

# Validation de la composante «neige» du modèle régionale canadien du climat (MRCC) à l'aide des données de télédétection satellitaire

par

Karem Chokmani, professeur

Monique Bernier, professeure

Benjamin Raphaël-Amanrich, stagiaire

Institut National de la Recherche Scientifique

Eau, Terre et Environnement

Université du Québec

490, de la Couronne, Québec (Québec)

Canada G1K 9A9

**Rapport n° R-1024**

Septembre 2008

*ISBN : 978-2-89146-585-4*

## **Avant-propos**

Les données d'analyse et les résultats présentés dans le présent rapport ont été produits par M. Benjamin RAPHAËL-AMANRICH, étudiant en licence et Master 1<sup>ère</sup> année à l'IUP (Systèmes intelligents) de l'université Paul Sabatier (Toulouse, France), dans le cadre d'un stage effectué à l'INRS-ETE sous la direction de Karem Chokmani, du 03 mars au 08 août 2008.

Le corps du rapport est consacré à présenter la problématique de recherche, la méthodologie de travail ainsi qu'une partie des résultats d'analyse et ce, à titre d'illustration. L'ensemble des résultats figure en annexe.

Les auteurs tiennent à remercier le CRSNG et le consortium OURANOS pour le support financier, Monsieur Royer A., professeur à l'Université de Sherbrooke ainsi pour sa collaboration dans le développement de l'algorithme NOAA-SSMI ainsi que Madame Anne Frigon, chercheure OURANOS, pour ses commentaires et suggestions. Les données du modèle régionale canadien du climat (MRCC) ont été générées et fournies par OURANOS.



# Table des matières

1	Introduction.....	1
1.1	Problématique de la recherche.....	1
1.2	Objectif .....	3
2	Méthodologie.....	5
2.1.	Données du MRCC.....	5
2.2.	Données de télédétection .....	6
2.2.1.	Détermination du dernier jour de la période de fonte.....	7
2.2.2.	Analyses.....	9
3	Résultats d’analyse.....	11
3.1	Corrélation des courbes de fonte.....	11
3.2	La date de la fin de fonte.....	16
3.2.1.	Le pourcentage de neige .....	16
3.2.2.	La hauteur de la neige .....	21
3.3	Écarts entre les dates de la fin de la fonte.....	24
4	Conclusions.....	31
5	Références.....	33
	Annexe 1 : Coefficient de corrélation entre la hauteur de neige estimée par MRCC et le pourcentage de couvert nival observé par NOAA-SSMI .....	39

Annexe 2 : Corrélation entre la vitesse relative de fonte selon le MRCC et la vitesse relative de fonte selon NOAA-SSMI.....	43
Annexe 3 : Histogrammes du pourcentage du couvert nival .....	47
Annexe 4 : Répartition géographique du pourcentage de couvert nival.....	51
Annexe 5 : Hauteur de neige selon le MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI .....	55
Annexe 6 : Cartes de la hauteur de neige pour chaque tuile selon le MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI.....	59
Annexe 7 : Écart entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN = 0 cm, et celui de NOAA-SSMI.....	63
Annexe 8 : Cartes des écarts entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN= 0 cm, et celui de NOAA-SSMI.....	67
Annexe 9 : Écart entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN optimal, et celui de NOAA-SSMI.....	71
Annexe 10 : Cartes des écarts entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN optimal et celui de NOAA-SSMI.....	75

# 1 Introduction

---

## 1.1 Problématique de la recherche

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'études multidisciplinaires menées par plusieurs chercheurs associés à OURANOS visant à valider les éléments importants du cycle hydrologique dans les simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) sur le Québec ainsi qu'à évaluer les effets estimés par le MRCC dans ses projections de changement climatique.

Le couvert nival est un facteur clé dans la modélisation de la circulation atmosphérique, du bilan hydrique, des phénomènes météorologiques ainsi que des changements climatiques. L'albédo élevé de la neige influence le bilan radiatif du système océan-terre-atmosphère et son contenu en eau représente un grand réservoir hydrique. En effet, durant le cycle annuel, la neige couvre entre 10% à 40% de l'hémisphère nord (Hall *et al.*, 2001; Cordisco *et al.*, 2003).

La source conventionnelle d'information sur le couvert nival (i.e., couverture de neige, le gel du sol, l'équivalent en eau de la neige) est le réseau de stations météorologiques où des observations journalières de la présence et/ou de la hauteur de la neige sont relevées. En raison de sa faible densité et sa distribution spatiale non optimale, ce réseau de stations ne permet pas de fournir des données assez précises pour cartographier l'étendue et l'équivalent en eau du couvert nival de manière spatialement consistante à grande échelle avec une bonne résolution spatiale. Ce qui se traduit par une incapacité de suivre avec précision l'état de surface sur de longues périodes ainsi que de suivre l'évolution du couvert nival pendant des périodes critiques telles que la formation du couvert nival en automne ou la fonte de la neige au printemps.

Les données satellitaires dans le visible et l'infrarouge comme dans les micro-ondes passives (NOAA-AVHRR, SSM/I, AMSR-E) représentent alors des sources alternatives d'information sur

le couvert nival. Elles pourraient être utilisées pour la validation des simulations du MRCC si des algorithmes adaptés à la géographie du territoire québécois (épaisseur et structure du couvert nival, types de végétation) étaient développés. Plusieurs produits satellitaires de la couverture nivale sont disponibles en temps réel. Toutefois, leur qualité varie considérablement en fonction des caractéristiques du capteur et de la plateforme, des procédures de traitement des images et des techniques de classification de la neige (Simic *et al.*, 2004).

Considérant que les simulations du MRCC couvrent une période de vingt ans (1979 à 1999), les produits opérationnels disponibles pour la cartographie de la neige ne permettent pas de fournir des données historiques sur une assez longue période (au minimum 25% de la période de simulation) et ce, pour plusieurs raisons : soit parce que la résolution et/ou la couverture spatiale sont inadéquates soit en raison de la non disponibilité d'une longue série continue d'observations (Chokmani *et al.*, 2007).

Ainsi, les deux capteurs AVHRR (au moins deux images de jour par jour, 1 km de résolution) à bord du satellite NOAA (visible et infrarouge) et SSM/I (2 images par jour, 25 km de résolution) à bord du satellite DMSP (micro-ondes passives) ont été retenus pour développer des algorithmes de cartographie de la neige au sol adaptés aux conditions du Québec. En 2003, une procédure opérationnelle de suivi spatio-temporel de la couverture de la neige au sol à l'aide des images NOAA-AVHRR a été développée (Chokmani *et al.*, 2004; Chokmani *et al.*, 2005; Chokmani *et al.*, 2006). En parallèle, une méthode simple pour la détection de la couverture de la neige à partir des données micro-ondes passives du capteur SSM/I a été élaborée (Langlois, 2003; Langlois *et al.*, 2004). Par ailleurs, plusieurs auteurs ont démontré l'intérêt de l'utilisation conjointe des données satellitaires dans le visible et l'infrarouge et dans les micro-ondes passives pour cartographier l'étendue de la neige et suivre son évolution dans le temps et dans l'espace

(Ramsay, 1998; Koskinen *et al.*, 1999; Romanov *et al.*, 2000; Tait *et al.*, 2001; Bitner *et al.*, 2002; Cordisco *et al.*, 2003; Simic *et al.*, 2004). Par conséquent, il a été décidé de combiner les deux capteurs et de développer une procédure de fusion de la cartographie de la neige obtenue à l'aide des données optiques du capteur AVHRR et celles obtenues à l'aide du capteur de micro-ondes passives SSM/I. Cette procédure permet d'allier la haute résolution spatiale du capteur AVHRR à la capacité de SSM/I de pénétrer les nuages.

## **1.2 Objectif**

Dans le but de valider la composante neige du MRCC, la présente étude vise à quantifier les différences entre les estimations de la date de la fin de la saison de fonte de la neige établie par le MRCC et celles des données réelles fournies par la cartographie historique de la présence de la neige effectuée à l'aide des capteurs NOAA et SSMI.



## 2.1. Données du MRCC

Les données, du MRCC (Modèle régional canadien du climat), utilisées ici, en lien avec la composante neige, proviennent de la simulation climatique régionale dénommée "acy" (nom opérationnel Ouranos), produite avec la configuration suivante :

- MRCC4.1.1 (Caya et Laprise, 1999; Music et Caya, 2007) sur le domaine régional centré sur le Québec (QC 112x88 tuiles ou mailles de calcul) avec une résolution horizontale d'environ 45km (à 60 degrés Nord);
- piloté aux frontières latérales par les réanalyses globales ERA40 (Uppala S. M. & al.(2005), à 2,5 x 2,5 degrés) et exécutée sur la période 1961-2002 (avec une période de chauffe préalable de trois années) avec des pas de temps de 15 minutes.
- Cette version du MRCC est couplée au schéma de surface multi-couches Canadian LAnd Surface Scheme (CLASS 2.7; (Verseghy, 1991; Verseghy *et al.*, 1993)).

La présente étude, a été réalisée sur un sous-domaine de 734 tuiles couvrant la partie centrale et méridionale du Québec ainsi que l'ouest du Labrador (Figure 1).

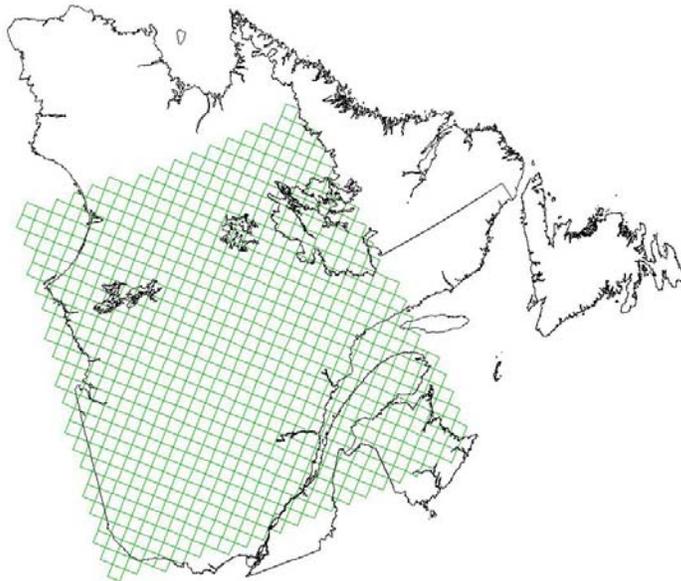
Trois variables calculées à un pas de temps journalier, du 1<sup>er</sup> avril au 30 juin de chaque année (1988-1999) nous ont été livrées, à savoir :

- 1) SMLT: taux de fonte de la neige;
- 2) SNO: neige au sol exprimée en équivalent en eau de la neige (EEN);
- 3) ZN: hauteur de neige au sol.

Nous nous sommes intéressés ici à la variable hauteur de neige au sol (ZN) laquelle est la variable MRCC qui, à notre avis, exprime le mieux l'état du couvert nival. ZN semble la variable

la plus en lien avec la détection de la présence ou non de la neige au sol à l'aide de l'imagerie satellitaire.

Dans le MRCC, CLASS 2.7 considère que toute la tuile est recouverte de neige (couverture 100%) lorsque la hauteur de la neige (ZN) est supérieure à 10cm. Si cette dernière est égale ou inférieure à 10cm, on suppose alors que la tuile est recouverte partiellement de neige en proportion linéaire par rapport à la limite de 10cm (p.ex., 50% de couverture si la hauteur est de 5cm.).



*Figure 1 – Territoire à l'étude*

## **2.2. Données de télédétection**

La cartographie de la présence de la neige a été effectuée à l'aide d'un algorithme de fusion de données satellitaires (Chokmani et al., 2007). Ce dernier consiste à combiner les résultats de cartographie de la neige en utilisant les données dans le visible et l'infrarouge du capteur

NOAA-AVHRR (dont la résolution spatiale est de 1 km et dont l'utilisation est limitée par la présence des nuages) avec ceux de la cartographie de la neige réalisée à l'aide du capteur micro-ondes passives SSMI (qui est insensible à la présence des nuages mais sa résolution spatiale est de 25 km). Cet algorithme de fusion tire avantage des caractéristiques des deux capteurs tout en minimisant les limites à leur application et produire ainsi une cartographie historique de la neige (pour le territoire du Québec-Labrador). Les résultats de la cartographie est utilisée ici comme données de référence pour la validation des données MRCC (décrites ci-haut).

Ainsi, nous disposons d'une base de données issue de l'algorithme de fusion (appelées ici NOAA-SSMI) couvrant la période de fonte c.-à-d. du 1<sup>er</sup> avril au 31 mai de chaque année, de 1988 à 1999. La précision globale de l'algorithme a été estimée à 86% (en comparaison avec les observations de la hauteur de neige au niveau des stations météorologiques).

### **2.2.1. Détermination du dernier jour de la période de fonte**

Pour une année donnée, nous avons défini la fin de la période de fonte pour le MRCC comme étant le dernier jour où la hauteur de neige estimée par le modèle (indiquée par le paramètre ZN du modèle) passe en dessous d'une valeur seuil, et s'y maintient. À priori ce seuil correspond à une valeur nulle de ZN (disparition totale de la neige de la tuile). Toutefois nous avons remarqué que souvent la valeur de ZN atteint des valeurs très faibles (inférieur à 2 cm) et s'y maintient durant plusieurs jours tandis que la cartographie NOAA-SSMI indique l'absence totale de la neige dans la tuile. Par conséquent, nous avons décidé de varier la valeur du seuil de ZN afin de déterminer la valeur optimale.

Le dernier jour de la période de fonte pour NOAA-SSMI a été défini comme étant le dernier jour pour lequel le pourcentage de couvert de neige, à l'intérieur de la tuile de calcul du MRCC, passe

et se maintient en dessous d'un seuil minimal. En effet, les résultats de cartographie de la neige par l'algorithme de fusion ont été préalablement compilés sur les tuiles du MRCC de 45 km (les données de NOAA-SSMI ont une résolution nominale de 1km, ce qui correspond donc à environ 1800 pixels pour chaque tuile).

Le seuil minimal a été déterminé en calculant le nombre minimal de pixels pour lequel les résultats de la cartographie de la neige à l'aide de l'algorithme NOAA-SSMI demeurent significatifs, et ce, avec un niveau de signification statistique de 95%. Le calcul du nombre minimal de pixels prend en compte le niveau de précision global de la classification (neige, non-neige) qui a été estimé à 86%. Le calcul se base alors sur la formule d'estimation de la taille d'un échantillon dans le cas d'une fonction de distribution binomiale :

$$N = \frac{1}{2} \times \frac{Z^2 p(1-p)}{E^2} \quad (1)$$

Où  $p$  est la précision globale de la classification (86%),  $E$  est l'erreur tolérée correspondant à un niveau de signification statistique de 95% (5%) et  $Z$  est la valeur standard normale correspondante (1,96). La division par 2 est pour tenir compte du fait qu'il s'agit de deux classes : neige et non-neige. Par conséquent, on obtient une valeur de 92 pixels. Ainsi, pour une tuile donnée, si on dénombre 92 pixels ou moins qui ont été classés comme neige, ce qui correspond à un pourcentage de couvert nival dans la tuile d'environ 5% ou moins, ce pourcentage pourrait être négligé et la tuile pourrait être déclarée sans neige.

Dans nos analyses, nous avons aussi pris soin d'écarter les tuiles pour lesquelles la détermination du dernier jour de la fin de la fonte, avec l'une ou l'autre source de données, pouvait comporter une incertitude. Pour cela et vu la contrainte temporelle sur la disponibilité des données, pour qu'une tuile soit prise en compte, sa date de disparition de la neige devait avoir lieu avant le 30

juin de chaque année, dans le cas des données du MRCC, et avant le 31 mai, en ce qui concerne les données NOAA-SSMI. Par ailleurs, lorsqu'il y avait plus de deux jours de suite pour lesquels les données d'après une date potentielle du dernier jour de la fonte sont manquantes, alors la tuile est écartée. En effet, il se pourrait qu'il existe une réapparition de neige pendant ces laps de temps correspondant aux données manquantes.

### **2.2.2. Analyses**

La comparaison entre les résultats fournis par le MRCC et la cartographie de la neige réalisée à l'aide de l'algorithme NOAA-SSMI a porté sur trois aspects : 1) La corrélation entre les courbes de fonte selon les deux types de données; 2) La date de la fin de la fonte et 3) L'écart entre les dates de la fin de la fonte calculées à partir des deux types de données.

Dans cette section, nous ne présentons qu'une partie des résultats d'analyse. L'ensemble des résultats figure en annexe.



### 3 Résultats d'analyse

#### 3.1 Corrélation des courbes de fonte

La Figure 2 illustre un exemple d'évolution de la courbe de fonte de la neige en fonction des jours-juliens. Dans cet exemple, y sont représentées conjointement la courbe d'évolution de la hauteur de neige telle qu'estimée par le MRCC et celle du pourcentage de couvert nival fourni par NOAA-SSMI. Les deux courbes affichent à peu près le même comportement. Toutefois, le modèle MRCC aurait tendance à continuer de simuler la présence d'une mince couche de neige malgré que NOAA-SSMI indique la disparition du couvert nival et ce, depuis quelques jours.

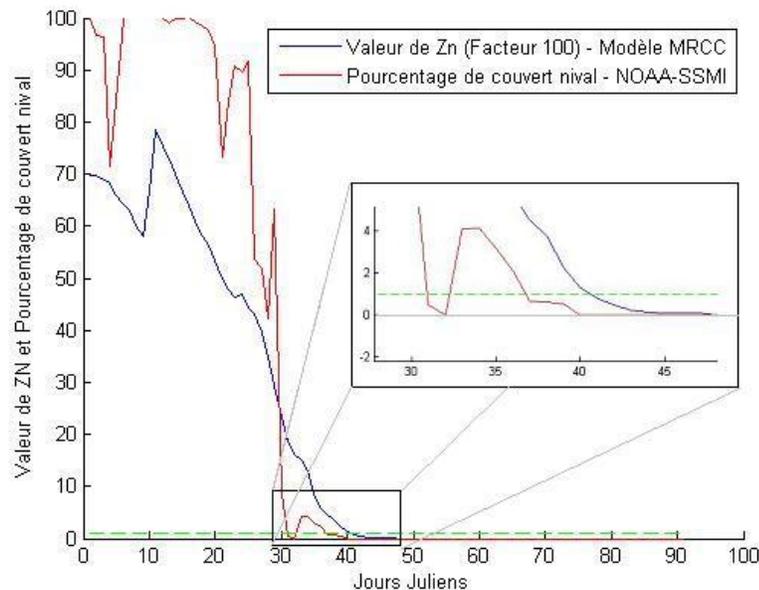
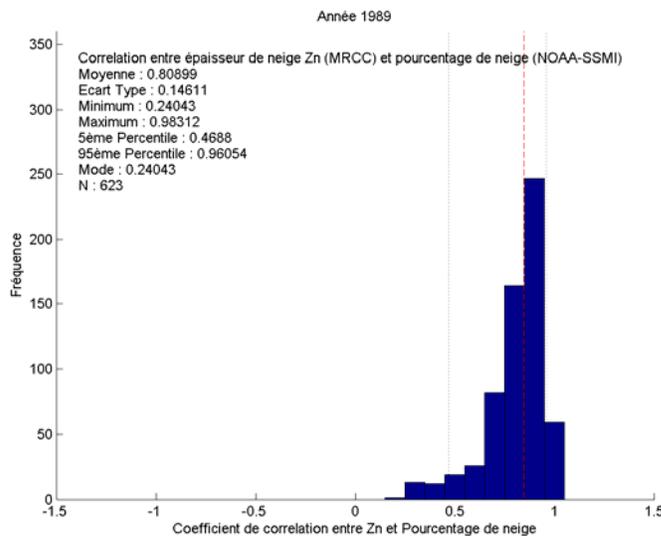


Figure 2 - Comparaison pour une tuile de la courbe de fonte du modèle MRCC et celle de NOAA-SSMI

Dans la Figure 2, la ligne pointillée verte indique une valeur de ZN de 1 cm. Pour cette tuile, il est aisé de constater qu'une valeur seuil de ZN de 1 cm permet de faire correspondre la fin de la fonte selon le MRCC avec celle indiquée par la carte de neige. Par ailleurs, ceci indique que le MRCC aurait tendance à établir la fin de la fonte plus tard qu'elle ne l'est réellement. Nous

analyserons ces aspects plus en détails dans les sections suivantes. Il est également à remarquer que l'évolution du pourcentage de couvert nival à l'intérieur de la tuile fournit par NOAA-SSMI est sujette à une plus grande fluctuation temporelle que celle de ZN estimée par le MRCC.

Nous avons calculé le coefficient de corrélation pour chacune des tuiles de chaque année, entre la hauteur de la neige (ZN) estimée par le MRCC et le pourcentage de couvert nival observé par NOAA-SSMI. La corrélation n'a été calculée que pour les jours pour lesquels nous disposons de données valides en provenance à la fois du MRCC et de la télédétection.



*Figure 3 - Coefficient de corrélation entre la hauteur de neige estimée par MRCC et le pourcentage de couvert nival observé par NOAA-SSMI, année 1989<sup>1</sup>*

La Figure 3 illustre, à titre d'exemple, l'histogramme de distribution du coefficient de corrélation pour l'année 1989. Pour cette année, 95% des 623 tuiles incluses dans le calcul affichent une corrélation supérieure à 0,47 pour une corrélation moyenne de l'ordre de 0,81, ce qui indique

<sup>1</sup> Tous les histogrammes reproduits ici contiennent l'information suivante : la moyenne, l'écart type, le minimum, le maximum, le 5ème centile, le 95ème centile, le mode, ainsi que le nombre N de tuiles retenues pour générer le graphique. La médiane est représentée à même le graphique, en rouge, ainsi que le 5ème et 95ème centile, en noir.

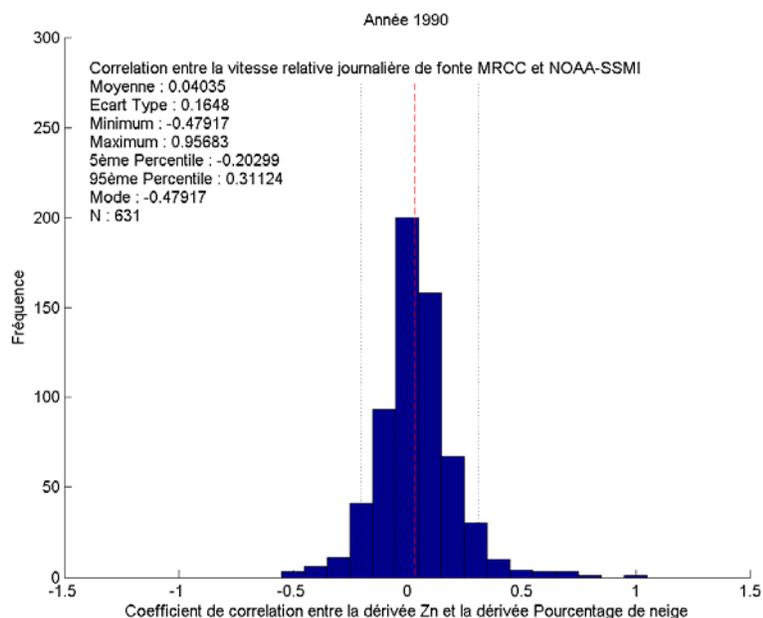
l'existence d'une bonne adéquation entre la courbe de fonte de la neige estimée par le MRCC et les données de référence. Ce constat s'avère valide pour l'ensemble des 12 années de l'étude (Tableau 1).

Après avoir constaté que le modèle suit bien les données de référence concernant la courbe de fonte de la neige, bien qu'il surestime éventuellement le dernier jour de la fonte, nous nous sommes penchés sur le cas de la vitesse relative de fonte.

*Tableau 1- Coefficient de corrélation moyen entre la hauteur de neige estimée par le modèle MRCC et le pourcentage de couvert nival observé par NOAA-SSMI*

Année	Coefficient de corrélation moyen
1988	0.74
1989	0.81
1990	0.77
1991	0.74
1992	0.71
1993	0.69
1994	0.72
1995	0.84
1996	0.67
1997	0.67
1998	0.82
1999	0.85

Pour ce faire, la dérivée relative de la fonte de la neige a été calculée selon MRCC et selon NOAA-SSMI. Ceci revient à calculer pour chaque jour la différence entre la valeur de ZN ou du pourcentage de couvert nival du jour en question et celle du jour précédent. Cette différence est ensuite standardisée en la divisant par la valeur du jour en question. Nous avons ensuite calculé les coefficients de corrélation sur la vitesse relative de fonte, pour chacune des tuiles de chaque année.



*Figure 4- Exemple de corrélation pour toute l'année 1990, entre la vitesse relative de fonte selon MRCC et la vitesse relative de fonte selon NOAA-SSMI*

La corrélation entre les vitesses relatives de fonte des deux types de données est très faible (Figure 4). En effet, 95% des 631 tuiles de l'année 1990 affichent une corrélation inférieure à 0,31. La valeur moyenne est de l'ordre de 0,04. Ceci est confirmé pour toutes les années étudiées (Tableau 2). Dans certains cas, la corrélation est négative.

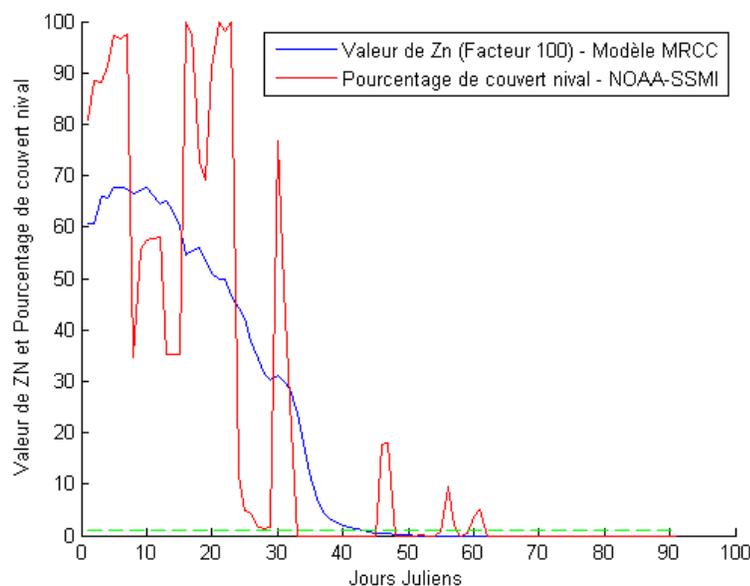
En examinant de près les courbes de fonte de la neige (Figure 5), il s'avère que la faible corrélation entre les deux vitesses de fonte est due, comme il a été mentionné plus haut (Figure 2), au fait que la courbe de fonte du MRCC est beaucoup plus lisse et ne présente pas les fluctuations temporelles de la courbe de fonte de NOAA-SSMI.

Ceci s'expliquerait par le fait que l'information donnée par NOAA-SSMI est plus dynamique puisqu'il s'agit d'une compilation de près de 1800 pixels. En effet, les données NOAA-SSMI sont influencées par la dynamique de la neige à l'intérieur d'une tuile qui peut s'avérer très

variable spatialement et temporellement. Une telle dynamique est tout simplement non prise en charge par le MRCC puisque la tuile de 45x45 km est traitée comme un point indivisible.

**Tableau 2- Moyenne annuelle des coefficients de corrélation entre la vitesse relative de fonte des neiges selon le modèle MRCC et la vitesse relative de fonte des neiges selon NOAA-SSMI**

Année	Coefficient de corrélation moyen
1988	0.05
1989	0.05
1990	0.04
1991	0.05
1992	0.06
1993	0.04
1994	-0.008
1995	0.02
1996	0.08
1997	0.05
1998	0.05
1999	0.007



**Figure 5- Courbes de fonte de neige du modèle MRCC et de NOAA-SSMI, tuile prise dans la région Sud, année 1996**

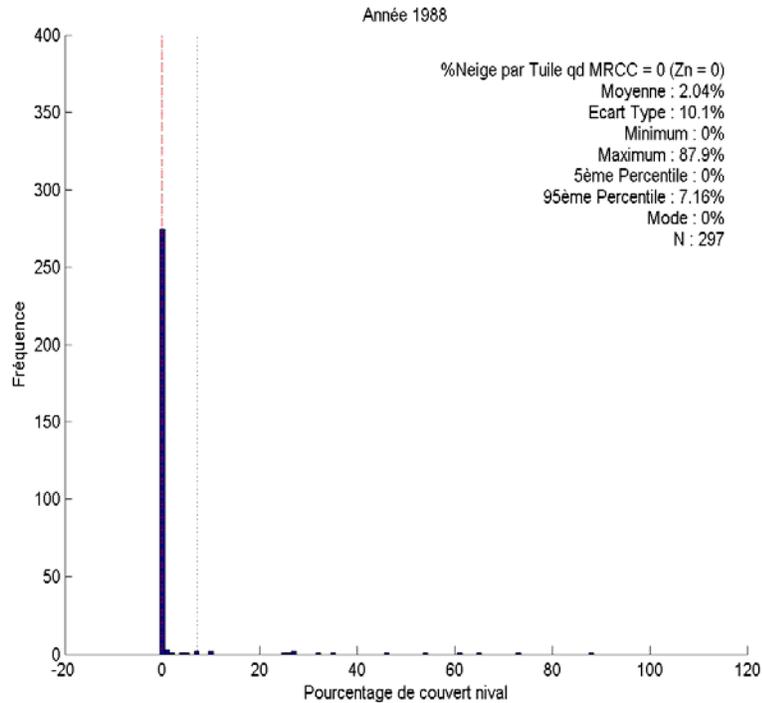
## **3.2 La date de la fin de fonte**

La comparaison entre la date de la fin de la fonte telle que déterminée par les deux sources de données a été opérée sur deux niveaux :

- Le pourcentage de neige encore présent sur les tuiles lors du dernier jour de la fonte indiqué par MRCC;
- La hauteur de neige estimée par le MRCC lors du dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI.

### **3.2.1. Le pourcentage de neige**

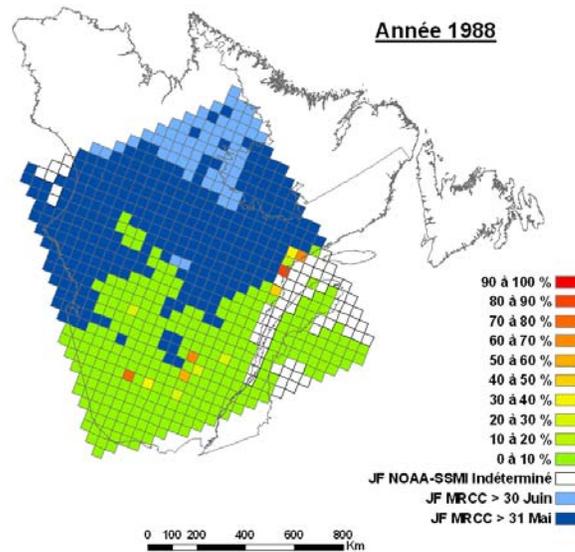
La méthodologie utilisée consistait à détecter le dernier jour de la fonte selon MRCC pour chaque tuile et d'aller chercher le pourcentage de neige dans les données de NOAA-SSMI pour ce même jour. Les tuiles ayant leur dernier jour de la fonte selon MRCC postérieur à la plage temporelle des données NOAA-SSMI (au-delà du 31 Mai) ont été écartées de l'analyse. La Figure 6 illustre un exemple de calcul pour l'année 1988.



**Figure 6- Histogramme du pourcentage du couvert nival, année 1988**

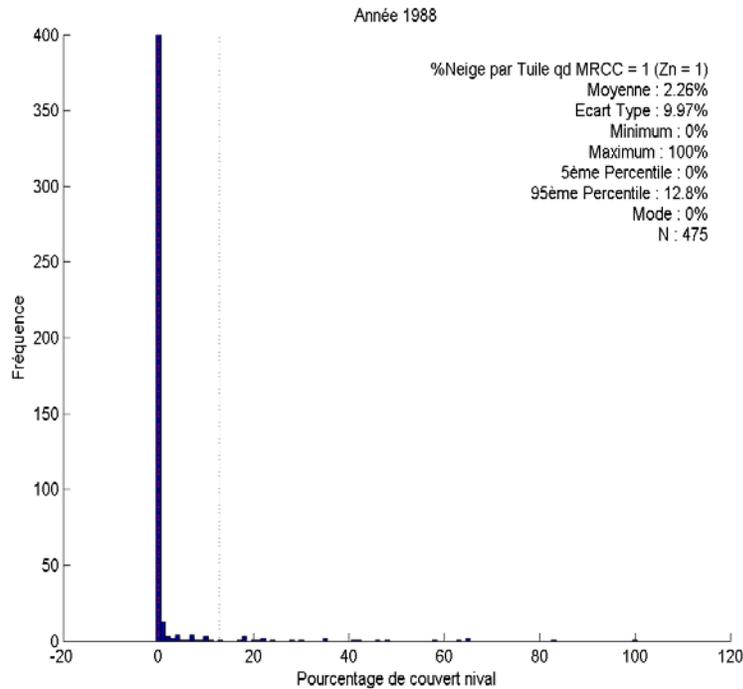
Pour l’année 1988, à la date de la fin de la fonte indiquée par le MRCC (correspondant ici au seuil ZN de 0 cm), les tuiles affichaient en moyenne 2% de couvert nival selon NOAA-SSMI. Également, 95% des tuiles avaient un pourcentage de couvert nival inférieur ou égal à 7%. Ainsi, lorsque le MRCC indique la disparition de la neige (0 cm de hauteur), ceci est confirmé par les données de télédétection. Cela signifie que le MRCC ne sous-estime pas la date de la fin de la fonte (c.-à-d. que la date n’arrive pas plus tôt que la date observée).

La distribution spatiale des résultats telle que illustrée par la Figure 7 montre bien que la neige a déjà disparu sur les tuiles lorsque le modèle MRCC en est au dernier jour de fonte.



*Figure 7- Répartition géographique du pourcentage de couvert nival, année 1988*

La variation du seuil minimal sur ZN pour la détermination du dernier jour de la fonte n’influence que peu les résultats (Figure 8, dans laquelle le seuil minimal sur ZN a été fixé à 1 cm). Par contre, le nombre de tuiles impliquées dans le calcul est alors plus élevé. En effet, la date de la fin de la fonte selon le MRCC est alors plus tôt dans la saison. Par conséquent, celle-ci a plus de chance d’avoir lieu avant le 31 mai augmentant le nombre de tuiles qui peuvent être incluses dans le calcul.



*Figure 8- Histogramme pourcentage couvert nival, seuil ZN fixé à 1 cm, année 1988*

Dans l'exemple de la Figure 8, 175 tuiles supplémentaires sont traitées. La moyenne reste à environ 2%, et l'écart type est sensiblement le même. L'examen de la distribution spatiale des résultats nous confirme qu'il n'y a pas de différences sensibles, mis à part le fait que l'on considère plus de tuiles (Figure 9). La même remarque est applicable pour toutes les années couvertes par l'étude (Tableau 3). L'augmentation de la valeur seuil de ZN à raison de 0.5 cm à chaque fois jusqu'à une valeur de 1,5 cm se traduit par l'augmentation de la valeur du pourcentage de couvert nival. Pour un seuil ZN de 1,5 cm, cette dernière dépasse la valeur seuil de 5% pour laquelle le couvert nival pourrait être considéré négligeable et ce, dans 9 cas sur 12.

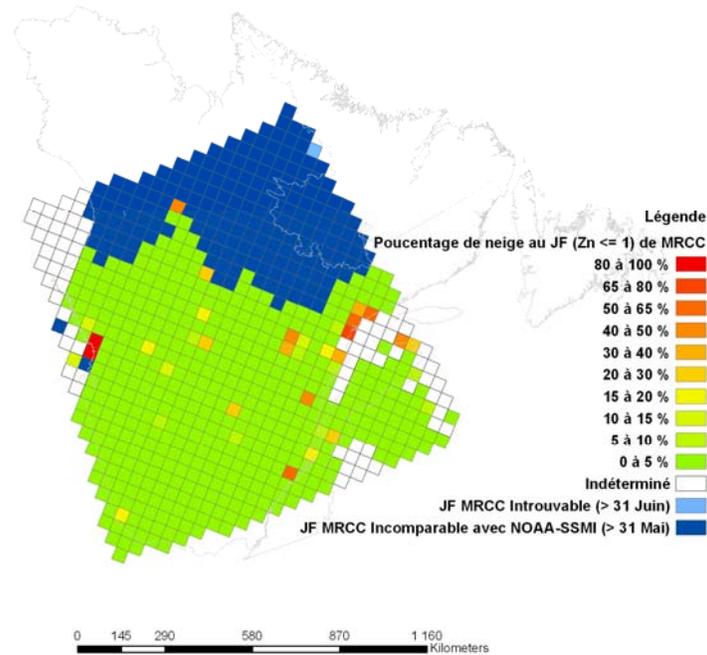


Figure 9- Répartition géographique du pourcentage de couvert nival, seuil à 1 cm, année 1988

Tableau 3 - Moyenne de pourcentage de couvert nival indiqué par la télédétection NOAA-SSMI pour chaque année, selon la variation du seuil ZN permettant de définir le dernier jour de fonte du modèle MRCC. Exprimé en pourcentage.

Année/ ZN	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
0.0 cm	2.0%	1.5%	0.5%	1.9%	3.2%	1.1%	6.0%	2.0%	1.3%	3.3%	0.1%	0.3%
0.5 cm	1.9%	3.3%	1.7%	6.5%	2.3%	1.8%	4.7%	3.8%	6.8%	7.6%	1.2%	3.2%
1.0 cm	2.3%	7.6%	3.7%	12.5 %	3.0%	3.9%	6.3%	5.8%	8.2%	9.0%	1.9%	4.4%
1.5 cm	3.9%	9.7%	5.9%	18.9 %	4.0%	7.2%	10.0 %	8.1%	10.1 %	9.86 %	2.8%	5.4%

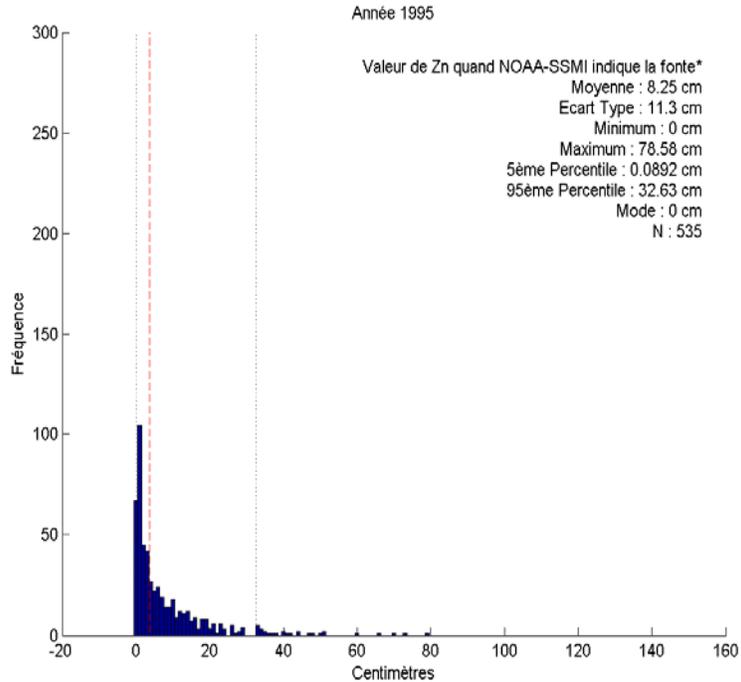


Figure 10 - Hauteur de neige selon MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI, année 1995

### 3.2.2. La hauteur de la neige

Dans cette section, nous avons procédé au cheminement inverse lequel consiste à étudier la hauteur de la neige (ZN) fournie par du modèle MRCC lorsque NOAA-SSMI annonce le dernier jour de fonte. Ceci revient à trouver ce dernier jour de fonte dans les données de NOAA-SSMI pour chacune des tuiles (correspondant à un pourcentage de couvert nival  $\leq 5\%$ ), et aller chercher la valeur du paramètre ZN pour ce même jour et cette même tuile dans les sorties du MRCC. La Figure 10 présente un exemple des résultats obtenus.

Pour 1995, il reste en moyenne plus de 8 cm de neige après que la période de fonte soit finie. L'écart type est de près de 11 cm et la distribution est asymétrique montrant bien que de façon

générale, il reste de la neige sur les tuiles d'après le MRCC au dernier jour de la fonte estimé à l'aide des données de référence NOAA-SSMI.

La représentation cartographique des résultats permet de constater que le MRCC a tendance à indiquer de fortes valeurs de ZN, au Sud du territoire (Figure 11). Ceci est particulièrement évident dans le cas des années où le MRCC produit de fortes valeurs de ZN à la date de la fin de la fonte indiquée par NOAA-SSMI tel 1991 (Figure 12).

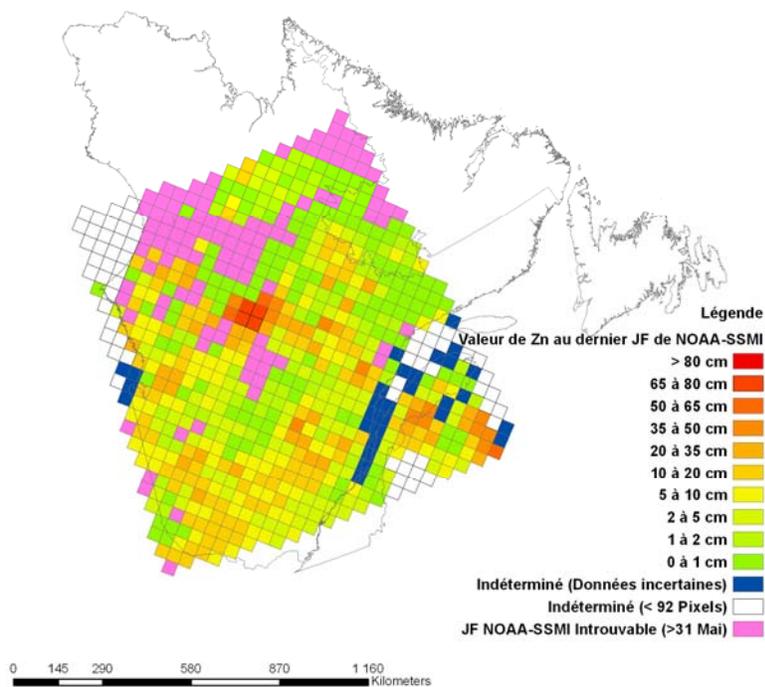


Figure 11- Hauteur de neige pour chaque tuile selon MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI, année 1995

De manière globale, le modèle aurait tendance à indiquer la présence de la neige encore après le dernier jour de fonte constaté réellement par NOAA-SSMI. Selon les années, la valeur moyenne de ZN varie entre 3,8 cm et 19,7 cm (Tableau 4). Ce résultat est en accord avec les résultats de la comparaison sur le pourcentage de neige par tuile lors du dernier jour de fonte indiqué par le

MRCC. Il confirme le constat selon lequel le MRCC a tendance à établir la fin de la fonte plus tard dans la saison qu'elle ne l'est réellement (en se basant sur les données historiques de référence NOAA-SSMI). De plus, il semblerait que ce biais soit plus important dans le secteur sud du territoire (Figure 12).

*Tableau 4 hauteur de neige moyenne (cm) estimée par le MRCC au du dernier jour de fonte indiqué par NOAA-SSMI.*

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
ZN moyen (cm)	4	5	10	20	8	7	6	8	11	16	20	9
$\sigma$ ZN (cm)	9	7	13	21	14	13	14	11	15	17	22	12

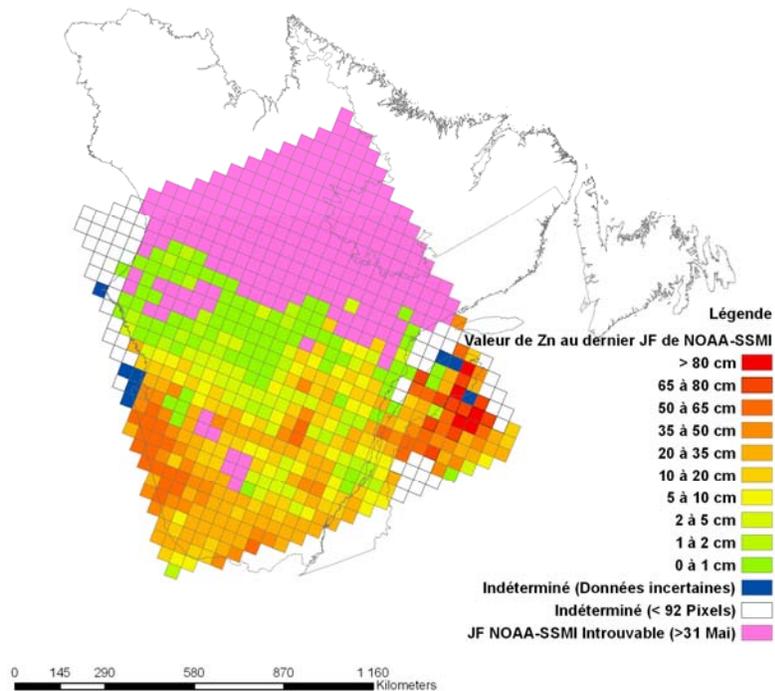


Figure 12- Hauteur de neige pour chaque tuile estimée par le MRCC au du dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI, année 1991

### 3.3 Écarts entre les dates de la fin de la fonte

Afin de bien vérifier si le MRCC surestime ou sous-estime le dernier jour de la fonte de la neige, nous avons procédé à une analyse des écarts entre les dates de la fin de la fonte telles qu'indiquées par NOAA-SSMI et le MRCC.

Les tuiles pour lesquelles le dernier jour de fonte n'a pas pu être déterminé ont été écartées du calcul (dans les données NOAA-SSMI, les tuiles n'incluant pas assez de pixels ou pour lesquelles le jour de fonte intervient après le 31 mai; dans le cas des données du MRCC, les tuiles pour lesquelles le jour de fonte intervient après le 30 juin).

L'écart a été calculé en soustrayant le dernier jour de la fonte selon NOAA-SSMI (correspondant à un pourcentage du couvert nival  $\leq 5\%$ ) du dernier jour de la fonte selon le MRCC (ZN  $\leq$  à la valeur seuil, celle-ci a été initialement fixée à 0 cm), soit : JF MRCC – JF NOAA-SSMI.

La Figure 13 présente un exemple de résultats portant sur l'année 1995. Pour cette année, la valeur moyenne des écarts est de l'ordre de +19 jours, ce qui signifie que le MRCC établit la fin de la fonte 19 jours en moyenne plus tard qu'elle ne l'est vraiment (selon NOAA-SSMI). Également, 90% des 535 tuiles incluses dans le calcul affichent un écart compris entre +3 jours et +31 jours. La répartition des valeurs suit une distribution uni-modale, ce qui n'est pas le cas pour toutes les années de l'étude. À titre d'exemple, la distribution des écarts calculés pour l'année 1988 affiche une forme bimodale indiquant l'existence de deux groupes de tuiles : un ensemble centré sur un écart d'environ 0 jour et un autre centré autour d'une valeur de +20 jours (Figure 14). Pour l'année 1998, l'écart moyen a été de +11 jours et 90% des 517 tuiles affichaient des écarts variant de -11 jours à +30 jours.

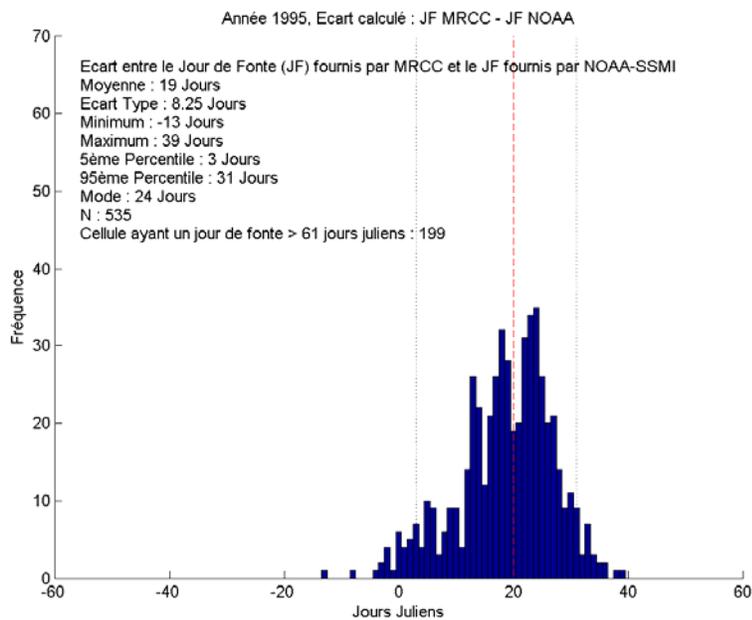


Figure 13- Écart entre le dernier jour de la fonte estimé par MRCC, avec un seuil ZN = 0 cm, et celui de NOAA-SSMI, année 1995

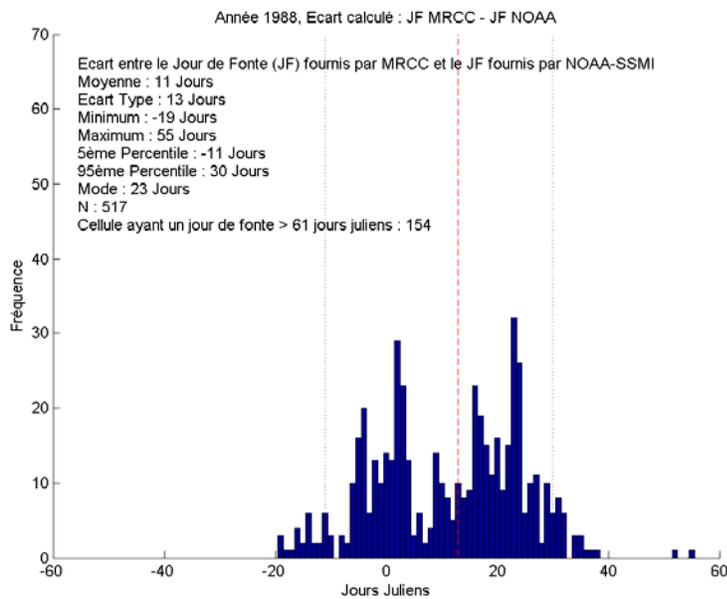


Figure 14 - Écart entre le dernier jour de la fonte selon le MRCC, avec un seuil ZN = 0 cm, et celui de NOAA-SSMI, année 1988

L'examen de la répartition spatiale des résultats de l'année 1988 montre bien l'existence d'une structure spatiale des deux groupes identifiés dans la Figure 14. En effet, le groupe ayant une valeur moyenne de l'écart d'environ 0 jour est situé dans la partie sud du territoire. Tandis que, le groupe ayant un écart centré sur +20 jours se trouve localisé dans la partie plus au nord, correspondant à la zone de transition entre la région couverte encore de neige et le secteur sud complètement sans neige. Il semblerait que le MRCC ait tendance à surestimer la présence de neige et continue de maintenir une faible couche de neige, quelques centimètres, au-dessus de ces tuiles, plusieurs jours après la fin effective de la fonte. Il serait alors intéressant de vérifier cette hypothèse et mesurer l'effet de l'augmentation de la valeur seuil de ZN sur le calcul des écarts.

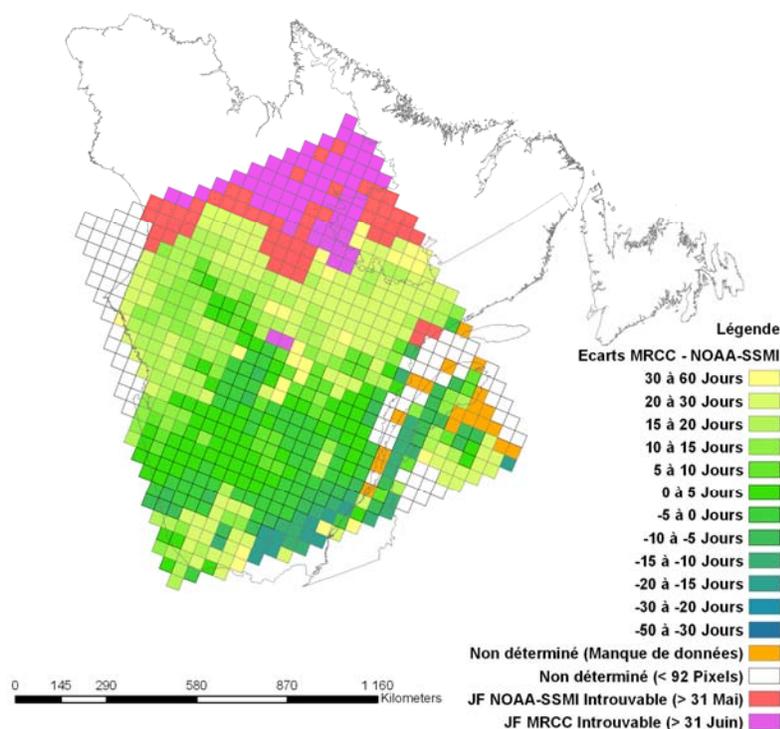


Figure 15 – Écarts entre le dernier jour de la fonte de MRCC, avec un seuil ZN= 0 cm, et celui de NOAA-SSMI, année 1988

Pour l'année 1988, l'emploi d'un seuil minimal de ZN de 1 cm au lieu de 0 cm, pour la détermination de la date de la fin de la fonte selon le MRCC, se traduit par un changement notable dans l'histogramme des écarts calculés (Figure 16). Les écarts présentent désormais une distribution uni-modale plus symétrique avec une translation de la valeur moyenne vers 1,3 jour au lieu 11 jours et une légère réduction de la variance (l'écart entre le 5<sup>ème</sup> et le 95<sup>ème</sup> percentile passe de 41 à 39 jours). Ce changement est également perceptible au niveau de la répartition spatiale des écarts (Figure 17). En effet, la différence entre le nord et le sud est moins marquée. Ceci signifie que l'emploi d'une valeur seuil de  $ZN \geq 0$  cm serait plus adéquate pour une meilleure détection du dernier jour de la fonte dans les sorties du MRCC. Une telle valeur permettrait de minimiser l'écart entre les dates estimées par le MRCC et les données de référence fournies par NOAA-SSMI.

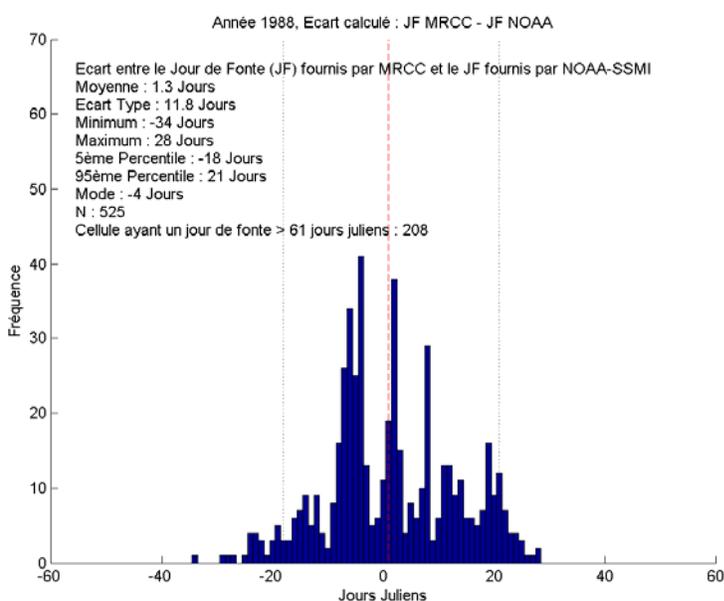


Figure 16– Écart entre le dernier jour de la fonte selon le MRCC, avec un seuil  $ZN = 1$  cm, et celui de NOAA-SSMI, année 1988

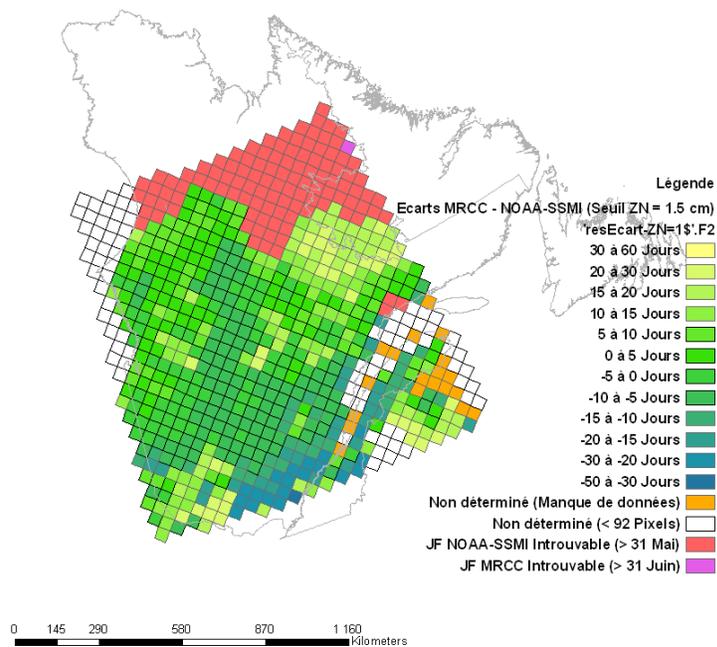


Figure 17- Écarts entre le dernier jour de la fonte selon le MRCC, avec un seuil ZN= 1 cm, et celui de NOAA-SSMI, année 1988

Cette analyse est valable pour toutes les années de l'étude. En effet, si on augmente graduellement le seuil ZN (entre 0 cm et 1,5 cm) pour la détermination du dernier jour de la fonte selon MRCC, nous pouvons constater que les écarts entre le modèle MRCC et les données de télédétection se réduisent (

Tableau 5). Pour les deux années extrêmes 1990 et 1998, les écarts moyens passent de 20 et 23 jours, pour ZN=0 cm, à 6,7 et 13 jours, respectivement.

Dans ce sens, nous avons tenté de déterminer par interpolation/extrapolation, à partir des valeurs du Tableau 5, la valeur optimale du seuil de ZN pour chaque année. Celle-ci correspond à la valeur de ZN pour laquelle la valeur moyenne des écarts s'annule. Les résultats figurent au Tableau 5. Il s'avère que cette valeur varie d'une année à une autre et peut atteindre les 3,5 cm (la moyenne est autour de 2 cm). Ainsi, quand les valeurs de ZN estimées par le MRCC passent

en deçà des ces valeurs seuil, il est possible de considérer qu'il ne reste plus de neige dans la tuile. Toutefois, on est en droit de se demander pourquoi il y a cette disparité entre les années? Y a-t-il un lien avec le régime de neige de l'année en question? Aussi, existe-t-il une valeur seuil pour chaque tuile? Autrement, y a-t-il une structure spatiale dans les valeurs seuil?

*Tableau 5 – Seuil optimal de ZN pour le calcul du dernier jour de la fonte selon le MRCC, permettant de minimiser l'écart avec le dernier jour de fonte déterminé par NOAA-SSMI*

Année	Seuil ZN optimal (cm)
1988	1.26
1989	1.58
1990	2.16
1991	2.5
1992	1.34
1993	1.22
1994	0.88
1995	2
1996	2.21
1997	2.7
1998	3.5
1999	1.9

*Tableau 6- Ecart moyen (en jours) entre le dernier jour de fonte selon le MRCC et le dernier jour de fonte trouvé par NOAA-SSMI, en fonction du seuil de ZN*

Année /Zn	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
0	11	14	20	16	13	13	7	19	15	18	24	15
0.5	4.3	6.5	12	10	5.2	5.2	1.3	11	8.4	12	18	8.5
1	1.3	3.6	9	8.2	2.1	1.3	-1.4	7.8	6.1	9.4	15	5.5
1.5	-0.8	1.9	6.7	6.7	-0.27	-1.7	-3.2	5.6	4.1	7.7	13	3.5

## 4 Conclusions

---

La comparaison entre les données sur la fin de la fonte de la neige établies par le MRCC pour la période 1988-1999 et celles fournies par la cartographie historique de la neige effectuée à l'aide des données NOAA et SSMI (considérées comme données de référence) nous permet de dresser les constats suivants :

1. La courbe de fonte de la neige établie par le MRCC est fortement corrélée avec les données de référence ce qui indique que le MRCC reproduit bien l'évolution temporelle du couvert nival pendant la période de la fonte;
2. La variation journalière de la hauteur de la neige estimée par le MRCC est insensible à la variation journalière de l'étendue du couvert nival observée à l'intérieur des tuiles de calcul de MRCC (grâce à la cartographie NOAA-SSMI). En effet, les vitesses relatives de fonte dans les deux types de données sont complètement décorrélées (la courbe de fonte de MRCC est beaucoup plus lisse que celle de NOAA-SSMI);
3. L'analyse du pourcentage de couverture de la neige à l'intérieur des tuiles de calcul correspondant aux dates de disparition de la neige selon le MRCC ( $ZN=0$  cm) a permis d'établir que ce dernier déclare la fin période de la fonte plus tard que ne l'est réellement;
4. Le constat précédent a été confirmé en analysant la hauteur de la neige calculée par le MRCC aux dates correspondant à la fin de la fonte selon les données NOAA-SSMI (l'étendue du couvert nival à l'intérieur des tuiles  $\leq 5\%$ ). En effet, la hauteur moyenne de la neige pour ces dates varie entre 4 et 20 cm, selon les années;

5. L'étude des écarts des dates de la fin de la fonte révèle que le MRCC déclare en moyenne celle-ci, de 7 à 23 jours plus tard que la date réelle déterminée à l'aide des données NOAA-SSMI. Ceci est obtenu avec un seuil sur ZN de 0 cm.
6. Le fait d'augmenter la valeur du seuil sur ZN, le fixer à 1 cm par exemple, se traduit par une réduction des écarts moyens qui passent dans ce cas à des valeurs variant entre -1,5 et 15 jours. Le seuil minimal sur ZN retenu par le MRCC pour déclarer la disparition de la neige devrait donc être supérieur à 0 cm;
7. L'essai de différentes valeurs seuil a permis d'estimer par extrapolation et pour chaque année une valeur seuil optimale permettant d'obtenir des écarts moyens nuls. Les valeurs obtenues varient de 1 cm à 3.5 cm, selon les années.

## 5 Références

---

- Bitner D., Carroll T., Cline D., Romanov P. 2002. An assessment of the differences between three satellite snow cover mapping techniques. *Hydrological Processes* **16**: 3723-3733.
- Caya D., Laprise R. 1999. A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review* **127**(3): 341-362.
- Chokmani K., Bernier M., Beaulieu V., Philippin M., Slivitzky M. 2004. Suivi spatio-temporel du couvert nival à l'aide des données NOAA-AVHRR. Québec, Canada, Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement: 73.
- Chokmani K., Bernier M., Gauthier Y. 2006. Suivi spatio-temporel du couvert nival du Québec à l'aide des données NOAA-AVHRR. *Revue des Sciences de l'Eau* **19**(3): 163-179.
- Chokmani K., Bernier M., Pâquet L. M., Goïta K., Roy A., Comtois-Boutet F., Turcotte M., Zhang Y., Forcier L.-C. 2007. Développement d'algorithmes pour le suivi par satellite de la couverture de neige au sol à l'échelle du bassin versant. Québec, Canada, Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement: 73.
- Chokmani K., Bernier M., Slivitzky M. 2005. Validation of a method for snow cover extent monitoring over Quebec (Canada) using NOAA-AVHRR data. *EARSeL eProceedings* **4**(1): 106-118.
- Cordisco E., Prigent C., Aires F. 2003. Sensivity of satellite observations to snow characteristics. *IEEE IGARSS '03*, Toulouse, France.
- Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. **2003**.

- Koskinen J., Metsamaki S., J. G., Janne S., Matikainen L., Hallikainen M. 1999. Snow monitoring using radar and optical satellite data. *Remote Sensing of Environment* **69**: 16-29.
- Langlois A. 2003. Étude de la variation spatio-temporelle du couvert nival par télédétection micro-ondes passives et validation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). *Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL)*. Sherbrooke, Canada, Université de Sherbrooke.
- Langlois A., Royer A., Fillol E., Frigon A., Laprise R. 2004. Evaluation of the snow cover variation in the Canadian regional climate model over eastern Canada using passive microwave satellite data. *Hydrological Processes* **18**: 1127-1138.
- Music B., Caya D. 2007. Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology* **8**(5): 969-988.
- Ramsay B. H. 1998. The interactive multisensor snow and ice mapping system. *Hydrological Processes* **12**: 1537-1546.
- Romanov P., Gutman G., Csisar I. 2000. Automated monitoring of snow cover over North America with multispectral satellite data. *Journal of Applied Meteorology* **39**: 1866-1880.
- Simic A., Fernandes R., Brown R., Romanov P., Park W. 2004. Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES+SSM/I snow cover products over Canada based on surface snow depth observations. *Hydrological Processes* **18**: 1089-1104.
- Tait A., Barton J. S., Hall D. K. 2001. A prototype MODIS-SSM/I snow-mapping algorithm. *International Journal of Remote Sensing* **22**(17): 3275-3284.
- Uppala S. M. & al. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **131**: 2961-3012.

Verseghy D. L. 1991. CLASS - A Canadian Land Surface Scheme for GCMS. I. Soil Model. *International Journal of Climatology* **11**: 111-113.

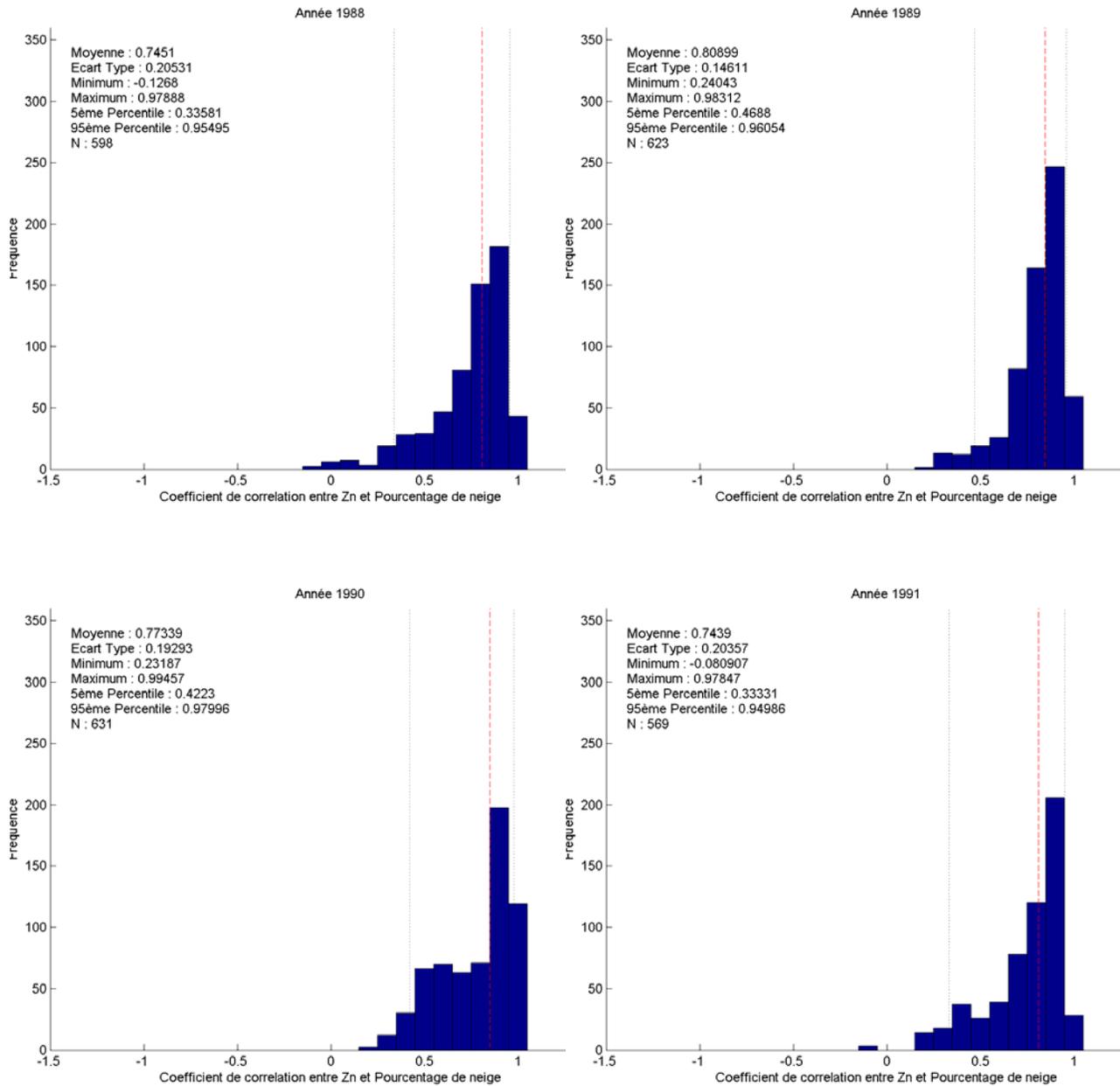
Verseghy D. L., McFarlane N. A., Lazare M. 1993. A Canadian Land Surface Scheme for GCMS:II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology* **13**: 347-370.

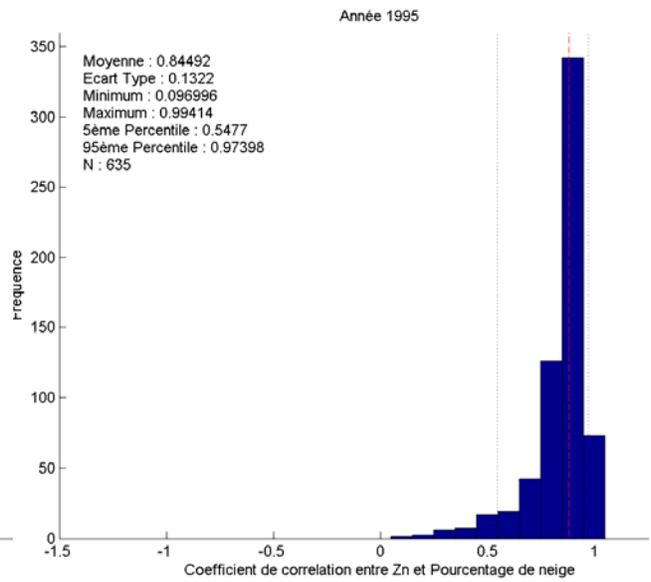
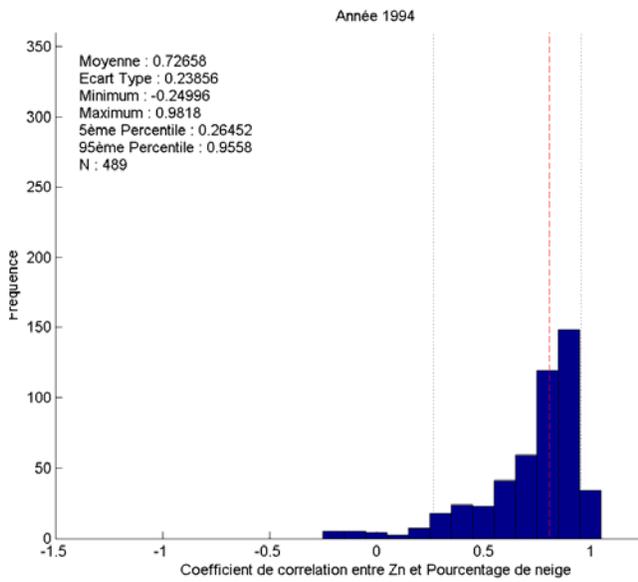
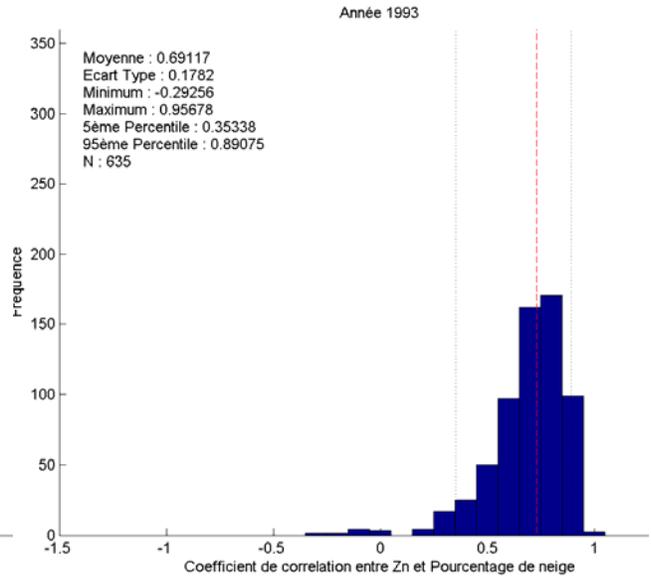
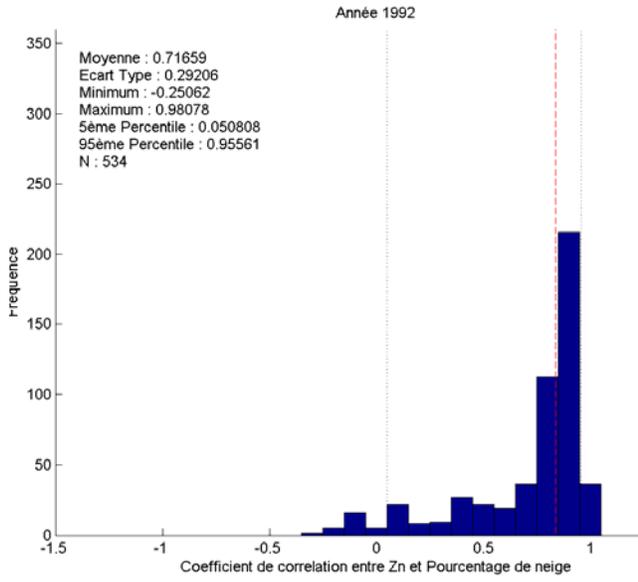


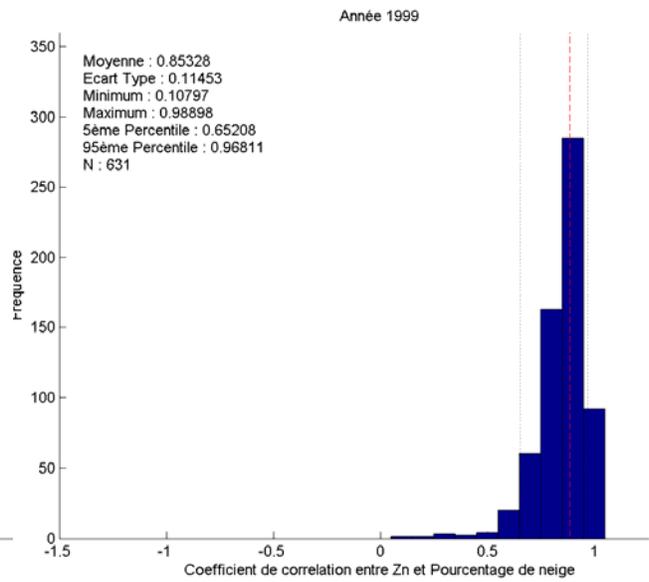
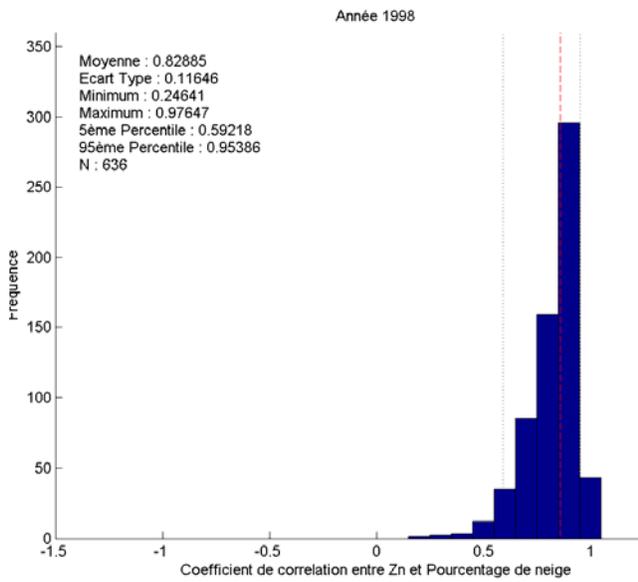
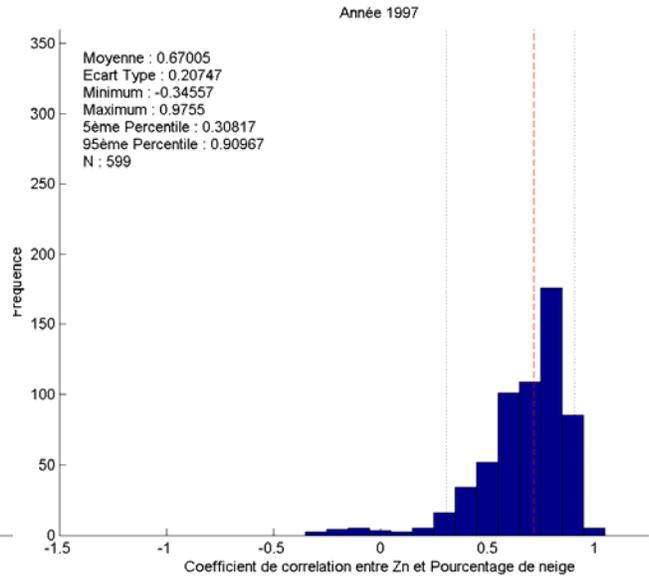
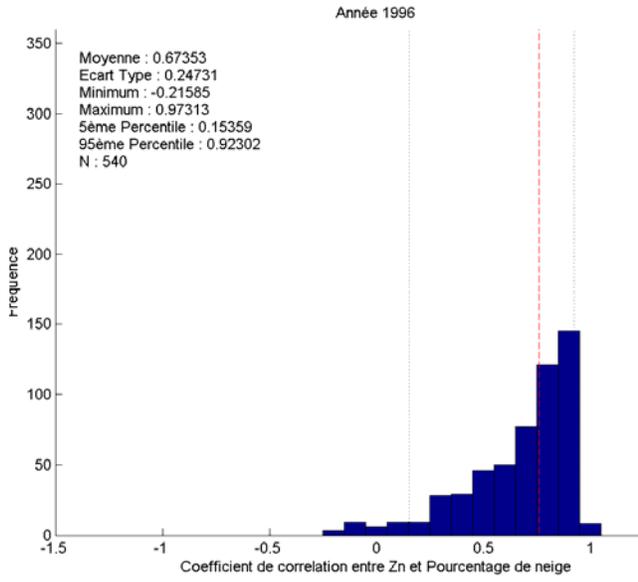
# Annexes



## Annexe 1 : Coefficient de corrélation entre la hauteur de neige estimée par MRCC et le pourcentage de couvert nival observé par NOAA-SSMI

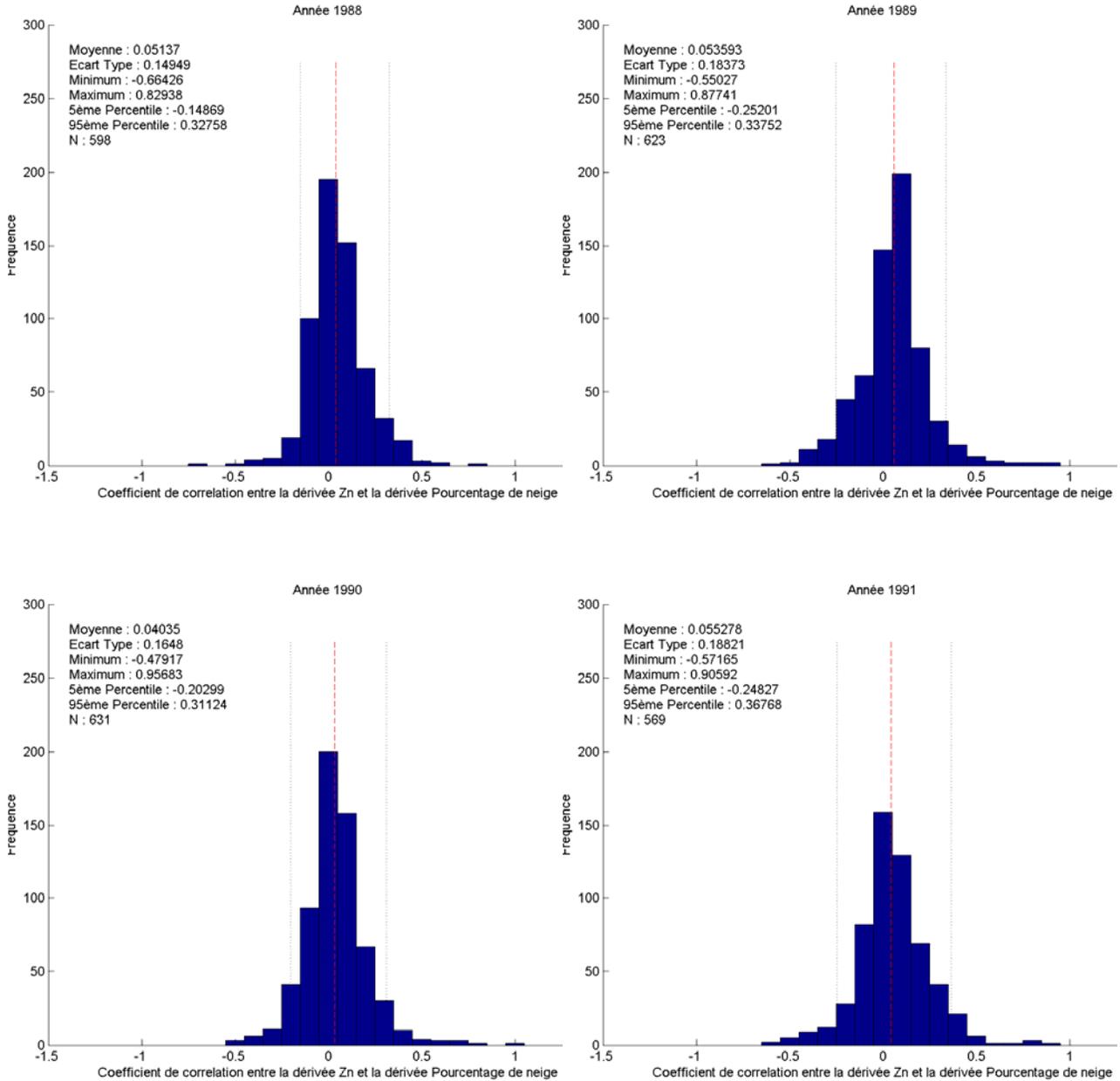


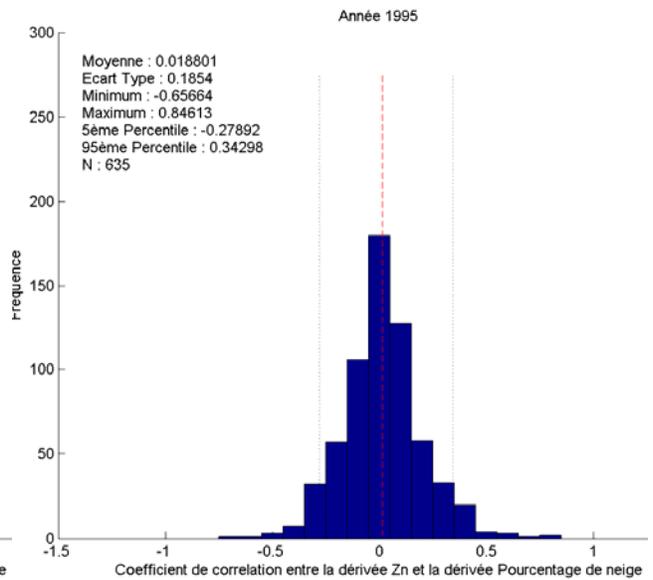
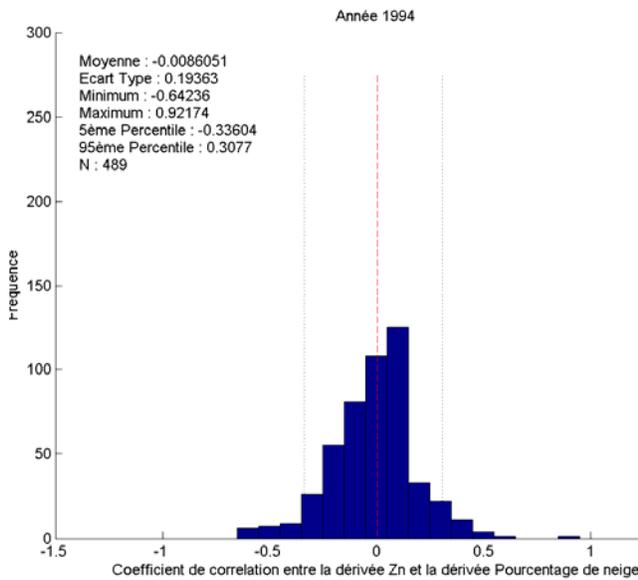
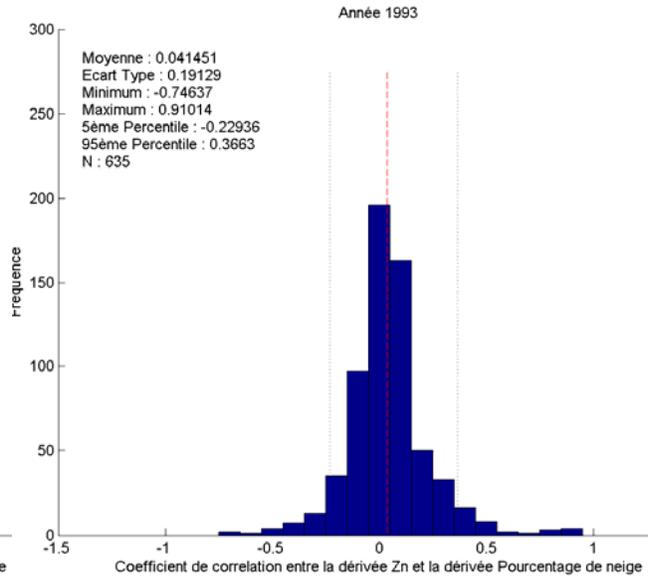
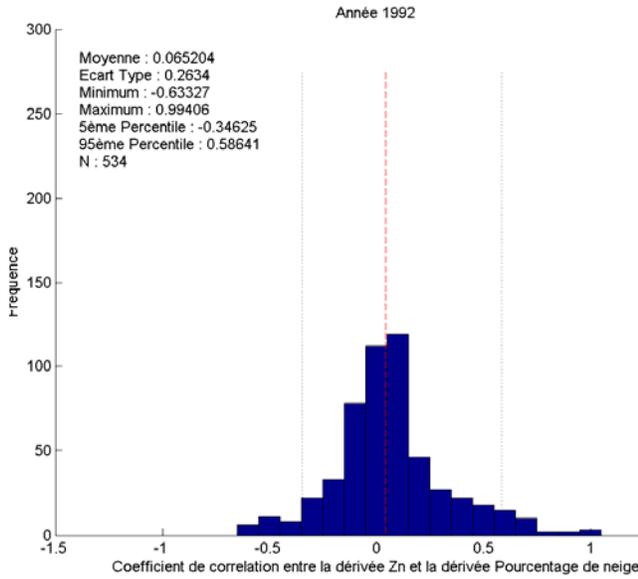


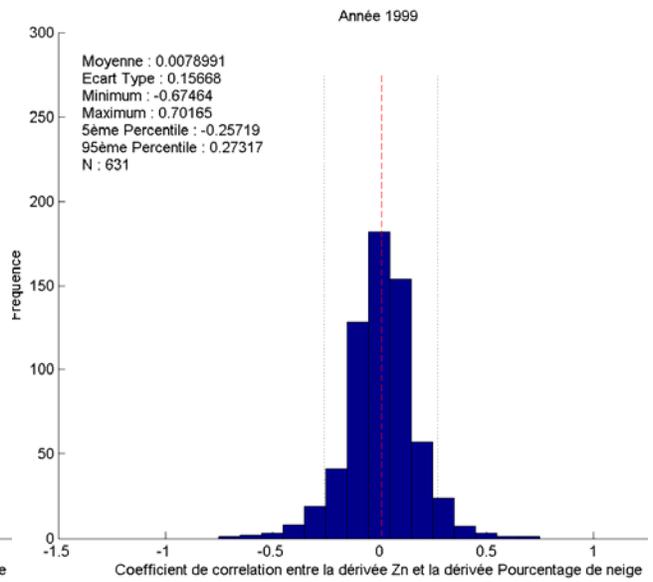
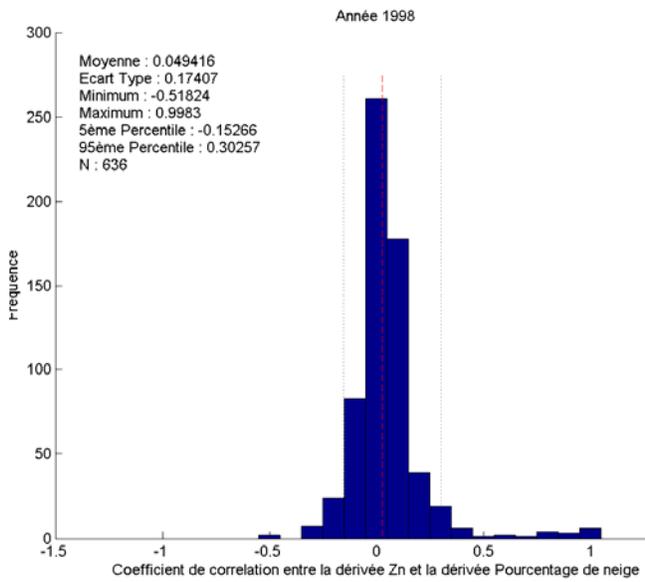
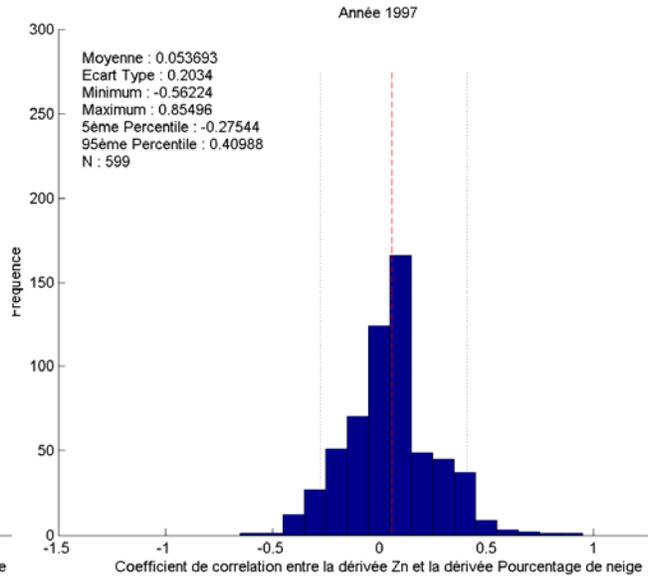
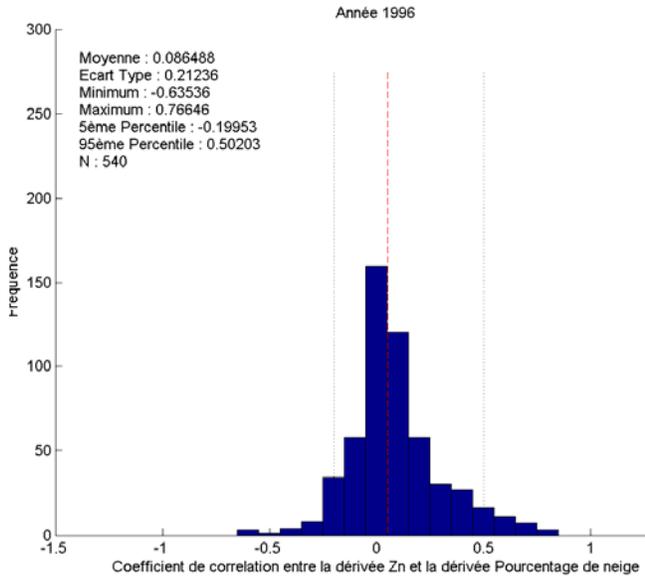




## Annexe 2 : Corrélation entre la vitesse relative de fonte selon le MRCC et la vitesse relative de fonte selon NOAA-SSMI

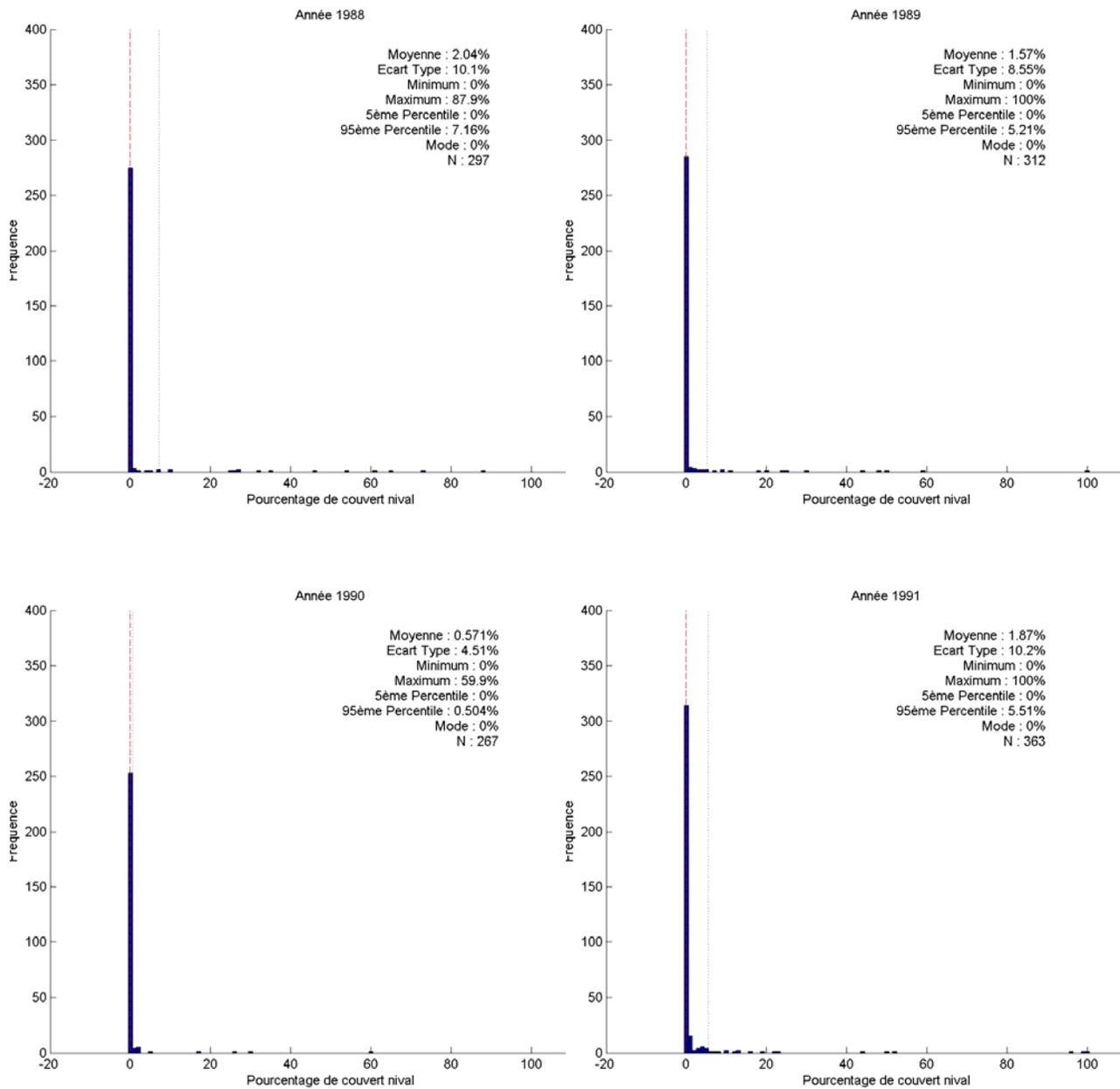


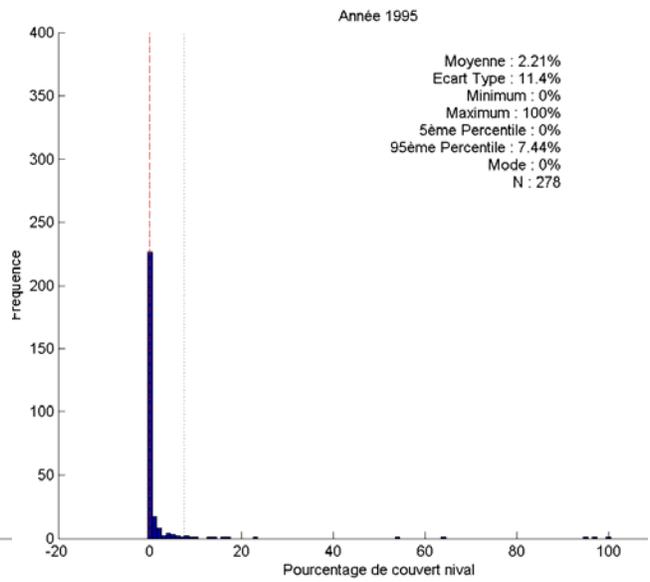
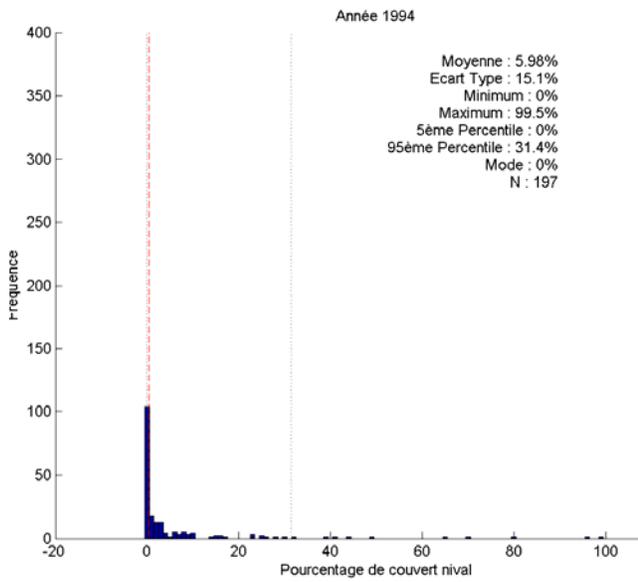
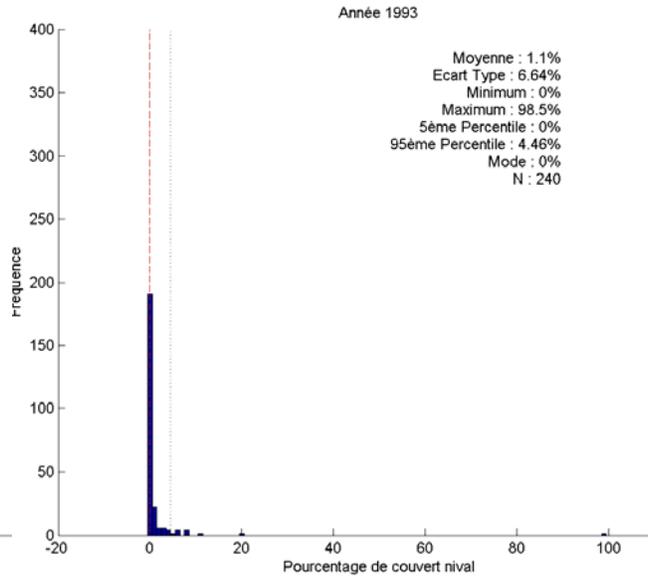
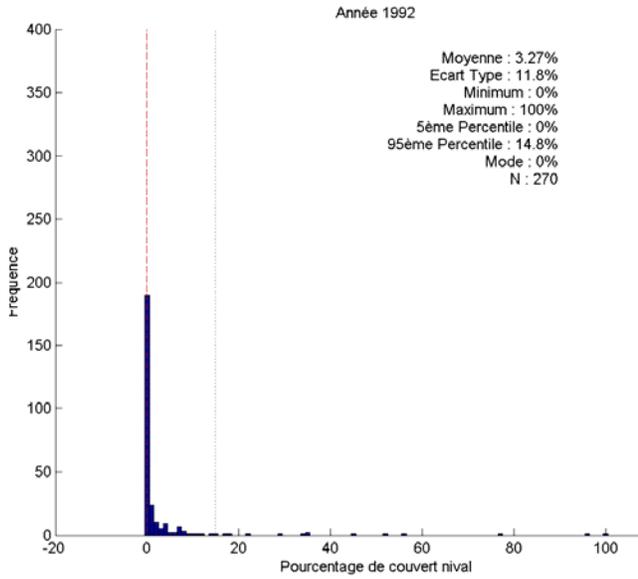


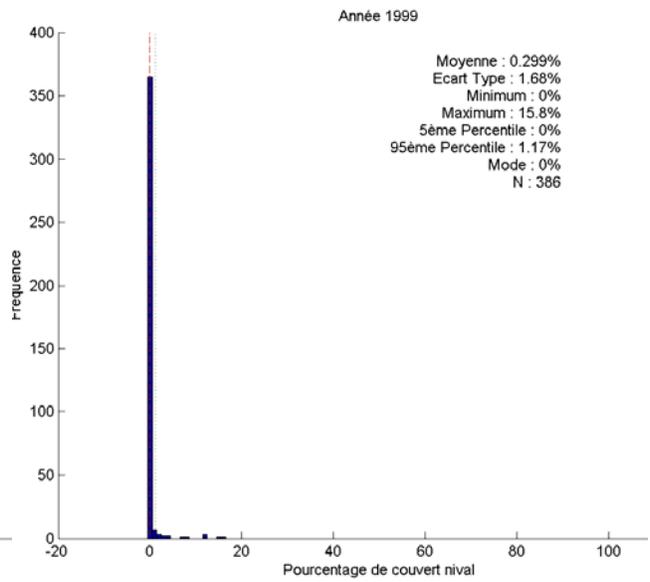
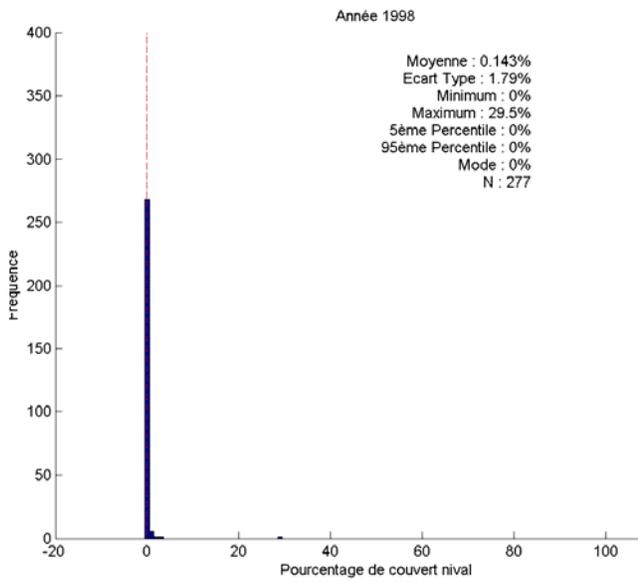
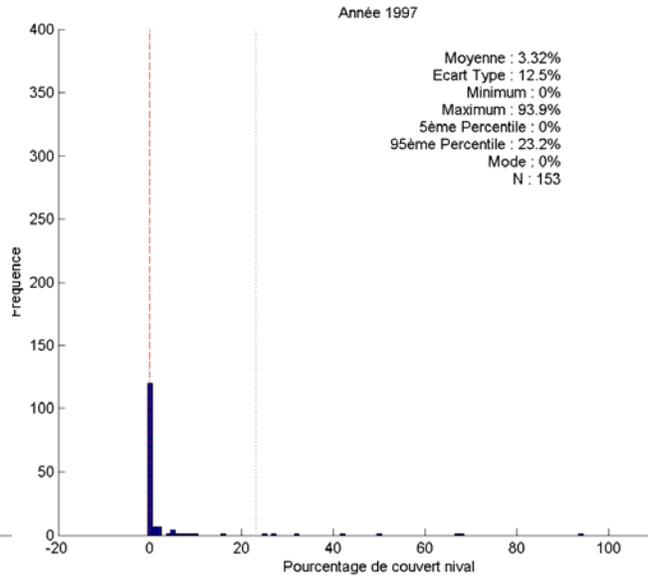
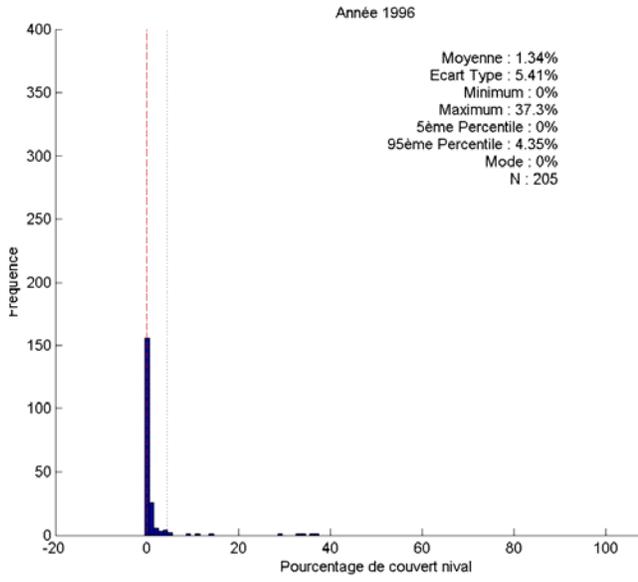




## Annexe 3 : Histogrammes du pourcentage du couvert nival

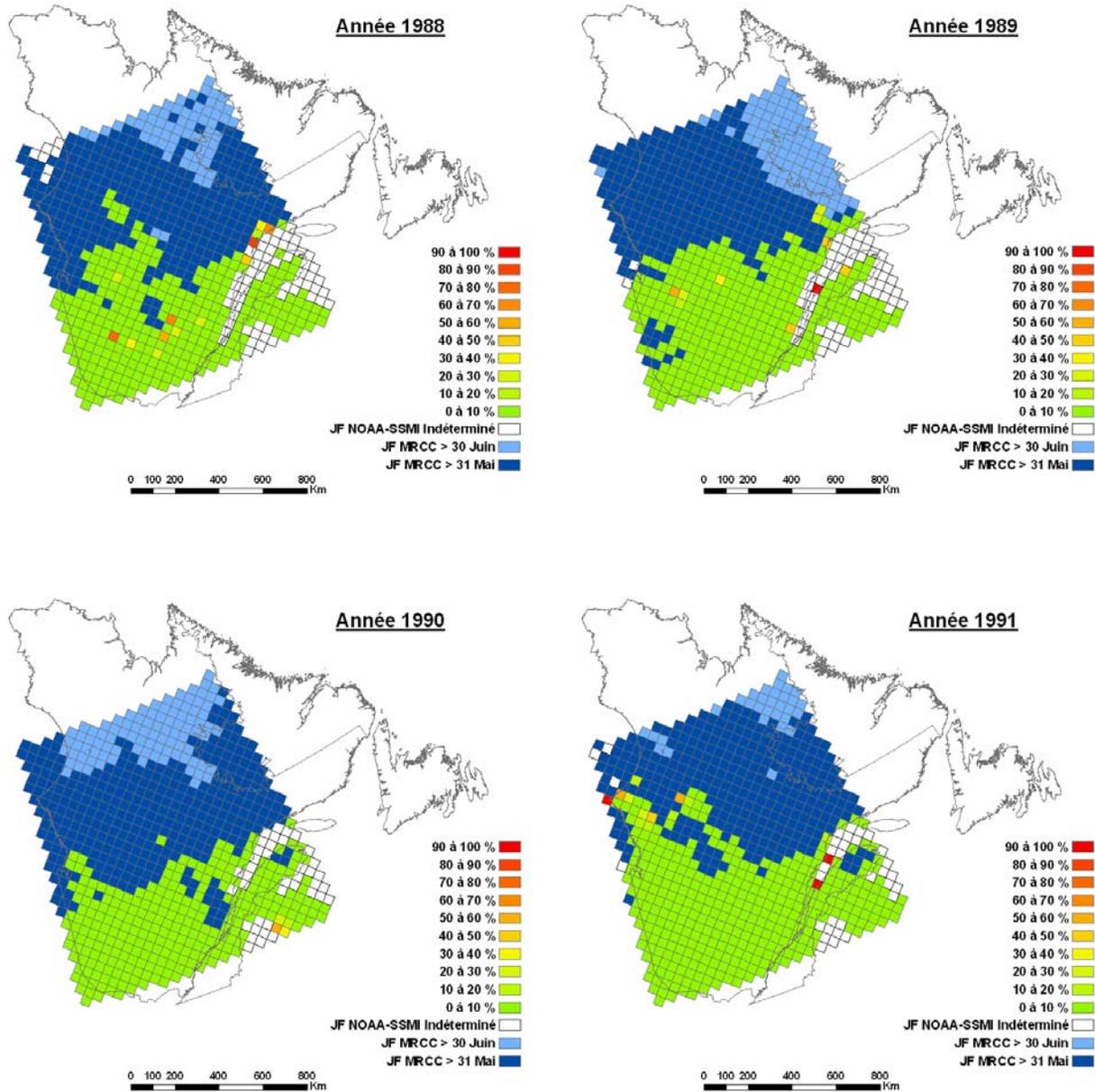


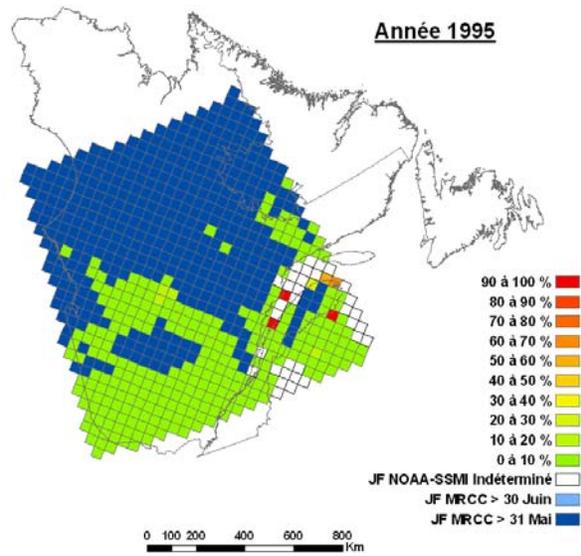
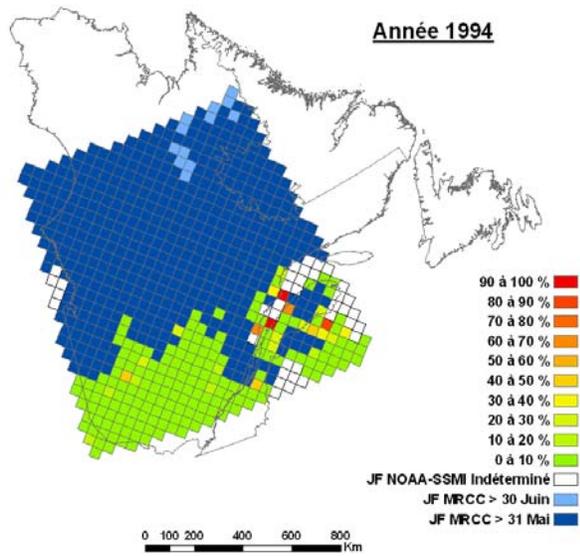
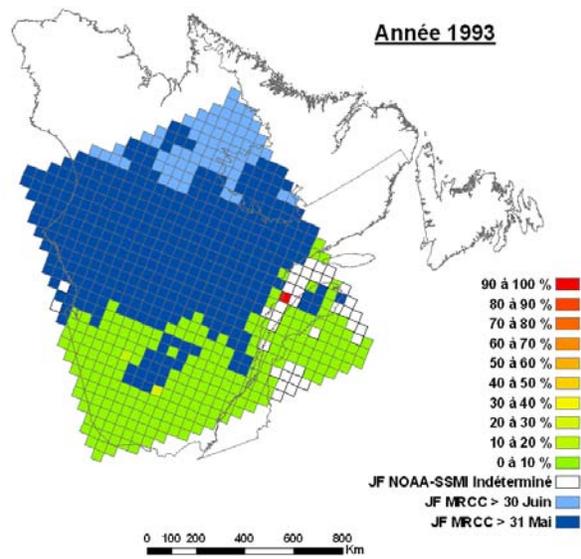
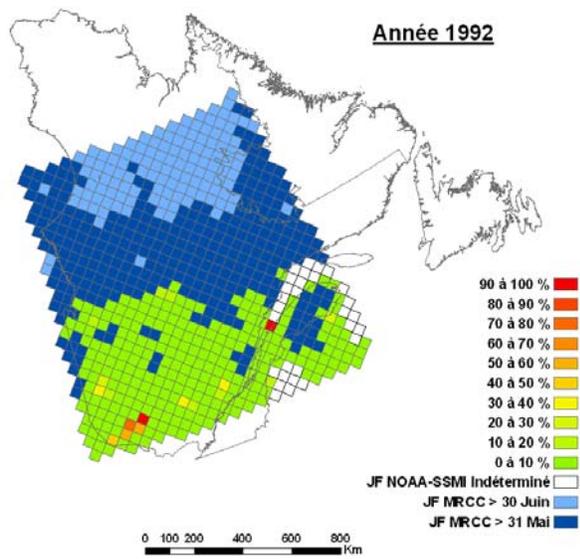


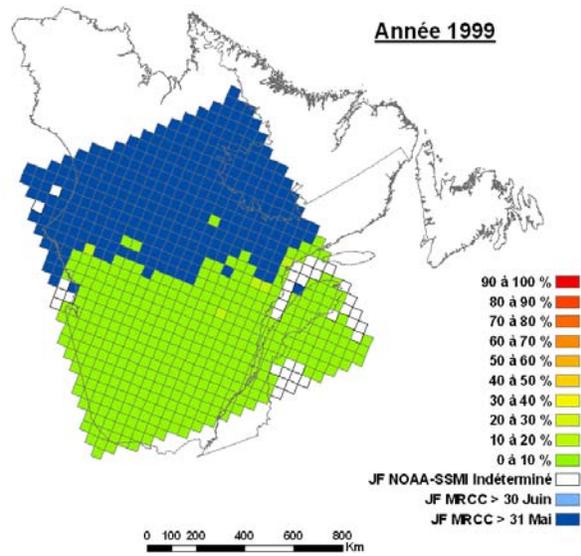
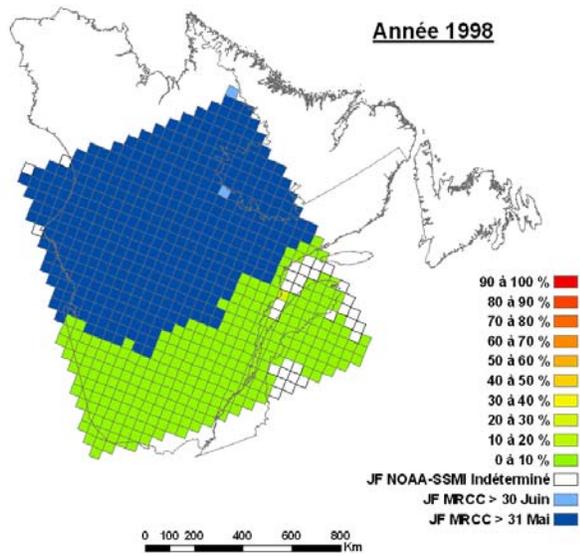
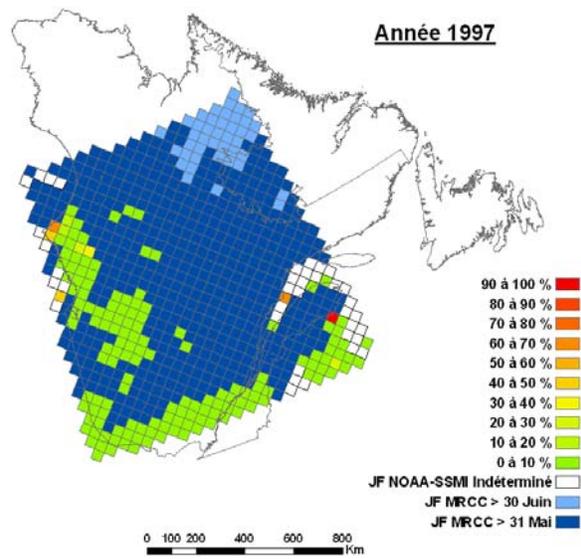
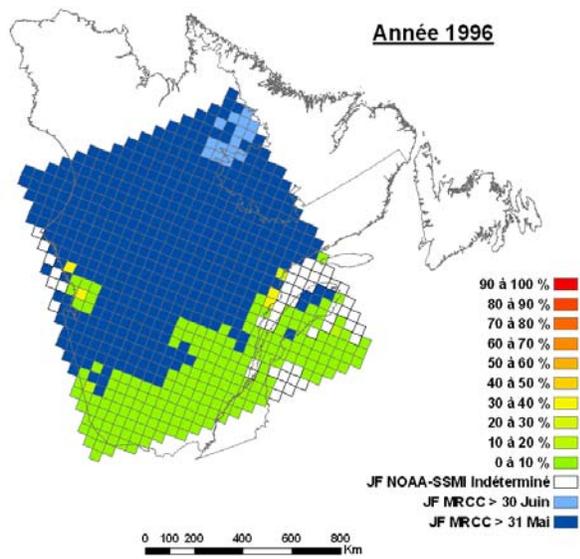




## Annexe 4 : Répartition géographique du pourcentage de couvert nival

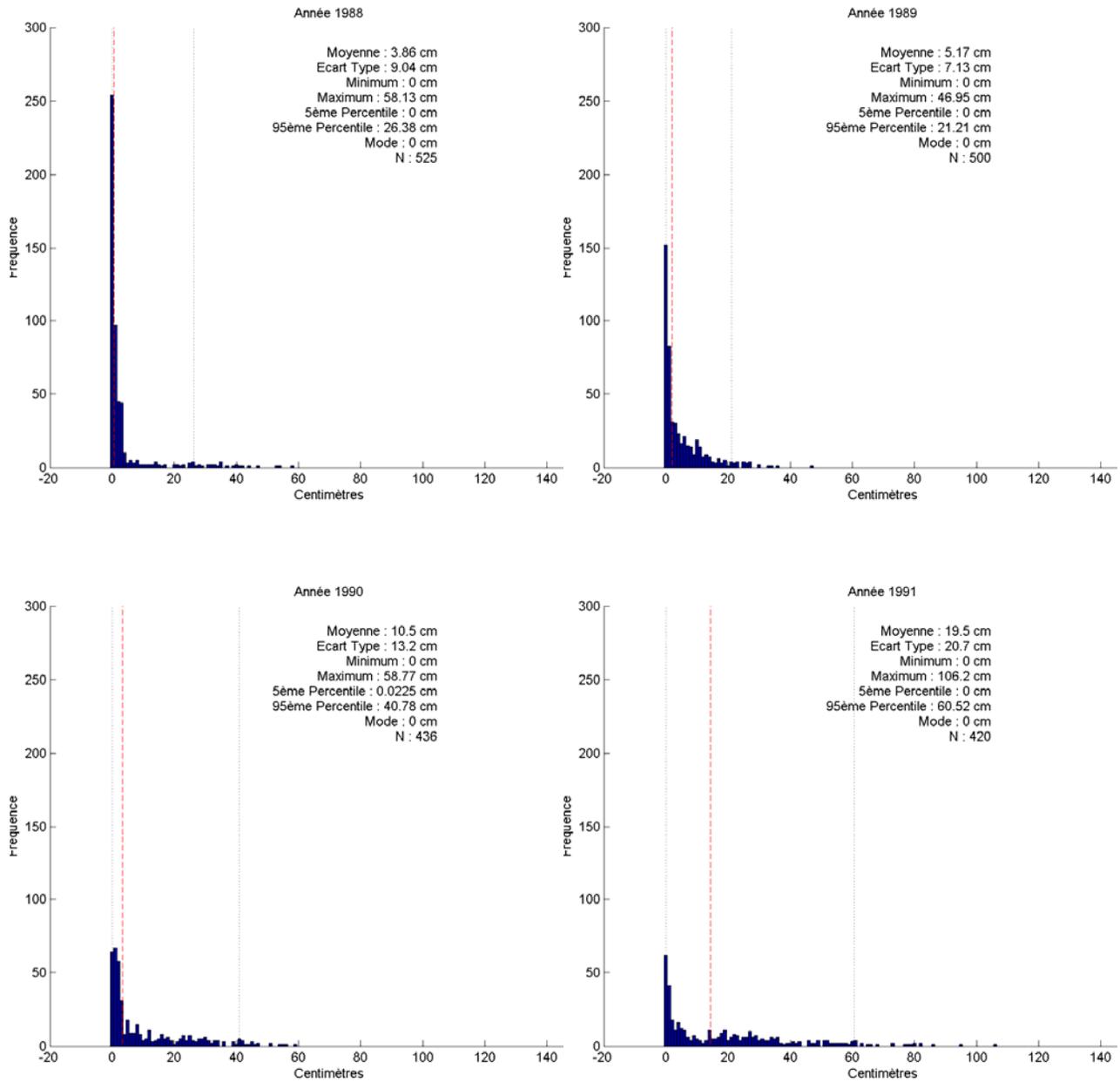


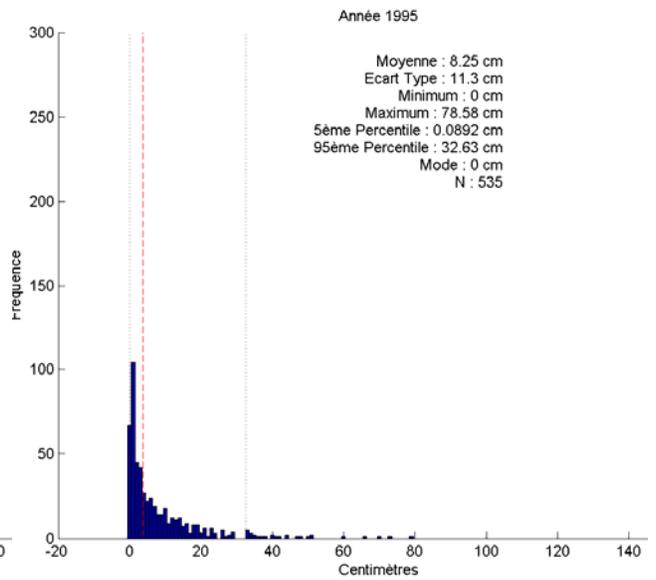
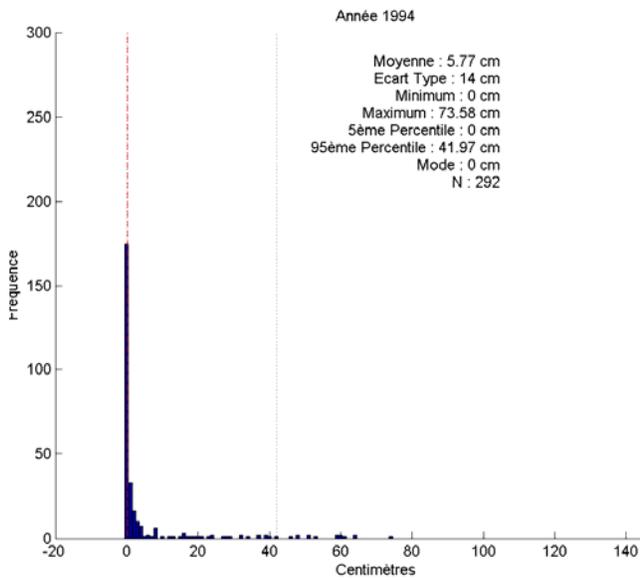
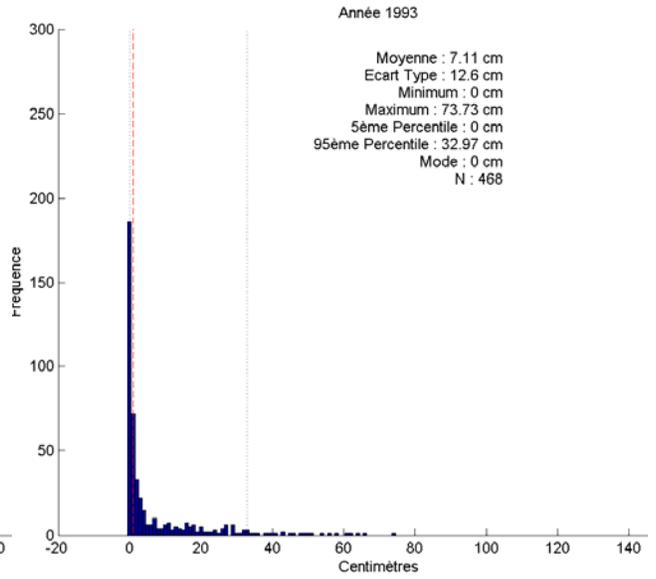
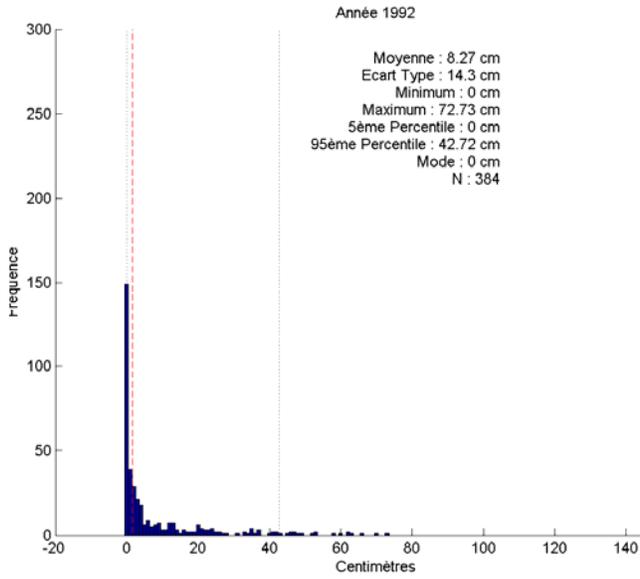


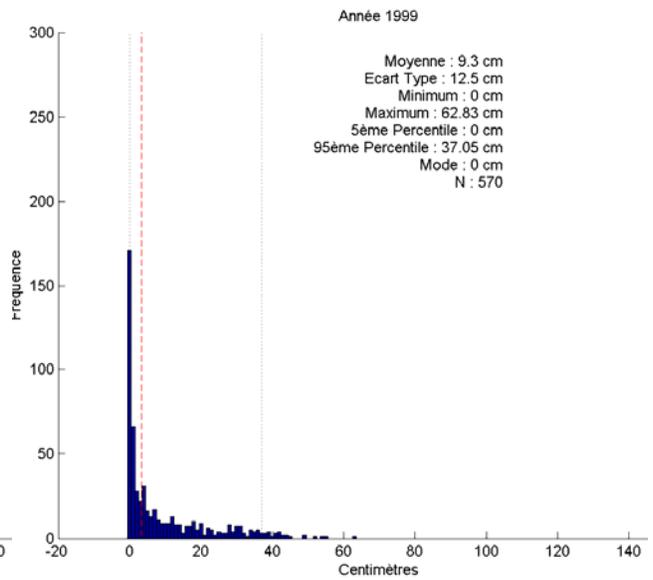
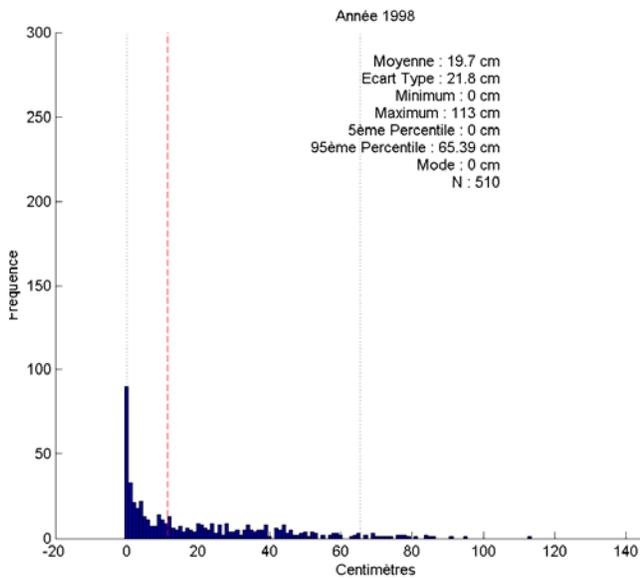
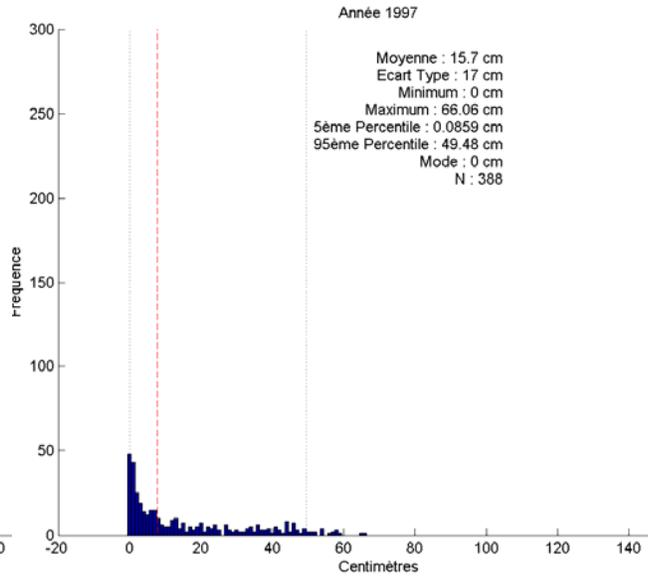
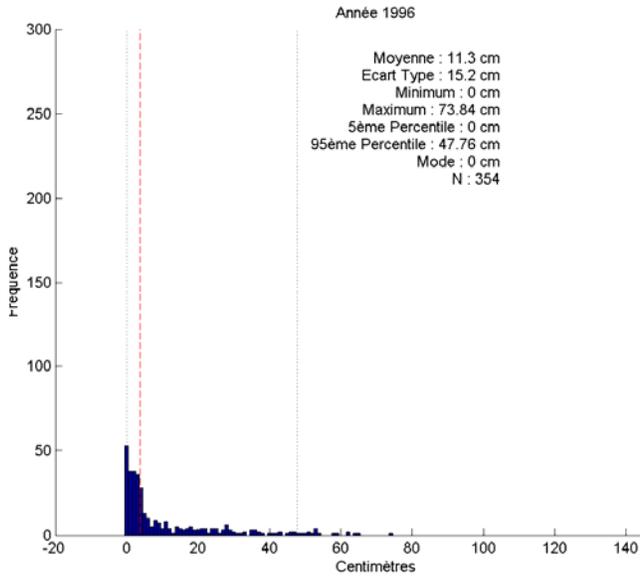




## Annexe 5 : Hauteur de neige selon le MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI

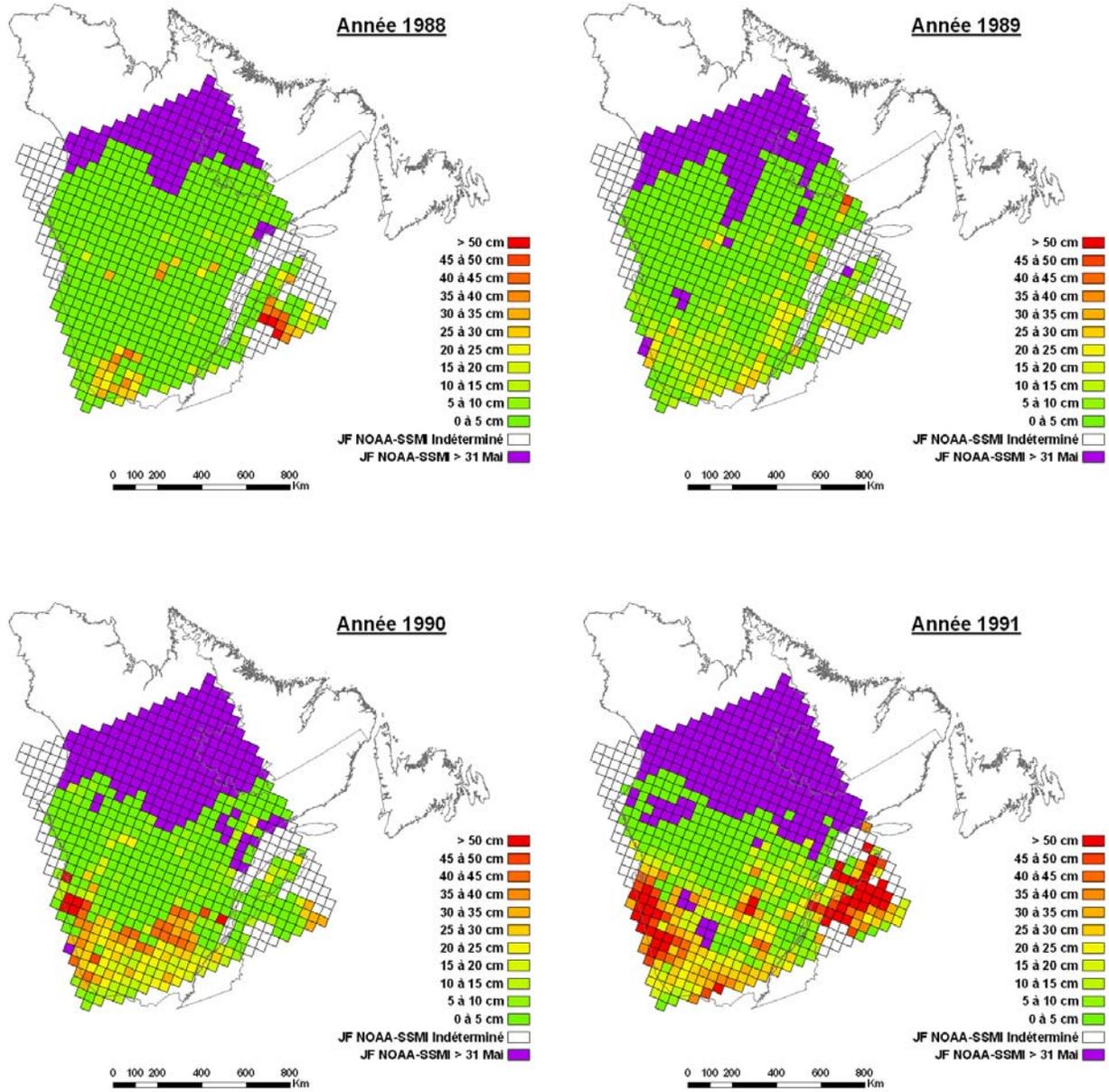


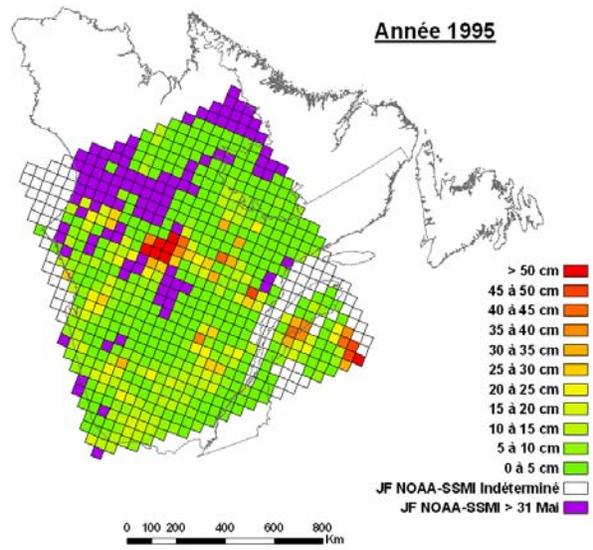
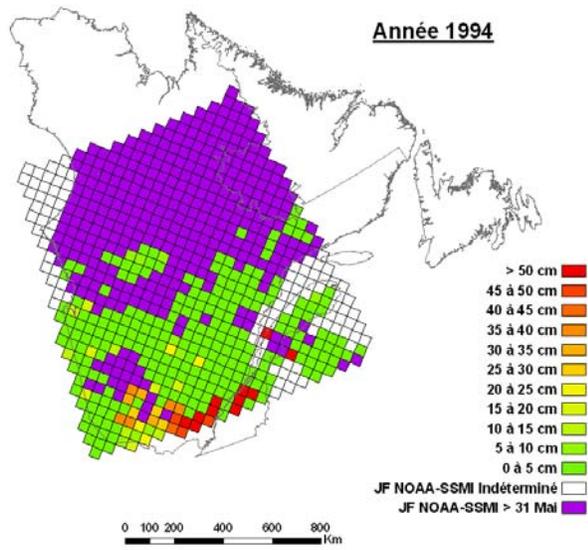
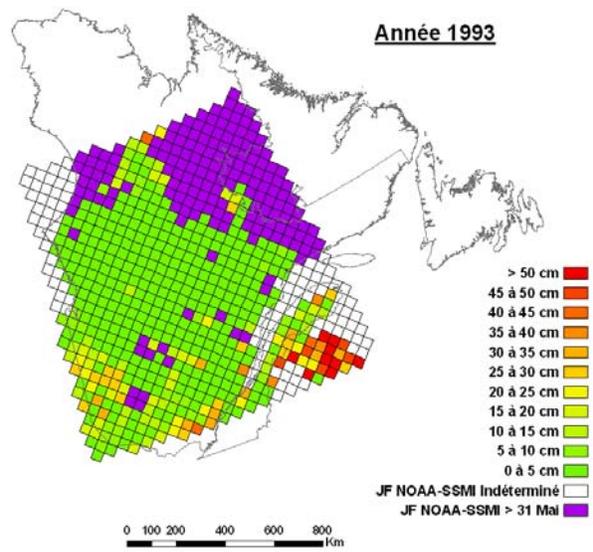
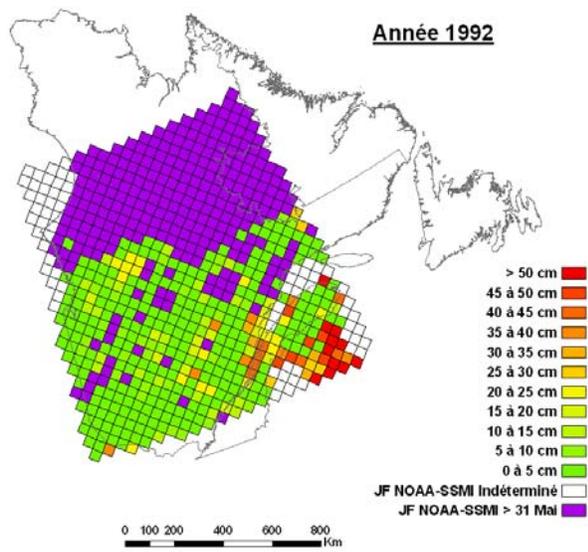


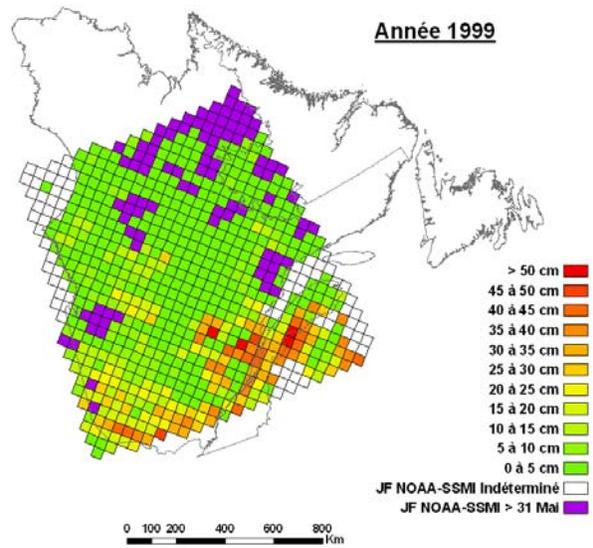
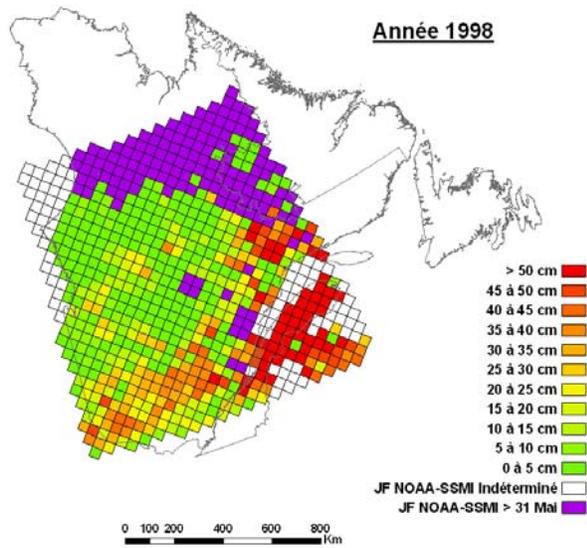
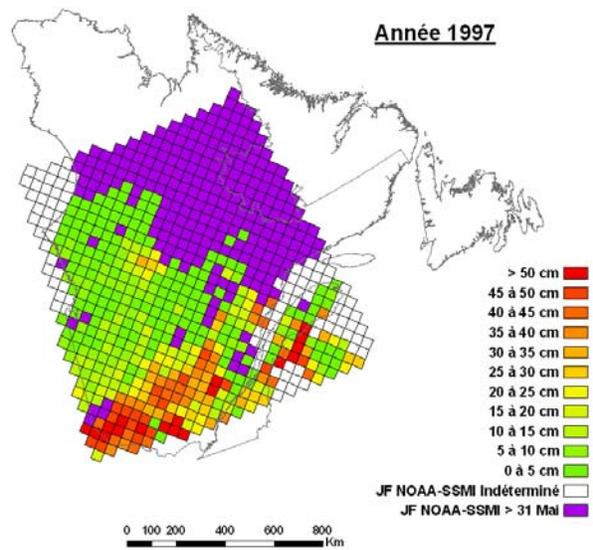
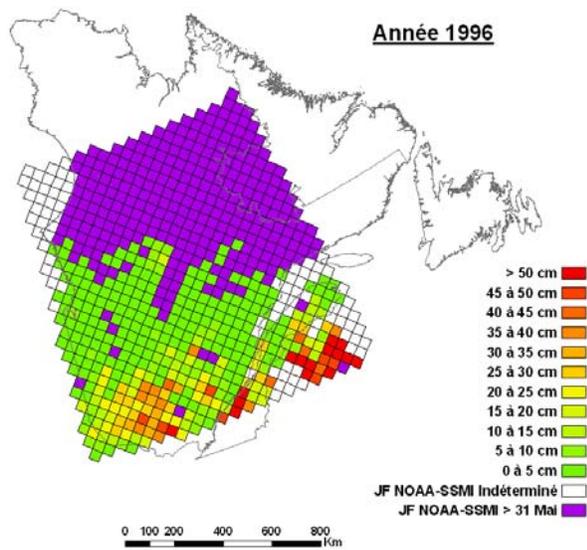




## Annexe 6 : Cartes de la hauteur de neige pour chaque tuile selon le MRCC correspondant au dernier jour de la fonte indiqué par NOAA-SSMI

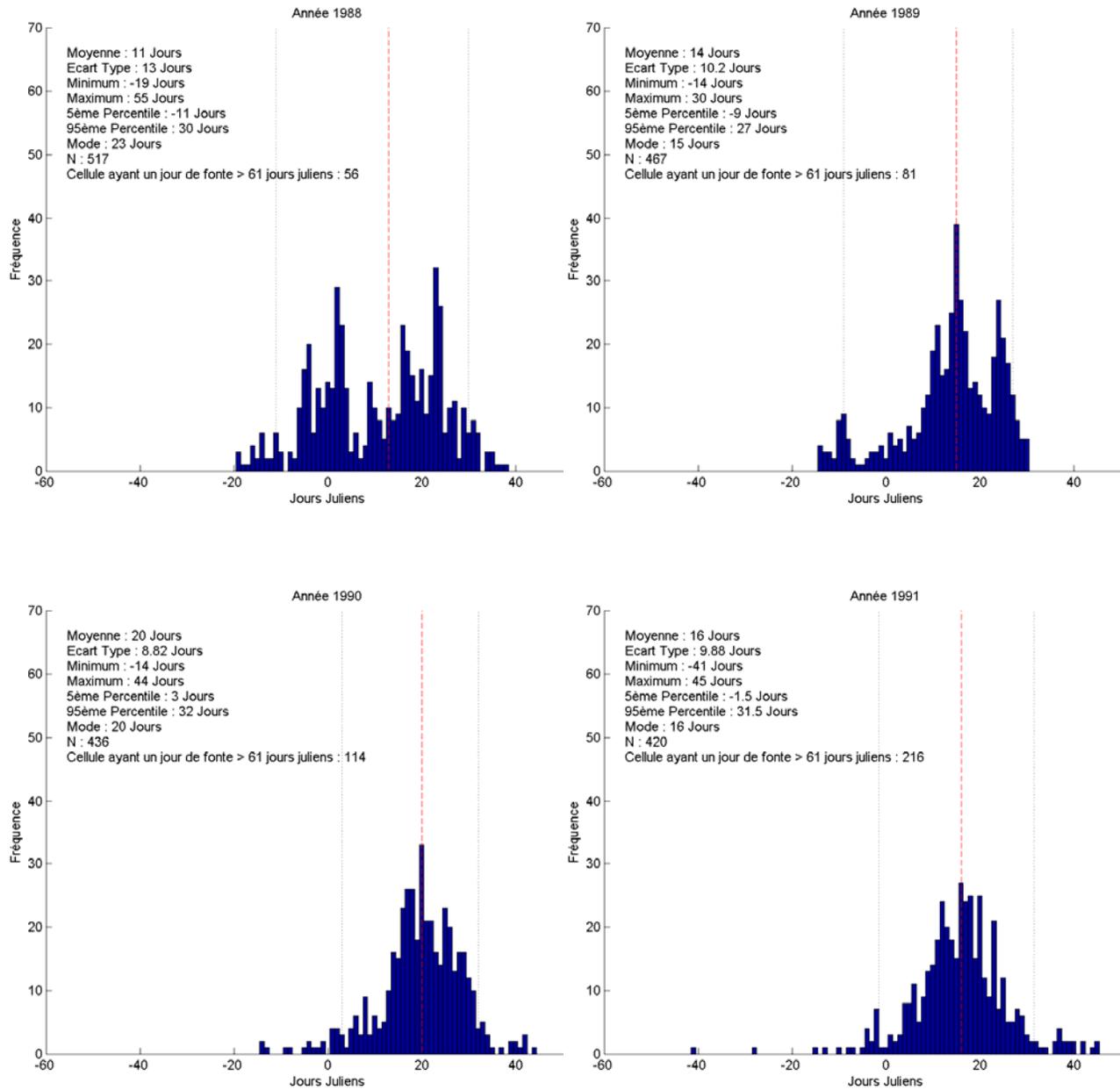


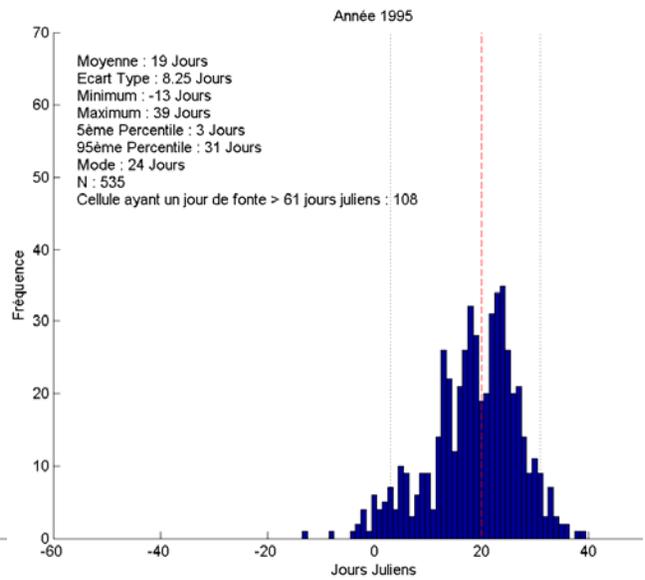
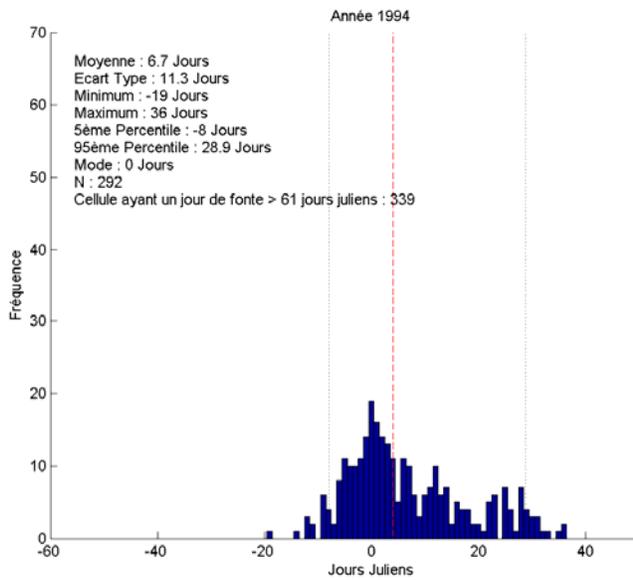
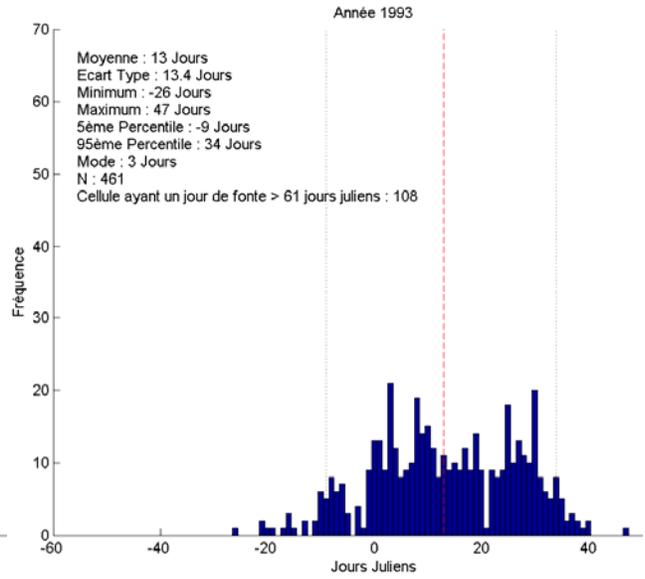
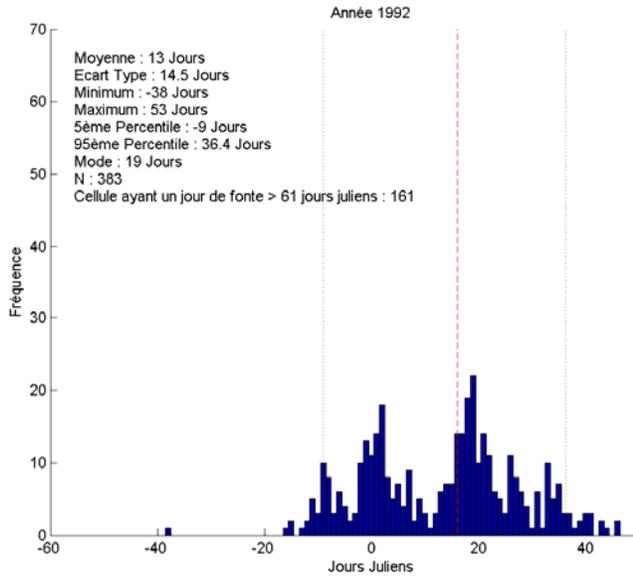


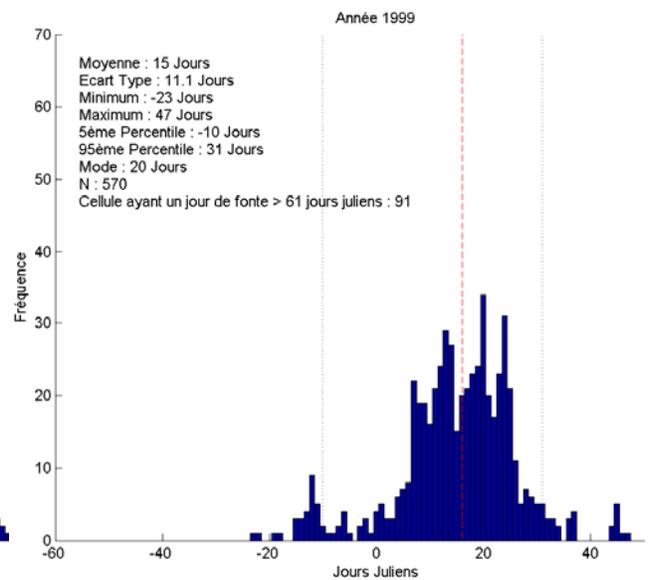
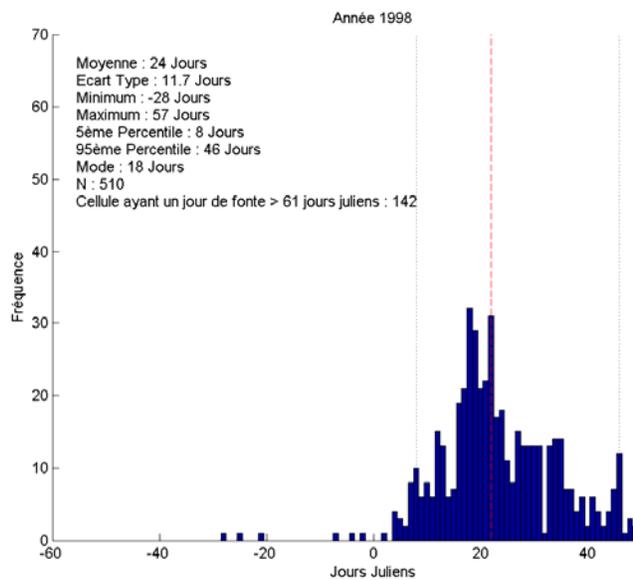
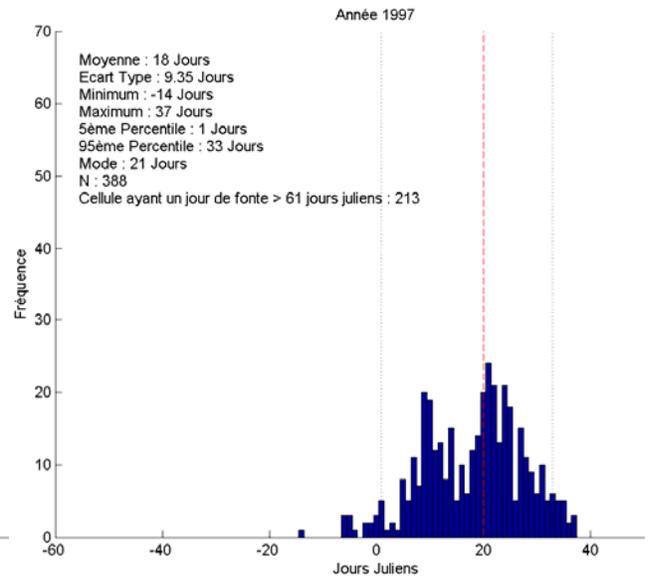
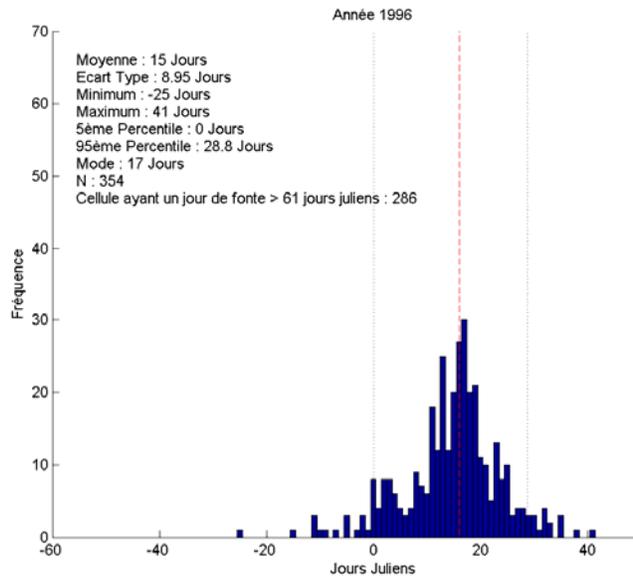




## Annexe 7 : Écart entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN = 0 cm, et celui de NOAA-SSMI

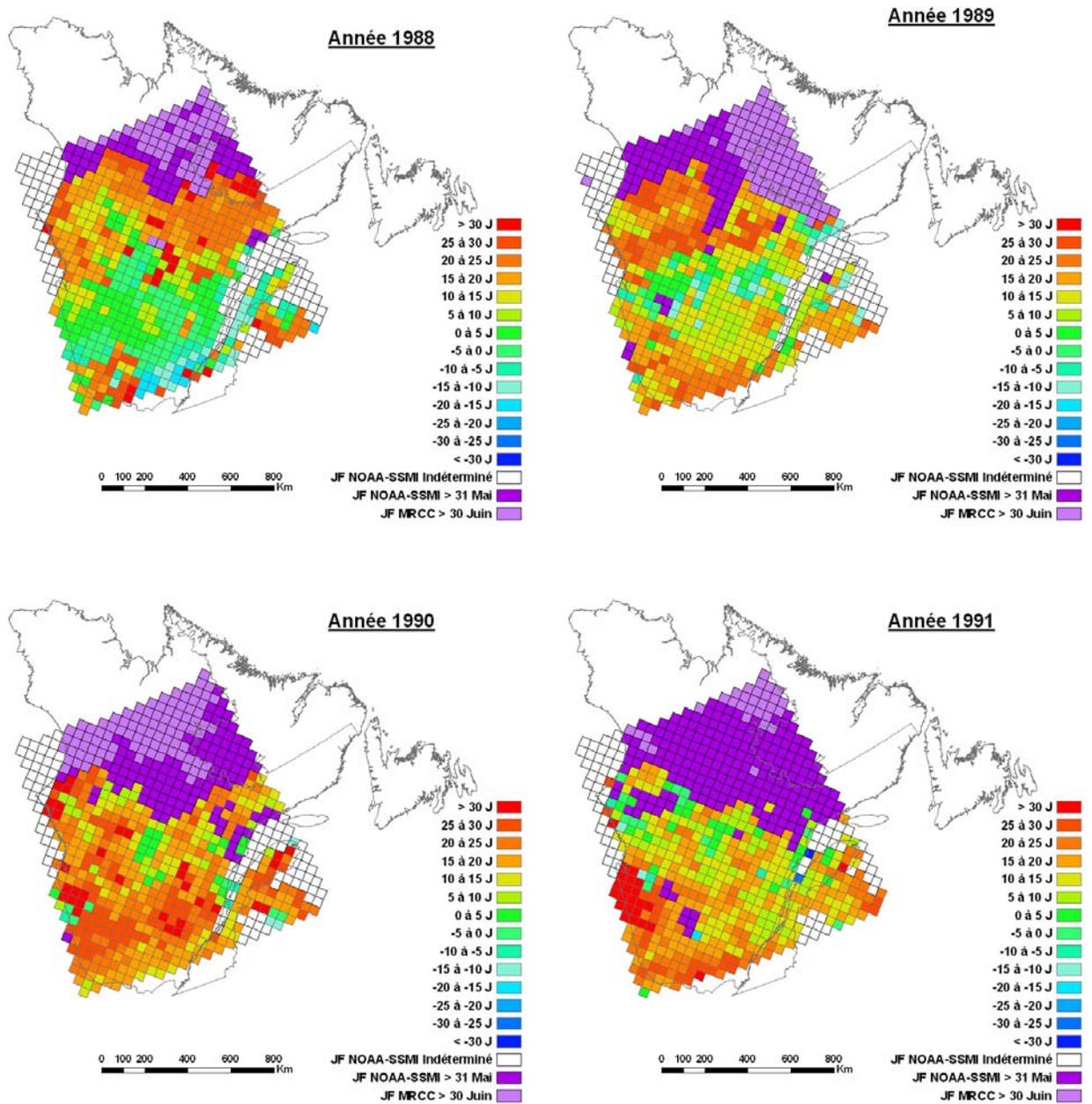


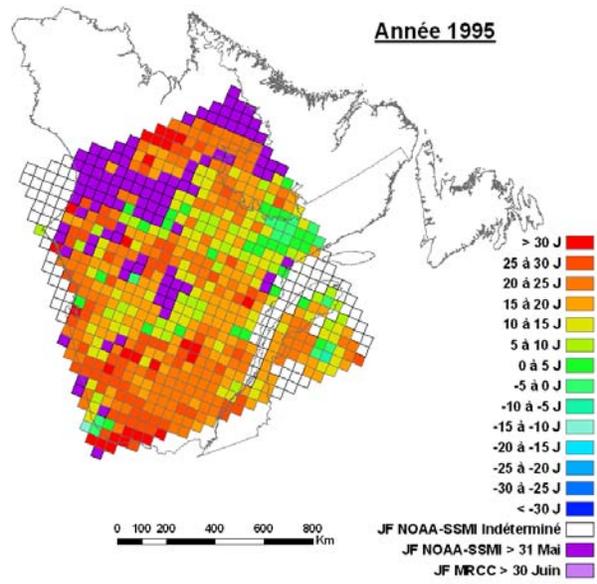
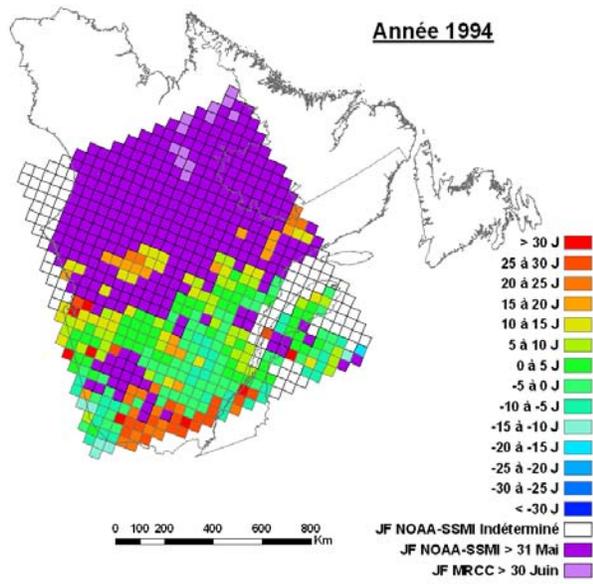
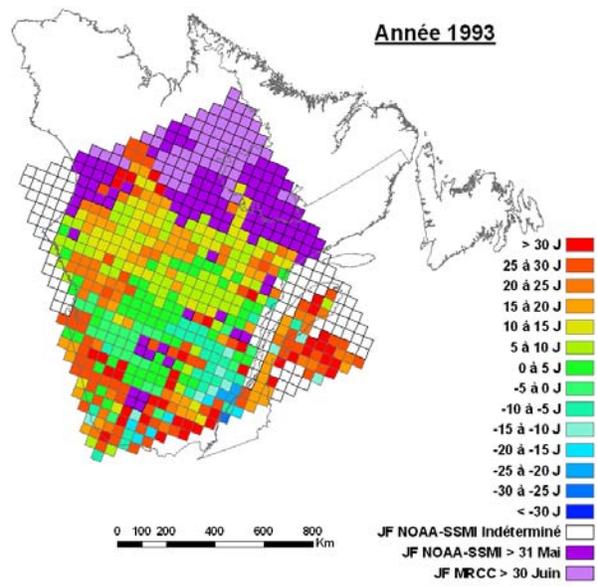
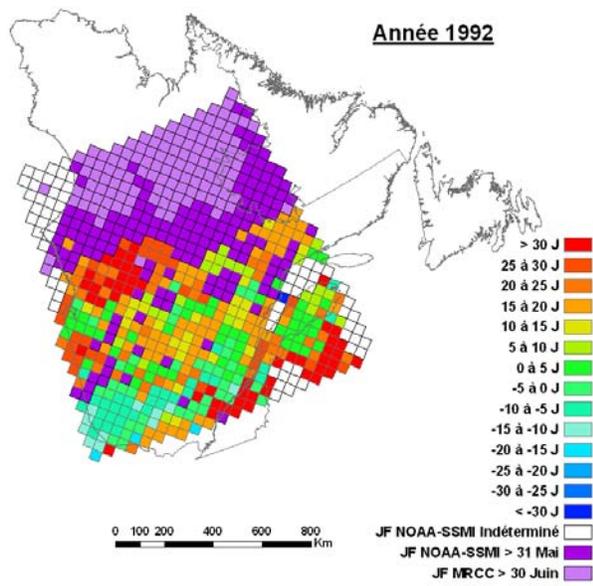


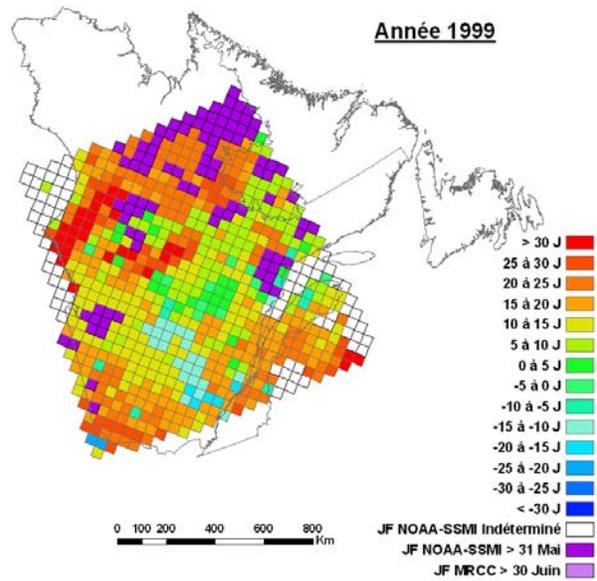
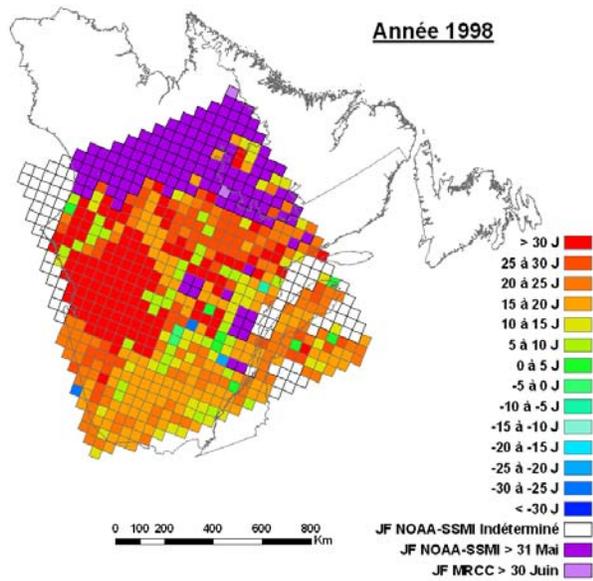
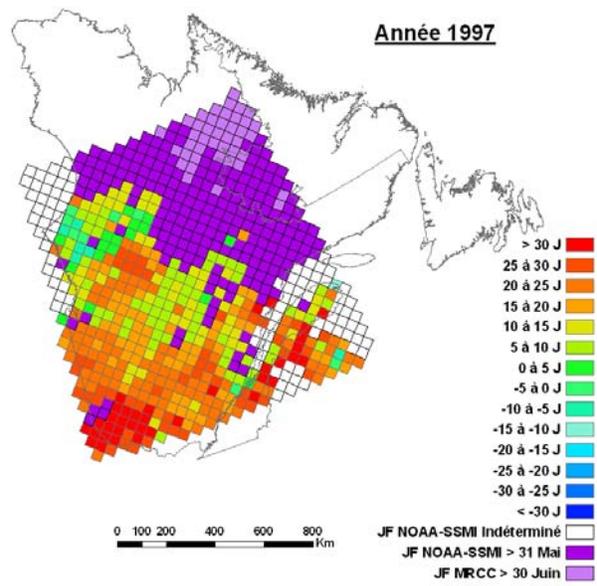
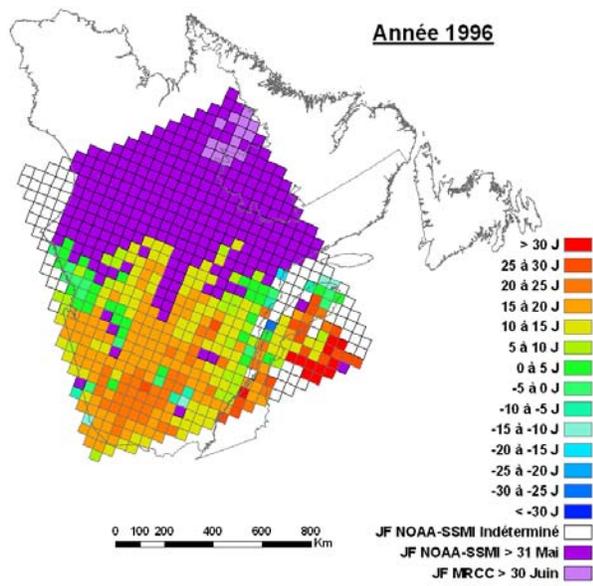




## Annexe 8 : Cartes des écarts entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN= 0 cm, et celui de NOAA-SSMI

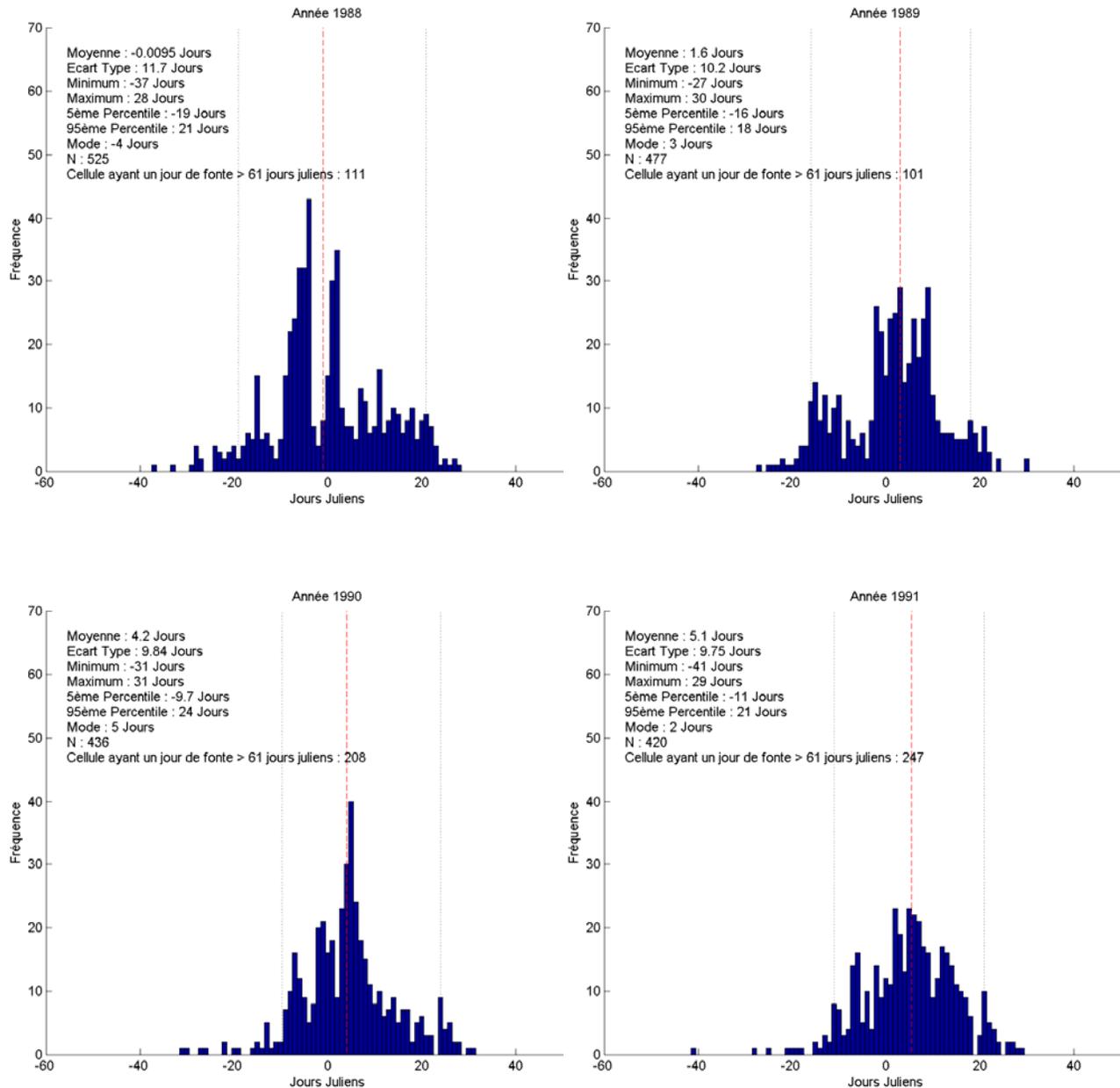


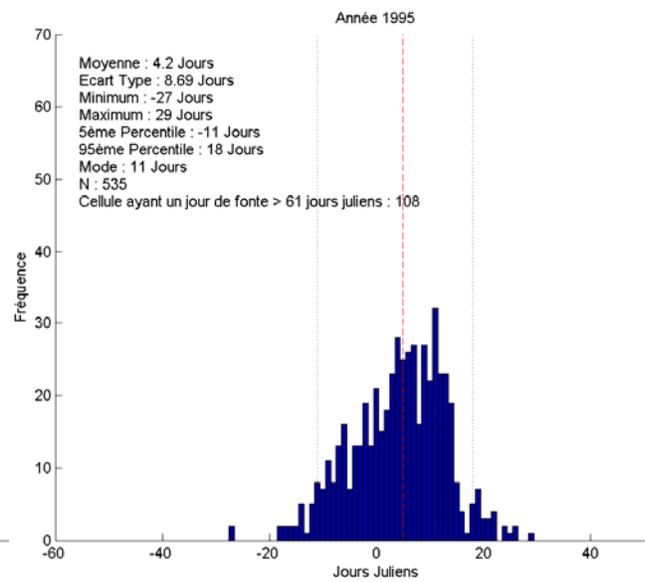
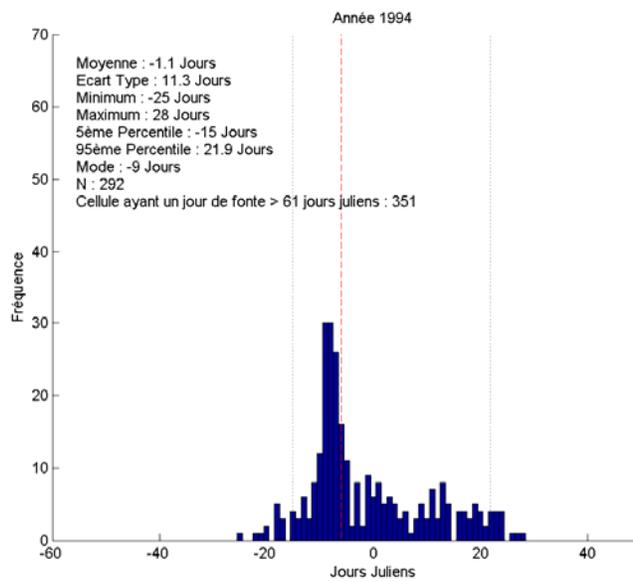
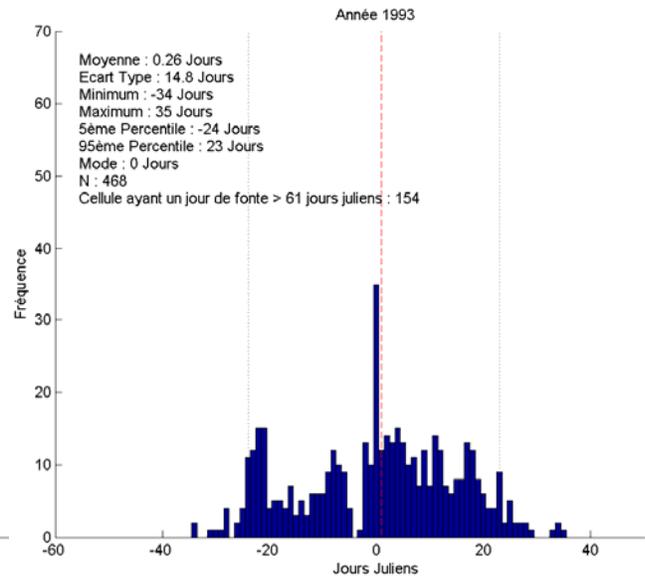
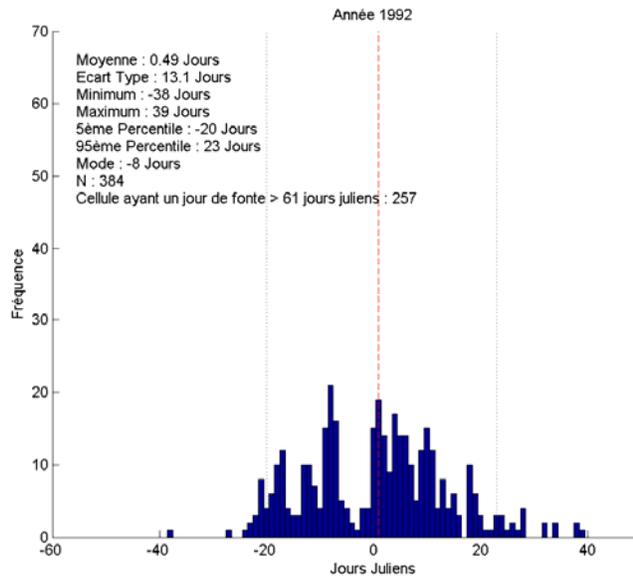


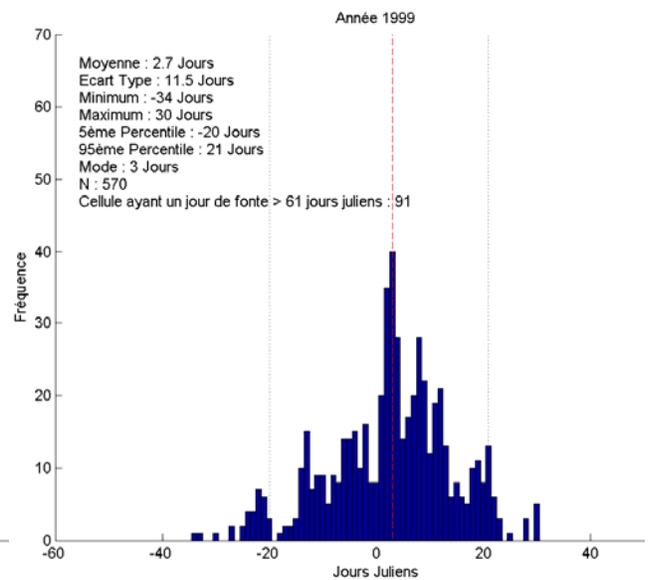
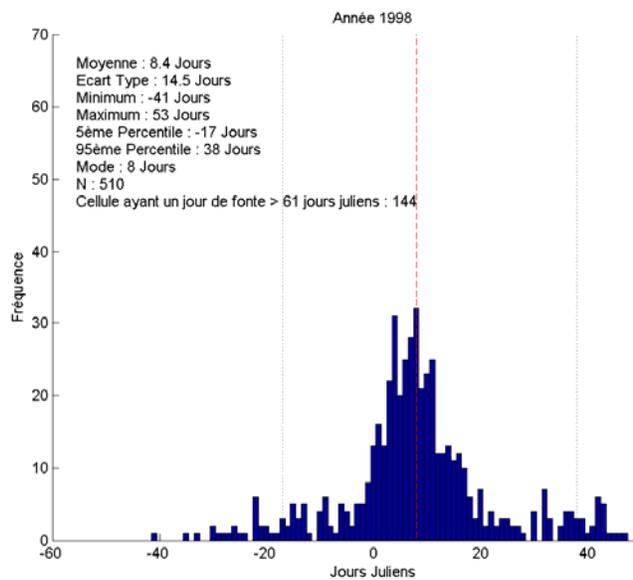
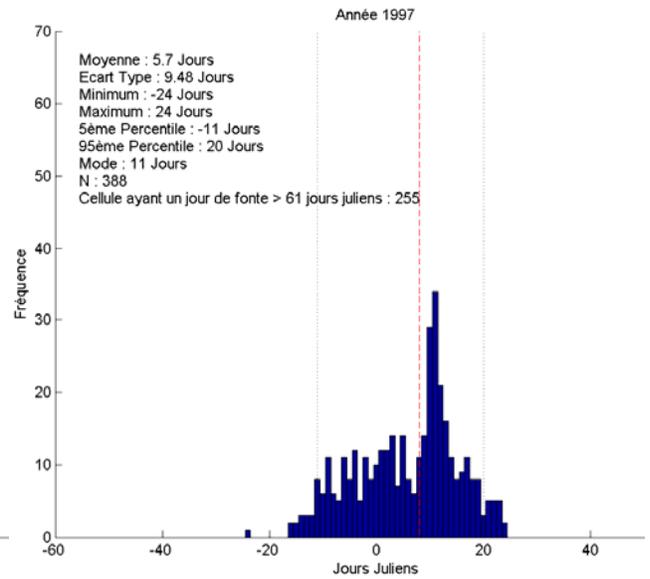
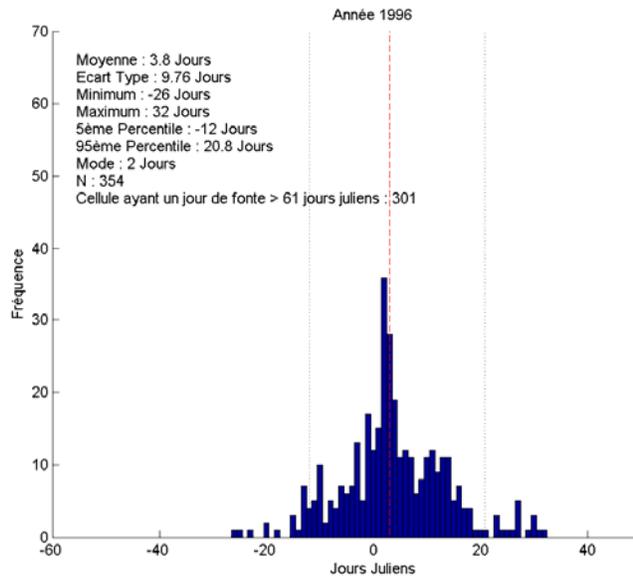




## Annexe 9 : Écart entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN optimal, et celui de NOAA-SSMI









## Annexe 10 : Cartes des écarts entre le dernier jour de la fonte estimé par le MRCC, avec un seuil ZN optimal et celui de NOAA-SSMI

