

Étude d'un algorithme de fonte de neige en Antarctique  
par télédétection micro-onde passive

Présenté à  
Dr. Ghislain Picard<sup>1</sup>  
Dr. Alain Royer<sup>2</sup>

Par  
Benoît Montpetit  
05 629 652  
Université de Sherbrooke

Dans le cadre d'un stage de la  
Commission Permanente de Collaboration France-Québec  
CPCFQ  
Projet de Recherche 61-106

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement  
LGGE

8 Septembre-5 Décembre 2008

---

<sup>1</sup>Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE)

<sup>2</sup>Centre d'Application et de Recherche en Télédétection (CARTEL)

## Résumé

L'étude des changements climatiques est au coeur de l'actualité. Un des phénomènes importants de ces changements au niveau du continent Antarctique est la fonte. Toutefois, les variations spatiales sont peu connues en Antarctique. Ceci est dû au fait qu'il y a très peu de stations météorologiques sur le continent. C'est pourquoi la télédétection devient un outil intéressant pour étudier la totalité de l'Antarctique. Toutefois, la résolution spatiale des différents capteurs, sur lesquels des algorithmes de détections de la fonte ont été développés, restent limitées. Afin de résoudre ce problème de résolution, un des algorithmes utilisés pour la détection de la fonte a été repris et étudié en profondeur. Pour ce faire, un capteur différent qu'initialement utilisé avec cet algorithme a été testé. Il a été démontré que le canal 19H d'AMSR est robuste et fiable mais qu'il est difficile pour l'instant d'utiliser les canaux à plus haute fréquence de ce même capteur.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>2</b>
1.1 Le projet . . . . .	2
1.2 Conditions de travail . . . . .	3
1.2.1 Le LGGE . . . . .	3
1.2.2 Au quotidien . . . . .	3
<b>2. La télédétection</b>	<b>4</b>
<b>3. Implémentation de l’algorithme de fonte</b>	<b>6</b>
3.1 Le principe de l’algorithme . . . . .	6
3.1 Validation de l’algorithme dans Matlab . . . . .	6
3.3 Visualisation de l’algorithme . . . . .	6
3.4 Pistes d’amélioration de la résolution . . . . .	7
<b>4. Interface Graphique</b>	<b>8</b>
<b>5. Analyse</b>	<b>9</b>
<b>6. Conclusion</b>	<b>16</b>
<b>7. Remerciements</b>	<b>17</b>
<b>A. Annexes : Quelques exemples de plus</b>	<b>18</b>
<b>B. Bibliographie</b>	<b>26</b>

# 1. Introduction

## 1.1 Le projet

L'étude des changements climatiques est un sujet important. Nombreux scientifiques à travers le globe étudient la multitudes de processus climatiques afin de mieux les comprendre et de les modéliser pour mieux prévoir les changements futurs et leurs impacts. Le climat est le produit d'interactions complexes entre différentes composantes de la planète tels l'atmosphère, l'océan, la biosphère et la cryosphère (portions de la surface terrestre où l'eau est présente à l'état solide).

Comme les pôles sont très sensibles aux changements climatiques, il est important de bien caractériser les variations spatio-temporelles afin d'améliorer notre compréhension du climat global. Comme le continent Antarctique est la plus grand réserve de glace mondial (90% des glaces du globe), ce dernier joue un rôle majeur sur la dynamique des changements climatiques. De plus, la fonte des glaces de ce continent engendrerait une élévation du niveau de l'eau d'environ 65 m.

Durant l'été australe, les zones côtières du continent Antarctique sont soumises à des fontes superficielles. Cette fonte est un indicateur important de l'évolution du climat sur le continent.

La variabilité spatiale de la fonte de neige est peu connue en Antarctique. Ceci est surtout due à la faible densité de stations météorologiques réparties sur tout le continent. Voici pourquoi la télédétection est un outils indispensable à l'étude de la variabilité spatiale sur l'Antarctique. Elle ne permet pas de mesurer les variations avec autant de précision que les stations météorologiques mais il est possible de mesurer des propriétés tels la température, l'albedo et la fonte de neige en surface.

Depuis 1979, différents radiomètres micro-ondes embarqués sur des satellites nous livrent de précieuses informations sur des régions difficilements accessibles. Il est connu que la présence d'eau liquide en surface a une influence significative sur le signal micro-onde capté par les différents radiomètres à bord des satellites. Il a été démontré qu'il est possible de détecter la fonte à l'aide d'algorithmes[1, 3, 4]. Toutefois, ces algorithmes ont une faible résolution spatiale. Le travail de mon stage, réalisé au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de

l'Environnement (LGGE) sous la tutelle de Dr. Ghislain Picard, a donc été de reprendre un de ces algorithmes et d'en faire une étude approfondie afin d'en améliorer la résolution spatiale.

## 1.2 Conditions de travail

### 1.2.1 Le LGGE

Le LGGE est une unité mixte de recherche sous la tutelle du Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Joseph Fourier (UJF). Il se structure autour de 4 thématiques principales. Le climat moderne et observations glaciologiques, la chimie atmosphérique et interactions air-neige-glace, paléoclimats et paléoenvironnements et finalement le matériau glace et dynamiques des glaciers et calottes polaires.

Le thème sur lequel j'ai travaillé est celui du climat moderne et observations glaciologiques. Elle travail surtout avec les données in situ, la modélisation et la télédétection.

### 1.2.2 Au quotidien

Le travail que j'ai effectué était de reprendre l'algorithme de détection de fonte développé par Olivier Torinesi[2] lors de sa thèse. Les données satellites que j'ai utilisées m'ont été fournies par Ghislain Picard. Ce sont des données du capteur AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) à bord du satellite AQUA de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). Toutefois, ces données sont distribuées par le National Snow and Ice Data Center (NSIDC).

Au quotidien, j'ai donc écrit différents petits programmes à l'aide du logiciel Matlab afin d'analyser ces séries de données. Aussi, afin d'accélérer l'analyse, G. Picard m'a demandé de créer un petit interface graphique sur Matlab. Ce dernier m'a permis de me situer rapidement sur le continent Antarctique et d'extraire les données à un point bien précis.

Tout au long du stage, de petites rencontres ont eu lieu entre G. Picard, Ludovic Brucker, un thésard au LGGE et moi. Ces discussions m'ont permis de bien m'orienter au courant de mon stage et de répondre à mes différentes questions. Bref, on m'a laissé une grande liberté de travail tout en m'offrant un bon encadrement.

## 2. La télédétection

La télédétection est l'ensemble des méthodes d'acquisition de propriétés physiques ou biologiques d'objets par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique. Il existe deux catégories de télédétection soit la télédétection active et passive. La première nécessite une source de rayonnement artificielle et mesure donc une énergie rétrodiffusée permettant de mesurer la distance capteur-objet ou les propriétés de la surface réfléchissante. Les radars sont un bon exemple de capteurs actifs dans le domaine des micro-ondes. La deuxième forme de télédétection ne nécessite pas de source artificielle. Elle mesure le rayonnement émanant ou réfléchi par la surface terrestre.

Le type de télédétection étudié dans ce projet est la télédétection micro-onde passive. Effectivement, la Terre et l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement solaire incident et réémettent un rayonnement de plus faible énergie soit de plus grande longueur d'onde (infrarouge et micro-ondes). À l'aide de radiomètres montés sur différents satellites, il est possible de mesurer le type de rayonnement utile à ce projet soit les micro-ondes.

Afin de bien comprendre la détection du phénomène de fonte, un bref rappel de la physique de la télédétection s'impose. Les radiomètres montés sur les satellites ne permettent pas de mesurer la température directement. Toutefois, il mesure une quantité appelée température de brillance qui est la température du corps noir qui émettrait la même énergie à cette même longueur d'onde. Dans le domaine du spectre électromagnétique qui nous intéresse (micro-ondes), nous pouvons utiliser l'approximation de Rayleigh-Jeans afin de décrire mathématiquement la température de brillance soit  $T_b = \epsilon T_s$  où  $\epsilon$  est l'émissivité et  $T_s$  est la température de la surface mesurée. Dans le domaine des micro-ondes, le signal capté possède une certaine longueur de pénétration. Le quantité mesuré est donc le signal intégré sur une partie du manteau neigeux et est influencée par son émissivité. Cette dernière est à son tour influencée par la constante diélectrique du milieu. Cette constante dépend entre autre de la présence d'eau liquide dans le manteau neigeux. Cette dernière propriété est celle qui nous intéresse pour le phénomène de fonte.

Afin de simplifier l'étude du continent Antarctique, ce dernier a été décomposé en différentes régions. Ce découpage provient de Torinesi et al. (2002)[2] et a été inspiré de Zwally & Fiegles (1994) [4]. Il y a la Péninsule, le Filchner, le Dronning Maud Land (DML), l'Amery, le Wilkes, le Ross et le Marie Byrd Land (MBL). La figure 1 présente ce découpage.

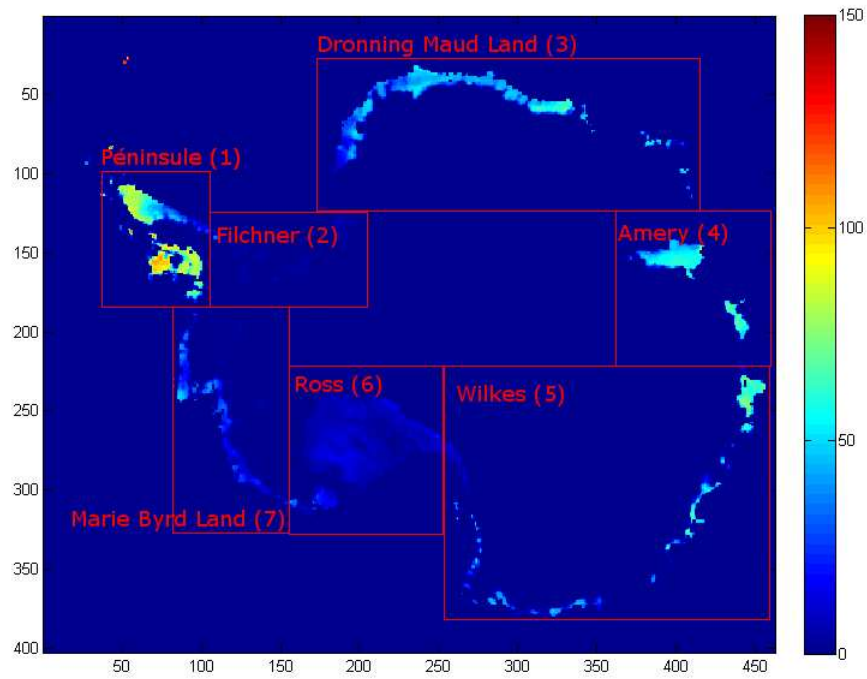


FIG. 1 – Carte du nombre d'événements de fonte pour l'été australe 2004-2005 et donnant l'emplacement des 7 régions[2]. L'échelle est en nombre de jours.

# 3. Implémentation de l'algorithme de fonte

L'algorithme utilisé lors de ce stage a été développé par Olivier Torinesi durant sa thèse[2]. Toutefois, comme le travail accompli s'est fait avec Matlab et que l'algorithme initial a été implémenté en FORTRAN, une étude approfondie de cet algorithme s'imposait pour sa réécriture.

## 3.1 Le principe de l'algorithme

Le principe de l'algorithme est relativement simple. Il suffit de calculer un seuil sur la température de brillance qui détermine s'il y a fonte ou non. Le calcul de ce seuil consiste en une triple itération du calcul de la moyenne et de l'écart-type de la série temporelle de température de brillance. Premièrement, la moyenne annuelle (du 1<sup>er</sup> avril au 31 mars de l'année suivante) est calculée. Ensuite, pour les deux itérations suivantes, la moyenne est recalculée en enlevant les valeurs dépassant 30 K la moyenne précédente. Par la suite, l'écart-type est calculé sur le même échantillon de valeurs que sur le calcul de la dernière moyenne. Le seuil est ensuite donné par :  $T = M + 3S$  où T est le seuil, M la moyenne et S l'écart-type. Finalement, afin de déterminer s'il y a fonte, il suffit de passer en boucle toute la série temporelle de température de brillance et si la valeur de cette dernière dépasse la valeur du seuil, la journée est déterminée comme journée de fonte.

## 3.2 Validation de l'algorithme dans Matlab

Puisque l'algorithme utilisé lors de ce stage était une reproduction de l'algorithme initial, une validation de ce nouvel algorithme s'imposait. Un fichier contenant les événements de fonte détectés avec l'algorithme initial existait. Il a donc été assez simple de comparer ce fichier avec le nouveau fichier donnant les événements de fonte de l'algorithme sur Matlab. Une fois que les deux algorithmes donnaient les mêmes résultats, le nouvel algorithme pouvait être utilisé.

## 3.3 Visualisation de l'algorithme

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de cet algorithme, une méthode plus visuelle s'est créée. La figure 2 présente cette représentation visuelle. Sur ce graphique, on observe en



bleu la série temporelle de la température de brillance, en vert la moyenne annuelle et en rouge le seuil de fonte calculés à l'aide de la méthode expliquée plus haut et finalement, les petites étoiles rouges nous indique précisément quand il y a eu fonte.

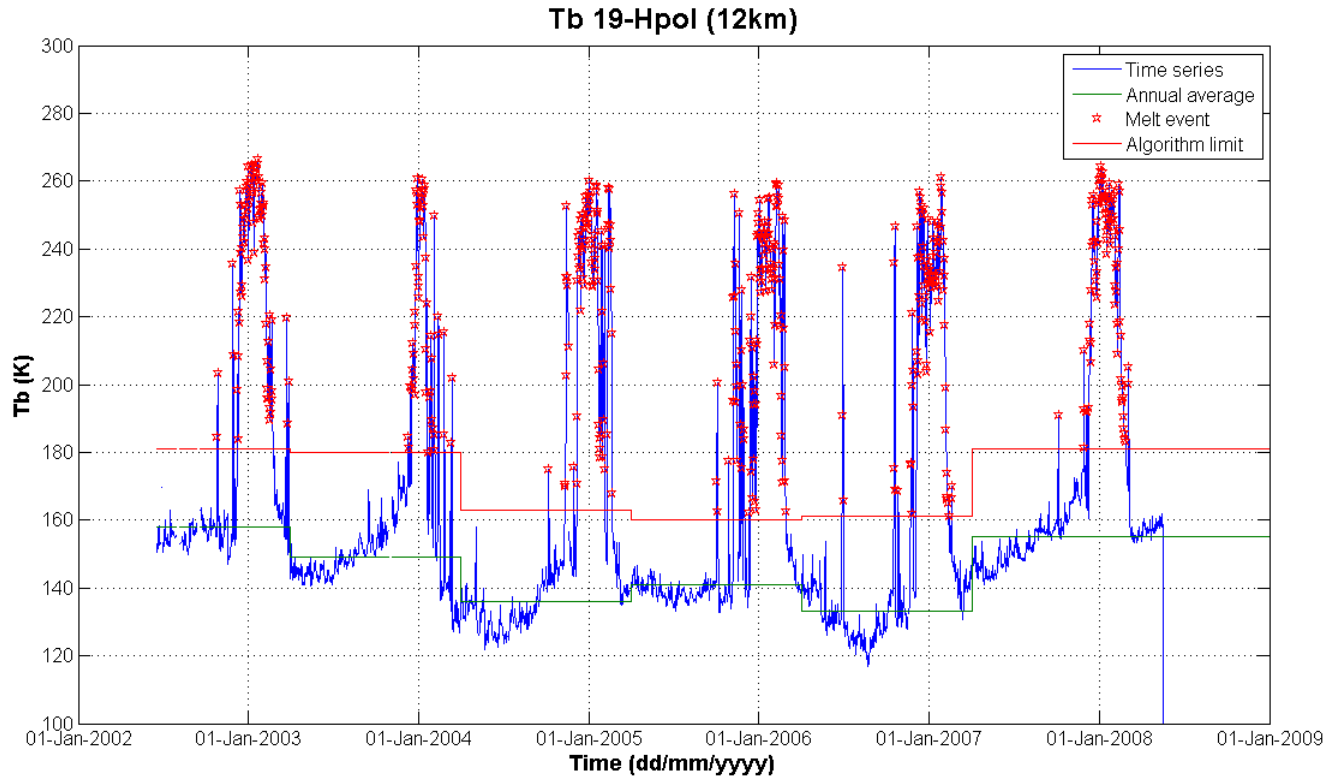


FIG. 2 – Représentation visuelle du fonctionnement de l’algorithme. Série temporelle d’avril 2002 à avril 2008 prise dans la péninsule Antarctique.

### 3.4 Pistes d’amélioration de la résolution

Comme le jeu de données de fonte de surface de l’Antarctique a été produit à partir du signal 19H (19GHz en polarisation horizontale) du capteur SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) et que ce dernier a une résolution faible ( $\approx 60km$ ) comparativement au gradient topographique et à l’accessibilité dans le cadre des campagnes de terrain, d’autres pistes ont dû être testées. La première piste a été de tester les canaux du capteur AMSR qui ont une meilleure résolution que SSM/I soit ceux à 19, 37 et 89GHz en polarisation horizontale (19H, 37H et 85H). Toutefois, certains problèmes sont survenus lors de l’étude de l’algorithme sur ces différents canaux.

# 4. Interface Graphique

Afin d'accélérer l'analyse des séries temporelles de température de brillance, un interface graphique permettant de se situer rapidement sur le continent et d'extraire les données voulues a été créée. La figure 3 présente cet interface graphique. Il affiche, dans un premier lieu, une carte de localisation. Avec un curseur, il est possible de se déplacer sur la carte et sélectionner le pixel qui nous intéresse. En haut à droite, il y a un menu déroulant qui offre différentes cartes possibles d'afficher. Par exemple, si l'on est intéressé par le nombre de jours de fonte détectés par le canal 19H en 2003, il suffit de sélectionner l'option "2003\_H19". Les 3 boîtes sous le menu déroulant sont des boîtes qui affichent les coordonnées X et Y du pixel et le canal avec lequel la fonte est détecté. Il est possible de modifier ces boîtes à sa guise. Par exemple, si l'on connaît les coordonnées exactes du pixel, il suffit de les inscrire dans leurs cases respectives et les données seront acquises sur ce pixel. Les boutons dans le coin inférieur gauche sont des boutons qui permettent d'afficher les données du pixel sélectionné dans un graphique comme celui présenté à la figure 2. Il est tout à fait possible de changer le code de base de cet interface afin d'afficher n'importe quelle fonction désirée. Bref, grâce à cet outils, le travail fut grandement accéléré.

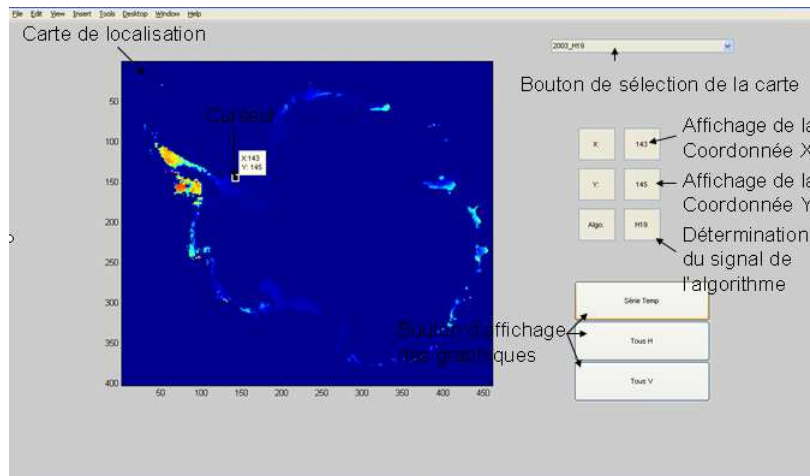


FIG. 3 – L'interface graphique créé afin d'accélérer l'analyse de données

# 5. Analyse

La première analyse qui a été faite, était de vérifier le comportement de la température de brillance dans différentes zones. Les figures 4 à 7 présente des séries temporelles de températures de brillance pour 4 régions différentes. 2 où il y a peu de fonte (Ross et Filchner) et 2 où il y a relativement beaucoup de fonte (Péninsule et Amery). Pour les deux premières régions, on y remarque des pics qui se distinguent de la série temporelle. Ces pics sont dus à la présence d'eau liquide en surface. Pour les deux autres régions, on y observe des montées brusques du signal et cette intensité est maintenue durant une certaine période. Ceci implique donc qu'il y a eu une longue période où il y a eu présence d'eau.

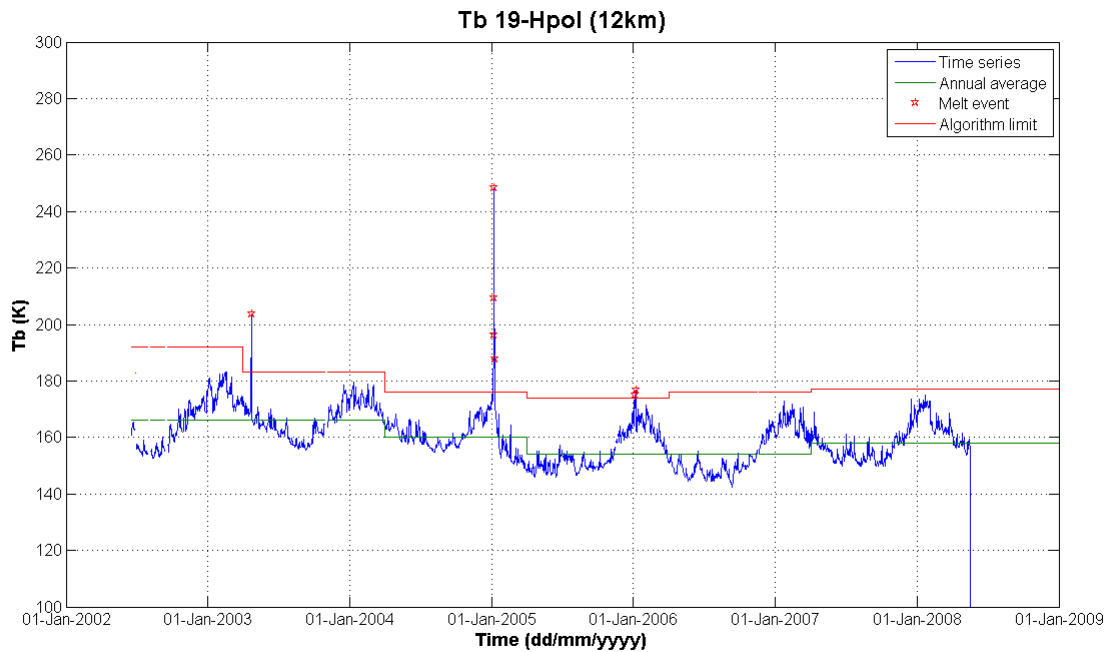


FIG. 4 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 19H d'AMSR pour un point dans le Ross

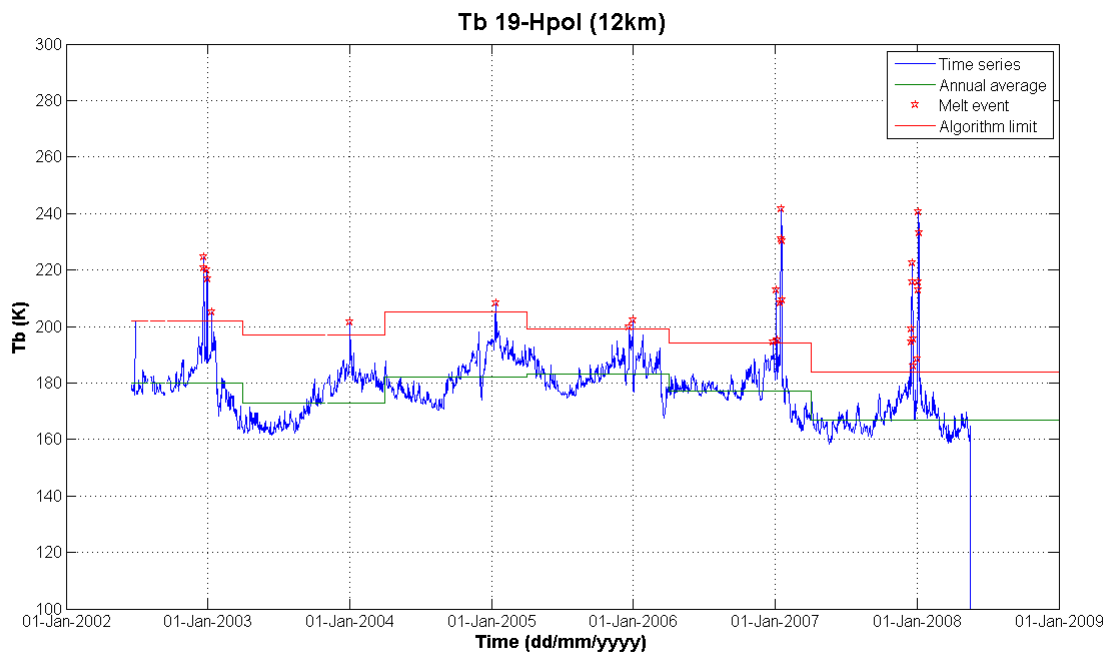


FIG. 5 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 19H d'AMSR pour un point dans le Filchner

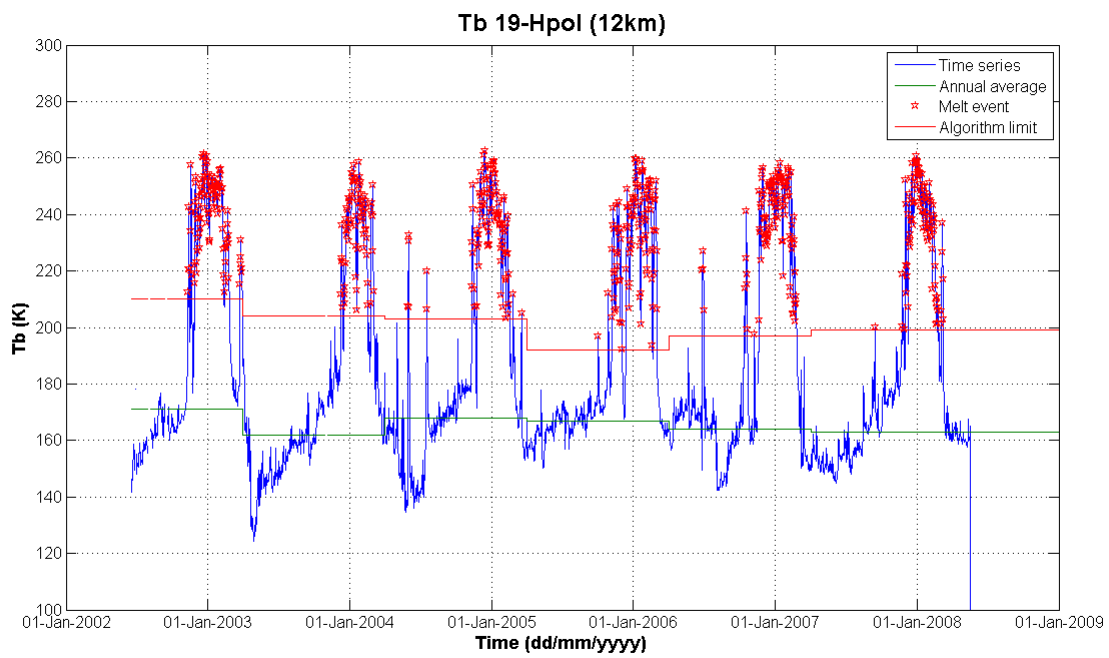


FIG. 6 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 19H d'AMSR pour un point dans la Péninsule

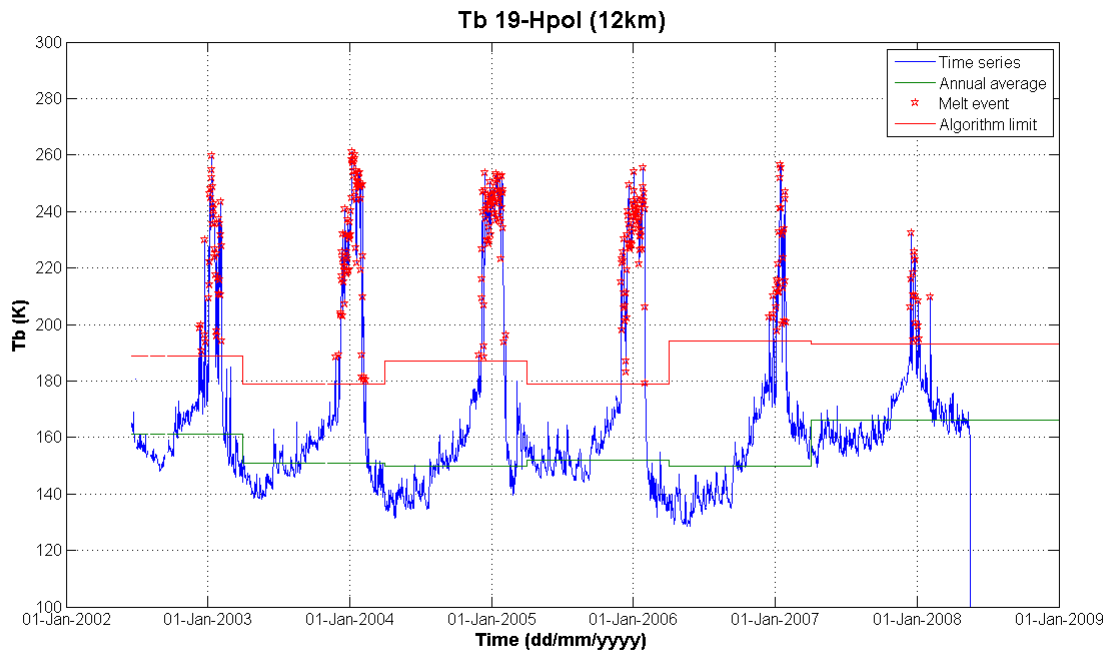


FIG. 7 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 19H d’AMSR pour un point dans l’Amery

Ce type d’analyse a permis d’observer que l’algorithme initial appliqué au canal 19H de AMSR est robuste et fiable dans différents types de régions. Il a donc été possible de passer à une fréquence plus élevée qui améliorerait d’avantage la résolution. Le canal 37H de AMSR a donc été testé. La figure 8 donne la série temporelle du même point qu’à la figure 4 mais pour le canal 37H. En comparant ces deux figures, il est clair que les deux signaux ne se comportent pas de la même façon. Le canal 37H détecte plus de fonte que le canal 19H dans cette zone où il y a normalement peu de fonte. La figure 9 est la série temporelle du même point que la figure 7 à 37H. Cette fois-ci, c’est l’inverse qui se produit. L’algorithme appliqué sur le canal 37H dans cette région détecte moins de fonte que sur le canal 19H. Les figure 10 et 11 représente bien le phénomène sur la Péninsule et l’Amery. En comparant le nombre de jours de fonte détectés sur les différents canaux, on observe très bien quand général, on détecte davantage de fonte sur le canal 19H que 37H. Les figures 23 à 27 présentées en annexe présente cette même relation pour les 5 autres régions de l’Antarctique.

La première différence que l’on peut observer est la valeur de la moyenne. La valeur de la moyenne à 37H est 15 à 20K de plus que celle à 19H. Ceci est possiblement dû au fait que le signal à 19H pénètre plus à l’intérieur du manteau neigeux et qu’il intègre des valeurs de température plus faibles à son signal final. Cette dernière observation est suffisante pour expliquer la différence entre l’algorithme appliqué à 19H et 37H sur des régions comme le Ross ou le Filchner. Toutefois, elle n’explique pas à elle seule le comportement de l’algorithme dans les régions comme la Péninsule ou l’Amery.

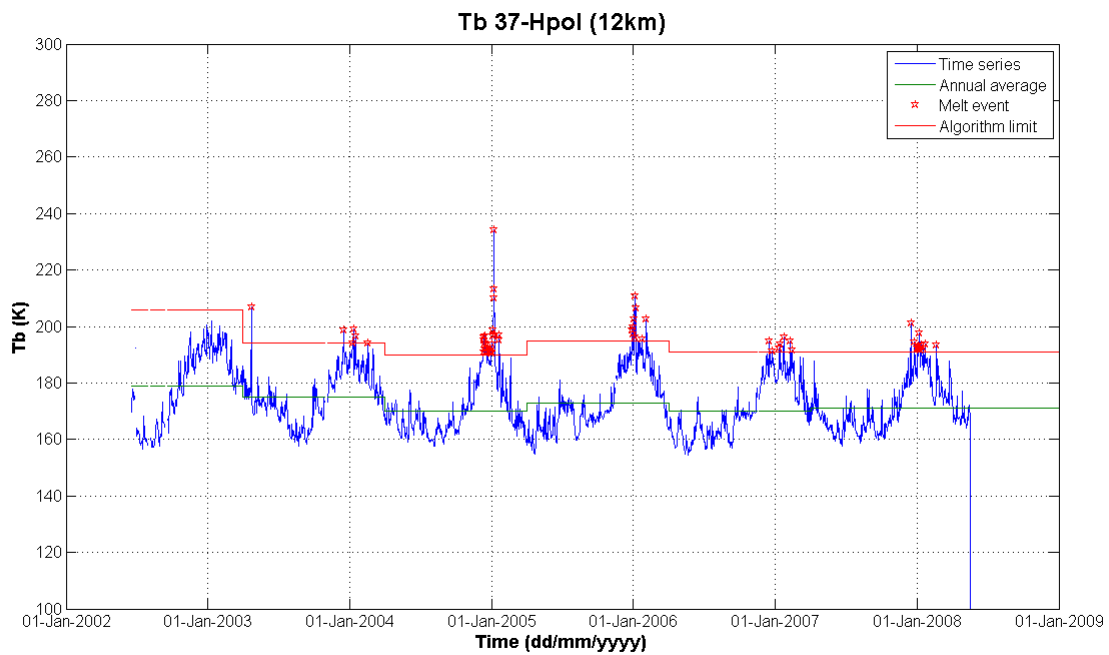


FIG. 8 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 37H d'AMSR pour un point dans le Ross

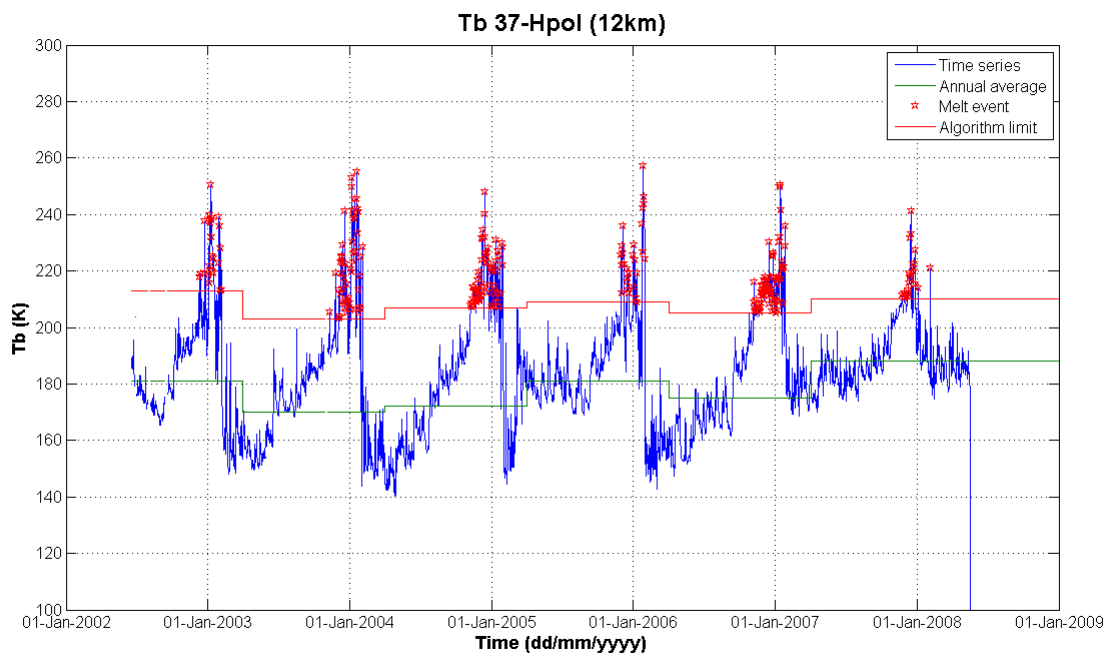


FIG. 9 – Série temporelle de 2002 à 2008 de température de brillance du canal 37H d'AMSR pour un point dans l'Amery

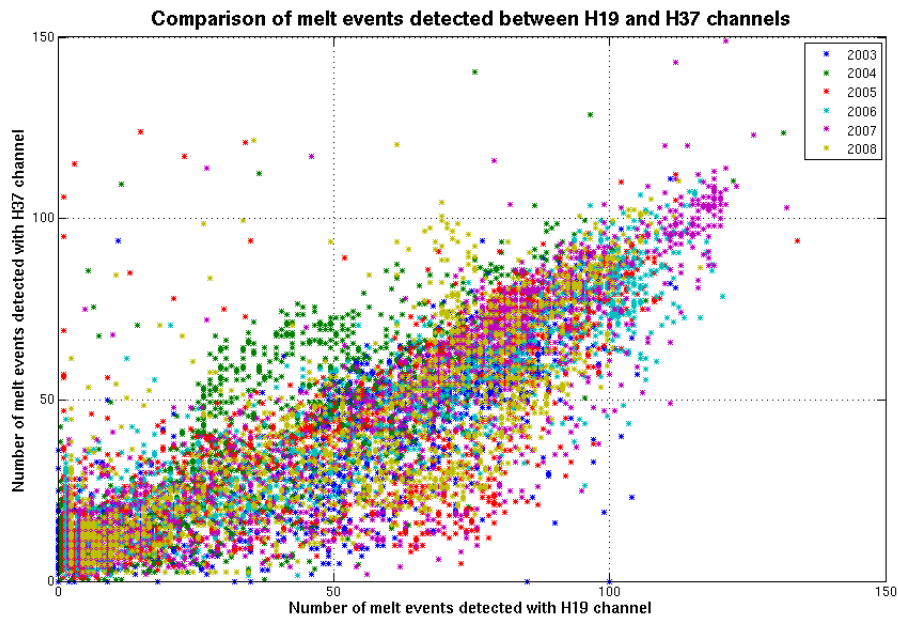


FIG. 10 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur la péninsule

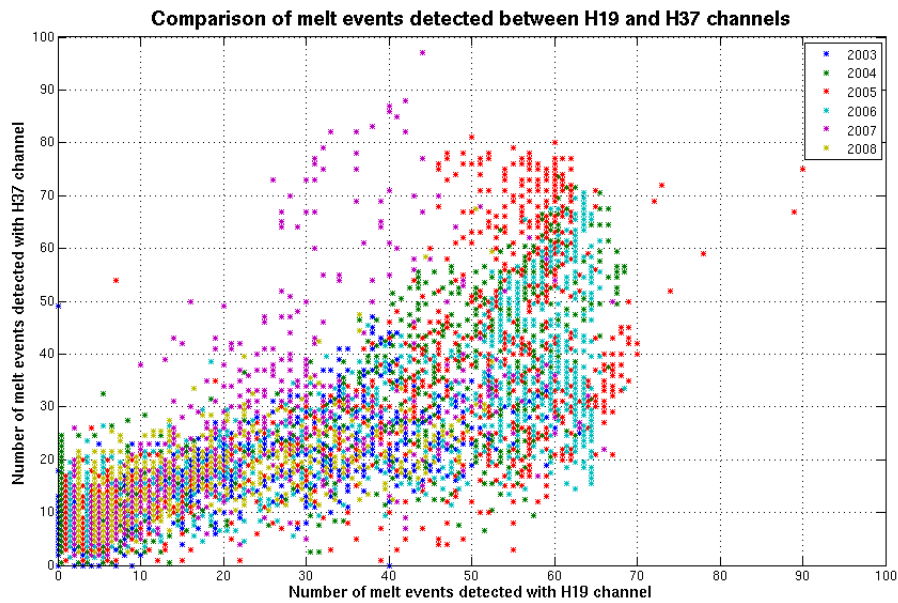


FIG. 11 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur l’Amery

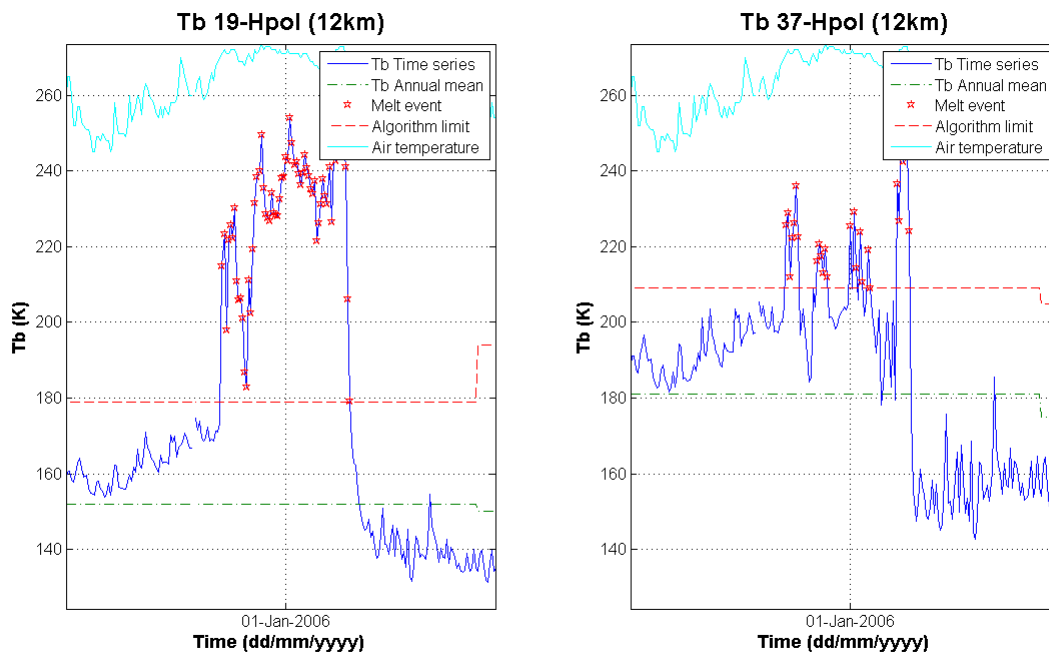


FIG. 12 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H (gauche) et 37H (droite) d'AMSR pour un point dans l'Amery

La figure 12 est un agrandissement sur la série temporelle autour du 1<sup>er</sup> janvier 2006 du point sur l'Amery. Lorsque mis côte à côte, les différences entre les deux signaux sont plus évidentes. On peut bien voir sur ce graphique que les moyennes sont différentes. Aussi, on observe que les variations durant la période de fonte sont beaucoup plus fortes durant la période de fonte à 37H qu'à 19H. La question qui se présente est : est-ce que ces variations sont locales et propres à ce point là ou est-ce que c'est un phénomène répandu aux pixels avoisinant ? Si le phénomène est localisé, ceci peut signifier que ces différences sont dues au changement de résolution. Les figures 14 à 17 présentées en annexes sont les séries temporelles des pixels autour de celui de la figure 12. Il est clair que le phénomène n'est pas localisé. On observe qu'il y a trois périodes différentes où la température de brillance redescend sous le seuil à 37H et non à 19H. Ceci implique donc que le problème vient plutôt du signal lui-même.

Afin de vérifier si ces baisses sont dues à des baisses d'émissivité, les signaux aux mêmes fréquences mais cette fois-ci en polarisation verticales ont été ajoutées aux graphiques initiaux. La figure 11 en est un exemple encore une fois, sur le même point dans la région de l'Amery. Puisque les deux polarisations ne se comportent pas exactement de la même façon mais subissent toutes deux des variations à l'émissivité, ce genre de graphique nous permet de comprendre un peu mieux l'origine du comportement du signal. On observe que pendant la première et la dernière retombée de la température de brillance, il y a une chute dans les deux polarisations. Toutefois, lors de la retombée intermédiaire, on observe une retombée en polarisation horizontale mais une stabilisation en polarisation verticale. Il est donc difficile de déterminer quelle est la cause des chutes du signal 37H comparativement au signal 19H. On



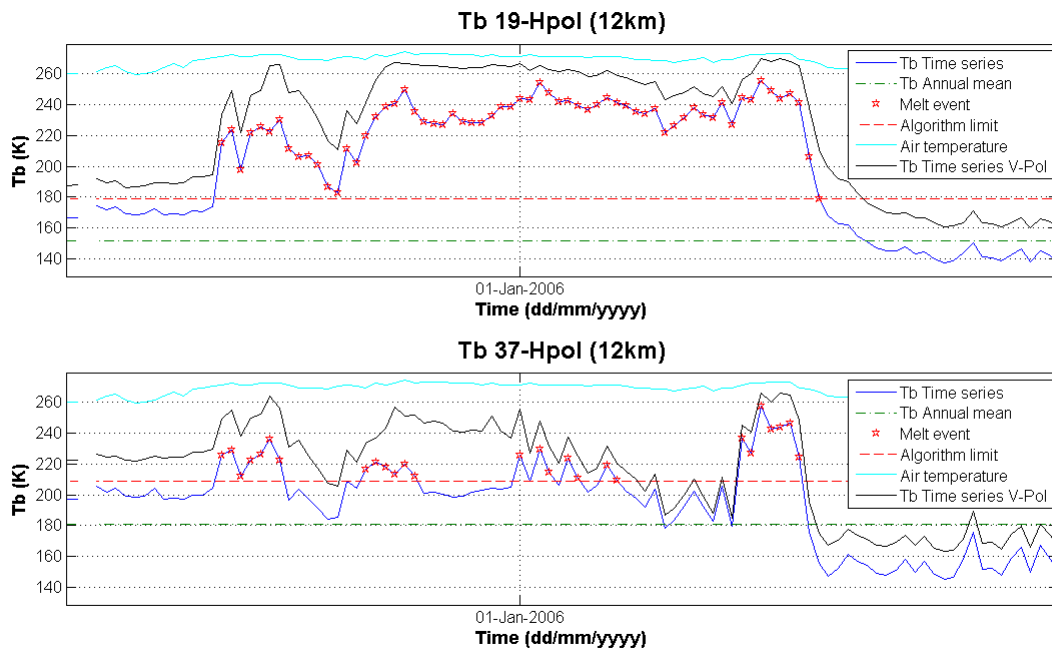


FIG. 13 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H/19V (gauche) et 37H/37V (droite) d'AMSR pour un point dans l'Amery

peut toutefois affirmer que l'algorithme de détection de la fonte ne détecte pas la même chose à 37GHz qu'à 19GHz. Il faudrait donc faire une étude plus approfondie des signaux à plus haute fréquence afin de mieux comprendre leur comportements.

## 6. Conclusion

Le but de ce stage aura donc été de comprendre le fonctionnement de l'algorithme d'Olivier Torinesi et d'en améliorer sa résolution spatiale. Grâce à la réécriture de l'algorithme et la représentation visuelle, la première partie de ce but a été accomplie. Il a même été possible de constater la robustesse et la fiabilité d'un tel algorithme. Toutefois, avec le peu de temps alloué à ce stage et les différents problèmes rencontrés dans l'analyse des signaux, il s'est avéré plus difficile de trouver un moyen d'améliorer la résolution spatiale.

Il ne faut toutefois pas perdre espoir qu'il est possible d'améliorer davantage la résolution. Il y a différentes approches qui n'ont pas été explorées. Le capteur QuickScat n'a pas été utilisé. Ce dernier possède une résolution de l'ordre de 8km. Aussi, en y mettant plus de temps, il serait peut-être possible de réussir à utiliser les fréquences plus élevées du capteur AMSR. Cela nécessiterait donc une étude beaucoup plus précise et minutieuse des différents changements climatologiques en fonction des variations de la température de brillance sur un point précis.

# 7. Remerciements

Il a été possible de ressortir quelques résultats intéressants malgré le temps limité. Ceci n'aurait pas été possible sans l'aide de mon superviseur Ghislain Picard et d'un thésard du LGGE Ludovic Brucker. Grâce à eux mes connaissances en télédétection et en programmation ce sont améliorées.

Ce stage n'aurait pas été aussi agréable sans mes collègues de bureau avec qui j'ai pu rigoler et profiter d'un bon café le matin. Bref, merci à tous ceux que j'ai côtoyés durant mon séjour en France.

# A. Annexes : Quelques exemples de plus

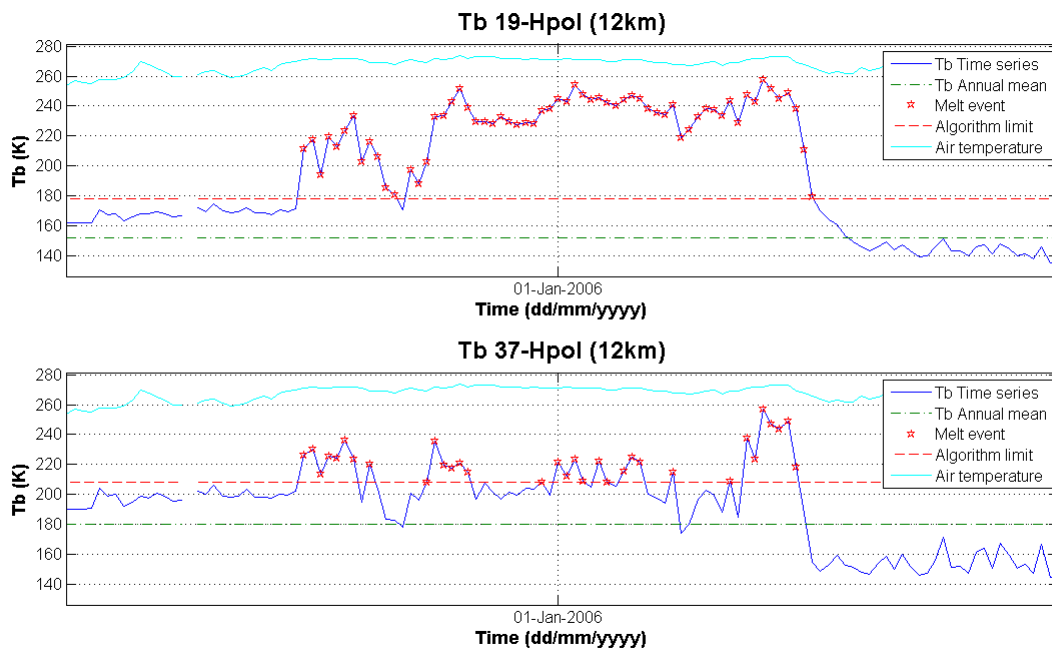


FIG. 14 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H (haut) et 37H (bas) d'AMSR pour le point à gauche de celui de la figure 12

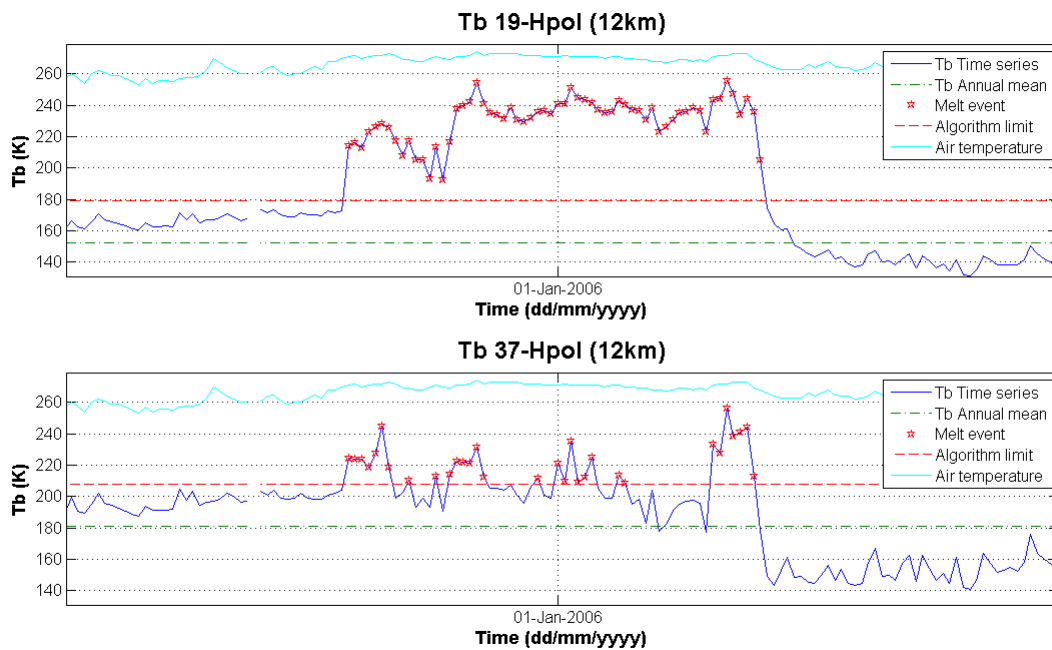


FIG. 15 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H (haut) et 37H (bas) d'AMSR pour le point en haut de celui de la figure 12

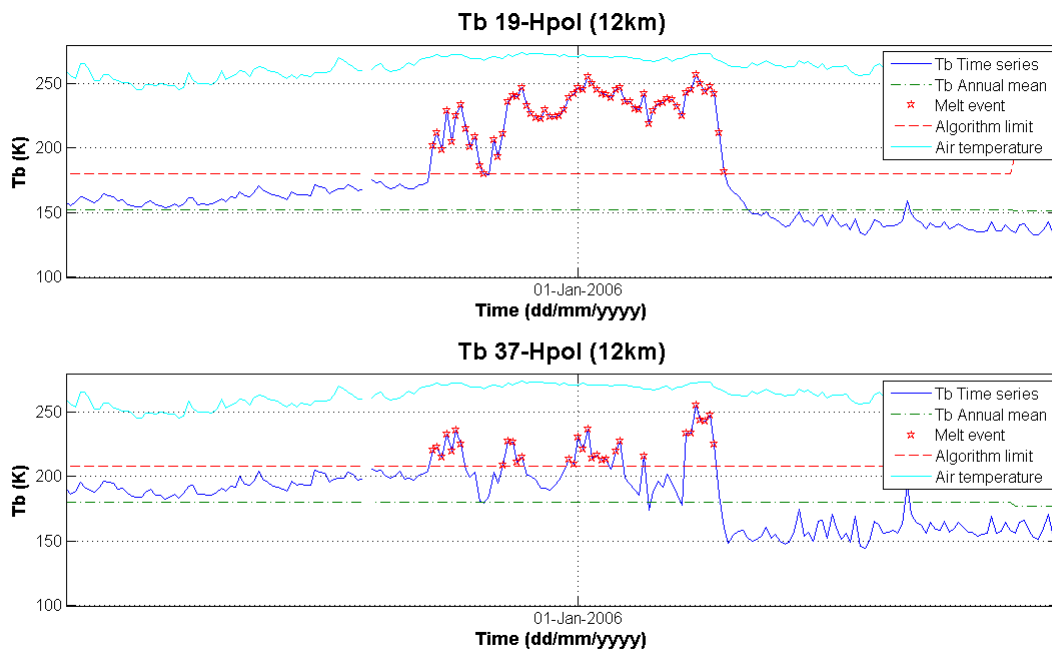


FIG. 16 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H (haut) et 37H (bas) d'AMSR pour le point en bas de celui de la figure 12

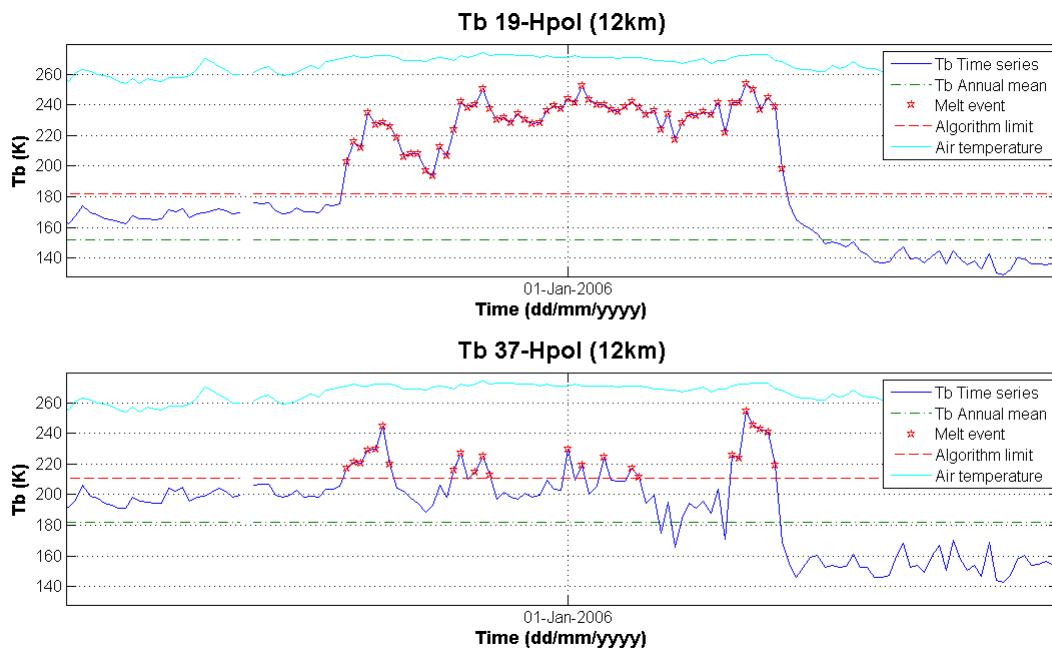


FIG. 17 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H (haut) et 37H (bas) d'AMSR pour le point à droite de celui de la figure 12

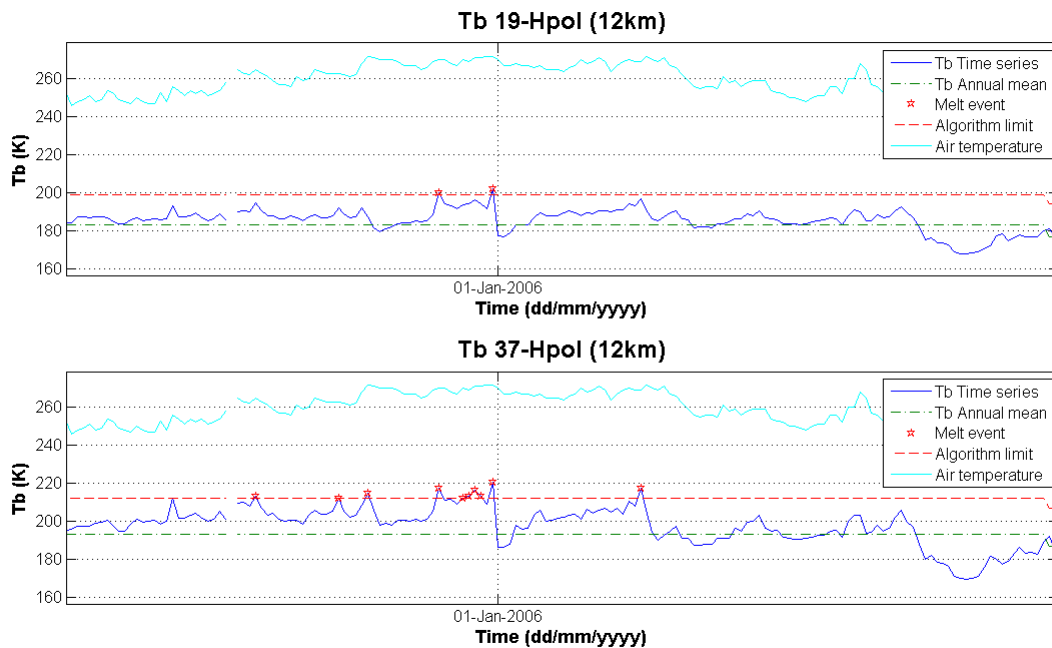


FIG. 18 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H(haut) et 37H (bas) d'AMSR pour un point dans le Filchner

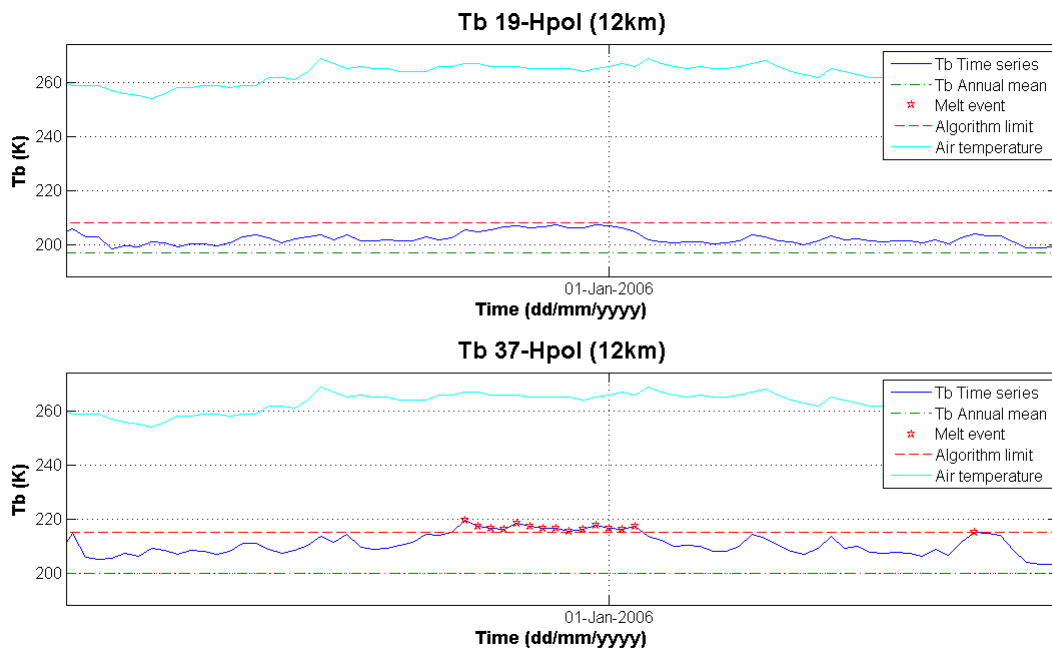


FIG. 19 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H(haut) et 37H (bas) d'AMSR pour un point dans le Filchner

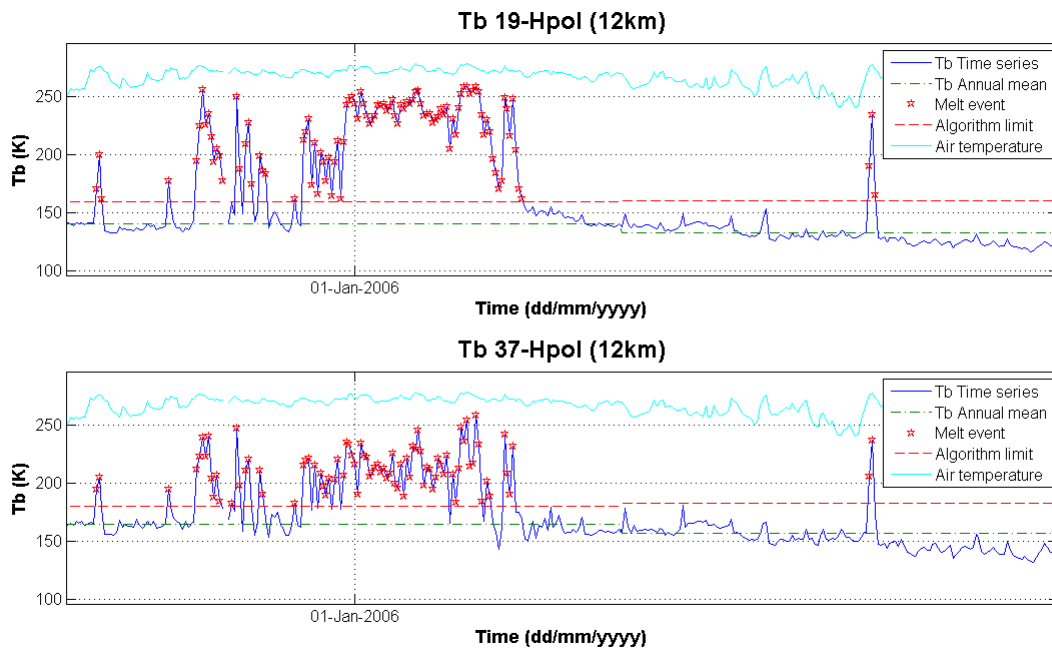


FIG. 20 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H(haut) et 37H (bas) d'AMSR pour un point dans la Péninsule

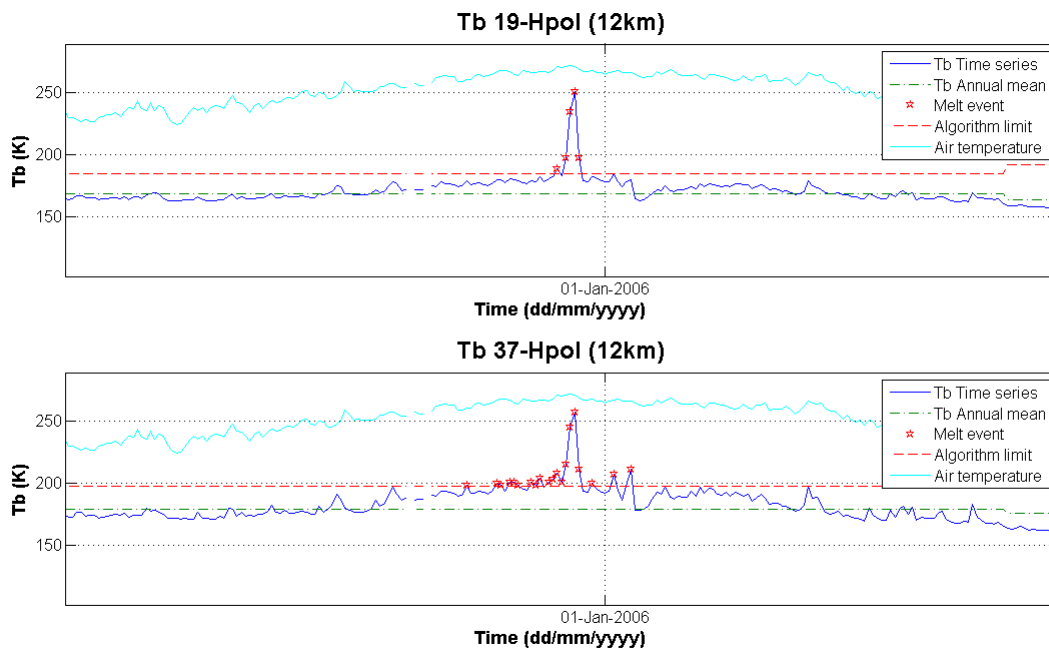


FIG. 21 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H(haut) et 37H (bas) d'AMSR pour un point dans le Ross

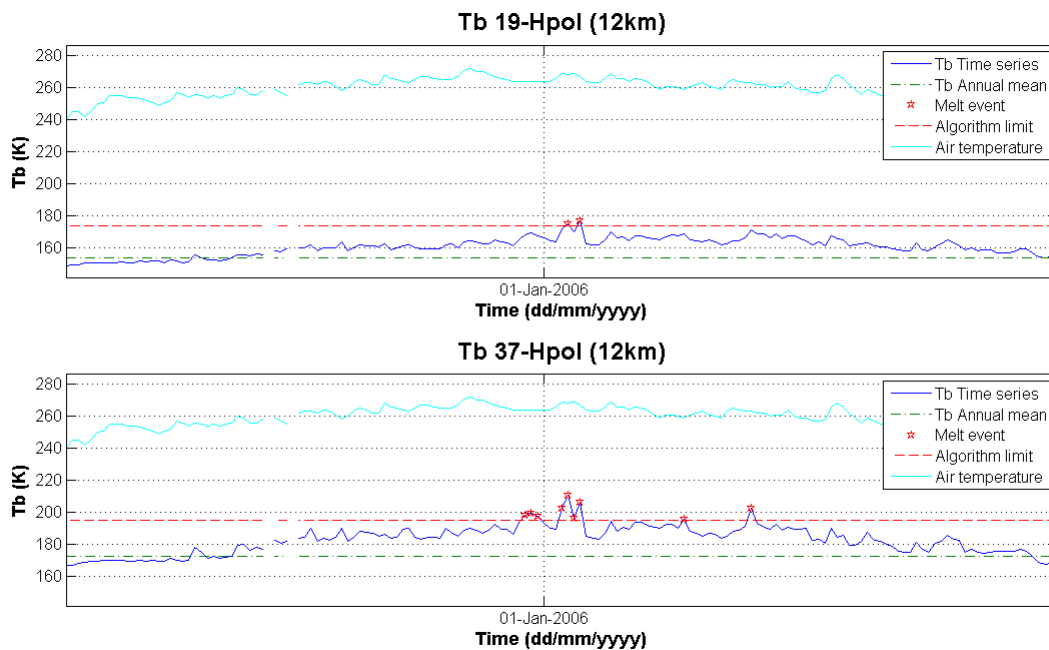


FIG. 22 – Série temporelle de l'été 05-06 de température de brillance du canal 19H(haut) et 37H (bas) d'AMSR pour un point dans le Ross



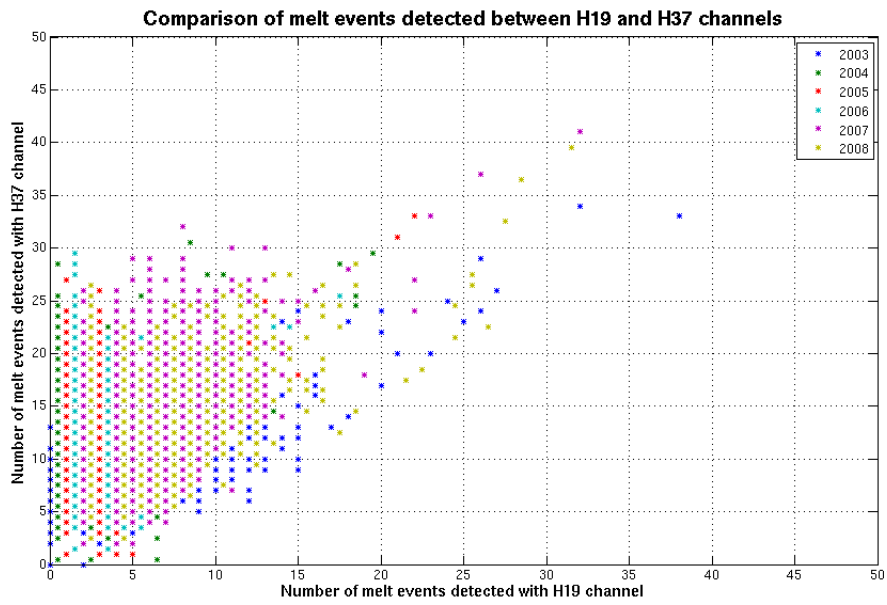


FIG. 23 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur le Filchner

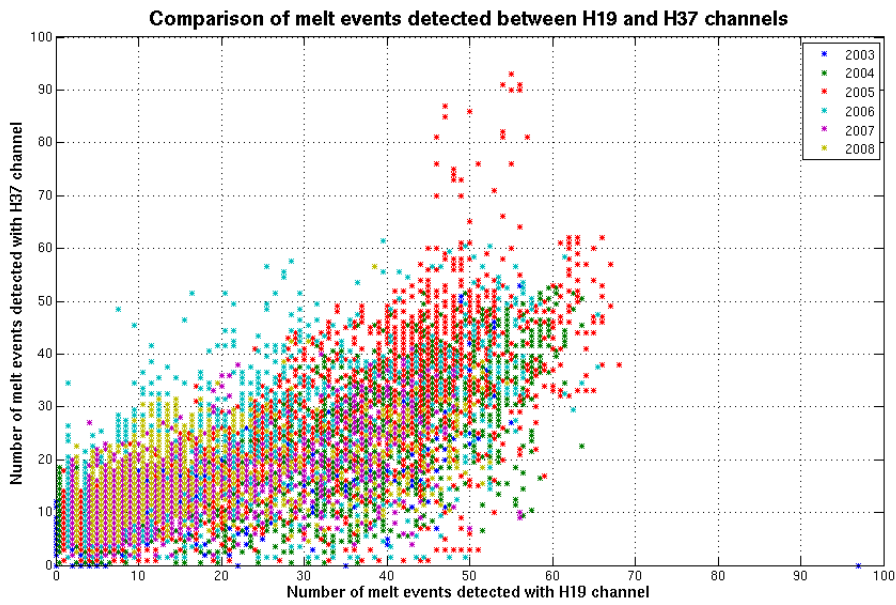


FIG. 24 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur le Dronning Maud Land

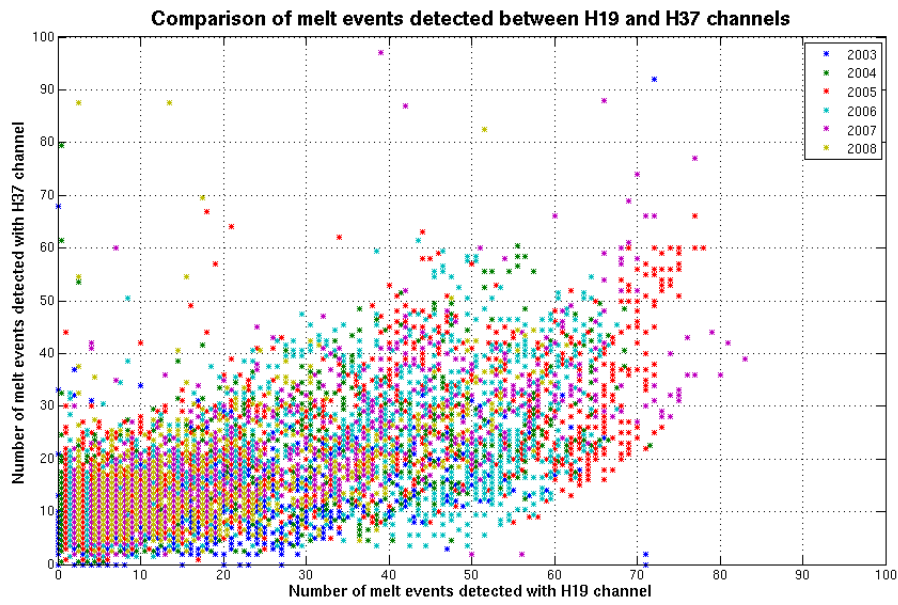


FIG. 25 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur le Wilkes

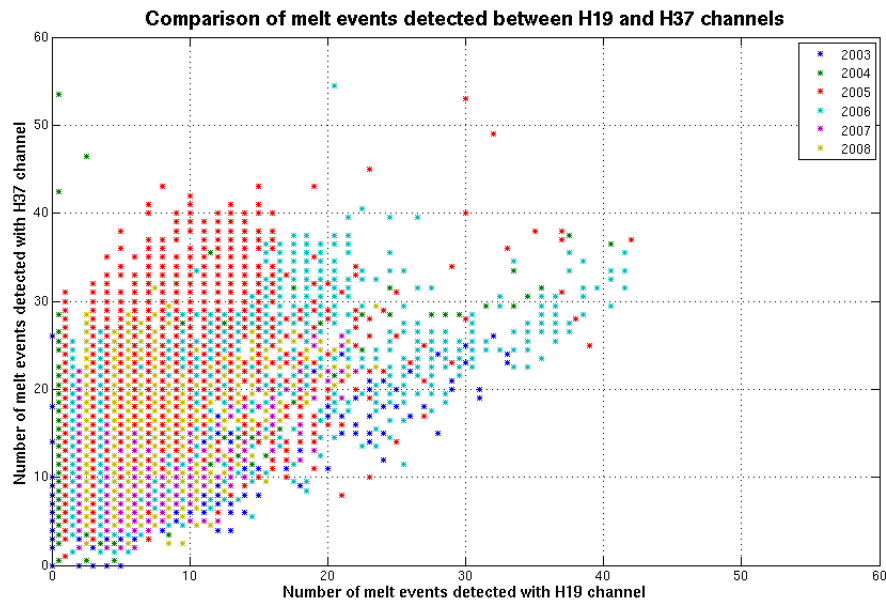


FIG. 26 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur le Ross

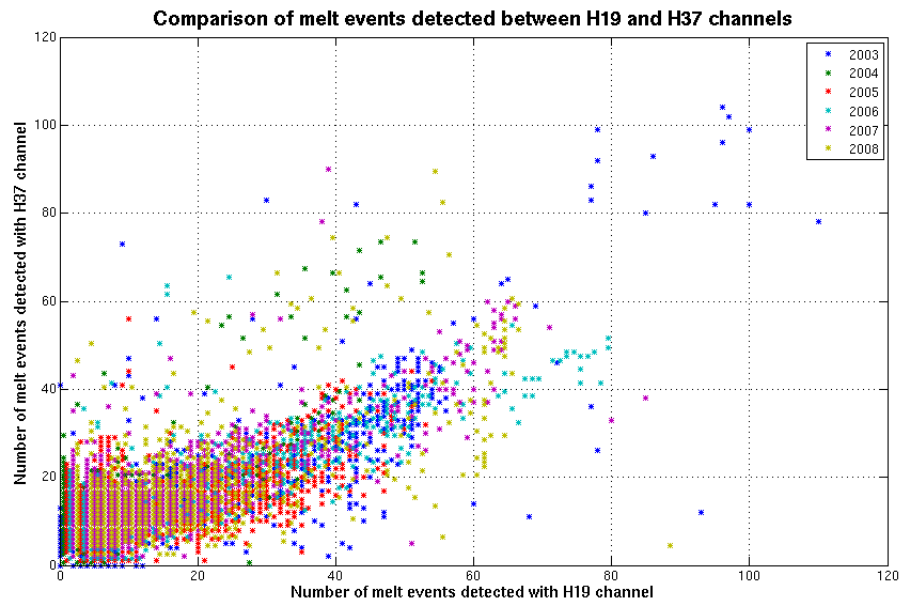


FIG. 27 – Comparaison du nombre de jours de fonte détectés sur chaque pixels par l’algorithme appliqué sur les canaux 19H et 37H d’AMSR sur le Marie Byrd Land

# Bibliographie

- [1] T. L. Mote, M. R. Anderson, K. C. Kuivinen, and C. M. Rowe. Passive microwave derived spatial and temporal variations of summer melt on the greenland ice sheet. *Annals of Glaciology*, 17 :233–238, 1993.
- [2] Olivier Torinesi. *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*. PhD thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2002.
- [3] A. Walker and B. Goodman. Discrimination of a wet snow cover using passive microwave satellite data. *Annals of Glaciology*, 17 :307–311, 1993.
- [4] H. Jay Zwally and S. Fiegles. Extent and duration of antarctica surface melting. *Journal of Glaciology*, 40 :463–476, 1994.