

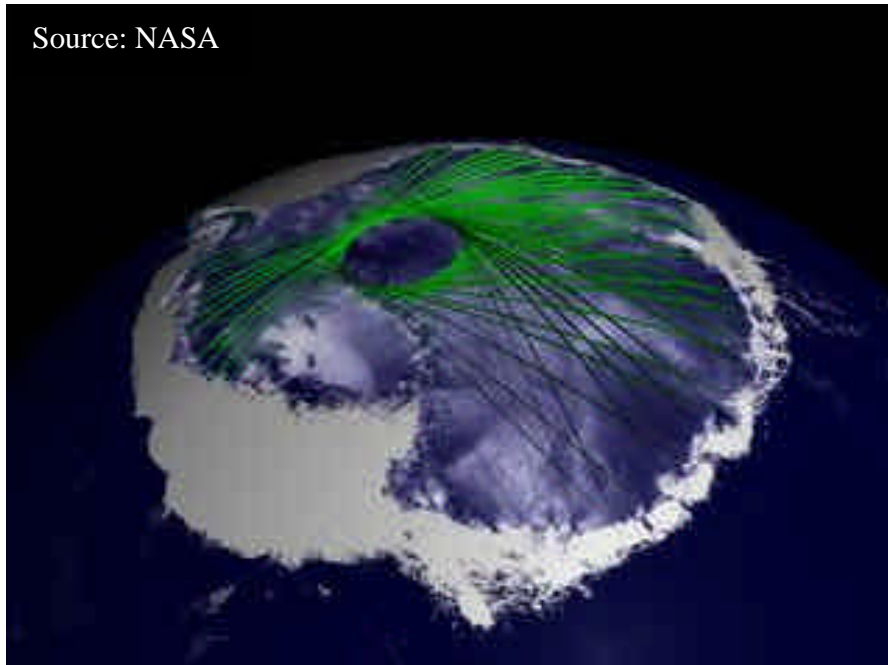


# Fontes estivales en Antarctique : Comparaison entre observations et modèles météorologiques

Frédéric Cyr

École Nationale Supérieure de Techniques Avancées

Source: NASA



Rapport de projet personnel en laboratoire  
Réalisé au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

Sous la supervision de Ghislain Picard, LGGE  
Tuteur : Laurent Mortier, ENSTA

Date de soutenance 9 juillet 2007, Paris





## Résumé

Le continent Antarctique subit chaque été des fontes superficielles sur ses côtes et ses plateformes de glace flottante. La caractérisation de leur évolution nous aide à mieux comprendre le climat antarctique et ses variations. Des méthodes de détection de la fonte via la télédétection micro-onde passive ont été mises au point. La présente étude compare les observations par télédétection avec des simulations numériques de modèles météorologiques afin de mieux comprendre les processus liés à la fonte. Dans un premier temps, la fonte prévue par le modèle météorologique tridimensionnel MAR (Modèle Atmosphérique Régional) a été analysée. Les résultats montrent que la résolution spatiale de MAR est trop grossière (40 km) pour décrire proprement la topographie escarpée des zones côtières de l'Antarctique, où se situe la majeure partie de la fonte. Comme l'altitude des zones côtières dans MAR est trop élevée, le modèle prévoit moins de fonte qu'observée. Cependant, l'évolution temporelle de la fonte est correctement prédite par le modèle. Pour résoudre les problèmes liés à la topographie, des simulations avec le modèle de neige CROCUS, forcé par les réanalyses météorologiques ERA-40, ont été effectuées à la résolution des observations (25 km). Notre analyse montre que ces simulations représentent mieux la variabilité spatiale de la fonte que MAR. Suites à ces constatations, la première solution envisagée serait de faire des simulations avec MAR à plus fine résolution, situation qui nécessiterait toutefois un temps important de calcul. La deuxième solution, plus pragmatique, serait de forcer CROCUS avec les sorties météorologiques de MAR, forçage qui sont probablement de meilleure qualité que les réanalyses utilisées.

## Abstract

Each year, during austral summer, the Antarctic continent is subjected to surface melting on its coasts and its floating ice shelves. The characterisation of their evolution helps us for a better understanding of Antarctic climate and its variations. Remote sensing methods using microwave radiometers have been developed to detect melting on the continent. The present study compares remote sensing observations and numerical simulations by meteorological models, on a way to improve our understanding of melting processes. We first analysed melting events detected by the tridimensional meteorological model MAR (Modèle Atmosphérique Régional). This analysis revealed that the model's resolution (40 km) was too coarse represent the steep coastal topography where most melting events occur. Because altitude of MAR's grid in the coastal regions is too high, the model does not predict enough melting events. However, the temporal evolution of snow melt is correctly predicted by the model. To resolve the topography problem, simulations have been done with the one-dimensional snow model CROCUS, forced by the meteorological re-analyses ERA-40 and at the resolution of the observations (25 km). Our analysis reveals that these simulations have a better representation of the spatial variability of melting duration with respect to MAR. After these findings, a first solution would be to run MAR on a finer grid (25 km), but that solution would need a lot of computing time. On another hand, a more realistic solution would be to use MAR simulation's results to force CROCUS. This forcing is probably more accurate than ERA-40.



<b>RESUME .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Fonte en Antarctique : état de l'art .....	1
1.2 Problématique du stage.....	3
1.3 Environnement de travail .....	3
1.3.1 Le LGGE et la recherche .....	3
1.3.2 Le travail au quotidien .....	4
<b>2. OBSERVATION DE LA FONTE EN ANTARCTIQUE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. MODELISATION DE LA FONTE .....</b>	<b>9</b>
3.1 MAR.....	9
3.2 CROCUS.....	10
3.3 Particularités des modèles et leur forçage.....	11
<b>4. ANALYSE COMPARATIVE ENTRE OBSERVATIONS ET MODELES.....</b>	<b>13</b>
4.1 Analyse des simulations MAR.....	13
4.2 Traitement des données CROCUS.....	18
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>21</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>23</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>24</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>27</b>



# 1. Introduction

La compréhension et la modélisation du climat terrestre sont au cœur de l'actualité. Ce dernier est le résultat d'interactions complexes entre les différentes structures de notre planète telles que l'atmosphère, les océans, la biosphère et la cryosphère. Dans une optique d'améliorer les connaissances dans ce domaine, il importe d'étudier et de comprendre tout d'abord à plus petite échelle les interactions entre le climat et l'environnement régional avant d'intégrer les différents paramètres dans un modèle de circulation générale du climat.

Les pôles étant particulièrement sensibles aux variations climatiques, la compréhension de leur variabilité interannuelle est essentielle pour notre compréhension du climat global. Le continent Antarctique est un acteur de premier plan dans la dynamique des changements climatiques, puisqu'il est la plus grande réserve de glace de la planète (90% des glaces terrestres), et leur fonte correspondrait à une élévation du niveau de la mer d'environ 65 mètres.

À une plus courte échelle de temps, ce continent subit, chaque été, des fontes locales sur sa périphérie, fontes qui peuvent nous renseigner l'évolution du climat antarctique et sur le bilan d'énergie du continent. Mon projet personnel en laboratoire, réalisé au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) sous la tutelle de M. Ghislain Picard, fut donc réalisé dans l'étude de ces dernières. Mon travail durant ce stage aura été de comparer les résultats d'observations satellites avec les sorties d'un modèle de climat régional et d'un modèle de neige.

## 1.1 Fonte en Antarctique : état de l'art

Le continent Antarctique est soumis chaque année (durant l'été antarctique) à des fontes superficielles sur sa périphérie. L'évolution de ces dernières nous renseigne entre autres sur l'évolution du climat sur le continent.

Afin d'étudier ce continent sur lequel les données de terrain sont très rares, les scientifiques ont su profiter du développement des techniques de télédétection. Les radiomètres micro-ondes embarqués sur les satellites depuis 1979 nous donnent de précieuses informations sur les régions qui sont soumises aux fontes. En effet, on sait que la présence d'eau liquide dans les premiers mètres du manteau neigeux influe fortement sur la température de brillance émise par le manteau, quantité physique mesurée par le capteur (voir chapitre 2.1). En développant des algorithmes de détection, Mote et al. (1993), Walker & Goodison (1993) et Zwally & Fiegles (1994) ont démontré qu'il est possible de détecter des événements de fonte à la surface de l'Antarctique avec la résolution des capteurs micro-onde passive qui est de quelques dizaines de kilomètres.

L'algorithme détectant la fonte utilise à la température de brillance polarisée horizontalement à 19 GHz, fréquence qui semble la mieux adaptée pour la détection de la fonte en Antarctique (Torinesi et al., 2003 ; Zwally & Fiegles, 1994 ; Liu et al., 2005, 2006). Fettweiss et al. (2005) ont montré, avec l'aide du modèle MAR dont nous parlerons dans le présent rapport, que l'algorithme de détection utilisé au Groenland, le XPGR (Cross-polarized gradient ratio), algorithme utilisant les fréquences de 19 GHz et 37 GHz était très sensible aux intempéries,

notamment aux précipitations liquides. Mais cette situation ne semble pas concerner l'Antarctique, car le problème est possiblement causé par la fréquence de 37 GHz dont la longueur d'onde (~8mm) est du même ordre de grandeur que les gouttelettes d'eau, fréquence que nous n'utilisons pas.

Un autre avantage de l'observation micro-onde est la longueur de la série temporelle dont nous disposons. En effet, 7 radiomètres se sont succédés depuis 1979 (voir figure 1.1.1), ce qui nous permet d'étudier les tendances à moyen et long terme de la fonte tel qu'effectué par Torinesi et al.(2003). C'est aussi cette série qui a permis à Fahnestock et al. (2002) de montrer que sur la période 1979-2000 la durée de la période de fonte a tendance à augmenter sur les plateformes glaciaires, tendance qui pourrait expliquer la désintégration des plateformes du Larsen A et B, respectivement en 1995 et 2002 (Scambos et Al., 2000).

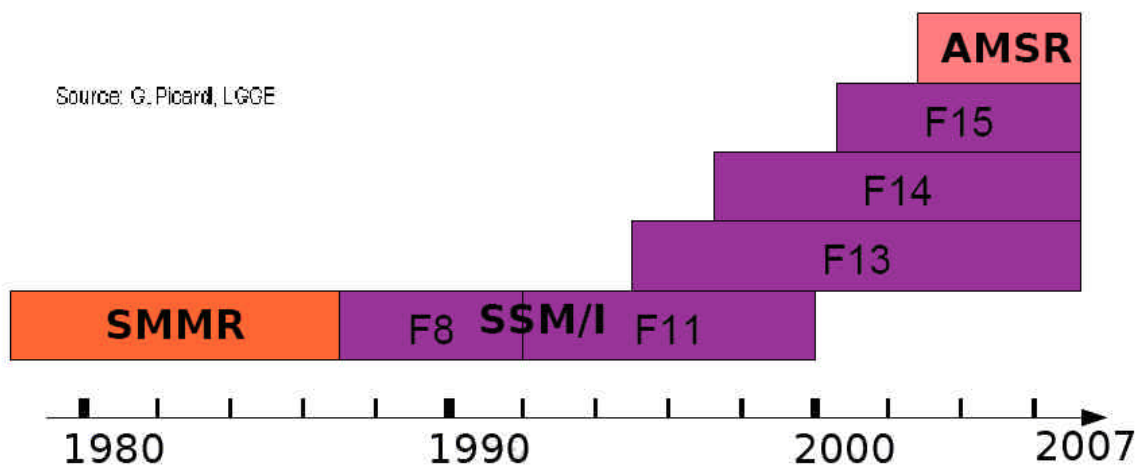
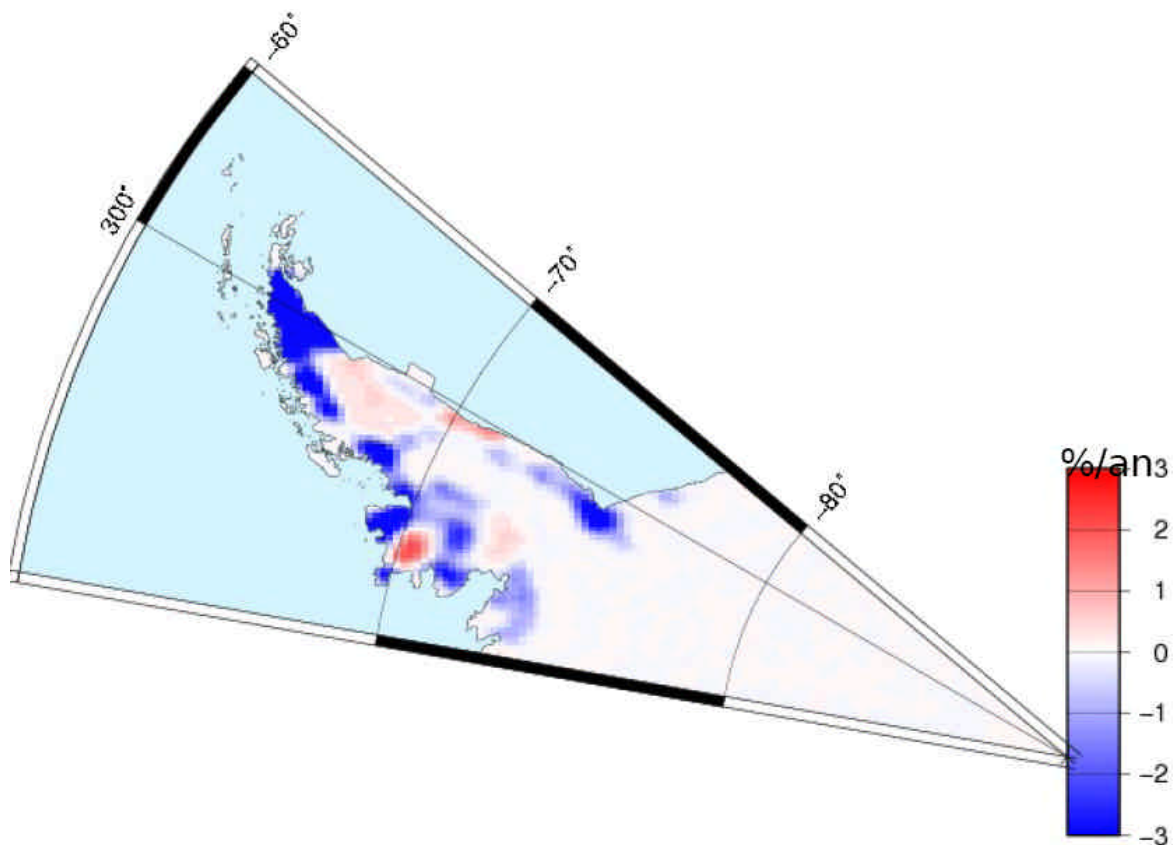


Figure 1.1.1 – radiomètres qui se sont succédé au dessus de l'Antarctique

Cependant, puisque l'heure de passage des satellites au dessus des régions d'observation diffère d'un capteur à l'autre, et que l'évolution de la fonte (et par conséquent de la température de brillance) évolue pendant la journée, cette série temporelle a dû être corrigée (Picard & Fily, 2006). La série temporelle qui nous intéresse ici est celle qui comprend, pour chaque pixel du continent à une résolution de 25x25 km<sup>2</sup> et pour chaque jour de 1979 à 2006, les pixels qui sont déclarés fondus. De cette série, nous utilisons seulement les années 1988-2002, afin de demeurer dans les observations des radiomètres SSM/I, radiomètres de meilleure qualité que SMMR et parce que nous possédons des simulations des modèles que jusqu'en 2002 (fin de ERA-40).

Sur cette échelle de temps, les dernières publications sur le sujet ont montré qu'il existe une importante variabilité spatiale sur les tendances à long terme de la fonte selon que la région observée se trouve en haute ou basse altitude (<200m). En effet, Picard et al. (2007) montrent que les régions de faible altitude, telles que les plateformes, ont tendance à voir leur durée de fonte s'allonger, contrairement aux régions de plus hautes altitudes qui voient leur durée de fonte diminuer (voir figure 1.1.2). Ce phénomène est toutefois encore mal compris, et, jusqu'à ce jour, aucune publication ne traite de la comparaison des observations de fonte avec des modèles. C'est cette modélisation de la fonte que nous avons abordé avec ce stage.





**Figure 1.1.2 – Tendances de la durée de fonte sur la péninsule**  
 L'échelle est en pourcentage de variation par an.  
 Source : Picard et al., 2007.

## 1.2 Problématique du stage

Le présent stage propose alors de faire ce travail en analysant des simulations de 2 modèles numériques et en comparant les résultats avec les observations. Ces 2 modèles sont, tel que nous le verrons plus tard, le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) et CROCUS, un modèle de neige. Le but est de déterminer si les modèles MAR et CROCUS prévoient les mêmes résultats que les observations pour ce qui est de la distribution spatiale et temporelle de la fonte, ainsi que sur les tendances de celle-ci sur la période dont nous disposons des sorties de modèles, c'est-à-dire de 1988 à 2002.

## 1.3 Environnement de travail

### 1.3.1 Le LGGE et la recherche

Le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement est une unité mixte dépendant directement du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Joseph Fourier à Grenoble. Le LGGE a bâti sa renommée dans l'étude du climat

terrestre et de son évolution, plus particulièrement via les archives que représentent la neige et la glace. La recherche au LGGE s'axe autour de 4 thèmes principaux. Les chercheurs sur les *paléoclimats et paléoenvironnements* tentent de reconstituer les climats passés avec l'aide notamment des forages dans les calottes glaciaires, technique qui a contribué à la renommée internationale du laboratoire. L'équipe *matériau glace, glaciers et calottes polaires* étudie la mécanique de la glace, du réseau cristallin jusqu'aux calottes. Une autre équipe oriente ses recherches sur la *chimie atmosphérique et les processus air-neige-glace*. Cette équipe étudie la machine physico-chimique qu'est l'atmosphère et son interaction avec les régions polaires ou alpines. Finalement, l'équipe de *climat moderne et observations glaciologiques* s'intéresse à l'état moyen du climat et à sa variabilité en régions polaires et alpines. Cette équipe travaille avec des données in-situ de terrain, mais utilise aussi la modélisation et la télédétection. C'est dans cette équipe que mon stage s'est déroulé.

### 1.3.2 Le travail au quotidien

Mon travail au sein du LGGE aura été, comme mentionné précédemment, de comparer les observations de télédétection et les simulations numériques obtenues de modèles. Deux modèles ont été étudiés, MAR et CROCUS, qui seront présentés plus loin. Les simulations de MAR utilisées pendant le stage (plus de 40 Go) proviennent de la production d'une importante masse de données (plus de 1 To) qui avait déjà été effectuée par M. Hubert Gallée, un des créateurs du modèle et maintenant chercheur au LGGE. Mon travail aura alors été d'extraire de ces données de l'*Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique* (IDRIS), le centre de calcul de haute performance du CNRS, et de les rapatrier sur les serveurs du LGGE afin de les analyser. Pour ce qui est de CROCUS, Ghislain Picard, et Ludovic Brucker, étudiant en thèse au LGGE, se sont chargés des simulations, tandis que mon travail était encore une fois la comparaison entre les résultats et les observations. Ces simulations étaient en constante amélioration puisqu'il s'agissait d'une des première fois que le modèle tournait sur le continent Antarctique (Genthon et al., accepté). Afin de nous aider à améliorer le programme, nous avons aussi reçu la visite de M. Jean-Marie Willemet, chercheur responsable de CROCUS au Centre d'Étude de la Neige, Météo-France. Ce travail de constante amélioration du programme ne m'a donc pas permis de pousser aussi loin l'analyse des résultats que l'on aurait voulu, mais les résultats préliminaires sont de bon augure pour de futures analyses.

Le travail au quotidien aura donc été d'analyser une masse importante de données spatio-temporelles concernant les observations de fonte et les résultats des simulations de MAR et de CROCUS. Il a donc fallu écrire des routines sur *Matlab* permettant de traiter l'ensemble de ces données qui se présentaient en format NetCDF (*Network Common Data Form*), format binaire, auto-documenté, couramment utilisé en sciences de la Terre et de l'environnement.

Afin de faire évoluer rapidement le travail et de s'orienter plus rapidement vers une voie à suivre suite aux premiers résultats, G. Picard a organisé, à mi-stage, une petite présentation avec les principales personnes concernées par mes travaux, c'est-à-dire L. Brucker - qui utilise CROCUS en Antarctique et au Canada - , M. Gallée - responsable de MAR au LGGE - et M. Michel Fily. L'ensemble de ces discussions, rencontres et analyses nous ont permis de définir une direction commune à prendre pour la fin du stage.

## 2. Observation de la fonte en Antarctique

### *Quelques concepts de télédétection et de radiométrie*

La télédétection regroupe l'ensemble des méthodes d'acquisition de l'information à distance par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique. On distingue 2 grandes catégories, la télédétection active et la télédétection passive. Tandis que la première nécessite une source de rayonnement artificiel (ex. radar) la deuxième recueille le rayonnement émanant naturellement (infrarouge et micro-onde passive) ou par réflexion (visible, radar et micro-onde) de la surface terrestre.

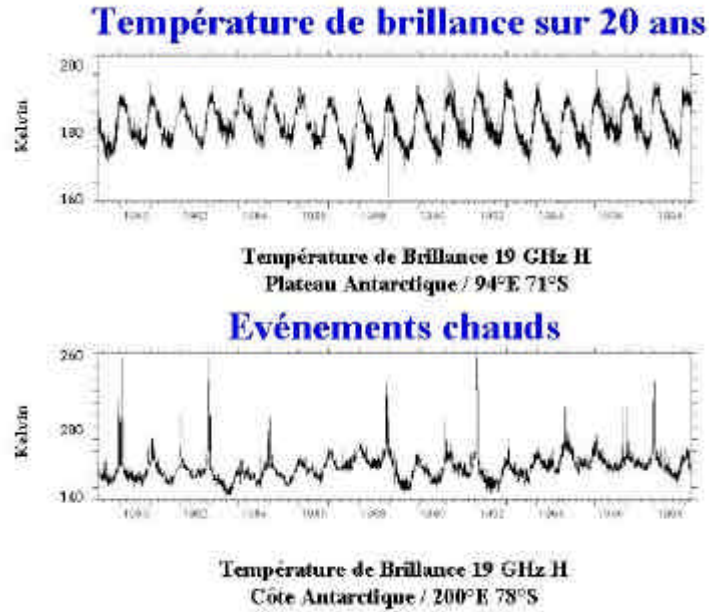
Dans la présente étude, nous nous intéressons à la télédétection passive. En effet, la Terre et l'atmosphère reçoivent depuis le soleil un rayonnement incident dans les courtes longueurs d'onde (ultra-violet et visible) et réémet après absorption un rayonnement de plus grandes longueurs d'onde (infrarouge thermique et micro-ondes). Comme mentionné précédemment, la longueur d'onde utilisée dans l'étude de l'Antarctique se trouve dans le domaine des micro-ondes. Ce rayonnement est capté par des radiomètres embarqués sur des satellites survolant au moins 2 fois par jour chaque point du continent. Ces satellites ont une orbite polaire héliosynchrone, c'est-à-dire que le satellite se trouve à passer au dessus d'un point toujours à la même heure locale. La grandeur physique mesurée est la température de brillance, mesure d'énergie émise par le manteau.

Afin de comprendre comment l'on détecte les événements de fonte, il importe de faire un rappel de la physique du rayonnement, plus particulièrement le rayonnement micro-onde de la neige. Comme mentionné précédemment, le radiomètre embarqué sur le satellite mesure la température de brillance ( $T_B$ ) de la surface. Cette dernière est fonction de l'émissivité et de sa température physique tel que le montre, en première approximation, la relation 2.1.

$$T_B = eT_s \quad (2.1)$$

où  $e$  représente l'émissivité de la neige et  $T_s$  sa température.

Cette température de brillance est une quantité intégrée sur une épaisseur du manteau neigeux de quelques mètres et est influencée par la structure de celui-ci via l'émissivité. Cette dernière grandeur physique dépend elle-même de la constante diélectrique du milieu qui gouverne l'absorption des micro-ondes. Cette constante est influencée par plusieurs phénomènes (taille des grains de neige, croûte de gel/regel, etc.), mais surtout, pour ce qui nous intéresse, par la présence d'eau liquide dans le manteau. Ainsi, alors que l'absorption des micro-ondes est faible pour la neige sèche, l'absorption de la neige fondue est plus importante par conséquent sa température de brillance se trouve augmentée (voir figure 2.1). Avec un algorithme de détection (Zwally & Fiegles, 1994, Torinesi et al., 2003, Picard & Fily, 2006) il est possible de déterminer si un pixel observé est fondu ou non à partir d'une valeur seuil de la température de brillance. Notons au passage qu'il est admis dans la littérature que l'attribution de « fondu » à un pixel correspond à un contenu en eau liquide (liquid water content ou LWC) d'environ 1% par volume dans le premier mètre de neige (Fettweis et al., 2006), mais nous verrons plus loin que dans notre cas ce seuil est trop important pour les modèles utilisés.



**Figure 2.1 – Détection des événements de fonte**

En haut : Variation interannuelle de la température de brillance sur le continent. Les variations sont principalement dues à la variation de la température physique du manteau.

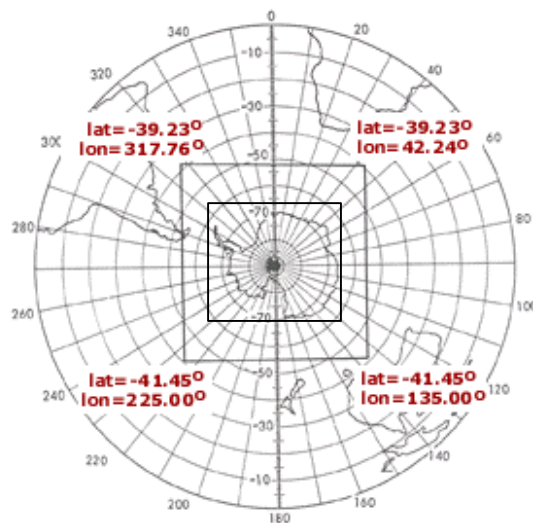
En bas : Variation de la température de brillance sur la côte Antarctique. Les pics sont dus à la présence d'eau liquide en surface.

Source : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

### Discretisation spatiale des observations

Les données de télédétection sont projetées en projection stéréographique polaire sur une grille telle que définie par le *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC) organisme qui fournit aussi les données de télédétection brutes (température de brillance) que nous utilisons. La grille utilisée est régulière, avec des pixels carrés de 25 km de côté.

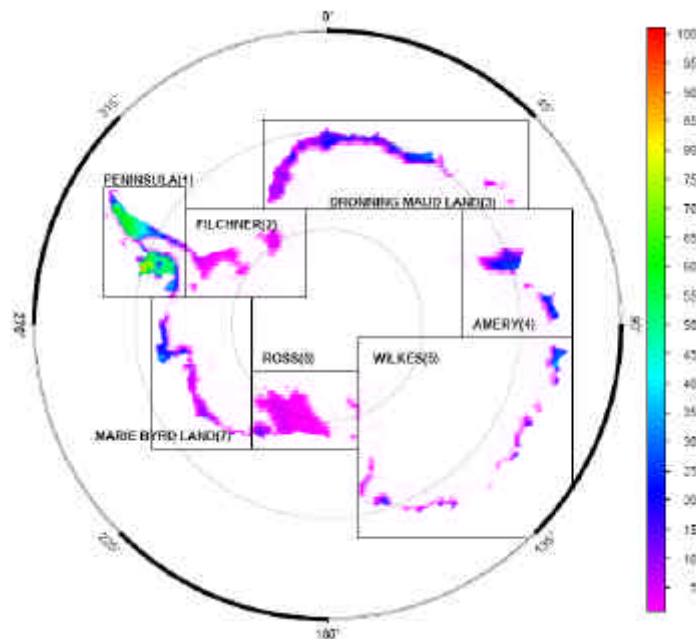
Source: NSIDC



**Figure 2.2 – Carte de la projection stéréographique du NSIDC.** La carte utilisée est une sous grille de dimension 201 x 231 qui minimise les pixels se trouvant dans l'eau.

### *Les régions du Continent*

Afin de nous aider dans l'étude du continent, nous avons découpé le continent en différentes régions où la fonte semble homogène. Ce découpage en 7 régions telles que présentées à la figure 2.3 provient de Torinesi et al. (2003) et est inspiré de Zwally & Fiegles (1994). Nous les nommons : Péninsule, Filchner, Dronning Maud land, Amery, Wilkes, Ross, et Marie Byrd Land. Comme nous le verrons dans les prochains paragraphes, l'étude plus approfondie des phénomènes de fonte a été réalisée pour la Péninsule (région complexe par sa topographie, mais où la fonte est la plus importante) et pour la région d'Amery.



**Figure 2.3 – Carte de la durée annuelle moyenne de la fonte de surface et de l'emplacement des 7 régions du continent tirée de Torinesi et al. (2003). L'échelle a pour unité le jour.**

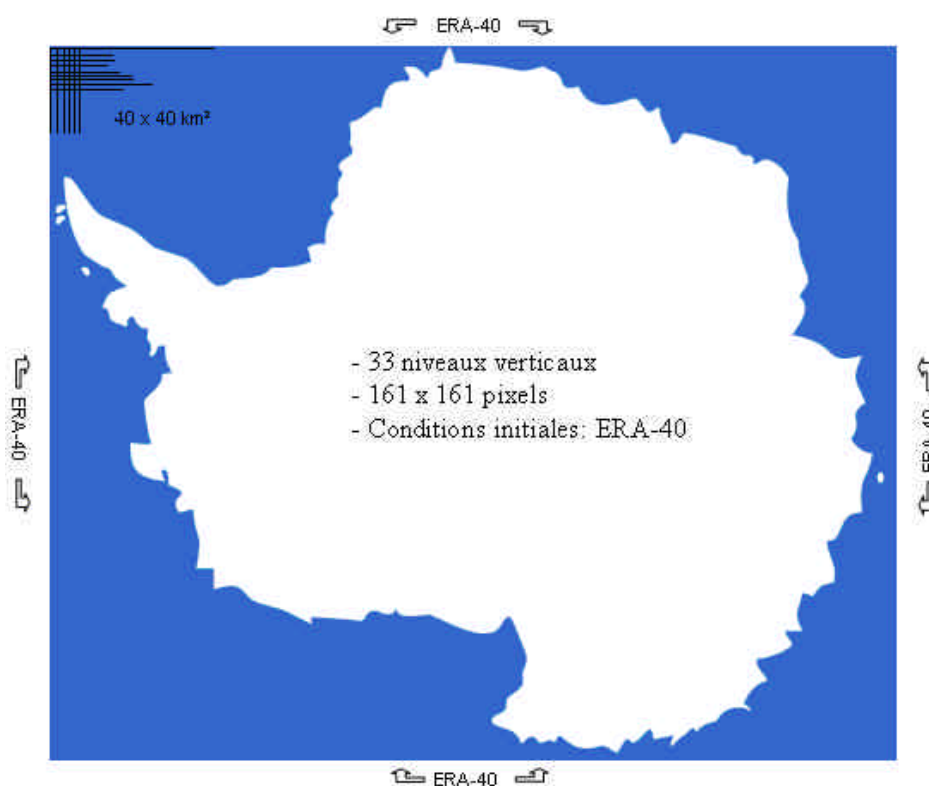


### 3. Modélisation de la fonte

Au cours du stage j'ai eu l'occasion de travailler avec 2 modèles numériques simulant la fonte de la neige. Le premier, MAR (*Modèle Atmosphérique de Régional*), est un modèle de circulation atmosphérique qui a été adapté pour les climats polaires (Gallée et Duynkerke, 1997). Le second modèle utilisé, appelé CROCUS, est un modèle du couvert neigeux proprement dit. Développé dans les Alpes françaises à la fin dans années 80, son utilité première était la prédiction des avalanches. Ces 2 modèles seront successivement décrits dans la présente partie. Par la suite, suivra une description plus complète de l'analyse de ces modèles comme indicateurs de la fonte, ainsi que leur comparaison entre eux et avec les données de télédétection dont nous disposons.

#### 3.1 MAR

Le modèle utilisé MAR est un modèle tridimensionnel de circulation atmosphérique à échelle méso-?. Les équations primitives et la dynamique du modèle est décrite dans Gallée et Schayes (1994). Le modèle évolue, dans le cas présent, sur une grille de projection stéréographique polaire avec une résolution spatiale de 40 km et est alimenté sur ses bords par les réanalyses ERA-40 (voir section 3.3). Ces dernières peuvent aussi être utilisées comme conditions initiales afin de diminuer le temps de calcul lors de l'ajustement des variables (*spin-up*). Le modèle possède également 33 niveaux verticaux, niveaux plus resserrés près du sol et plus espacés près du sommet du modèle à 50 hPa.



**Figure 3.1.1 – Modèle tridimensionnel MAR :** Le forçage latéral est donné par ERA-40, qui peut également être utilisé comme conditions initiales. Le modèle a 33 niveaux verticaux et une résolution spatiale de 161 x 161 pixels de 40 km de côté.

Pour ce qui est de son interaction avec le sol, MAR est couplé à un modèle unidimensionnel de sol appelé SISVAT (Soil-Ice-Snow-Vegetation-Atmosphere Transfert), qui dans le cas de l'Antarctique ne comprend bien sûr que de la neige et de la glace. MAR caractérise aussi le métamorphisme de la neige en utilisant la paramétrisation du modèle CROCUS (voir section suivante) avec l'ajout du transport turbulent de la neige déposée selon la description qui en est faite dans Gallée et al. (2001).

Hubert Gallée avait déjà fait les simulations sur la période 1979-2002, simulations qui ont nécessité 10 mois de calcul. Afin de valider le modèle un post-traitement était nécessaire, pour adapter les simulations aux observations. Cette partie fut réalisée pendant le stage.

Les fichiers NetCDF correspondants aux sorties extraites du modèle MAR comprenaient différents paramètres tels que les latitudes et longitudes de chaque point de la grille, l'altitude sur la grille, l'albédo, la température de surface et le contenu en eau liquide. Les sorties correspondaient à un fichier par année, avec une résolution spatiale de 40 km de côté pour un pixel et avec une valeur toutes les 3 heures. Les années dont nous disposons vont de 1980 à 2002. Mais avant d'aller plus loin, rappelons que comme la résolution de MAR est de 40 km et que celle des données de télédétection sont de 25 km, un travail à du être réalisé afin de déterminer, à partir d'un point de la grille des observations, le point correspondant dans la grille de MAR. Cette différence de résolution, comme nous le verrons plus loin, nous a apporté quelques complications lors de l'analyse des résultats, entre autres à cause de la différence d'altitude qui peut être attribuée dans chacune des grilles pour un même point.

## 3.2 CROCUS

Nous présenterons dans cette section le modèle unidimensionnel CROCUS, créé par le *Centre d'Étude de la Neige* dans le but de mieux comprendre la stratigraphie du manteau neigeux afin d'améliorer la prévision des avalanches. Son évolution principale s'est effectuée en 2 grandes étapes. Sa version originale, mise à l'épreuve, comme mentionné, à l'hiver 1986-1987 (Brun et Al., 1989) est un bilan de masse et d'énergie du manteau neigeux sans métamorphose des grains de neige. Une seconde évolution est survenue en 1992 afin d'inclure ce dernier phénomène d'évolution des grains dans le manteau (Brun et al., 1992). Sans entrer en détail dans l'ensemble des processus de métamorphisme des grains de neige, mentionnons que dans le cas qui nous concerne cette évolution est essentielle. En effet, les grains de neige, en vieillissant, ont tendance à grossir en taille, ce qui a pour effet de diminuer l'albédo et d'augmenter l'énergie absorbée dans le manteau. Ce dernier s'échauffera alors plus rapidement et atteindra de vite le stade de fonte.

A l'instar de MAR, le modèle est aussi forcé par les réanalyses ERA-40, directement en surface après ré-échantillonnage de celles-ci sur la grille des observations. Les paramètres d'entrée nécessaires, fournis au pas horaire, sont la température de surface ( $T_s$ ), l'humidité relative ( $R_h$ ), le rayonnement incident en ondes courtes et longues ( $SW_d$ ,  $LW_d$ ), la vitesse du vent ( $U$ ), les précipitations et leur phase (Precip.) et la nébulosité (nébul.). La figure 3.2.1 représente ces forçages. Le modèle représente aussi le manteau en 50 couches verticales qu'il agrège ou désagrège selon les cas. Présentement, et ce travail s'inscrit dans cette optique, le LGGE tente de regarder les possibilités d'adaptation du modèle en Antarctique et dans le Nord Canadien.



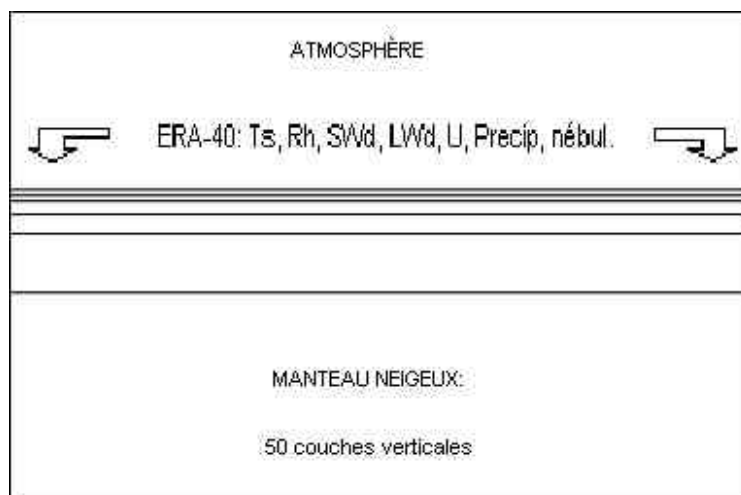


Figure 3.2.1 – Modèle unidimensionnel CROCUS : On fournit en entrée les réanalyses ERA-40.

Dans le cas qui nous intéresse, l'utilisation de MAR ou de CROCUS, nous sert à déterminer le contenu en eau liquide, *liquid water content* (LWC), dans le premier mètre du manteau. En posant un certain seuil au LWC, il nous est possible de faire la comparaison entre les observations de télédétection et d'attribuer, pour une surface de la taille d'un pixel, la mention fondu ou non-fondu aux sorties du modèle (voir section 2.2).

### 3.3 Particularités des modèles et leur forçage

Un problème majeur avec l'utilisation des modèles sur l'Antarctique est le manque d'observations in-situ à l'échelle du continent. En effet, ces dernières étant très localisées et souvent discontinues, elles fournissent alors une représentation peu fiable de la météo et des forçages radiatifs sur le continent. Afin de remédier à cette situation, les scientifiques utilisent ce que l'on appelle des réanalyses, c'est-à-dire une réanalyse à posteriori des différentes analyses en temps réel, préalablement issues de modèles météo. Ces réanalyses proviennent d'une assimilation de données provenant de sources diverses. Pour notre part, les modèles MAR et CROCUS ont été forcés avec les réanalyses ERA-40 du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) (voir Uppala et al., 2005) et qui couvrent la période 1957-2002. Ces réanalyses sont toutefois disponibles avec une résolution d'environ 125 x 125 km<sup>2</sup> (grille non-régulière). Du côté de MAR, le modèle à l'avantage d'être moins sensible aux réanalyses que CROCUS. En effet, le modèle est forcé sur ses bords par ERA-40, mais il crée ensuite son propre climat à l'intérieur du continent. Cependant, la résolution spatiale utilisée de 40 km, ce qui cause des problèmes lorsque nous superposons ces pixels sur la grille des observations qui est de 25 km. Nous verrons plus loin en quoi consistent ces problèmes.

Tandis que MAR utilise directement les réanalyses, un travail de désagrégation a été nécessaire pour CROCUS afin de les utiliser à la résolution de 25 km. La méthode utilisée par G. Picard consiste à désagréger la température extraite de MAR pour la ramener à une résolution de 25 km. Cette désagrégation est effectuée en considérant les différences d'altitude entre les pixels

d'ERA-40 et les pixels sous-jacents de la grille des observations. La désagrégation est effectuée suivant le gradient adiabatique humide, ce qui correspond à une variation de température de  $6^{\circ}/\text{km}$ . Les autres forçages ne sont pas modifiés et sont utilisés tels quels. Globalement, cette méthode a pour avantage de mieux représenter la température en fonction de l'altitude, mais cette méthode ne tient pas compte de la représentation orographique du continent. Bien que nous travaillions maintenant directement à la résolution des observations, cette désagrégation ainsi que la qualité des réanalyses peuvent être des sources potentielles d'erreurs, surtout sur ce continent où le réseau d'observations est faible. Comme CROCUS est aussi découplé de l'atmosphère, les rétroactions neige-atmosphère ne sont pas prises en compte.

## 4. Analyse comparative entre observations et modèles

Dans cette section nous présentons le travail d'analyse des simulations en les comparant aux modèles. Nous décrivons tour à tour le travail effectué avec chacun des modèles.

### 4.1 Analyse des simulations MAR

#### *Détection des événements de fonte*

Le paramètre issu des simulations qui nous intéresse ici est le contenu en eau liquide dans le premier mètre du manteau. Un premier travail fut donc de fixer un seuil sur ce dernier qui pourrait correspondre à l'attribution « fondu » pour un pixel. Afin de déterminer ce seuil, nous avons tracé l'évolution du contenu en eau liquide dans le manteau selon MAR avec les données d'observation de fonte pour plusieurs pixels des régions de fonte du continent.

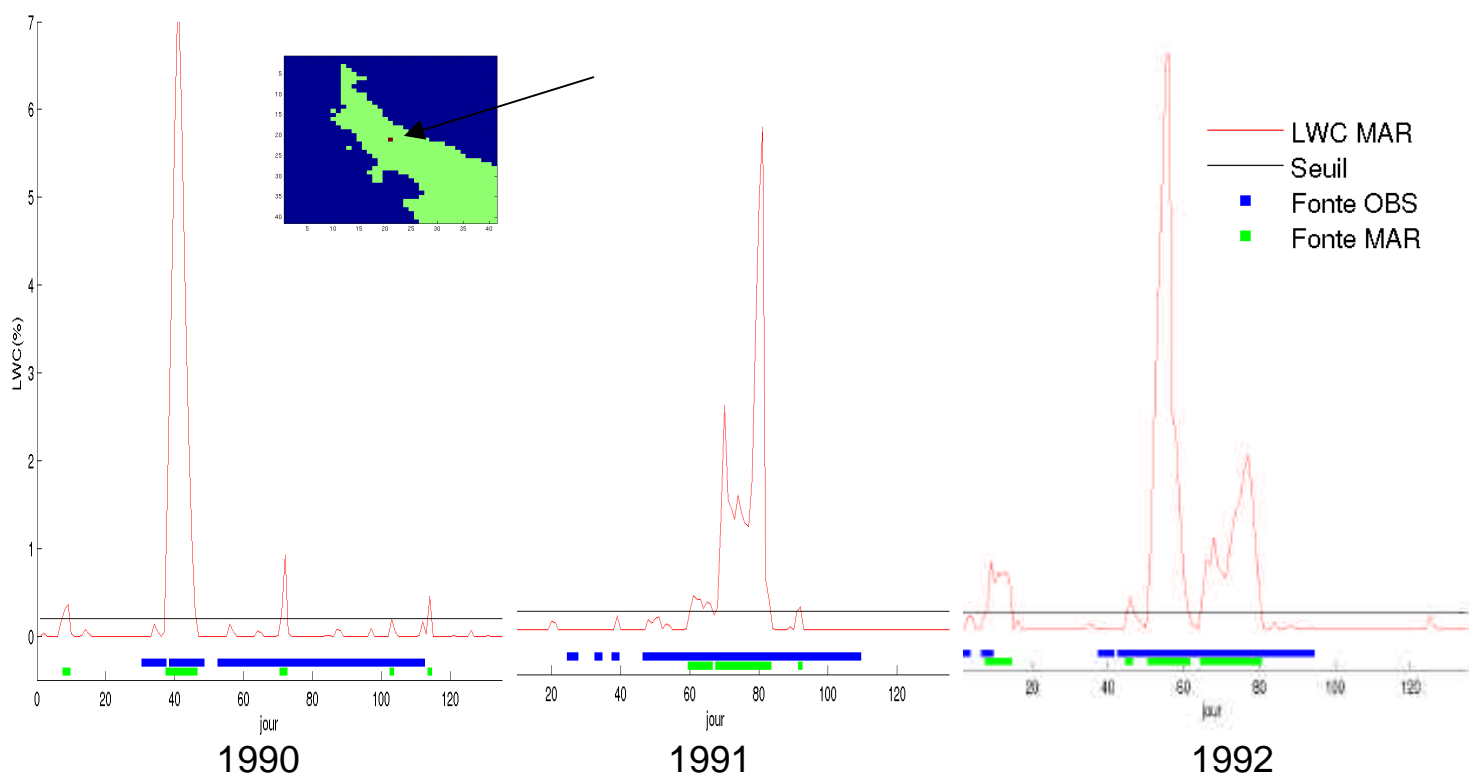
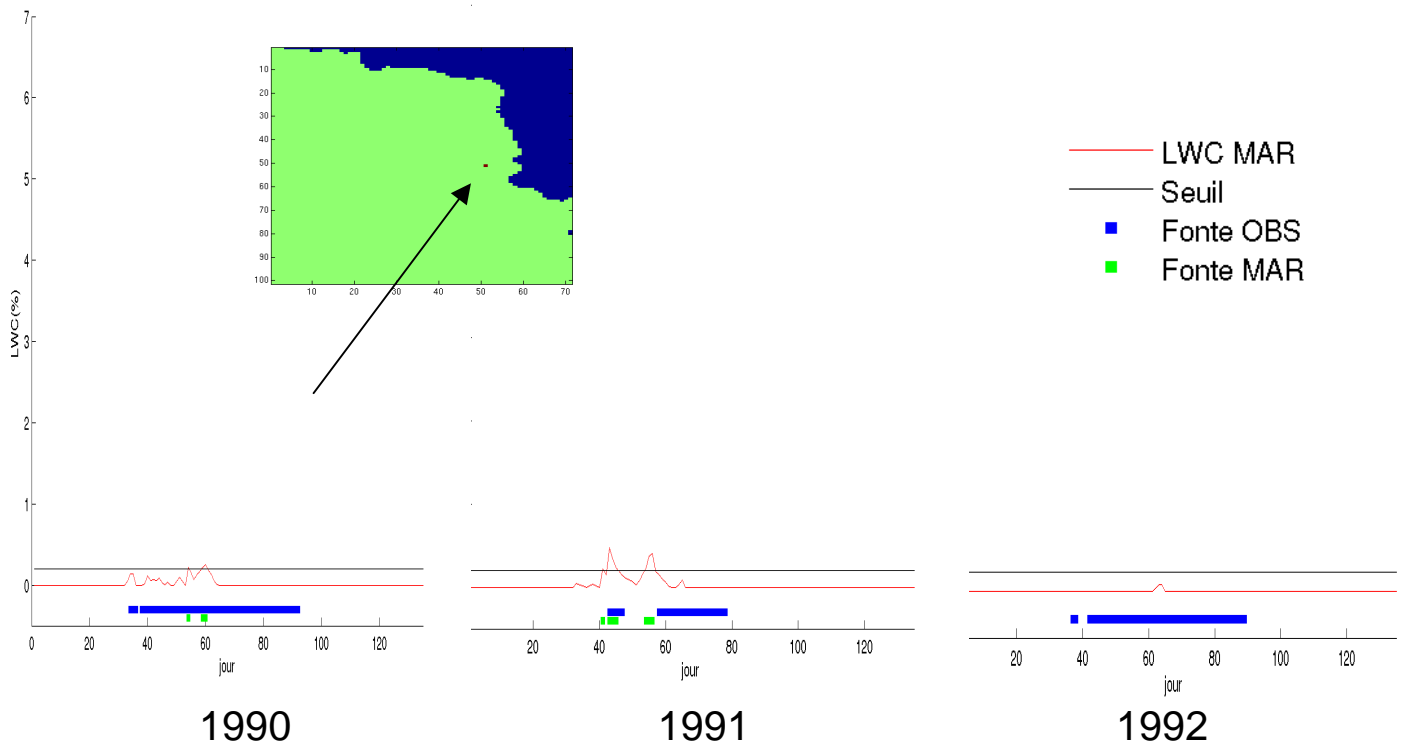


Figure 4.1.1 – Détection des événements de fonte sur un pixel de la péninsule (60,30):

la courbe en rouge représente la variation annuelle du contenu en eau liquide dans le premier mètre du manteau. Lorsqu'il dépasse un certain seuil (ligne noire) on détecte de la fonte (ligne verte). La ligne bleue représente la détection d'événements par télédétection.



**figure 4.1.2 – Détection des événements de fonte sur un pixel d’Amery (77,201):**

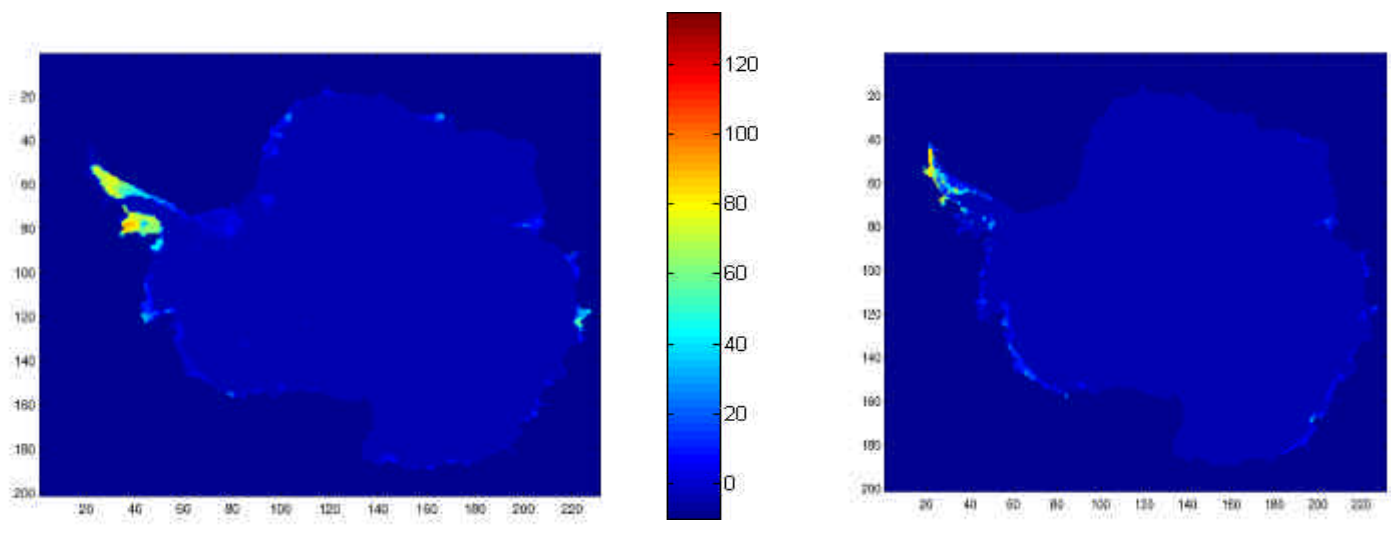
La courbe en rouge représente la variation annuelle du contenu en eau liquide dans le premier mètre du manteau. Lorsqu’il dépasse un certain seuil (ligne noire) on détecte de la fonte (ligne verte). La ligne bleue représente la détection d’événements par télédétection.

L’étude des figures 4.1.1, 4.1.2 (et leurs semblables) nous a permis de définir un seuil pour la fonte, seuil que nous avons fixé très bas, c’est-à-dire de 0,2% pour MAR, malgré les autres valeurs admises dans la littérature (cf. section 2.1). Ce choix vient du fait que d’après l’analyse de ces graphiques, le modèle semble trop froid et l’analyse des figures dans les régions où la fonte est moins importante que la péninsule (comme la plate-forme Amery de la figure 4.2.2) nous montre que la fonte doit être détecté quand le LWC est très faible. Le choix de 0,2% a donc été fait de façon arbitraire, après l’analyse visuelle d’une importante quantité de graphiques comme ceux présentés. Il faut dire cependant que la quantité d’eau liquide retournée par les modèles représente la hauteur d’eau intégrée sur le premier mètre du manteau, et que, dans des régions où la fonte n’est que très superficielle (les premiers centimètres), le LWC dans les premiers centimètres peut dépasser quelques pourcents, sans pour autant avoir une valeur de LWC qui permette de détecter la fonte. Ce choix n’est donc pas un problème majeur actuellement.

Disposant maintenant de ce seuil, il nous est possible de calculer le nombre d’événements de fonte par été et par pixel. Nous avons défini la saison potentielle de fonte (l’été Antarctique) du 1 novembre jusqu’au 15 mars de l’année suivante (ou 14 mars si l’année est bissextile), pour une durée totale de 135 jours, qui diminue le temps de calcul et de stockage par rapport à une année complète. Ce choix n’a cependant pas de conséquence, parce qu’il n’y a pratiquement aucune fonte le reste de l’année.

### *Carte de durée de fonte*

Nous utilisons ici une méthode fréquemment utilisée lors de l'étude de la fonte dans les régions polaires, méthode qui consiste à calculer, pour chaque pixel de la grille, le nombre de jour de fonte pendant l'été. Ce calcul nous permet d'obtenir une carte de la durée de la fonte selon les régions. La figure 4.1.3 nous montre la comparaison entre les observations et les résultats tirés de MAR pour l'année 1998. Cette figure nous montre tout d'abord que malgré le faible seuil utilisé, MAR semble sous estimer la fonte sur la majorité du continent. De plus, la distribution spatiale de la fonte représentée par le modèle sur la péninsule ne semble pas du tout correspondre aux observations. Des cartes pour les autres années sont fournies en annexe.

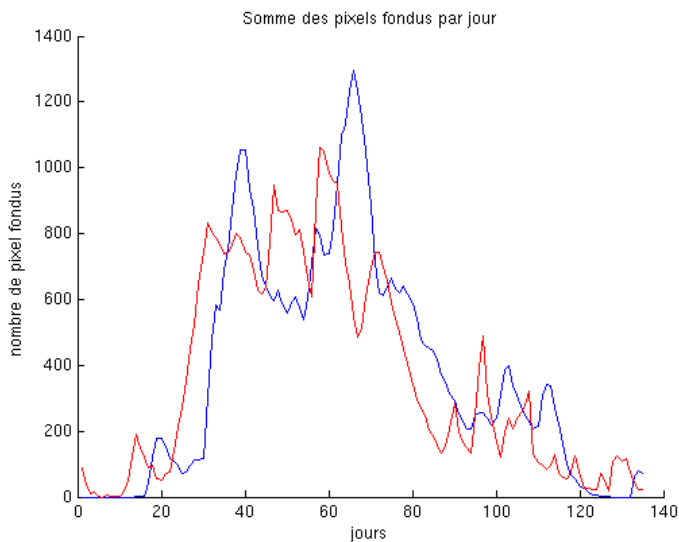


**Figure 4.1.3 – Fonte cumulée de l'année 1998 respectivement pour les observations et pour MAR**

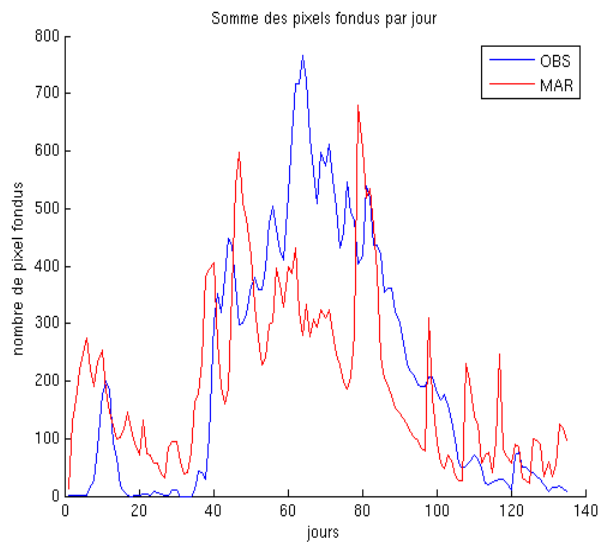
### *Évolution quotidienne de la fonte*

Afin de vérifier si le problème est d'ordre spatial ou temporel, nous avons tracé pour chaque jour des observations considérés, c'est-à-dire les 135 jours de chaque été entre 1988 et 2002. La figure 4.1.4 nous montre que cette fois-ci, le modèle semble bien répondre aux observations, même si d'une façon générale MAR a tendance à sous-estimer le nombre de jour de fonte. Ceci est d'autant plus évident que l'été est bien entamé.

Cette bonne corrélation entre les simulations de MAR et les observations nous montre qu'il est probablement possible d'obtenir des résultats intéressants avec MAR. Cette constatation nous porte donc à croire que la représentativité temporelle du modèle est bonne (détection des « pics » de chaleur ou de froid), mais que la répartition spatiale des événements de fonte fait défaut. Nous tentons de trouver des raisons à ce problème.



1998

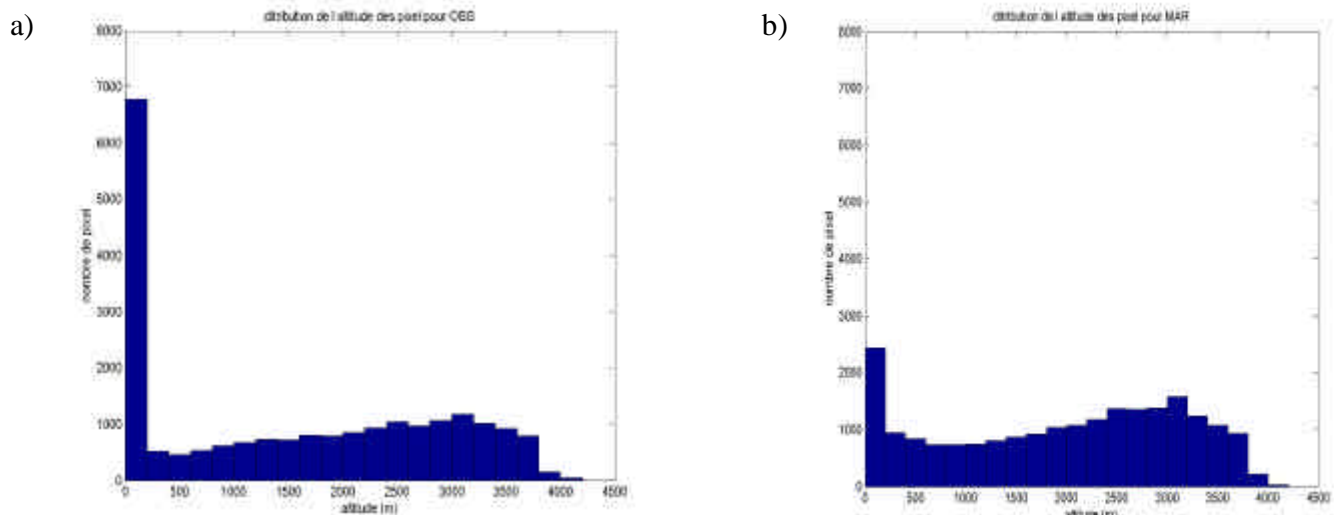


1999

**Figure 4.1.4 – Nombre de pixel fondus pour chaque jours des été 1998 et 1999 sur tout le continent :** Pendant ces 2 années nous remarquons une assez bonne corrélation entre les deux séries. Notons que la longueur de chaque été est de 135 jours tel que mentionné précédemment ; les jours d’hiver où il n’y a pas de fonte on donc été exclus.

### *Problème de la différence d’altitude entre les grilles*

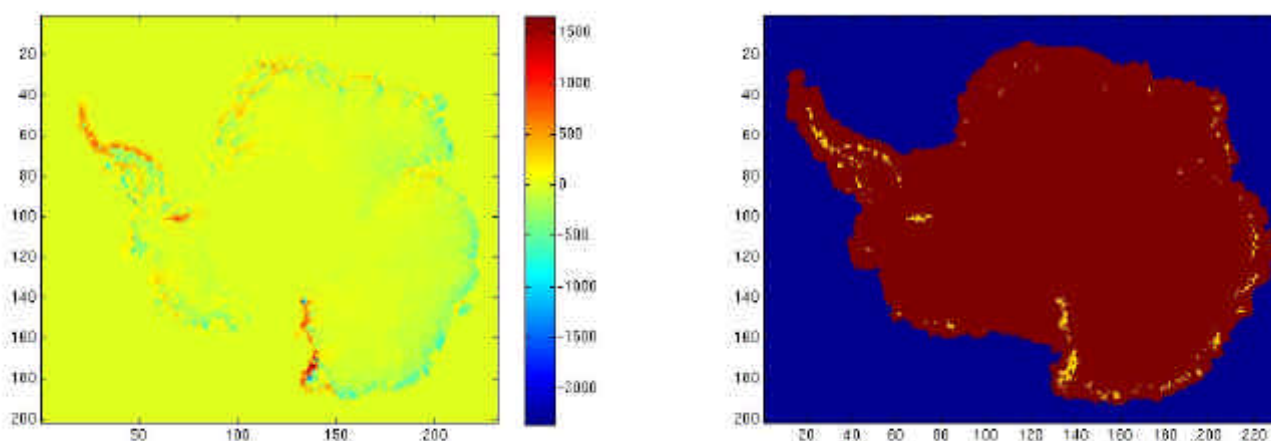
Comme mentionné précédemment, le fait de ramener une grille de résolution de 40 km sur une grille de 25 km nous cause des problèmes de superposition. Un problème potentiel est la différence d’altitude que peut avoir un même pixel selon que l’on se place dans les observations et dans MAR. Effectivement, ce sont les pixels situés en basse altitude qui subissent la fonte, et, s’il y a de grandes différences d’altitude entre l’altitude du modèle et des observations, il est normal que le nombre de pixels fondus au plus fort de l’été ne soit pas le même. Les histogrammes de la figure 4.1.5 nous montrent la répartition des pixels en fonction de l’altitude pour les grilles de MAR et les observations.



**Figure 4.1.5 – Répartition du nombre de pixel dans chaque classe d’altitude pour les observation (a) et la simulation MAR (b) :** à noter la grande différence du nombre de pixel dans la première classe (0-200m), classe où la fonte est la plus importante.

Cette figure comporte en elle-même une partie des explications relatives à la sous estimation des pixels fondus par MAR. En effet, la grille des observations comporte plus du double de pixels à une altitude inférieure à 500m. Ainsi, il est normal qu'au milieu de la saison de fonte, lorsque celle-ci est à son maximum, que le nombre de pixels fondus soit bien inférieur dans MAR. C'est ce qui explique aussi qu'en début et en fin de saison, le nombre de pixels fondus dans MAR et dans les observations est sensiblement le même, puisque cette fonte survient pour les pixels les plus susceptibles de fondre, probablement ceux qui sont à la bonne altitude.

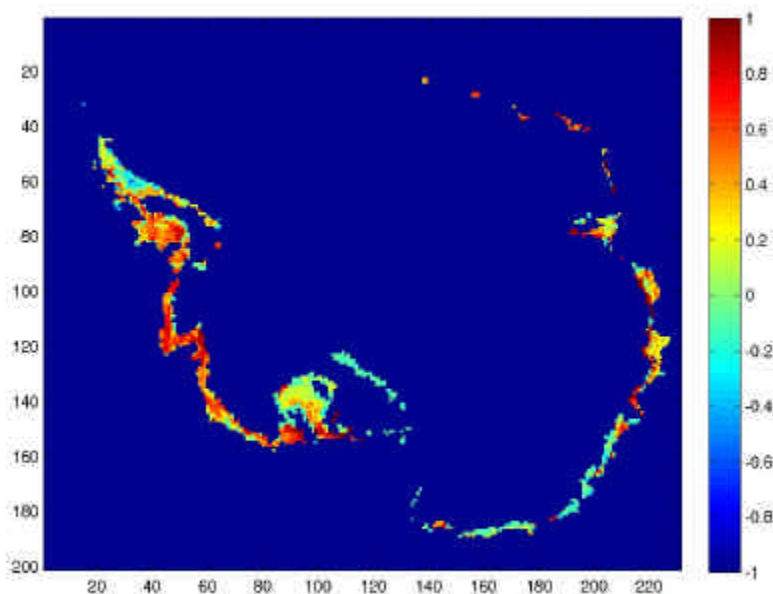
Afin de considérer la répartition spatiale de l'erreur d'altitude, nous avons tracé une carte correspondant à la différence, pour chaque pixel, entre l'altitude de MAR et celle des observations. La figure 4.1.6 présente cette situation.



**Figure 4.1.6 – Différence d'altitude MAR-OBS.** La première figure représente la valeur de cette différence en mètres. La seconde figure montre tous les pixels où la différence d'altitude - en valeur absolue - est supérieure à 500m.

La répartition nous montre clairement que pour certaines régions nous sommes en présence d'une très grande différence d'altitude à cause de la superposition des grilles. Notons au passage que les régions mises en évidence par la figure 4.1.6b correspondent aux régions montagneuses du continent.

Sachant, d'après la figure 4.1.5, que, hormis un certain décalage, l'évolution du nombre de pixels fondus détecté par MAR suit bien les observations. Afin de mettre ceci en valeur, nous avons tracé, pour chaque pixel du continent, la corrélation entre MAR et les observations pour les séries temporelles du nombre de jours où ce pixel est déclaré « fondu » dans l'été pour les années 1988-2001. Le résultat est présenté à la figure 4.1.7.



**Figure 4.1.7 – Corrélation entre MAR et OBS sur le nombre de jours de fonte.**

Coefficient de corrélation entre les séries temporelles de MAR et des observations pour le nombre de jours où le pixel est fondu entre les années 1988 et 2001.

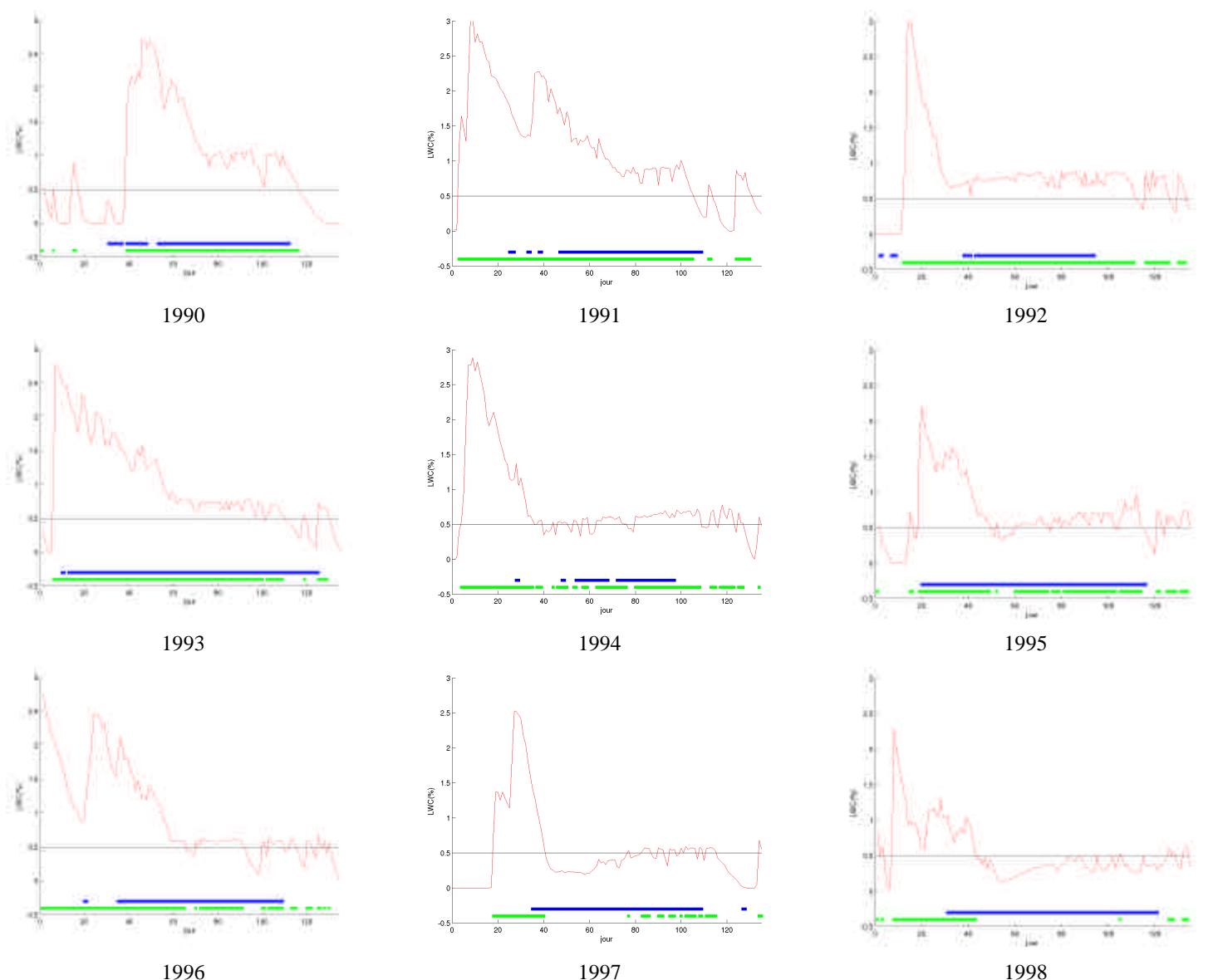
Cette dernière figure nous montre une assez bonne corrélation dans la partie Sud-ouest du continent, région appelée Marie Byrd Land. Les régions de faible corrélation ou d'anti-corrélation correspondent en majeure partie aux régions où la différence d'altitude est importante. Cependant, dans les régions révélées par la figure 4.1.6b, où la différence d'altitude est très importante, la corrélation est très faible, voire négative. Cette situation contribue à nous faire croire que la différence de résolution entre MAR et les observations est trop importante. Afin de conforter cette hypothèse, la prochaine section traitera du modèle CROCUS qui, rappelons-le, a la même discrétisation spatiale que les observations.

## 4.2 Traitement des données CROCUS

D'abord, notons que les résultats obtenus ici pour CROCUS sont préliminaires et que beaucoup de travail d'adaptation du modèle reste à faire pour continuer de le faire tourner sur l'Antarctique. Les problèmes de paramétrisation du modèle, entre autres de stabilité du manteau.

À l'instar de MAR, la même approche a été effectuée pour tout ce qui concerne la détection des événements de fonte par CROCUS. Nous avons tout d'abord tracé le contenu en eau liquide de la neige pour différents pixels.



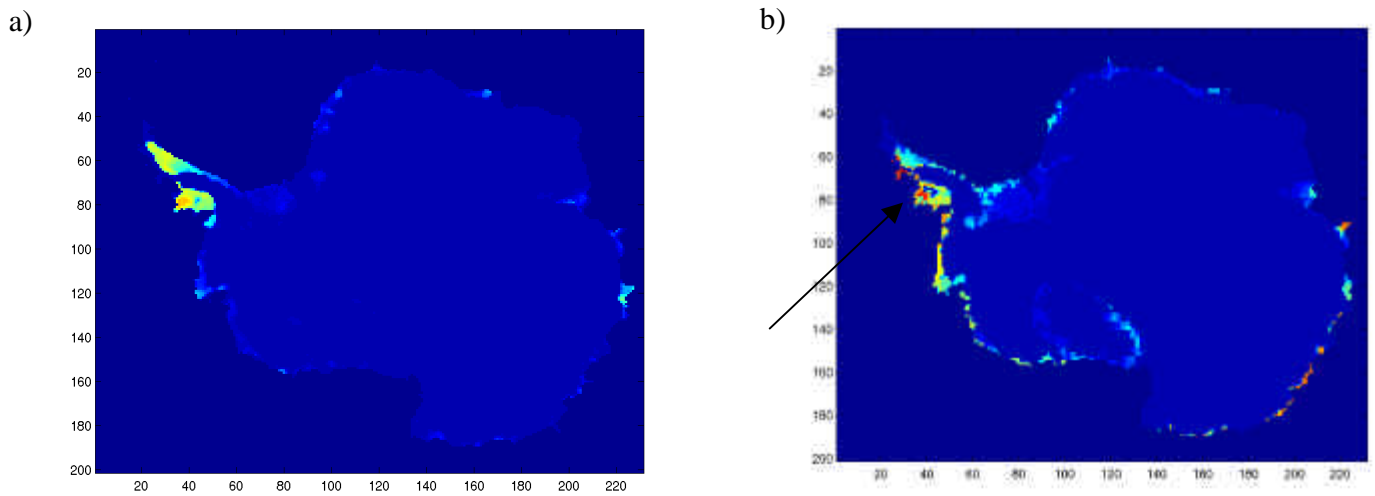


**Figure 4.2.1 – Détection des événements de fonte sur un pixel de la péninsule (30,60)**

La courbe en rouge représente la variation annuelle du contenu en eau liquide dans le premier mètre du manteau. Lorsqu'il dépasse un certain seuil (ligne noire) on détecte de la fonte (ligne verte). La ligne bleue représente la détection d'événements par télédétection.

La figure 4.2.1 nous montre le problème majeur que nous avons avec CROCUS : d'année en année, la teneur en eau liquide (LWC) diminue alors que le manteau se densifie et devient entièrement couvert de glace (la glace, à cause de sa densité est plus dure à fondre que la neige). Cette situation, qui traduit l'instabilité du manteau, devra être corrigée avant de pouvoir exploiter les résultats de CROCUS, mais déjà les résultats présentés semblent prometteurs. En effet, contrairement aux courbes de LWC de MAR (figures 4.1.1 et 4.1.2), il semble plus facile de fixer un seuil correspondant à la fonte. Ce comportement du LWC est beaucoup plus réaliste que celui observé par MAR, dont les courbes sont souvent une série de « pics » entrecoupés de valeurs nulles (fonte et regel rapides). Le LWC de CROCUS suggère plutôt un début de fonte et une période sur laquelle le pixel demeure fondu avant de regeler à la fin de l'hiver, situation que l'on observe habituellement avec la télédétection.

Afin de vérifier si le problème de la représentation spatiale de la fonte est aussi un problème avec CROCUS, nous avons tracé les cartes de durée de la fonte, comme nous l'avons déjà fait pour MAR. La figure 4.2.2 nous montre la situation pour l'année 1998.



**Figure 4.2.2 – Fonte cumulée, observations et CROCUS :** Cette image, présente la fonte cumulée par pixel pour les observations (a) et CROCUS (b). Notons la région George VI Ice Shelf (montrée d'une flèche) qui représente une partie de fonte importante de la péninsule, qui est relativement bien modélisée par CROCUS mais qui est totalement oubliée par MAR.

Ces cartes nous laissent croire qu'avec une paramétrisation efficace, CROCUS pourrait mieux modéliser la distribution spatiale de la fonte, ce qui fait pencher encore une fois la balance du côté de la différence de résolution entre MAR et les observations qui pourraient faire défaut. En somme, nous pensons donc que ces résultats sont prometteurs, mais qu'un travail plus poussé d'analyse de sorties avec un manteau stable serait nécessaire pour valider le modèle.

## 5. Conclusion

Rappelons les faits constatés pour la comparaison entre MAR et les observations. Le modèle, alimenté à ces bords par ERA-40, reproduit bien les variations intra-saisonniers du nombre de pixel fondus dans l'été (variation de l'étendue de la fonte). Cependant, à cause entre autres d'une différence d'altitude, la fonte dans certaines régions est sous-estimée par MAR. Il est donc invraisemblable d'essayer de trouver des tendances à long terme sur ces pixels où la différence d'altitude est trop importante. Une option serait de créer un masque pour enlever les pixels avec une trop grande différence d'altitude, mais en faisant cela on perd beaucoup de pixel dans les zones de fonte, ce qui n'est pas très intéressant. La meilleure option serait vraisemblablement de faire tourner MAR à une plus grande résolution, c'est-à-dire, sur la même grille que les observations, mais ceci est extrêmement coûteux en calcul. À titre d'exemple, le calcul avec MAR pour une seule année sur tout le continent nécessite un temps de calcul de 2 semaines sur les supercalculateurs du CNRS.

De son côté, CROCUS a l'avantage de tourner directement sur la grille des observations, mais ceci demande la désagrégation des réanalyses. Pour l'instant nous ne sommes pas en mesure de conclure directement sur la capacité de CROCUS à reproduire les observations - comme mentionné, il existe des problèmes avec le modèle CROCUS pour le faire tourner correctement en Antarctique - mais les résultats préliminaires semblent intéressants. Ces problèmes de paramétrisation ne nous ont donc pas permis de pousser la comparaison entre le modèle et les observations aussi loin que l'on aurait voulu. Cependant les premières simulations semblent - du fait de la réduction des problèmes d'altitude - mieux représenter la distribution spatiale de la fonte. De plus, les valeurs de LWC et leur évolution semblent plus réalistes que dans les résultats de MAR. Malgré ceci, une incertitude plane sur la précision des réanalyses ERA-40 avec lesquelles on le force. Une solution intermédiaire pourrait être de forcer CROCUS avec des données météorologiques issues de MAR.

Pour cette dernière option, j'ai extrait et rapatrié les simulations de MAR correspondant aux forçages dont CROCUS a besoin pour tourner (voir figure 3.2.1). Ce travail permettra de vérifier cette hypothèse lorsque les problèmes de stabilité du manteau de CROCUS auront été résolus.



## Remerciements

Deux mois c'est très court pour un stage. Pressé par le temps nous avons tenté toutefois de produire des résultats intéressants, ce qui aurait été impensable sans une très belle coopération avec les gens plus près du projet. Je parle ici de mon maître de stage, M. Picard, de Ludovic Brucker, étudiant en thèse avec qui j'ai coopéré pour le modèle CROCUS, Hubert Gallée qui était toujours prêt à se faire déranger pour une question ou deux à propos de MAR ou de la façon d'en extraire les sorties, et de M. Michel Fily, le directeur du laboratoire; ses idées et commentaires ont été essentiels.

Tout aussi important, mes collègues de bureau qui étaient là pour rigoler ou pour répondre à mes questions de petit nouveau. Un merci tout spécial à Laura pour ses réponses sur l'organisation du laboratoire et à Pierre, qui en connaît plus que moi (juste un peu !) sur Matlab et qui était là pour les questions. Merci aussi à Nico pour les références et les réponses à mes questions sur MAR.

Finalement merci aux autres avec qui le repas du midi était plus sympathique, sans pour autant être meilleur au goût !

## Bibliographie

- Bromwich, D. H. et R. L. Fogt (2004), Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP-NACR reanalyses in the high and midlatitudes of the southern hemisphere, 1958-2001, *Journal of Climate*.
- Brun, E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre et C. Coleou (1989), An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, 35, 333-342.
- Brun, E., P. David, M. Sudul et G. Brunot (1992), A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, 38, 13-21.
- Essery, R. et P. Etchevers (2004), Parameter sensitivity in simulations of snowmelt, *American Geophysical Union*.
- Fahnestock, M.A., W. Abdalati et C.A. Shuman (2002), Long melt seasons on ice shelves of the Antarctic Peninsula: an analysis using satellite-based microwave emission measurements, *Annals of Glaciology*, 34, 127-133.
- Fettweis, X., H. Gallée, F. Lefebvre, et J.-P. van Ypersele (2005), The 1988-2003 Greenland ice sheet extent using passive microwave satellite data and a regional climate model, *Climate Dynamics*, 34.
- Gallée, H., G. Guyomarc'h et E. Brun (2001), Impact of snow drift on the Antarctic ice sheet surface mass balance: possible sensitivity to snow-surface properties, *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 1-19.
- Gallée, H. et G. Schayes (1994), Development of a three-dimensional meso-gamma primitive equation model, katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica, *Monthly Weather Review*, 122, 671-685.
- Gallée, H. et P. G. Duynkerke, Air-snow interactions and the surface energy and mass balance over the melting zone of west Greenland during Greenland Ice Margin Experiment, *Journal of Geophysical Research*, 102, 13813-13824.
- Genthon, C., P. Lardeux et G. Krinner (soumis), The surface accumulation and ablation of a coastal blue ice area near Cap Prudhomme, Adelie Land, Antarctica, *Journal of Glaciology*.
- Jourdain, N. (2007), Simulations climatiques régionales dans le secteur de la Mer de Ross, Antarctique: Réalisation d'une modèle couplé océan - glace de mer - atmosphère, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France (sous presse).
- Liu, H., L. Wang et K. Jezek (2005), Wavelet-transform based edge detection approach to derivation of snowmelt onset, end and duration from satellite passive microwave measurements, *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4639-4660.
- Liu, H., L. Wang et K. C. Jezek (2006), Spatiotemporal variations of snowmelt in Antarctica derived from satellite Scanning Multi-channel Microwave Radiometer and Special Sensor Microwave Imager data (1978-2004), *Journal of Geophysical Research*,
- Mote, T. L., M. R. Anderson, K. C. Kuivinen, et C. M. Rowe (1993), Passive microwave derived spatial and temporal variations of summer melt on the Greenland ice sheet, *Annals of Glaciology*, 17, 233-238
- Picard, G. et M. Fily (2006), Surface melting observations in Antarctica by microwaves radiometers: Correcting 26-year time series from changes in acquisition hours, *Remote Sensing of Environment*, 104, 325-336.
- Picard, G., M. Fily et H. Gallée (2007), Surface melting derived from microwave radiometers: a climatic indicator in Antarctica, *Annals of Glaciology*, 46.
- Poutou, E. (1999), Simulation du manteau neigeux polaire au Groenland, mémoire de maîtrise de physique fondamentale, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

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

Scambos, T.A., C. Hulbe, M. Fahnestock, et J. Bohlander (2000), The link between climate warming and breakup of ice shelves in the Antarctic peninsula, *Journal of Glaciology*, 46, 516-530.

Torinesi, O. (2003), Contribution à l'étude du climat antarctique: Variabilité de la fonte de surface par télédétection micro-onde entre 1979 et 1999. Et paramétrisation de la couche limite atmosphérique stable, thèse de doctorat, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, CNRS.

Torinesi, O., M. Fily et C. Genthon, Variability and trends of summer melt period of Antarctic ice margins since 1980 from microwave sensors, *Journal of Climate*, 10, 165-175.

Uppala S.M. and 45 others (2005), The ERA-40 re-analysis, *The Phenological Reports of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961-3211.

Walker, A., et B. Goodison (1993), Discrimination of a wet snow cover using passive microwave satellite data, *Annals of Glaciology*, 17, 307-311.

Zwally, H. J., et S. Fiegles (1994), Extent and duration of Antarctic surface melting, *journal of Glacilogy*, 40, 463-476.





## **Annexes**

**A1 – Cartes annuelles de durée de fonte des observations et des simulations de MAR et CROCUS (1988-2001)**

