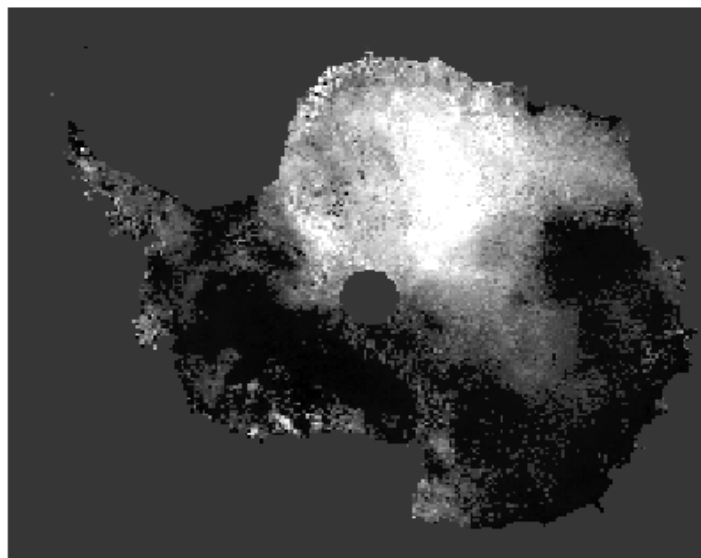


Détection des événements de précipitation en Antarctique par télédétection micro-onde passive

Isaline Gravaud

Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées



Rapport de Projet Personnel en Laboratoire, libre

5 mai – 4 juillet 2008

Réalisé au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement

sous la supervision de Ghislain Picard, LGGE

Tuteur ENSTA : Laurent Mortier

Résumé

Les précipitations en Antarctique sont un paramètre encore mal connu, malgré leur rôle fondamental dans le bilan de masse de la calotte antarctique, et donc sur le niveau des mers. Cette méconnaissance des détails des précipitations s'explique en grande partie par la difficulté d'acquérir des données de terrain dans cette région. Ainsi ce projet a pour but la mise en œuvre d'une méthode permettant de détecter les événements de précipitation à partir d'observations satellites, ce qui aurait l'avantage d'une couverture spatiale et temporelle inégalable par les observations *in situ*. Cette méthode utilise des données micro-ondes (température de brillance à 85 GHz en polarisation verticale). Elle consiste à détecter, à l'aide de la transformée de Hilbert-Huang, les variations positives du signal dues à la présence de neige fraîche en surface suite aux précipitations. Cela nous permet de créer des cartes (journalières et annuelles) des événements de précipitation sur tout l'Antarctique, et particulièrement dans la zone intérieure du continent, qualifiée de désertique, où les précipitations sont extrêmement faibles. La période que nous pouvons étudier avec les données disponibles s'étend de 1996 à aujourd'hui. Les résultats obtenus avec cette méthode sont assez satisfaisants car ils correspondent bien aux quelques observations *in situ* dont nous disposons, ainsi qu'aux réanalyses météorologiques auxquelles nous les avons comparés. Nous avons en effet constaté, en comparant visuellement les cartes obtenues avec notre méthode et les cartes issues des réanalyses, qu'elles s'accordaient bien sur les dates et lieux des précipitations.

Mots-clé : précipitations en Antarctique, climat antarctique, télédétection satellite, micro-ondes.

Abstract

Snowfalls in Antarctica are a poorly known parameter, despite its importance in the mass balance of the Antarctic ice sheet, and therefore in sea level rise. The misunderstanding of snowfall details is mainly explained by the fact that *in situ* data are difficult to acquire in this area. So this project aims at implementing a technique that detects snowfall events using satellite observations, which have a far better spatial and temporal coverage than *in situ* observations. This method uses microwave data (vertically polarized brightness temperature at 85 Ghz). It consists in detecting the signal increase due to fresh snow laid on the surface after a snowfall. The filter used for this is the Hilbert-Huang Transform. We then can create daily and annual maps of snow events in the entire Antarctica, and particularly in the inside area of the continent, said to be a desert, where snowfalls are extremely low. With the available data, we can study the time period from 1996 to today. The results obtained with this method are rather satisfactory since they are in agreement with the few *in situ* observations that we had, as well as with meteorological re-analysis. We visually compared the maps from our method with the maps from re-analysis and noticed that, most of the time, they agreed on where and when snowfall occurred.

Key-words : snowfalls in Antarctica, Antarctic climate, satellite remote sensing, microwave.

Résumé.....	3
Abstract.....	3
1 Introduction.....	7
1.1 Contexte.....	7
1.2 Observation des précipitations.....	8
1.3 Contexte et objectif du stage.....	10
2 Détection des précipitations par satellite.....	11
2.1 La télédétection.....	11
2.2 Présentation de la méthode de Bindschadler et al. (2005).....	12
3 Implémentation de l'algorithme de détection des précipitations.....	17
4 Résultats.....	19
4.1 Validation de l'algorithme	19
4.2 Comparaison avec les réanalyses du CEPMMT.....	21
5 Conclusion et perspectives.....	23
Remerciements.....	24
Bibliographie.....	25
Annexes.....	27

1 Introduction

1.1 Contexte

L'étude du climat de notre planète est un sujet de la plus haute importance. Afin de prévoir les changements futurs, les scientifiques développent des modèles qui prennent en compte au mieux la réalité du système climatique, ce qui nécessite au préalable une bonne compréhension des processus climatiques. Le climat résulte en effet d'interactions complexes entre différentes composantes de la planète, en particulier l'atmosphère, l'océan, la biosphère et la cryosphère (glaciers, glace de mer, neige, sol gelé).

Les calottes polaires sont un élément clé du système planétaire, par le stockage ou largage d'importante quantité d'eau douce et par leur influence sur le bilan radiatif global et la circulation thermohaline. Les pôles sont, de plus, particulièrement sensibles aux changements climatiques et jouent un rôle capital sur le niveau des mers. En effet, la calotte de glace antarctique, avec plus de 2000m d'épaisseur en moyenne sur une superficie de 14 millions de km², représente 90% des glaces terrestres et sa fonte complète entraînerait une augmentation d'environ 65 m du niveau des mers.



Figure 1.1. Carte de l'Antarctique. (source : Institut Polaire)

L'établissement d'un bilan de masse (BM) de l'Antarctique a pour objectif de déterminer si la calotte perd ou gagne de la masse, et donc son influence sur le niveau des mers. Ce bilan s'écrit de la manière suivante :

$$BM = \text{précipitation} - \text{sublimation} - \frac{\text{vêlage}}{\text{d'iceberg}} - \frac{\text{neige soufflée}}{\text{vers l'océan}} - \frac{\text{fonte de surface}}{\text{vers l'océan}}$$

Les deux premiers termes du bilan constituent l'accumulation nette en surface.

C'est plus particulièrement sur les événements de précipitation en Antarctique qu'a porté mon projet personnel en laboratoire. Ce stage de 2 mois, réalisé sous la tutelle de Ghislain Picard (maître de conférences à l'Université Joseph Fourier) et de Michel Fily (professeur à l'Université Joseph Fourier), a consisté en l'implémentation d'un algorithme permettant de détecter les événements de précipitation à partir de données satellites micro-ondes.

1.2 Observation des précipitations

Les précipitations en Antarctique

Du fait des basses températures de l'Antarctique, la grande majorité des précipitations se produit sous forme neigeuse sur le continent, bien que quelques épisodes de pluie puissent survenir à l'ouest du continent sur la pointe de la péninsule antarctique (Figure 1.1).

Près de la moitié du continent antarctique est un désert, dans le sens où les précipitations y sont inférieures à 100 mm par an (en équivalent eau). On distingue en effet, en Antarctique, deux régimes de précipitations distincts (Rémy, 2003). Sur la côte, le processus qui conduit à la précipitation serait l'effet orographique, c'est-à-dire le refroidissement de l'air qui s'élève en franchissant les fortes pentes du pourtour du continent. Les précipitations y sont relativement importantes, en moyenne 350 mm par an. Ces régions qui représentent moins de 30% du continent reçoivent plus de la moitié des précipitations. Ce régime est essentiellement contrôlé par l'activité cyclonique. En revanche, sur le plateau, à l'intérieur du continent, les précipitations peuvent être aussi dues au refroidissement radiatif : de très fins cristaux de glace en suspension dans l'air tombent d'un ciel sans aucun nuage. On ne connaît cependant pas le régime saisonnier, ni la part de chaque type de précipitations. Il y a environ 30 mm (éq. eau) par an en moyenne, ce qui correspond à une épaisseur de neige d'à peu près 10 cm.

Les mesures *in situ*

Les mesures *in situ* ne concernent que l'accumulation annuelle, car on ne sait pas mesurer précisément les précipitations neigeuses. Les techniques utilisées pour mesurer l'accumulation sont principalement les carottages et les mesures de hauteur de neige accumulée au pied de perches, pour ce qui est de l'acquisition manuelle des données. L'Observatoire GLACIOCLIM/SAMBA du LGGE, notamment, a mis en place des réseaux et lignes de balises dans la région de Cap Prud'homme et de Dome C. L'utilisation d'instruments automatiques comme les sondes à ultrasons permet d'acquérir des données en continu, même si leur qualité est moins bonne qu'avec les techniques précédentes. Ces mesures *in situ* de l'accumulation sont globalement rares et elles ne sont donc pas représentatives de l'ensemble du continent.

L'état de l'art : des mesures *in situ* à la télédétection

Malgré son importance capitale dans l'établissement du bilan de masse de l'Antarctique, l'accumulation de neige n'est pas connue avec beaucoup de précision. Actuellement, on estime que 170 mm (éq. eau) de neige s'accumulent chaque année sur la surface de l'Antarctique (Rémy, 2003).

Une compilation de l'ensemble des mesures *in situ* de l'accumulation contenues dans la littérature, composée de 1.860 points au total, a été établie par Vaughan et Russel (1997). Ces données sont toutefois réparties de façon très inégale sur le continent (Figure 1.2).

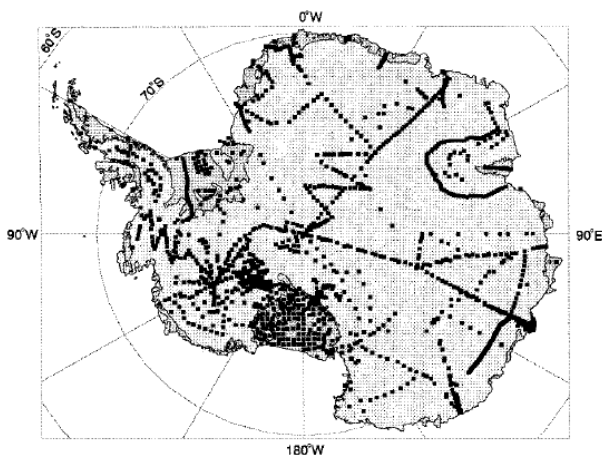


Figure 1.2. Distribution des mesures *in situ* de l'accumulation en surface.
(source : Vaughan et al., 1999)

Des cartes de l'accumulation annuelle ont été établies en interpolant ces mesures sur toute l'étendue du continent (Vaughan et al., 1999 ; Giovinetto & Zwally, 2000). La figure 1.3 présente deux cartes d'accumulation obtenue par interpolation des observations *in situ*. Différentes approches ont été adoptées pour effectuer ces interpolations, notamment l'utilisation d'observations satellites dans le domaine des micro-ondes (Vaughan et al., 1999 ; Arthern et al., 2006). Ces données satellites présentent l'avantage d'une bonne couverture spatiale et temporelle du continent.

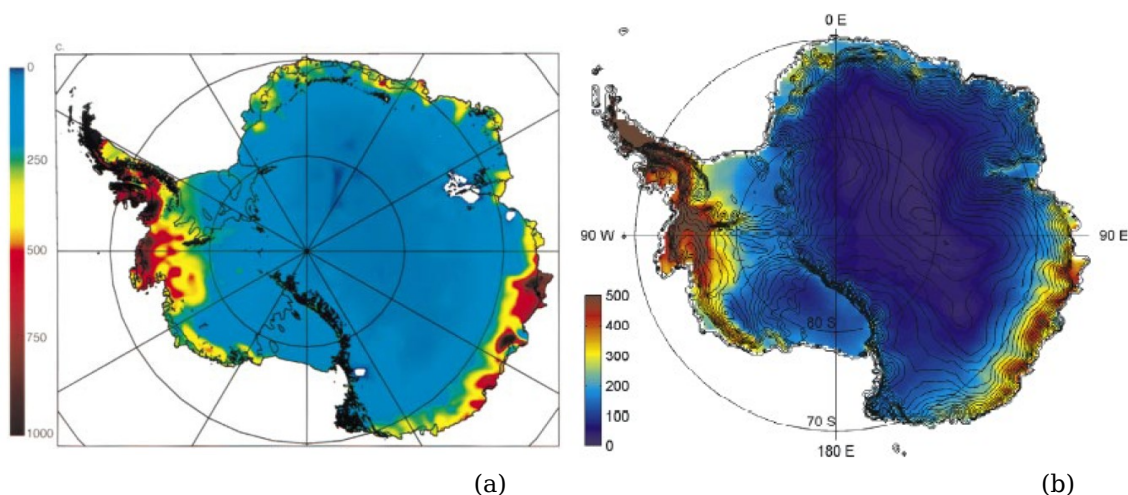


Figure 1.3. Accumulation de neige en surface ($\text{kg.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$)
d'après (a) Vaughan et al., 1999, et (b) Arthern et al., 2006.

Comme nous l'avons vu précédemment, les méthodes pour mesurer l'accumulation en Antarctique sont diverses, et leur fiabilité aussi est variable. Ainsi, en compilant toutes les observations de la littérature sans sélection, on obtient une base de données très diverse en qualité, pouvant contaminer les informations fournies par les méthodes les plus fiables et biaiser les extrapolations d'accumulation sur de grandes surfaces (Magnand et al., 2007). Ainsi, un contrôle de qualité des données issues de Vaughan & Russell (1997) est encore réalisable, comme il l'a été fait par Magnand et al. (2007) pour le secteur 90°-180°E de l'Antarctique.

Par ailleurs, l'utilisation de modèles climatiques atmosphériques régionaux, comme RACMO2/ANT, permet de simuler l'accumulation en Antarctique. La comparaison des accumulations simulées avec les observations et les compilations (notamment celle de Vaughan et al., 1999) permet de calibrer le modèle et de construire une meilleure estimation de l'accumulation actuelle de l'Antarctique (Van de Berg et al., 2006).

Enfin, Bindschadler et al. (2005) propose une nouvelle méthode de détection de la neige fraîche directement à partir des observations satellites. Contrairement aux interpolations précédentes, cette méthode présente l'avantage de ne pas se baser sur des observations *in situ* qui posent des problèmes d'échantillonnage spatial et temporel. La technique est basée sur l'observation de l'émission à 85 GHz (domaine des micro-ondes) en polarisation verticale. Ce signal connaît en effet de grandes variations lors des précipitations car la neige fraîche qui couvre alors la surface est plus émissive.

1.3 Contexte et objectif du stage

Le LGGE

Le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) est une Unité Mixte de Recherche sous la double tutelle du CNRS et de l'Université Joseph Fourier à Grenoble. Il a bâti sa renommée scientifique sur l'étude du climat et de la composition de l'atmosphère. Ces études portent sur le climat présent mais aussi sur les évolutions passées au travers des archives que constituent la neige et la glace accumulées au cours du temps.

L'activité scientifique du LGGE se structure autour de 4 thématiques:

- Chimie atmosphérique et interaction air-neige-glace;
- Paléoclimats et paléoenvironnements : une approche à partir des archives glaciaires et des interactions climat-calottes polaires;
- Matériau glace et dynamique des glaciers et calottes polaires;
- Climat moderne et observations glaciologiques: une approche à partir des régions polaires et alpines.

C'est dans cette dernière thématique que mon stage s'est déroulé. Les chercheurs y étudient le climat actuel moyen et sa variabilité dans les régions polaires, alpines et andines. Les méthodes utilisées sont variées et complémentaires: acquisition de données sur le terrain, télédétection satellitale, modélisation météorologique et climatique.

Le travail effectué

Mon projet personnel en laboratoire s'inscrit dans le cadre de l'étude du climat en Antarctique. Il s'agit de la détection des précipitations sur le continent à partir des observations satellites. La méthode utilisée est celle proposée par Bindschadler et al. (2005), appelé dans la suite B05. Le but de mon stage est de mettre en œuvre cette méthode et de l'appliquer sur une plus longue série de données, afin d'obtenir des résultats de grande ampleur.

Mon travail a donc été, dans un premier temps, d'implémenter avec mes propres outils (en utilisant le logiciel Matlab) l'algorithme évoqué dans l'article de B05, de l'appliquer aux données satellites (1987-2008) fournies par Ghislain Picard et de vérifier que mes résultats correspondaient bien à ceux présentés par B05 afin de valider mon code.

Dans un deuxième temps, j'ai effectué, à partir de cet algorithme, et de manière systématique, des cartes journalières de précipitations, des statistiques annuelles et des comparaisons de mes résultats avec les réanalyses du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT, en anglais : ECMWF).

2 Détection des précipitations par satellite

2.1 La télédétection

La télédétection englobe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques ou biologiques d'objets par des mesures effectuées sans contact direct. Pour cela, on utilise des capteurs qui enregistrent un signal provenant de cette cible. Ces capteurs sont regroupés en deux catégories. Les capteurs actifs possèdent leur propre source d'énergie pour illuminer une cible. Ils mesurent alors une énergie rétrodiffusée, permettant de déduire soit la distance capteur-objet, soit les propriétés de la surface réfléchissante. Par exemple, les radars (Radio Detection And Ranging) sont des capteurs actifs dans le domaine des micro-ondes. Les capteurs passifs, quant à eux, ne nécessitent pas de source émettrice et utilisent les capacités de réflexion dans le spectre solaire (visible, proche infrarouge) ou d'émission (infrarouge et micro-ondes) des objets que l'on tente de caractériser.

L'utilisation de capteurs embarqués sur des satellites est particulièrement intéressante dans l'étude de l'Antarctique car, contrairement aux données *in situ*, les données satellites sont régulières dans le temps et concernent des grandes distances. On peut ainsi avoir accès à de nombreuses informations sur ce continent difficile d'accès.

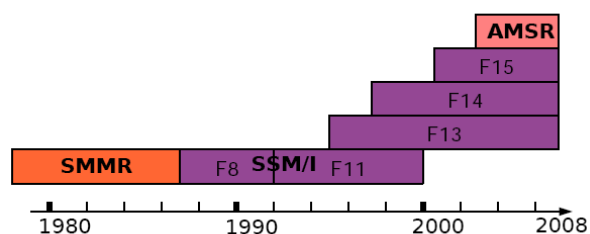


Figure 2.1. Succession des radiomètres.

Pour mon projet de détection des précipitations en Antarctique, j'ai utilisé les données satellites obtenues dans la gamme spectrale des micro-ondes passives, issues des capteurs SSM/I (Special Sensor Microwave Imager), embarqués sur les satellites américains DMSP F8, F11 et F13. Les micro-ondes ont en effet l'avantage d'être indépendantes des radiations solaires – ce qui est capté étant l'émission de la Terre – et peu influencées par l'atmosphère. Elles sont sensibles à certaines conditions comme la présence d'eau ou de neige. La résolution de ces données est de 25 km sur 25 km, ce qui permet une étude à grande échelle. De plus, la série de données pour cette fréquence est particulièrement longue, débutant en juillet 1987 (Figure 2.1). Les données dont j'ai disposé étaient les températures de brillance (T_b , en Kelvin) journalières, à la fréquence de 85 GHz (3,5 mm de longueur d'onde). En effet, les capteurs SSM/I enregistrent une énergie radiative (émittance) qui est directement proportionnelle à la température de brillance du corps. Celle-ci représente la température qu'aurait un corps noir pour émettre la même quantité d'énergie qu'un corps réel à la même longueur d'onde. La température de brillance (T_b) est reliée à la température réelle du corps (température de surface dans le cas de l'Antarctique) et à son émissivité ϵ (coefficient qui traduit sa capacité à émettre ou absorber l'énergie radiative) : $T_b = \epsilon \times T_{surf}$.

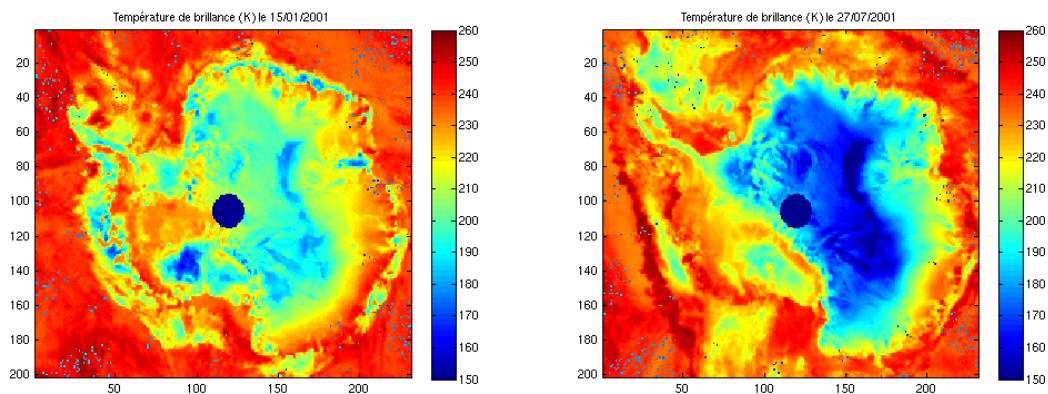


Figure 2.2. Température de brillance à 85 Ghz du continent Antarctique en été et en hiver.

Ces cartes de la Figure 2.2 ont été réalisées à partir des mesures de température de brillance effectuées par les capteurs SSM/I pour la fréquence de 85 GHz. La zone en bleu au centre du continent n'est jamais survolée par les satellites, il n'y donc pas de données pour cette région et on y affecte la valeur de 0 K. Les différences de température de brillance entre ces deux cartes correspondent à la variabilité saisonnière de la température de surface. Par ailleurs, sur les deux cartes, on observe que les températures de brillance dans les régions côtières sont bien plus élevées qu'au centre. Ceci est directement lié aux différences de température de surface entre ces deux zones qui présentent des caractéristiques climatiques très différentes.

2.2 Présentation de la méthode de Bindschadler et al. (2005)

L'étude de B05, qui a pour but de détecter et mesurer l'accumulation de neige sur les calottes polaires par télédétection satellite, s'effectue en deux temps. Tout d'abord, ils utilisent les données micro-ondes pour détecter où et quand se produisent les chutes de neige. Ceci fait, ils déterminent la quantité de neige accumulée en étudiant des données d'altimétrie laser. Mon projet ne concernant que les événements de précipitation, et non l'accumulation de la neige, c'est sur la première partie de cette étude que je me suis basée.

Principe : détection d'un changement d'émissivité de la neige

La méthode présentée par B05 permet de détecter la neige une fois qu'elle est tombée. Elle se fonde sur la différence d'émissivité entre la neige fraîche et la neige qui recouvre la surface depuis un certain temps déjà. En effet, les cristaux de neige qui se forment dans l'atmosphère sont de morphologie variée, selon les conditions de pression et de température dans lesquelles la vapeur d'eau s'est condensée (Nakaya, 1954). Dans les conditions des calottes polaires (froid et sec) les cristaux sont principalement sous forme d'aiguilles et de plaquettes hexagonales. Mais avec le temps, ils subissent au sol un processus métamorphique qui les transforme en des grains de neige plus arrondis et plus gros, diminuant la surface spécifique de la neige et son émissivité.

Données de base : choix des températures de brillance à 85 GHz

Une chute de neige entraîne donc une augmentation de l'émissivité de la surface (environ +0,04), et par conséquent une augmentation de sa température de brillance (environ +10 K). Pour étudier les variations de la température de brillance, la fréquence retenue est le 85 GHz en polarisation verticale (85V). En effet, cette fréquence est assez élevée pour ne pas trop pénétrer dans la neige (2 cm) et elle permet donc d'obtenir des informations sur la surface. A titre d'exemple, à 37 GHz un signal a une profondeur de pénétration de 90 cm, à 18 GHz : 3 m et à 6 GHz : 18 m (Rott et al., 1993). En revanche, elle est assez basse pour ne pas interférer avec les particules d'eau ou de glace de l'atmosphère, comme c'est le cas du 183 GHz, et être ainsi peu sensible aux nuages. De plus, 85 GHz est une fréquence à laquelle des mesures sont faites depuis 1987, ce qui fait une longue série de données. Enfin, le signal en polarisation verticale est moins affecté par les effets stratigraphiques de la surface que le signal en polarisation horizontale. Les données utilisées sont les températures de brillance journalières moyennes, sur une grille de projection stéréographique à mailles de 12,5 km, fournies par le National Snow and Ice Data Center (NSIDC).

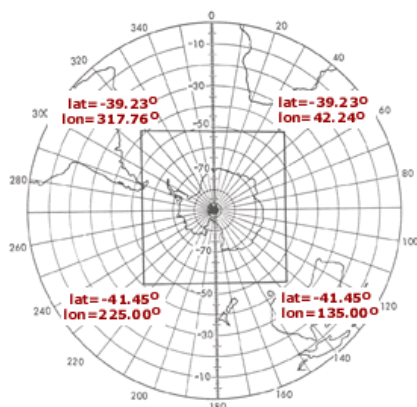


Figure 2.3. Carte de la projection stéréographique du NSIDC (source: NSIDC)

Le traitement des données

Cependant, la température de brillance, comme nous l'avons vu précédemment, ne dépend pas que de l'émissivité, mais aussi de la température de la surface. Pour pouvoir avoir l'influence de l'émissivité seule sur les variations de la température de brillance, il faudrait pouvoir acquérir régulièrement des données de température de surface. Mais les méthodes actuelles qui permettent ces mesures nécessitent un ciel clair alors que les précipitations se produisent par temps nuageux. Il faut donc filtrer les séries temporelles initiales pour réduire au mieux la dépendance à la température. Pour cela, B05 appliquent sur les données du 85V une transformée, la transformée de Hilbert-Huang (HHT). Elle permet de retirer les variations du signal à d'autres échelles de temps que les 3-7 jours typiques des événements étudiés.

Principe général de la transformée de Hilbert-Huang

La transformée de Hilbert-Huang (HHT) est une méthode émergente qui permet d'étudier les phénomènes non linéaires, contrairement aux outils traditionnels de traitement des données, qui reposent sur la transformée de Fourier et qui ne fonctionnent bien que si les données sont linéaires et stationnaires.

Or, les mesures de phénomènes naturels sont essentiellement non linéaires et non stationnaires. La HHT est une méthode récente (Huang, 1998), développée par Dr N. Huang (Laboratory for Hydrospheric Processes, NASA Goddard Space Flight Center), exempte des limitations de la FFT. Elle comporte deux éléments principaux : la décomposition empirique en modes (EMD) et l'analyse spectrale de Hilbert.

C'est essentiellement la décomposition EMD qui est utilisée dans la méthode de détection des événements de précipitation. L'EMD, contrairement à presque toutes les autres méthodes, fonctionne en temporel plutôt qu'en fréquentiel. Cette décomposition est directe et adaptative, avec une base définie a posteriori à partir des données. Il s'agit d'un processus itératif de filtrage qui décompose un signal en un jeu fini de modes de fréquence décroissante. Ces modes, appelés IMF (intrinsic mode functions), satisfont aux deux conditions suivantes: passer autant de fois par zéro qu'il y a d'extrema et avoir une enveloppe, définie par les minima et maxima locaux, qui est symétrique. Ces fonctions sont automatiquement centrées autour de zéro.

Le processus de filtrage (Figure 2.4) commence en identifiant les extrema locaux du signal. Il relie entre eux tous les maxima et tous les minima pour former les enveloppes supérieure et inférieure. La moyenne de ces deux enveloppes est ensuite retranchée au signal d'origine et on recommence la procédure précédente sur le signal restant. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'on obtienne un signal qui satisfait à la définition d'une IMF. Cette première IMF contient les oscillations de plus courte période du signal. Elle est retranchée au signal d'origine et on réitère le processus sur le résidu pour obtenir le second mode, et ainsi de suite jusqu'à ce que le résidu soit une fonction monotone ou avec un seul extremum. Les données originales sont ainsi décomposées en un nombre fini d'IMF. La somme de toutes les IMF et du dernier résidu redonne le signal d'origine.

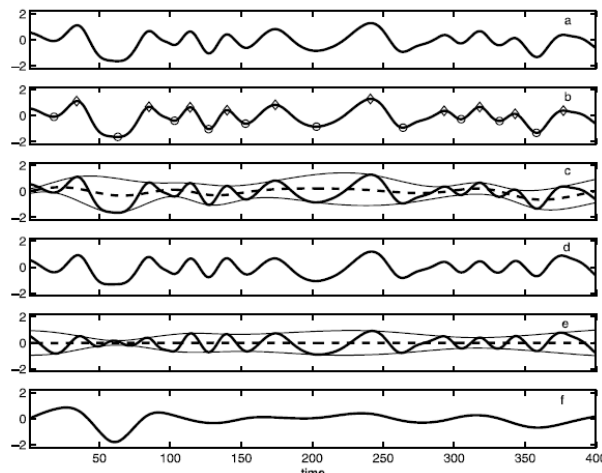


Figure 2.4. Processus de filtrage de l'EMD : (a) signal d'entrée arbitraire ; (b) identification des maxima et minima ; (c) enveloppes supérieure et inférieure (trait plein) et leur moyenne (pointillés) ; (d) différence entre la ligne continue et la ligne en pointillés de la Figure .c ; (e) enveloppes (trait plein) et moyenne (pointillés) d'une IMF ; (f) reste après que l'IMF ait été soustraite au signal d'entrée. (source : Huang & Wu, 2008)

Validation de la méthode et résultats

Afin de valider cette méthode, B05 comparent leurs résultats avec les observations de précipitations au niveau de trois stations en Antarctique : Siple Dome (81,67° S, 149,07° W), McMurdo Station (77,92° S, 166,6° E) et le site #6 (74,48° S, 11,52° W) dans le Dronning Maud Land.



Figure 2.5. Localisation des stations étudiées sur le continent Antarctique. (source: Bindschadler et al., 2005)

Ainsi, selon B05, on peut assez simplement détecter qu'il y a eu précipitation à un endroit donné et à une date donnée en étudiant le signe du 85V filtré à l'aide de la HHT: s'il est positif, il y a de la neige fraîche, s'il est négatif, il n'y a pas eu de précipitation. Cette méthode connaît, à la station de McMurdo, pour l'année 2001, un taux de succès de 69% en ce qui concerne la détection de la présence de neige fraîche (HHT positive) et de 65% pour la détection de l'absence de neige fraîche (HHT négative). En appliquant la méthode sur l'ensemble du continent, B05 ont produit des cartes annuelles de statistiques sur les événements de précipitation (Figure 2.6), ainsi que des cartes journalières pour suivre ces événements (Figure 2.7).

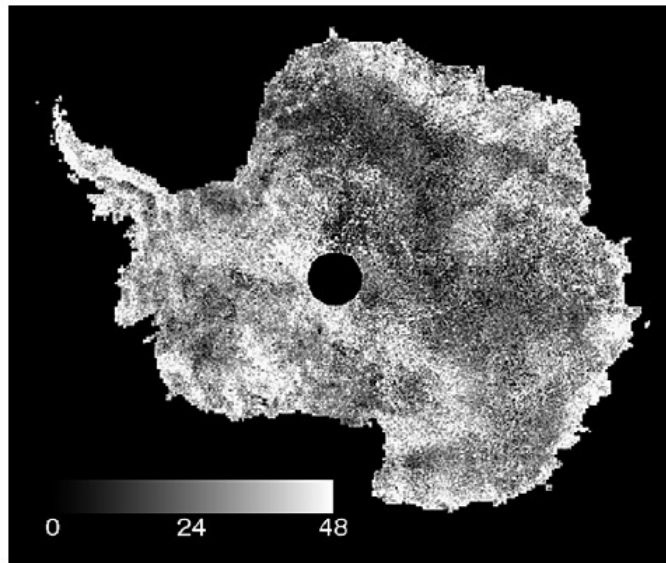


Figure 2.6. Nombre de périodes où le 85V HHT est positif durant l'année 2003. (source : Bindschadler et al., 2005)

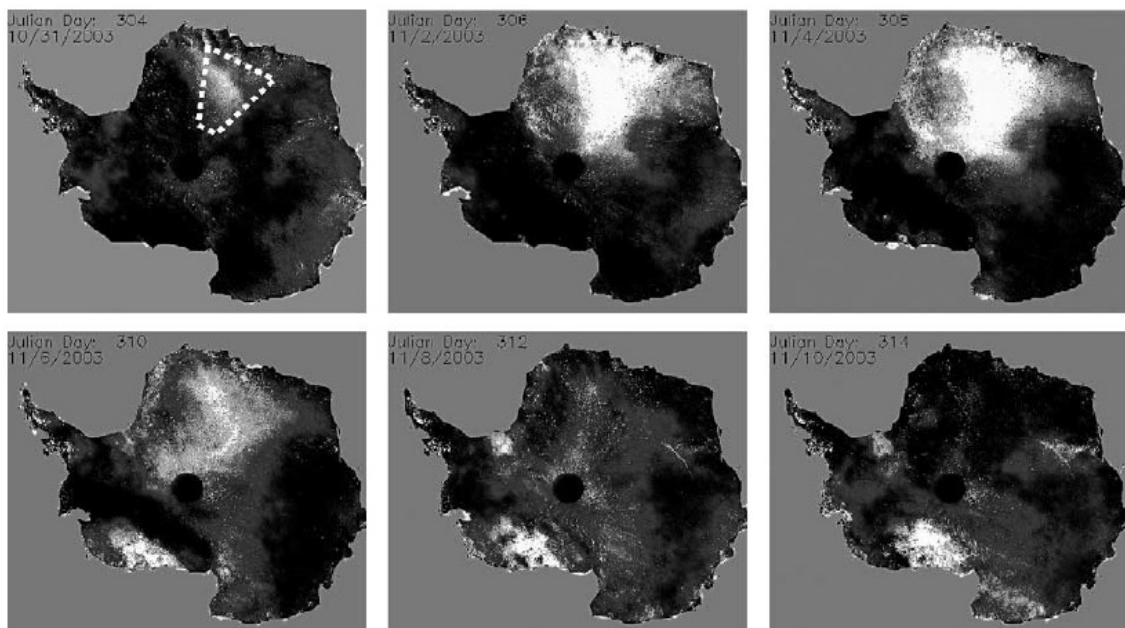


Figure 2.7. Suivi d'un événement de précipitation (la HHT du 85V est positive) du 31/10/2003 au 10/11/2003. (source : Bindschadler et al., 2005)

3 Implémentation de l'algorithme de détection des précipitations

Les données

Pour suivre la même méthode que B05, les données que j'ai utilisées sont aussi les températures de brillance à 85 GHz en polarisation verticale fournies par le NSIDC (Maslanik & Stroeve, 1990). Toutefois, j'ai pu disposer d'une version plus récente des données. Je n'ai pas non plus utilisé la même grille, mais une sous-grille de la grille NSIDC, resserrée autour du continent, afin de limiter le nombre de pixels qui sont dans l'océan. De plus, les pixels de ma grille font 25 km de côté et couvrent donc une surface quatre fois plus grande. Au final, la taille de la grille est de 201 sur 231 pixels. Je disposais donc des températures de brillance sur toute cette grille et pour tous les jours de toutes les années de 1987 à 2008. Cette grande quantité de données (600 Mo) est stockée dans un fichier au format NetCDF (Network Common Data Form), format fréquemment utilisé en climatologie et parfois en télédétection. La manipulation de données NetCDF avec le logiciel Matlab n'est pas aisée et nécessite l'installation de routines spécialement conçue pour ce format. J'ai donc dû apprendre à extraire des données stockées dans ce type de fichier, mais aussi à créer de tels fichiers pour stocker mes résultats.

Le filtrage des données

Les données de température de brillance ont nécessité quelques modifications avant d'être filtrées. Tout d'abord, la qualité des séries temporelles est très mauvaise jusqu'à 1995, ce qui fait que je n'ai appliqué l'algorithme qu'à partir de 1996. De plus, il arrive qu'il manque une valeur de T_b pour un pixel donné, à une date donnée. La valeur contenue dans le NetCDF est alors 0 K, au lieu d'être entre 200 et 250 K, ce qui créerait artificiellement des grandes variations dans le signal temporel du pixel concerné et fausse complètement la HHT (Figure 3.1). Etant donné que le nombre de valeurs nulles dans la série temporelle d'un pixel donné est faible (moins d'une dizaine en moyenne), j'ai appliqué sur toutes les séries temporelles un petit algorithme de remplissage des « trous » par la moyenne des données précédentes et suivantes (si non nulles).

Ceci fait, on passe à la décomposition EMD. J'ai téléchargé un code Matlab de la HHT (<http://perso.ens-lyon.fr/patrick.fladrin/emd.html>), dont j'ai extrait les fonctions utiles à l'EMD, que j'ai insérées dans mon propre algorithme. Pour chaque pixel de la carte (et qui est sur le continent), on extrait la série temporelle et on le décompose en différentes IMF, la première étant celle contenant les oscillations de plus haute fréquence. L'Annexe 1 présente un exemple de décomposition de la série temporelle d'un pixel. On somme ensuite les modes 2, 3 et 4 seulement, car ce sont ceux qui correspondent aux échelles de temps de quelques jours des événements observés, et on obtient le signal temporel filtré (Figure 3.2). On stocke les signaux filtrés dans un fichier NetCDF de même dimension que le fichier des données de T_b du départ.

Nous nous sommes posé la question de la longueur de la période sur laquelle on effectuait la HHT, qui n'était pas mentionnée dans l'article de Bindschadler. En effet, pour avoir la valeur du 85V transformé sur un pixel à un instant donné, on peut appliquer la HHT (1) sur une période centrée autour de cette date, ou (2) sur l'ensemble des 10 années que l'on utilise. Des tests localisés ont montré que la méthode 1 ne marchait que si on prenait une période supérieure à 1 an. Dans ce cas, les résultats sont peu différents de celui obtenu avec la méthode 2, qui a

l'avantage de se rapprocher le plus des résultats de B05 (Annexe 2). Surtout, cette dernière méthode ne nécessite qu'un seul calcul de HHT par pixel, ce qui accélère l'algorithme, qui met déjà 8h à tourner (pour la période 1996-2007, sur les 21.500 pixels du continent).

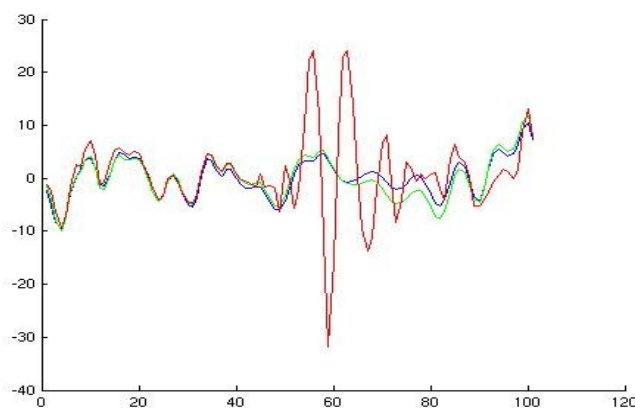


Figure 3.1. Graphe comparatif des courbes de 85V_HHT obtenues (pixel 118,5°E 66,8°S, sur une centaine de jours) selon le signal 85V utilisé: en rouge : 85V_HHT obtenu à partir du 85V qui présente un trou au jour 59 ; en vert : 85V_HHT obtenu à partir du 85V modifié; en bleu : 85V_HHT de B05.

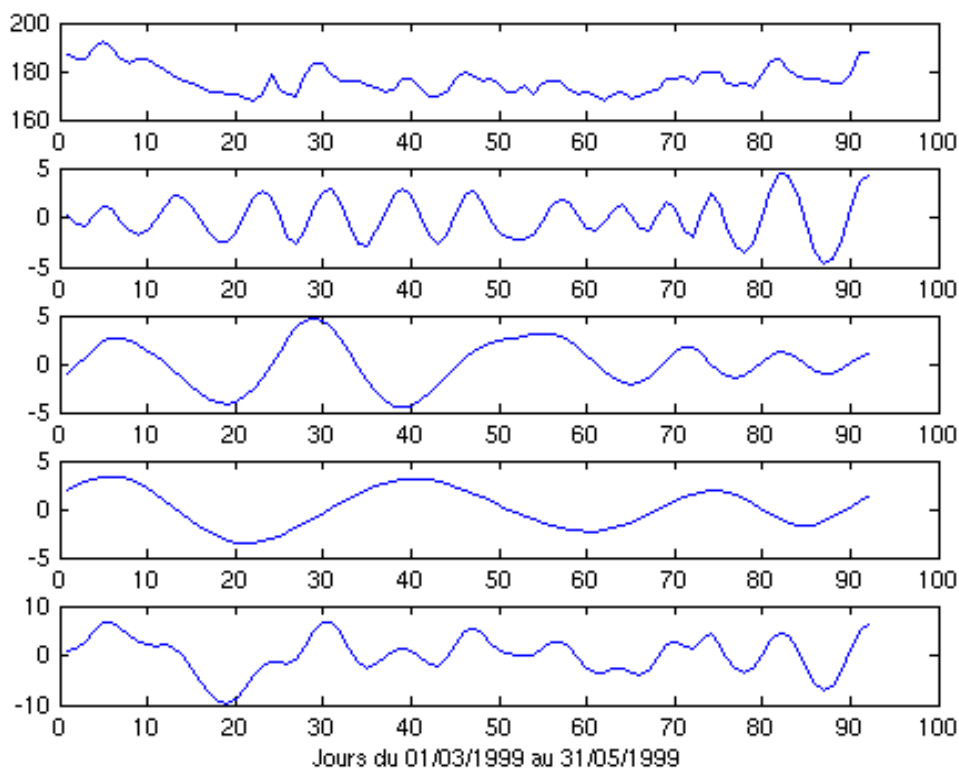


Figure 3.2. Processus de filtrage d'une série temporelle (Siple Dome, du 01/03/1999 au 31/05/1999). De haut en bas : 85V; IMF2; IMF3; IMF4; 85V filtré (somme de ces 3 IMF).

4 Résultats

4.1 Validation de l'algorithme en comparaison avec les résultats de Bindschadler et al. (2005)

Les séries temporelles locales

Dans un premier temps, j'ai créé les courbes correspondant aux différents graphes présentés par B05. Pour cela, j'ai extrait les séries temporelles du 85V et de sa transformée (85V HHT) des pixels contenant les stations étudiées, sur la période correspondante. L'allure de mes courbes étant très ressemblante, j'ai créé des graphes (Figure 4.1 et Annexe 3) où j'ai superposé mes courbes avec celles de B05 (préalablement numérisées à partir de la publication au format PDF).

Les deux courbes de 85V devraient être identiques puisqu'il s'agit des données de base, issues de la même source (NSIDC). Les légers écarts observés peuvent être expliqués par l'utilisation de versions différentes des données. Les courbes de 85V_HHT, quant à elles, correspondent assez bien pour les quelques situations présentées par B05. Pour les graphes relatifs au site de Siple Dome, B05 dispose d'observations de chutes de neige effectuées par le personnel de la station. J'ai reporté ces données supplémentaires sur les graphes, ce qui nous permet de constater qu'il y a bien une corrélation entre les pics de HHT (moments où la HHT est positive) et la présence de neige fraîche. D'ailleurs, pour les situations étudiées, il arrive que cette corrélation soit meilleure avec nos résultats qu'avec ceux de B05. Nous observons, par exemple, un pic de HHT le 31/12/2001 (Figure 4.1), correspondant effectivement à une précipitation, que B05 ne détecte pas.

Les cartes de précipitations

Dans un deuxième temps, j'ai produit les cartes correspondant aux événements de précipitation détectés par B05 au début du mois de novembre 2003 (Figure 4.2). Ces cartes représentent l'intensité du 85V_HHT sur l'Antarctique, tous les deux jours du 31/10/2003 au 10/11/2003. Les pixels sont noirs si le 85V_HHT est négatif, et en niveaux de gris jusqu'à blanc s'il est positif. Il est à noter que l'intensité du signal ne correspond pas à la quantité de neige tombée, mais seulement à une probabilité plus forte qu'il y ait eu précipitation à cet endroit. La corrélation entre ces cartes et les cartes présentées par B05 est très bonne. Les mêmes événements de précipitations sont détectés : Terre de la Reine Maud du 31/10/2003 au 06/11/2003, mer de Ross du 06/11/2003 au 10/11/2003... Ceci nous permet de valider notre algorithme de détection, comparativement à celui de B05.

Les statistiques annuelles de précipitations

L'algorithme étant validé, j'ai créé des cartes de statistiques annuelles de précipitations. J'ai donc écrit des routines permettant de calculer le nombre de périodes durant l'année où le 85V_HHT est positif, c'est-à-dire le nombre d'événements de précipitation. La comparaison de la carte de 2003 (Figure 4.3) avec celle présentée par B05 (Figure 2.6) n'est pas évidente. On peut tout de même remarquer qu'elles affichent toutes deux les mêmes zones avec très peu d'événements sur le plateau (centre est de l'Antarctique). L'annexe 4 présente les cartes de statistiques pour les années 1997 à 2006, les données pour les années 1996 et 2007 étant incomplètes.

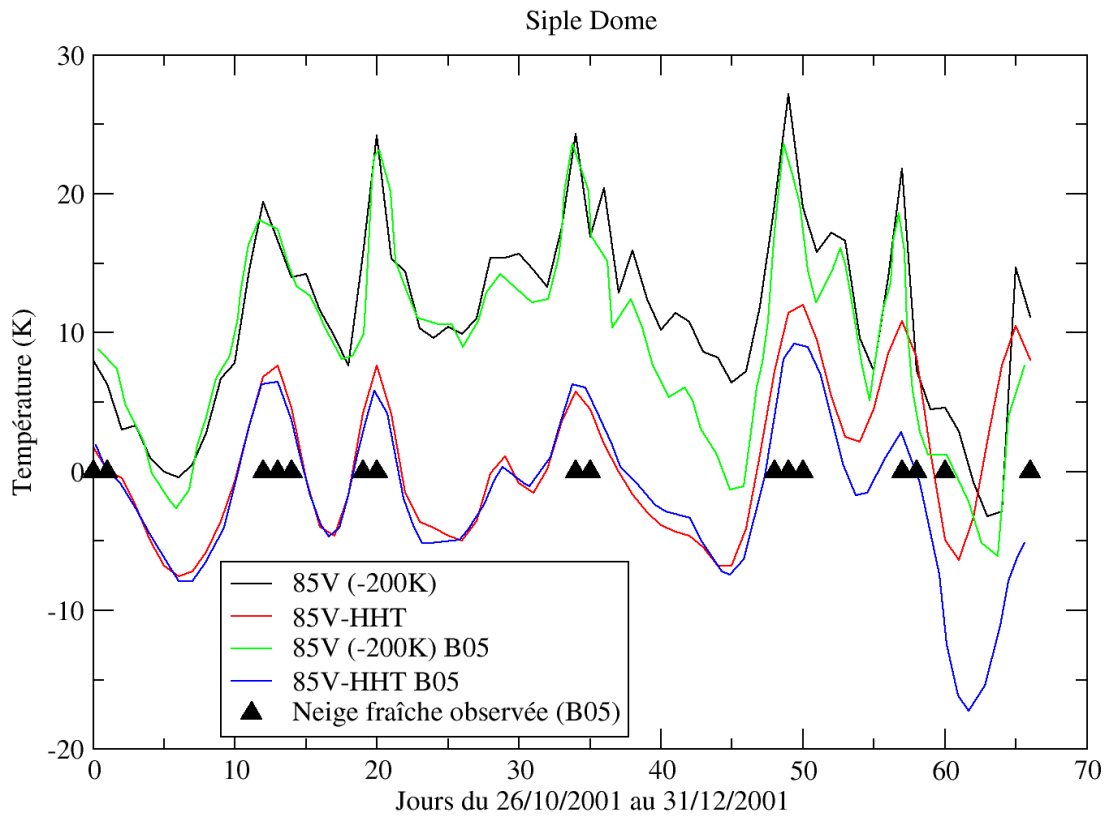


Figure 4.1. Graphe comparatif des courbes de 85V et de sa transformée 85V_HHT avec les courbes de Bindshadler et al. (2005) et avec les observations de neige fraîche, à Siple Dome, pour la période du 26/10/2001 au 31/12/2001.

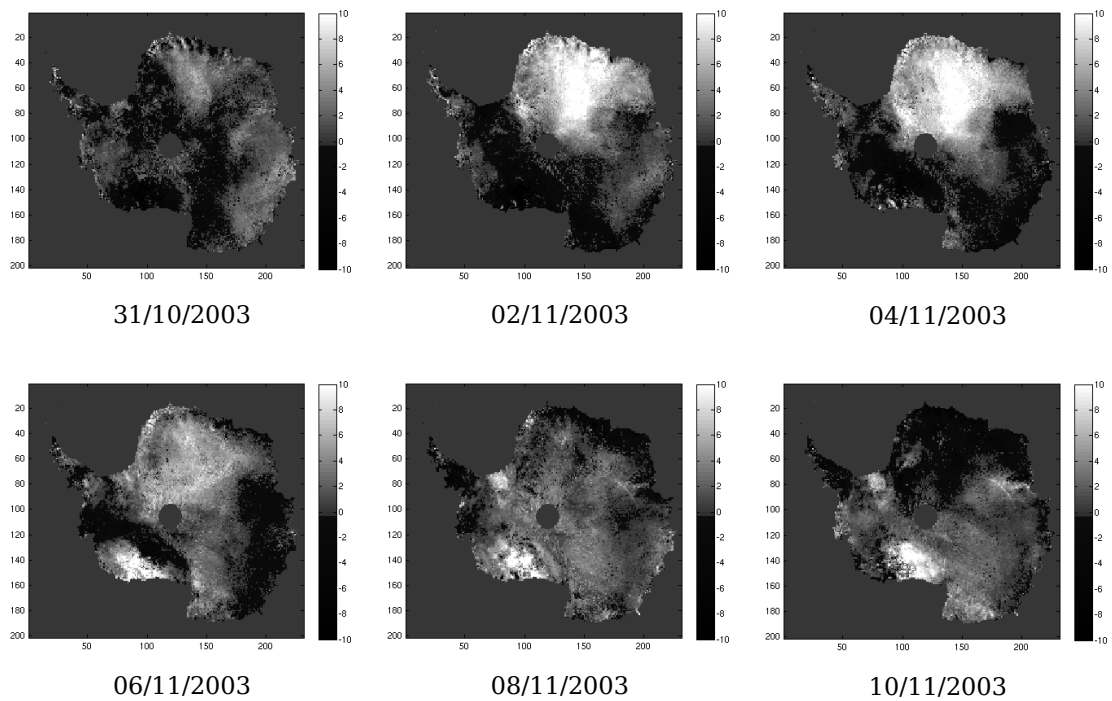


Figure 4.2. Suivi d'événements de précipitation : cartes du 85V filtré au cours du temps.

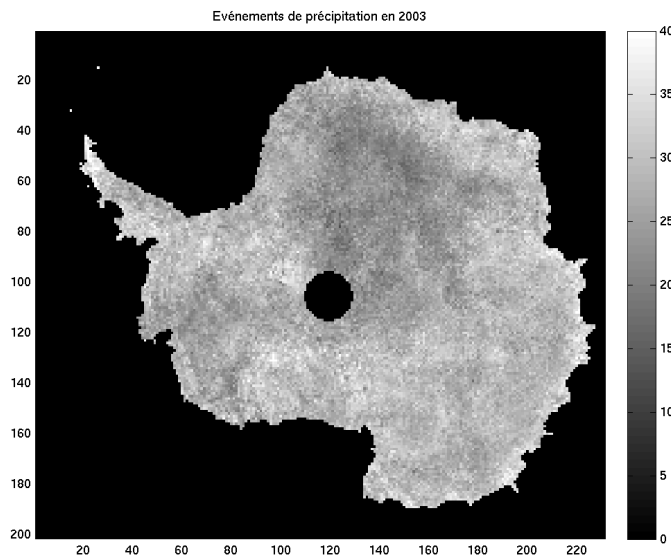


Figure 4.3. Nombre d'événements de précipitation durant l'année 2003.

4.2 Comparaison des résultats avec les réanalyses du CEPMMT

Le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme produit des réanalyses (ERA-40), mêlant observations et modélisation, jusqu'à l'année 2002. Pour les années suivantes, nous pouvons disposer des analyses opérationnelles. Dans les deux cas, les données correspondent à des quantités de précipitations en mètre équivalent eau. Elles sont fournies pour tous les jours, par tranche de 6h, dans des fichiers NetCDF, dans un format de planisphère. Un premier travail de projection de ces données sur notre grille a donc été nécessaire. Ces données ne sont pas directement comparables avec nos cartes puisque que nous ne produisons pas l'information de quantité. Nous pouvons toutefois comparer les dates et les localisations des événements de précipitations.

Pour cela, j'ai produit, pour différentes années, la série entière des cartes journalières de précipitations d'après les réanalyses du CEPMMT, en vis-à-vis avec les cartes correspondantes obtenues avec l'algorithme de détection. Cela facilite la comparaison visuelle des deux méthodes, qui aboutit au constat qu'elles s'accordent en général assez bien. La Figure 4.4 juxtapose la carte du 85V_HHT avec celle du CEPMMT, pour la date du 25/05/2000. Il est important de noter que, pour la première carte, la neige fraîche correspond aux zones dans les tons jaunes, oranges et rouges, et que pour la seconde, il y a précipitation dès la couleur bleu turquoise. La quantité de neige tombée dans le centre du continent est en effet très faible comparé à ce qui tombe sur la côte. Dans le cas présenté par la Figure 4.4, les deux cartes affichent les mêmes gros événements de précipitation au nord-ouest et à l'est de l'Antarctique. Des comparaisons à d'autres dates sont disponibles en annexe (Annexe 5).

En revanche, il nous arrive aussi de constater des cas où la carte obtenue avec notre méthode présente des précipitations absentes dans les réanalyses. La Figure 4.5 correspond à un cas de discordance entre les deux méthodes : notre algorithme détecte d'importantes variations du 85V au bord de la mer de Weddell, alors qu'aucune précipitation n'apparaît dans les réanalyses pour cette région. Dans certains cas, une telle situation s'explique par le fait qu'il y a eu précipitation la veille ou l'avant-veille (selon le CEPMMT) , et que la neige est encore relativement fraîche. Cependant, dans le cas de la Figure 4.5, les réanalyses ne présentent aucune précipitation à cet endroit les jours précédents.

C'est notamment à cause de cette possibilité de décalage dans le temps qu'une comparaison statistique et quantitative s'avère difficile pour le moment.

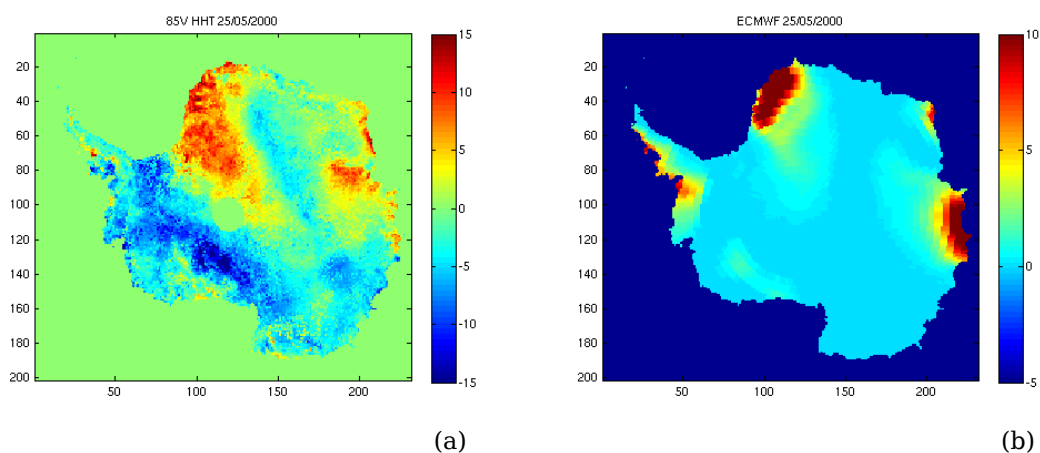


Figure 4.4. Comparaison de cartes au 25/05/2000 :
 (a) 85V filtré avec la HHT (K) ; (b) réanalyses du CEPMMT / ECMWF (mm éq. Eau).

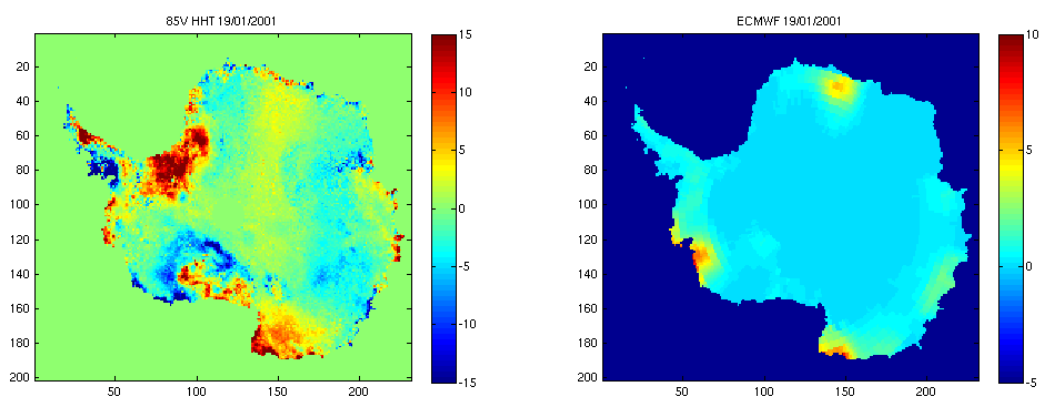


Figure 4.5. Comparaison de cartes au 19/01/2001 :
 (a) 85V filtré avec la HHT (K) ; (b) réanalyses du CEPMMT / ECMWF (mm éq. Eau).

5 Conclusion et perspectives

Au cours de ce projet, nous avons mis au point un algorithme de détection des événements de précipitation sur le continent Antarctique à partir des données satellites de température de brillance à 85 GHz. La méthode employée est directement inspirée de Bindschadler et al. (2005). Les résultats obtenus correspondent bien à ceux présentés par B05, ce qui permet de valider notre algorithme. D'autre part, nos résultats ont aussi une bonne corrélation avec les observations *in situ* de chutes de neige et les réanalyses du CEPMMT.

Toutefois, en ce qui concerne cette dernière comparaison, nous avons constaté des cas où notre algorithme détectait des précipitations qui n'apparaissaient pas dans les réanalyses. Il serait intéressant, par la suite, de vérifier que ces pics de HHT correspondent bien à une augmentation d'émissivité, et non à une brusque variation de température. Pour cela, on pourrait appliquer la HHT aux données de température de surface et juxtaposer la carte obtenue à celles du 85V_HHT et d'ECMWF.

Par ailleurs, les résultats obtenus gardent un caractère qualitatif, dans le sens où ils ne concernent que la détection des événements de précipitation et ne donnent aucune information sur la quantité de neige tombée. Les comparaisons n'ont été faites que visuellement et ne permettent pas de fournir des calculs d'erreur.

De plus, la validation de nos résultats à partir de la comparaison avec les réanalyses est à nuancer car celles-ci sont issues de modèles du CEPMMT. Cette comparaison peut aussi être faite dans l'autre sens et permettre de conforter les résultats des réanalyses. Quoi qu'il en soit, un bon accord entre les deux méthodes, comme c'est souvent le cas dans nos comparaisons, augmente fortement la probabilité que les événements détectés aient bien eu lieu.

D'autre part, il serait intéressant aussi d'explorer des basses fréquences (toujours dans le domaine des micro-ondes), comme celle de 6GHz. Les températures de brillance à cette fréquence sembleraient aussi présenter des sauts, qui, étant donné que les basses fréquences sont peu sensibles à la température de surface, correspondraient plutôt à des augmentations d'émissivité. Si cette observation était confirmée, cela permettrait d'augmenter la robustesse de notre méthode.

Les applications de cette méthode se trouvent notamment dans l'analyse climatique. Par exemple, Christophe Genthon, directeur de recherche au LGGE, étudie la relation entre le nombre d'événements de précipitation en Antarctique de l'Ouest et le phénomène ENSO (El Niño et oscillation australe). D'autre part, la mise en œuvre de cette méthode s'inscrit dans le vaste projet Ice2Sea (projet de collaboration à grande échelle au sujet de l'estimation de la contribution future de la glace continentale à l'élévation du niveau des mers), auquel le LGGE postule.

Remerciements

Je remercie Ghislain Picard, Michel Fily et Christophe Genthon pour m'avoir proposé ce sujet de stage et pour m'avoir ainsi permis d'effectuer un projet personnel en laboratoire très enrichissant, à tous points de vue.

Je remercie tout particulièrement Ghislain Picard, mon maître de stage, dont les conseils m'ont bien guidée dans la réalisation de ce projet, pour l'attention et l'aide qu'il a portées à la rédaction de ce rapport.

Un grand merci à Ludovic Brucker, toujours disponible pour répondre à mes questions, et dont les conseils techniques m'ont été grandement utiles.

Je remercie également :

Michel Vallon pour m'avoir fait une petite place dans son bureau ;

Marie-Pierre, Cécile, Giuliat et Charlie pour l'accueil qu'ils m'ont fait au laboratoire ;

Les autres stagiaires, thésards et chercheurs du LGGE, avec qui partager le repas de midi au RU était bien sympathique!

Bibliographie

Arthern, R. J., D. P. Winebrenner and D. G. Vaughan (2006), Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission, *Journal of Geophysical Research*, 111, D06107, doi: 10.1029/2004JD005667.

Bindschadler, R., H. Choi, C. Shuman, and T. Markus (2005), Detecting and measuring new snow accumulation on ice sheets by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment* 98 (2005) 388-402.

Giovinetto, M. B., and H. J. Zwally (2000), Spatial distribution of net surface accumulation on the Antarctic ice sheet, *Ann. Glaciol.*, 31, 171-178.

Huang, N. (1998), The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society of London, A*, 454, 903-995.

Huang, N. and Z. Wu (2008), A review on Hilbert-Huang Transform: method and its applications to geophysical studies, *Reviews of Geophysics*, 46, RG2006, doi: 10.1029/2007RG000228.

Magand O., C. Genthon, M. Fily, G. Krinner, G. Picard, M. Frezzotti, A. A. Ekaykin (2007), An up-to-date quality-controlled surface mass balance data set for the 90°–180°E Antarctica sector and 1950–2005 period, *Journal of Geophysical Research*, 112, D12106, doi:10.1029/2006JD007691.

Maslanik, J., and J. Stroeve (1990), updated current year. DMSP SSM/I daily polar gridded brightness temperatures, [list dates of temporal coverage used]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media.

Nakaya, U. (1954), *Snow crystals: natural and artificial*. Cambridge: Harvard University Press.

Rémy, F. (2003), *L'Antarctique, la mémoire de la Terre vue de l'espace*, 180 pages, CNRS Editions, Paris.

Rott, H., K. Sturm, and H. Miller (1993), Active and passive microwave signatures of Antarctic firn by means of field measurements and satellite data, *Annals of Glaciology*, 17, 337-343.

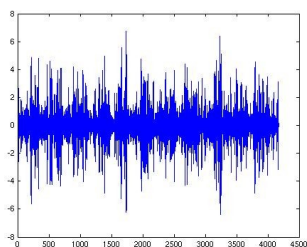
Van de Berg, W. J., M. R. van den Broecke, C. H. Reijmer, and E. van Meijgaard (2006), Reassessment of the Antarctic surface mass balance using calibrated output of a regional atmospheric climate model, *Journal of Geophysical Research*, 111, D11104, doi: 10.1029/2005JD006495.

Vaughan, D. G., and J. Russell, 1997, Compilation of surface mass balance measurements in Antarctica. British Antarctic Survey Internal Rep. ES4/8/1/1997/1, 56 pp.

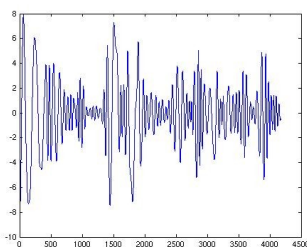
Vaughan, D. G., J.L. Bamber, M. Giovinetto, J. Russell, and A. P. R. Cooper (1999), Reassessment of net surface mass balance in Antarctica, *J. Clim.*, 12, 933-946.

Annexes

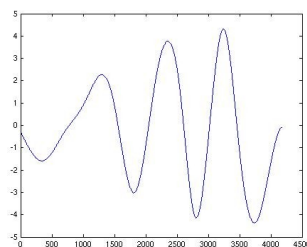
Annexe 1 : Exemple de décomposition en différentes IMF



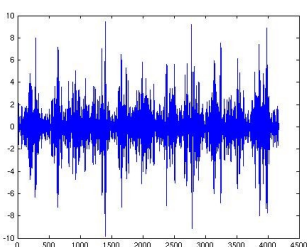
IMF 1



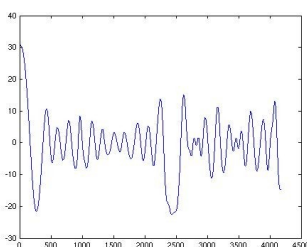
IMF 5



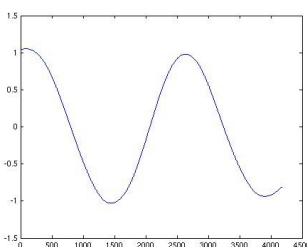
IMF 9



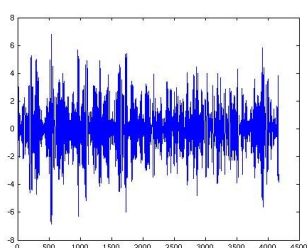
IMF 2



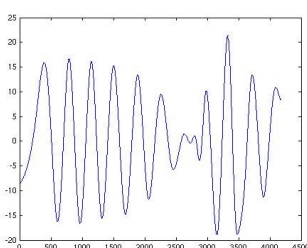
IMF 6



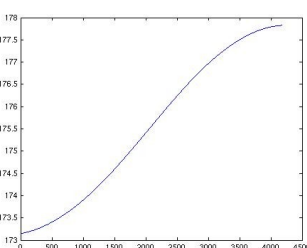
IMF 10



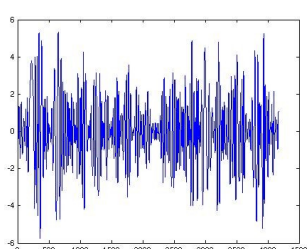
IMF 3



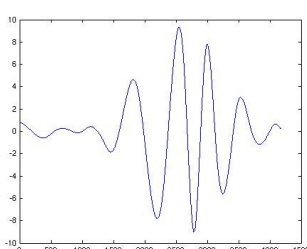
IMF 7



Résidu final



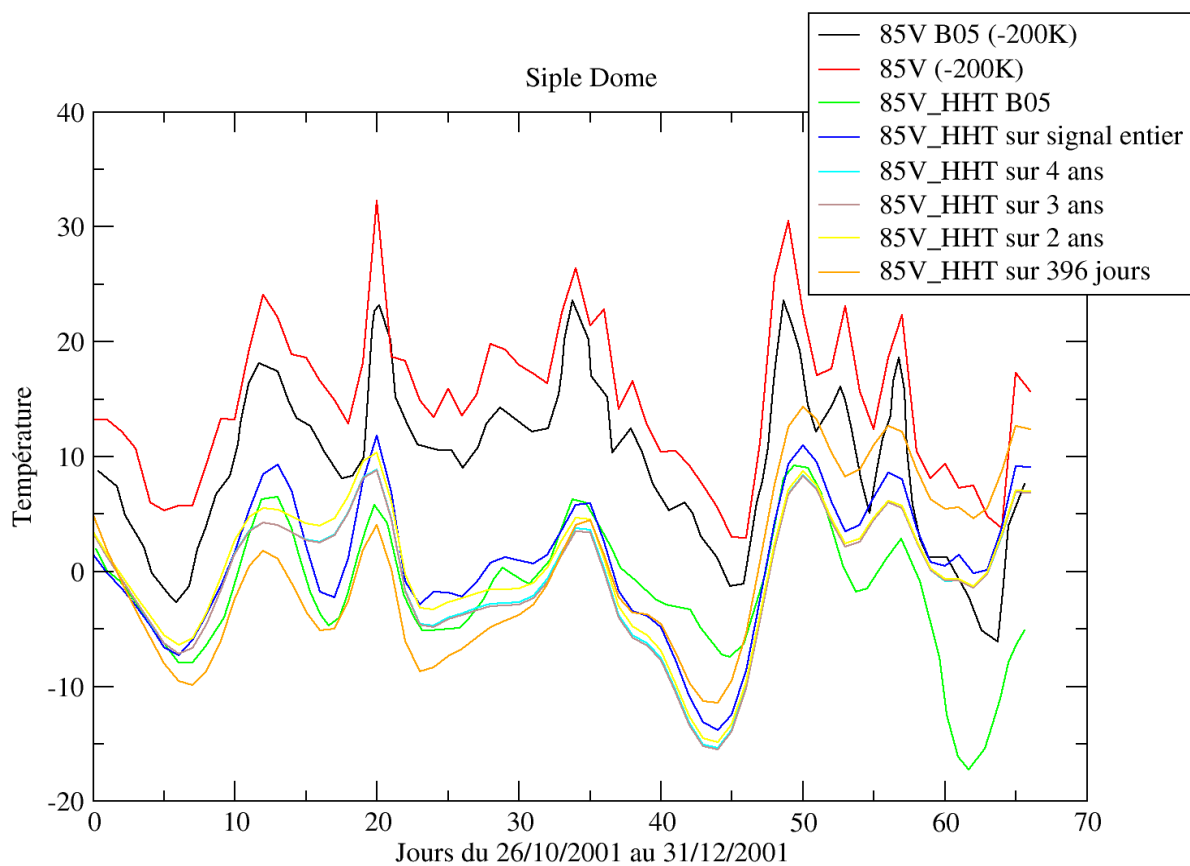
IMF 4



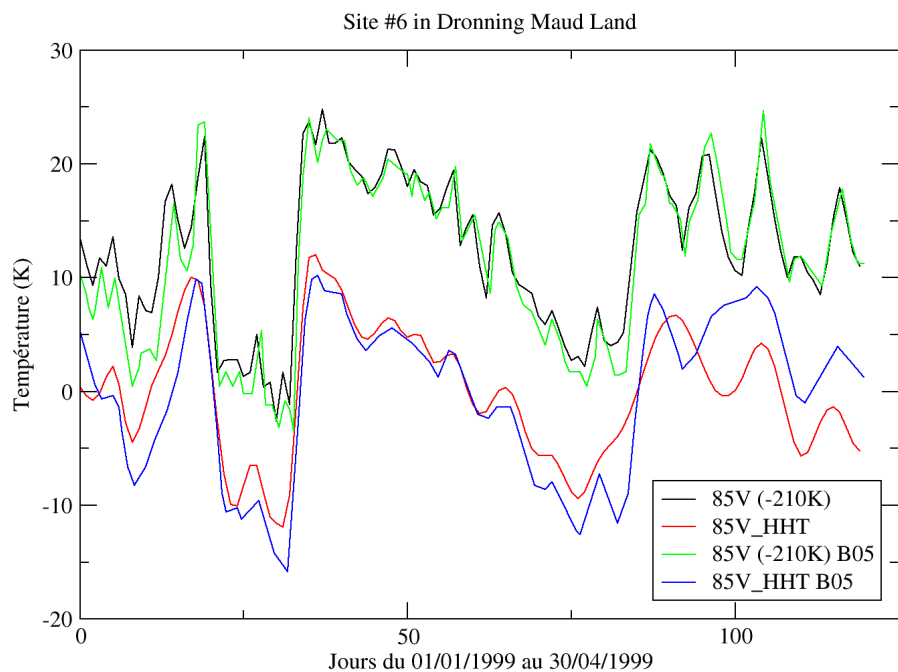
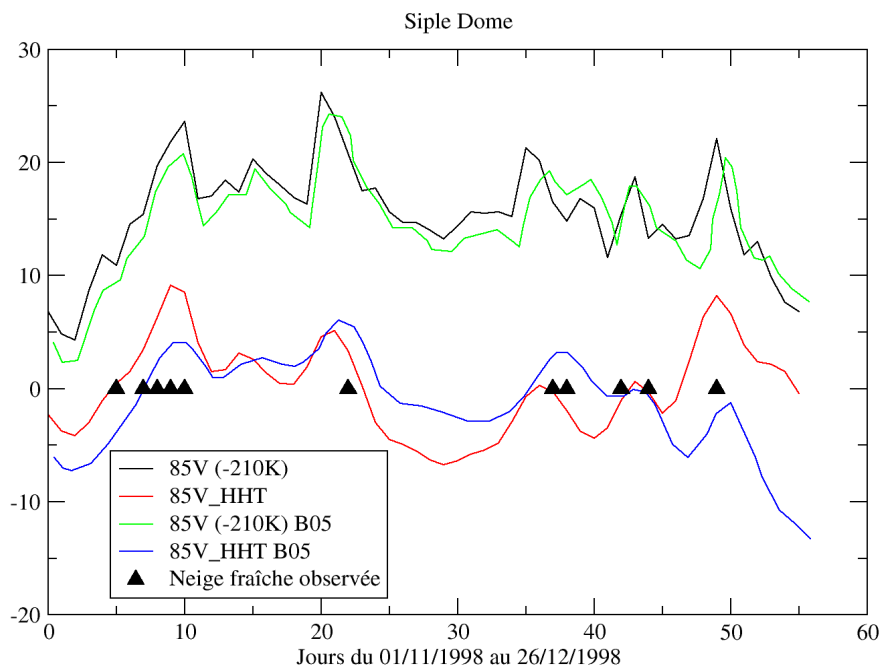
IMF 8

(Dronning Maud Land, 1997-2007)

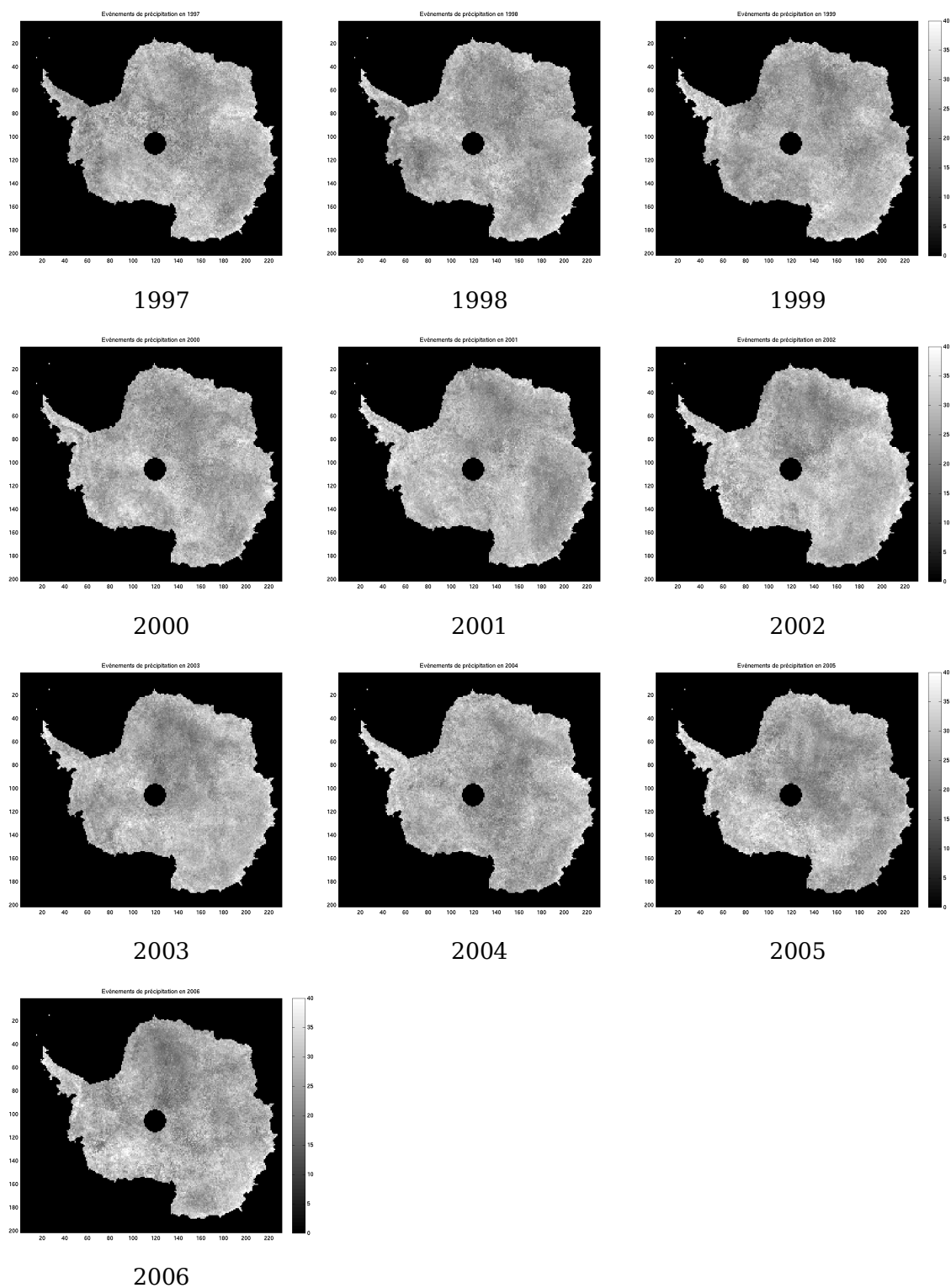
Annexe 2 : Graphe comparatif des signaux originaux (85V) et filtrés (85V_HHT) avec des procédures de filtrage effectuées sur des périodes de différentes longueurs.



Annexe 3 : Comparaison des courbes obtenues avec celles de B05



Annexe 4 : Statistiques de précipitations



Cartes annuelles du nombre d'événements de précipitation.

Annexe 5 : Exemples de comparaison HHT/réanalyses

Les échelles de couleur sont les mêmes que celles de la Figure 4.4.

