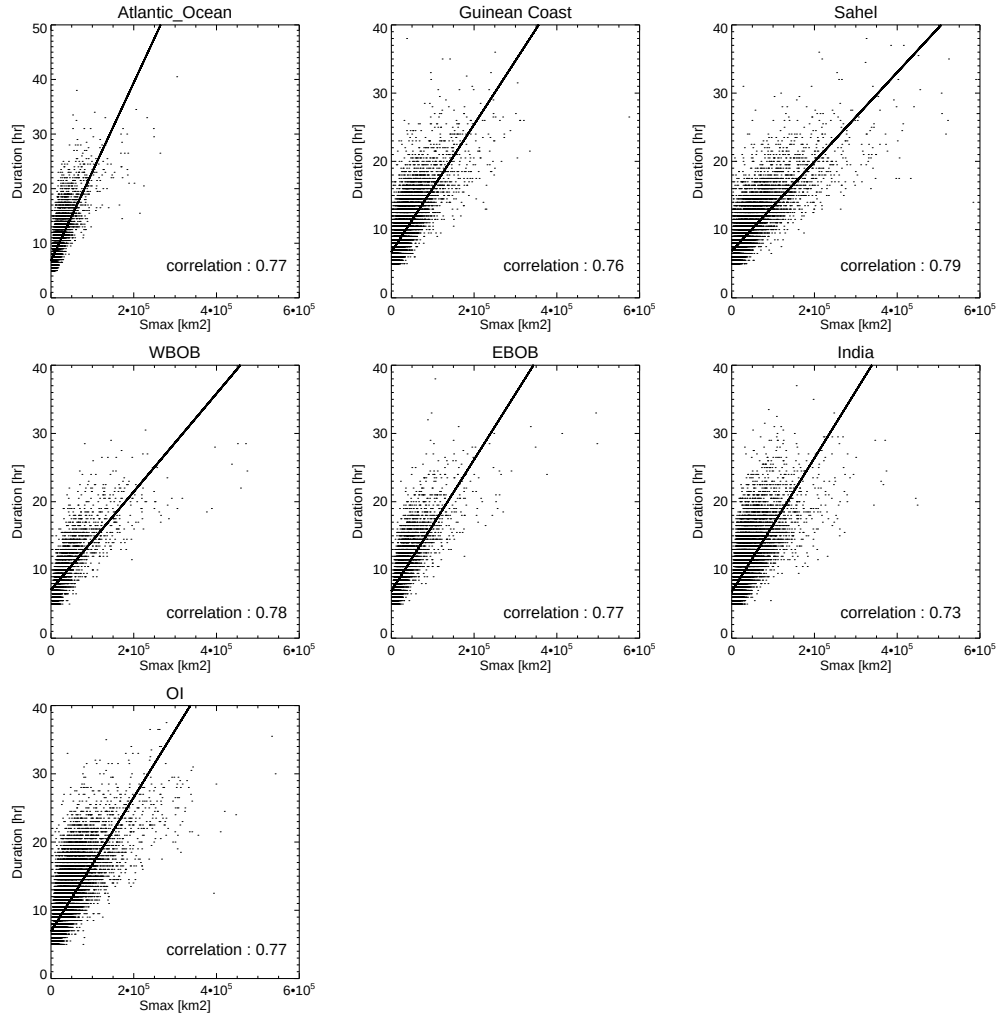


FIGURE 4.27 – Diagramme de dispersion des durées de vie en fonction des tailles maximums des MCS de la classe 2a 40-70.

du cycle de vie des systèmes convectifs dans les régions de mousson est alors simplifié à un seul degré de liberté (S_{max} ou durée de vie) fonction des sous-régions et donc directement relié à l'environnement de grande échelle. Les études de Yuter et Houze [1995] et Houze [2004] vont nous permettre de discuter du cycle de vie des MCS dans leur environnement de grande échelle. Plus l'environnement est susceptible de favoriser la formation de cellules convectives, plus il y aura de matériel convectif en phase de dissipation disponible dans les hautes couches afin de former la partie stratiforme du MCS, et donc plus le MCS aura une durée de vie élevée et une taille importante. En conséquence, une couche limite humide au-dessus de l'océan est plus à même d'entretenir un réservoir infini d'humidité et d'énergie afin de soutenir la formation de cellules convectives alimentant par conséquent les régions stratiformes des MCS. Cela provoque ainsi la formation de gros systèmes convectifs possédant de larges enclumes, et mettant un long moment avant de se dissiper.

Dans le cas contraire, un environnement de couche limite continentale, par exemple, fortement dépendant du cycle diurne, n'est pas à même de favoriser le développement de cellules convectives après le coucher du soleil. Les systèmes convectifs, n'étant plus alimentés par de nouvelles cellules convectives, se dissipent alors rapidement et n'atteignent pas des tailles importantes, le cas des lignes de grains Sahéliennes étant une exception (Houze [2004]).

4.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons utilisé les données issues de l'imagerie infrarouge de deux satellites géostationnaires, auxquelles nous avons appliqué la nouvelle méthode de suivi des systèmes convectifs TOOCAN afin d'étudier les caractéristiques des systèmes convectifs de mousson rencontrés dans les régions de mousson couvrant l'Afrique de l'Ouest et l'Inde. Les résultats issus de la nouvelle technique de suivi, tout en corroborant les résultats des précédents travaux, permettent d'approfondir notre compréhension des MCS tant au niveau des processus qu'à un niveau de conditions environnementales régionales.

D'un point de vue processus, l'étude réalisée au cours de ce chapitre a permis de faire émerger un nouveau modèle conceptuel de la morphologie des systèmes convectifs de mousson au cours de leur cycle de vie. Le cycle de vie de la surface froide des MCS peut ainsi être décrit par une phase de croissance et une phase de décroissance dépendant alors de trois paramètres : la taille maximale, l'instant où cette taille est atteinte durant le cycle de vie des MCS et la durée de vie des systèmes. Un autre paramètre descriptif des MCS concerne le taux d'accroissement et de décroissance dans chaque phase du MCS. Il a été montré que ce modèle permet une bonne représentation des systèmes individuels avec plus de 90% de la population étant qualifié par une bonne RMSD entre le cycle de vie observé et modélisé. Les trois paramètres caractéristiques sont :

- La durée de vie. La durée de vie maximum du système est de 60h et la moyenne des durées de vie montre des spécificité régionales.
- La taille maximum rencontrée au cours du cycle de vie du MCS. Elle peut atteindre le million de km² et montre de fortes disparités régionales. Une forte corrélation existe entre la taille maximale et la durée de vie pour chacune des sept régions.
- La phase où le système atteint sa taille maximum : T_{max} . T_{max} est constant et égale à 50% pour l'ensemble de la région d'étude, indiquant qu'une grande partie des systèmes convectifs présente une évolution morphologique symétrique au cours de leur cycle de vie.

Ainsi, les paramètres du modèle sont ainsi soit constants (T_{max}), soit présentent une forte corrélation. Le problème du cycle de vie des MCS peut alors être simplifié à un seul degré de liberté (durée de vie ou taille maximale). Dans tous les cas, ces paramètres intégrés apparaissent très liés à l'environnement de grande échelle régional, alors que le déroulement du cycle de vie semble le même partout.

Alors que l'analyse de la morphologie des systèmes convectifs par l'utilisation des seules données infrarouges révèle des caractéristiques importantes des MCS, elle ne permet pas de conclure

sur les précipitations internes aux MCS. En particulier, l'analyse de la surface froide des MCS ne permet pas une compréhension des distributions de précipitations internes aux MCS (Diongue [2001], Nesbitt et al. [2006], Liu et al. [2008]). La fusion des multiples données issues de différentes plates-formes satellites avec les caractéristiques des MCS dérivées des données infrarouges géostationnaires est une des possibilités afin de dépasser ces limitations. Les travaux récents sur les données issues du satellite TRMM sont prometteurs (Kondo et al. [2006], Futyan et Del Genio [2007], Inoue et al. [2009]). Dans le chapitre suivant, une telle approche de fusion sera mise en oeuvre avec les données du radiomètre TMI embarqué à bord de TRMM, dans l'objectif d'étudier le cycle de vie des précipitations des MCS et de compléter cette étude morphologique.

Chapitre 5

Fusion des données issues des satellites orbite basse et des caractéristiques des systèmes convectifs de mousson

5.1 Introduction

Le chapitre précédent, avec l'utilisation des seules données géostationnaires, nous a permis de faire ressortir un modèle conceptuel de morphologie des systèmes convectifs de mousson. Il est apparu ainsi que le cycle de vie de la surface froide des MCS pouvait être décrit par une phase de croissance et une phase de décroissance dépendant alors de trois paramètres : la taille maximale, l'instant où cette taille est atteinte et la durée de vie des systèmes. Une classe de systèmes convectifs majoritaires sur l'ensemble de la zone de mousson ressort de ce chapitre correspondant à des systèmes convectifs présentant une évolution morphologique symétrique au cours de leur cycle de vie. Cette classe a été appelée classe2a 40-70. Les paramètres du modèle des systèmes convectifs de mousson sont ainsi soit constants (T_{max}), soit présentent une forte corrélation entre les paramètres de durée de vie et de taille maximum. Le problème du cycle de vie des MCS peut alors être simplifié à un seul degré de liberté (durée de vie ou taille maximale). Cependant, l'utilisation des seules données infrarouges issues des satellites géostationnaires ne permet pas de décrire l'évolution des paramètres géophysiques des MCS au cours de leur cycle de vie (précipitations, flux radiatifs, etc...) et ne permet donc pas de conclure sur le bilan d'énergie des systèmes convectifs de mousson (chaleur latente, bilan radiatif).

Depuis 1997, la mission satellitaire défilant TRMM (cf Annexe A) fournit des données permettant la mesure de tels paramètres géophysiques dans les tropiques. Dans le futur, les missions Megha-Tropiques et GPM permettront de compléter ce jeu de données en terme de précipitation notamment. Cependant, ce type de satellites, du fait de leur altitude basse, ne permettent pas une observation continue d'une même zone géographique. Il n'est alors pas possible de réaliser des études basées sur des moyennes mensuelles d'une région d'intérêt. Les satellites géostationnaires

observant de manière continue une même zone géographique sont une alternative afin de dépasser cette problématique, en permettant de projeter les flux radiatifs et de précipitations mesurées par les satellites défilants dans l'imagerie des satellites géostationnaires. Dans notre problématique d'analyse du cycle de vie des paramètres géophysiques internes aux MCS, cela revient à associer les données des satellites défilants aux caractéristiques des systèmes convectifs préalablement segmentés par l'algorithme TOOCAN à partir des données infrarouges des satellites géostationnaires. Cette étape est appelée échantillonnage dynamique des MCS et sera décrite au cours de ce chapitre.

Dans le cadre de la mission Megha-Tropiques, la méthode de fusion des données issues des satellites orbite basse et des caractéristiques morphologiques des MCS issues des algorithmes de suivi a été opérationnalisée et correspond à un produit de niveau 3/4 qui s'intitule "Composite du cycle de vie des systèmes convectifs tropicaux". Ce produit sera appliqué sur les données infrarouges d'une constellation de satellites géostationnaires permettant alors une observation de l'ensemble de la bande inter-tropicale et une étude du cycle de vie de l'ensemble des systèmes convectifs de ces régions. Le principe de ce produit est expliqué dans l'annexe A et le document (Data Product Catalogue) permettant une description complète de son fonctionnement algorithmique est présenté annexe C.

Des travaux sur la fusion des données issues du satellite TRMM et des caractéristiques des MCS ont déjà été réalisées (Kondo et al. [2006], Futyán et Del Genio [2007], Inoue et al. [2009]). Cependant, ces études ont été effectuées à partir de jeux de données de systèmes convectifs déterminés par des algorithmes de détection et de suivi d'anciennes générations. Un filtrage important des MCS a alors dû être effectué afin de n'étudier que les MCS possédant un cycle de vie cohérent (sans division, ni fusion) (cf chapitre 3). Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes concentrés sur l'étude du cycle de vie des précipitations au sein des systèmes convectifs de mousson appartenant à la classe2a 40-70. Pour cela nous utiliserons au cours de ce chapitre les données de précipitation déterminées par l'algorithme BRAIN (Viltard et al. [2006]) à partir des mesures du radiomètre TMI. Les satellites défilants ne permettant d'observer que ponctuellement le cycle de vie des MCS, l'étude des distributions des paramètres géophysiques au cours d'un cycle de vie d'un MCS ne peut alors être réalisée que de manière statistique. La méthodologie permettant de décrire ce cycle de vie sera introduite au cours de ce chapitre.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous présenterons les distributions des taux de précipitation, des fractions précipitantes et des fractions de pluie convective rencontrées au sein du modèle type de MCS de la classe2a 40-70, de manière globale sur l'ensemble de la région de mousson Afrique-Inde et pour la période 2002-2004. Une régionalisation se basant sur les travaux présentés chapitre 4 sera alors proposée permettant d'analyser les spécificités des distributions de précipitation associée aux systèmes convectifs de mousson.

5.2 Les estimations des taux de précipitation par micro-ondes

5.2.1 Introduction aux méthodologies de restitution des précipitations

Dans le spectre électromagnétique, le domaine micro-onde correspond aux longueurs d'onde comprises entre $300\ \mu\text{m}$ et $30\ \text{cm}$. A ces longueurs d'onde, le rayonnement électromagnétique n'interagit que très peu avec les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace formant les nuages ($\sim 10\ \mu\text{m}$). Contrairement aux longueurs d'onde infrarouges, le rayonnement micro-onde pénètre à l'intérieur des nuages et interagit directement avec les particules de précipitation dont la taille peut varier de $100\ \mu\text{m}$ à $1\ \text{cm}$ permettant ainsi leur détection par les instruments micro-ondes passifs ou actifs. Il existe deux types d'interactions entre les hydrométéores et le rayonnement émis à la surface de la Terre ou par l'atmosphère :

- l'absorption et l'émission
- la diffusion

Ces deux types d'interaction existent à toutes les fréquences micro-ondes. Cependant, pour les basses fréquences micro-ondes ($< 22\ \text{GHz}$), le rayonnement émis à la surface de la Terre ou par l'atmosphère est principalement absorbé par les gouttes d'eau liquide, en présence de nuages précipitants. La diffusion par la glace ou par l'eau liquide est négligeable à ces fréquences. Le signal mesuré par un radiomètre spatial correspond alors à la température de brillance de la couche d'atmosphère où se produit l'interaction. Cette interaction permet donc une mesure indirecte des précipitations. Cependant, la mesure des précipitations n'est notable que si l'émissivité de la surface terrestre est suffisamment différente de celle des précipitations ($\epsilon \sim 0,8$). Si la surface visée correspond à une zone océanique ($\epsilon \sim 0,4$), cela ne posera pas de problèmes. En revanche, sur Terre, la variabilité du type de surface, de l'humidité, et la différence faible entre les émissivités de surface et des précipitations ne permettent pas à ces fréquences de distinguer le signal dû aux précipitations. Pour les hautes fréquences micro-ondes ($> 60\ \text{GHz}$), le rayonnement est aussi bien absorbé par les gouttes d'eau liquide que diffusé par la glace ou l'eau liquide. Le mécanisme de diffusion est prépondérant, et plus particulièrement en présence de cristaux de glace, et cette prédominance augmente avec la fréquence. Le rayonnement qui atteint le satellite est nettement diminué par la diffusion, et les températures de brillance mesurées sont inférieures à celles mesurées en ciel clair. Ainsi, les grosses particules présentes au sommet des nuages convectifs induisent une diminution des températures de brillances observées par les satellites, en diffusant le rayonnement ascendant. Cette diminution constitue donc une signature des tours convectives et indirectement de la pluie engendrées par celles-ci. Cette propriété du rayonnement micro-ondes hautes-fréquences permet donc d'estimer les précipitations au dessus des zones continentales.

Il reste cependant difficile d'associer quantitativement le signal mesuré par un radiomètre micro-ondes avec les taux de précipitation des scènes observées. En effet, les températures de brillance mesurées depuis un satellite dépendent non seulement de l'intensité des précipitations dans les pixels observés, mais également d'un grand nombre de paramètres liés à la distribution

des hydrométéores et des émissivités de surface à l'intérieur des pixels observés. Il n'existe donc pas de relation simple entre les températures de brillance et les taux de précipitation.

La méthode d'estimation des précipitations utilisée dans notre étude est l'algorithme BRAIN (Viltard et al. [2006]). Cet algorithme est fondé sur une méthode physique d'inversion.

5.2.2 L'algorithme de restitution des précipitations BRAIN

BRAIN est un algorithme de restitution des taux de précipitation, dérivé à l'origine de l'algorithme GPROF/2A12 (Kummerow et al. [2001]) présenté dans l'annexe A. Il utilise une approche de Bayes/MonteCarlo afin de restituer les taux de précipitation à partir d'une base de données de températures de brillance issues des mesures de TMI.

La spécificité de l'algorithme BRAIN réside dans cette base de données qui est exclusivement réalisée à partir des données colocalisées du radiomètre TMI et du radar de précipitation PR embarqués à bord de TRMM. Les deux instruments partagent une fauchée commune de 100 km de chaque côté du nadir et observent alors une même région atmosphérique suivant deux angles de vue différents avec un temps de retard de 1 minute (cf Annexe A). La colocalisation des données radars et du radiomètre offrent ainsi une série infinie de taux de pluie auxquels sont associés les mesures de températures de brillance. La base de données de l'algorithme BRAIN est constituée de 60 000 vecteurs de température de brillance auxquels sont attribués les taux de pluie correspondants. La base de données est ensuite divisée en deux parties :

- une base de données utilisée pour la restitution des précipitations et constituée de 35 000 vecteurs
- une base de données test de 25 000 taux de pluie

La première base de données est alors utilisée afin de retrouver les taux de précipitations à partir des mesures de TMI. La base de données test est utilisée comme référence et permet une estimation des erreurs. La sélection des situations précipitantes constituant ces bases de données est réalisée de manière aléatoire et a été effectuée sur une période de deux mois de février à mai 1998. Afin de compléter la représentativité de ces bases de données, des cas météorologiques extrêmes (ouragans d'août 1998 et 2000) ont été rajoutés dans ces bases de données. Les données radars de TRMM sont traitées de telle sorte que la résolution finale des pixels en sortie de l'algorithme BRAIN soit dégradée à la résolution du canal 37 GHz du radiomètre TMI, soit un rayon de pixel équivalent de 8 km.

Dans le cadre de la mission GPM, l'algorithme BRAIN est également appliqué aux données des radiomètres SSMI F15, SSMI F13, et AMSRE (figure 5.1).

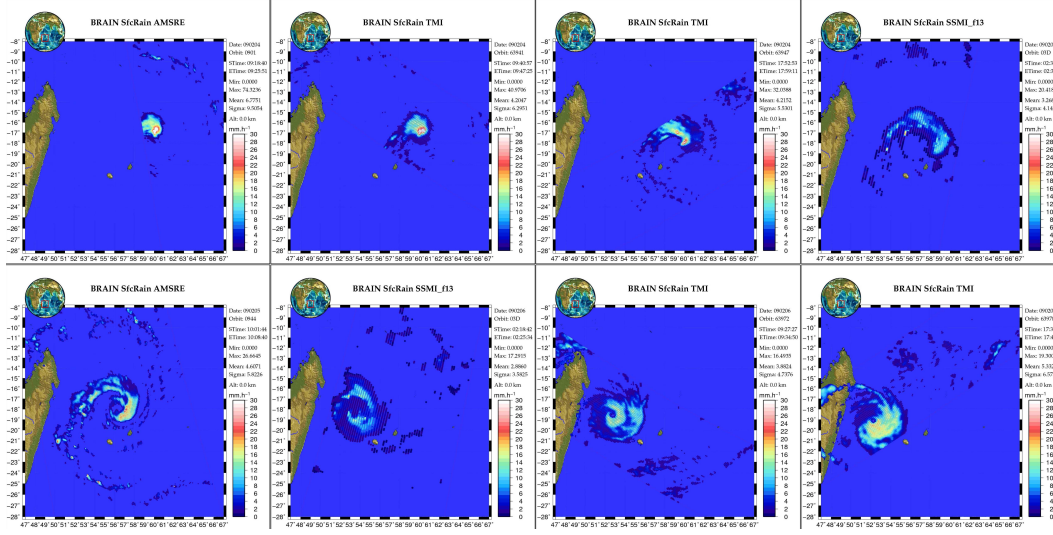


FIGURE 5.1 – exemple de restitution de la pluie de surface par l’algorithme BRAIN dans le cyclone Gaëlle au moment de son passage sur la Réunion vu par tous les survols de TMI, SSMI/I et AMSR-E sur 48 h à partir du 4 février 2009. Source : N.Viltard.

5.3 L'échantillonnage dynamique des systèmes convectifs de mousson par les instruments micro-ondes

5.3.1 Introduction

L’analyse des précipitations au sein des MCS le long de leur cycle de vie ne peut être réalisée par les seules données géostationnaires. Elle nécessite un apport de données extérieures issues des satellites défilants embarquant des instruments capables de mesurer des paramètres géophysiques tels les taux de précipitations au sol, les fractions de pluies convectives, etc... La fusion de ces données issues des multiples plates-formes avec les caractéristiques des systèmes convectifs de mousson est une solution afin de répondre à cette problématique. Cependant, contrairement aux satellites géostationnaires qui observent de manière continue une même région du globe, les satellites défilants n’observent pas une même zone géographique de manière continue. Ainsi, alors qu’il est possible de détecter et de suivre des systèmes convectifs tout au long de leur cycle de vie grâce à l’algorithme de suivi TOOCAN appliqué aux données géostationnaires, les satellites défilants ne permettent de mesurer des paramètres géophysiques au sein des MCS que de manière ponctuelle le long de leur cycle de vie. L’étude du cycle de vie des précipitations des systèmes convectifs de mousson ne pourra alors être effectué que de manière statistique dans un espace normalisé et commun à l’ensemble des MCS. C’est ce que nous présenterons dans le paragraphe suivant en calculant un composite de précipitations pour un type de MCS.

5.3.2 Colocalisation spatio-temporelle des données micro-ondes avec l'imagerie infrarouge issue des géostationnaires

Pour notre étude, les données utilisées correspondent d'une part aux images issues de l'algorithme TOOCAN, à la résolution spatiale de 5 km et temporelle de 30 minutes, et au sein desquelles sont labellisés l'ensemble des systèmes convectifs détectés, et d'autre part aux données de précipitations restituées par l'algorithme BRAIN à la résolution du canal 37 GHz du radiomètre TMI. L'étude a été réalisée sur des données des périodes de mousson de juin-juillet-août-septembre (JJAS) de 2002 à 2004. Il est cependant à noter que les données BRAIN pour la saison 2002 et pour la région ouest africaine ne sont disponibles que sur 10 jours.

Les données issues de l'algorithme TOOCAN sont représentées dans une grille correspondant à la projection sur la surface terrestre du champ de vue du satellite METEOSAT. Les coordonnées (ligne-colonne) de chaque pixel de l'imagerie issue de TOOCAN peuvent ainsi être indexées par les coordonnées géographiques (longitude-latitude) correspondantes du centre du pixel METEOSAT. Du fait de la rotondité de la Terre, une telle grille de projection implique une non-régularité de la distance (en km ou en longitude-latitude) entre deux points de grille voisins.

Les données BRAIN sont des données orbitales. Les coordonnées de chaque pixel correspondent donc aux longitudes-latitudes du centre du pixel échantillonné par l'instrument considéré, ici TMI. De plus, chaque pixel BRAIN est référencé par son instant d'acquisition en année, mois, jour, minute. Ces informations de temporalité vont ainsi nous permettre de sélectionner les pixels BRAIN correspondant à la fenêtre temporelle d'acquisition d'une image METEOSAT. Cependant, chaque pixel de la grille METEOSAT n'est pas observé en même temps par les deux satellites. Compte tenu de la répétitivité des mesures METEOSAT-5 et METEOSAT-7 de 30 minutes, le décalage temporel maximum entre une observation METEOSAT et une observation TMI pour un pixel donné de la zone d'étude est alors de 15 minutes. Ce décalage temporel entre les images METEOSAT et les données de TMI est discuté dans Ramage [2002]. En considérant un nuage se déplaçant à la vitesse de 10 m/s en Afrique de l'Ouest, il en déduit que le décalage temporel entre les observations des deux satellites pouvait induire un décalage spatial de l'ordre de 9km entre les pixels TMI et les pixels METEOSAT correspondant à ce nuage (soit environ un pixel TMI).

La combinaison spatio-temporelle des données issues de différentes plates-formes nécessite donc de travailler sur une grille géographique commune à l'ensemble des données. Ainsi, il sera possible d'associer dans l'espace et dans le temps les pixels de l'imagerie TOOCAN référencés comme systèmes convectifs aux pixels BRAIN correspondant. L'objectif de notre étude étant l'analyse du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson, il est alors nécessaire que cette grille de référence commune corresponde à la grille METEOSAT. Cela signifie que les pixels BRAIN sélectionnés temporellement au préalable soient projetés dans cette grille de référence METEOSAT. De cette manière, les pixels labellisés comme systèmes convectifs dans l'imagerie TOOCAN vont pouvoir être associés aux pixels BRAIN correspondant.

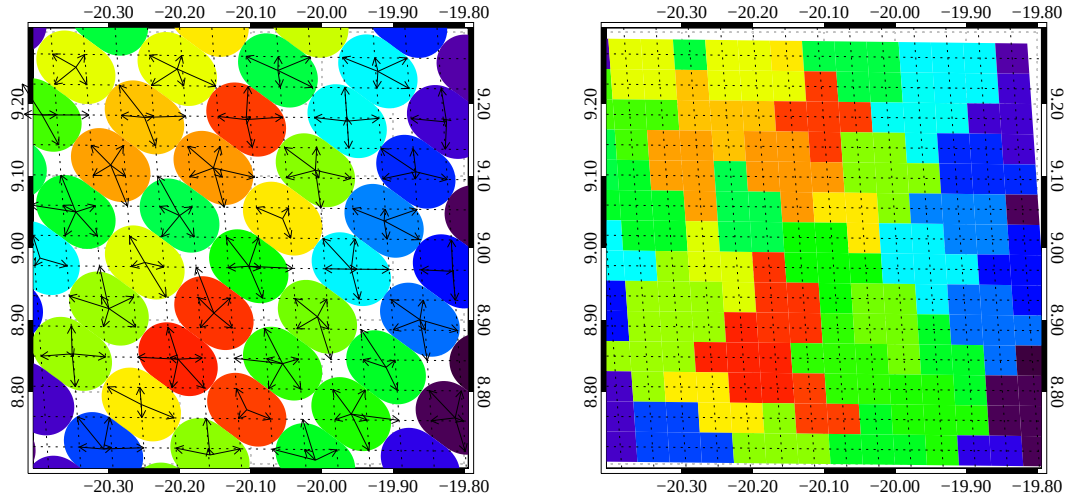


FIGURE 5.2 – *Projection des pixels TMI dans la grille METEOSAT. La figure de gauche représente les EFOV TMI pour le canal 37 GHz correspondant aux pixels BRAIN. La figure de droite représente les pixels TMI projetés dans la grille METEOSAT. Les lignes en pointillées représentent la grille METEOSAT. Les flèches issues d'un centre de pixel TMI indiquent les points de la grille METEOSAT sur lesquels sont projetés ce pixel TMI (Ramage [2002])*

Une méthode du plus proche voisin a alors été utilisée et est illustrée figure 5.2. Pour chacun des pixels labellisés de la grille METEOSAT, on va rechercher le centre des pixels BRAIN le plus proche. Si la distance entre le point de grille METEOSAT et le centre du pixel BRAIN est supérieure à la demi-distance entre deux centres de pixels BRAIN le long d'un scan, on considère que le point de grille METEOSAT est en dehors de la trace de TMI. Aucune mesure géophysique n'est alors attribuée au point de grille METEOSAT. Dans le cas contraire, on associe aux pixels de la grille METEOSAT les informations géophysiques mesurées par l'algorithme BRAIN.

Les pixels TMI à la résolution 37 GHz étant jointifs entre deux lignes de scan et le long de la ligne de scan, chaque point de la grille METEOSAT inclut dans la trace de TMI peut alors être associé à un pixel TMI. La distance maximale de correspondance entre les pixels METEOSAT et les pixels TMI est alors de 8 km.

Cette étape de colocalisation permet de déterminer dans un premier temps, et à l'échelle de chacun des clusters convectifs segmentés par TOOCAN, la fraction surfacique du cluster qui a été observée par le radiomètre TMI. Pour chacun des pixels d'un cluster convectif segmenté par l'algorithme TOOCAN et compris dans la trace de TMI, est alors attribué la mesure des taux de pluie de surface déterminée par l'algorithme BRAIN. La fraction de pluie convective, correspondant au rapport pluie convective sur pluie de surface est également associée à chacun de ces pixels échantillonnés par TMI. Les mesures géophysiques effectuées aux sein des clusters convectifs par l'instrument TMI ne l'ont été qu'à des instants donnés du cycle de vie des MCS. Les informa-

tions géophysiques mesurées sont alors moyennées au sein des clusters convectifs et associées aux caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs à ces instants d'observations.

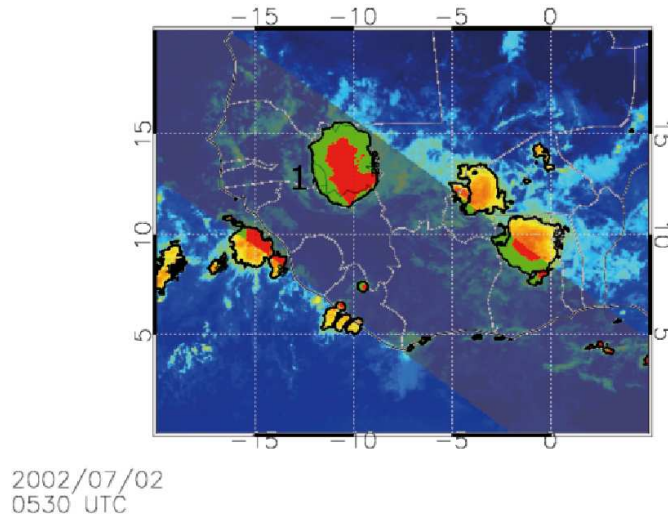


FIGURE 5.3 – Illustration de l'échantillonnage des systèmes convectifs par l'instrument TMI de TRMM; les systèmes convectifs identifiés par l'algorithme TOOCAN sont représentés par un contour noir. Les MCS échantillonnés par TMI sont représentés par une couleur verte. La couleur rouge correspond aux régions précipitantes à l'intérieur des MCS.

La figure 5.3 illustre l'échantillonnage dynamique par TMI des systèmes convectifs déterminés par l'algorithme TOOCAN pour la date du 2 juillet 2002 à 0530 UTC. Les contours noirs représentent les MCS segmentés par l'algorithme TOOCAN à partir de l'imagerie géostationnaire. La trace au sol de TMI est représentée par une bande sombre. La couleur verte au sein des MCS indique la zone du système convectif observée par TMI et la couleur rouge indique les zones précipitantes à l'intérieur des MCS. On peut observer que 15 systèmes convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN ont été échantillonnés par l'instrument TMI à cette date. Les surfaces de 8 systèmes convectifs ont été observées dans leur totalité par TMI. Pour les sept autres systèmes, seule une fraction de leur surface a pu être échantillonnée par le radiomètre.

Si l'on considère le système n°1, on peut observer que la fraction surfacique observée par TMI est de 100% à cette date. La figure 5.4 illustre le cycle de vie en terme de surface froide de ce système convectif. Elle indique également les taux de pluie de surface déterminés par l'algorithme BRAIN aux instants d'échantillonnage du système convectif. Le système convectif a une durée de vie de 20 h, et atteint une taille maximale de $140\,000\text{ km}^2$ au cours de son cycle de vie. On peut observer que ce système a été observé deux fois par TMI, au deuxième pas de temps de son cycle de vie (30 minutes), et au 21^e pas de temps (10h30). L'échantillonnage dynamique de ce système par TMI a alors permis pour ces deux pas de temps d'associer aux caractéristiques morphologiques de

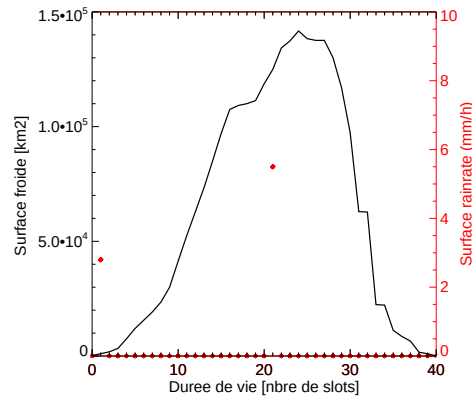


FIGURE 5.4 – Illustration du cycle de vie de la surface froide du système convectif n°1 (noir) et des taux de précipitation mesurés par l'algorithme BRAIN aux instants d'échantillonnage (rouge).

ce système, les taux de précipitation déterminés par l'algorithme BRAIN, 2,90 mm/h et 5,5 mm/h respectivement.

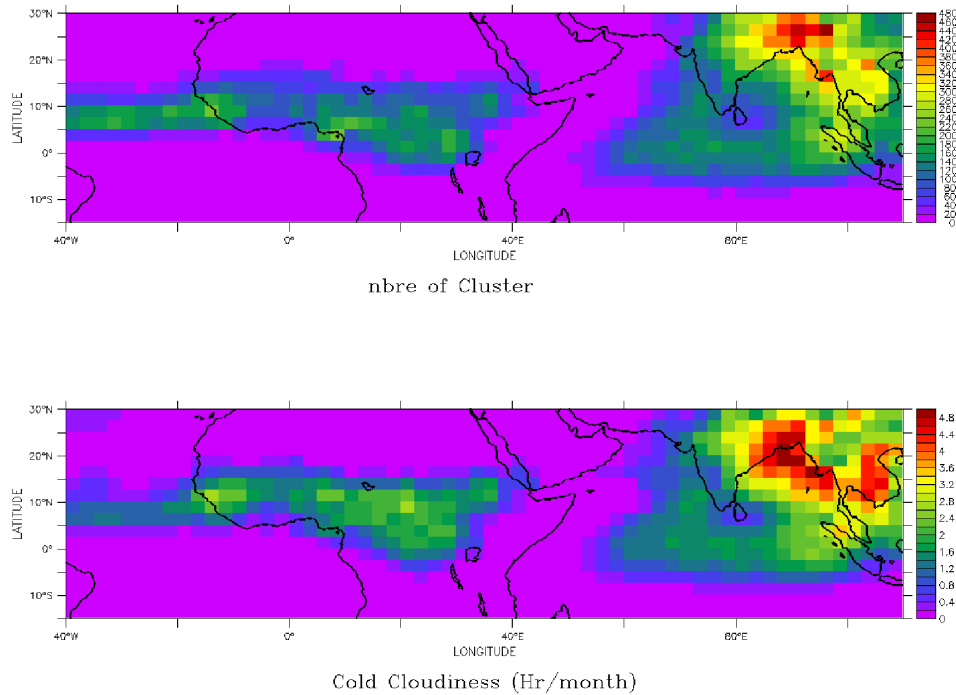


FIGURE 5.5 – a- Carte des population des clusters convectifs observés par TMI pour la période JJAS 2002-2004 pour la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde ; b- Carte de la couverture nuage haut observée par TMI exprimée en h/mois.

Les cartes présentées dans la figure 5.5 illustrent l'échantillonnage des clusters convectifs par TMI en terme de population et de couverture nuage haut sur l'ensemble de zone de mousson pour la période JJAS 2002-2004. Le nombre total de clusters convectifs échantillonnés par TMI pour l'ensemble de la région d'étude et sur les trois saisons de traitement est de 63 794, soit 1,7% de la population totale des clusters convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN. De même, la couverture nuage haut observée par TMI est de l'ordre de 1,9% de la couverture nuage haut totale. Le maximum de population des clusters convectifs observée par TMI se situe dans la région de la baie du Bengale. Si l'on se réfère à la carte de la population des systèmes convectifs segmentés par l'algorithme TOOCAN du chapitre 4 (figure 4.4), cette région correspond à un maximum local de population au sein la zone de mousson. De plus, en considérant le tableau du nombre de passage moyen par jour du satellite TRMM présenté dans l'annexe A, cette zone située entre 20°N et 25°N est observée par l'instrument TMI en moyenne 1,5 fois par jour, alors que la zone située entre -10°N et 10°N est en moyenne observée qu'une fois par jour.

Afin d'étudier la sensibilité de l'échantillonnage des clusters convectifs par l'instrument TMI, la figure 5.6 représente un histogramme 2D des fractions surfaciques de l'ensemble des clusters observés par TMI en fonction de la surface froide des clusters convectifs échantillonnés pour la période JJAS 2002-2004 et pour l'ensemble de la zone de mousson Inde-Afrique de l'Ouest. La surface froide des clusters convectifs est représentée par des intervalles et les couleurs correspondent au pourcentage de population de clusters convectifs échantillonnés pour chacun des intervalles de taille. Cette distribution montre que pour des tailles de clusters inférieures à 200 000 km², les clusters convectifs sont le plus fréquemment observés par TMI avec des fractions de surfaces froides supérieures à 70%. Au delà de cette taille, l'instrument TMI a des difficultés à observer des surfaces froides conséquentes des clusters convectifs.

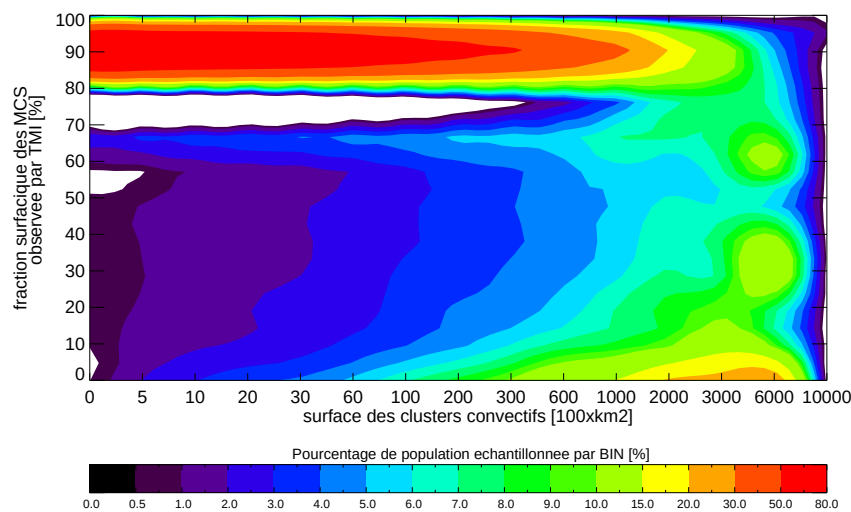


FIGURE 5.6 – Histogramme 2D des fractions nuageuses des clusters convectifs observées par TMI en fonction des tailles des clusters convectifs ; les résultats sont exprimés en pourcentage de population par intervalle de taille.

5.4 Elaboration des composites des précipitations le long du cycle de vie des MCS

Au cours du paragraphe précédent, nous avons présenté la méthodologie permettant d'associer aux caractéristiques morphologiques des MCS des informations géophysiques (pluie de surface, fraction convective) mesurées par TMI. Cependant, étant donné la répétitivité des satellites défilants, tous les MCS n'ont pas pu être échantillonnés par TMI. De plus, pour les MCS observés par TMI, seules quelques phases de leur cycle de vie ont pu être observées.

L'étude du cycle de vie de ces paramètres géophysiques ne peut alors être réalisée que de manière statistique en élaborant un modèle représentant une évolution moyenne des précipitations au sein d'une classe de systèmes convectifs, ici la classe2a 40-70. Dans cet objectif, seuls les systèmes convectifs appartenant à la classe2a 40-70 et échantillonnés par l'instrument TMI seront analysés. De plus, afin de pouvoir comparer les informations géophysiques mesurées au sein des MCS, il est nécessaire de travailler dans un espace commun à l'ensemble des MCS. En utilisant la même méthode que dans le chapitre précédent, le cycle de vie de chacun des MCS sélectionné est normalisé et décomposé en 10 phases de 0 à 100%. Les informations géophysiques de taux de pluie de surface, de fraction de pluie convective, de fraction précipitante et de fraction surfacique de chacun des MCS échantillonnés sont alors projetés dans la phase normalisée correspondant aux instants du cycle de vie du MCS observés par TMI. Les fractions de pluie convective correspondent au rapport de pluie convective sur le taux de pluie de surface et sont exprimées en pourcentage.

La figure 5.7 illustre cinq cas de systèmes convectifs ayant été échantillonnés par TMI. La colonne du milieu montre le cycle de vie normalisé de la surface froide de chacun des MCS. La courbe rouge représente les taux de pluie de surface (en mm/h) mesurés au cours de leur cycle de vie et projetés dans la phase normalisée correspondante. La colonne de gauche correspond aux cycles de vie des surfaces froides de chacun des MCS. La variable pluie de surface mesurée par BRAIN est indiquée par un point rouge aux instants échantillonnés du cycle de vie des MCS. La colonne de droite illustre les trajectoires des différents MCS ainsi que leur surface froide représentée ici par des ellipses. Les ellipses rouges indiquent les instants d'échantillonnage des systèmes par TMI.

- Le premier cas d'étude est un MCS qui a été observé le 3 juin 2004 à la pointe de l'Inde. Sa surface froide décrit un cycle de vie symétrique confirmant son appartenance à la classe2a 40-70. Sa durée de vie est de 10 h. 4 h 30 après son initiation, 90% de sa surface froide a été observé par TMI. L'algorithme BRAIN permet alors de déterminer un taux de pluie de surface conditionnelle de 1 mm/h en moyenne sur la surface froide échantillonnée. Cette variable géophysique est alors projetée dans la phase normalisée correspondante 40-50% dans l'espace normalisé du MCS.
- Le deuxième système convectif a eu lieu le 2 juin 2004 dans la région ouest africaine et possède une durée de vie de 7 h. L'instrument TMI a observé 24% de la surface froide de ce système 5 h 30 après son initiation et la pluie restituée par BRAIN à cet instant est de

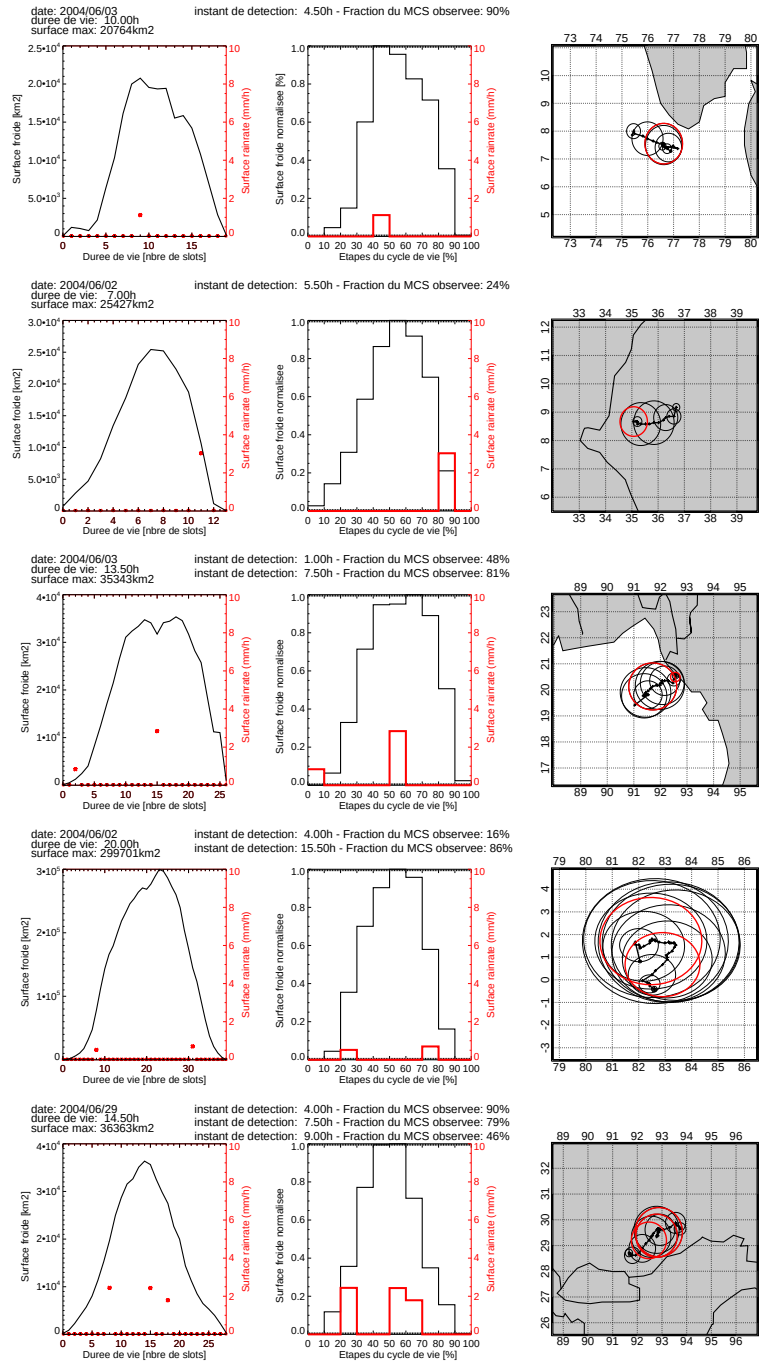


FIGURE 5.7 – Illustration des systèmes convectifs échantillonnés par TMI. La colonne de gauche illustre les évolutions des systèmes convectifs en terme de surface froide ; les taux de précipitation mesurés par TMI sont représentés par un point rouge. La colonne du milieu représente le composite des surfaces froides des MCS ; les taux de pluie de surface mesurés par TMI sont représentés par la courbe rouge. La colonne de droite représente les trajectoires des MCS ; les instants où les systèmes ont été échantillonnés par TMI sont représentés par des ellipses équivalentes rouges.

- 3 mm/h. Cette pluie de surface est projetée lors de l'étape de normalisation du MCS dans la phase 80-90%.
- le système n°3 a été observé dans la région de la baie du Bengale Est le 3 juin 2004. Il possède une durée de vie de 13 h 30 et a été échantillonné par TMI deux fois au cours de son cycle de vie, une première fois une heure après son initiation et une deuxième fois 7 h 30 après le début de son initiation. Les taux de précipitation mesurés au sein de ce MCS sont de 0,5 mm/h et de 2,75 mm/h respectivement. Ces deux mesures sont alors projetées dans les phases 0-10% et 50-60% du cycle de vie normalisé du MCS.
 - Le système n°4 a également été observé deux fois par TMI 4 h et 15h30 après le début de son cycle de vie. Il possède une durée de vie de 20 h et les mesures de précipitations au sein de MCS inférieures à 1 mm/h sont projetés dans les phases 20-30% et 70-80% du cycle de vie normalisé.
 - Le dernier système possède une durée de vie de 14 h 30 et a été observé le 29 juin 2004 dans la région de l'Inde continentale. TMI a échantillonné sa surface froide trois fois au cours de son cycle de vie, 4h, 7 h 30 à et 9 h après son initiation. Les fractions de surfaces nuageuses observées par TMI sont respectivement de 90%, 76% et 46% pour des taux de précipitation de 2,5 mm/h, 2,5 mm/h et 1,8 mm/h. Ces mesures sont là encore projetées dans les phases normalisées 20-30%, 50-60% et 60-70% du MCS.

La méthodologie de fusion des données de précipitation issues de BRAIN avec les paramètres morphologiques des MCS ne permet de mesurer que de manière ponctuelle les taux de précipitation au sein des MCS, mais ne permet pas de résoudre le cycle de vie des précipitations le long de leur cycle de vie. Afin de répondre à cette problématique, il est nécessaire de déterminer un composite des précipitations qui représentera de manière statistique l'évolution des précipitations au sein d'une classe de MCS (ici, la classe2a 40-70 déterminée au cours du chapitre 4).

Pour cela, les MCS sont filtrés en fonction de la phase de leur cycle de vie normalisé qui a été échantillonnée par TMI (figure 5.8). Par exemple, l'ensemble des taux de précipitation mesurés dans la phase 20-30% des MCS sont mémorisés dans la phase 20-30% du cycle de vie des précipitations. Ainsi, chaque phase du composite des précipitations comporte un nombre déterminé de mesures des taux de précipitation. De cette manière, il est possible de calculer un taux de précipitation conditionnel moyen pour chacune des dix phases du composite de précipitations. La même opération est réalisée concernant les paramètres de fraction de pluie convective, et de fraction précipitante au sein des systèmes convectifs.

On est ainsi capable d'évaluer statistiquement l'évolution moyenne de paramètres géophysiques tels la pluie de surface au cours du cycle de vie d'un modèle type de système convectif. La figure 5.8 (bas) illustre un tel composite de pluie de surface conditionnel moyen (distribution en rouge) au sein du modèle de surface froide des MCS appartenant à la classe2a 40-70 (courbe noire).

La figure 5.9-a représente la population de clusters convectifs appartenant à la classe2a 40-70 observée par TMI pour chacune des 10 phases du cycle de vie et pour la période JJAS 2002-2004

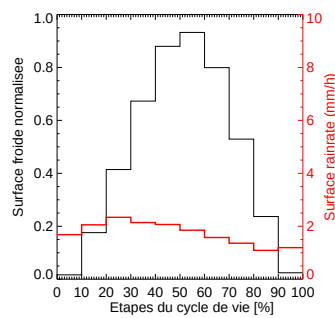
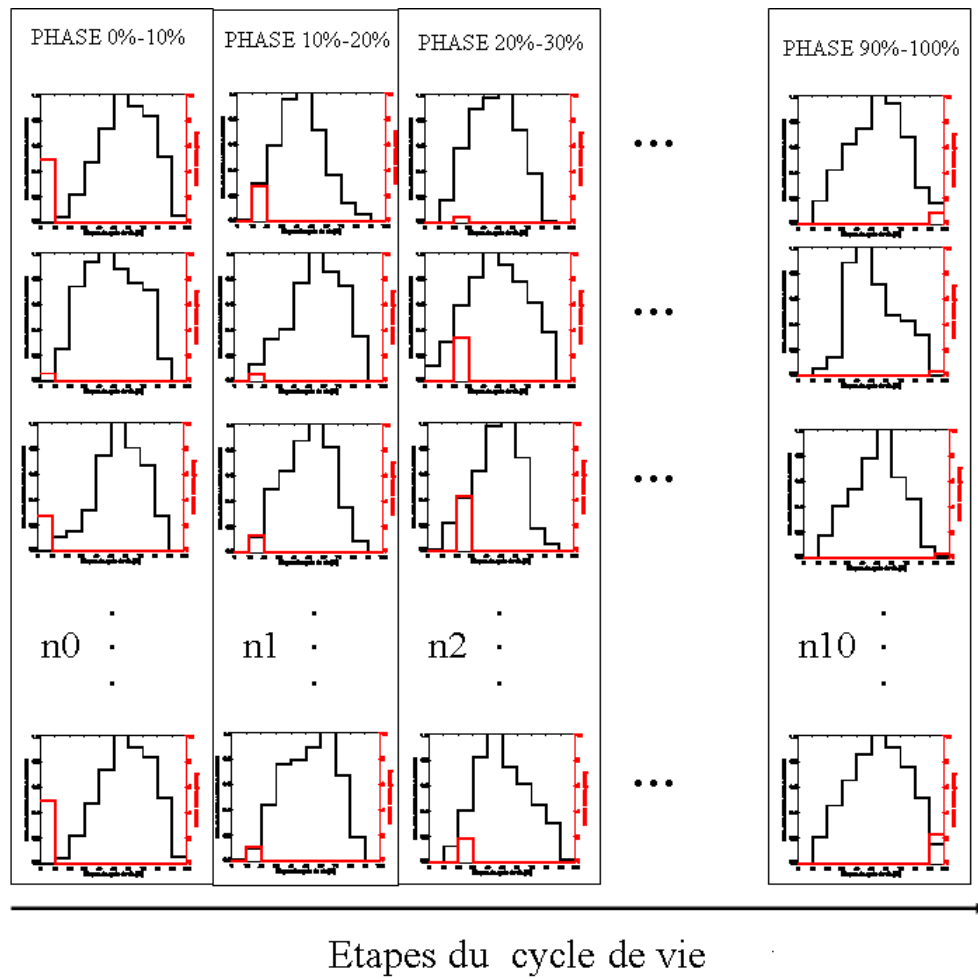


FIGURE 5.8 – Illustration de la méthode d'élaboration des composites de précipitations au cours du cycle de vie d'un système convectif type (haut). Composite de la surface froide normalisée pour les systèmes convectifs de mousson appartenant à la classe 2a 40-70 (courbe noire) ; Evolution moyenne de la pluie de surface conditionnelle au cours du cycle de vie normalisé du modèle type de MCS (courbe rouge) (bas).

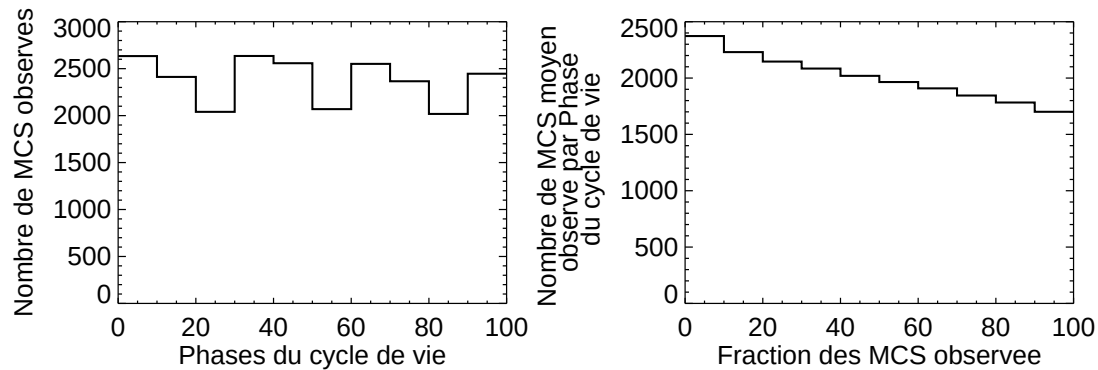


FIGURE 5.9 – a- Population des clusters convectifs observée par TMI en fonction des 10 phases du cycle de vie pour la période JJAS 2002-2004 sur l'ensemble de la région de mousson Inde-Afrique de l'Ouest (gauche) ; b- Distribution de la population moyenne des clusters convectifs pour chacune des 10 phases du cycle de vie conditionnée par un seuil sur la fraction de surface froide des clusters convectifs observée par TMI (droite).

dans la zone de mousson Afrique-Inde. Cette distribution montre que pour chacune des 10 phases du cycle de vie, un nombre conséquent de clusters convectifs ont été échantillonnés par TMI. En moyenne, 2400 clusters convectifs ont été échantillonnés pour chacune des phases du cycle de vie. Cependant, la figure 5.9-b illustre que ce nombre de clusters moyen par phase du cycle de vie diminue en fonction du seuil de fraction surface froide observée. En considérant les clusters convectifs observés par TMI avec plus de 70% de la surface froide, le nombre moyen de clusters échantillonnés par TMI et pour chacune des phases du cycle de vie reste élevé (1800 clusters). En prenant en considération ces résultats avec ceux de la figure 5.6, on peut alors déterminer un seuil minimum de fraction nuageuse observée par TMI de 70%, nous permettant de garder uniquement les clusters convectifs dont la surface froide a été observée avec une bonne qualité par TMI, et dans le même temps, de garder une population de clusters importante dans chacune des phase du cycle de vie, conditions nécessaires à l'élaboration d'un composite de précipitation robuste.

5.5 Le cycle de vie des précipitations au sein des MCS : dans le domaine entier d'étude

5.5.1 Les composites continentaux/océaniques

Le cycle de vie de vie des précipitations est dans un premier temps présenté sur l'ensemble de la région d'étude en différenciant les systèmes convectifs de mousson continentaux et océaniques appartenant à la classe2a 40-70.

La figure 5.10 représente les taux de pluie de surface conditionnelle pour les systèmes continentaux et océaniques. La pluie conditionnelle au sein d'un système convectif correspond à la pluie

moyennée uniquement dans la zone précipitante du MCS. Avant toute chose, on peut observer que le taux de pluie de surface conditionnelle pour chacune des phases du cycle de vie des MCS continentaux est plus important d'un facteur 2 par rapport aux taux de pluie de surface conditionnelle des systèmes océaniques. Futyant et Del Genio [2007] pour leur part, dans leur étude du cycle de vie des précipitations au sein des MCS en Afrique de l'Ouest, et en utilisant les données radars et du produit 3B42 de TRMM, observaient des intensités de précipitations similaires entre les MCS Continentaux d'Afrique de l'Ouest et océaniques (Atlantique). Ces différences d'intensité dans les précipitations seront discutées dans le paragraphe 5.5.1.1, en comparant les données BRAIN avec les données de l'algorithme 2A12. Pour la région océanique, les précipitations présentent un cycle de vie de faible amplitude avec un maximum de $\sim 1,6 \text{ mm/h}$ rencontré lors de la phase 20-30%, et une diminution des précipitations pour atteindre 1 mm/h en fin de vie du MCS. Pour la région continentale, le cycle de vie des précipitations suit une évolution plus prononcée. A leur début de cycle de vie, les précipitations conditionnelles sont de l'ordre de 2 mm/h puis atteignent $3,5 \text{ mm/h}$ à la phase 20-30%. Les taux de pluie de surface présentent ensuite une légère décroissance jusqu'à atteindre une valeur de 2 mm/h . Dans les deux cas, il est intéressant de noter que le maximum de précipitation est atteint pour la phase 20-30% du cycle de vie des MCS, soit un décalage en avant de 20 à 30% par rapport au maximum de surface froide observé dans le cycle de vie des MCS de la classe 2a 40-70.

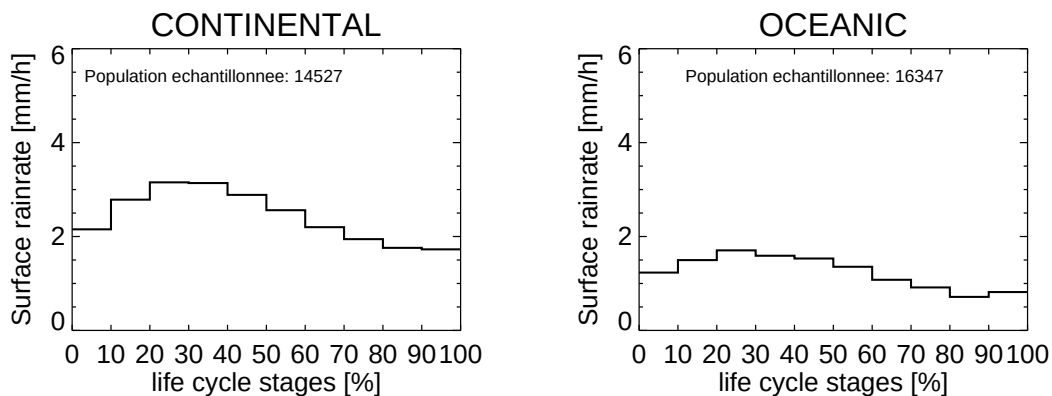


FIGURE 5.10 – Composites des pluies de surfaces conditionnelles pour les systèmes convectifs continentaux et océaniques de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde pour la période JJAS 2002-2004.

L'évolution de la fraction précipitante au sein des MCS en fonction d'un seuil de précipitations permet de présenter plus en détail les différences entre les systèmes convectifs continentaux et océaniques. La figure 5.11 montre que la fraction précipitante au sein des MCS est plus importante pour les systèmes océaniques que pour les systèmes continentaux pour des seuils de taux de pluie compris dans un intervalle 0 mm/h - 1 mm/h . Pour un seuil de 0 mm/h (correspondant au seuil pluie/non pluie), les MCS continentaux présentent un cycle de vie de leur fraction précipitante relativement stable aux alentours de 20% jusqu'à la phase 50-60%, puis une lente diminution de leur fraction précipitante est observée jusqu'à atteindre une valeur de 5% en fin de cycle de vie. La fraction précipitante au sein des MCS océaniques décrit quant à elle une décroissance de 40%

jusqu'à 15% avec le cycle de vie des précipitations et pour un seuil de 0 mm/h. Pour les phases 0% à 30%, l'évolution de la fraction précipitante des MCS océaniques est relativement constante. La différence entre les cycles de vie des fractions précipitantes des MCS continentaux et océaniques n'est observée que pour des seuils de pluie de surface inférieurs à 1 mm/h et devient moins marquée pour des seuils supérieurs. On peut également observer qu'une large fraction des systèmes océaniques est expliquée par des précipitations inférieures à 1 mm/h (25%), alors que peu de taux de précipitations inférieurs à ce même seuil contribuent aux précipitations des systèmes continentaux.

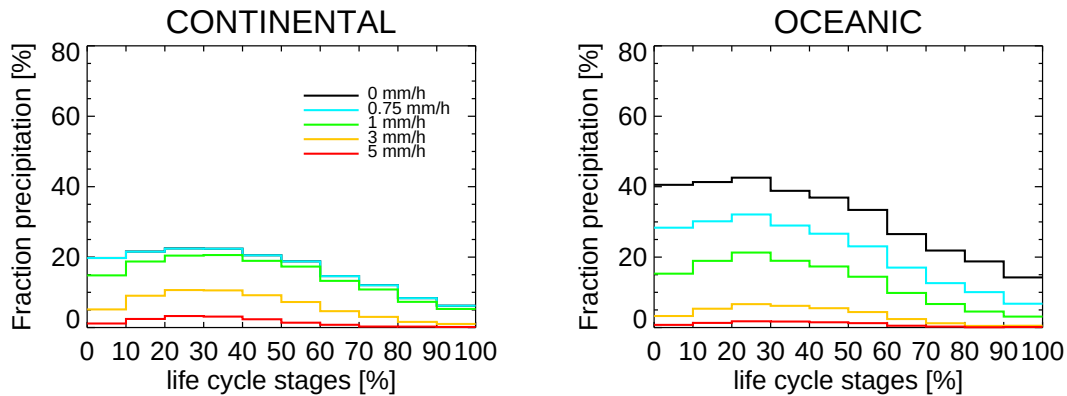


FIGURE 5.11 – Composites de la fraction précipitante plus grande qu'un seuil des systèmes convectifs continentaux et océaniques de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde au cours de leur cycle de vie pour la période JJAS 2002-2004.

Les résultats précédents nous indiquent que les systèmes continentaux présentent des taux de précipitations deux fois plus intenses que les systèmes océaniques, mais présentent des fractions précipitantes deux fois moins importantes que les systèmes océaniques (tout du moins dans la première partie du cycle de vie).

L'analyse des fractions de pluies convectives rencontrées au sein des MCS continentaux et océaniques (figure 5.12) confirme ce diagnostic. On peut ainsi observer que la fraction de pluie convective rencontrée au sein des MCS continentaux est deux fois plus forte que dans les systèmes océaniques en début de cycle de vie. Là encore le maximum de fraction de pluie convective est atteint pour les phases 20-30% du cycle de vie pour les MCS continentaux et océaniques. On peut noter de plus que le cycle de vie de la fraction convective des MCS continentaux est très marqué et décrit une forte décroissance à partir de la phase 20-30% pour atteindre une valeur similaire à celle des MCS océaniques pour les phases 90-100%. L'évolution de la fraction de pluie convective est beaucoup plus lisse pour des MCS océaniques. Ces différences de résultats entre les MCS continentaux et les MCS océaniques en terme de fraction de pluie convective sont en conformité avec la présence de zones précipitantes stratiformes plus importantes au dessus des océans (Schumacher et al. [2004]).

Dans le chapitre précédent, nous avons observé qu'une grande majorité des systèmes convectifs de mousson étaient caractérisés par une évolution de leur surface froide symétrique au cours

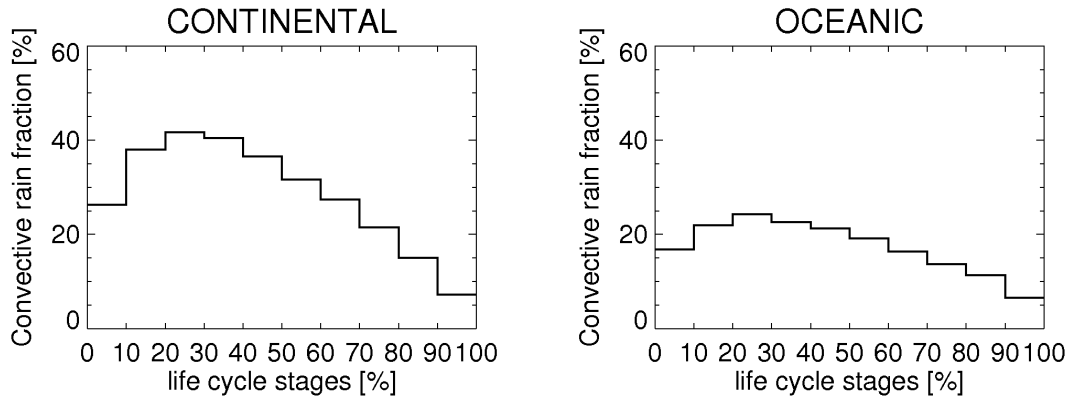


FIGURE 5.12 – Fraction de pluie convective des systèmes convectifs continentaux et océaniques de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde au cours de leur cycle de vie pour la période JJAS 2002-2004.

de leur cycle de vie. Ainsi, seules deux phases pouvaient décrire un MCS : une phase de croissance jusqu'à 50% du cycle de vie normalisé et une phase de décroissance. En combinant les informations des fractions de pluie convective avec les informations des surfaces froides au cours du cycle de vie des MCS, il est alors possible de caractériser le cycle de vie des MCS non plus par deux phases mais par trois phases :

- une phase d'initiation pour les phases 0-30% correspondant à un accroissement de la surface froide des MCS et à un accroissement des fractions de pluie convective.
- une phase de maturité pour les phases 30-50% correspondant à un accroissement de la surface froide des MCS et à une diminution des fractions de pluie convective.
- une phase de dissipation pour les phases 50-100% correspondant à une décroissance de la surface froide des MCS et à une diminution des fractions de pluie convective.

Cette décomposition du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson en trois phases sera détaillée dans le paragraphe discutant des variabilités à des échelles régionales des précipitations.

5.5.1.1 Sensibilité des composites de précipitations aux algorithmes BRAIN et 2A12

Dans le paragraphe précédent nous avons montré que les MCS observés au dessus des zones continentales possédaient des taux de précipitation deux fois plus importants que ceux rencontrés au sein des MCS océaniques. De même, on a pu noter qu'une large fraction des systèmes convectifs océaniques était expliquée par des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h. Ces différences pourraient être expliquées par un artefact dû à une détection des MCS par l'algorithme TOOCAN ou/et par un biais de l'algorithme BRAIN lors de la restitution des précipitations. En effet, la segmentation infrarouge des systèmes convectifs est actuellement limitée à un seuil de 235 K, pouvant engendrer une sous-représentation des précipitations présentes au delà de ce seuil. Une autre explication réside dans le fait que les MCS au dessus des régions continentales ne présentent pas de pluies de faibles intensités au dessus des régions continentales à cause de biais intrinsèques

à l'algorithme de restitution de pluie BRAIN. La figure 5.13 permet d'apporter des éléments de réponse à ces questionnements.

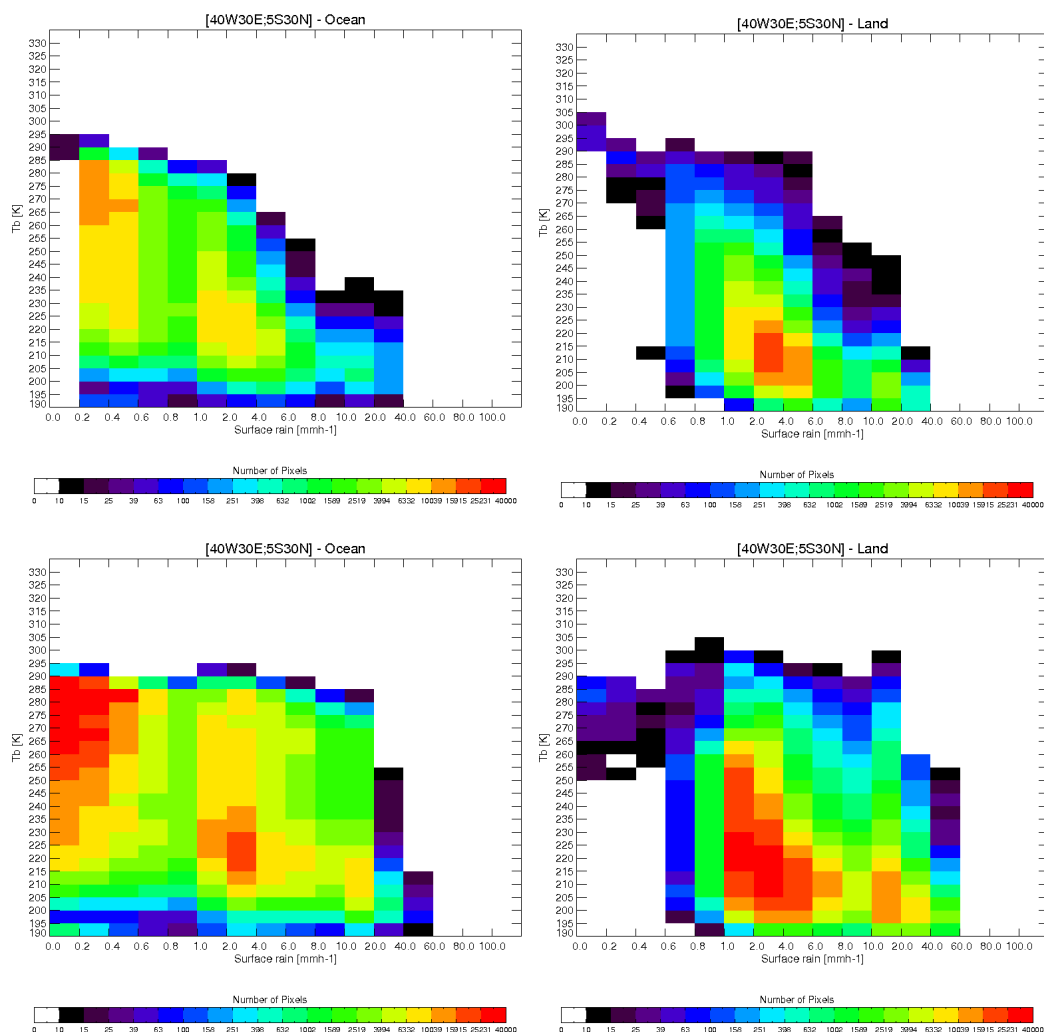


FIGURE 5.13 – *Histogramme des précipitations de surfaces issues des produits micro-ondes BRAIN (haut) et 2A12 (bas) et des températures de brillance issues de METEO-SAT ; tous les pixels dans une région [40W-30E ; 5S-30N] accumulés pour la période JJAS 2002.*

Les pluies de surfaces restituées par les algorithmes BRAIN et 2A12 ont été projetées sur les images géostationnaires infrarouges de METEOSAT-7 pour la période JJAS de l'année 2002, pour la région ouest africaine [40°W-30°E ; 5°S-30°N], et en séparant les zones continentales des zones océaniques. Les résultats de l'algorithme BRAIN sont représentés pour la ligne du haut et ceux de l'algorithme 2A12 pour la ligne du bas. La colonne de gauche correspond aux résultats pour les zones océaniques et la colonne de droite aux résultats des zones continentaux. Les résultats montrent que les deux produits permettent de restituer des taux de précipitation de faibles intensités (<1 mm/h). Cependant, quel que soit l'algorithme considéré, ces taux de précipitation sont rares pour les zones continentales. Au dessus des zones océaniques, les deux algorithmes restituent

beaucoup plus fréquemment des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h. En revanche, ces taux de pluie de faibles intensités sont rencontrés majoritairement dans des nuages de type 'chaud', supérieurs au seuil de 235 K établi pour la segmentation des systèmes convectifs.

Ces résultats permettent ainsi d'expliquer les différences d'intensité de pluie de surface rencontrées dans les systèmes convectifs continentaux et océaniques. De même, ils permettent de comprendre les larges fractions des systèmes convectifs océaniques expliquées par des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h correspondant aux parties stratiformes des MCS.

5.6 Régionalisation des composites de précipitation

Dans le paragraphe précédent, nous avons pu observer des différences marquées dans les composites de précipitations conditionnelles, de fractions précipitantes, et de fractions de pluie convective des MCS continentaux et océaniques. Cependant, au cours du chapitre 4, nous avons montré qu'une catégorisation des MCS continentaux et océaniques n'était pas adaptée afin d'observer à partir des seules données infrarouges des géostationnaires des différences marquées dans les régimes de mousson. Sept régions ont alors été définies en prenant en compte les spécificités régionales basées sur les paramètres de durée de vie, de taille maximum et de taux d'accroissement des MCS. Afin d'analyser plus en détail les comportements des MCS, le cycle de vie des précipitations est déterminé pour chacune des sept régions d'intérêt. Il est à noter que cette régionalisation est rendue possible sur seulement trois années de données grâce à la segmentation cohérente dans l'espace et dans le temps des systèmes convectifs de mousson par l'algorithme TOOCAN. Ainsi, les systèmes convectifs n'ont pas été filtrés du fait d'artefacts de fusion ou de division, permettant alors une représentativité statistique suffisante dans l'élaboration des composites de précipitation régionaux, ce qui ne serait pas le cas avec d'autres méthodes de suivi (cf chapitre 3).

La figure 5.14 illustre les composites de pluie de surface conditionnelle pour chacune de ces régions. Dans un premier temps, on peut observer que la population de clusters convectifs échantillonnée en moyenne pour chacune des 10 phases de chaque région est suffisante pour être statistiquement robuste. Le minimum de population est rencontré pour la baie du Bengale Ouest avec 1101 clusters convectifs échantillonnés sur les 10 phases du cycle de vie. La figure 5.14 montre des comportements de pluie de surface conditionnelle similaires pour les MCS de l'Atlantique ITCZ et pour les MCS de l'océan Indien. L'évolution des précipitations est relativement constante le long du cycle de vie et présente des intensités de précipitation inférieures à 2 mm/h quelle que soit la phase du cycle de vie. Plus spécifiquement, au dessus de l'océan Atlantique, le taux de pluie de surface conditionnelle présente une légère augmentation dans les phases 0-20%, puis est constant jusqu'à la phase 50-60% du cycle de vie, et enfin décrit une faible décroissance jusqu'à atteindre un taux de pluie de surface conditionnelle de 1 mm/h. Pour les systèmes de l'océan Indien, la diminution des taux de précipitation s'observe à partir de la phase 40-50%. Les MCS de la baie du Bengale Ouest et Est possèdent un comportement relativement similaire entre eux, avec une évolution constante jusqu'à la phase 50-60%. Il est cependant à noter que contrairement aux régions

océaniques Atlantique ITCZ et Océan Indien, les taux de précipitations rencontrées dans les MCS de la baie du Bengale sont plus élevés et de l'ordre de 2 mm/h dans les premières phases du cycle de vie. Les MCS des régions de la côte guinéenne, du Sahel et de l'Inde continentale présentent eux des évolutions de précipitation beaucoup plus marquées. Les intensités des pluies de surface conditionnelles rencontrées dans ces régions sont au minimum deux fois plus importantes que pour les deux régions océaniques précédemment analysées. De l'ensemble des régions d'étude, les MCS rencontrés dans la région du Sahel possèdent les taux de précipitation conditionnels les plus élevés (3,5 mm/h en début de cycle de vie). Pour la phase 20-30%, ce taux de précipitation atteint 4,5 mm/h.

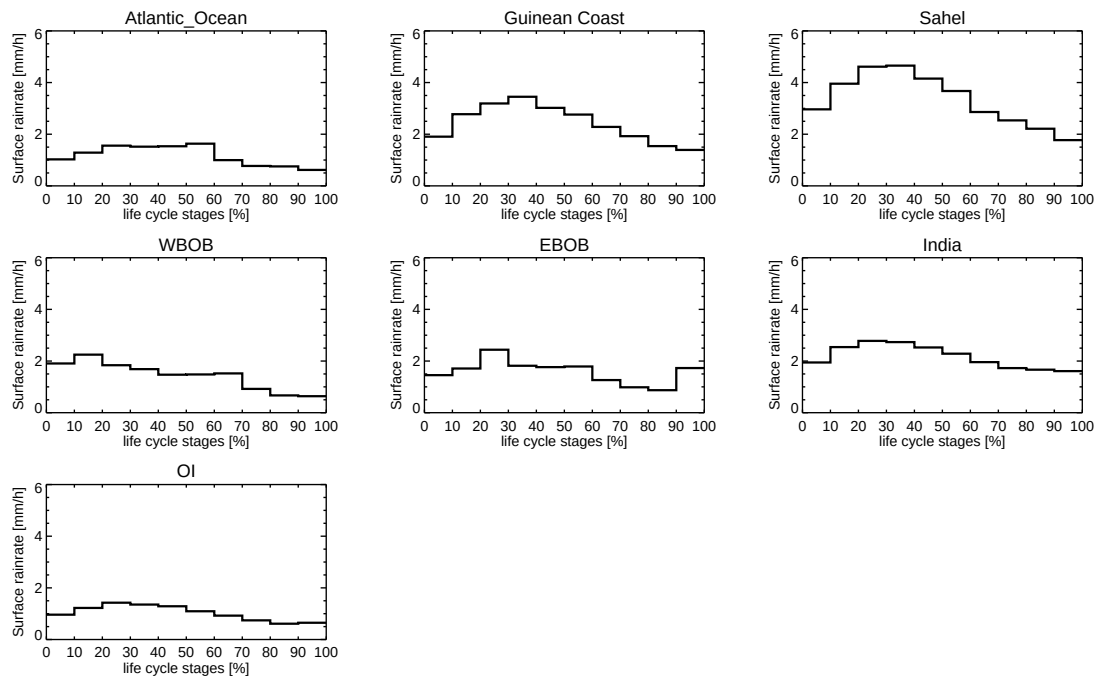


FIGURE 5.14 – Composite des pluies de surfaces conditionnelles pour les systèmes convectifs des sept régions d'intérêt de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde pour la période JJAS 2002-2004.

La figure 5.15 illustre les évolutions des fractions précipitantes en fonction d'un seuil de pluie rencontrées aux seins des MCS des sept régions d'intérêt. On peut dans un premier temps noter une certaine similarité pour un seuil de 0 mm/h (correspondant à un seuil pluie/non pluie), entre l'évolution des fractions précipitantes des régions de la baie du Bengale Ouest, Est et de l'océan indien. La fraction précipitante possède une valeur d'environ 40% relativement constante dans les cinq premières phases du cycle de vie, pour chacune de ces trois régions et décrit une lente décroissance le long du cycle de vie des MCS pour atteindre une valeur comprise entre 10 et 20% en fonction de la région. On peut observer de plus qu'en début de cycle de vie (jusqu'à la phase 40-50%), 30% des précipitations de l'océan Indien sont expliquées par des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h, alors que pour les deux régions de la baie du Bengale, 20% des précipitations s'expliquent par des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h en début de cycle de vie.

Dans le cas des MCS de la région Atlantique ITCZ, la fraction précipitante pour un seuil de 0 mm/h est de 60% en début de cycle de vie jusqu'à la phase 50-60% puis décroît jusqu'à une valeur de 30% en fin de cycle de vie. Tout au long du cycle de vie des MCS de cette zone, 35% des précipitations rencontrées correspondent à des taux de pluie inférieurs à 1 mm/h.

En ce qui concerne les systèmes convectifs de la côte guinéenne, du Sahel et de l'Inde continentale, on peut observer une similarité dans le comportement des fractions précipitantes. Jusqu'à la phase 40-50% du cycle de vie normalisé, l'évolution des fractions de pluie convective est relativement stable pour un seuil de précipitation de 0 mm/h, puis la fraction précipitante décrit une décroissance pour atteindre une valeur de ~5%. En fonction de ces régions, et pour un seuil compris entre 0 et 0,75 mm/h, la fraction précipitante varie entre 20% (Inde continentale) et ~30% (côte guinéenne). Ainsi, on peut observer qu'en début de cycle de vie, les fractions précipitantes dans la région Sahélienne sont trois fois moins importantes que celles rencontrées dans la région de l'Atlantique ITCZ. On peut également remarquer que pour des seuils de précipitation supérieurs à 3 mm/h, les fractions précipitantes des systèmes sahéliens, de la côte de Guinée et de l'Inde continentale sont supérieures aux quatre autres régions océaniques.

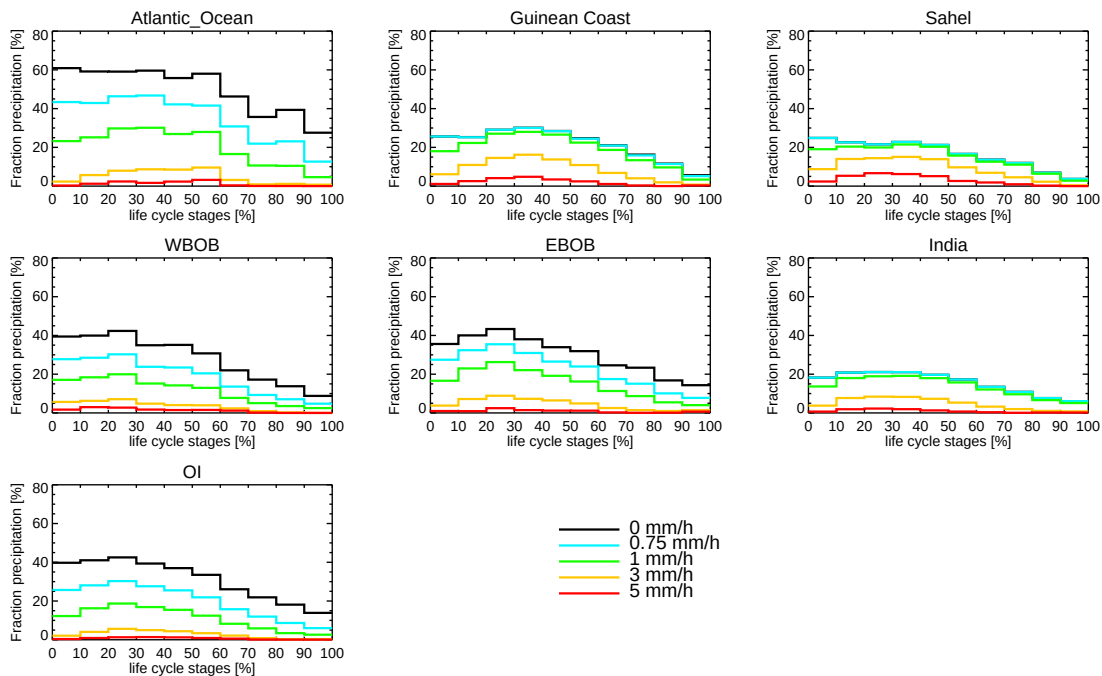


FIGURE 5.15 – Composite des fractions précipitantes au sein des systèmes convectifs en fonction de seuils de précipitation pour les sept régions d'intérêt de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde et pour la période JJAS 2002-2004.

La figure 5.16 présente l'évolution des fractions de pluie convective rencontrées au sein des MCS pour les sept régions d'intérêt. En ce qui concerne les zones Atlantiques ITCZ, Océan Indien, on peut noter des similarités dans l'évolution de cette fraction de pluie convective. Cette fraction est alors relativement stable le long du cycle de vie. En début de cycle de vie, selon la région,

la fraction convective est comprise entre 15 et 20% puis diminue lentement jusqu'à atteindre une valeur comprise entre 5 et 10% en fin de vie.

Dans la baie du Bengale, et notamment dans la baie du Bengale Ouest, cette évolution est plus marquée. En début de cycle de vie, on retrouve une valeur de 20% de la fraction convective, puis on observe une augmentation de 10% de cette fraction jusqu'à la phase 20-30%. Ensuite, la fraction de pluie convective diminue jusqu'à atteindre une valeur de 5%.

Pour les régions continentales de la côte guinéenne, du Sahel, et de l'Inde Continentale, les MCS possèdent un cycle des fractions de pluie convective beaucoup plus marqués que pour les régions océaniques précédemment analysées. Ces systèmes des régions continentales possèdent également des fractions de pluie convective plus élevées (jusqu'à deux fois plus) dans la phase 20-30% du cycle de vie que celles rencontrées dans les régions océaniques. Cependant, à la fin de leur cycle de vie, les MCS de ces trois régions continentales sont décrits par des fractions de pluie convective de l'ordre de 5%, équivalentes à celles rencontrées dans les régions océaniques. C'est le cas par exemple pour les MCS de la région Sahélienne qui décrivent une augmentation de leur fraction de pluie convective entre 35 et 50% pour les trois premières phases de leur cycle de vie, puis présentent une diminution importante de la fraction de pluie convective entre les phases 30 et 100% du cycle de vie pour atteindre une valeur de 5%.

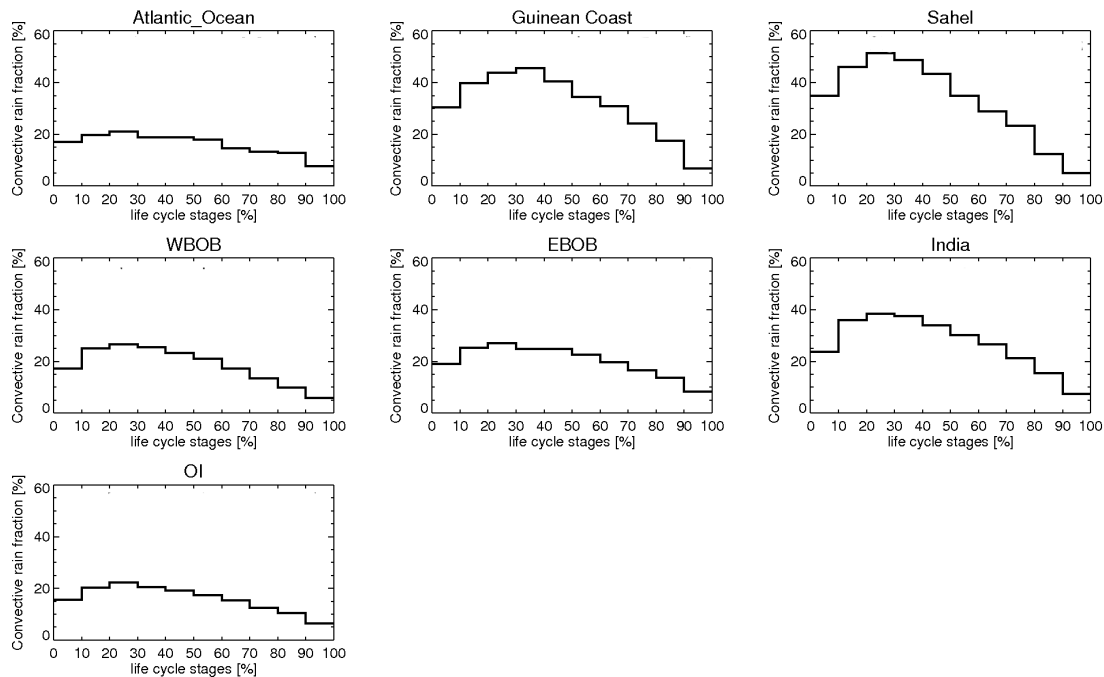


FIGURE 5.16 – Composite des fractions de pluie convective pour les sept régions d'intérêt de la zone de mousson Afrique de l'Ouest-Inde pour la période JJAS 2002-2004.

Comme nous avons pu l'observer dans l'étude des précipitations des MCS continentaux et océaniques, quelle que soit la région d'étude, la fraction de pluie convective décrit une croissance jusqu'à la phase 20%-30% puis une phase de décroissance. Seule l'amplitude de la fraction de

pluie convective présente des différences ou des similarités entre les régions. Ainsi, les systèmes convectifs de la région de l’océan Indien et de l’océan Atlantique possèdent un cycle de vie des fractions de pluie convective similaire. Au contraire, les systèmes convectifs de l’océan Atlantique possèdent une évolution de fraction de pluie convective beaucoup plus lisse et plus faible que celle des systèmes de la région Sahélienne.

Ces résultats confirment ce qui a été observé dans le paragraphe précédent, à savoir que les MCS océaniques possèdent des zones de pluie stratiformes plus importantes que les MCS des régions continentales. Il faut cependant noter que les MCS de la baie du Bengale Ouest et Est se distinguent des MCS des régions Atlantique ITCZ et Océan Indien en décrivant un cycle de vie d’amplitude plus grande de leur fraction convective se rapprochant ainsi d’un modèle continental de fraction de pluie convective. Au dessus des continents, les MCS sont caractérisés par une forte augmentation de leur fraction convective dans le premier tiers de leur cycle de vie, puis cette fraction tend à décroître rapidement jusqu’à atteindre une valeur proche de 5%. Pour les MCS océaniques, et quelle que soit la région océanique considérée, la fraction convective est moins importante que pour les MCS continentaux et présente une évolution plus lisse. Ces résultats sont cohérents avec les études menées par Futyan et Del Genio [2007].

Ainsi les résultats de ce chapitre ont montré que quelle que soit la région d’intérêt de la zone de mousson, les précipitations au sein des MCS pouvaient être décrits par un modèle de fraction précipitante et par un modèle de fraction de pluie convective. Ces modèles sont dépendants de facteurs d’échelles régionaux tels que la fraction de pluie convective maximum (f_c) rencontrée au cours de la phase 20-30% du cycle de vie ainsi que la fraction précipitante au sein des MCS qui est constante jusqu’à la moitié du cycle de vie des MCS (f_p). Le modèle de fraction de pluie convective est caractérisé par :

- une croissance de la fraction de pluie convective jusqu’à 25% du cycle de vie des MCS
- une décroissance de la fraction de pluie convective entre 25% du cycle de vie du MCS et sa dissipation
- un facteur d’échelle régional (f_c) correspondant à la fraction de pluie convective rencontré à 25% du cycle de vie des MCS

Le modèle de fraction précipitante est lui caractérisé par :

- une fraction précipitante constante jusqu’à la moitié de la durée de vie des MCS
- une décroissance de la fraction précipitante à partir de la moitié de la durée de vie des MCS
- un facteur d’échelle régional (f_p) correspondant à la fraction précipitante constante lors de la première moitié de la durée de vie des MCS.

Ces modèles associés au composite de surface froide défini dans le chapitre 4 permettent ainsi d’établir un cycle de vie complet des systèmes convectifs du point de vue morphologie et du point de vue précipitation (figure 5.17). Ainsi, un système convectif de mousson peut être décrit par trois phases au cours de son cycle de vie :

- Une phase d’initiation pendant le premier quart du cycle de vie d’un MCS au cours de laquelle la fraction de pluie convective augmente, la fraction précipitante au sein du MCS est constante et la surface froide du MCS augmente.

- Une phase de maturité pendant le deuxième quart du cycle de vie d'un MCS au cours de laquelle la surface froide du MCS continue de croître, la région précipitante au sein du MCS s'accroît également de manière proportionnelle à la surface froide du MCS. Mais la fraction de pluie convective au sein de cette région précipitante commence à diminuer.
- Une phase de dissipation correspondant à la deuxième moitié du cycle de vie du MCS, au cours de laquelle la surface froide, la fraction précipitante ainsi que la fraction de pluie convective décroissent.

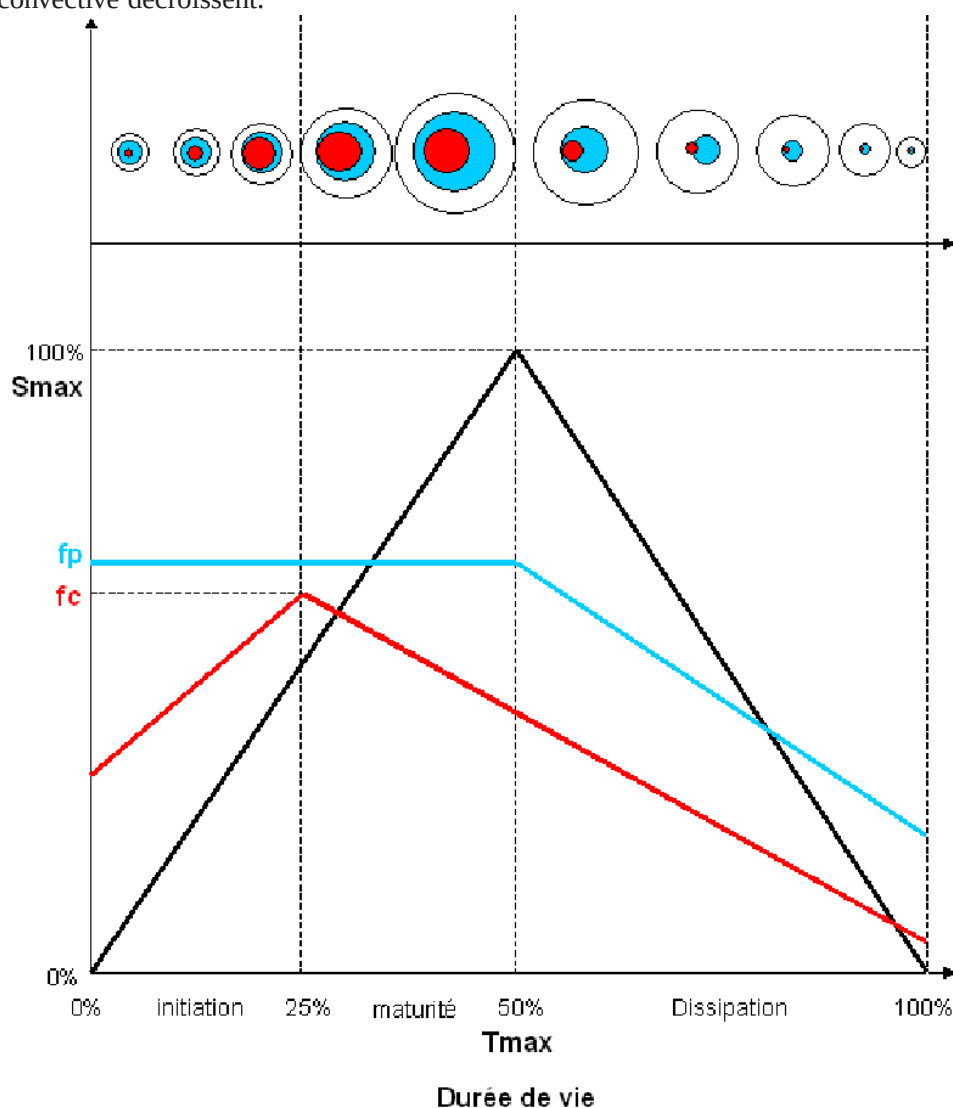


FIGURE 5.17 – Illustration des modèles conceptuels de surface froide (en noir), des fractions précipitantes (en bleu), et des fractions de pluie convective (en rouge) le long du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson.

La phase d'initiation présente un développement de plus en plus important de cellules convectives permettant d'alimenter la partie stratiforme du système convectif. Ainsi, la surface froide du MCS, ainsi que la surface de précipitation au sein de ce MCS augmentent. Au cours de la deuxième phase (maturité), la régénération de cellules convectives au sein de la région précipitante du MCS

commence à s'affaiblir. La partie stratiforme est quand même entretenue par les cellules convectives, ce qui permet au MCS et à sa région précipitante de continuer de s'accroître. Au cours de la phase de dissipation la régénération des cellules convectives n'est pas assez soutenue et ne permet plus de fournir du matériel suffisant à la partie stratiforme du MCS. Les précipitations au sein du MCS ainsi que la surface froide du système convectif commencent alors à diminuer jusqu'à dissipation du MCS.

Les caractéristiques des précipitations peuvent alors être associées aux caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs de mousson. Le tableau 4.3 du chapitre précédent présentant les caractéristiques régionales des MCS peut alors être complété par les caractéristiques régionales des précipitations (tableau 5.1).

Nom de la région	Type de région	Durée de vie moyenne (h)	Taille maximum moyenne (km^2)	G_{rate} moyen (km^2/h)	fraction précipitante (f_p) (%)	fraction de pluie convective (f_c) (%)
Atlantique ITCZ	Océanique	9.2	14474	637	60	20
Côte guinéenne	Continentale	8.9	23491	1107	30	45
Sahel	Continentale	9.0	33825	1476	25	50
Baie du Bengale Ouest	Océanique	9.2	33678	1535	40	25
Baie du Bengale Est	Océanique	9.2	24656	1120	40	25
Sous-continent indien	Continentale	8.7	20777	1010	20	40
Océan indien	Océanique	8.9	25204	1176	40	20

TABLEAU 5.1 – *Caractéristiques des systèmes convectifs de moussons en fonction des régions d'études en terme de morphologie et de précipitation.*

5.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les paramètres de précipitation restitués par l'algorithme BRAIN à partir des données TMI ont été combinés aux caractéristiques des systèmes convectifs de mousson déterminés à partir de l'imagerie Infrarouge METEOSAT par l'algorithme TOOCAN, dans le but d'étudier le cycle de vie des précipitations des MCS des régions ouest africaines et Indiennes.

Pour cela, une méthodologie de fusions de données a été mise en place permettant une colocalisation des pixels TMI et des pixels labellisés comme MCS de l'imagerie METEOSAT. Cette colocalisation a ainsi permis d'associer à chaque point de grille METEOSAT identifié comme MCS et compris dans la trace de TMI, des données géophysiques (pluie de surface, fraction de pluie convective) issues de BRAIN. Les mesures des précipitations au sein des systèmes convectifs ne sont cependant effectuées que de manière ponctuelle le long de leur cycle de vie, du fait de l'orbite basse du satellite TRMM ne permettant pas une mesure continue d'une même région géographique.

Afin de dépasser ce problème, une méthodologie statistique a été mise en oeuvre afin de déterminer les distributions de précipitation le long d'un cycle de vie normalisé d'un modèle type de MCS. Dans ce chapitre, seuls les MCS possédant un cycle de vie des surfaces froides symétrique, et appartenant donc à la classe 2a 40-70 ont été étudiés.

Dans un premier temps, une analyse des composites de précipitation dans les régions continentales et océaniques de l'ensemble de la région de mousson Afrique de l'Ouest-Inde a permis de faire ressortir des différences importantes de comportement. D'une part, les MCS continentaux présentent des taux de pluies de surface d'intensité deux fois plus importante que ceux rencontrés dans les systèmes océaniques. En considérant les fractions précipitantes au sein des systèmes convectifs, on a pu observer que les MCS continentaux possédaient des fractions précipitantes deux fois moins importantes que celles des systèmes océaniques pour des seuils de précipitation compris dans un intervalle 0-1 mm/h. 20% des précipitations au sein des systèmes océaniques sont alors expliquées par des taux de précipitation inférieurs à 1 mm/h, confirmant ainsi la présence de larges zones précipitantes stratiformes dans les systèmes océaniques. L'étude des fractions de pluie convective au sein des MCS nous a permis d'aller plus en détail dans l'étude de comportement des systèmes convectifs continentaux et océaniques. Les systèmes continentaux présentent ainsi de larges fractions de pluie convective en début dans le premier tiers de leur cycle de vie, puis décrivent une forte diminution de cette fraction. Les systèmes océaniques possèdent eux, un cycle de vie des fractions de pluie convective plus lisse. De même, cette fraction de pluie est beaucoup moins importante en début de cycle de vie, mais identique à la fraction de pluie convective des systèmes continentaux en fin de vie des MCS.

Une régionalisation des résultats a permis d'établir un modèle conceptuel de cycle de vie des fractions précipitantes et des fractions de pluie convective. Les précipitations des MCS de chacune des régions d'intérêt sont décrits par une croissance des fractions de pluie convective jusqu'à 25% de leur cycle de vie puis une décroissance jusqu'à la dissipation des MCS. De même la fraction précipitante au sein des MCS peut être idéalisée par une phase constante de la fraction précipitante jusqu'à la moitié du cycle de vie des MCS, puis une phase de décroissance de cette fraction jusqu'à la dissipation des MCS. Ces modèles de précipitation sont cependant dépendant de facteurs d'échelles régionaux tels que la valeur de la fraction précipitante (f_p) dans la première moitié du cycle de vie des MCS et la valeur maximum atteinte par la fraction de pluie convective (f_c) lors de la phase 20-30% du cycle de vie des MCS. Ces paramètres descriptifs des précipitations au sein

des systèmes convectifs de mousson, couplés avec les paramètres descriptifs de la morphologie des MCS (durée de vie, surface froide maximum, G_{rate}) présentés au cours du chapitre 4 permettent ainsi de déterminer un modèle conceptuel complet du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson décrit par trois phases dont les durées ont été quantifiées :

- Une phase d’initiation pendant le premier quart du cycle de vie d’un MCS au cours de laquelle la fraction de pluie convective augmente, la fraction précipitante au sein du MCS est constante et la surface froide du MCS augmente.
- Une phase de maturité pendant le deuxième quart du cycle de vie d’un MCS au cours de laquelle la surface froide du MCS continue de croître, la région précipitante au sein du MCS s’accroît également de manière proportionnelle à la surface froide du MCS. Mais la fraction de pluie convective au sein de cette région précipitante commence à diminuer.
- Une phase de dissipation correspondant à la deuxième moitié du cycle de vie du MCS, au cours de laquelle la surface froide, la fraction précipitante ainsi que la fraction de pluie convective décroissent.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Le cycle de l'eau et de l'énergie dans les tropiques joue un rôle fondamental dans le climat global mais reste encore mal appréhendé pour comprendre l'évolution des ressources en eau dans ces régions. En particulier, il est nécessaire de préciser le rôle des systèmes convectifs de mousson organisés dans ce cycle et de documenter leurs propriétés afin de contraindre plus fortement les développements de modélisation les concernant.

Dans un contexte de réchauffement climatique, de nombreuses missions satellitaires (TRMM, Megha-Tropiques, GPM) ont pour objectifs de documenter ces cycles d'eau et d'énergie dans les tropiques et les sub-tropiques. Afin de préparer la mission Megha-Tropiques et de répondre à la problématique des cycles de l'eau et de l'énergie, l'objectif initial de cette thèse était donc d'étudier le cycle de vie des systèmes convectifs de mousson dans la région de mousson Afrique de l'Ouest-Inde : l'évolution de leurs paramètres morphologiques, l'évolution des précipitations associées et la quantification de la durée des différentes phases du cycle de vie. Ce travail a été réalisé en utilisant les données infrarouges des satellites géostationnaires METEOSAT Seconde Génération, METEOSAT-5 et 7 ainsi que les données de précipitations issues du radiomètre TMI à bord du satellite défilant TRMM.

6.1 Résumé des travaux entrepris

Différentes méthodes de détection et de suivi des systèmes convectifs développées au cours des trente dernières années ont été présentées et analysées. Ces méthodes ont permis des avancées importantes dans la compréhension des phénomènes météorologiques que sont les systèmes convectifs. Elles ont en particulier permis d'établir un grand nombre de climatologies en Afrique de l'Ouest mais également en Amérique du Sud, aux Etats-Unis, sur le Pacifique et en Asie. Cependant, il est apparu que l'ensemble de ces méthodes pouvait engendrer des divisions et des fusions artificielles des systèmes nuageux lors de l'étape de suivi. Ces problèmes algorithmiques provoquent alors des naissances et des disparitions artificielles de systèmes, mais également des évolutions bruitées des paramètres morphologiques associées aux systèmes convectifs. Les méthodes

employées jusqu'alors ne permettent alors pas de caractériser de manière cohérente le cycle de vie de l'ensemble des systèmes convectifs. Ces limitations nous ont alors conduit à élaborer une nouvelle méthodologie de détection et de suivi des systèmes convectifs appelée TOOCAN (Tracking Of Organized Convection using a 3D segmentationN), et basée sur une technique de segmentation 3D dans l'espace et dans le temps de l'imagerie infrarouge des satellites géostationnaires. La détection et le suivi des systèmes convectifs est alors réalisée en une seule et unique étape permettant de fragmenter une couverture nuage haut en plusieurs systèmes convectifs dans un domaine spatio-temporel en 3 dimensions. Cette technique possède l'avantage de caractériser le cycle de vie de vie des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs de manière cohérente.

Dans un premier temps, la sensibilité de la fragmentation nuageuse par l'algorithme TOOCAN au pas de détection ΔT_b a été évalué. Il est alors apparu que le nombre de MCS segmentés évoluait peu en fonction de ce paramètre, qu'il soit fixé à 2K, 5K, ou 10K. Plus précisément, les MCS possédant une importante couverture au cours de leur cycle de vie sont identifiés de la même façon quel que soit le pas de détection ΔT_b choisi. Pour la suite de l'étude, ce paramètre a alors été fixé à 5K. Dans un deuxième temps, une comparaison des résultats issus de l'algorithme TOOCAN avec les systèmes convectifs segmentés par un algorithme d'ancienne génération utilisant une détection par l'application d'un simple seuil et un suivi par une technique de "recouvrement" a été réalisée au cours du chapitre 3. Cette comparaison a été effectuée d'une part en analysant des cas d'études en Afrique de l'Ouest et en Inde, et d'autre part de manière statistique. L'analyse des cas d'études a permis de souligner les limitations de l'algorithme par "recouvrement" dans sa capacité à décrire les paramètres morphologiques des systèmes convectifs de mousson tout au long de leur cycle de vie. D'une part, un suivi par une technique de "recouvrement" engendre des fusions et des divisions des systèmes convectifs. Il en résulte des systèmes qui naissent ou se dissipent artificiellement, mais également une évolution bruitée de leur caractéristiques morphologiques. D'autre part, la détection des systèmes convectifs par un simple seuil en température de brillance appliqué à l'imagerie infrarouge révèle la difficulté d'une telle technique à décrire une organisation convective. Les problèmes de détection et de suivi engendrent alors des évolutions bruitées des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie. Les mêmes cas d'études traités par l'algorithme TOOCAN révèlent en revanche sa capacité à caractériser cette organisation, quelle que soit son échelle dans l'espace et dans le temps. De même, quel que soit le degré de complexité de cette organisation convective, l'algorithme TOOCAN, grâce à sa technique de segmentation spatio-temporelle, fragmente la couverture nuage haut, identifiant ainsi les systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie en supprimant les divisions et les fusions. Il apparaît alors que les systèmes convectifs sont détectés au plus tôt dans leur phase d'initiation et au plus tard dans leur phase de dissipation. De plus, les orages cellulaires, indépendants dans une image infrarouge 2D, mais appartenant à une même organisation convective peuvent être identifiés comme appartenant à un même système convectif.

L'analyse statistique des paramètres morphologiques des systèmes convectifs traités par l'algorithme de "recouvrement" a mis en évidence les problèmes dus aux fusionx et aux divisions. Les systèmes de longue durée de vie, contribuant fortement à la couverture nuage haut totale,

correspondent en fait à des systèmes qui se sont régénérés artificiellement suite à des fusions. De même, les systèmes atteignant des surfaces froides de plusieurs centaines de milliers de km^2 correspondent en réalité à une mauvaise segmentation de la couverture nuage haut. Ces fusions et divisions posent également problème dans la représentation statistique de paramètres tels que la vitesse de déplacement moyenne ou instantanée des systèmes. Au contraire, l'analyse statistique réalisée au cours du chapitre 3 indiquent que les paramètres morphologiques des MCS segmentés par TOOCAN semblent plus en accord avec la littérature connue sur les MCS. Cette bonne caractérisation des paramètres morphologiques des systèmes convectifs par TOOCAN permet de n'appliquer aucun filtre sur les MCS pour la suite de l'étude. Enfin, des études statistiques sur le cycle de vie de l'ensemble des MCS traités par TOOCAN montrent que cette méthodologie permet de caractériser de manière cohérente l'ensemble des MCS dans l'espace mais également dans le temps.

L'algorithme TOOCAN a été appliqué au cours du chapitre 4 sur des données infrarouges issues de METEOSAT-5 et 7 afin d'étudier les caractéristiques des systèmes convectifs de mousson couvrant la région de l'Afrique de l'Ouest et de l'Inde sur la période Juin-Juillet-Août-Septembre des années 2002 à 2004. Ce chapitre a permis de faire ressortir un nouveau modèle conceptuel de la morphologie des systèmes convectifs de mousson au cours de leur cycle de vie. Le cycle de vie des surfaces froides des systèmes convectifs peut alors être décomposé en deux phases, une phase de croissance et une phase de décroissance, dépendant de trois paramètres :

- la surface froide maximum du MCS rencontrée au cours de son cycle de vie, S_{max} .
- l'instant où cette taille maximale est atteinte au cours du cycle de vie, T_{max} .
- la durée de vie des systèmes convectifs.

Un nouveau paramètre G_{rate} a alors été introduit correspondant au taux d'accroissement et de décroissance des surfaces froides des MCS. Il a été montré que T_{max} est constant sur l'ensemble de la région d'étude et est égale à 50% du cycle de vie, indiquant qu'une forte proportion des systèmes convectifs possède un cycle de vie de leur surface froide symétrique. Cette classe de MCS a été appelée classe 2a 40-70. De même, il existe une forte corrélation entre les durées de vie des systèmes et leur surface froide maximum. Ainsi, les paramètres du modèle de MCS sont soit constant, soit présentent une forte corrélation. Le problème du cycle de vie des MCS est alors résumé à un seul degré de liberté (durée de vie, surface froide maximum). Les résultats issus de ces travaux ont permis d'approfondir notre compréhension des MCS d'un point de vue processus, mais également au niveau des conditions environnementales régionales.

Au cours du chapitre 5, et afin d'étudier le cycle de vie des processus humides au sein des MCS, les données issues de l'algorithme BRAIN permettant la restitution des précipitations à partir des observations TMI ont été utilisées. Une méthodologie de fusion des données BRAIN et de l'imagerie des MCS issue de l'algorithme TOOCAN a permis d'associer aux paramètres morphologiques des MCS, les caractéristiques de précipitation. Les satellites défilants tels que TRMM utilisés dans ce chapitre ne permettent pas d'observer en continue une même scène. Les mesures de précipitations au sein des MCS ne peuvent alors être réalisées que de manière ponctuelle au cours de leur cycle de vie. Une méthodologie statistique a alors été mise en place afin d'estimer

l'évolution des précipitations au sein d'un MCS type correspondant aux MCS de la classe 2a 40-70. Les résultats présentés de manière globale sur la zone de mousson des régions Afrique de l'Ouest et Inde permettent de mettre en évidence des différences de comportement entre les MCS océaniques et continentaux. Tout d'abord, les systèmes continentaux présentent des taux de pluie de surface conditionnelle deux fois plus importants que ceux rencontrés au sein des systèmes convectifs océaniques. De même, les fractions précipitantes des systèmes océaniques sont deux fois plus larges que celles des systèmes continentaux pour des seuils de précipitations compris dans un intervalle 0-1 mm/h. Ainsi, cette analyse permet de faire ressortir que 20% des précipitations au sein des systèmes océaniques sont expliquées par des taux de précipitations inférieurs à 1 mm/h indiquant alors la présence de larges zones précipitantes stratiformes dans les systèmes océaniques. L'étude des fractions de pluie convective au sein des MCS a permis de montrer que les systèmes continentaux présentent de larges fractions de pluie convective dans le premier tiers de leur cycle de vie, puis cette fraction diminue fortement jusqu'à la fin du cycle de vie du MCS. Les systèmes océaniques possèdent eux, un cycle de vie des fractions de pluie convective plus lisse le long de leur cycle de vie. Cette fraction est beaucoup moins large en début de cycle de vie, mais devient similaire à la fraction de pluie convective des systèmes continentaux en fin de vie des MCS.

L'étude du cycle de vie des précipitations associé à l'analyse morphologique des MCS du chapitre 4 permet de faire ressortir un modèle conceptuel du cycle de vie des systèmes convectifs de mousson. Ainsi, ce cycle peut être décomposé en trois phases :

- une phase d'initiation au cours des 25 premiers pourcents du cycle de vie des MCS correspondant à un accroissement de la fraction de pluie convective, ainsi que de la surface froide des MCS. La fraction précipitante au sein du MCS est quant à elle constante pendant cette phase d'initiation.
- une phase de maturité pendant le deuxième quart du cycle de vie des MCS correspondant à une diminution de la fraction de pluie convective au sein de la région précipitante, à une augmentation de la surface froide et à une fraction précipitante constante.
- une phase de dissipation au cours de la deuxième moitié de cycle de vie des MCS correspondant à une diminution de la fraction de pluie convective, de la fraction précipitante au sein des MCS, et une décroissance de la surface froide des MCS.

Le cycle de vie des précipitations est reproductible sur l'ensemble de la zone de mousson en tenant compte de facteurs d'échelles régionaux, tels que la fraction précipitante constante au cours de la première moitié du cycle de vie des MCS (f_p), la fraction de pluie convective maximum à 25% du cycle de vie des MCS (f_c).

Le travail réalisé au cours de cette thèse a ainsi permis de faire émerger des modèles de cycle de vie des systèmes convectifs tant au niveau des paramètres morphologiques tels que la surface froide, qu'au niveau des processus humides. Ces deux types de modèle sont valables sur l'ensemble de la région de mousson étudiée et est dépendant de facteurs d'échelles régionaux.

6.2 Perspectives

Une première perspective à ce travail est liée à une approche utilisant uniquement les données géostationnaires, avec pour but d'étendre la technique de segmentation TOOCAN, actuellement limitée à un seuil de 235 K, à l'ensemble de la couverture nuage haut, incluant ainsi les cirrus non précipitants, pour étudier les propriétés radiatives des MCS (Bouniol et al. [2010]). Les travaux existants ont montré qu'en utilisant les informations multi-spectrales des plateformes géostationnaires, il était possible d'identifier un masque nuage haut. Un tel type de segmentation a déjà été utilisé par la méthode 'Detect And Spread' (Roca et al. [2002]) et pourrait alors être utilisé par la méthodologie de segmentation 3D TOOCAN. Il pourra ainsi être possible d'étudier la sensibilité de la symétrie du cycle de vie des MCS en fonction du seuil de température de brillance utilisé.

L'étude du bilan d'énergie le long du cycle de vie des systèmes convectifs est une problématique qui n'a pas été abordée au cours de cette thèse. Les travaux de Schumacher et al. [2004] nous permettent cependant d'établir des premiers résultats concernant le cycle de vie de la chaleur latente au sein des systèmes convectifs de mousson. D'ores et déjà, des analyses du cycle de vie de la chaleur latente ont été effectuées sur la région de mousson Afrique de l'Ouest-Inde pour la période JJAS 2002-2004 mais n'ont pas été montrées au cours de cette thèse. Cette étude doit être approfondie et étendue à l'ensemble des régions d'intérêts étudiées au cours de cette thèse.

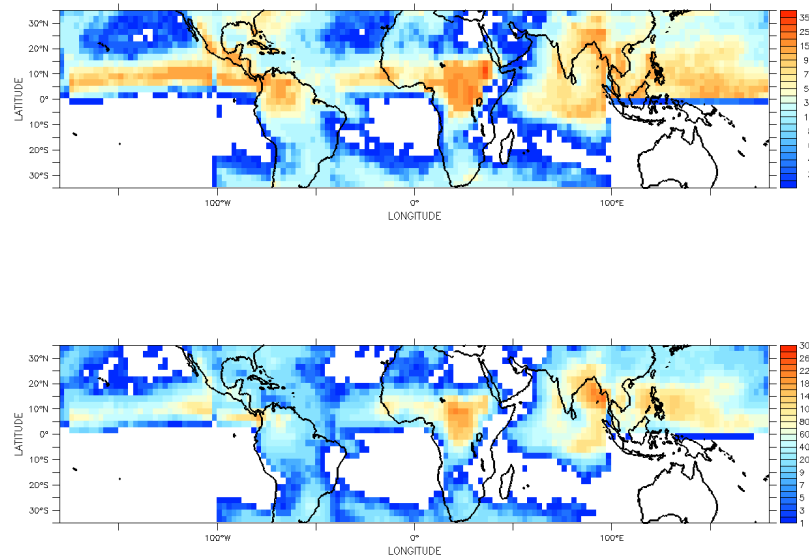


FIGURE 6.1 – Population des clusters convectifs segmentés par l'algorithme par "recouvrement" sur l'ensemble de la bande intertropicale pour la période JJAS 2009 (haut) ; Couverture nuage haut segmentée par l'algorithme par "recouvrement" sur l'ensemble de la bande intertropicale pour la période JJAS 2009 (bas).

L'étude du bilan radiatif au sommet des systèmes convectifs et le long de leur cycle de vie pourra être accomplie avec les mesures issues de l'instrument Scarab embarqué à bord de Megha-Tropiques. Cette analyse pourra être réalisée à partir des méthodologies développées au cours de cette thèse, et notamment en prenant en compte les algorithmes de fusion des données et de calculs des composites.

Dans le cadre de la mission Megha-Tropiques, un produit de niveau 3/4 "Cycle de vie des systèmes convectifs" (cf annexe A) a été développé consistant en un produit de niveau 2 de détection et de suivi des systèmes convectifs et un produit de niveau 3/4 permettant de combiner dans l'espace et dans le temps les données issues du produit de niveau 2 BRAIN et les systèmes nuageux issus de l'algorithme de détection et de suivi des MCS. A l'heure actuelle l'algorithme de suivi des MCS utilisé est un algorithme d'ancienne génération basé sur une détection des MCS par un simple seuil en température de brillance et un suivi basé sur une méthodologie de recouvrement. A terme, cet algorithme sera remplacé par l'algorithme de nouvelle génération TOOCAN.

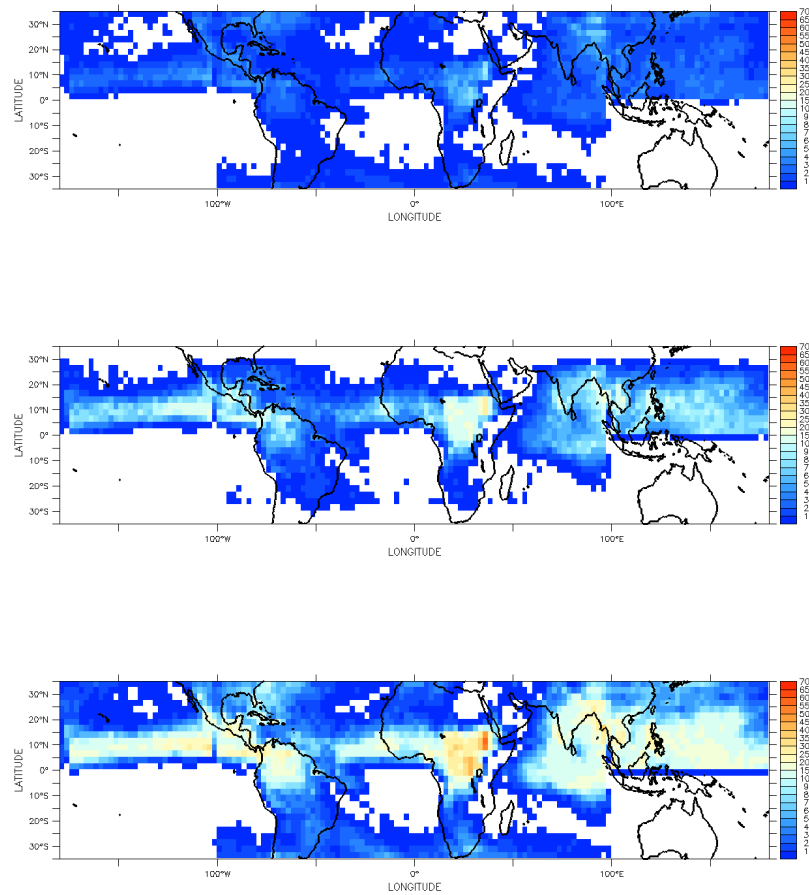


FIGURE 6.2 – Population des clusters convectifs échantillonnés par TRMM sur l'ensemble de la bande intertropicale pour la période JJAS 2009 (haut) ; échantillonnés par Megha-Tropiques (milieu) ; échantillonnés par la constellation GPM (bas).

Tout au long de la mission Megha-Tropiques, toutes les données pleines résolutions et temporelles des satellites géostationnaires couvrant l'ensemble de la ceinture inter-tropicale seront disponibles (MTSAT, GOES-W, GOES-E, GOES-SA, SEVIRI, FY-2C et METEOSAT-7), permettant ainsi une étude des caractéristiques morphologiques et des processus humides des MCS des tropiques. Pendant l'exercice du "Dry-Run" de l'été 2009, en prévision du lancement de Megha-Tropiques, l'algorithme de suivi d'ancienne génération a été appliqué à l'ensemble des données infrarouges issues de ces satellites géostationnaires, et combinées aux données de précipitations issues de BRAIN et déterminées à partir des radiomètres TMI, SSMI-F13, SSMI-F15, et AMSRE. Cet exercice nous a permis de détecter et de suivre l'ensemble des systèmes convectifs de l'été 2009 de la bande intertropicale (figure 6.1).

De même, la fusion des données BRAIN et des caractéristiques morphologiques des systèmes convectifs de mousson a permis une première évaluation de leurs processus humides de l'ensemble des MCS de la bande tropicale. Au cours de la mission Megha-Tropiques, des régions d'intérêts de la bande intertropicale pourront être établies afin d'étendre les travaux entrepris au cours de cette thèse à l'ensemble des systèmes convectifs des tropiques.

Enfin, les missions satellitaires Megha-Tropiques, et la constellation GPM, par la répétitivité de leurs mesures, vont accroître considérablement l'échantillonnage des systèmes convectifs de mousson. Les cartes présentées figure 6.2 montrent l'apport de ces missions en terme d'échantillonnage des systèmes convectifs par rapport à un échantillonnage par le seul satellite TRMM. De telles missions satellitaires, associées à une détection des systèmes convectifs par l'algorithme TOOCAN vont ainsi nous permettre de réaliser des études intra-saisonnières sur le comportement des processus humides des systèmes convectifs des régions tropicales.

Annexe A

Les satellites météorologiques

A.1 METEOSAT

A.1.1 Introduction

En 1968, l'Europe par l'intermédiaire de l'ESRO (European Space Research Organisation), qui deviendra plus tard l'ESA (European Space Agency), choisit de se doter d'une capacité spatiale incluant les satellites météorologiques. Les premières études de faisabilité et de construction du radiomètre ARIES, prototype des radiomètres METEOSAT, furent effectuées en France au LMD. En 1972, l'ESRO entérina officiellement le programme METEOSAT et le premier prototype METEOSAT-1 fut lancé le 23 novembre 1977, permettant ainsi l'observation des circulations atmosphériques et de la météorologie à partir d'un satellite géostationnaire. Ce premier satellite fonctionna pendant deux ans jusqu'à la panne de son radiomètre en novembre 1979. Le rôle clé pris entre temps par le satellite européen dans le domaine de la prévision météorologique amena les pays européens à établir un programme de pérennisation à long terme de METEOSAT. METEOSAT-2 fut lancé en 1981 et les accords pour un programme d'observations spatiales à long terme furent entérinés en 1986 par les 16 états membres de l'ESA. Un ancien prototype fut lancé en 1988 sous le nom de METEOSAT-3 afin d'assurer la continuité des mesures en attendant les satellites METEOSAT-4, 5 et 6. Ces derniers assurèrent la mission d'observation jusqu'en 1998 quand fut lancé METEOSAT-7, toujours opérationnel à l'heure actuel. METEOSAT-7 fit parti du programme de transition, qui s'acheva en 2002, faisant place à une nouvelle génération de satellites, METEOSAT Seconde Génération (MSG). Les satellites MSG consistent en une série de quatre satellites géostationnaires, qui opèreront jusqu'en 2020. Ils embarquent un instrument appelé SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager), qui a la capacité d'observer le globe terrestre dans 12 canaux spectraux, ainsi que l'instrument GERB (Geostationary Earth Radiation Budget) pour la mesure du bilan radiatif terrestre. Le programme METEOSAT Seconde Génération sera remplacé progressivement à partir de 2017 par une troisième génération de satellites, les METEOSAT Third Generation.

Nous décrirons par la suite la série des satellites METEOSAT en nous concentrant sur les données du canal infrarouge.

A.1.2 Description générale de METEOSAT

Les caractéristiques générales présentées ici sont issues de différentes sources : les publications EUMETSAT, le site internet de EUMETSAT ([http :www.eumetsat.de](http://www.eumetsat.de)). Les informations orbitographiques des satellites METEOSAT, ainsi que pour les satellites TRMM et Megha-Tropiques dans les paragraphes qui suivront ont été en partie tirées du livre "Satellites : orbites et missions" de Michel Capderou ainsi que du logiciel d'orbitographie IXION.

A.1.2.1 Caractéristiques de vol

Les satellites METEOSAT (figure A.1) observent la Terre depuis une orbite quasi-circulaire à une altitude d'environ 36 000 km dite géostationnaire. La vitesse de rotation autour de la planète sur cette orbite est identique à la rotation de la Terre sur elle-même et permet ainsi une observation continue d'une même région du globe. Le satellite opérationnel a pour point subsatellite 0° de longitude et observe le continent africain, l'océan Atlantique et l'Europe. La légère instabilité de cette position produit un déplacement du satellite en forme de huit autour de ce point. Des écarts de 1° en longitude et latitude autour du point subsatellite sont considérés comme des variations normales pour un satellite géostationnaire. Lorsque ces écarts sont dépassés, on effectue alors une correction à l'aide de moteurs latéraux fonctionnant à l'hydrazine, impliquant alors une durée de vie limitée du satellite.

L'orbite de certains satellites METEOSAT a été modifiée afin de rejoindre d'autres positions longitudinales. METEOSAT-3, en remplacement d'un satellite GOES-Atlantique a été déplacé de sa position de repos vers les longitudes 55°W et 75°W entre 1991 et 1995. C'est aussi le cas de METEOSAT-5 qui a été déplacé de sa position de repos (10°W) vers l'océan Indien à 63°W, en support de la campagne internationale INDOEX entre 1998 et 2005. Depuis 2005, METEOSAT-5 a été remplacé par METEOSAT-7 positionné à 57,5° pour l'observation de la région indienne.

A.1.2.2 Caractéristiques spectrales de l'instrument

– METEOSAT première génération

Les satellites METEOSAT-1 à 7 possèdent à leur bord trois bandes spectrales d'observation ou canaux :

- Un canal dit visible bande large (0,45 - 1 μm) qui observe le spectre solaire et donne des informations sur l'albédo des surfaces claires ou des nuages.
- Un canal dans l'infrarouge thermique (10,5 - 12,5 μm) qui renseigne par exemple sur la température de la surface de la mer, la température au sommet des nuages.

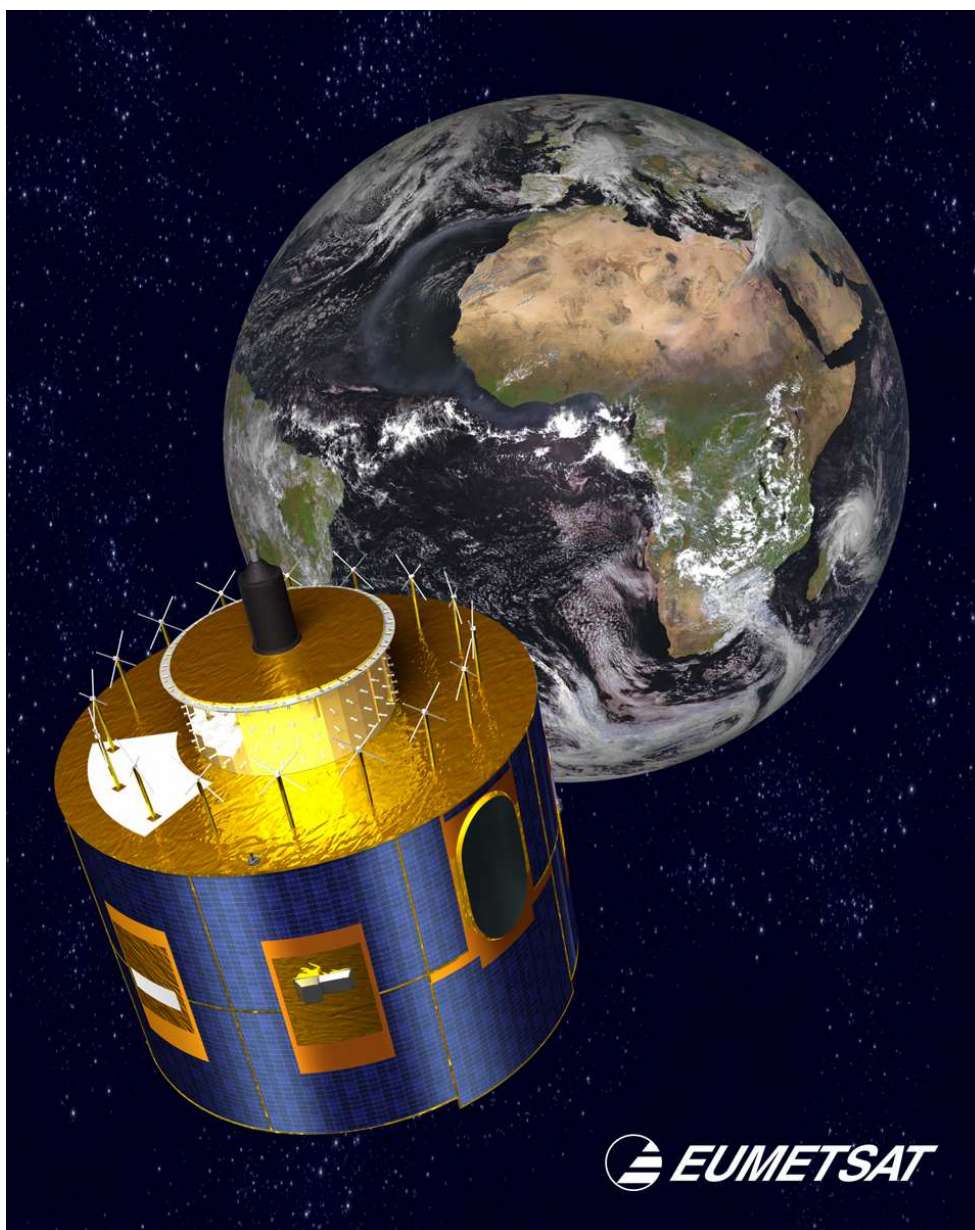


FIGURE A.1 – *Vue artistique de METEOSAT Seconde Génération.*

- Un canal vapeur d'eau centré sur une forte bande d'absorption de la vapeur d'eau aux environs de $6,3 \mu\text{m}$, couvrant la bande $5,7 - 7,1 \mu\text{m}$ et qui est principalement utilisé pour estimer l'humidité dans la troposphère libre, mais aussi pour corriger l'attribution de l'altitude des nuages semi-transparents. Dans ces longueurs d'onde, l'atmosphère est très opaque si de la vapeur d'eau est présente et transparente si l'air est sec.

– **METEOSAT Seconde Génération**

La seconde génération des satellites METEOSAT possède douze bandes spectrales d'observation. Les canaux originaux de METEOSAT première génération sont conservés afin d'assurer la

continuité des mesures et de nouveaux canaux ont été ajoutés pour enrichir la qualité d'observation (SEVIRI Science Plans). Les 12 canaux sont décrits ci-dessous :

- Deux canaux visibles $0,6\ \mu\text{m}$ et $0,8\ \mu\text{m}$ essentiels pour la la détection nuageuse, l'identification de scènes, les aérosols, le suivi de la végétation...
- Un canal $1,6\ \mu\text{m}$ pour discriminer les nuages de la couverture neigeuse ainsi que les nuages composés de cristaux de glace des nuages composés de gouttelettes d'eau.
- Un canal HRV à une résolution de 1km utilisé pour la prévision météorologique.
- Les canaux vapeur d'eau $6,2\ \mu\text{m}$ et $7,3\ \mu\text{m}$
- Quatre canaux infrarouges $3,9\ \mu\text{m}$, $8,7\ \mu\text{m}$, $10,8\ \mu\text{m}$ et $12\ \mu\text{m}$ pour une observation nuageuse continue avec une température estimée des nuages, de la surface du sol et de la mer. Le canal $3,8\ \mu\text{m}$ est utilisé spécifiquement la nuit pour détecter le brouillard et les nuages très bas.
- Les canaux $9,7\ \mu\text{m}$ et $13,4\ \mu\text{m}$ pour une amélioration des imageries multi-spectrales, des calculs des déplacements nuageux, etc... Le canal infrarouge $9,7\ \mu\text{m}$ appartient à une bande d'absorption correspondant à l'ozone et est utilisé pour l'étude dans la haute troposphère des paramètres de la tropopause et des vents stratosphériques. Le canal $13,4\ \mu\text{m}$ appartient à une bande d'absorption du CO_2 et est en particulier utilisé pour la discrimination des cirrus.

Depuis le lancement du premier satellite METEOSAT, la précision radiométrique (le nombre de bits pour numériser le signal électrique mesuré par le capteur) a évolué de 6 bits pour les satellites pré-opérationnels, à 8 bits pour les satellites METEOSAT première génération de la période opérationnelle, et à 10 bits pour MSG. Les comptes numériques ainsi obtenus varient entre 0 et 63, 0 et 255 et, 0 et 1023 respectivement. Dans le cas du canal infrarouge $10,8\ \mu\text{m}$ de MSG, l'erreur radiométrique à une température de 300 K est estimée à 0,11 K, alors qu'il est de 0,3 K dans le cas du canal $10,8\ \mu\text{m}$ de METEOSAT-7 pour une même température. Il est intéressant de noter que la technologie et les performances des canaux infrarouges restent les mêmes depuis le lancement des premiers METEOSAT. La diminution de l'erreur radiométrique pour le canal $10,8\ \mu\text{m}$ entre les différents satellites METEOSAT est alors expliquée par la numérisation sur 10 bits du signal reçu.

A.1.2.3 Géométrie de l'acquisition des images

La stabilité du satellite sur son orbite est assurée par sa rotation propre autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation de la Terre à la vitesse de 100 tours/minute. La région observée à chaque instant est appelée pixel et correspond à une tache au sol de l'ordre de 5km au point subsatellite pour les canaux infrarouges et vapeur d'eau et de 2,5 km pour le canal visible des METEOSAT première génération. En ce qui concerne les satellites de seconde génération, la résolution des pixels au point subsatellite est de l'ordre de 1 km pour le canal HRV et de 3 km pour les canaux IR et WV et les trois canaux visibles restant. A chaque rotation, le radiomètre balaye la zone d'observation selon une ligne. L'inclinaison de l'optique de mesure est modifiée après chaque rotation (schéma A.3). L'ensemble des lignes ainsi acquises forme l'image METEOSAT. Dans le cas des METEOSAT première génération, la zone totale d'observation de METEOSAT est composée de $2\ 500 \times 2\ 500$

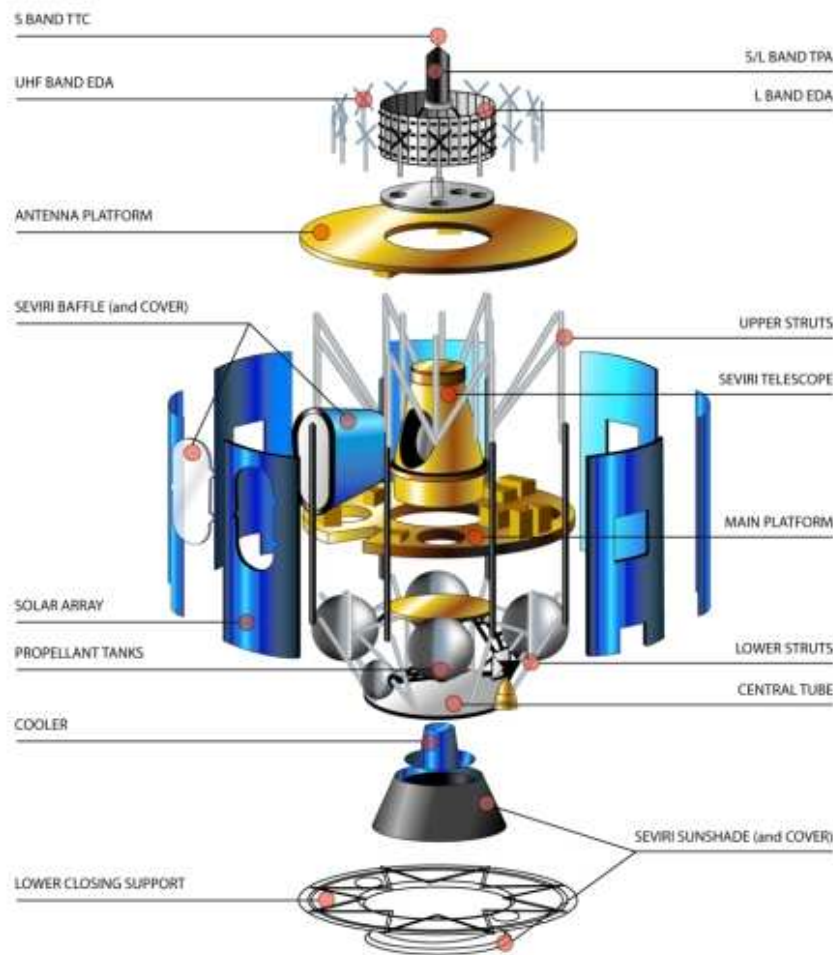


FIGURE A.2 – Description technique du satellite MSG

pixels pour les canaux IR et WV, et de 5 000 x 5 000 pixels pour le canal visible. Dans le cas de MSG, la zone d'observation est composée de 11 136 x 11 136 pixels pour le canal HRV, et de 3 712 x 3 712 pixels pour les canaux IR, WV et les 3 autres canaux visibles.

En ce qui concerne les satellites de première génération, la procédure d'acquisition de l'image se déroule en 25 minutes. Le satellite est ramené à son inclinaison originale en 2 minutes 30. Deux minutes 30 sont alloués à la stabilisation du satellite. Une nouvelle image est donc disponible toutes les 30 minutes. Ce mode d'acquisition est parfois modifié pour des applications spécifiques. Pendant l'éclipse totale de soleil du 11 août 1999, METEOSAT-6 observa la trace au sol de l'ombre de la lune à la fréquence d'une image toutes les 10 minutes. Dans le cas de METEOSAT Seconde Génération, une nouvelle image est disponible toutes les 15 minutes. L'acquisition de l'image se déroule en 12 minutes, et 3 minutes sont nécessaires pour ramener le satellite à son inclinaison originale et pour le stabiliser.

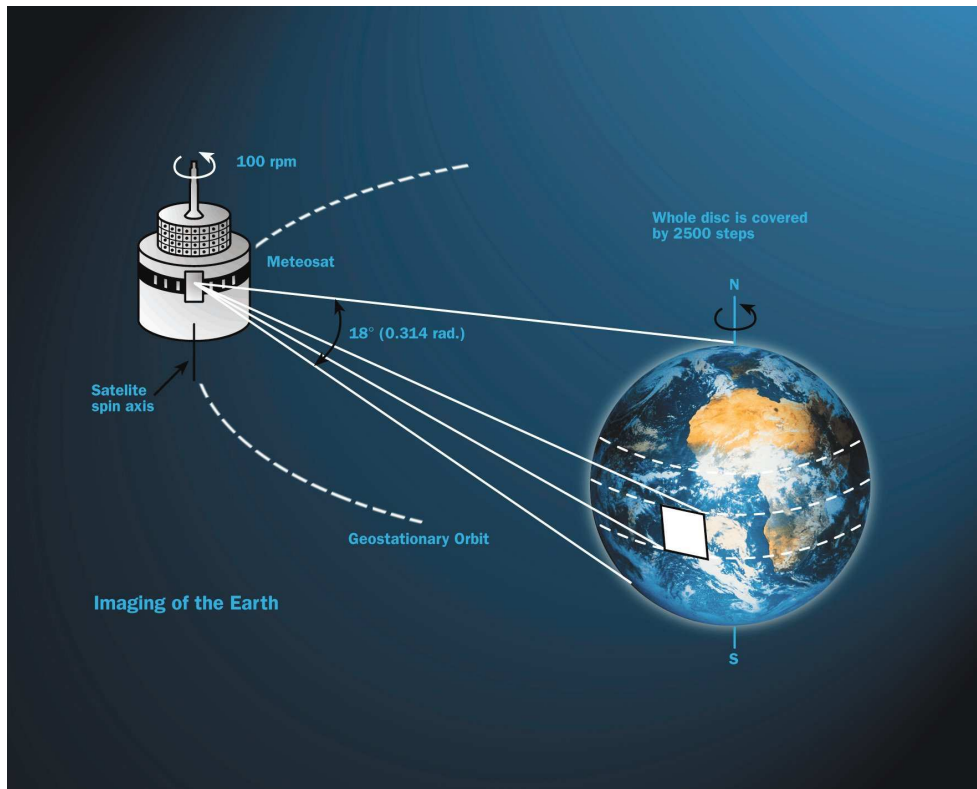


FIGURE A.3 – Schéma descriptif de l'acquisition des images METEOSAT.

A.1.3 Exploitation des données METEOSAT

Les manipulations préalables à l'exploitation des mesures METEOSAT sont de deux ordres :

- la navigation des images
- l'étalonnage du radiomètre

A.1.3.1 Navigation des images

La navigation des images obtenues par le satellite consiste à associer à chaque pixel sa position géographique sur le globe. Cette opération est réalisée par l'agence EUMETSAT à l'aide de modèles mathématiques prenant en compte les déformations des images (les écarts à une image de référence dus aux mouvements du satellite). Cette procédure permet d'appliquer des règles simples pour convertir les coordonnées des images de l'espace ligne-colonne vers des coordonnées géophysiques (longitude-latitude) valables pour chaque image.

A.1.3.2 La calibration opérationnelle

La calibration d'un système de détection est une opération cruciale afin d'exploiter les mesures effectuées. Etalonner un radiomètre revient à associer chacun des comptes numériques mesurés à

la radiance de la scène observée par le radiomètre. Jusqu'en mai 2000, l'étalonnage reposait sur des méthodes statistiques utilisant des mesures in situ de la température et de l'humidité à la surface de la Terre et dans l'atmosphère. Ces mesures sont ensuite utilisées pour simuler les radiances observées dans les 3 canaux de METEOSAT première génération à partir de modèles de transfert radiatifs. Les radiances ainsi simulées sont ensuite comparées aux valeurs des comptes numériques mesurés par METEOSAT afin de calculer des coefficients d'étalonnage. Pour le canal IR, les coefficients sont déduits d'observations de la mer en ciel clair colocalisées avec des mesures de la température de surface de la mer fournies par le NCEP (National Center for Environmental Prediction). Depuis mai 2000, la calibration opérationnelle des canaux IR et WV, est basée sur l'observation de deux corps noirs connus séquentiellement par le radiomètre. Les comptes numériques IR et WV observés pour ces deux corps noirs sont reliés aux radiances connues de ces deux corps noirs, permettant alors de retrouver les coefficients de régression de la droite reliant les comptes numériques aux radiances. Les radiances mesurées par le radiomètre sont calculées à partir des coefficients d'étalonnage et des comptes numériques en utilisant la relation :

$$R = \alpha(C_{nt} - C_0)$$

où R désigne la radiance, α le coefficient d'étalonnage, C_{nt} le compte numérique mesuré par le capteur, et C_0 le compte numérique de l'espace. Pour transformer les radiances estimées à partir des comptes numériques mesurés dans les canaux IR et WV en température de brillance, il est nécessaire de tenir compte de la fonction de filtre du système de mesure du radiomètre. Cette fonction de filtre, représentant la fonction spectrale du radiomètre, peut être décomposée en deux parties : le filtre correspondant au système optique qui est constant et le filtre du détecteur qui varie avec la température. Ainsi, les filtres obtenus correspondent à la convolution de l'ensemble de la sensibilité de l'instrument. Les luminances pénétrant le système sont modifiées par le filtre propre à cette partie de l'instrument. Les luminances arrivent ensuite sur le détecteur et sont de nouveau filtrées (par la réponse du détecteur) et converties en tension. L'ensemble du système ne relie donc pas des températures (ou des luminances émises par un corps) aux luminances arrivant sur le détecteur, mais à des tensions générées par le détecteur. Les conversions luminances-températures de brillances sont effectuées selon l'équation :

$$R = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B(\nu, Tb) \Phi(\nu) d\nu$$

où $\Phi(\nu)$ est le filtre de l'ensemble du système de mesure et représente la réponse spectrale du radiomètre à la fréquence ν , $B(\nu, Tb)$ correspond à la fonction de planck et Tb la température de brillance. En pratique, les températures de brillance sont calculées à partir des radiances en utilisant des tables de conversion fournies par EUMETSAT. Pour faciliter l'utilisation de ces tables de conversion, on utilise un ajustement exponentiel des valeurs de ces tables :

$$R(T) = \exp(a + \frac{b}{Tb})$$

où R désigne la radiance en $W.m^{-2}.sr^{-1}$, Tb la température de brillance en Kelvin, et a (sans dimensions) et b (en kelvin) les coefficients de régression. Les températures de brillance IR et WV peuvent alors être calculées en utilisant la relation :

$$Tb = \frac{b}{\ln(\alpha(C_{nt} - C_0)) - a}$$

A.2 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Le satellite TRMM (Simpson et al. [1996]) constitue la première mission spatiale dédiée à la mesure des précipitations dans les tropiques et les sub-tropiques. C'est une mission conjointe de l'agence américaine NASA (National Aeronautics and Space Administration) et de l'agence Japonaise NASDA (National Space Development Agency of Japan) maintenant appelés JAXA (Japan Aerospace and Exploration Agency), dont les objectifs sont de mesurer les précipitations ainsi que les échanges d'énergie (chaleur latente) dans les régions tropicales. Le satellite a été lancé le 27 novembre 1997 pour une durée prévue de trois ans. En août 2001, l'altitude du satellite a été augmentée de 350 à 403 km afin de prolonger sa durée de vie de quelques années. En 2010, le satellite était toujours en activité.

A.2.1 Les instruments

Le satellite TRMM embarque cinq instruments, dont trois sont dédiés spécifiquement à l'observation et l'estimation des précipitations :

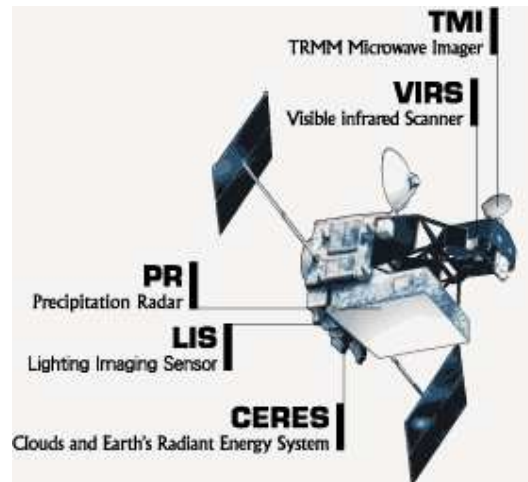


FIGURE A.4 – Le satellite TRMM et ses instruments.

- Le scanner VIRS (Visible and Infrared Scanner). Il s'agit d'un radiomètre Visible-Infrarouge comportant 5 canaux aux longueurs d'ondes $0,63 \mu\text{m}$, $1,6 \mu\text{m}$, $3,75 \mu\text{m}$, $10,8 \mu\text{m}$ et $12 \mu\text{m}$.
- L'instrument TMI (TRMM Microwave Imager) est un radiomètre micro-ondes multi-fréquences comportant 8 canaux polarisés horizontalement et verticalement aux fréquences 10,7 GHz, 19,3 GHz, 37 GHz et 85,5 GHz, et un canal à 21,3 GHz polarisé verticalement.
- Le radar PR (Precipitation Radar). Il s'agit d'un radar fonctionnant à une fréquence de 13,8 GHz et permettant la mesure des profils verticaux de pluie.

- L'instrument CERES (Cloud and Earth's Radiant Energy System) est un radiomètre VIS-IR bandes larges dédié à l'étude du bilan radiatif (Wielicki et al. [1996]). Il comporte trois capteurs radiométriques qui mesurant le rayonnement solaire réfléchi par la Terre dans l'intervalle $0,3 - 0,5 \mu\text{m}$, le rayonnement réfléchi et émis par la Terre dans l'intervalle $0,3 - 100 \mu\text{m}$, et le rayonnement ondes longues émis par la Terre dans l'intervalle $8 - 12 \mu\text{m}$ avec une résolution spatiale de 10 km au nadir. Couplées aux estimations de la chaleur latente dérivées des estimations des précipitations, les estimations du bilan radiatif obtenues à partir des mesures CERES permettent de décrire l'ensemble du bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre. L'instrument n'a fonctionné cependant que pendant les mois de janvier à août 1998 et pendant le mois de mars 2000.
- Le LIS (Lightning Imaging Sensor) est un imageur dédié à l'observation des éclairs (Goodman et al. [1996])

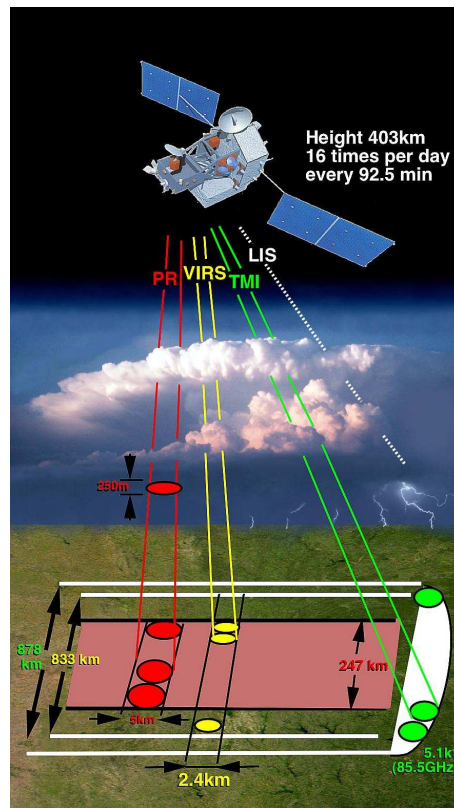


FIGURE A.5 – Vue schématique des géométries de balayage des instruments TMI, VIRS et PR de TRMM (d'après Kummerow et al. [1998]).

A.2.1.1 Visible and Infrared Scanner : VIRS

Le scanner VIRS est un radiomètre VIS-IR observant dans cinq canaux à des longueurs d'onde comprises entre $0,6 \mu\text{m}$ et $12 \mu\text{m}$. Le but de ce radiomètre est de permettre l'estimation des précipitations à partir des méthodes IR et VIS. Les données du VIRS constituent en plus un lien entre les estimations des précipitations obtenues à partir des données micro-ondes de TRMM et

les observations IR et VIS des satellites géostationnaires. Le VIRS est un instrument similaire aux AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) en opération depuis 1978 sur les satellites polaires de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Le balayage du VIRS est de type 'cross-track', c'est à dire qu'il balaye chaque ligne observée perpendiculairement à la direction du déplacement du satellite. La largeur de la fauchée résultant de l'altitude de 350 km et du balayage à 45 ° est de 720 km. Chaque ligne ou scan est constitué de 261 pixels. Au nadir, la résolution des pixels est de 2,11 km et passe à 3,02 km aux extrémités du scan. Les lignes balayées sont continues au nadir, ce qui induit un recouvrement d'environ 0,9 km entre chaque ligne aux extrémités du scan. L'étalonnage des comptes numériques permettant de déterminer les radiances à partir des signaux électriques mesurés et numérisés par les capteurs du VIRS est semblable à l'étalonnage des canaux IR et WV de METEOSAT mis en place depuis 2001. Pour les canaux mesurant le rayonnement solaire réfléchi (0,63 μm et 1,6 μm), les coefficients d'étalonnage des comptes numériques ont été déterminés en laboratoire avant le lancement du satellite. Ces coefficients sont contrôlés régulièrement en utilisant un diffuseur à bord du satellite permettant d'observer le soleil (Lyu et al. [2000]). Pour les canaux dans l'infrarouge thermique (3,75 μm , 10,8 μm et 12 μm), l'étalonnage des comptes numériques est réalisé en utilisant un corps noir de température connue embarqué sur le satellite (Barnes et al. [2000]). Pour les cinq canaux, des observations de l'espace permettent de définir le zéro de référence.

A.2.1.2 Precipitation Radar : PR

Le radar de précipitations est le premier radar pour la mesure des précipitations embarqué à bord d'un satellite. Les principaux objectifs associés à cet instrument sont : de fournir des observations de la structure tri-dimensionnelle des précipitations et plus particulièrement leur distribution verticale. D'obtenir des mesures quantitatives des précipitations aussi bien au dessus des continents que des océans. D'améliorer les estimations des précipitations en combinant les mesures des instruments micro-ondes passifs et actifs. Le PR fonctionne à une fréquence de 13,8 GHz, à une bande d'absorption du rayonnement par les gouttes d'eau liquide. L'antenne du radar balaye dans une direction perpendiculaire au déplacement du satellite avec un angle de $\pm 17^\circ$ de part et d'autre du point sub-satellite, induisant ainsi une fauchée de 220 km. La largeur du faisceau radar est de 0,71 °, et chaque scan est constitué à partir de 49 intervalles angulaires d'observation. Il en résulte une résolution spatiale au sol de 4,3 km au nadir et d'environ 5 km en bord de scan. La distance entre deux portes radar est de 250 m et correspond à la résolution verticale des mesures radar. L'échantillonnage des échos radar est réalisé entre surface et une altitude de 15 km pour chacun des 49 angles d'observation. Ces échos radar consistent en trois composantes : les échos de pluie les échos de sol correspondent à la partie du signal réfléchi par le sol. Cet écho est mesuré afin de mesurer l'atténuation du signal radar et pour obtenir la distance de la surface dans le faisceau radar. les échos des images miroirs correspondent à l'écho de pluie reçu après une double réflexion à la surface lorsque le radar vise au nadir. De plus, au nadir, les données sont sur-échantillonnées (intervalles de 125 m) dans le but d'améliorer la restitution des profils des échos possédant une grande variabilité spatiale (échos de sol et bande brillante).

Pour chaque angle de visée, des mesures indépendantes du niveau de bruit du radar sont réalisées afin d'estimer le rapport entre le signal utile et le bruit contenu dans le signal. Le rapport signal sur bruit est alors de 4 dB pour les taux de pluie de 0,7 mm/h. Cette valeur des taux de pluie correspond à la sensibilité minimum du radar. En dessous de cette valeur, il n'est pas possible d'estimer les taux de pluie à partir des mesures du radar.

A.2.2 TRMM Microwave Imager : TMI

L'instrument TMI est un radiomètre mesurant le rayonnement micro-ondes émis par la Terre et l'atmosphère dans 9 canaux, trois paires de canaux de 10,65 GHz, 19,35 GHz, 21,3 GHz, 37 GHz, 85,5 GHz polarisés horizontalement et verticalement. L'antenne du radiomètre TMI, d'un diamètre de 50,8 cm vise la surface suivant un angle de 49° par rapport à un axe parallèle à la direction du nadir, formant un angle d'incidence entre le faisceau de l'antenne et la surface de 52,8°. L'antenne tourne autour de son axe à une vitesse constante de 31,6 tours par minute, observant ainsi un cercle sur la surface terrestre.

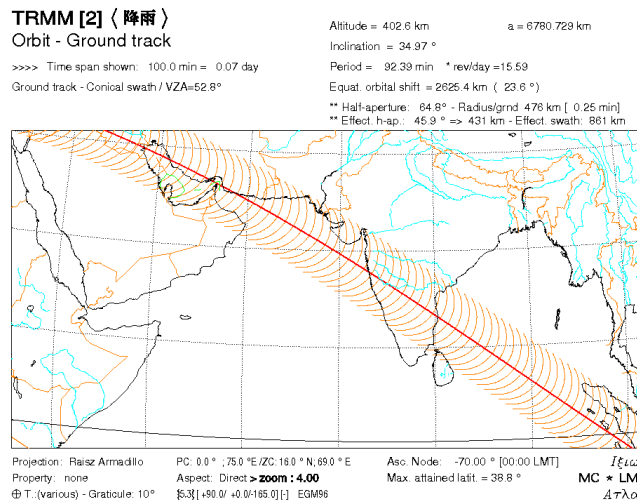


FIGURE A.6 – *Orbite du satellite TRMM et représentation des fauchées coniques de l'instrument TMI. La trace rouge représente le Nadir. Source : M.Capderou*

Les observations du radiomètre TMI se limitent dans ce cercle au secteur de 130° situé à l'avant du satellite. Compte tenu de l'altitude du satellite, le secteur de 130° correspond à une fauchée effective de 861 km au sol. Pendant chaque révolution de l'antenne, le point sub-satellite avance d'une distance de 13,9 km. Le mode de balayage conique utilisé permet d'une part de garder une résolution spatiale constante des pixels observés dans chaque canal le long d'un scan, et d'autre part de considérer toujours la même direction d'observation, et donc le même angle d'incidence par rapport aux polarisations verticale et horizontale quelque soit le pixel considéré dans chaque scan (figure A.6).

Fréquence (GHz)	EFOV (CTxAT) (km ²)
10,65	9,1x63,2
19,35	9,1x30,4
21,30	9,1x22,6
37,00	9,1x16,0
85,50	4,6x7,2

TABLEAU A.1 – *Résolution spatiale des différents canaux du radiomètre TMI. Les EFOV correspondent aux traces au sol effectivement échantillonnées. Les résolutions correspondent aux longueurs des axes des ellipses observées au sol dans la direction de déplacement du satellite (AT) et perpendiculairement (CT)*

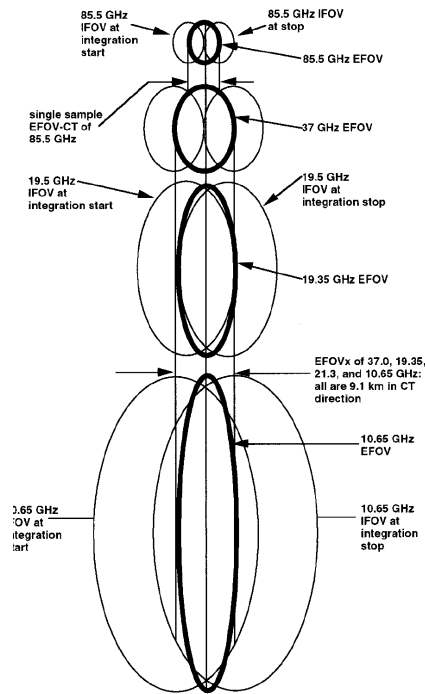


FIGURE A.7 – *Caractéristiques des traces au sol du radiomètre TMI (d'après Kummerow et al. [1998]).*

Les données fournies par le TMI correspondent aux mesures instantanées intégrées sur 6,6 ms pour les canaux de 10,65 GHz à 37 GHz et 3,3 ms pour le canal à 85 GHz. Le champ de vue effectif (EFOV : Effective Field Of View) correspond à la trace au sol effective résultant de cette intégration. Les temps d'intégration de 6,6 ms et 3,3 ms correspondent respectivement aux laps de temps nécessaires pour que les faisceaux des canaux à 37 GHz et 85,5 GHz avance d'un IFOV le long d'un scan. Chaque ligne du scan du radiomètre TMI est constitué de 104 pixels pour les canaux basses fréquences et de 208 pixels pour le canal à 85 GHz. Le déplacement du satellite étant très faible pendant les temps d'intégration, la longueur du grand axe des EFOV est à peu près la même que celle des IFOV. Les résolutions spatiales des données de températures de brillance observées dans ces EFOV sont présentées dans le tableau A.1. Compte tenu de la distance de 13,9 km entre deux scans, les pixels entre deux scans consécutifs observés dans les

basses fréquences se recouvrent, alors que les bords de pixels correspondant au canal 85 GHz sont séparés de 7 km.

A.2.3 L'orbitographie de TRMM

Dix ans avant le lancement de TRMM, était lancé le premier radiomètre SSM/I. Ces micro-ondes embarqués sur les satellites DMSP suivent une orbite héliosynchrone, c'est à dire que chacun des points du globe est observé par ce type de satellite à la même heure locale à chaque revisite. Ce type d'orbite est alors problématique pour l'observation du cycle diurne des systèmes convectifs et des précipitations dans les tropiques. De plus, la pluie est une variable atmosphérique difficile à mesurer du fait, en particulier, de sa concentration dans quelques nuages. Les précipitations montrent ainsi de fortes fluctuations dans l'espace et dans le temps. Afin de prendre en compte cette problématique, l'orbite de TRMM a été fixée dans un premier temps à 350 km puis à 403 km d'altitude suivant une orbite inclinée de 35 degrés par rapport à l'équateur de manière à observer un point donné situé entre la latitude 38°S et 38°N plusieurs fois par jour et à différentes heures locales en tenant compte des fauchées des différents instruments. Un point donné de la ceinture sub-tropicale est revu à la même heure avec une période de 46 jours. Cette période est appelée Précession.

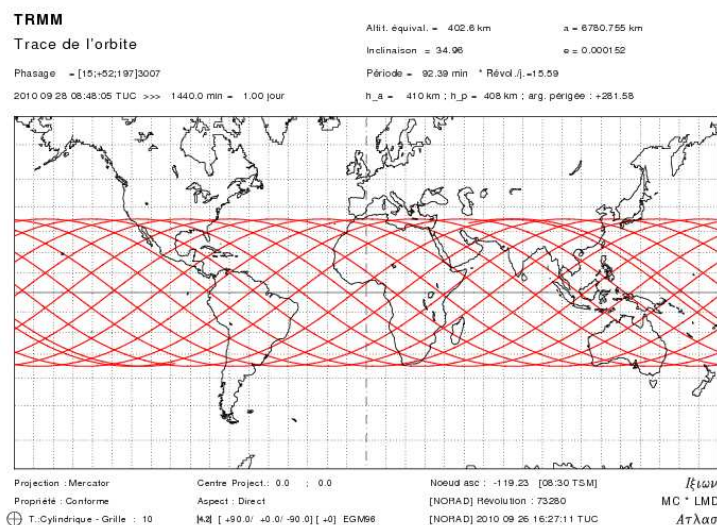


FIGURE A.8 – Représentation de la trace de l'orbite de TRMM sur 1 jour. Source : M.Capderou.

La période de révolution du satellite autour de la Terre est de 91 minutes. Le choix de l'altitude constitue un compromis entre les résolutions des observations micro-ondes actives et passives et la largeur de la fauchée des observations micro-ondes passives. En effet, pour obtenir une résolution spatiale des données du radar micro-ondes comparable à celle des radars-sols (2 km), il est nécessaire que le satellite soit suffisamment bas. Cependant, plus l'altitude du satellite est basse,

plus la fauchée du radiomètre micro-ondes est étroite. L'altitude de 350 km permet d'obtenir une résolution des données du radar de l'ordre de 4 km au nadir, tout en gardant une fauchée assez large (760 km) pour obtenir une couverture d'observation spatiale suffisante.

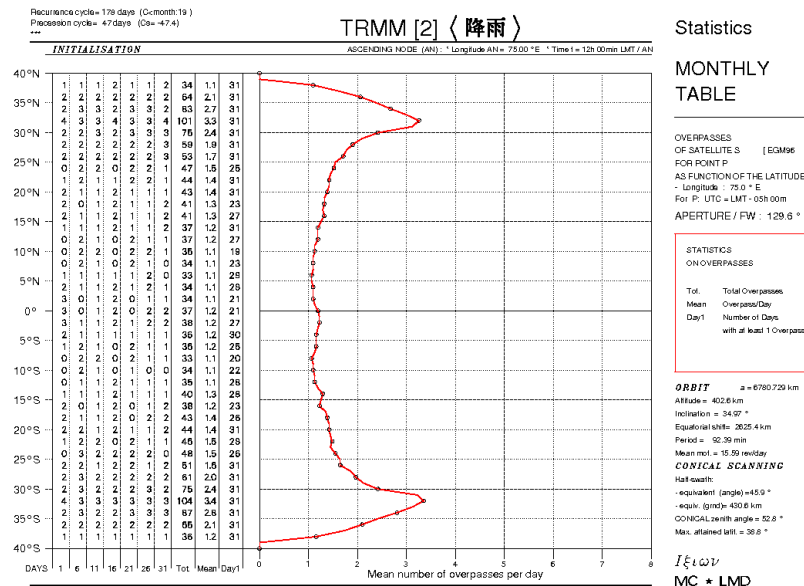


FIGURE A.9 – Tableau du nombre moyen de passages journaliers du satellite TRMM pour un point à des latitudes variant entre 40°S et 40 °N en prenant en compte la fauchée de l'instrument TMI.

Le graphique A.9 présente le nombre moyen de passages journaliers du satellite TRMM pour un point à des latitudes variant entre 40°S et 40 °N. L'axe des abscisses illustre le nombre moyen de passage par jour alors que l'axe des ordonnées correspond aux latitudes entre 40°S et 40°N. Ce graphique montre que les latitudes les plus fréquemment observées par l'instrument TMI sont aux environs de 32°N et 32°S. avec 3,2 passages en moyenne par jour. A l'équateur, le satellite ne passera que ~1 fois par jour en moyenne.

A.3 Les produits TRMM

Différents produits sont fournis par le TSDIS (TRMM Science Data and Information System) à partir des données des instruments de TRMM. La dénomination de ces produits suit la nomenclature adoptée par la NASA. Les produits de niveau 1 correspondent à des produits orbitaux des mesures spectrales des radiomètres VIRS et TMI et du radar PR. Les produits de niveau 2 sont également des produits orbitaux et comprennent les estimations des paramètres géophysiques instantanées à la résolution des instruments. Les produits de niveau 3 constituent les moyennes spatiales et/ou temporelles des paramètres géophysiques. Les produits de niveau 4 sont des résultats d'analyses et de modèles.

Le niveau auquel appartient un produit est indiqué par le premier chiffre dans son nom. La lettre suivant le numéro indique les données brutes des instruments spectraux navigués. Les produits de niveau 1A correspondent aux comptes numériques non corrigés des erreurs de navigation alors que les données 1B consistent en des mesures spectrales calibrées et naviguées. Pour les produits de niveau 2 et 3, les lettres A et B indiquent si le produit est un produit respectivement mono-source ou combiné. Enfin chaque instrument est associé à un numéro, correspondant au premier chiffre après la lettre dans le nom des produits et permettant d'identifier le type de données utilisées dans chacun des produits. Le chiffre 0 correspond au radiomètre VIRS, le numéro 1 au radiomètre TMI, le numéro 2 au PR, le numéro 3 à la combinaison des données du TMI et du PR, et le numéro 4 à la combinaison des données TRMM avec des sources externes.

Dans le cadre de cette thèse, seul le produit 2A12 d'estimation des pluies de surface à partir de TMI sera présenté. Pour une description de l'ensemble des algorithmes ou produits de TRMM, on pourra se référer à Simpson et al. [1996] et TSDIS [2000].

A.3.1 Le produit 2A12

Le produit 2A12 est un produit d'estimation des taux de pluie instantanées obtenus avec le radiomètre TMI. Pour chaque pixel TMI, les taux de pluie de surface ainsi que les profils verticaux des hydrométéores sont calculés à la résolution spatiale des pixels du canal 37 GHz (16 km x 9 km) pour une fauchée de 760 km. Les profils sont stratifiés sur 14 couches d'atmosphère : 8 couches de 500 m de la surface à 4 km, deux couches de 1 km d'épaisseur, puis deux couches de 2 km d'épaisseur et enfin deux couches de 4 km d'épaisseur. Pour chacune des couches, différents paramètres sont calculés :

- les contenus en eau liquide nuageuse,
- les contenus en eau liquide précipitante,
- les contenus en glace nuageuse,
- les contenus en glace précipitante.

En plus de ces données, le produit 2A12 caractérise le type de pluie observée, qu'elle soit convective ou stratiforme (Hong et al. [1999]), ainsi que les profils de chaleur latente estimés en utilisant la technique décrite par Olson et al. [1999]. Le produit 2A12 est construit à partir de l'algorithme de restitution des profils du Goddard (GPROF) développé par Kummerow et al. [1996]. Pour l'estimation des précipitations au dessus de l'océan, l'ensemble des canaux du TMI sont utilisés. Plusieurs modifications ont été apportées au produit 2A12. Une des principales modifications apportée à l'algorithme GPROF entre la version 4 et la version 5 concerne l'estimation des pluies au dessus des continents. Dans la version 4, la méthode d'inversion utilisait uniquement les températures de brillance du canal à 85 GHz polarisé horizontalement pour rechercher dans une base de données le profil le plus proche des observations. Dans la version 5 du produit 2A12, la méthode d'inversion GPROF est combinée à l'algorithme opérationnel du NESDIS (National Environment Data and Information Service) fondé sur une méthode de 'Scattering Index'. Cette méthode

utilise une combinaison linéaire des températures de brillance des canaux à 19 GHz, 21 GHz, et 85 GHz polarisés verticalement pour estimer les précipitations au dessus des continents à partir d'une relation empirique.

A.4 Megha-Tropiques

A.4.1 Historique

Les moyens d'observation conventionnels de l'atmosphère tropicale sont déficients : forte proportion d'océans, continents souvent mal couverts par les réseaux météorologiques. C'est pourquoi l'observation spatiale y est d'un apport plus important que dans les régions de plus hautes latitudes, d'autant que les processus diabatiques liés au cycle de l'eau dominant et sont caractérisés par une haute variabilité spatio-temporelle. L'observation des éléments du cycle de l'eau tropical a progressé, surtout grâce à l'emploi d'instruments de télédétection passive en micro-ondes (hyperfréquences), qui permettent d'accéder plus ou moins directement, non seulement à la vapeur d'eau, mais au contenu des nuages en eau et en précipitation. Ces instruments ne sont cependant utilisables qu'en orbite basse, et ont été placés le plus souvent en orbite polaire. La seule exception est le satellite nippo-américain TRMM (cf. paragraphe précédent) qui emporte également un radar destiné à la mesure des précipitations et dont l'orbite est inclinée de 35° sur l'équateur (Simpson et al. [1996], Kummerow et al. [2000]). Mais son altitude très basse (350 km) limite la fauchée de ses instruments et ne lui permet pas d'obtenir une répétitivité suffisante des mesures en régions tropicales. Généralement, compte tenu de la forte variabilité temporelle des précipitations, mais aussi de la vapeur d'eau associée aux systèmes tropicaux, la fréquence d'observation obtenue à partir des satellites d'orbite basse existants (au mieux deux fois par jour par satellite) est insuffisante. Seuls les satellites géostationnaires ont une vision continue des tropiques, mais leurs instruments fonctionnant dans le visible et l'infrarouge ne permettent de décrire que certaines propriétés de la surface des nuages ou de la répartition horizontale de la vapeur d'eau. Leur apport n'en demeure pas moins fondamental pour compléter l'échantillonnage temporel de tous les satellites à orbite basses. Ces considérations importantes conduisirent à la naissance de la mission satellitaire franco-indienne Megha-Tropiques (Megha signifie Nuage en Sanskrit), dans l'objectif d'étudier le bilan d'eau et d'énergie dans les tropiques, en mesurant avec une bonne répétitivité les observables liés aux flux radiatifs, à la vapeur d'eau et aux précipitations. L'originalité de la mission vient de l'association instrumentale et de son orbite faiblement inclinée sur l'équateur permettant une haute répétitivité des mesures.

A.4.2 Les instruments

La charge utile comprend trois instruments : un imageur hyperfréquences pour les nuages et la pluie (Madras), un sondeur hyperfréquences de vapeur d'eau (Saphir) et un instrument à bandes larges destiné à la mesure des flux radiatifs (ScaRaB) (figure A.10).

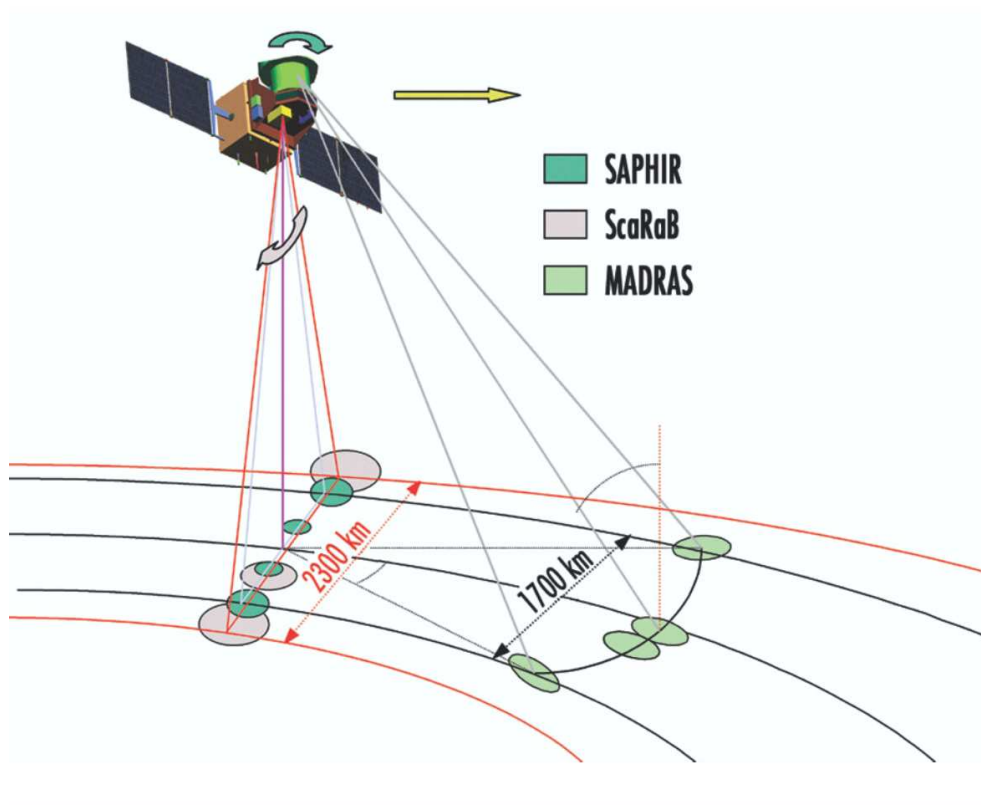


FIGURE A.10 – Configuration générale des fauchées des trois instruments de Megha-Tropiques. La dimension des pixels est agrandie pour montrer leur orientation et leur déformation.

A.4.2.1 Madras

La mesure des précipitations et des propriétés nuageuses est l'objectif principal de l'imageur passif hyperfréquence Madras. Il s'agit d'un radiomètre mesurant le rayonnement micro-ondes émis par la terre et l'atmosphère dans 9 canaux. Ses fréquences les plus élevées (89 et 157 GHz) sont sensibles à la diffusion par les particules de glace du sommet des nuages, fournissant une localisation des zones de pluie convective, sur terre comme sur mer. Des canaux à plus basse fréquence sont exploitables au-dessus de l'océan : mesure de l'eau liquide et des précipitations en utilisant l'absorption à 18 et 37 GHz, mesure de la vapeur d'eau intégrée à 23 GHz, estimation du vent de surface de la mer à 18 GHz. Les caractéristiques des canaux de Madras sont données dans le tableau A.1.

La résolution spatiale des canaux de Madras est d'autant meilleure que la fréquence est élevée. L'antenne du radiomètre, d'un diamètre effectif de 60 cm, est conçue pour fournir une résolution de 10 km à 89 GHz. Le balayage conique de Madras (figure A.11) permet d'une part de conserver la même résolution spatiale tout au long de la fauchée, d'autre part de mesurer deux composantes polarisées du rayonnement mesuré (verticale et horizontale). La surface est visée suivant un angle

de 65° et l'angle dans la direction du nadir est constant $f = 45,05^\circ$, permettant ainsi à l'angle de vue zénithal d'être constant, $53,5^\circ$. La fauchée de Madras résultante de Madras est de 1740 km (figure A.11).

Megha-Tropiques / MADRAS Orbit - Ground track

Recurrence = [14; -1; 7] 97

>>> Time span shown: 100.0 min = 0.07 day

Ground track - Conical swath / VZA=53.1°

Altitude = 865.5 km

a = 7243.678 km

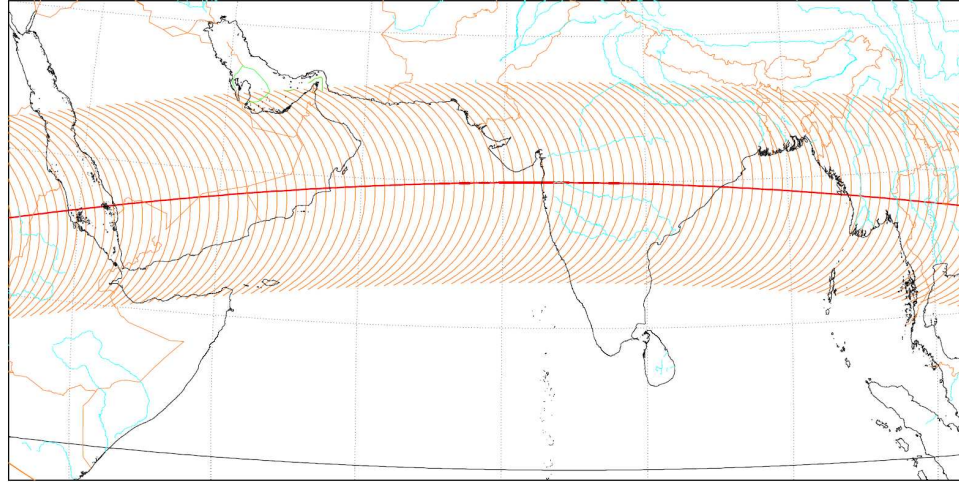
Inclination = 20.00°

Period = 101.93 min * rev/day = 14.13

Equat. orbital shift = 2892.0 km (26.0°)

** Half-aperture: 65.0° - Radius/grnd 928 km [0.25 min]

** Effect. h-ap.: 42.3° => 841 km - Effect. swath: 1682 km



Projection: Raisz Armadillo

MC: 0.0° ; 75.0° E / ZC: 16.0° N; 69.0° E

Asc. node: -10.00° [00:00 LMT]

Ιξίωv

Property: none

Aspect: Direct > zoom : 4.00

App. inclin. = 21.52°

MC ★ LMD

⊕ T.: (various) - Graticule: 10°

{6.4} [+90.0/ +0.0/-165.0] [-] GEM-T2

Max. attained latit. = 27.6°

Ατλας

FIGURE A.11 – Trace de l'orbite du satellite Megha-Tropiques et représentation des fauchées coniques de l'instrument Madras. La trace rouge représente le Nadir.
Source : M.Capderou.

La résolution des canaux est résumée dans le tableau A.2. Ce type d'instrument, à l'exception du canal 157 GHz existe déjà sur des satellites possédant des orbites non adaptées (SSM/I sur DMSP, TMI sur TRMM, AMSRE-E sur Aqua).

Numéro du canal	fréquence centrale	Largeur de bande	Polarisation	Résolution spatiale (km)
M1	± 100	18,7 GHz	H+V	40±10%
M2	± 200	23,8 GHz	V	40±10%
M3	± 500	36,5 GHz	H+V	40±10%
M4	± 1350	89 GHz	H+V	10±10%
M5	± 1350	157 GHz	H+V	6±10%

TABLEAU A.2 – Polarisation et résolution spatiale des différents canaux de Madras.

A.4.2.2 Scarab

L'instrument de mesure des flux radiatifs sortant au sommet de l'atmosphère, en ondes longues et en ondes courtes, est un dérivée de l'instrument Scarab, conçu et réalisé par le CNES et le CNRS/LMD

, qui a volé sur deux précédents satellites d'orbite polaire (Meteor et Resurs). La figure A.17 est un exemple des restitutions des flux par Scarab/Resurs.

La résolution au sol, compte tenu de l'orbite choisie par Megha-Tropiques est de 40 km au nadir. Elle se dégrade considérablement (de l'ordre de 100 km) aux extrémités de la fauchée, qui a été volontairement choisie le plus large possible (2200 km). La fauchée de l'instrument est orthogonale et est définie par $f = 48,91^\circ$, correspondant à l'angle de demi-fauchée. Une fauchée orthogonale est quasiment perpendiculaire à la trace au sol du satellite (figure A.12).

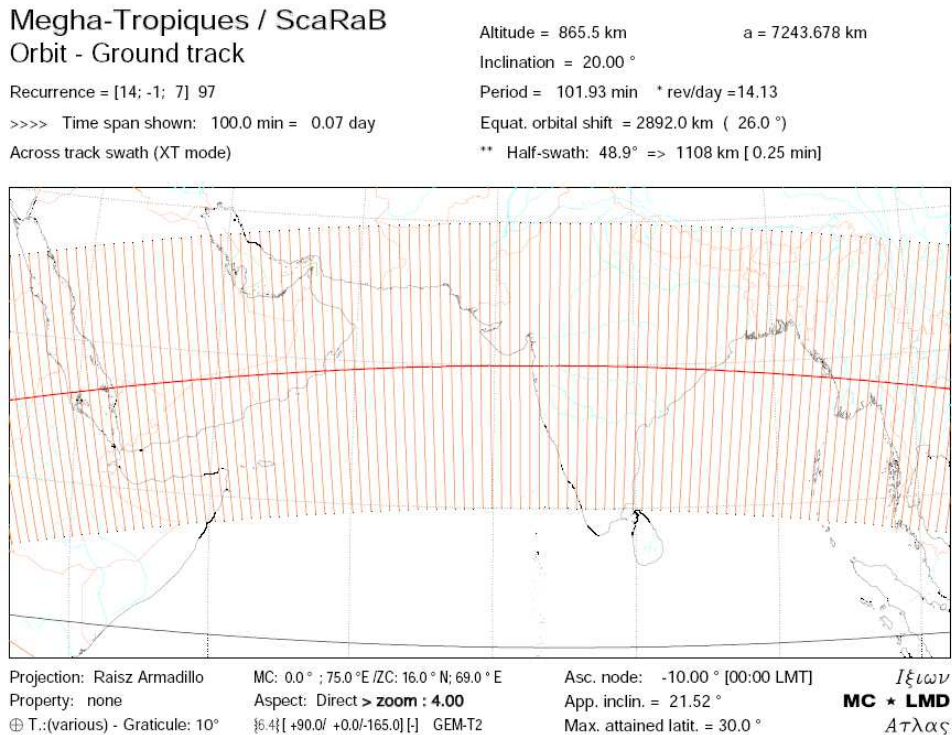


FIGURE A.12 – Trace de l'orbite du satellite Megha-Tropiques et représentation des fauchées orthogonales de l'instrument Scarab. La trace rouge représente le Nadir.
Source : M.Capderou.

Pour chaque pixel, l'angle de vue zénithal varie de 0° à une valeur extrême de $58,9^\circ$ pour Scarab. L'instrument mesure le rayonnement reçu dans quatre canaux (cf tableau A.3). La résolution au sol, compte tenu de l'altitude de l'orbite choisie pour Megha-Tropiques, est de 40 km au nadir. Elle se dégrade considérablement aux extrémités de la fauchée. Les deux canaux principaux de Scarab sont les canaux 2 et 3. Dans la version Megha-Tropiques de l'instrument, ils pourront être intervertis par l'intermédiaire d'une roue à filtres qui permet de placer un filtre en silice sur l'un d'eux et de laisser l'autre non filtré. Cette roue à filtres est également utilisée pour les procédures d'étalonnage en vol. Les mesures ondes longues, c'est-à-dire dans l'intervalle $4-200 \mu\text{m}$ sont obtenues, de jour, par différence du canal total (non filtré) et du canal solaire (filtré), moyennant des corrections relatives à la réponse spectrale des canaux. Techniquement, cet instrument est complexe du point de vue mécanique : les canaux, constitués de petits télescopes focalisant le rayonnement reçu sur des détecteurs pyroélectriques, doivent être parfaitement alignés, car le traitement fait appel à une

différence de deux canaux. La rotation de l'ensemble de la tête optique de l'instrument produit le balayage lignes. D'autres mécanismes résident dans cette tête optique : les hacheurs de faisceau et la roue à filtres. Tous les dispositifs de la tête optiques ont reliés électriquement à la partie fixe de l'appareil par des contacts tournants. Les étalonnages au sol et en vol doivent être particulièrement soignés et suivis régulièrement. Des versions antérieures de Scarab ont déjà volé sur d'autres missions. Scarab a ainsi contribué, avec les programmes Erbe, Ceres, Gerb, à la surveillance du bilan radiatif de la Terre (Kandel et al. [1998], Duvel et al. [2001]).

Numéro du canal	Nom du canal	Longueurs d'ondes	Filtre utilisé
1	Visible	0,5 μm à 0,7 μm	Visible
2	Solaire (ondes courtes)	0,2 μm à 4 μm	Roue à filtres
3	Total	0,2 μm à 200 μm	Roue à filtres
4	Infrarouge	10,5 μm à 12,5 μm	IR

TABLEAU A.3 – Caractéristiques des différents canaux de Scarab.

A.4.2.3 Saphir

La mesure de la distribution de la vapeur d'eau atmosphérique se fait à l'aide d'un instrument sondeur d'humidité micro-onde à canaux passifs, Saphir, basé sur l'absorption dans des canaux étroits, proches d'une raie de la vapeur d'eau située à une fréquence de 183,31 GHz. Six canaux sont prévus afin d'obtenir des informations sur environ six couches d'atmosphère, du sol à 12 km d'altitude (figure A.13).

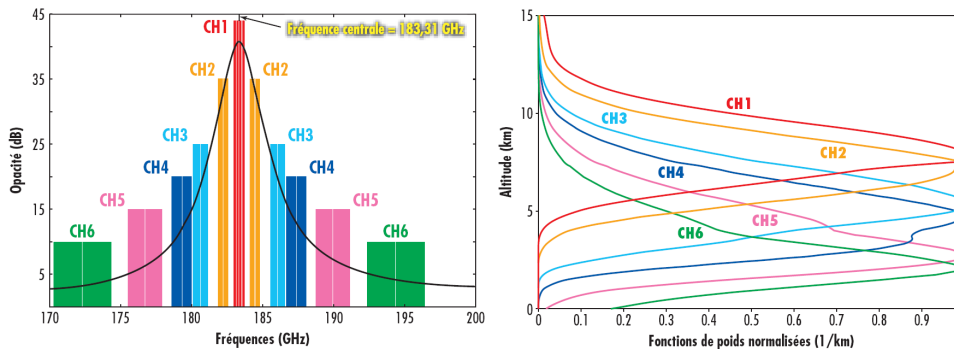


FIGURE A.13 – fréquences de Saphir.

Comme pour Scarab, la fauchée de Saphir est couverte par un balayage transverse mais possède un angle de demi-fauchée de $42,96^\circ$. La résolution horizontale est de 10 km au nadir, et de l'ordre de 14×22 km aux extrémités de la fauchée de 1700 km. Ce type d'instrument existe déjà en orbite polaire (AMSU-B puis MHS), mais avec seulement trois canaux autour de 183 GHz, plus adaptés aux régions tempérées.

A.4.3 L'échantillonnage

Une orbite de 870 km d'altitude, inclinée à 20° sur l'équateur permet d'obtenir plusieurs observations par jour (jusqu'à six) de chaque point de la zone intertropicale. La période de révolution du satellite est de 101.93 min et le satellite présente un cycle de précession de 51 jours.

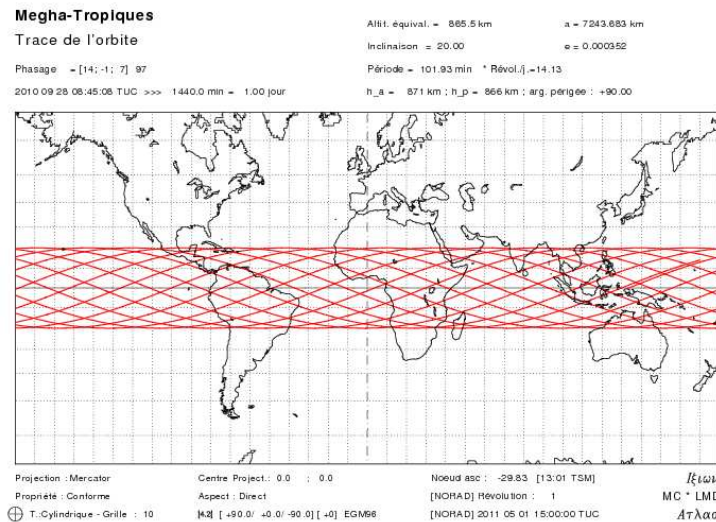


FIGURE A.14 – Représentation de la trace de l'orbite de Megha-Tropiques sur 1 jour.

Le tableau mensuel d'échantillonnage par l'instrument Madras pour un point P à une longitude et à une latitude données est présenté (figure A.15). L'axe des abscisses correspond aux heures locales de 0 à 24 h pour un jour donné. L'axe des ordonnées indique les jours de chaque mois notés de 1 à 31. Chaque passage du satellite et de l'instrument au dessus du point P est noté par un triangle pour le jour et à l'heure locale d'observation. Les informations sur les passages ascendants ou descendants du satellite ainsi que l'angle de vue pour lequel le point P a été observé sont également indiqués dans ce graphique. Par exemple, pour la figure A.15, le point P observé est à une latitude de 10°N. A cette latitude, ce point sera vue 4 fois par jours par l'instrument Madras : deux fois à des heures locales consécutives, puis il faut attendre 5 h pour que ce point soit de nouveau observé deux fois consécutivement par le satellite. Le décalage des heures locales d'observation du point P jour après jour est expliqué par le cycle de précession. Ce cycle de précession égale à 51 jours implique un décalage de 14 h 13 minutes chaque mois dans l'échantillonnage du point P.

Le graphique A.16 présente le nombre moyen de passages journaliers du satellite Megha-Tropiques pour un point à des latitudes variant entre 40°S et 40°N. L'axe des abscisses illustre le nombre moyen de passage par jours alors que l'axe des ordonnées correspond aux latitudes entre 40°S et 40°N. On peut voir clairement sur ce graphique que les latitudes les plus fréquemment observées par l'instrument Madras sont aux environs de 15°N et 15°S. avec 5,5 passages en moyenne par jour. A l'équateur, le satellite ne passera que 3,2 fois par jours en moyenne. Au-delà

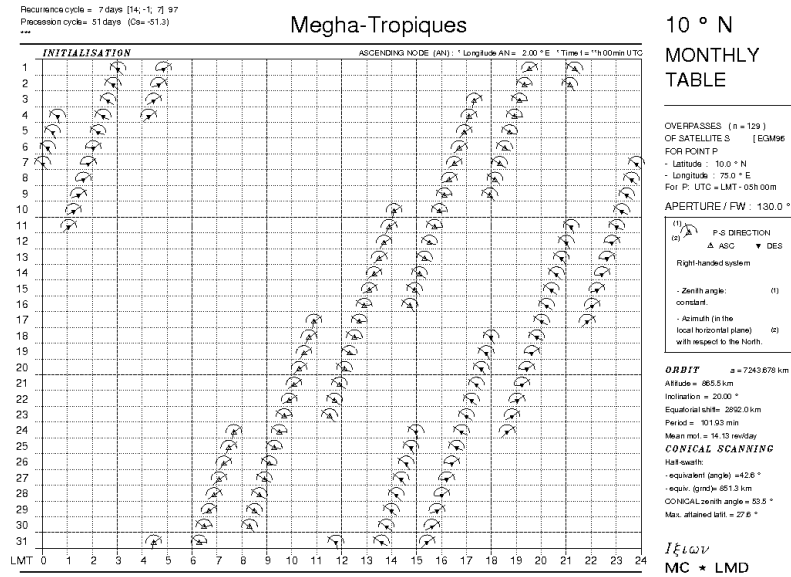


FIGURE A.15 – Tableau de l'échantillonnage mensuel de Madras pour un point situé à 10°N.

des latitudes 15°N et 15°S, le nombre moyen de passages par jour diminue jusqu'aux latitudes $\pm 30^\circ$ N.

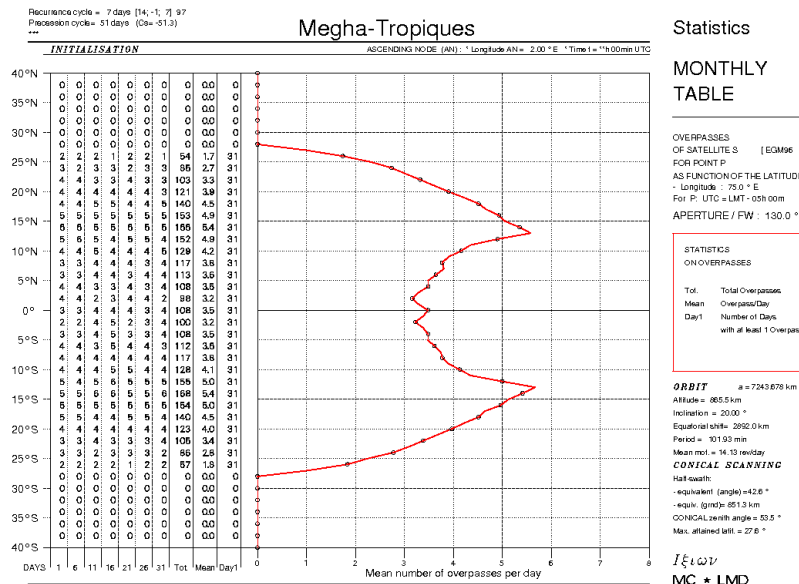


FIGURE A.16 – Tableau du nombre moyen de passages journaliers du satellite Megha-Tropiques pour un point à des latitudes variant entre 40°S et 40°N en prenant en compte la fauchée de l'instrument Madras.

A.5 Les produits Megha-Tropiques

A.5.1 Terminologie

Les données MT sont organisées en 4 chaînes de niveau 2 et 3 chaînes de niveau supérieurs 3/4 correspondant à plus de 30 produits géophysiques différents. Le niveau 2 consiste en des produits géophysiques instrument par instrument instantannés sous la trace. Les niveaux 3 et 4 consistent en des produits combinant les mesures de la plateforme MT avec les observations des géostationnaires. Cela découle à la fois de l'orbite de MT qui ne permet pas de faire des moyennes temporelles qui auraient du sens et des variables mesurées (pluie,...). Ainsi, le projet Megha-Tropiques ne possède pas de véritables niveaux 3 mais des niveaux 4. Dans la suite, on parlera donc de ces produits comme des produits de niveaux 3/4.

A.5.2 Produit de niveau 2 "ciel précipitant"

Les produits de niveau 2 en ciel précipitant issus de l'algorithme BRAIN permettent l'estimation des champs de précipitation mesurés à partir de l'instrument Madras. Les différents produits en sortie de BRAIN sont :

- pluie de surface
- profil de contenu en nuage liquide
- profil de contenu en nuage de glace
- profil de précipitations glacées
- profil de précipitations liquides

A.5.3 Produit de niveau 2 "ciel non précipitant"

La chaîne 'ciel non-précipitant' restitue, à partir des observations coïncidentes SAPHIR-MADRAS, principalement des profils d'humidité relative sur 6 couches (surface-902 hPa ; 902-725 hPa ; 725-543 hPa ; 543-377 hPa ; 377-208 hPa ; 208-20 hPa), avec les configurations terre/mer et ciel clair/ciel nuageux (non précipitant). D'autres produits sont estimés : le contenu intégré en vapeur d'eau (TCWV : total column water vapor), la température de surface continentale, la vitesse du vent océanique à 10 mètres, ainsi que les émissivités de surface (continentale) pour les différents canaux.

L'inversion des produits en ciel non précipitant est réalisée en utilisant des inversions par réseaux de neurones. L'inversion est différenciée selon la nature de la scène : clair ou nuageux non précipitants, terre ou mer, ce qui donne lieu à une famille de 6 produits de niveau 2 :

- profil de vapeur d'eau
- contenu intégré en vapeur d'eau
- eau précipitable

- température de surface sur terre
- vent de surface sur mer
- contenu en eau liquide nuageuse des nuages non précipitants

A.5.4 Produit de niveau 2 "Bilan Radiatif"

Cette chaîne a pour objectif d'exploiter les mesures de l'instrument SCARAB pour estimer les flux radiatif ondes longues et courtes au sommet de l'atmosphère. Pour cela, elle utilise deux types d'algorithmes :

– Algorithme SEL (ScaRaB Erbe Like)

Cette chaîne de traitement permet, à partir des radiances obtenues au niveau 1, d'obtenir les flux SW (ShortWave ou onde courte) et LW (LongWave ou onde longue) au sommet de l'atmosphère. SEL est une chaîne dont l'origine remonte aux deux précédents ScaRaB (ScaRaB-1 et ScaRaB-2 respectivement embarqués sur les satellites Russes Meteor en 1995 et Resurs en 1998).

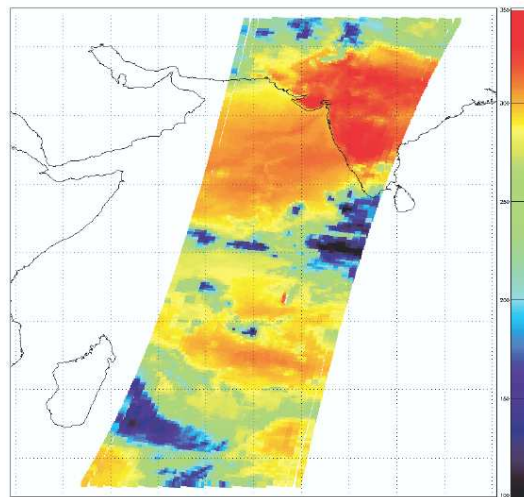


FIGURE A.17 – exemple des restitutions des flux par Scarab/Resurs.

– Algorithme SANN (ScaRaB Artificial Neural Network)

Pour pouvoir obtenir des flux au sommet de l'atmosphère avec une précision supérieure à celle obtenue avec la chaîne SEL, la chaîne de traitement SANN est basée sur un réseau de neurone. Il s'agit d'éduquer un réseau de neurones à partir des données CERES. Ces données ont la particularité d'être traitées beaucoup plus finement grâce à l'apport d'un imageur (VIRS sur TRMM et MODIS sur AQUA et TERRA) permettant une caractéristique des scènes (état de la couverture nuageuse et des surfaces) beaucoup plus exhaustives. SEL permet la différenciation de 12 types de scènes, les algorithmes CERES plusieurs centaines.

A.5.5 Produit de niveau 2 "masque nuage global"

Pour des raisons historiques, la plateforme Megha-Tropiques n'est pas équipée d'un radiomètre visible infrarouge comme le sont les missions comparables et s'appuie donc sur la flotte des géostationnaires pour combler cette lacune. Les géostationnaires vont permettre de mieux décrire la scène par l'utilisation d'un masque nuageux et permettre ainsi la construction d'un meilleur produit sous la trace.

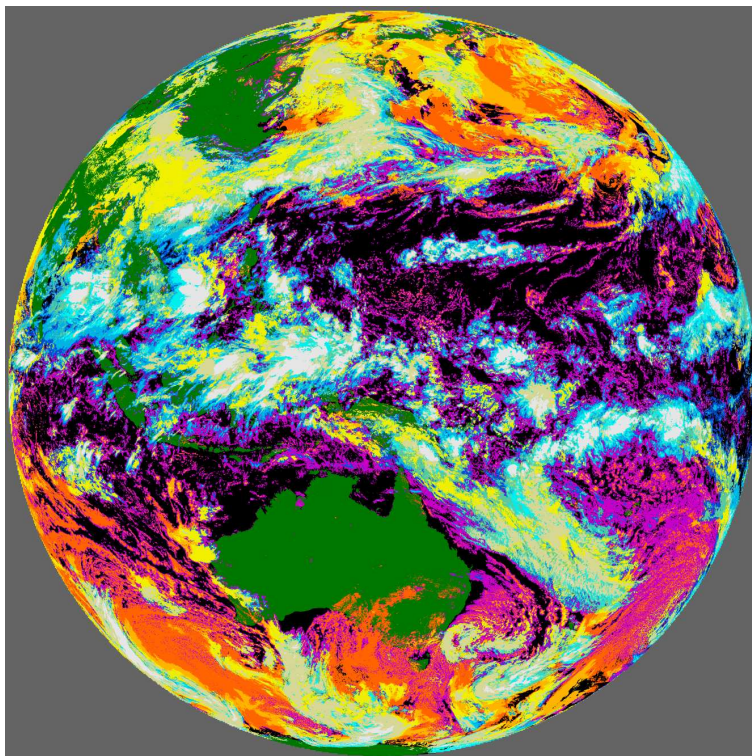


TABLEAU A.4 – *Illustration pour le 1^{er} juin 2009 à 0000 UTC de la classification nuageuse pour le satellite MTSAT-1. Chaque couleur correspond à un type de nuage.*
Source : G.Seze

L'objectif de ce produit est alors de fournir un masque nuageux et une classification en type nuageux cohérents sur toute la ceinture tropicale, à partir de la flotte des géostationnaires, avec une résolution spatiale de 5km x 5km et une résolution temporelle de l'ordre de la demi-heure. Ce masque ou identificateur de scène est utilisé comme entrée dans la chaîne de traitement des données micro-ondes SAPHIR-MADRAS. Il sera aussi utile pour les chaînes de niveaux 4 d'estimation des précipitations et de suivi de systèmes convectifs à partir des mêmes données des géostationnaires ainsi que pour évaluer les types de scènes Scarab utilisés pour la détermination des flux.

A.5.6 Produit de niveau 3/4 "précipitation accumulée"

Le produit de niveau-3/4 'précipitation accumulée' a été développé dans l'objectif de fournir des mesures de cumuls de pluie accompagnées d'incertitudes à la résolution 1°/jour. Une approche de type GPCP (Huffman et al. [2001]) a été développée dans le cadre de l'algorithme TAPEER (Tropical Amount of Precipitation with Estimation of ERrors) afin de fusionner les données de la chaîne de Niveau-2 "BRAIN" et les données des géostationnaires pour fournir des estimations de pluie accumulée sur toute la ceinture tropicale. Le produit permet également des estimations des erreurs associées aux estimations de pluie accumulée, afin d'en faciliter l'utilisation en précisant le degré de pertinence de chaque cumul 1°/jour.

Les données de la chaîne de niveau-2 "BRAIN" fournissent des estimations de taux de pluie instantanées qui offrent une couverture dans le temps et dans l'espace trop faible pour construire des cartes de cumuls de pluie grillées sans que l'erreur d'échantillonnage associée ne soit trop grande. Le concept général de la combinaison de données infrarouges et micro-ondes est de propager la distribution des taux de pluie mesurée par le niveau-2 sur les images infrarouge géostationnaires (mono canal 10.8 μm) pour ensuite les accumuler à la résolution 1°/jour. Une des hypothèses principales du produit "précipitation accumulée" est d'attribuer les taux de pluie les plus forts restitués par BRAIN aux températures de sommet de nuage les plus froides. Ainsi, d'un point de vue technique, plusieurs paramètres sont calculés à partir d'une base de données d'informations IR géostationnaire et BRAIN co-localisées, afin de produire les cartes de pluie : des températures de brillance IR seuils définissant les zones pluvieuses ainsi que des taux de pluie définissant leurs intensités. Ces paramètres sont ensuite généralisés à l'ensemble des données IR géostationnaires. Afin d'être le plus fidèle possible aux conditions météorologiques locales et de déduire la meilleure estimation 1°/jour possible, les paramètres cités ci-dessus doivent être mis à jour le plus souvent possible et adapté aux conditions géographiques locales. Pour ce faire, une fenêtre glissante spatio-temporelle est utilisée pour définir le volume de données nécessaire à un apprentissage de paramètres locaux.

A.5.7 Produit de niveau 3/4 "Cycle de vie des systèmes convectifs"

Le produit "Cycle de vie des systèmes convectifs" comprend 2 parties principales :

- Un produit de niveau 2 "Détection et suivi des systèmes convectifs"
- Un produit de niveau 3/4 "Composite du cycle de vie des systèmes convectifs tropicaux"
- **Produit de niveau 2 "Détection et suivi des systèmes convectifs"**

L'algorithme de suivi utilisé dans le cadre de ce produit a été détaillé dans de nombreux papiers (Williams et Houze [1987]; Arnaud et al. [1992]; Machado et al. [1992]; Mathon et Laurent [2001]). Il consiste à détecter les systèmes nuageux en appliquant un simple seuil en température de brillance sur l'imagerie infrarouge et à les suivre image par image par des techniques de recouvrement géographiques. L'algorithme de suivi est appliqué sur l'ensemble de la ceinture tropi-

cale en utilisant les données issues de 6 satellites géostationnaires différents (GOES10, GOES11, GOES12, MSG, METEOSAT-7 et MTSAT). Chacune des données satellitaires est traitée indépendamment. Cet algorithme de détection sera dans l'avenir remplacé par l'algorithme TOOCAN présenté dans les chapitre 1 et 2 de cette thèse.

– **Produit de niveau 3/4 "Composite du cycle de vie des systèmes convectifs tropicaux"**

Le produit de niveau 3/4 va permettre de combiner dans l'espace et dans le temps les données issues du produit de niveau 2 BRAIN et les systèmes nuageux déterminés par le produit de niveau-2 "Détection et Suivi des Systèmes". Etant donné la répétitivité des satellites LEO, seules quelques phases du cycle de vie des systèmes convectifs peuvent être échantillonnées et documentées. Le produit de niveau 3 va ainsi permettre d'évaluer statistiquement la distribution des précipitations au sein d'un cycle de vie d'un système convectif type en composant les différentes phases observées de l'ensemble des MCS.

A.6 la mission GPM (Global Precipitation Mission)

Les précipitations sont un élément clef de la météorologie, du climat et des systèmes hydrologiques. Dans ce contexte, la mission GPM est une mission spatiale internationale consistant en une constellation de satellites dédiés à la mesure des précipitations, permettant ainsi l'observation des précipitations d'un point donné du globe avec une répétitivité de 2 à 4h. Les objectifs de la mission sont de comprendre la variabilité spatiale et temporelle des précipitations à une échelle globale. Dans un contexte de réchauffement climatique, la mission fournira ainsi des observations permettant de caractériser les modifications du cycle de l'eau dans le système terrestre, de fournir des prévisions dans des cas d'événements météorologiques extrêmes, etc...

A.6.1 Les satellites de la mission GPM

Le segment spatial GPM consiste en :

- un satellite principal, "GPM Core", développé conjointement par la NASA (National Aeronautic and Space Administration) et la JAXA (Japan Aerospace and Exploration Agency), embarquant un instrument passif,
- le radar DPR, et un instrument passif, le radiomètre GMI
- un satellite LIO (Low Inclinaison Observatory) développé par la NASA embarquant un second radiomètre GMI une constellation de radiomètres micro-ondes passifs fournis par un consortium international de partenaires liés au programme GPM.

La constellation GPM comprendra, en plus des deux satellites "GPM Core" et LIO, les instruments SSMI/S (Special Sensor Microwave Imager/sounder) embarqués à bord des satellites de défense américains DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), le radiomètre AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-2) embarqué à bord du satellite de la JAXA GCOM-W1 (Global Change Observation Mission - Water 1), et le radiomètre MADRAS (Multi-frequency

Microwave Scanning Radiometer) de la mission Megha-Tropiques. Initialement, la constellation GPM avait pour objectif de réunir uniquement les radiomètres opérant dans une bande de fréquence [10 GHz-89 GHz]. Ces radiomètres ont été les principaux instruments permettant des estimations de précipitations depuis le lancement du premier SSM/I en 1987. Les instruments sondeurs d'humidité infrarouges opérant dans la bande d'absorption 183 GHz, n'étaient originellement pas inclus dans le programme GPM. En effet, ces instruments haute fréquence sont sensibles aux particules de glace rendant leur mesure moins directement reliée aux précipitations. Il est apparu cependant que leur fréquence de mesure pouvait fournir des informations intéressantes, notamment dans les régions de grande incertitude d'émissivités de surfaces (Régions enneigées, glace...). Les instruments MHS (Microwave Humidity Sounder) à bord de NOAA-N' et la série des MetOp, ainsi que les instruments ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) embarqués sur les satellites polaires NPOESS-NPP (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System-Preparatory Project) et NPOESS-C1 ont alors été rajoutés dans la constellation GPM. la figure A.18 montre le calendrier prévisionnel de lancement et de durée de vie de l'ensemble des satellites cités précédemment et faisant parti de la constellation GPM et le tableau A.5 résume l'ensemble des instruments dont disposera la mission GPM.

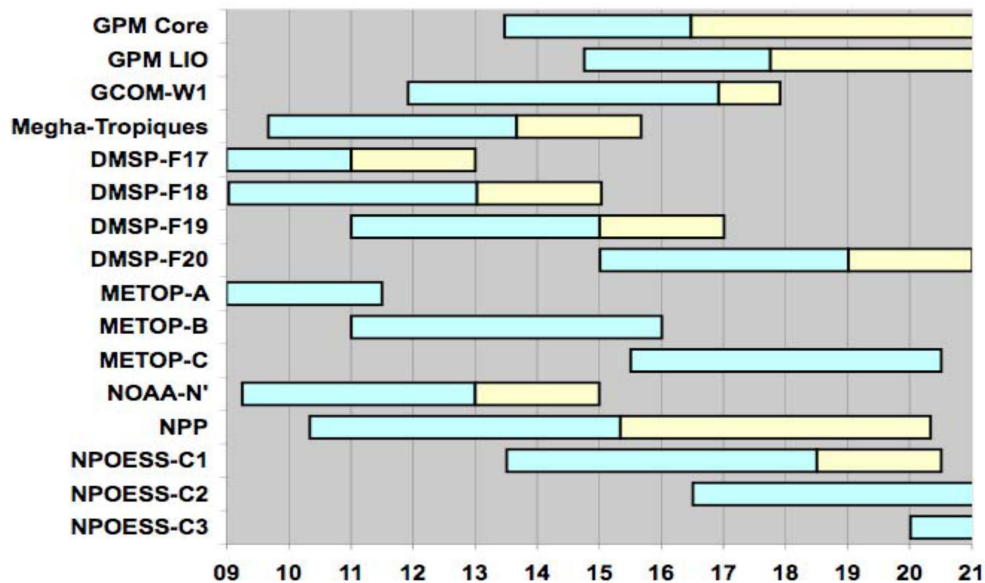


FIGURE A.18 – Calendrier prévisionnel des lancements et des durées de vie des satellites de la constellation GPM. en bleu sont représentées les phases primaires des missions de chacun des satellites. En jaune, sont représentées les durées de vie possiblement étendues des missions satellitaires

Etant donné que de plus en plus de nations contribuent à l'observation de la Terre depuis l'espace, il est possible que l'échantillonnage de GPM soit amélioré grâce à l'apport de radiomètres micro-ondes des satellites chinois FY-3 et des imageurs/sondeurs russes embarqués à bord du satellite MTVZA.

Table 3. Characteristics of passive microwave radiometers in the GPM era									
Channel	6-7 GHz	10 GHz	19 GHz	23 GHz	31-37 GHz	50-60 GHz	89-91 GHz	150-167 GHz	183-190 GHz
Channel Center Frequency (GHz): V-Vertical Polarization, H-Horizontal Polarization									
GMI		10.65 V/H	18.70 V/H	23.80 V	36.50 V/H		89.0 V/H	165.6 V/H	183.31 V
AMSR 2	6.925/7.3 V/H	10.65 V/H	18.70 V/H	23.80 V/H	36.5 V/H		89.0 V/H		
SSMIS			19.35 V/H	22.235 V	37.0 V/H	50.3- 63.28 V/H	91.65 V/H	150 H	183.31 H
MADRAS			18.7 V/H	23.80 V	36.5 V/H		89.0 V/H	157 V/H	
MHS							89 V	157 V	183.311 H 190.311 V
ATMS				23.8	31.4	50.3- 57.29	87-91	164-167	183.31
Mean Spatial Resolution (km)									
GMI		26	15	12	11		6	6	6
AMSR2	62/58	42	22	26	12		5		
SSMIS			59	59	36	22	14	14	14
MADRAS			40	40	40		10	6	
MHS							17	17	17
ATMS				74	74	32	16	16	16

TABLEAU A.5 – Caractéristiques des différents instruments participant à la constellation GPM

A.6.1.1 Le satellite "GPM Core"

Le satellite central à cette mission, le "GPM Core" est un satellite développé conjointement par la NASA et la JAXA qui embarquera des instruments de mesure actifs (radars) et passifs (radiomètre micro-onde) dans un objectif d'améliorer la restitution des précipitations mesurées à partir de l'ensemble des radiomètres micro-ondes de la constellation GPM (figure A.19). Les instruments de "GPM Core", serviront également de référence afin d'inter-calibrer les radiomètres micro-ondes des différentes plates-formes, et de s'assurer de l'uniformité des mesures radiométriques pour l'estimation des précipitations. Le satellite possèdera une orbite non héliosynchrone, inclinée de 65° par rapport à l'équateur et une altitude de 407 km. Cette configuration lui permettra de fournir des mesures coïncidentes avec la constellation de radiomètres micro-ondes, répondant ainsi à sa fonction d'inter-calibration des différents instruments. L'inclinaison a été choisie de manière à optimiser la couverture latitudinale observée, tout en évitant une orbite polaire. Elle lui permet aussi de maintenir une faible période de précession nécessaire à l'échantillonnage de la variabilité diurne. Avec cette orbite, les mesures de "GPM Core" couvriront 90% de la surface terrestre. Le lancement de "GPM Core" est prévu en juillet 2013 pour une durée de 3 ans avec une extension possible de 2 ans.

A.6.1.2 Le satellite LIO (Low Inclinaison Observatory)

Partant du principe que la majorité des satellites participant au programme GPM possèdent une orbite polaire, n'autorisant pas de mesure de la variabilité diurne de la pluie, un nouveau satellite est actuellement développé par la NASA, le LIO (Low Inclinaison Observatory). Le LIO

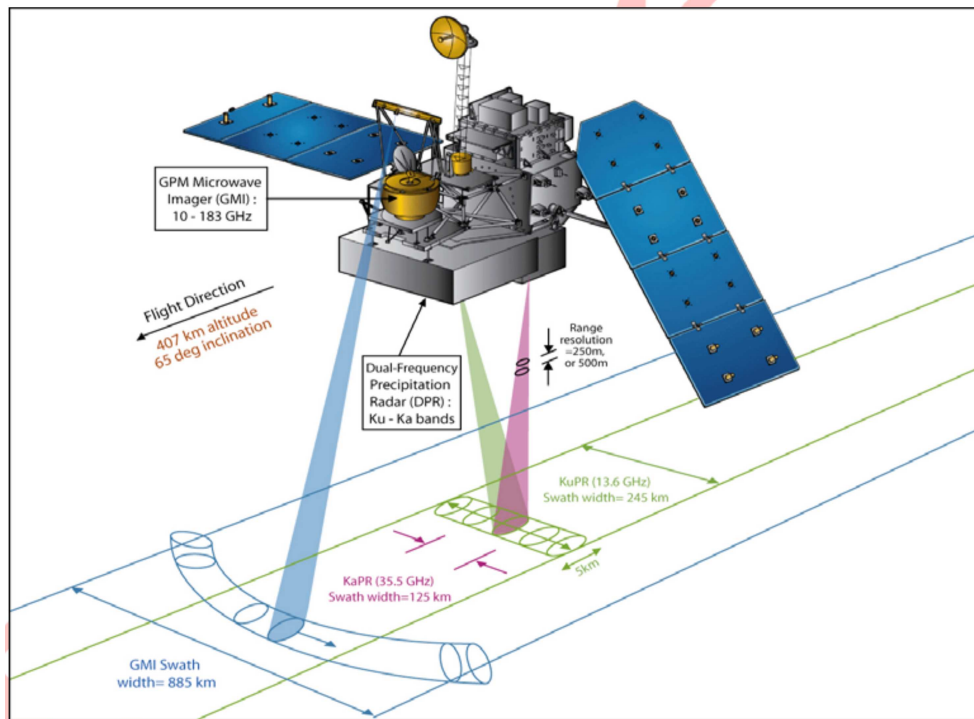


FIGURE A.19 – Le satellite "GPM-Core" avec ses instruments DPR et GMI

embarquera un radiomètre micro-ondes GMI (GPM Microwave Imager). Son altitude de 635km et sa faible inclinaison de 40° par rapport à l'équateur lui permettront d'améliorer l'échantillonnage de la constellation GPM. Ces mesures pourront alors être utilisées pour la prévision des ouragans et des cyclones. Le lancement de LIO est prévue pour 2014.

A.6.2 Les instruments

Les instruments embarqués à bord des satellites "GPM Core" et du "LIO" sont des évolutions technologiques des instruments présents à bord du satellite TRMM, qui permettront notamment d'améliorer les mesures des précipitations de faible intensité (moins de 0,5 mm/h), des contenus en glace et des particules micro-physiques des particules précipitantes. Les précipitations de faibles intensités et les chutes de neige contribuant fortement aux précipitations totales dans les moyennes et hautes latitudes, leur mesure et leur détection par GPM constituera une avancée majeure comparativement à la mission TRMM.

A.6.2.1 Dual frequency Precipitation Radar (DPR)

L'instrument DPR consiste en un radar de précipitation dans la bande Ka à la fréquence 35,5GHz (KaPR) et en un radar de précipitation dans la bande Ku (KuPR) à la fréquence de 13,6GHz. Ce dernier est une version améliorée du radar embarqué à bord de TRMM. Les deux

radars KuPR et KaPR seront coalignés de telle sorte que leur trace au sol de 5 km coïncide sur la surface de la Terre, avec une fauchée 'Cross-Track' de 245 km et 125 km respectivement (figure A.18). Les profils verticaux seront stratifiés sur des couches de 250 m. Le DPR sera ainsi capable de mesurer les structure tri-dimensionnelles de la pluie avec une meilleure sensibilité que le radar de TRMM. le rapport signal sur bruit sera amélioré de 6 dBz par rapport au radar de TRMM permettant de mesurer des précipitations liquides de 0,2 mm/h au minimum.

A.6.2.2 Le radiomètre micro-ondes GPM Microwave Imager (GMI)

L'instrument GMI est un radiomètre micro-ondes à balayage conique comprenant 13 canaux de 10 GHz à 183 GHz polarisés horizontalement et/ou verticalement. Son antenne de diamètre 1,2 m lui permettra d'obtenir une meilleure résolution spatiale que les radiomètres TMI ou AMSRE. Le canal 10 GHz a pour objectif de mesurer les fortes précipitations rencontrées dans les tropiques. Les canaux 19 et 37 GHz mesureront les précipitations de faibles intensités des régions océaniques. Le canal 21 GHz permettra de corriger l'absorption par la vapeur d'eau dans les autres canaux. Pour distinguer les pluies convectives des pluies stratiformes au dessus des océans et détecter les particules de glace, le canal 89 GHz sera utilisé. Le canal 166 GHz sera utilisé pour mesurer les faibles précipitations en dehors des tropiques.

La surface visée dans la direction du nadir sera constante et égale à $48,5^\circ$, formant un angle d'incidence entre le faisceau de l'antenne et la surface de $52,8^\circ$. L'antenne tournera autour de son axe à une vitesse de 32 tours/minute, permettant une observation en arc de cercle à la surface de la Terre. Sa rotation sera limitée au secteur 140° située à l'avant du satellite. La fauchée résultante de ces paramètres est alors de 885 km.

La portion centrale de la fauchée de GMI sera observée par les fauchées du radar Ka-Ku avec un retard de 67 secondes, Ce recouvrement permettra d'améliorer les restitutions des précipitations.

A.6.3 L'échantillonnage

Les performances de l'échantillonnage de la constellation GPM est fonction du nombre de satellites en vol. Pour un nombre de satellites équivalent à celui montré dans la figure A.5, le temps de revisite est illustré dans le tableau A.6 pour les 5 années d'opération du satellite "GPM Core". Le tableau montre que le temps de revisite de la constellation ne dépasse pas 3 h.

La figure A.20 présente une comparaison du temps de revisite moyen par la constellation GPM en 2015 (droite) et par les satellites dédiés aux précipitations disponibles en 2008 (gauche).

Table 2. Expected GPM Constellation Performance										
Year ^a	Average Revisit Time (hr)					Coverage of Revisit Times < 3 hr (%)				
	2013	2014	2015	2016	2017	2013	2014	2015	2016	2017
	Land					Land				
Tropics	1.6	1.6	1.6	2.1	2.0	100	100	100	100	100
Extratropics	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	100	100	100	100	100
Globe	1.3	1.3	1.4	1.6	1.5	100	100	100	100	100
	Ocean					Ocean				
Tropics	3.1	3.1	2.5	3.8	4.8	52.4	52.4	92.8	0	0
Extratropics	3.2	3.2	2.5	2.6	3.3	37.6	37.6	80.2	80.2	34.0
Globe	3.1	3.1	2.5	3.2	4.1	45.7	45.7	87.4	38.8	16.5
	Land and Ocean					Land and Ocean				
Tropics	2.7	2.2	2.3	3.3	4.0	70.3	95.7	94.7	26.6	26.5
Extratropics	2.5	1.9	2.1	2.1	2.6	63.5	87.3	86.8	86.8	56.1
Globe	2.6	2.0	2.2	2.7	3.3	67.2	91.9	91.2	57.1	41.5

^a Results for the January of each year except 2013, for which results are for August, a month after the GPM Core launch.

TABLEAU A.6 – Performances de l'échantillonnage de GPM pour les années 2013 à 2017

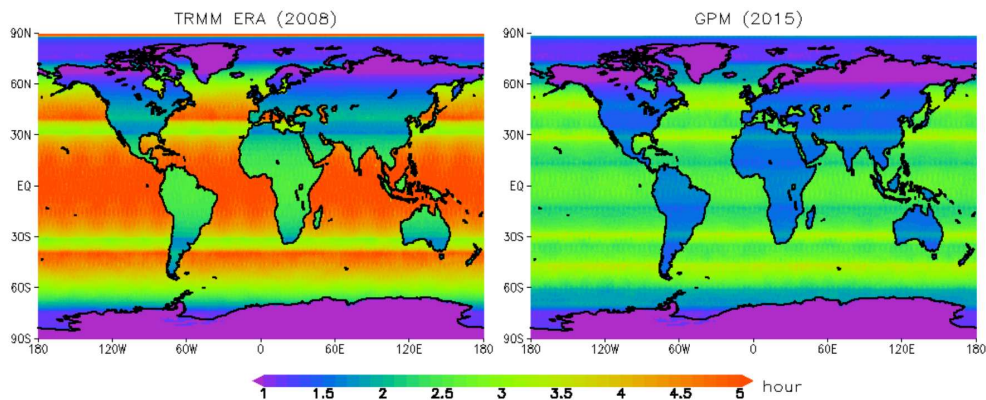


FIGURE A.20 – Cartes globales comparatives du temps moyen de revisite entre la constellation GPM prévue en 2015 (gauche) et les instruments dédiés aux précipitations disponibles en 2008 (droite)

Annexe B

Summertime Climatology of Mesoscale Convective Systems over West Africa from 24-years of METEOSAT observations



Project no. 004089

AMMA

African Monsoon Multidisciplinary Analysis

Instrument : IP

Thematic Priority : 1.1.6.3 Global change and Ecosystems

**A climatology of Mesoscale Convective System from
satellite**

D2.1.C.g

Start date of project: 1st January 2005

Duration: 60 months

**Lead contractor :
Coordinator of deliverable :
Evolution of deliverable**

**Due date :
Date of first draft :
Start of review :
Deliverable accepted :**

Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006)		
Dissemination Level		
PU	Public	
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including the Commission Services)	
CO	Confidential, only for members of the consortium (including the Commission Services)	

A climatology of Mesoscale Convective System from satellite

T. Fiolleau¹, M. Tomasini², R. Roca¹, JP. Lafore², H. Laurent^{3†}, T. Lebel³, C. Piriou² and K.

Ramage⁴

¹Laboratoire de Météorologie Dynamique
Tour 45-55, 3eme étage, Case Postale 99
4 place Jussieu
75252 Paris Cedex 05, France

²CNRM
42 avenue Gaspard Coriolis
31057 Toulouse, France

³LTHE
BP 53
38041 Grenoble Cedex 09, France

[†] Deceased 2007.

The deliverable presents a new database of MCS over West Africa obtained from a long time series of satellite measurements. The data have been made available in the AMMASAT server.

Summary

In West Africa, recent decades have shown significant climatic evolution. In particular, droughts conditions are continuously observed over the Sahel since the 70's while other regions exhibit a return towards neutral long term conditions. The intimate link between the rainfall and the Mesoscale Convective Systems calls for a concurrent analysis of the evolution of the MCS over the region. A first step is performed here by computing a homogeneous analysis of 24 years of METEOSAT data. MCS are hence detected and tracked in time using the infrared imagery. A simple MCS classification is developed based on the duration of the system and its speed of propagation. Four classes are formed using thresholds selected on a physical basis of 9 hour and 10 m/s, respectively. The long term average spatial distribution of the systems is presented as well as the interannual variability. A dedicated focus on the 2006 season is proposed. This work shows that in spite of its simplicity, the present MCS classification is useful to document convection in West Africa at various scales and should be of help to better understand the observed recent climatic variations over the region.

Introduction

West African rainfall is driven by a wide variety of convective clouds ranging from the isolated storms to the organized convective systems among which stands out the well known squall lines (Dhoneur, 1985). Over Sahel, in particular, organized convective systems appear to produce a large fraction of the summer rain yield (Mathon et al., 2002). The last century climatic history of the region is fully centered on the Sahelian drought which is lasting since the 1970's. Over the last 20 years, the situation has evolved with some regions revealing continued drought conditions (Lebel and Ali, 2009) and others showing "greening" associated with more rainfall per season (although still under the pre-drought climatic mean). Establishing the extent to which the different types of convective systems have evolved over this recent period over Sahel, and more generally over West Africa, would hence provide a way to link this climatic event with the processes at play in the rainfall. This would put a strong physical constrain on the ability to model such a past drought and the future evolution of rainfall in this sensitive area under climate change for which the current generation of GCM is still not showing much skills nor agreement (e.g. Douville and Terray, 2007). In this work, a systematic and homogenous analysis of 24 years of summertime METEOSAT satellite data is presented in order to offer the required observational support for such scientific investigations.

The natural spread of the expression of deep convection in the tropical atmosphere with various degree of organization (e.g., Houze and Betts, 1981 Redelsperger 1997), together with the multiple observational platforms deployed to characterize them (synoptic stations, rain gauges, ground radar, satellite infra red and microwave imagery,...) has yield to a large body of literature promoting a substantial nomenclature to characterize the rain events. The analysis of the satellite imagery in particular, based on the delineation of the convective systems generally using brightness temperature thresholds corresponding to optically thick cloudiness distributed at different altitudes in the atmosphere (e.g., Duvel, 1989) has raised a significant corpus. The classification of these

loosely defined Mesoscale convective systems has indeed been the subject of many studies promoting various methods ranging from the Mesoscale Convective Complex (Maddox 1980), disturbance- or squall-line systems (Aspliden et al., 1976) to the Organized Convective Systems (Mathon 2001) and the Organized Tropical Storms and cyclones (Smith and Metha 1991). These classifications are based on experimental thresholds applied to some morphological parameters of the systems. For instance, the identification and analysis of the Mesoscale Convective Complex Systems (MCCs), defined by Maddox, has been generalised by Evans and Shemo (1996), and extended in four categories of organized and disorganized convective systems depending on their sizes, temperatures, lifetimes and eccentricities : Mesoscale Convective Complex (MCC), Convective Cloud Cluster (CCC), Disorganized Short-Lived convection (DSL), and Tropical Storms. Other studies focused on specific sub-category of systems like warm pool superclusters, convective clusters lasting longer than 2 days in the IR imagery (Mapes and Houze, 1993). Tropical convection penetrating into the upper troposphere and lower stratosphere is identified as cloud clusters detected at 245K on the IR imagery, if once in the lifecycle, a cold cluster (delineated by a 220°K threshold) is associated to it and furthermore, if a minimum temperature of 200°K corresponding to the cold point tropopause temperature is found in the system (Rossow and Pearl, 2007). Other approaches classify the system with respect to the global population of convective systems encountered during the period of study over the region of interest. Hence, Chen et al (1995) over the warm pool as well as Zuidema (2003) over the Bay of Bengal have classified convective systems in four classes, each class contributing to an equal amount of the cloud clusters cumulative size distribution.

Over West Africa, specific regional classifications have been applied on convective systems to characterize them according various criterion. Payne and McGarry (1977) have identified squall-lines by “explosive growth, high brightness, and a distinct and generally convex shaped leading edge”. In their study on the relationship between West African Squall-lines and African Easterly

waves, any system consisted of a Western leading edge was considered as a squall-line by Fink and Reiner (2003). Aspiden et al (1976) has only classified the brightest clouds in squall-lines, depending on minimum size and lifetime thresholds. To analyse the generation of African Squall-lines, Rowell and Milford (1993), have applied thresholds on the temperature, the size and the propagation speed of the convective systems. In the study of Mathon (2001) about Mesoscale Convective Rainfall in the Sahel, Organized Complex Systems (OCS), associated to the most precipitating systems, are defined as areas colder than 233°K , containing at least one cluster at 213°K , and moving faster than 10m/s . The Global Atmospheric Research Program Atlantic Tropical Experiment (GATE), yield to MCS classification in three classes, only according to their speeds propagation speed (Barnes and Sieckman, 1984). In order to define convection over the Upper Ouémé Valley and to link it to the local dynamics, Fink et al (2006) have classified three types of rainfall events (advective cloud systems, local precipitation, and vortex related rainfall events), based on the genesis of the cloud clusters and the regional vertical winds. These three classes were then subdivided into OCS, MCS and instability storms, according to the temperature, the propagation speed, the area of the cloud cluster detected at 233°K , and the area of the convective cell, detected at 213°K , within it. Laing and Fritsch (1993) have used the Maddox (1980) definition of MCCs has been applied to the African continent and shown there to resemble closely to the tropical storms found elsewhere in the tropics (Laing and Fritsch, 1997). Hodges and Thorncroft (1997) have computed a 8-year climatology (1983-1990) of African Mesoscale Convective Systems based on Meteosat imagery. Convective cloud systems have been detected at a -15°C temperature, and then tracked through their entire life cycles. To compute statistics of organized convection, only systems with a lifetime longer or equal than half a day have been kept. In order to provide a simple and homogenized view of the convection organization over the whole West African continent, a simple four-class, two parameters convective cloud systems classification is introduced here. The 24 year climatology of these four classes of systems is presented and a focus on the 2006 season is offered as a large number of investigators are analyzing this season in details

owing to the occurrence of the AMMA SOP (Redelsperger et al. 2006). This way, the convective activity during the AMMA SOP campaign is put in the context of the 24 years climatology.

The document is organized as follows. First the data are introduced together with some control quality indices. The cloud identification and classification is also discussed. The climatology is then presented as well as the interannual variability over the period.. A quick summary ends the manuscript.

Data and methodology

METEOSAT observations

Raw observations in the thermal window (10-12 microns) of the METEOSAT spacecrafts for the 1st June- 30st September over all the years 1983 :2006 included at full resolution (5km ; 30 minutes) have been acquired and processed at the Climserv data server of the Institut Pierre Simon Laplace, Palaiseau, France. The data originate from the EUMETSAT archive and from the Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Spatiales located at the Centre de Météorologie Spatiale in Lannion, France. Calibration coefficients from EUMETSAT are then used to convert raw numerical counts to radiance and then to brightness temperature. METEOSAT-2 to METEOSAT-7 observations are used here and hardly differ in terms of spectral response. These characteristics constitute the basis of this long and homogeneous database. The summer 2006 is processed using Meteosat Seconde Generation data which have been degraded, temporally to mimic the METEOSAT first generation characteristics and to permit the extension of the database to the AMMA SOP period.

The seasonal availability of the data averages to 94.5% over the full period with a standard deviation of 4.2%. As shown in Figure 1a, the best year is 2003 with 0.7% in contrast with the worst sampling conditions of 1985 with 21%. The first 15 days of the season being missing. Of interest to the tracking of cloud systems discussed below is the return time between series of missing images. Indeed the tracking algorithm interpolates the missing slots up to 3 hours. If the imagery is not available for consecutive period greater than 2.5 hours then all the trajectories are stopped yielding to an artificial reduction in the cloud system estimated duration. Similarly, such events imply that some systems are initiated after the event while they could have started within the event. The figure 1b shows the fraction of the observed MCS that are concerned by such alterations at the seasonal scale along all the study period. It reveals that a marginal amount of the systems (less than 1.5%) are corrupted by this artificial interruption/initiation with better statistics after the

MFG satellite became operational with the advent of METEOSAT-4 during the year 1990. This indicates that the MCS statistical characteristics to be shown next are not affected by the availability of the imagery.

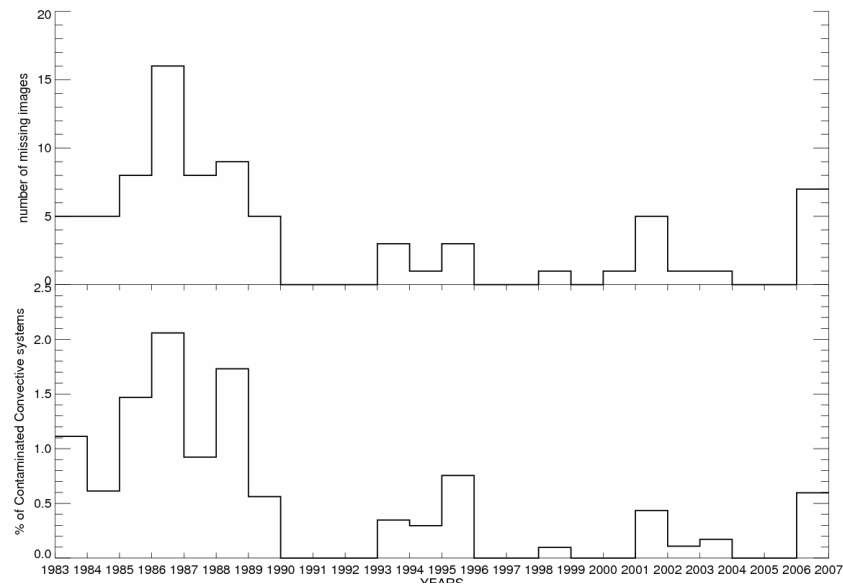


Figure 1 Number of missing images per season (top). Percentage of the MCS population affected by missing series of images longer than 3 hours (bottom).

Cloud system tracking

The cloud system tracking algorithm is fully detailed in a number of papers (Williams and Houze 1987; Arnaud et al., 1992; Machado et al., 1992; Mathon et al. 2002). Here we only briefly summarize its functioning. It is composed of two steps: the detection of the cloud system at a given time and the tracking along the time. The cloud shield identification is performed simply with the raw IR imagery. It is indeed segmented using a clustering routine that delineates continuous region in space that is colder than a threshold. The labeling is performed using 8-connectivity and a threshold of 233K, well adapted for the study of convection and accumulated convective precipitation in the Tropics, (e.g., Arkin 1979) is chosen. The minimum size to characterize the

cloud system is 5000 km^2 which is 200 pixels (555 pixels for MSG). The cluster tracking is performed when all the images of a given period are first segmented. Then the clusters detected in the image at time $t+1$ are matched with the ones in the previous image at time t based on the spatial overlap between the two segmented images. If the overlap is greater than 50% or 10000 km^2 of the area of either the current cluster or the cluster from the previous image, the clusters are matched. When no overlapping occurs in the previous image, it is considered that the cloud system is generated. On the other hand, a convective system dissipates when there is no longer intersection with another cluster in the next image. The tracking can result in some clusters merging and splitting yielding to complex MCS life cycle. When several clusters merge to form a unique cluster in the next image, the larger cluster at this time is selected to continue the original track, whereas the tracks of the smaller clusters are considered to end. Similarly, splitting clusters are taken into account by selecting the larger cluster in the next image to continue the track and the smaller clusters are considered as split generation. For this study, a selection is applied to the MCS generated by a split, or dissipated by a merge, in order to keep convective systems which describe a complete life cycle. Consider that the cluster B in the current image is generated by a split of the cluster A in the previous image. If the lifetime of cluster B is longer than the lifetime of cluster A, from its genesis to the moment of its split, then the cluster B is considered as having describe a complete life cycle and is selected in our database. A similar process is applied for convective systems dissipated by a merge. This approach hence tracks each cluster along the time and allows building a life cycle of the mesoscale convective systems. The rejected MCS account for a few percent of the whole population and of the total cloud cloudiness and hence do not impact the following statistical analysis. Missing images in the time series are handled as follows: if few images are missing (< 10 images), a recovery process is run to continue the track of each convective system during the period of missing images. This process is based on the generation of the missing images, by extrapolating the behaviour of each convective system, like their locations and their sizes. As discussed earlier only a marginal amount of the systems indeed suffer from this issue (see

Figure 1b).

The morphological parameters of the so-defined convective cloud systems includes the surface of the system (km^2), the mean IR brightness temperature ($^{\circ}\text{K}$), the speed of propagation (m/s) as a function of time along the MCS life cycle. Integrated MCS parameters like the duration (h), the cumulated surface (km^2), the average speed (m/s) are also computed. The location of the systems is defined by the center of mass weighted by the brightness temperature of each pixel. This definition of location is then required to compute the average speed, according to the average zonal displacement of the center of mass between the genesis and the dissipation of the convective system life cycle. Here, we focus on the use of the latter parameters (duration, cumulated surface, average speed) to analyze of the MCS population through the establishment of a classification of the systems.

Mesoscale Cloud Systems classification

As discussed in the Introduction, the rationale for the present new system classification is: simplicity and suitability to document the organized convective activity and associated rainfall encountered over the whole West African region. In light of the literature and after a series of tests, the duration D (hours) and the propagation speed V (m/s) were chosen as the basics parameters of the classification. Figure 2 shows the distribution of all the events detected with the tracking algorithm in this duration and speed propagation space. Most of the systems are short lived and do not propagate fast. The shortest systems reach the fastest average velocities while the speed of the longest systems asymptotes towards 12-15 m/s. Similar characteristics hold if the occurrence of the MCS is weighted by their cold cloudiness cover. Another major feature of the West African convective activity is the diurnal cycle. Most of the systems begin in the afternoon and dissipate before midnight. A threshold of 9 hours is hence used to separate the MCS that vanish in the evening or early night from those that can sustain their activity through out part of the night or

longer.

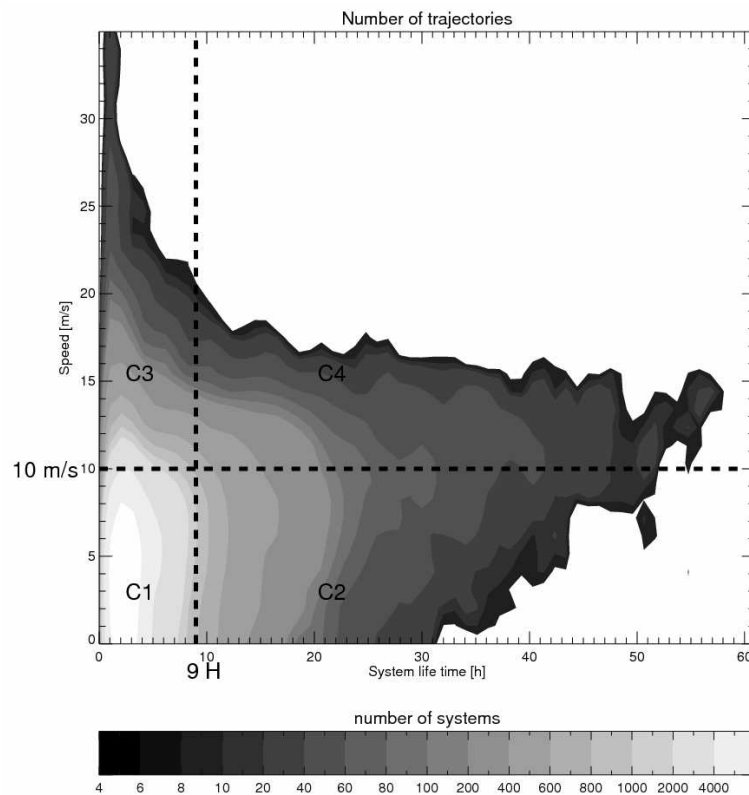


Figure 2 Histogram of the number of MCS as a function of the duration and speed of the system

The limit of the approach is coming from the use of hard thresholds and a limited set of parameters to characterize the diversity of organization of convection encountered in the West African monsoon. Such effort might hence not describe the convective processes as well as a local delineation might do (e.g. over the Niamey area, the multi parameter OCS from Mathon et al. 2001) but as advocated in the following sections, and in light of its simplicity, this classification is shown to be useful to document the convective activity in West Africa.

Other data

The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Version 2 surface rainfall estimates are used at a nominal resolution of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ at monthly mean over the period 1983-2006 to complete our

description of deep convection over the region. The GPCP data (Huffman et al., 1997) is composed of rainfall estimates from geostationary satellite IR images, from polar orbiting microwave imagers and the rain gauges readily available from the Global Telecommunications Systems. Over the long time span considered here, the amount of data ingested by the merging algorithm fluctuates sensibly, for instance, with respect to the microwave imager availability (it only exists after 1987). The stability of the products with respect to other climatological rainfall products based on rain gauges only is nevertheless reasonable over West Africa. Indeed when carefully compared to Global Precipitation Climatology Centre observations (Beck et al., 2005), the GPCP V2 data has been shown to be well adapted for characterizing the annual and seasonal mean spatial distribution over the region as well as over sub latitudinal bands and to some extent of the interannual variability with emphasis on the sign of the anomaly; the magnitude being less certain (Lamptey, 2008). With respect to Sahel, recent investigation underscores the need for dedicated geographical and quality index to characterize the interannual variability and the recent (post 1993) evolution of the rainfall there (Ali et al., 2008). The computed interannual anomalies over Central Sahel for GPCP corresponds well to the one reported in Ali et al (2008). This indicates that GPCP is suitable to characterize the interannual variability of rainfall over our region of study for the sign of the interannual anomalies and to a certain extent, for the magnitude of this variability.

Climatology and inter-annual variability of the MCS

This section presents the climatology and the interannual variability of the MCS for the JJAS season over the period 1983-2006 included.

Long time mean statistics

Morphological parameters

Table 1 shows the long time mean morphological parameters of the MCS for each class over both the continent and the ocean. The C4 systems exhibit the larger average mean size of followed by the

C2, C3 and C1. The same ranking holds for the maximum system size recalling the strong relationship characterizing the MCS life duration and spatial extension (e.g. Mapes and Houze, 1993; Machado et al., 1992). The C2 and C4 systems have slightly colder average temperature as well as colder minima than the C1 and the C3 which is in agreement with the size parameters characteristics (Roca and Ramanathan, 2000; Roca et al. 2002). Most of the systems are propagating west wards (more than 80%) especially the C4 population (more than 97% of the cases). The only difference in the oceanic and continental MCS is the fact that for, each class, oceanic systems are systematically smaller and less cold than the continental ones indicating a lesser degree of organisation over the ocean.

	Land				Ocean			
Class	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
Average Mean Size (103km ²)	11.6	64.8	17.2	82.5	9.3	35.4	12.9	48.0
Average Maximum Size (103km ²)	16.0	137	26.1	175	12.1	69.6	18.2	94.5
Average Mean IR Temperature (K)	219	211	219	216	221	217	221	216
Average Minimum IR Temperature (K)	204	193	201	191	208	199	205	196
Fraction of Westwards population (%)	84	86	87	98	80	86	82	97

Tableau 1 Long term mean morphological parameters of the MCS for the land and oceanic part of the region of study

Diurnal cycle

Figure 3 shows long time accumulated statistics of the local time of initiation of the cloud system for the 4 classes for a broad continental area roughly corresponding to West Africa (15°W-25°E; 5°N-20°N). All classes exhibit a strong diurnal cycle with most of the initiation taking place in the afternoon between 12h and 18h. C2 and C4 systems have very similar cycle while C1 appears similar but delayed by two hours. C3 systems cycle is marked with well defined activity between 14h and 18h. All classes show a minimum of initiation during the early morning between 6h and

10h but the C4. For this latter category the minimum of activity occurs in the middle of the night between 2h and 4h. More detailed analysis should be carried out to establish if these large scale results still hold true at regional and local scales which is out of the scope of the present paper.

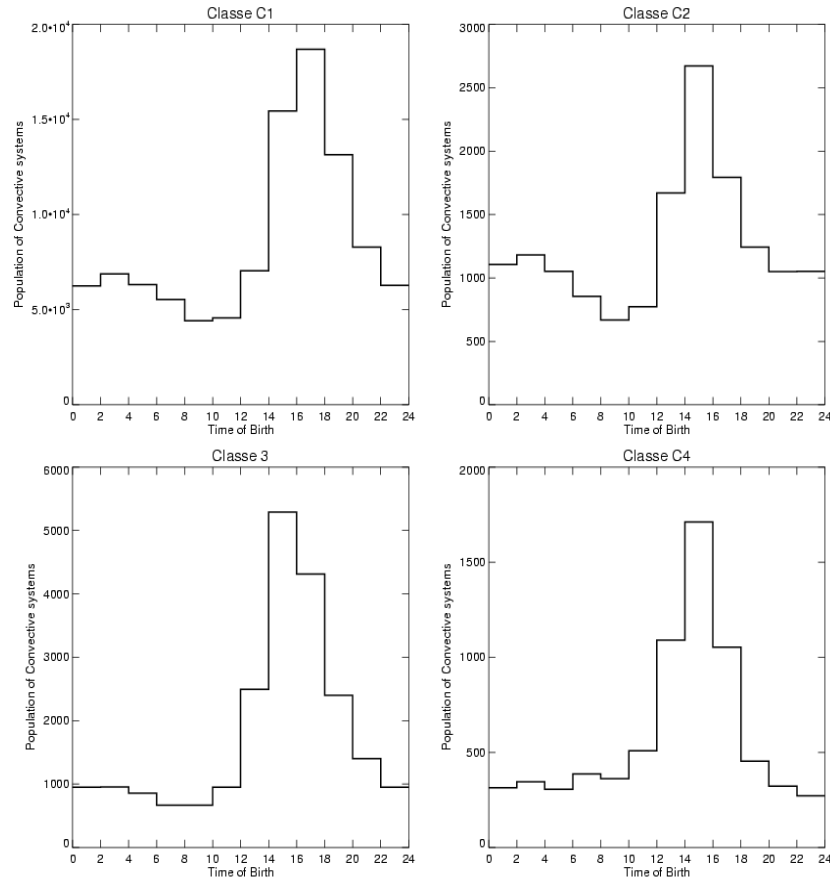


Figure 3 Climatological averaged local time of genesis for the 4 classes. Only the continental system of the region of interest are kept.

Maps

Figure 4 reveals the spatial distribution of the convective systems. The cold cloudiness associated to the MCS cloud shield is accumulated over each season and for each grid point and normalized with respect to space and time and then expressed in hour per month. For instance, a value of 40 hour/month for the class 3 MCS indicates that for this grid point, cold cloudiness associated to the class 3 systems has been observed on average 40 hours per month. Figure 5 shows the relative contribution of each class to the total cold cloudiness. The C4 and C2 class are shown to be complementary; the C2 contribution being overwhelming over the Atlantic ITCZ area and over the Gulf of Guinea while the C4 dominates the cold cloudiness over the Sahelian band. Note that continental C2 contributes to a large fraction to the total over the Congo basin. The C1 systems contribution is smaller over the Sahel than else where and the C3 map reveals an equally distributed contribution of this population to the cold cloudiness.

In summary, the different MCS classes have the following characteristics:

- The C1 systems correspond to small, numerous, diurnal (short) and slow moving systems and are observed preferentially over the mountainous areas and over the ocean. This class overall does not contribute more than 20% of the total cold cloudiness with local minimum in the Sahelian band.
- The C2 systems are slow moving but long-lived MCS, bigger than the C1 systems. They are located over the ocean and over the slopes of the elevation where maximum of rainfall are found. While they contribute around a third of the total cloudiness over the Sahelian region, their contribution is overwhelming over the oceanic region.
- The C3 clouds are not very frequent and correspond to continental fast propagating and short lived MCS, dissipating in the evening with a very small contribution to the cold cloudiness.

- The C4 MCS are the long-lived, fast propagating systems. These are the biggest systems of the 4 classes and mainly located over the continent. Their track is concentrated on the Sahel band (10-17°N) where they dominate the total cloudiness (up to 80% of contribution)

These summaries are in agreement with the arbitrary thresholds used to delineate the MCS categories. The long lived and fast propagating systems (C4), among which are the well known squall lines, are associated with this region of the west African monsoon where favorable conditions for these kind of systems are encountered in the summer. Indeed a warm low-level equivalent potential temperature, a strong wind shear to the African easterly jet located at 600 hPa (Lafore and Moncrieff, 1989) and a dry middle atmosphere (Roca et al., 2005) all facilitates the organization of convection into C4 systems (Barnes and Sieckman, 1984; Rotunno et al., 1988). The spatial distribution of the smaller and larger systems over ocean and land respectively was previously noted (Machado et al., 1992) so was the southward shift of the location of the small (C1) systems compared to the larger ones (C2).

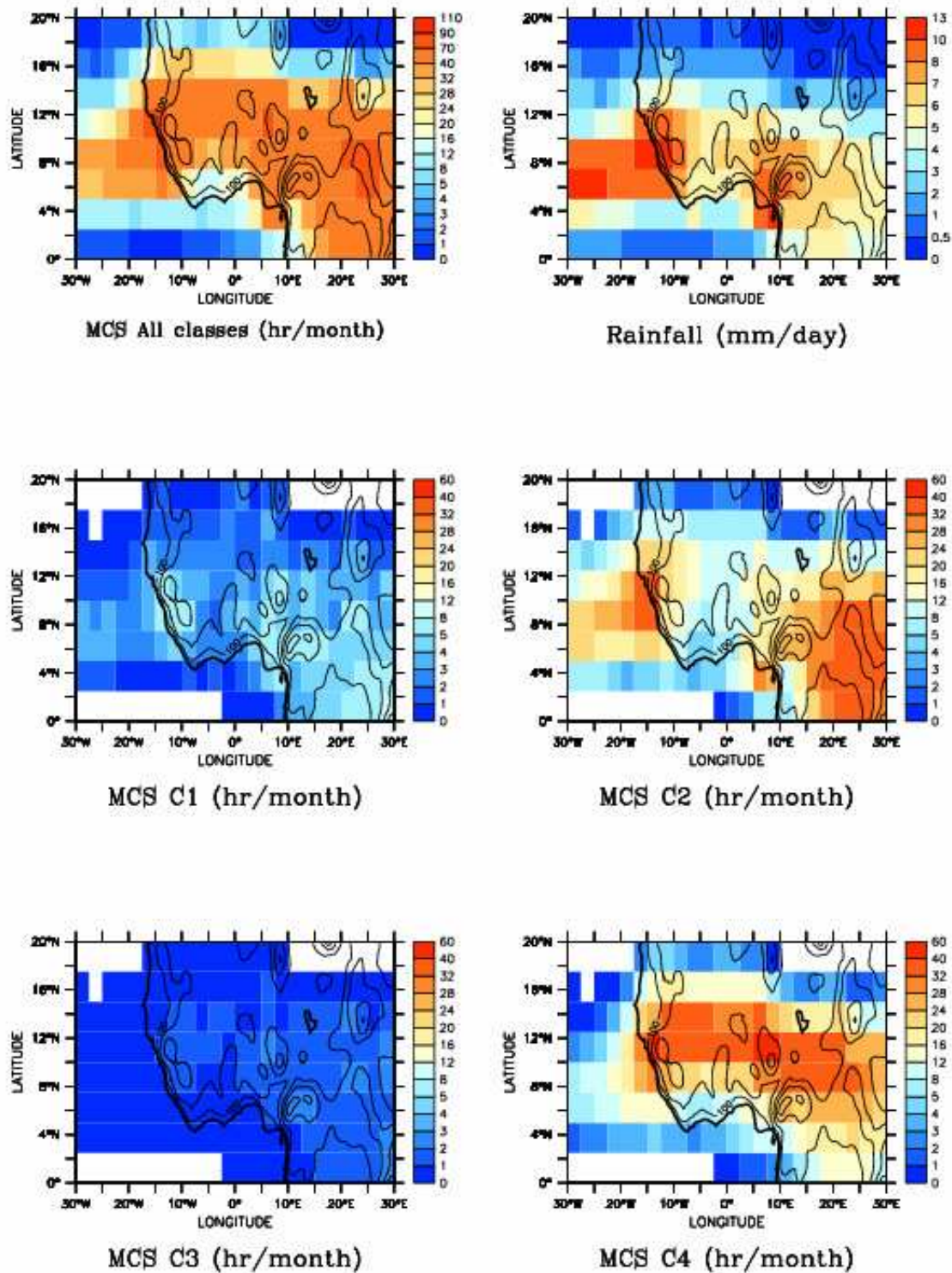


Figure 4 Long term average map of the convective systems cold cloudiness expressed in hr/month (see text for details) for (a) All the systems (c) C1 (d) C2 (e) C3 (f) C4. The corresponding rainfall climatology is also shown (b). The contours correspond to the terrain elevation in meters.

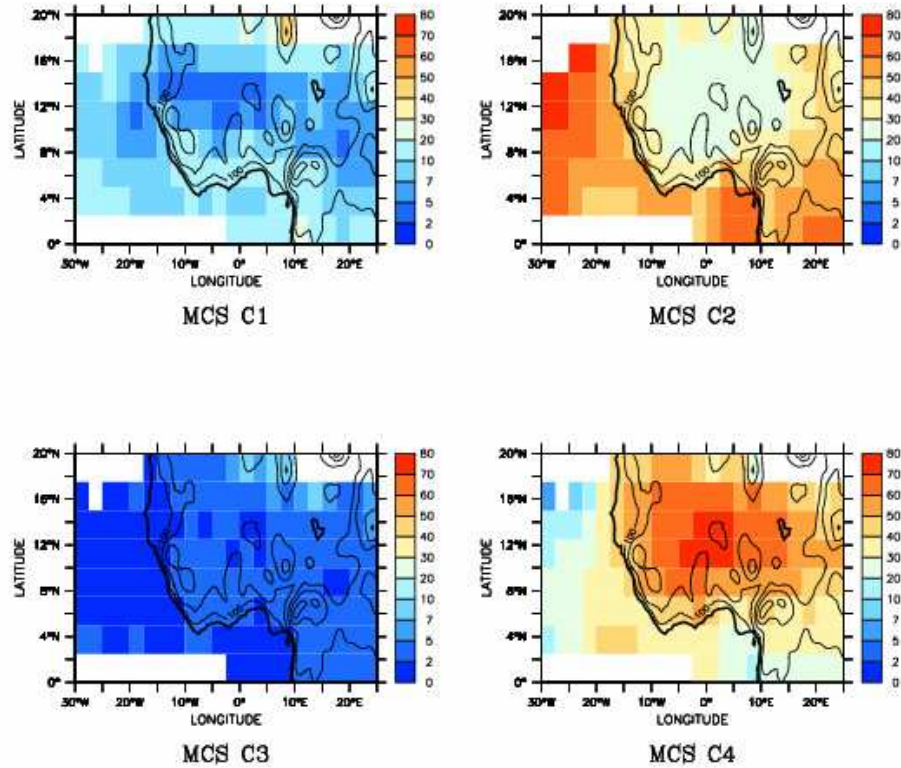


Figure 5 Long term average map of the convective systems contribution to the total cold cloudiness in % for (a) C1 (b) C2 (c) C3 (d) C4. The contours correspond to the terrain elevation in meters.

Interannual variability

The interannual variability is highlighted here over typical rain regimes of the West African monsoon.

Niamey and Dakar

Figure 6 shows the time series of the MCS over a $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ region corresponding to Dakar (17.5°W - 15°W and 12.5°N - 15°N). The average cold cloudiness is around 50% contributed almost equally by the C2 and C4 classes; the two others classes contributing marginally. The interannual coefficient of variation (standard deviation normalized by the mean) of the cold total cloudiness is roughly 13%. The variability of contribution of the C2 (~20%) and of the C4 category (~19%) to the total cold cloudiness is comparable. The C2 and C4 hence seem to explain the interannual

variability of the cold cloudiness over the Dakar area.

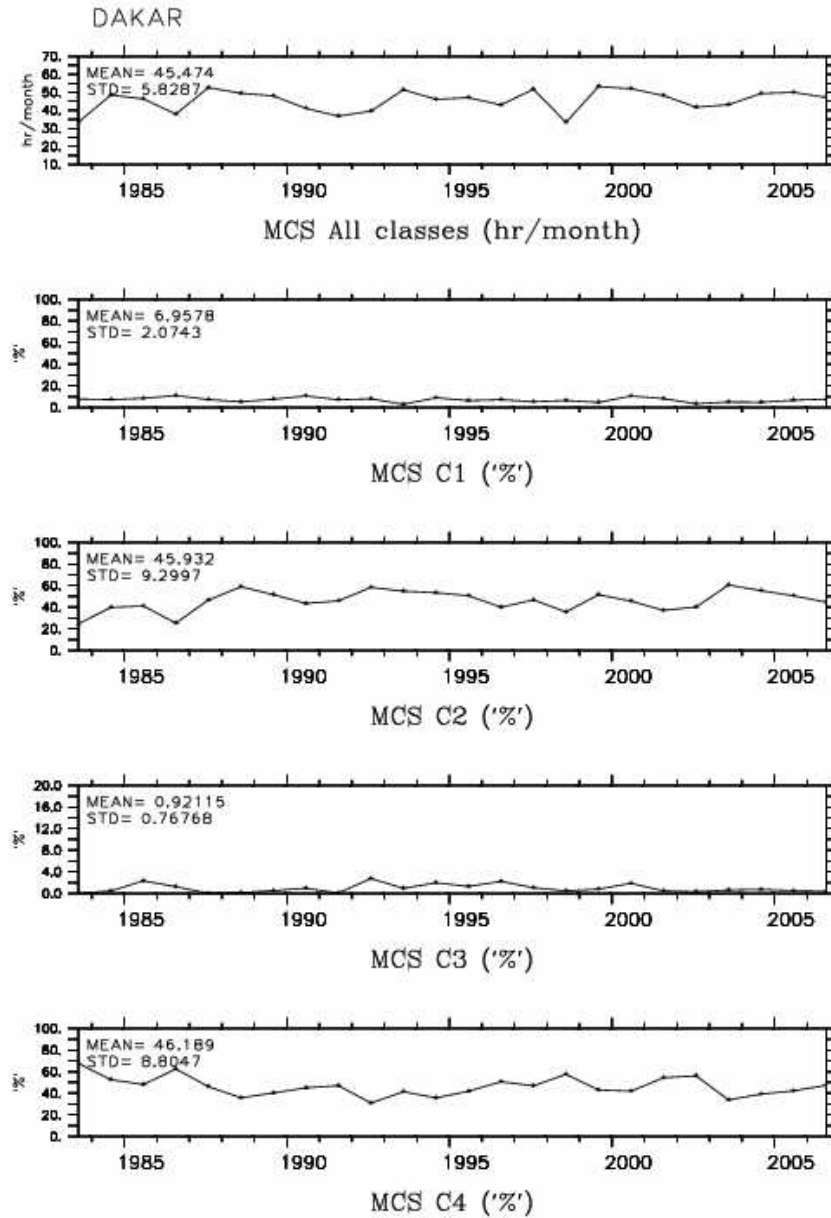


Figure 6 Time series for the Dakar area ($^{\circ}$ E- $^{\circ}$ E $^{\circ}$ N- $^{\circ}$ N). (a) All classes cold cloudiness in h/month. (b) Fraction of the cold cloudiness associated to Class 1. (c) Class 2. (d) Class 3 and (e) Class 4.

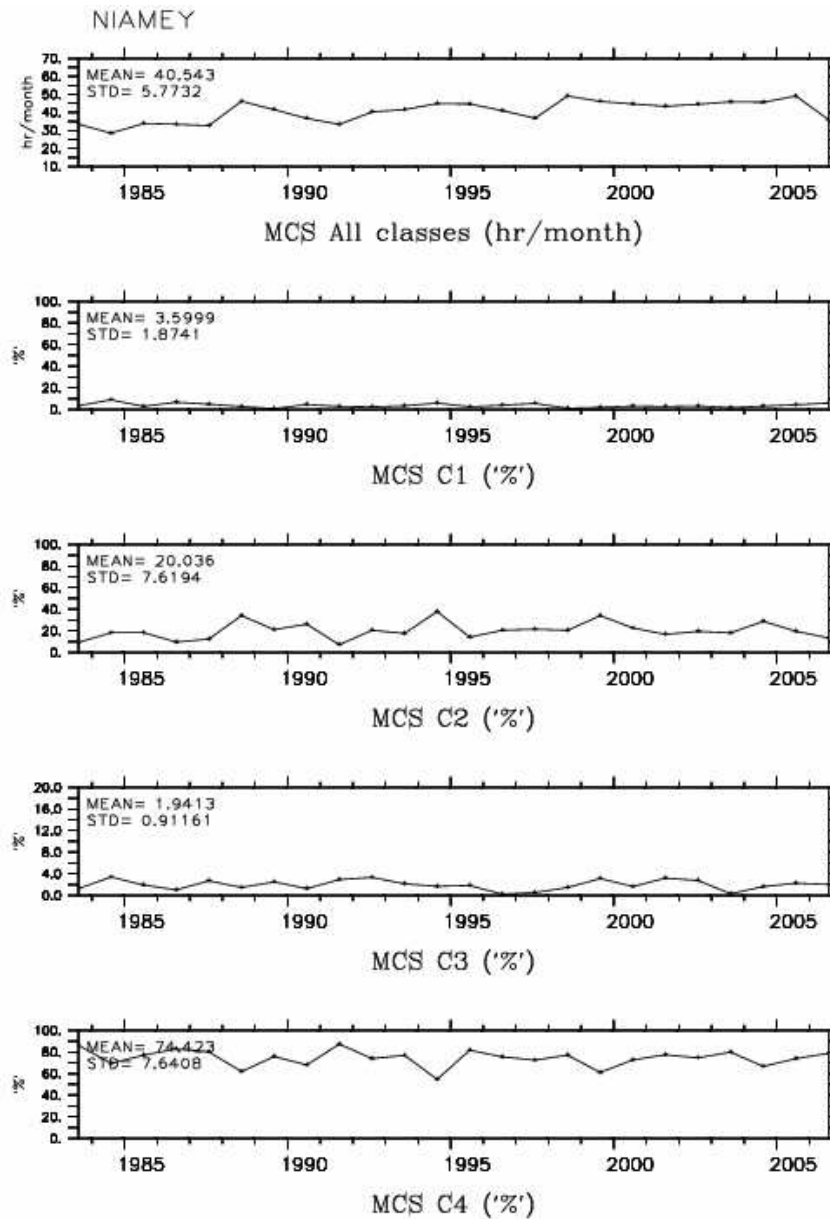


Figure 7 Time series for the Niamey area (0°E - 2.5°E and 12.5°N - 15°N). (a) All classes cold cloudiness in h/month. (b) Fraction of the cold cloudiness associated to Class 1. (c) Class 2. (d) Class 3 and (e) Class 4.

For the Niamey area (0°E - 2.5°E and 12.5°N - 15°N) the results are plotted in Figure 7. The cold cloudiness there is slightly less than that of Dakar ($\sim 40\%$) but reveals similar variability with a

coefficient of variation of 15%. The C4 category dominates the contribution to the average cold cloudiness, and then comes the C2 with a small 20% contribution. The normalized interannual variability of the contribution of the C4 (10%) is less than that of the C2 (38%). In 1984, the C4 are less frequent than usual while all the other classes occurred in excess of the climatology, yielding to the less cold covered season of the period. In 1991, , the contribution of the C2 ceils to 5% while the C4 contributes up to 90%. The C4 hence seems to dominate the interannual variability of cold cloudiness in the Niamey region.

The AMMA 2006 SOP

During the 2006 season West Africa was the locus of a Special Observing Period of the AMMA project (Redelsperger et al., 2006). During the preparation phase of this campaign the MCS classification and climatology were used to qualify, in terms of MCS, the convective activity over a number of sites following a similar analysis as above (Lafore, 2006 personal communication). The analysis has been performed in more details (including day to day variations; intraseasonal and synoptic analyses, etc...) and was shown as an objective tool to discuss the location of the operational center of the flights operations (Lafore et al, 2007). The 2006 African summer monsoon was a near-normal rainy season with some excess rainfall north to 15°N compared to 2001-2005 (Janicot et al., 2008). Results in figure 8 are here computed with respect to 1983-2006 and confirm the overall near normality of the rain anomaly with a positive anomaly in the Western Sahel and a negative one on the Eastern Sahel. On the Mont Cameroun area, a significant positive anomaly is observed. The MCS occurrence anomalies also convey a near normal picture for 2006 with low anomalies. The C4 class exhibits an overall negative anomaly, like the total cold cloud cover, while the C2 anomaly seems to better correlate with the rainfall map. A more detailed analysis of the role of each class in the interannual variability of rainfall is nevertheless needed to further link the MCS distribution to the rainfall variability.

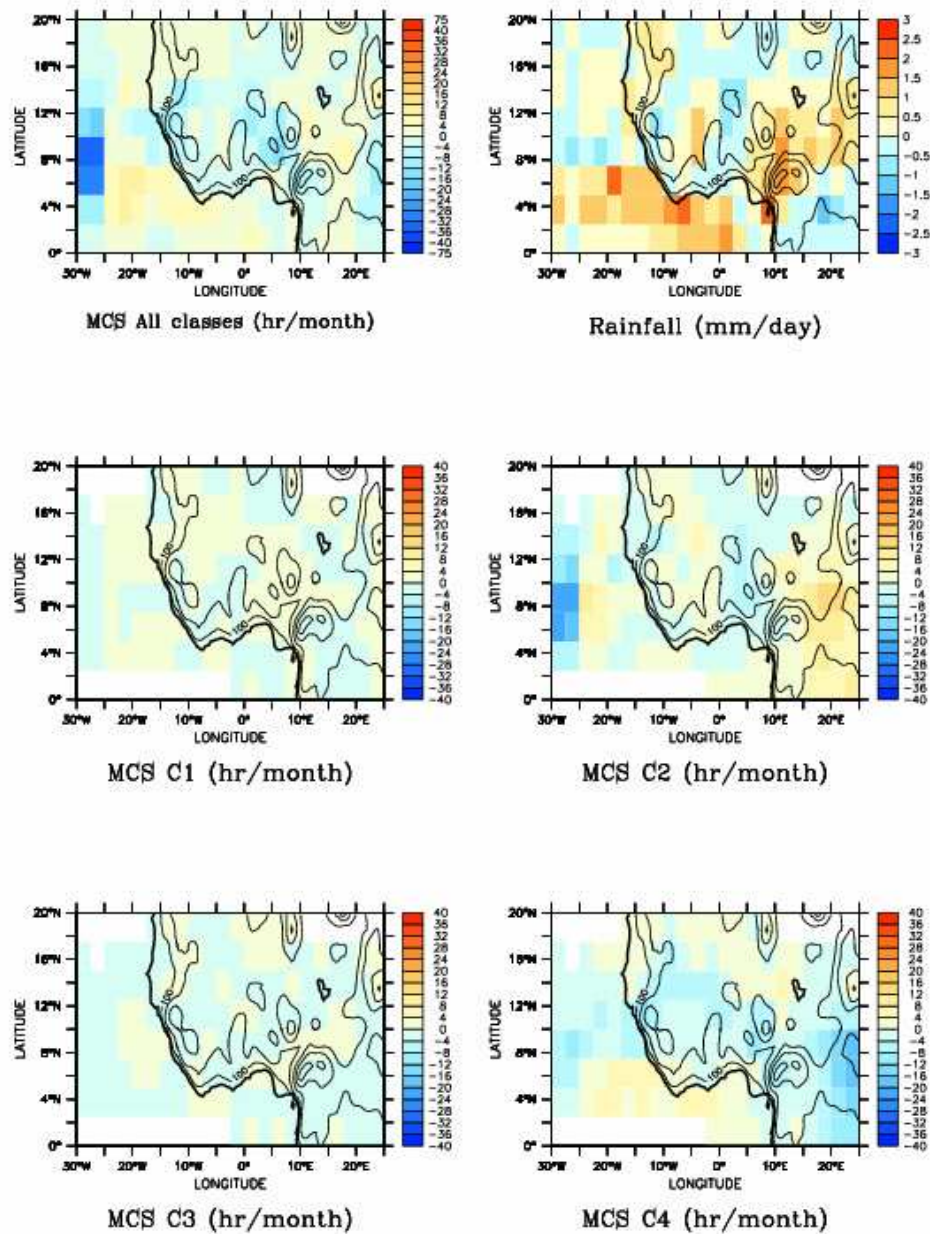


Figure 8 The maps of the anomaly of the season 2006 with respect to the climatology. (a) Cloud cloudiness for all classes (h/month) (b) GPCP rainfall estimates (mm/day) (c) cold cloudiness (h/month) for Class 1 (d) Class 2 (e) Class 3 and (f) Class 4. The contours correspond to the terrain elevation in meters.

Summary

A new data set is now available to the community and provides a homogeneous quality controlled simple classification of the cloud systems over the region. The data will be made available in the AMMA-SAT server. It will consist in netCDF files of each class's contribution in terms of cold cloudiness on a regular $2.5 \times 2.5^\circ$ grid for each month. The preliminary, rapid analysis of this new climatology reveals that:

- the C4, long lasting fast moving, dominates the Sahel region in terms of contribution to the cold cloudiness despite being, in numbers, less than all the other classes
- a weak relative interannual variability of the total cloudiness is observed over the Sahel (10%) which is well related to the variability of the C2 and the C2 MCS.
- 2006 is characterized by an overall negative to near normal anomaly in terms of MCS population.

More work is needed to link the MCS climatology to the rainfall climatology in some details.

...

Acknowledgments

This work has necessity the investment of many along the years and thanks are due to JL Redelsperger and M Desbois for their encouragements and initial contribution at an early stage of this effort. Based on a French initiative, AMMA, African Monsoon Multidisciplinary Analyses, was built by an international scientific group and is currently funded by a large number of agencies, especially from France, UK, US and Africa. It has been the beneficiary of a major financial contribution from the European Community's Sixth Framework Research Programme.

References

- Ali A., T. Lebel, A. Amani, 2008. Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Sécheresse*, 19 (4), 227-235
- Arnaud Y, Desbois M, Maizi J, 1992. Automatic tracking and characterization of African convective systems on meteosat pictures. *Journal of Applied Meteorology*, 31: 443-453.
- Arkin P. A. 1979: The Relationship between Fractional Coverage of High Cloud and Rainfall Accumulations during GATE over the B-Scale Array. *Monthly Weather Review*. Volume 107, Issue 10 pp. 1382-1387
- Aspiden, C. I., Y. Tourre, and J. B. Sabine, 1976: Some climatological aspects of West African disturbance lines during GATE. *Mon. Wea.* 104, 1039-1035
- Barnes G., and Sieckman K., 1984, The environment of fast and slow moving tropical mesoscale convective cloud lines, *Mon. Wea. Rev.*, 112, p1782-1794.
- Beck, C. , J. Grieser and B. Rudolf (2005): A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. DWD, Klimastatusbericht KSB 2004, ISSN 1437-7691, ISSN 1616-5063 (Internet), ISBN 3-88148-402-7, 181-190.
- Chen S., Houze R., and Mapes B., 1996, Multiscale variability of deep convection in relation to large-scale circulation in TOGA COARE, *J. of atm Sc.*, vol 53, n°10, p 1380,1409
- Dhonnou G (1985) *Traité de météorologie tropicale: application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale*, 150 pp, Eds : Météo-France, Paris
- Douville H. et P. Terray, 2007, Réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques. Chapitre 5 du rapport Eschime La Météorologie, N° 57 - MAI 2007
- Duvel J.P., Convection over Tropical Africa and the Atlantic Ocean during Northern Summer. Part I: Interannual and Diurnal Variations, *Mon. Wea. Rev.*, Vol 117, Issue 12 (December 1989) pp. 2782-2799
- Evans J. L., and R. E. Shemo, 1996: A procedure for automated satellite-based identification and climatology development of various classes of organized convection. *J. Appl. Meteor.*, 35, 638-652
- Fink AH, Reiner A. Spatio-temporal variability of the relation between African Easterly Waves and West African Squall Lines in 1998 and 1999. *J Geophys Res* 2003 ; 108 : 4332.
- Fink, A.; Vincent, D.G.; Emert, V. (2006): Rainfall Types in the West African Soudanian Zone during the Summer Monsoon 2002. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (8), pp. 2143-2164.
- Hodges, K. I., and C. D. Thomcroft, 1997: Distribution and statistics of African mesoscale convective weather systems based on the ISCCP Meteosat imagery. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2821-2837.
- Houze R. and A. K. Betts, 1981: Convection in GATE. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 19, 541-576.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, P. Arkin, A. Chang, R. Ferraro, A. Gruber, J. Janowiak, A. McNab, B. Rudolf, and U. Schneider, 1997: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 5-20.
- Janicot S, Thomcroft C, Ali A, Asencio N, Berry G, Bock O, Bourles B, Caniaux G, Chauvin F, Deme A, Kergoat L, Lafore J-P, Lavaysse C, Lebel T, Marticorena B, Mounier F, Nedelec P, Redelsperger J-L, Ravegnani F, Reeves CE, Roca R, de Rosnay P, Schlager H, Sultan B, Tomasini M, Ulanovsky A (2008) Large-scale overview of the summer monsoon over West Africa during the AMMA field experiment in 2006. *Ann Geophys* 26:2569-2595
- Lebel, T. and Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990 - 2007). *Journal of Hydrology*, 375(1-2): 52-64.
- Lafore J-P et al (2006) Forecaster's guide for West African synthetic analysis/forecast WASA/F. AMMA EU Du2.1.a, 12 pp
- Lafore, J.-P., and M. W. Moncrieff, 1989: A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 46, 521-544.
- Laing A. G., Fritsch J.M., Mesoscale Convective Complexes in Africa, *Mon. Wea. Rev.*, Vol 121, Issue 8 (August 1993) pp. 2254-2263
- Laing, A.G. and Fritsch J.M., 1997, The global population of mesoscale convective complexes, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 123, 389-405.
- Lamprey, B.L., 2008: Comparison of gridded multisatellite rainfall estimates with gridded gauge rainfall over West Africa. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 185-205.
- Maddox, R.A., 1980: Mesoscale Convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 61, 1374-1387
- Mapes, B. E., and R. A. Houze Jr., 1993: Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1398-1415.
- Mathon V, Laurent H. Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart J Roy Meteor Soc* 2001 ; 72 : 105-10
- Mathon V., 2001, Etude climatologique des systèmes convectifs de méso-échelle en Afrique de l'Ouest, PhD, University of Paris VII.

- Machado L.A.T., Desbois M., Duvel J.-Ph., Structural Characteristics of Deep Convective Systems over Tropical Africa and the Atlantic Ocean, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 120, Issue 3 (March 1992) pp. 392–406
- Mathon, V., Laurent, H., Lebel, T., 2002, “Mesoscale convective system rainfall in the Sahel”, *J. Applied Meteo.*, **41**, 1081-1092
- Payne S. W. and McGarry, 1977 : The Relationship of Satellite Inferred Convective Activity to Easterly Waves Over West Africa and the Adjacent Ocean During Phase III of GATE, *Mon. Wea. Rev.*, Vol 105, 413–420
- Roca, R. and Ramanathan, V.,: Scale dependence of monsoonal convective systems over the Indian Ocean, *J. Climate*, 13, 1286, 2000.
- Roca R., M. Viollier, L. Picon and M. Desbois, 2002, A multi satellite analysis of deep convection and its moist environment over the Indian Ocean during the winter monsoon, *J. Geophys. Res.*, vol 107, No: 10.1029/2000JD000040.
- Roca R., J-Ph. Lafore, C. Pirou and J.L. Redelsperger, 2005, Extra-tropical dry air intrusions into the West African Monsoon mid-troposphere: an important factor for the convective activity over Sahel, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 62, No. 2, pp. 390-407
- Rossow WB, Pearl C (2007) 22-Year survey of tropical convection penetrating into the lower stratosphere. *Geophysical Research Letters* 34(4): L04803
- Rowell DP, Milford JR. On the generation of squall line. *J Clim* 1993 ; 6 : 1181-93.
- Redelsperger, J. L., 1997: The mesoscale organization of deep convection. *The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection*, R. K. Smith, Ed., Kluwer Academic Publishers, 59–98.
- Redelsperger J-L, Thorncroft CD, Diedhiou A, Lebel T, Parker DJ, Polcher J (2006) African monsoon multidisciplinary analysis—an international research project and field campaign. *Bull Am Meteorol Soc* 87:1739–1746. doi:10.1175/BAMS-87-12-1739
- Rotunno, R., J. B. Klemp, and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463–485.
- Smith, E. A., and A. V. Mehta, 1990: The role of organized tropical storms and cyclones on intraseasonal oscillations in the Asian monsoon domain based on INSAT satellite measurements. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44, 195–218.
- Williams, M., and R. A. Houze Jr., 1987: Satellite-observed characteristics of winter monsoon cloud clusters. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 505–519.
- Zuidema P., 2003: Convective Clouds over the Bay of Bengal. *Monthly Weather Review* 131(5): 780.

Annexe C

DPC

Le DPC (Data Product Catalogue) est un document permettant de décrire de façon détaillée les produits d'entrée/sorties et les étapes internes à l'algorithme. Ces documents expliquent ainsi pour chaque chaîne de traitement le fonctionnement détaillé du code informatique associé à l'algorithme. Ces documents permettront de plus à décrire le format de sortie des produits Megha-Tropiques et seront distribués vers la communauté internationale avec les données.



Mesoscale Convective System tracking

Data Product Catalog

Level 2 & 3

Version 2.0

Février 2009

TABLE OF CONTENTS

<u>I. INTRODUCTION</u>	<u>3</u>
1. Objectives	3
2. Principle	4
<u>II. GENERAL INPUT DATA AND PRE-PROCESSING</u>	<u>5</u>
1. Geostationary data and regional boxes	5
1.1. Geostationary images	5
1.2. Regional boxes	5
2. Cloudy classifications	8
3. Geographical conversion files	8
4. Megha-Tropiques products	9
4.1. Rain products	9
4.2. Earth radiation budget products	10
4.3. Reading programmes	11
5. General pre-processing	11
<u>III. LEVEL 2 PRODUCTS</u>	<u>11</u>
1. Tracking	11
1.1. Input data	11
1.2. Output data	12
2. Sampling and data merging	15
2.1. Input data	15
2.2. Output data	16
3. Selection and classification	19
3.1. Input data	19
3.2. Output data	20
<u>IV. LEVEL 3 PRODUCTS</u>	<u>21</u>
1. Input data	21
2. Output data	22
<u>REFERENCES</u>	<u>24</u>
<u>ACRONYMS</u>	<u>24</u>
<u>FIGURES AND TABLES LIST</u>	<u>25</u>

I. Introduction

1. Objectives

Megha-Tropiques (MT) is a French-Indian mission (CNES/ISRO) aiming at documenting the energy budget of Mesoscale Convective Systems (MCS) in the intertropical belt. To this end, the mission takes 3 passive remote sensing instruments on board, among which SCARAB, a broad-band radiometer dedicated to the radiative budget and MADRAS, a technically scanning multi-frequency microwave imager to evaluate precipitations and cloud top properties. In addition to this original association of instruments, Megha-Tropiques is planned on an orbit with a low equatorial inclination which makes the repetitivity of measurements easier in the tropical zone. The MT mission intends to characterize the evolution of the energy budget during the life cycle of convective systems. MCS and their life cycle will be characterized by means of geostationary satellite observations by using the results of new developments under way at the Dynamic Meteorological Laboratory (LMD). The level 3 product put in place will combine the data obtained by geostationary meteorological satellites (system morphology) and MT measurements (geophysical parameters) (Figure 1).

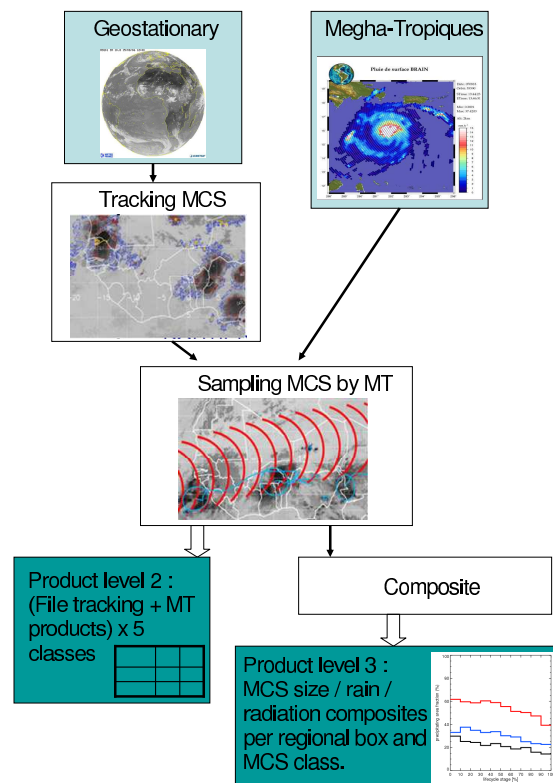


Figure 1: Schematic diagram

The Data Product Catalog (DPC) is intended to provide an overview of the data products that are needed (input) or produced (output) by the level 2 product and by the level 3 product.

2. Principle

The follow up of MCS and the characterization of their morphology are based on geostationary observations. This step corresponds to MCS tracking [2] and classification [3] stages (Figure 2). The product obtained at the end of these stages is a level 2 product. To obtain the precipitation characteristics and the radiative budget of MCS during their life cycle, MT products are coupled with geostationary observations. This step corresponds to data merging [4] and composites [5] stages. The product obtained at the end of these stages is a level 3 product.

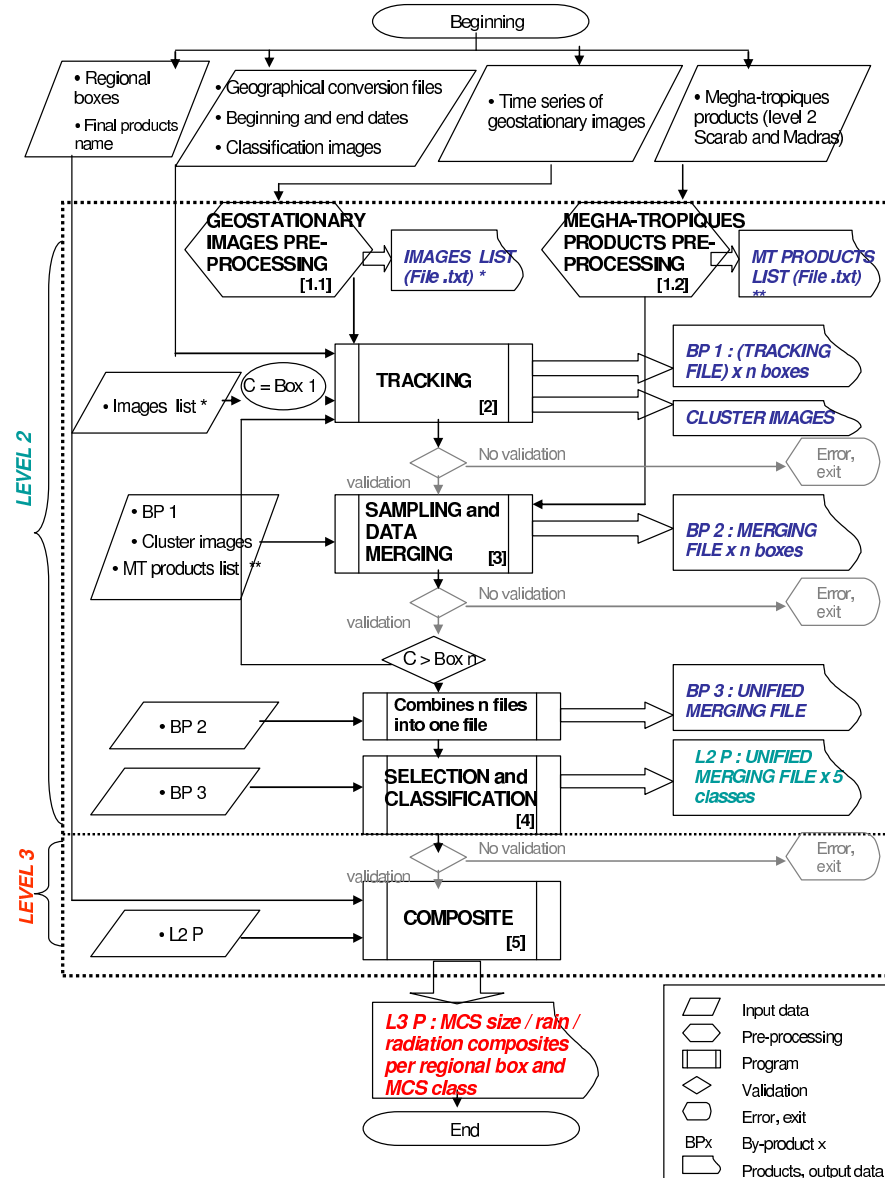


Figure 2: Algorithm diagram

II. General input data and pre-processing

1. Geostationary data and regional boxes

1.1. Geostationary images

Time series of geostationary images in the form of 2D matrix imagery are needed. Pixels are not processed independently.

For these images, infra-red and water vapour channels are more particularly needed. They have to be synchronized with a spatial resolution of 5 km and a time resolution of 30 min or 15 min. It should be noted that resolution degradation leads to a degradation of the MCS tracking and to a composite defined with 5 bins instead of 10 bins.

The intention is to process each every geostationary images time series independently and incorporate them in time and in space. Each time series corresponds to a specific regional box in the tropical belt (between 35°N/ 35°S) and to a geostationary satellite. For the tracking stage, they are processed one by one and the global geostationary images are processed. On the contrary, the composites are made inside regional boxes. To make composites, about one month data have to be collected and tracked previously.

Source: Images are provided by the 'Centre de Météorologie Spatiale' (CMS) at 'Météo-France'.

1.2. Regional boxes

Regional boxes are based on both geostationary parameters and climatic parameters. They have to be large enough to allow a sufficient number of MCS inside the boxes so as to make composites on these boxes.

As regards geostationary parameters (Table 1), several criteria have to be considered: an optimal coverage between a +/- 52° satellite position (Figure 3), the images quality, the images availability and the time resolution. According to these criteria, GOES 10 (time-resolution 15 min on South America), MSG 2 (time-resolution 15 min on South America, good quality and availability), Meteosat 7 (time-resolution 30 min on Africa and Indian ocean, good quality and availability) are retained. It is more difficult for the Pacific owing to the unregular acquisition of GOES 11 and owing to FY2-E which has just been launched. Nevertheless, GOES 11 (time-resolution 30 min) and FY2-E (time-resolution 30 min) are chosen. If there is a problem with FY-2E, we can use FY2D or INSAT 3 but their coverage is smaller and the time resolution is worse.

Note : Further boxes will be defined in order to follow up tropical cyclones. They will combine several geostationary satellites.

Table 1: Geostationary satellite characteristics

Geostatio-nary satellite	Coverage (WMO)	Maximum coverage	Satellite position	Optimum coverage (position + / - 52°)	Quality	Availability (for years 2006/2008)	Channels (μm)	Time resolution
Goes 10	108°W / 36°W	-	60°W	8°W / 112°W	Medium	Request to CMS		Full disk = 3h South America = 15min
Goes 11 (w)	180°W / 108°W	145.7°E / 55.7°E	135°W	83°W / 187°W	Bad	Request to NOAA	IR : 10.7 WV : 6.7	Full disk = 3h Wrong north = 30 min
Goes 12 (E)	108°W / 36°W	154.3°W / 4.3°E	75°W	23°W / 127°W	Bad		IR : 10.7 WV : 6.5	Full disk = 3h north / south = 30 min
MSG2	36°W / 36°E	80.55°W / 80.55°E	0°	52°W / 52°E	Good	2006 ok	IR : 10.8 WV : 6.2	Full disk = 15 min
Météosat 7	36°E / 108°E		57.5°E	5.5°E / 109.5°E	Good	2006 ok	IR : 11.5 WV : 6.4	Full disk = 30 min
FY2C	36°E / 108°E	25.2°E / 176.2°W	105°E	53°E / 157°E	Bad (out of order)		IR : 10.8 WV : 6.95	Full disk = 1h 30 min ?
FY2D	36°E / 108°E	-	86.5°E	34.5°E / 138.5°E	To check	Request for results of the quality test + samples	IR : 10.8 WV : 6.95 (?)	30 min ?
FY2E	108°E / 180°E	-	123°E	71°E / 175°E	Has just been launched		IR : 10.8 WV : 6.95 (?)	30 min ?
MTSAT1	108°E / 180°E	60.32°E / 140.32°W	140°E	88°E / 12°W	One channel out of order ; good	Is under negotiation with CMS	IR : 10.8 WV : 6.75	Full disk = 1h 5 north / 1 south = 30 min
INSAT3A	36°E / 108°E	-	93.5°E	41.5°E / 145.5°E		difficult	IR : 11.5 WV : 6.4	3 h ?

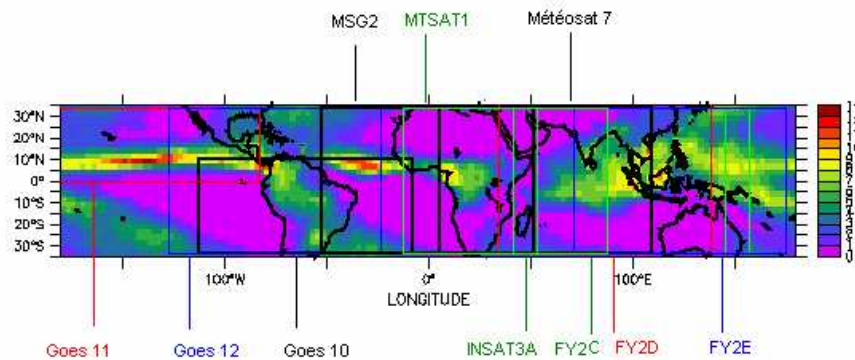


Figure 3: Geostationary satellite coverage

As regards climatic parameters, regional boxes must be placed where rains are detected. They vary with the seasons.

The boxes finally selected are shown below. (Figures 4 to 7)

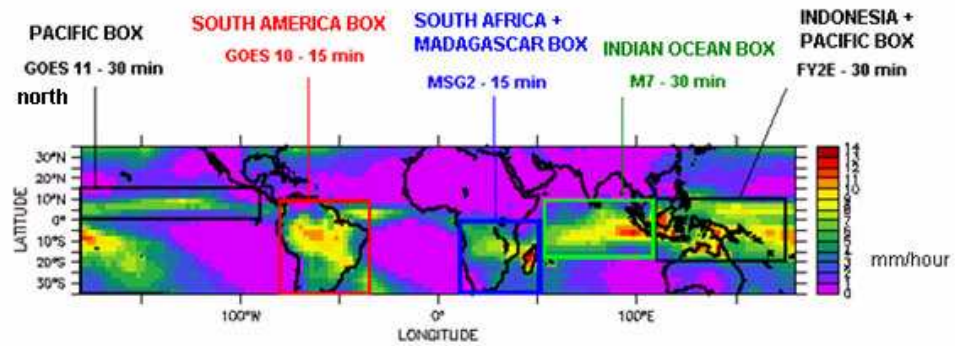


Figure 4: Regional boxes in winter

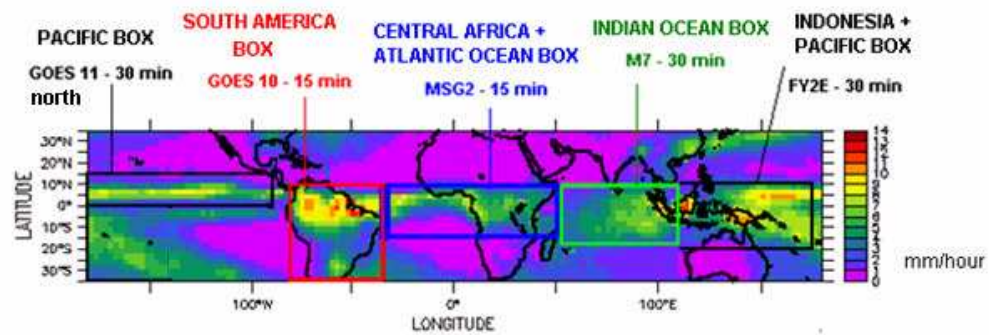


Figure 5: Regional boxes in spring

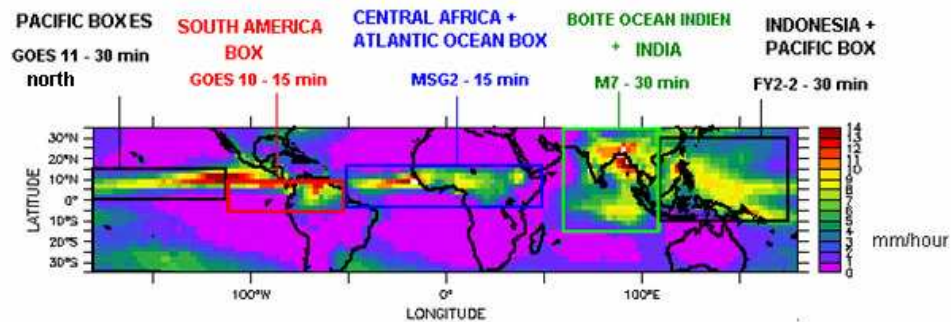


Figure 6: Regional boxes in summer

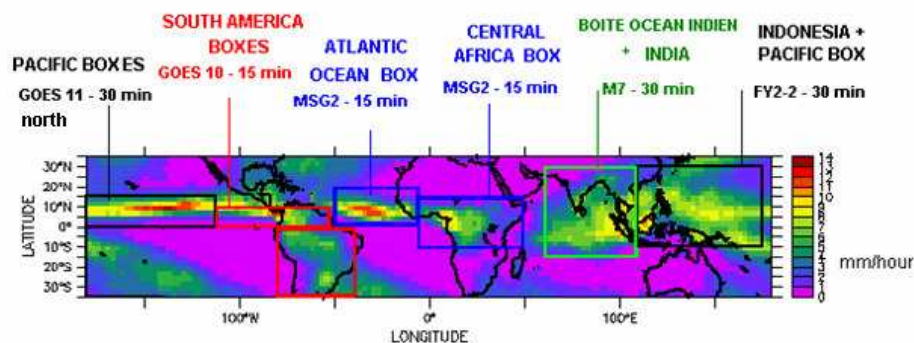


Figure 7: Regional boxes in autumn

2. Cloudy classifications

A “high clouds” mix class is needed. It will allow to segment geostationary images and detect MCS. It is derived from multispectral classifications and group high clouds classes together (high opaque and cumuliform clouds, high opaque and stratiform clouds, very high opaque and cumuliform clouds, very high opaque and stratiform clouds, high semitransparent thin clouds, high semitransparent meanly thick clouds, high semitransparent thick clouds). These classifications come from the algorithm developed by SEVIRI/MSG SAFNWC.

Source: Interactions Clouds Aerosols Radiations Etc (ICARE).

3. Geographical conversion files

For geographical conversions, several files are needed.

One file is a correspondence file between a geostationary pixel and its area. Indeed, the pixel area (km^2) varies with the latitude.

Another file is a correspondence file between the MT products (microwaves) and geostationary data. The MT products have to be coupled with the geostationary grid (orbital projection, initial geometry).

Source: ICARE.

4. Megha-Tropiques products

4.1. Rain products

Precipitation and cloud properties are studied by the microwave imager MADRAS. Its high frequencies (89 and 175 GHz) are sensitive to the scattering of the ice particles at the top of clouds. Thus, it provides a position of convective rain area on both the earth and the ocean. The spatial resolution depends on channels and is between 10 and 40 km.

The restituted rain product BRAIN (Level 2 product) includes surface rain (mm/h) and rainfall outline. The rain product file is shown below (Table 2).

Source: Nicolas Viltard / Sonia Labetoulle – ‘Centre d’Etudes des Environnements Terrestre et Planétaires’(CEET) – ‘Institut Pierre-Simon Laplace’ (IPSL).

Table 2: Nomenclature of parameters in the rain file - BRAIN product

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/ record	Bytes
Lin	Scan number	Int_16	N/A	TBD	x	2x
NbPix	Pixels number in the scan	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Lat	Latitude	Float_32	degree	-40 ... +40	104	416
Lon	Longitude	Float_32	degree	-180 ... +180	104	416
Year	Scan date : year (SSAA)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Month	Scan date : month (MM)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Day	Scan date : day (JJ)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Hour	Scan date : hour (hh)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Minute	Scan date : minut (mm)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
Second	Scan date: second (ss)	Int_16	N/A	TBD	x	2x
RainMask	Restitution diagnosis	Int_16	N/A	-1 = no restitution 0 = restitution done but possible anomaly +1 = restitution done, but equal to 0.0 +2 = restitution done	104	416
SfcRain	Surface rain	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	104	416
Convect	Convective rain	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	104	416
Quality	Quality	Float_32	N/A	TBD	104	416
LyrHgt	Altitudes of considered layers	Float_32	N/A	TBD	14	56
Structure flag	Indicates if outlines are available	Int_16	N/A	-1 = no restitution for the scan 0 = rain is at 0.0 for the scan +1 = outline available.	x	2x
Ciw	Liquid cloud content outline	Float_32	g.m ⁻³	TBD	104 x 14	5824
Rain	Liquid precipitation content outline	Float_32	g.m ⁻³	TBD	104 x 14	5824
Ciw	Ice cloud content outline	Float_32	g.m ⁻³	TBD	104 x 14	5824
Ice	Ice precipitation content outline	Float_32	g.m ⁻³	TBD	104 x 14	5824
Q1	Q1 outline	Float_32	N/A	TBD	104 x 14	5824

4.2. Earth radiation budget products

Outgoing radiative fluxes at the top of the atmosphere are measured by the radiometer SCARAB. The spatial resolution at nadir is 40 km.

The earth radiation budget products from SCARAB used here are short-wave and long-wave fluxes in the top of atmosphere in instants. They are level 2 products from "ScaRaB Erbe-Like" (SEL) algorithm (used for past scarab data) and from "ScaRaB Artificial Neural Network" (SANN) algorithm (in progress at LMD).

The file earth radiation budget product is shown below (Table 3).

Source: Olivier Chomette, Michel Voillier, Patrick Raberanto - CEET LMD.

Table 3: Nomenclature of parameters in the earth radiation budget file - SEL and SANN products

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/ record	Bytes
	Satellite Nadir Colatitude	Float_32	deg	-90.0 .. +90.0	1	4
	Satellite Nadir Longitude	Float_32	deg	-180.0 .. +180.0	1	4
Orbit Number	It's a relative number. Its origin should be close to the first real satellite orbit. It increases by 1 at the ascending node. Although not directly used in the secondary processing, this element is a practical index used in any satellite data comparisons. It is also useful to show the spatial coverage of one orbit without any overlap from another orbit.	Int_16	N/A	TBD	1	2
Pixel Latitude	Pixel stands for the elementary target viewed from the satellite. These latitude and longitude correspond to the centre of pixel, i.e the point where the sensor's optical axis intercepts the 30 km altitude earth envelop (top of the atmosphere for the ERB study). They are computed at the level 1 data processing, with orbit bulletin updated every 15 days. The accuracy is assumed to be the half-pixel, i.e. 20 km or 0.2 degree at the equator.	Float_32	deg	-90.0 .. +90.0	50	200
Pixel Longitude		Float_32	deg	-180.0 .. +180.0	50	200
Time	Time is needed for all pixels. The International Atomic Time (TAI) seconds from January 1, 1993 will probably be used. The range will be then approximately $3.7 \cdot 10^8$.. $5.1 \cdot 10^8$	Float_64	sec	$3.7 \cdot 10^8$.. $5.1 \cdot 10^8$	50	400
Shortwave Outgoing Flux at TOA SEL	The SW unfiltered radiance is converted into flux, using the view and sun angles, the scene identification and the SW Erbe bi-directional function (Suttles et al, 1988). A linear interpolation of BRDF between angles is used in order to remove the discrete nature of the angular model TOA : top of atmosphere (30km altitude as in Erbe).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200

Longwave Outgoing Flux at TOA SEL	The LW unfiltered radiance is converted into flux, using the view angle and colatitude, the scene identification and the LW Erbe anisotropic function (Suttles et al, 1988). A linear interpolation of the anisotropic function between view angle and colatitude is also used.	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200
Shortwave Outgoing Flux at TOA SANN	The SW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm (SANN).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200
Longwave Outgoing Flux at TOA SANN	The LW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm (SANN).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200

4.3. Reading programmes

The geostationary images reading programmes use the correspondence file between latitude, longitude and line, column. They also use maximum latitudes and longitudes and geostationary data files. The output of the reading programmes is a brilliance temperatures (°K) matrix.

The MT products reading programmes could be made by ICARE (framework).

5. General pre-processing

A general pre-processing of the geostationary images must be carried out upstream and can be useful for all users of these images. It can enable to make or check the geometrical images correction, the radiometric correction (calibration sensor) and to check the quality of the images (brilliance temperature margin error).

III. Level 2 products

1. Tracking

This step corresponds to the MCS detection and tracking. The tracking is based on the use of cloud classifications.

1.1. Input data

The input data are the following:

- **Pixel/area correspondence file ; lat, long /line, column correspondence file**
- **Beginning-end dates**
- **Geostationary images** time series - IR and WV channels - brilliance temperatures (°K) matrix

➤ **High clouds classifications.**

This step also requires a text file listing all the geostationary images.

➤ **Geostationary images list file**

This file results from the pre-processing of geostationary images preceding tracking (Figure 2). Its organization is presented in Table 4 and its parameters are given in Table 5. The file groups 15 min time-resolution images together for each geostationary satellite, ie for each regional box selected. In the case where time-resolution is not 15 min, 0 is printed.

Table 4: Organization of the geostationary images list file

	Geostationary 1		...	Geostationary n	
Time	File	Path		File	Path
0 min	...	.../.../		...	.../.../
15 min					
...					

Table 5: Nomenclature of parameters in the geostationary images list file

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/ record	Bytes
Time	Every 15 min (or 30 min)	Float_32	h.	TBD	Images number	4 x images number
File	Image-geo1-0min	CHAR	N/A	TBD	Images number	1 x images number
Path	.../.../..	CHAR	N/A	TBD	Images number	1 x images number

1.2. Output data

Tracking provides information on MCS organization like life period, size evolution, moving speed, life cycle evolution, etc.

The input data are the following:

➤ **Geostationary images clusters**

➤ **MCS tracking files: MCS are organized with MCS number chronological series**

There is a MCS tracking file for each regional box ie for each geostationary satellite. The organization of this file is presented in Table 6 and its parameters are given in Table 7. The parameters can change over time.

Table 6: Organization of the tracking file

The parameters described in the columns are given for each MCS. There is one MCS for each line. The MCS are indicated by an arrow.

X n boxes							
	Box 1	n0t	R	Life	daydeb	dayfin	...
	==> MCS No 1						
	==> ...						
	==> MCS No n						

Table 7: Nomenclature of parameters in the tracking file

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/ record	Bytes
n0	Cluster No image after image	Int_32	N/A	1 ... TBD	MCS number	4 x MCS number
n0t	Cluster No in tracking sequence	Int_32	N/A	1 ... TBD	MCS number	4 x MCS number
R	Flag regional box	Int_16	N/A	1, 5 (n box)	5 (n box)	10
life	MCS life period (number of slots)	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
daydeb	Tracking beginning date JJJ.SS (JJ cluster birth date in Julian day, SS slot No)	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
dayfin	Tracking end date JJJ.SS (JJ cluster death date in Julian day, SS slot No)	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
hdeb	Tracking beginning hour	Float_32	h.	TBD	MCS number	4 x MCS number
hfin	Tracking end hour	Float_32	h.	TBD	MCS number	4 x MCS number
vmoy	Cluster average speed	Float_32	Km.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
timoykm2	Cluster average size	Float_32	km ²	TBD	MCS number	4 x MCS number
timaxkm2	Cluster maximal size	Float_32	km ²	TBD	MCS number	4 x MCS number
londeb	Beginning longitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
latdeb	Beginning latitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
lonfin	End longitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
latfin	End latitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
lonmin	minimum longitude reached	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
latmin	minimum latitude reached	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
lonmax	maximum longitude reached	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
latmax	maximum latitude reached	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
iti	Cluster size in pixel	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
Timoy	Cluster average size in pixel	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
Timax	Cluster maximal size in pixel	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
iticu	Size of all convective cells within cluster (in pixels)	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
Tmin	Minimum temperature	Float_32	°K	TBD	MCS number	4 x MCS number
Tmoy	Average temperature	Float_32	°K	TBD	MCS number	4 x MCS number
sig	Standard deviation of cluster temperatures	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
grd	Temperature gradient of cluster western side	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number

igrd	Clear sky detection test in the west of the cluster	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
daytu	The integer part corresponds to the Julian day and the decimal part to the slot	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
hlocal	Local hour	Float_32	H.	TBD	MCS number	4 x MCS number
alon	Mass center longitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
alat	Mass center latitude	Float_32	Degree	-180°+180°	MCS number	4 x MCS number
jcm	Mass center column coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
icm	Mass center line coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
jco	Geometric center column coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
ico	Geometric center line coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
jcw	Western side middle position column coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
icw	Western side middle position line coordinates	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
jd	Mass center column moving	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
id	Mass center line moving	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
v	Cluster instantaneous speed	Float_32	Km/h ou m/s ?	TBD	MCS number	4 x MCS number
if1	Cluster No receiving melting	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
if3	In case of melting with more than 5 clusters : $if3z = if3z + n0 \times 10^{(2 \times (n_{melting} - 1))}$ ($n_{melting}$: number of melting)	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
if2	In case of melting with less than 5 clusters : $if2z = if2z + n0 \times 10^{(2 \times (n_{melting} - 1))}$ In case of melting with one cluster : $if2z = n0$: melting cluster No	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
nsp	Number of divisions	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
ang	Angle between the main ellipse axis and the equator (if ellipse cluster modeling)	Float_32	Degree	TBD	MCS number	4 x MCS number
exc	Ellipse eccentricity	Float_32	N/A	0 - 1	MCS number	4 x MCS number
ivol	Volume index = sum (Tb_Tthreshold) on the whole cluster surface	Float_32	km ² x C	TBD	MCS number	4 x MCS number
itikm2	Cluster size (=itiz x area (jcoz, icoz))	Float_32	km ²	TBD	MCS number	4 x MCS number
iticukm2	Convective cells size (=iticuz x area (jcoz, icoz))	Float_32	km ²	TBD	MCS number	4 x MCS number

The analysis of the different MCS characteristics provide information about MCS speed, MCS area evolution, MCS cumulated area evolution, trajectory (video) and time series on a geographical window.

Based on the tracking file, outfiles in the form of bar charts can be made:

- MCS number as a function of their speed
- MCS number as a function of their area
- MCS number as a function of their life cycle
- All systems average speed distribution as a function of their life period
- No split / no merge systems average speed distribution as a function of their life period
- MCS area distribution as a function of life period
- Cumulated area distribution as a function of average speed
- Cumulated area distribution as a function of life period.

2. Sampling and data merging

This step corresponds to the coupling between the morphological characteristics of MCS detected thanks to geostationary data and MT products (rain rates and earth radiation budget at the top of clouds). MCS are sampled for a regional box corresponding to a geostationary satellite. Tracking files are interfaced with MT mission orbit.

2.1. Input data

The input data are the following:

- **MCS tracking files: obtained above (see 1.2.)**
- **Cluster images**

We work on the cluster images obtained by cloudy detection processing. In these images threshold MCS are numbered. A link has to be done between MCS No inside the cluster images and MCS No inside the tracking file. These numbers are different.

- **Megha-Tropiques rain and earth radiation budget products**
- **Orbit and instruments satellite longitude and latitude**

This step also requires a text file listing all MT products.

- **MT products list file**

This file results from the pre-processing of MT products preceding tracking (Figure 2). Its organization is presented in Table 8 and its parameters are given in Table 9. It lists MT products for each MT satellite passage.

Table 8: Organization of the Megha-Tropiques products list file

MT satellite passage	BRAIN product (rain)		SEL / SANN products (Energy budget)	
	File	Path	File	Path
Passage 1				
...				
Passage n				

Table 9: Nomenclature of parameters in the Megha-Tropiques products list file

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/record	Bytes
Passage	Time	Float_32	Hour	TBD	Passage number	4 x passage number
File	MT product	CHAR	N/A	TBD	Passage number	1 x passage number
Path	.../..	CHAR	N/A	TBD	Passage number	1 x passage number

➤ **Correspondence file**

If there is no correspondence file between the MT products (microwave) and the geostationary data, an intermediate file has to be made and used during sampling and data merging. Its aims at linking cluster images and MT satellite orbit. Its organization is presented in Table 10 and its parameters are given in Table 11.

Table 10: Organization of the SearchFile

Date	File	Cluster images	MT satellite orbit
Instant 1	File 1	Image 1	Orbit 1
...			
Instant n	File n	Image n	Orbit n

Table 11: Nomenclature of parameters in the SearchFile

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/record	Bytes
Instant	Hour	Float_32	hour	TBD	Passage number	4 x passages number
Image	File	CHAR	N/A	TBD	Passage number	4 x passages number
Orbit	File	CHAR	N/A	TBD	Passage number	4 x passages number

2.2. Output data

This step allows to access to rain and earth radiation budget for each detected MCS. It also allows to group all this information with morphological characteristics inside one file.

The output data are the following:

- **Determination flag to know if the cluster has been sampled by MT**
- **MCS area percentage detected by MT**
- **Merging file : (tracking + MT products) file**

This file contains both tracking data (see 1.2) and MT data for each MCS sampled. There is one file for each regional box ie for each geostationary satellite. Its organization is presented in Table 12. Only the new parameters of MT products are presented in Table 13. Tracking data are the parameters in Table 7.

Table 12: Organization of the merging file

X n boxes								
Box 1	Detected MCS morphological characteristics from geostationary data				MT observations (rain rate, energy budget) for each MCS detected by MT			
	nOt	Life	daydeb	...	Mean-Rain	SizeDetect	STD-Detect	...
==> MCS No 1								
==> ...								
==> Detected MCS								
==> Undetected MCS					0	0	0	0
==> MCS No n								

Tracking file
MT product

Table 13: Nomenclature of parameters in the merging file

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/record	Bytes
DAY	Day	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
slot	Image	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
_MCS number	MCS number	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
Time		Float_32		TBD	MCS number	4 x MCS number
numMCSFich	MCS No in the file	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
numMCSImage	MCS No in the image	Int_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
ilife	MCS life cycle	Float_32		TBD	MCS number	4 x MCS number
isize	MCS size	Float_32	km ²	TBD	MCS number	4 x MCS number
Mean-Conv	Mean convective rain inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
MEAN_SfcRain	Mean rain inside MCS (if no data on convective rain)	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
MEAN_SfcRain1.0	Mean rain 1 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
MEAN_SfcRain2.5	Mean rain 2.5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
MEAN_SfcRain5.0	Mean rain 5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number
MEAN_SfcRain7.5	Mean rain 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	MCS number	4 x MCS number

STD_SfcRain	Mean rain Standard deviation inside MCS	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
STD_SfcRain1.0	Mean rain Standard deviation 1 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
STD_SfcRain2.5	Mean rain Standard deviation 2,5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
STD_SfcRain5.0	Mean rain Standard deviation 5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
STD_SfcRain7.5	Mean rain Standard deviation 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	MCS number	4 x MCS number
%sizeDetect	Rain fraction inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	MCS number	4 x MCS number
%Detect1.0	Rain fraction at 1 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	MCS number	4 x MCS number
%Detect2.5	Rain fraction at 2.5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	MCS number	4 x MCS number
%Detect5.0	Rain fraction at 5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	MCS number	4 x MCS number
%Detect7.5	Rain fraction at 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	MCS number	4 x MCS number
Shortwave Outgoing Flux at TOA SEL	SW unfiltered radiance is converted into flux, TOA: top of atmosphere.	Float_32	Wm ⁻²	TBD	MCS number	4 x MCS number
Longwave Outgoing Flux at TOA SEL	LW unfiltered radiance is converted into flux.	Float_32	Wm ⁻²	TBD	MCS number	4 x MCS number
Shortwave Outgoing Flux at TOA SANN	SW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm.	Float_32	Wm ⁻²	TBD	MCS number	4 x MCS number
Longwave Outgoing Flux at TOA SANN	LW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm.	Float_32	Wm ⁻²	TBD	MCS number	4 x MCS number

The analysis of the MCS associated with the MT satellite orbit also allow to make a video of the MCS sampling and to study MCS area evolution. Outfiles as initial bar charts can be set up from the merging file. They allow coupling the first MCS classes with MT orbit, evaluating the redistribution of detected MCS for each first classes as a function of life period and the area percentage of detected MCS.

Note:

At the end of this step, the n merging files are grouped together into only one file (Table 14).
At the present time, all the MCS are kept including those which are not sampled.

Table 14: Organization of the unified merging file

Box 1	Morphological characteristics of MCS detected from geostationary data				MT observations (rain rate, energy budget at the top of clouds) for each MCS detected by MT			
	n0t	Life	daydeb	...	Mean-Rain	SizeDetect	STD-Detect	...
=> MCS No 1								
=> ...								
=> MCS detected								
=> MCS not detected					0	0	0	0
=> MCS No n								
...								
Box n	Morphological characteristics of MCS detected from geostationary data				MT observations (rain rate, energy budget at the top of clouds) for each MCS detected by MT			
	n0t	Life	daydeb	...	Mean-Rain	SizeDetect	STD-Detect	...
=> MCS No 1								
=> ...								
=> MCS detected								
=> MCS not detected					0	0	0	0
=> MCS No n								

3. Selection and classification

This step corresponds to the MCS classification in view of a MCS coherent segmentation per regional box. MCS normalization is needed to be able to study them. It deals with the MCS size evolution normalization and the MCS life cycle normalization. The MCS size is normalized between 0 and 1 as a function of the percentage life cycle (with bin of 1%, 5% and 10%). Then, selected and normalized MCS are classified. At the present time, the classification is made according to life cycle but it could change in the future (birth hour, state (no split/no merge), land/ocean ...).

3 classes are retained:

- Life cycle < 3 hours
- 3 hours < Life cycle < 24 hours
- Life cycle > 24 hours. This class contains tropical cyclones.

The MCS with a life cycle between 3 and 24 hours are reclassified into 3 classes:

- MCS size as a function of life cycle is in a plateau shape
- MCS size as a function of life cycle is in the shape of one maximum
- MCS size as a function of life cycle is in the shape of several maximums.

3.1. Input data

The input data consists in the unified merging file obtained above (see Table 14).

- **The unified merging file.**

3.2. Output data

The output data are the following:

➤ **Structure-select : data structures containing the selected MCS**

This data structure contains the MCS selected according to their life cycle.

➤ **Unified merging file x 5 classes**

The unified merging file is divided into 5 files. Each file groups the MCS corresponding to one of the 5 classes defined according to their life cycle. Its organization is presented in Table 15. The parameters are the same as parameters in the unified merging file but they are reorganized.

Table 15: Organization of the unified merging file x 5 classes

X 5 classes								
CLASS 5 : LIFE > 24 H								
Box 1	Morphological characteristics of MCS detected from geostationary data				MT observations (rain rate, energy budget at the top of clouds) for each MCS detected by MT			
	n0t	Life	daydeb	...	Mean-Rain	SizeDetect	STD-Detect	...
==> MCS No 1								
	Information for each image containing the MCS No 1							
	nmst	strs	iti	...				
Image No 1								
...								
Image No n								
==> MCS No n								
...								
Box n	Morphological characteristics of MCS detected from geostationary data				MT observations (rain rate, energy budget at the top of clouds) for each MCS detected by MT			
	n0t	Life	daydeb	...	Mean-Rain	SizeDetect	STD-Detect	...
==> MCS No 1								
	Information for each image containing the MCS No 1							
	nmst	strs	iti	...				
Image No 1								
...								
Image No n								
==> MCS No n								
...								

From merging files, outfiles as MCS number, life cycle and size bar charts functions of birth hour can be made to study MCS segmentation. These 5 files constitute the final level 2 product.

IV. Level 3 products

The composites step (level 3) must allow to reconstitute radiation fluxes evolution (w/m^2), rainfall rate (mm/h) and rainfall area (total area %) statistically inside a MCS composite for one specific class and one specific regional box (see example in Figure 8).

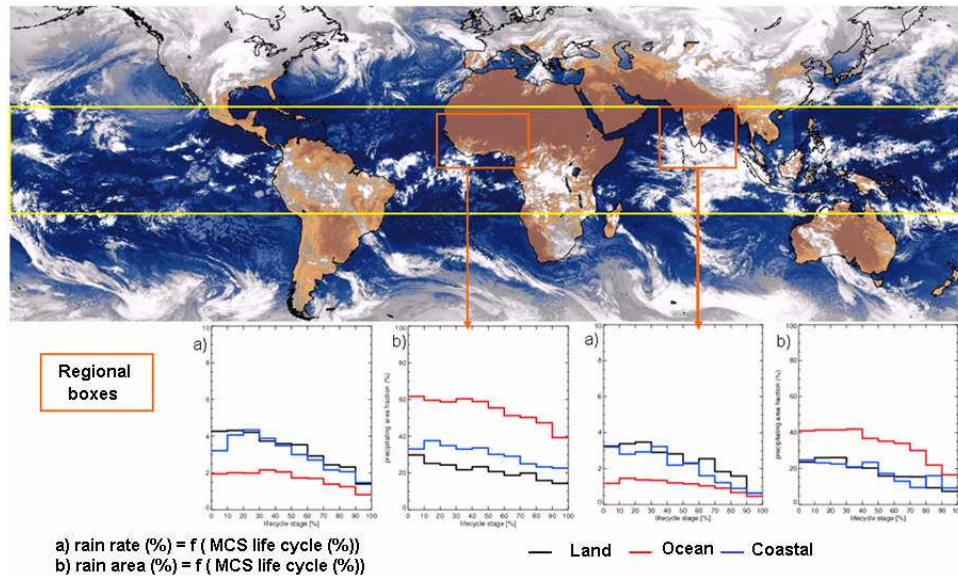


Figure 8: Presentation of final level 3 product

Normalized systems are added. 5 MCS average composites are thus obtained (one per class). The normalized curve of the MCS size evolution as a function of life cycle is correlated with bar charts of MCS numbers detected by MT. It deals with the MCS detection time.

Different composites are obtained:

- rain composite inside a MCS composite class
- energy budget inside a MCS composite class
- vertical structure inside a MCS composite.

At the present time, only the simple case of the no split and the no merge MCS is processed. A classification according to land / ocean / coastal can be made.

1. Input data

The input data are the following:

- Regional boxes
- Final product name
- MT orbit file
- Merging file x 5 classes. This file is obtained above (see Table 15).

2. Output data

We get a level 3 product:

➤ **Final level 3 product.**

This file presents the average evolution on 10 bins of the main parameters obtained. These parameters characterize the MCS morphology (size), rainfall and radiation fluxes for each of the 5 MCS composites and for each regional box. The file organization is presented in Table 16 and its parameters are given in Table 17.

Table 16: Organization of the final level 3 product

BOX 1	Class 1 MCS composite			...	Class 5 MCS composite		
	Bin 1	...	Bin 10		Bin 1	...	Bin 10
Size							
Rain							
Flux							
...							
BOX N	Class 1 MCS composite			...	Class 5 MCS composite		
	Bin 1	...	Bin 10		Bin 1	...	Bin 10
Size							
Rain							
Flux							
...							

Table 17: Nomenclature of parameters in the final level 3 product

Parameter	Note	Data Type	Units	Range	Elem/ record	Bytes
R	Flag regional box	Int_16	N/A	1, 5 (n box)	5 (n box)	10
Bin	Bin	Int_16	N/A	0 - 10	50	100
Size evolution (for 10 bins and for each of the 5 MCS composite classes)						
Size	MCS size	Float_32	km ²	TBD	50	200
Rain evolution (for 10 bins and for each of the 5 MCS composite classes)						
Mean-Conv	Mean convective rain inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	50	200
MEAN_SfcRain1.0	Mean rain 1 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	50	200
MEAN_SfcRain2.5	Mean rain 2.5 mm/h inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	50	200
MEAN_SfcRain5.0	Mean rain 5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	50	200
MEAN_SfcRain7.5	Mean rain 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	mm.h ⁻¹	TBD	50	200
STD_SfcRain1.0	Mean rain Standard deviation 1 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	50	200
STD_SfcRain2.5	Mean rain Standard deviation 2,5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	50	200
STD_SfcRain5.0	Mean rain	Float_32	N/A	TBD	50	200

	Standard deviation 5 mm.h ⁻¹ inside MCS					
STD_SfcRain7.5	Mean rain Standard deviation 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS	Float_32	N/A	TBD	50	200
%Detect1.0	Rain fraction at 1 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	50	200
%Detect2.5	Rain fraction at 2.5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	50	200
%Detect5.0	Rain fraction at 5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	50	200
%Detect7.5	Rain fraction at 7.5 mm.h ⁻¹ inside MCS percentage	Float_32	%	0-100	50	200
Radiative flux evolution (for 10 bins and for each of the 5 MCS composite classes)						
Shortwave Outgoing Flux at TOA SEL	The SW unfiltered radiance is converted into flux, TOA : top of atmosphere (30km altitude as in Erbe).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200
Longwave Outgoing Flux at TOA SEL	The LW unfiltered radiance is converted into flux,	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200
Shortwave Outgoing Flux at TOA SANN	The SW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm (SANN).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200
Longwave Outgoing Flux at TOA SANN	The LW unfiltered radiance is converted into flux, using the ScaRaB Artificial Neural Network Algorithm (SANN).	Float_32	Wm ⁻²	TBD	50	200

References

- Scarab Data Product Catalog – Level 2 & 3, June 2008.
- User Manual for the PGE01-02-03 of the SAFNWC / MSG: Scientific part, Météo-France, Centre de météorologie Spatiale, February 2005.

Acronyms

CMS	Centre de Météorologie Spatial
CNES	Centre National d'Etudes Spatial
CEET	Cycle de l'Eau et de l'Energie dans les Tropiques
CEETP	Centre d'Etudes des Environnements Terrestre et Planétaires
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
ICARE	Interactions Clouds Aerosols Radiations Etc
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
IR	Infra-Red
ISRO	Indian Space Research Organisation
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
MCS	Mesoscale Convective System
MT	Megha-Tropiques
SANN	ScaRaB Artificial Neural Network
ScaRaB	Scanner for Radiation Budget
SEL	ScaRaB Erbe-Like
TOA	Top Of the Atmosphere
WV	Water Vapor
WMO	World Meteorological Organization.

Figures and tables list

Figure 1: Schematic diagram.....	3
Figure 2: Algorithm diagram	4
Figure 3: Geostationary satellite coverage.....	6
Figure 4: Regional boxes in winter.....	7
Figure 5: Regional boxes in spring	7
Figure 6: Regional boxes in summer	7
Figure 7: Regional boxes in autumn	8
Figure 8: Presentation of final level 3 product.....	21
Table 1: Geostationary satellite characteristics.....	6
Table 2: Nomenclature of parameters in the rain file - BRAIN product.....	9
Table 3: Nomenclature of parameters in the earth radiation budget file - SEL and SANN products	10
Table 4: Organization of the geostationary images list file	12
Table 5: Nomenclature of parameters in the geostationary images list file.....	12
Table 6: Organization of the tracking file	12
Table 7: Nomenclature of parameters in the tracking file	13
Table 8: Organization of the Megha-Tropiques products list file	16
Table 9: Nomenclature of parameters in the Megha-Tropiques products list file	16
Table 10: Organization of the SearchFile.....	16
Table 11: Nomenclature of parameters in the SearchFile	16
Table 12: Organization of the merging file	17
Table 13: Nomenclature of parameters in the merging file.....	17
Table 14: Organization of the unified merging file	19
Table 15: Organization of the unified merging file x 5 classes	20
Table 16: Organization of the final level 3 product	22
Table 17: Nomenclature of parameters in the final level 3 product	22

Bibliographie

1. **Arkin, P. A.** (1979). *The Relationship between Fractional Coverage of High Cloud and Rainfall Accumulations during GATE over the B-Scale Array*. Mon. Weather Rev., **107** (10), pp. 1382–1387.
2. **Arnaud, Y., M. Desbois et J. Maizi** (1992). *Automatic Tracking and Characterization of African Convective Systems on Meteosat Pictures*. Journal of Applied Meteorology, **31** (5), pp. 443–453.
3. **Aspliden, C. I., Y. Tourre et J. B. Sabine** (1976). *Some Climatological Aspects of West African Disturbance Lines During GATE*. Monthly Weather Review, **104** (8), pp. 1029–1035.
4. **Augustine, J. A. et K. W. Howard** (1991). *Mesoscale Convective Complexes over the United States during 1986 and 1987*. Monthly Weather Review, **119** (7), pp. 1575–1589.
5. **Barnes, R. A., W. L. Barnes, C.-H. Lyu et J. M. Gales** (2000). *An Overview of the Visible and Infrared Scanner Radiometric Calibration Algorithm*. J. Atmos. Ocean. Technol., **17** (4), pp. 395–405.
6. **Bellerby, T.** (2006). *High-Resolution 2-D Cloud-Top Advection From Geostationary Satellite Imagery*. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, **44** (12), pp. 3639–3648.
7. **Berges, J., I. Jobard et R. Roca** (2009). *A new index to estimate precipitation using cloud growing rate*. Geophys. Res. Lett., **36** (8), pp. 0094–8276.
8. **Boer, E. et V. Ramanathan** (1997). *Lagrangian Approach for Deriving Cloud Characteristics from Satellite Observations and its Implications to Cloud Parameterization*. J. Geophys. Res., **102** (D17), pp. 21 383–21 399.
9. **Bouniol, D., J. Delanoë, C. Duroure, A. Protat, V. Giraud et G. Penide** (2010). *Microphysical characterisation of West African MCS anvils*. Q.J.R. Meteorol. Soc., **136**, pp. 323–344.
10. **Carvalho, L. M. V. et C. Jones** (2001). *A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE)*. Journal of Applied Meteorology, **40** (10), pp. 1683–1701.
11. **Chen, S. S., R. A. Houze et B. E. Mapes** (1996). *Multiscale Variability of Deep Convection In Relation to Large-Scale Circulation in TOGA COARE*. Journal of the Atmospheric Sciences, **53** (10), pp. 1380–1409.

12. **Desbois, M., T. Kayiranga, B. Gnamien, S. Guessous et L. Picon** (1988). *Characterization of Some Elements of the Sahelian Climate and Their Interannual Variations for July 1983, 1984 and 1985 from the Analysis of METEOSAT ISCCP Data*. J. Climate, **1** (9), pp. 867–904.
13. **Diongue, A.** (2001). Interactions entre convection et écoulement de grande échelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse.
14. **Duvel, J. P.** (1989a). *Convection over Tropical Africa and the Atlantic Ocean during Northern Summer. Part I : Interannual and Diurnal Variations*. Mon. Weather Rev., **117** (12), pp. 2782–2799.
15. **Duvel, J. P.** (1989b). *Convection over Tropical Africa and the Atlantic Ocean during Northern Summer. Part II : Modulation by easterly Wave*. Mon. Weather Rev., **118**, pp. 1855–1868.
16. **Duvel, J.-P., M. Viollier, P. Raberanto, R. Kandel, M. Haeffelin, L. A. Pakhomov, V. A. Golovko, J. Mueller, R. Stuhlmann et I. S. R. B. Scientific Working Group** (2001). *The ScaRaB-Resurs Earth Radiation Budget Dataset and First Results*. Bulletin of the American Meteorological Society, **82** (7), pp. 1397–1408.
17. **Endlich, R. M. et D. E. Wolf** (1981). *Automatic Cloud Tracking Applied to GOES and METEOSAT Observations*. Journal of Applied Meteorology, **20** (3), pp. 309–319.
18. **Endlich, R. M., D. E. Wolf, D. J. Hall et A. E. Brain** (1971). *Use of a Pattern Recognition Technique for Determining Cloud Motions from Sequences of Satellite Photographs*. Journal of Applied Meteorology, **10** (1), pp. 105–117.
19. **Evans, J. L. et R. E. Shemo** (1996). *A Procedure for Automated Satellite-Based Identification and Climatology Development of Various Classes of Organized Convection*. J. Appl. Meteorol., **35** (5), pp. 638–652.
20. **Feidas, H. et C. Cartalis** (2001). *Monitoring Mesoscale Convective Cloud Systems Associated with Heavy Storms Using Meteosat Imagery*. Journal of Applied Meteorology, **40** (3), pp. 491–512.
21. **Fioleau, T., M. Tomasini, R. Roca, J.-P. Lafore, H. Laurent, T. Lebel, C. Piriou et K. Ramage** (2009). *A climatology of Mesoscale Convective Systems from satellite*. AMMA-EU report.
22. **Fritz, S. et J. Winston** (1962). *Synoptic Use of Radiation Measurements from Satellite Tiros II*. Mon. Weather Rev., **90**, pp. 1–9.
23. **Fujita, T. ()**. *Present status of cloud velocity computations from ATS-1 and ATS-3*.
24. **Fujita, T. et W. A. Bohan ()**. *Detailed Views of Mesoscale Cloud Patterns Filmed from ATS-1 Pictures*. 16 mm, 9 min.

25. **Futyan, J. M. et A. D. Del Genio** (2007). *Deep Convective System Evolution over Africa and the Tropical Atlantic*. Journal of Climate, **20** (20), pp. 5041–5060.
26. **Gambheer, A. V. et G. S. Bhat** (2000). *Life Cycle Characteristics of Deep Cloud Systems over the Indian Region Using INSAT-1B Pixel Data*. Monthly Weather Review, **128** (12), pp. 4071–4083.
27. **Goodman, S. J. et al.** (1996). *The optical transient detector : First results*. Dans Eight Conf. on Satellite Meteorology, Atlanta, GA. AMS, pp. 583–587.
28. **Han, L., S. Fu, L. Zhao, Y. Zheng, H. Wang et Y. Lin** (2009). *3D Convective Storm Identification, Tracking, and Forecasting An Enhanced TITAN Algorithm*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, **26** (4), pp. 719–732.
29. **Hodges, K. I.** (1994). *A General Method for Tracking Analysis and Its Application to Meteorological Data*. Monthly Weather Review, **122** (11), pp. 2573–2586.
30. **Hodges, K. I.** (1995). *Feature Tracking on the Unit Sphere*. Monthly Weather Review, **123** (12), pp. 3458–3465.
31. **Hodges, K. I. et C. D. Thorncroft** (1997). *Distribution and statistics of African Mesoscale Convective Weather Systems based on the ISCCP Meteosat Imagery*. Mon. Weather Rev., **125** (11), pp. 2821–2837.
32. **Hong, Y., C. D. Kummerow et W. S. Olson** (1999). *Separation of Convective and Stratiform Precipitation Using Microwave Brightness Temperature*. J. Appl. Meteorol., **38** (8), pp. 1195–1213.
33. **Hongping, L., S. Yang, L. Biling et Z. Wenhai** (2008). *An Automatic Tracking and Recognition Algorithm for Thunderstorm Cloud-Cluster (TRACER)*. Dans Preprint on the 24th Conference on Severe Local Storms. AMS.
34. **Houze, R. A.** (1977). *Structure and Dynamics of a Tropical Squall-Line System*. Mon. Weather Rev., **105** (12), pp. 1540–1567.
35. **Houze, R. A.** (1982). *Cloud Clusters and Large-Scale Vertical Motions in the Tropics*. J. Meteorol. Soc. Japan, **60** (1), pp. 396–408.
36. **Houze, R. A.** (1993). *Clouds Dynamics*, tm. 53 de *International Geophysics series*. Academic Press, Inc, New York, 573 pp.
37. **Houze, R. A.** (2004). *Mesoscale convective systems*. Rev. Geophys., **42** (4), pp. 8755–1209.
38. **Houze, R. A. et A. K. Betts** (1981). *Convection in Gate*. Rev. Geophys. Space Phys., **19** (4), pp. 541–576.

39. **Houze, R. A., M. I. Biggerstaff, S. A. Rutledge et B. F. Smull** (1989). *Interpretation of Doppler Weather Radar Displays of Midlatitude Mesoscale Convective Systems*. Bulletin of the American Meteorological Society, **70** (6), pp. 608–619.
40. **Huffman, G. J., R. F. Adler, P. Arkin, A. Chang, R. Ferraro, A. Gruber, J. Janowiak, A. McNab, B. Rudolf et U. Schneider** (1997). *The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset*. Bulletin of the American Meteorological Society, **78** (1), pp. 5–20.
41. **Inoue, T., D. Vila, K. Rajendran, A. Hamada, X. Wu et L. A. T. Machado** (2009). *Life Cycle of Deep Convective Systems over the Eastern Tropical Pacific Observed by TRMM and GOES-W*. Journal of the Meteorological Society of Japan, **87A**, pp. 381–391.
42. **Jackson, B., S. E. Nicholson et D. Klotter** (2009). *Mesoscale Convective Systems over Western Equatorial Africa and Their Relationship to Large-Scale Circulation*. Monthly Weather Review, **137** (4), pp. 1272–1294.
43. **Johnson, J. T., P. L. MacKeen, A. Witt, E. D. W. Mitchell, G. J. Stumpf, M. D. Eilts et K. W. Thomas** (1998). *The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm : An Enhanced WSR-88D Algorithm*. Weather and Forecasting, **13** (2), pp. 263–276.
44. **Kandel, R., M. Viollier, P. Raberanto, J. P. Duvel, L. Pakhomov, V. Golovko, A. Trishchenko, J. Mueller, E. Raschke, R. Stuhlmann et I. S. S. W. G. (Isswg)** (1998). *The ScaRaB Earth Radiation Budget Dataset*. Bulletin of the American Meteorological Society, **79**, pp. 765–783.
45. **Khiel, J. et K. Trenberth** (2000). *Earth's Annual Global Mean Energy Budget*. ams, **58**, pp. 197–208.
46. **Kneizys, F. X., E. P. Shettle, W. O. Gallery, L. W. a. S. J. E. A. Chetwynd, J. H. Abreu, S. A. Clough et R. W. Fenn** (1983). *Atmospheric Transmittance/Radiance : Computer Code LOWTRAN 6*. Environmental Research Paper, **1010**, pp. 83–0187.
47. **Kondo, Y., A. Higuchi et K. Nakamura** (2006). *Small-Scale Cloud Activity over the Maritime Continent and the Western Pacific as Revealed by Satellite Data*. Monthly Weather Review, **134** (6), pp. 1581–1599.
48. **Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue et J. Simpson** (1998). *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package*. J. Atmos. Ocean. Technol., **15** (3), pp. 809–817.
49. **Kummerow, C., W. S. Olson et L. Giglio** (1996). *A simplified Scheme for obtaining Precipitation and Vertical Hydrometeor Profiles from Passive Microwave Sensors*. IEE Trans. Geosc. and Rem. Sens., **34** (5), pp. 1213–1232.
50. **Kummerow, C., D.-B. Shin, Y. Hong, W. S. Olson, S. Yang, R. F. Adler, J. McCollum, R. Ferraro, G. Petty et T. T. W. and** (2001). *The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm*

- (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, pp. 1801–1820.
51. **Kummerow, C., J. Simpson, O. Thiele, W. Barnes, A. T. C. Chang, E. Stocker, R. F. Adler, A. Hou, R. Kakar, F. Wentz, P. Ashcroft, T. Kozu, Y. Hong, K. Okamoto, T. Iguchi, H. Ku-roiwa, E. Im, Z. Haddad, G. Huffman, B. Ferrier, W. S. Olson, E. Zipser, E. A. Smith, T. T. Wilheit, G. North, T. Krishnamurti et K. Nakamura** (2000). *The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit*. *J. Appl. Meteorol.*, **39** (12), pp. 1965–1982.
52. **Laing, A. G. et J. M. Fritsch** (1993). *Mesoscale Convective Complexes over the Indian Monsoon Region*. *Journal of Climate*, **6** (5), pp. 911–919.
53. **Laing, A. G. et J. Michael Fritsch** (1997). *The global population of mesoscale convective complexes*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **123**, pp. 389–405.
54. **Lakshmanan, V., K. Hondl et R. Rabin** (2009). *An Efficient, General-Purpose Technique for Identifying Storm Cells in Geospatial Images*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **26** (3), pp. 523–537.
55. **Lakshmanan, V., R. Rabin et V. Debrunner** (2003). *Multiscale storm identification and forecast*. *Journal of Atmospheric Research*, pp. 367–380.
56. **Lakshmanan, V. et T. Smith** (2010). *An Objective Method of Evaluating and Devising Storm-Tracking Algorithms*. *Weather and Forecasting*, **25** (2), pp. 701–709.
57. **Lanza, L. et M. Conti** (1995). *Cloud tracking using satellite data for predicting the probability of heavy rainfall events in the Mediterranean area*. *Surveys in Geophysics*, **16**, pp. 163–181. 10.1007/BF00665778.
58. **Leese, J. A., C. S. Novak et B. B. Clark** (1971). *An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation*. *Journal of Applied Meteorology*, **10** (1), pp. 118–132.
59. **Liu, C., E. J. Zipser, D. J. Cecil, S. W. Nesbitt et S. Sherwood** (2008). *A Cloud and Precipitation Feature Database from Nine Years of TRMM Observations*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47** (10), pp. 2712–2728.
60. **Lyu, C.-H., W. L. Barnes et R. A. Barnes** (2000). *First Results from the On-Orbit Calibrations of the Visible and Infrared Scanner for the Tropical Rainfall Measuring Mission*. *jaot*, **17** (4), pp. 385–394.
61. **Machado, L., M. Desbois et J.-P. Duvel** (1992). *Structural Characteristics of Deep Convective Systems over Tropical Africa and the Atlantic Ocean*. *Mon. Weather Rev.*, **120** (3), pp. 392–406.

62. **Machado, L. A. T. et H. Laurent** (2004). *The Convective System Area Expansion over Amazonia and Its Relationships with Convective System Life Duration and High-Level Wind Divergence*. Monthly Weather Review, **132** (3), pp. 714–725.
63. **Machado, L. A. T., W. B. Rossow, R. L. Guedes et A. W. Walker** (1998). *Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas*. Monthly Weather Review, **126** (6), pp. 1630–1654.
64. **Maddox, R. A.** (1980). *Mesoscale Convective Complexes*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., **61** (11), pp. 1374–1387.
65. **Mapes, B. E. et R. A. Houze** (1993). *Cloud Clusters and Superclusters over the Oceanic Warm Pool*. Monthly Weather Review, **121** (5), pp. 1398–1416.
66. **Martin, D. W. et A. J. Schreiner** (1981). *Characteristics of West African and East Atlantic Cloud Clusters : A Survey from GATE*. Mon. Weather Rev., **109**, pp. 1671–1688.
67. **Mathon, V. et H. Laurent** (2001). *Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems*. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., **127**, pp. 377–406.
68. **McAnelly, R. L. et W. R. Cotton** (1989). *The Precipitation Life Cycle of Mesoscale Convective Complexes over the Central United States*. Monthly Weather Review, **117** (4), pp. 784–808.
69. **Miller, D. et J. M. Fritsch** (1991). *Mesoscale Convective Complexes in the Western Pacific Region*. Monthly Weather Review, **119** (12), pp. 2978–2992.
70. **Mohr, K. I. et E. J. Zipser** (1996). *Defining Mesoscale Convective Systems by their 85 GHz Ice-Scattering Signatures*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., **77**, pp. 1179–1189.
71. **Morel, S., C. and Senesi, F. Autones et L. Labatut** (2000). *The Rapid Developing Thunderstorms (RDT) product of the Nowcasting SAF. Prototyping activities and quality assessment using GOES images*. Dans The 2000 Meteorological Satellite Data Users' Conference.
72. **Nesbitt, S. W., R. Cifelli et S. A. Rutledge** (2006). *Storm Morphology and Rainfall Characteristics of TRMM Precipitation Features*. Monthly Weather Review, **134** (10), pp. 2702–2721.
73. **Olson, W. S., C. D. Kummerow, Y. Hong et W.-K. Tao** (1999). *Atmospheric Latent Heating Distributions in the Tropics Derived from Satellite Passive Microwave Radiometer Measurements*. J. Appl. Meteorol., **38** (6), pp. 633–664.
74. **Orlanski, I.** (1975). *A rational subdivision of scales for atmospheric processes*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., **56**, pp. 527–530.
75. **Papin, C., P. Bouthemy, E. Mémén et G. Rochard** (2000). *Tracking and Characterization of Highly Deformable Cloud Structures*. Dans ECCV '00 : Proceedings of the 6th European Conference on Computer Vision-Part II. Springer-Verlag, London, UK.

76. **Peak, J. E. et P. M. Tag** (1994). *Segmentation of Satellite Imagery Using Hierarchical Thresholding and Neural Networks*. Journal of Applied Meteorology, **33** (5), pp. 605–616.
77. **Pope, M., C. Jakob et M. J. Reeder** (2008). *Convective Systems of the North Australian Monsoon*. Journal of Climate, **21** (19), pp. 5091–5112.
78. **Ramage, K.** (2002). Contribution à l'estimation des précipitations et à la caractérisation des nuages en Afrique de l'Ouest à partir des observations des satellites METEOSAT et TRMM. Thèse de doctorat, Université Paris VII.
79. **Roca, R., S. Louvet, L. Picon et M. Desbois** (2005). *A study of convective systems, water vapor and top of the atmosphere cloud radiative forcing over the Indian Ocean using INSAT-1B and ERBE data*. Meteorology and Atmospheric Physics, **90**, pp. 49–65. 10.1007/s00703-004-0098-3.
80. **Roca, R. et V. Ramanathan** (2000). *Scale dependence of monsoonal convective systems over the Indian Ocean*. J. Climate, **13** (4), pp. 1286–1298.
81. **Roca, R., M. Viollier, L. Picon et M. Desbois** (2002). *A multisatellite analysis of deep convection and its moist environment over the Indian Ocean during the winter monsoon*. J. Geophys. Res., **107**, p. 8012.
82. **Rowell, D. P. et J. R. Milford** (1993). *On the generation of squall lines*. J. Climate, **6**, pp. 1181–1193.
83. **Ruprecht, G. W. M., E.** (1976). *Analysis of satellite-observed tropical cloud clusters II. Thermal, moisture and precipitation*. Tellus, **28** (4), pp. 2153–3490.
84. **Sadler, J. C.** (1964). *Tropical Cyclones of the Eastern North Pacific as Revealed by TIROS Observations*. Journal of Applied Meteorology, **3** (4), pp. 347–366.
85. **Salembier, P.** (2001). *Region-based filtering of images and video sequences : a morphological viewpoint*, pp. 249–288.
86. **Schumacher, C., R. A. Houze et I. Kraucunas** (2004). *The Tropical Dynamical Response to Latent Heating Estimates Derived from the TRMM Precipitation Radar*. Journal of the Atmospheric Sciences, **61** (12), pp. 1341–1358.
87. **Sherwood, S. C. et R. Wahrlich** (1999). *Observed Evolution of Tropical Deep Convective Events and Their Environment*. Monthly Weather Review, **127** (8), pp. 1777–1795.
88. **Simpson, J., C. Kummerow, W. K. Tao et R. F. Adler** (1996). *On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*. Meteorol. Atmos. Phys., **60**, pp. 19–36.
89. **Smith, E. A. et A. V. Mehta** (1990). *The role of organized tropical storms and cyclones on intraseasonal oscillations in the Asian monsoon domain based on INSAT satellite measurements*. Meteorology and Atmospheric Physics, **44**, pp. 195–218. 10.1007/BF01026818.

90. **Sohn, B. J., J. Schmetz et E. Chung** (2008). *Moistening processes in the tropical upper troposphere observed from Meteosat measurements*. J. Geophys. Res., **113**, pp. 148–227.
91. **Tomasini, M., J.-P. Lafore, C. Piriou, R. Roca, K. Ramage, H. Laurent, C. Morel et S. Senesi** (2006). *Atlas on a climatology of West African mesoscale convective systems*. AMMA-EU report.
92. **TSDIS** (2000). *Tropical Rainfall Measuring Mission Science Data and Information System - Volume 3 and 4 : File Specification for TRMM Products - Level 1, 2 and 3*. Rap. tech. Version 5.07, GSFC, Greenbelt, Maryland ([http : //tsdis.gsfc.nasa.gov/tsdis/tsdis_redesign/SelectedDocs.html](http://tsdis.gsfc.nasa.gov/tsdis/tsdis_redesign/SelectedDocs.html)).
93. **Velasco I., F. M.** (1987). *Mesoscale Convective Complexes in the Americas*. J. Geophys. Res., **92** (D8), pp. 9591–9613.
94. **Vila, D. A., L. A. T. Machado, H. Laurent et I. Velasco** (2008). *Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery : Methodology and Validation*. Weather and Forecasting, **23** (2), pp. 233–245.
95. **Viltard, N., C. Burlaud et C. D. Kummerow** (2006). *Rain Retrieval from TMI Brightness Temperature Measurements Using a TRMM PR-Based Database*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, **45** (3), pp. 455–466.
96. **Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee III, G. L. Smith, et J. E. Cooper** (1996). *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) : An Earth Observing System Experiment*. Bull. Amer. Meteorol. Soc., **77** (5), pp. 853–868.
97. **Williams, M. et R. A. Houze** (1987). *Satellite-Observed Characteristics of Winter Monsoon Cloud Clusters*. Monthly Weather Review, **115** (2), pp. 505–519.
98. **Yang, Y., H. Lin, Z. Guo, Z. Fang et J. Jiang** (2004). *Automatic tracking and characterization of multiple moving clouds in satellite images*. tm. 4.
99. **Yuter, S. E. et R. A. Houze** (1995). *Three-Dimensional Kinematic and Microphysical Evolution of Florida Cumulonimbus. Part I : Spatial Distribution of Updrafts, Downdrafts, and Precipitation*. Monthly Weather Review, **123** (7), pp. 1921–1940.
100. **Zinner, T., H. Mannstein, A. Tafferner et C. Forster** (2007). *Cb-TRAM : Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data*.
101. **Zipser, E.** (1977). *Mesoscale and Convective-Scale Downdrafts as Distinct Components of Squall-Line Structure*. Mon. Weather Rev., **105** (12), pp. 1568–1589.
102. **Zuidema, P.** (2003). *Convective Clouds over the Bay of Bengal*. Monthly Weather Review, **131** (5), pp. 780–798.

CYCLE DE VIE DES SYSTÈMES CONVECTIFS DE MOUSSON DANS LES RÉGIONS TROPICALES : PRÉPARATION À LA MISSION MEGHA-TROPIQUES

La convection joue un rôle important dans le cycle de l'eau et de l'énergie des régions tropicales. Cette thèse s'intéresse à l'étude des systèmes convectifs dans les moussons africaines et indiennes par l'utilisation des observations issues de satellites météorologiques. Dans un premier temps, un nouvel algorithme appelé TOOCAN fondé sur une segmentation de l'imagerie IR en 3 dimensions (image+temps) a été développé dans le but de suivre de manière objective et automatique les systèmes convectifs. Cette nouvelle technique améliore la caractérisation de l'évolution du bouclier nuageux associé aux systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie. Des composites des structures précipitantes au cours du cycle de vie du système nuageux organisé sont alors construits en fusionnant les données des satellites géostationnaires avec des estimations de précipitation issues des mesures micro-ondes à bord des satellites défilant. Ces techniques ont été appliquées aux données IR des satellites METEOSAT et aux données micro-ondes du satellite TRMM sur plusieurs saisons de mousson (JJAS 2002-2004) en Afrique de l'ouest et en Inde. Les résultats montrent que l'évolution temporelle de la nébulosité froide des systèmes convectifs est symétrique, avec une phase de croissance et de décroissance sur l'ensemble de la région d'étude. Il est aussi montré que les paramètres contraignants de ce modèle conceptuel de cycle de vie du nuage convectif sont fortement corrélés entre eux diminuant ainsi le nombre de degré de liberté du problème. L'utilisation de la méthode de fusion de données, permet de décrire l'évolution de la fraction précipitante et de la fraction convective au sein du système convectif. Ainsi, le cycle de vie des systèmes convectifs peuvent être décrits par trois phases : initiation, mature et dissipation. Ce schéma est robuste sur toute la région d'étude et les facteurs d'échelles de ce modèle idéalisé indiquent des spécificités régionales complexes.