



CONSORTIUM OURANOS

Projet –MENV-7

Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional.

Rapport No. 4 :

Homogénéisation des séries de températures du Québec méridional et
analyse de l'évolution du climat à l'aide d'indicateurs.

Abderrahmane Yagouti, OURANOS

**Gilles Boulet, Ministère du Développement durable, de
l'Environnement et des Parcs du Québec**

Luc Vescovi, OURANOS

Janvier 2006

RÉSUMÉ

Dans un contexte de changements climatiques, les mesures historiques de la température sont d'une grande importance pour l'analyse et le suivi du climat. Ainsi, nous avons retenu dans ce travail de recherche 53 stations climatiques, localisées au Québec méridional. On s'intéresse aux températures minimales et maximales enregistrées à ces stations durant la période 1960 à 2003. Avant d'analyser le comportement des séries de températures, il est indispensable de s'assurer de l'homogénéité de ces dernières. Nous avons, donc, développé un processus d'homogénéisation, qui prend en considération plusieurs types d'informations, à savoir les métadonnées et les mesures des températures aux stations voisines. La technique statistique utilisée pour la détection des sauts dans les séries de températures est basée sur le modèle de régression.

Nous avons homogénéisé 106 séries de températures maximales et minimales à différentes échelles temporelles : quotidienne, mensuelle, saisonnière et annuelle. Les résultats du processus d'homogénéisation ont montré que seulement 36 % des 106 séries de températures sont homogènes. Ainsi, nous avons estimé les amplitudes des sauts détectés et nous avons apporté les corrections nécessaires aux séries non homogènes. A la fin du processus d'homogénéisation, nous avons retenu 52 stations, dont les séries de températures sont maintenant considérées statistiquement homogènes. En fait, nous avons éliminé une seule station (parmi les 53 stations retenues initialement) à cause du grand pourcentage de valeurs manquantes qui ont dû être estimées et également des nombreuses relocalisations dont cette station a fait l'objet durant la période 1960 à 2003. Enfin, il est important de mentionner que le processus d'homogénéisation est un processus complexe, qui ne se limite pas seulement à l'application d'une technique statistique pour obtenir une série de températures homogénéisées. Ainsi, chaque station possède des particularités qui lui sont propres, et dont il faut absolument tenir compte lors de l'homogénéisation.

L'analyse de l'évolution de la température au Québec méridional entre 1960 et 2003 a été réalisée en utilisant les séries de températures homogénéisées correspondant aux 52 stations retenues. Nous avons examiné l'évolution, entre 1960 et 2003, des températures maximales et minimales aux échelles annuelles et saisonnières. Ces résultats ont permis notamment de finaliser la validation des séries homogénéisées. Nous avons, également, défini plusieurs

indicateurs climatiques pertinents à différents domaines d'activités (agriculture, foresterie, hydrologie, etc) et nous avons analysé leur évolution sur la période 1960 à 2003.

Les résultats obtenus montrent qu'à plusieurs stations au Québec méridional, les températures annuelles sont à la hausse et que le réchauffement observé varie d'une région à l'autre. Les températures annuelles minimales et maximales ont augmenté entre 1960 et 2003 dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. Dans l'est du Québec méridional, le réchauffement observé est nettement moins marqué. Un gradient orienté d'ouest en est de la tendance des températures annuelles a donc été mis en évidence. Nous avons également constaté que le réchauffement est plus marqué pour les températures de nuit que pour les températures de jour. Par conséquent, entre 1960 et 2003 les nuits sont devenues moins « fraîches » et les jours un peu plus chauds dans le sud de la province.

L'analyse de l'évolution des séries de températures saisonnières a montré que les températures hivernales et estivales ont connu une augmentation significative à plusieurs stations. Plus spécifiquement, il ressort que, lors de la saison d'été, les températures minimales ont connu une plus forte augmentation que les températures maximales. Pour la saison d'hiver, ce sont plutôt les températures maximales qui ont enregistré la plus forte augmentation. Nous avons également constaté que le gradient de tendance orienté d'ouest en est est plus évident pour l'hiver comparativement aux autres saisons.

L'évolution des températures annuelles et saisonnières décrite précédemment est étroitement liée à l'évolution des autres indicateurs utilisés dans cette étude. Ainsi, à titre d'exemple, mentionnons que le réchauffement des températures hivernales s'est traduit par une diminution du cumul annuel des degrés jours de chauffe et de gel dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. Le réchauffement des températures minimales et maximales de l'été s'est manifesté, notamment, par une augmentation du cumul annuel des degrés-jours de climatisation, principalement dans le sud et le centre du Québec méridional.

Les températures minimales et maximales ont subi un réchauffement moins marqué au printemps et à l'automne comparativement aux autres saisons. Cependant, on constate aussi d'autres faits particulièrement intéressants pour l'automne et le printemps comme, par exemple une augmentation du 90^e percentile des températures minimales à l'automne et une diminution du nombre de jours de gel et dégel au printemps, principalement dans le sud, le centre et l'est du Québec méridional.

MOTS CLÉS

Changements climatiques, température, homogénéisation, régression, tendance, évolution, climat, indicateur climatique, régionalisation.

TABLES DE MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	HOMOGENÉISATION DES SÉRIES DE TEMPÉRATURES	3
2.1	INTRODUCTION	3
2.2	LE RÉSEAU	3
2.3	IDENTIFICATION DES STATIONS VOISINES	6
2.4	ESTIMATION DES VALEURS MANQUANTES.....	6
2.5	LE PROCESSUS D’HOMOGENÉISATION	7
2.5.1	<i>Introduction.....</i>	<i>7</i>
2.5.2	<i>Homogénéisation des séries de températures annuelles</i>	<i>7</i>
2.5.2.1	Méthodologie	7
2.5.2.2	Exemple : cas de la station de Oka	8
2.5.2.3	Résultats de l’homogénéisation	11
2.5.2.4	Validation inter-station : analyse régionale	14
2.5.3	<i>Homogénéisation des séries de températures mensuelles</i>	<i>15</i>
2.5.3.1	Méthodologie	15
2.5.3.2	Exemple : cas de la station de Oka	16
2.5.3.3	Résultats de l’homogénéisation	18
2.5.3.4	Validation inter-station : analyse régionale	21
2.5.4	<i>Homogénéisation des séries de températures quotidiennes</i>	<i>22</i>
2.5.4.1	Méthodologie	22
2.5.4.2	Exemple : cas de la station de Oka	23
2.5.4.3	Résultats de l’homogénéisation	23
2.5.4.4	Validation inter-station : analyse régionale par des indicateurs climatiques... ..	28
2.6	CONCLUSIONS.....	28
3	ANALYSE RÉGIONALE DES TEMPÉRATURES HOMOGENÉISÉES ET DE LEURS INDICATEURS DÉRIVÉS	31
3.1	INTRODUCTION	31

3.2	INDICATEURS CALCULÉS À PARTIR DES DONNÉES ANNUELLES	31
3.3	INDICATEURS CALCULÉS À PARTIR DES DONNÉES SAISONNIÈRES	31
3.4	INDICATEURS CALCULÉS À PARTIR DES DONNÉES QUOTIDIENNES	32
3.5	TRAITEMENT DES VALEURS MANQUANTES.....	34
3.6	RÉSULTATS	42
3.6.1	<i>Résultats : indicateurs calculés à l'échelle annuelle.....</i>	42
3.6.2	<i>Résultats : indicateurs calculés à partir des données saisonnières.....</i>	50
3.6.3	<i>Résultats : indicateurs calculés à partir des données quotidiennes</i>	61
3.6.3.1	Évolution des percentiles 2, 10, 90 et 98	64
3.6.3.2	Évolution de l'écart diurne.....	66
3.6.3.3	Évolution de la saison de gel	67
3.6.3.4	Évolution de la fréquence et de la durée des vagues de froid	67
3.6.3.5	Évolution du nombre de jours de gel et dégel.....	68
3.6.3.6	Évolution du cumul annuel des degrés-jours	69
3.6.3.7	Évolution de la longueur de la saison de croissance.....	70
3.7	CONCLUSIONS ET DISCUSSION.....	107
4	CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS.....	113
5	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	117
6	ANNEXE : ANALYSE DES TENDANCES À UN NIVEAU DE SIGNIFICATION ÉGAL À 10%	119

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration de la localisation spatiale du réseau de 53 stations	4
Figure 2 : Série des différences de la température entre la station de Oka et la série de référence.	10
Figure 3 : Températures minimales annuelles, brutes et homogénéisées de la station de Oka. ..	10
Figure 4 : Facteurs de correction mensuels appliqués aux températures mensuelles maximales (A_m étant l'amplitude absolue à l'échelle mensuelle du saut)	20
Figure 5 : Facteurs de correction mensuels appliqués aux températures mensuelles minimales (A_m étant l'amplitude absolue à l'échelle mensuelle du saut)	20
Figure 6 : Comparaison entre les températures annuelles calculés à partir des températures mensuelles homogénéisées et les températures annuelles homogénéisées par la technique MRL. (a) représente les températures maximales et (b) représente les températures minimales.....	21
Figure 7 : Facteurs de correction mensuels (histogramme) et les facteurs de correction cibles (point-étoile) correspondant au saut détecté en 1963 à la station Oka.	23
Figure 8 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0 et 0.2 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).	24
Figure 9 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.2 et 0.4 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).	25
Figure 10 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.4 et 0.6 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).	25
Figure 11 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.6 et 0.8 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).	26
Figure 12 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.8 et 1.0 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).	26

Figure 13 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , supérieurs à 1.0 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).....	27
Figure 14 : Comparaison entre les températures annuelles calculées à partir des températures quotidiennes homogénéisées et les températures annuelles homogénéisées par la technique MRL (a) représente les températures maximales et (b) représentent les températures minimales.....	28
Figure 15 : Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de croissance.....	38
Figure 16 : Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de gel soutenu et de la longueur de la saison de gel non soutenu.....	40
Figure 17 : Tendances des températures annuelles minimales entre 1960 et 2003.	46
Figure 18 : Tendances des températures annuelles maximales entre 1960 et 2003.....	47
Figure 19 : Tendances des températures annuelles moyennes entre 1960 et 2003.....	48
Figure 20 : Interpolation des tendances des températures annuelles moyennes entre 1960 et 2003.....	49
Figure 21 : Tendances des températures maximales de l'hiver entre 1960 et 2003.	53
Figure 22 : Tendances des températures maximales du printemps entre 1960 et 2003.....	54
Figure 23 : Tendances des températures maximales de l'été entre 1960 et 2003.....	55
Figure 24 : Tendances des températures maximales de l'automne entre 1960 et 2003.....	56
Figure 25 : Tendances des températures minimales de l'hiver entre 1960 et 2003.....	57
Figure 26 : Tendances des températures minimales du printemps entre 1960 et 2003.	58
Figure 27 : Tendances des températures minimales de l'été entre 1960 et 2003.	59
Figure 28 : Tendances des températures minimales de l'automne entre 1960 et 2003.	60
Figure 29 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	71
Figure 30 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant le printemps entre 1960 et 2003.....	72
Figure 31 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.....	73

Figure 32 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'automne entre 1960 et 2003.....	74
Figure 33 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	75
Figure 34 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant le printemps entre 1960 et 2003.....	76
Figure 35 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.....	77
Figure 36 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'automne entre 1960 et 2003.....	78
Figure 37 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	79
Figure 38 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant le printemps entre 1960 et 2003.....	80
Figure 39 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'été entre 1960 et 2003.....	81
Figure 40 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'automne entre 1960 et 2003.....	82
Figure 41 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	83
Figure 42 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant le printemps entre 1960 et 2003.....	84
Figure 43 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'été entre 1960 et 2003.....	85
Figure 44 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'automne entre 1960 et 2003.....	86
Figure 45 : Tendances du percentile 98 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.....	87
Figure 46 : Tendances du percentile 2 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	88
Figure 47 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'hiver entre 1960 et 2003.	89

Figure 48 : Tendances de l'écart diurne moyen du printemps entre 1960 et 2003.....	90
Figure 49 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'été entre 1960 et 2003.....	91
Figure 50 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'automne entre 1960 et 2003.....	92
Figure 51 : Tendances de la longueur de la saison de gel soutenu entre 1960 et 2003.	93
Figure 52 : Tendances de la longueur de la saison de gel non soutenu entre 1960 et 2003.	94
Figure 53 : Tendances de la fréquence des vagues de froid durant l'hiver entre 1960 et 2003...	95
Figure 54 : Tendances de la fréquence des vagues de froid durant le printemps entre 1960 et 2003.....	96
Figure 55 : Tendances de la durée des vagues de froid durant l'hiver entre 1960 et 2003.....	97
Figure 56 : Tendances de la durée des vagues de froid durant le printemps entre 1960 et 2003.	98
Figure 57 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant l'hiver entre 1960 et 2003....	99
Figure 58 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant le printemps entre 1960 et 2003.....	100
Figure 59 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant l'automne entre 1960 et 2003.	101
Figure 60 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 5 degrés Celsius entre 1960 et 2003.....	102
Figure 61 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 22 degrés Celsius entre 1960 et 2003.....	103
Figure 62 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessous de 18 degrés Celsius entre 1960 et 2003.....	104
Figure 63 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessous de zéro degrés Celsius entre 1960 et 2003.....	105
Figure 64 : Tendances de la longueur de la saison de croissance entre 1960 et 2003.....	106
Figure 65 : Tendances des températures maximales annuelles durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	119
Figure 66 : Tendances des températures moyennes annuelles durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	120
Figure 67 : Tendances des températures maximales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	121

Figure 68 : Tendances des températures maximales du printemps durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	122
Figure 69 : Tendances des températures maximales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	123
Figure 70 : Tendances des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	124
Figure 71 : Tendances des températures minimales du printemps durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	125
Figure 72 : Tendances du percentile 90 des températures maximales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	126
Figure 73 : Tendances du percentile 90 des températures maximales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	127
Figure 74 : Tendances du percentile 10 des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	128
Figure 75 : Tendances du percentile 10 des températures minimales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	129
Figure 76 : Tendances du percentile 2 des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	130
Figure 77 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.....	131
Figure 78 : Tendances de la longueur de la saison de gel non soutenu durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%.....	132
Figure 79 : Tendances de la longueur de la saison de gel soutenu durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%.....	133
Figure 80 : Tendances de la durée de la vague de froid de l'hiver durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%.....	134
Figure 81 : Tendances du nombre de vagues de froid de l'hiver durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%.....	135
Figure 82 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel du printemps durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%.....	136

Figure 83 : Tendances du cumul annuel des degrés jours supérieurs à 5 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%	137
Figure 84 : Tendances du cumul annuel des degrés jours supérieurs à 22 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%	138
Figure 85 : Tendances du cumul annuel des degrés jours inférieurs à 18 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%	139
Figure 86 : Tendances du cumul annuel des degrés jours inférieurs à 0 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%	140

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des stations du réseau.....	4
Tableau 2 : Caractéristiques de la station de base et de ses voisines.....	8
Tableau 3 : Pourcentage des séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction du nombre de sauts détectés par la technique d'homogénéisation MRL	11
Tableau 4 : Nombre des sauts détectés par la technique MRL dans les séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction de leurs amplitudes	12
Tableau 5 : Pourcentage des séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction du nombre de sauts retenus après application du processus d'homogénéisation ..	13
Tableau 6 : Nombre des sauts retenus en fonction de leurs amplitudes à la fin du processus d'homogénéisation.....	13
Tableau 7 : Facteurs de correction mensuels calculés à partir des températures minimales mensuelles de la station de Oka.....	17
Tableau 8 : Facteurs de correction mensuels "ajustés" correspondant au saut 1988	18
Tableau 9 : Traitement des valeurs manquantes lors du calcul des indicateurs climatiques.	36
Tableau 10 : Liste des indicateurs calculés à partir des données annuelles.....	42
Tableau 11 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des températures annuelles (niveaux de signification 5% et 10%).....	43
Tableau 12 : Liste des indicateurs calculés à partir des données saisonnières	50
Tableau 13 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des températures saisonnières (niveaux de signification 5% et 10%)	51
Tableau 14 : Liste des indicateurs calculés à partir des données quotidiennes	61
Tableau 15 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des indicateurs climatiques (niveaux de signification 5% et 10%).....	63

1 INTRODUCTION

Dans un contexte de changements climatiques, les mesures historiques de la température sont d'une grande importance pour l'analyse et le suivi du climat. Ainsi, nous avons retenu dans ce travail de recherche 53 stations climatiques (figure 1), localisées au Québec méridional (territoire situé sous le 51^e parallèle). On s'intéresse aux températures minimales et maximales enregistrées à ces stations durant la période 1960 à 2003. Avant d'analyser le comportement des séries de températures, il est indispensable de s'assurer de l'homogénéité de ces dernières. Nous avons, donc, développé un processus d'homogénéisation, qui prend en considération plusieurs types d'informations, à savoir les métadonnées et les mesures des températures aux stations voisines. La technique statistique utilisée pour la détection des sauts dans les séries de températures est basée sur le modèle de régression.

Dans ce rapport, nous présentons les résultats de l'homogénéisation des séries des températures maximales et minimales correspondant aux 53 stations climatiques. L'homogénéisation des séries de températures est réalisée aux échelles annuelle, saisonnière, mensuelle et quotidienne. À partir de ces données, nous dressons un portrait régional de l'évolution de la température au Québec méridional. En effet, les températures homogénéisées calculées aux échelles annuelles et saisonnières sont utilisées pour l'analyse de la tendance de la température minimale, maximale et moyenne durant la période 1960 à 2003. Nous analysons également le comportement de quelques indicateurs climatiques, calculés généralement à partir des températures quotidiennes. À titre d'exemple, nous analysons l'évolution du cumul annuel des degrés-jours de chauffe (températures inférieures à 18 °C) durant la période 1960 à 2003.

Ce rapport est rédigé en quatre chapitres dont le premier est constitué de la présente introduction. Le chapitre 2 présente une description des résultats de l'homogénéisation des séries de températures annuelles, mensuelles et quotidiennes. Dans le chapitre 3, nous présentons la définition des indicateurs climatiques retenus dans le cadre de ce travail, ainsi qu'une description de la méthodologie pour calculer ces indicateurs en présence de valeurs manquantes dans les séries de températures. Les résultats de l'analyse du climat au Québec méridional durant la période 1960 à 2003 sont cartographiés selon la position géographique des

stations climatiques. Finalement, nous présentons, dans le chapitre 4, les conclusions générales des résultats présentés dans ce rapport.

2 HOMOGÉNÉISATION DES SÉRIES DE TEMPÉRATURES

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous vérifions l'homogénéité des séries de températures maximales et minimales obtenues à partir de 53 stations climatiques, localisées au Québec méridional. Pour ceci, nous utilisons la technique d'homogénéisation développée par Vincent (1998) et adaptée par Yagouti et Boulet (2004a et b). Quand cette technique détecte la présence d'un ou de plusieurs sauts dans la série de températures, cette série doit être, éventuellement, homogénéisée (ajustée) en considérant les positions des sauts et leurs amplitudes. La technique d'homogénéisation utilise l'information des stations voisines, qui sont supposées être homogènes, pour détecter les sauts présents dans la série de base. Or, l'hypothèse d'homogénéité des séries voisines est rarement satisfaite en pratique. Dans cette situation, la technique statistique de l'homogénéisation ne permet pas d'homogénéiser avec confiance la série de base et nous devons faire appel à d'autres outils ou informations avant de retenir un saut identifié par cette technique. En effet, la consultation des métadonnées des stations de base et des stations voisines constitue l'un des moyens important pour justifier la présence réelle d'un saut dans la série de base. On comprend, donc, que l'homogénéisation d'une série de températures ne se limite pas à l'application de la technique statistique. C'est pour cette raison que nous employons dans ce rapport le terme "processus d'homogénéisation", qui englobe les différentes étapes menant à l'homogénéisation d'une série de températures.

2.2 Le réseau

Nous avons choisi à partir d'un réseau de 114 stations identifiées par Yagouti et Boulet (2003), 53 stations de base où l'hypothèse d'homogénéité est à vérifier. Le choix de ces stations repose sur des critères ayant trait à :

- la représentativité spatiale;
- la représentativité temporelle (les séries couvrent en général la période 1960 à 2003);
- le faible pourcentage de valeurs manquantes.

Nous avons généralement choisi des stations "uniques", c'est-à-dire que les séries de températures sont obtenues à partir de la même station, et non pas en combinant deux ou plusieurs stations voisines.

La figure 1 présente la répartition spatiale des 53 stations retenues et on constate aisément que la localisation des stations permet de couvrir les différentes régions du Québec méridional. Nous présentons également dans le tableau 1 les caractéristiques de ces stations. On remarque qu'environ 68 % des stations ont un pourcentage de valeurs manquantes inférieur ou égal à 10% (colonne %VM du tableau 1).

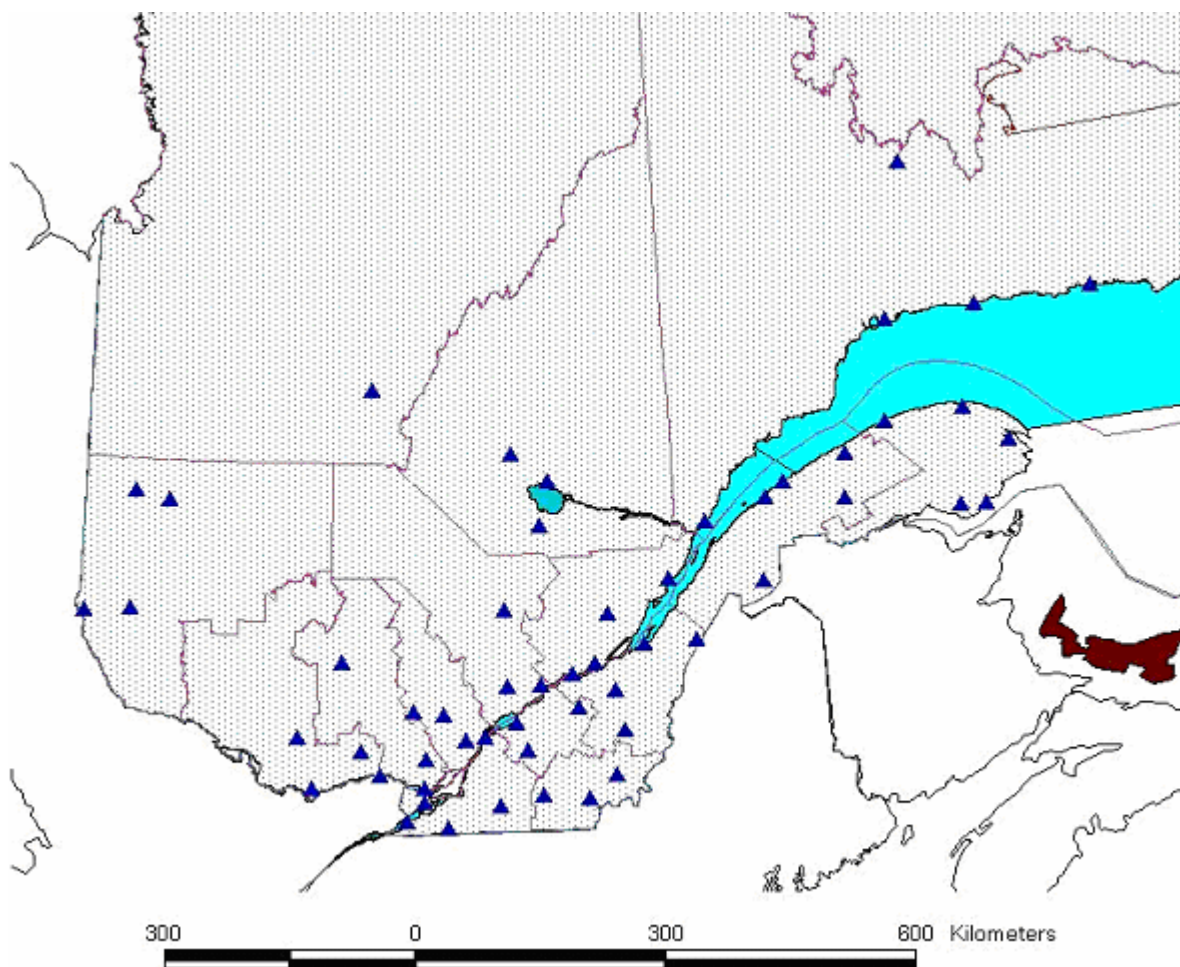


Figure 1 : Illustration de la localisation spatiale du réseau de 53 stations

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des stations du réseau

N	Station	Nom de la station	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	% VM de tmax	% VM de tmin
1	7012071	Donnacona-2	53	46,68	-71,73	4.8	5.0
2	7013362	Joliette-Ville	56	46,00	-73,42	20.1	21.1
3	7014290	Les Cèdres	47	45,30	-74,05	6.1	6.0
4	7015730	Oka	91	45,50	-74,07	8.1	7.9
5	7016840	Sainte-Anne-de-la-Pérade	16	46,58	-72,23	18.9	18.9

Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle 5
de ces séries au Québec méridional

6	7017080	Saint-Come	244	46,28	-73,75	1.4	2.3
7	7017100	Saint-Donat	400	46,32	-74,23	6.8	12.2
8	7018000	Shawinigan	131	46,57	-72,77	21.4	21.2
9	7016294	Québec-A	74	46,78	-71,38	5.5	5.3
10	7020828	Bonsecours	310	45,40	-72,25	16.8	17.5
11	7022160	Drummondville	76	45,89	-72,47	5.0	5.0
12	7022320	Farnham	68	45,30	-72,90	0.7	1.0
13	7023075	Hemmingford-Four-Winds	61	45,07	-73,72	5.7	5.7
14	7024250	Laurierville	152	46,33	-71,67	9.5	11.7
15	7024920	Milan	482	45,58	-71,12	2.9	2.9
16	7025440	Nicolet	30	46,18	-72,62	5.5	5.3
17	7026836	Saint-Anicet	53	45,13	-74,35	4.5	3.8
18	7027200	Saint-Éphrem	312	46,07	-70,97	2.2	2.1
19	7027802	Sawyerville-Nord	346	45,35	-71,53	5.7	5.8
20	7027840	Scott	145	46,50	-71,08	5.7	4.3
21	7028200	Sorel	15	46,03	-73,12	5.2	5.8
22	7031360	Chelsea	115	45,50	-75,80	4.1	3.8
23	7031375	Cheneville	223	45,90	-75,05	17.4	16.8
24	7036063	Pointe-au-Chêne	61	45,63	-74,75	16.0	16.0
25	7036855	Sainte-Anne-du-Lac	262	46,85	-75,33	9.3	9.6
26	7037400	Saint-Jérôme	169	45,80	-74,05	3.6	3.7
27	7038975	Wright	165	46,05	-76,03	20.8	21.1
28	7040MMN	Baie-Johan-Beetz	17	50,29	-62,80	22.9	23.1
29	7042840	Grandes-Bergeronnes	61	48,25	-69,52	4.0	2.8
30	7043960	La Malbaie	23	47,67	-69,52	8.7	8.4
31	7046212	Poste-Montagnais	595	51,88	-70,15	38.7	38.8
32	7047910	Sept-Iles A	55	50,22	-65,72	15.5	15.5
33	704FEG0	Rivière-au-Tonnerre	15	50,27	-66,27	19.9	19.1
34	7051200	Causapscal	168	48,37	-64,77	3.9	4.2
35	7052605	Gaspé A	33	48,78	-67,23	34.9	34.3
36	7052865	Grande-Vallée	8	49,18	-64,48	18.4	21.1
37	7055120	Mont-Joli A	52	48,60	-65,17	15.6	15.6
38	7055210	Montmagny	15	46,97	-68,22	7.7	7.9
39	7056120	Port-Daniel	69	48,15	-70,58	1.1	0.6
40	7056480	Rimouski	36	48,45	-64,98	4.3	4.8
41	7056850	Sainte-Anne-des-Monts	15	49,13	-68,50	8.5	8.3
42	7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	358	48,84	-66,47	5.0	4.7
43	7057600	Saint-Pamphile	366	46,98	-67,17	7.8	9.2
44	7057720	Sainte-Rose-du-Degelis	151	47,57	-69,77	1.1	2.2
45	7063090	Hémond	183	49,07	-68,63	3.2	1.8
46	7063560	Lac-Bouchette	358	48,28	-72,60	13.1	13.8
47	7065960	Péribonca	107	48,77	-72,17	10.0	10.2
48	7074240	La Tuque	152	47,40	-72,02	3.8	2.8
49	7080600	Belleterre	315	47,39	-72,78	3.0	2.6
50	7088760	Ville-Marie	215	47,35	-78,71	9.3	7.3
51	7090120	Amos	310	48,57	-78,13	21.4	21.5
52	7091305	Chapais-2	396	49,78	-79,43	7.2	7.1
53	7098360	Taschereau	310	48,67	-78,70	13.5	13.2

2.3 Identification des stations voisines

La technique d'homogénéisation utilisée dans le cadre de ce projet exige la présence d'une ou de plusieurs séries voisines. A partir de ces séries voisines, on constitue une série dite série de référence, dont le comportement doit être climatiquement similaire à la série de base. Le choix des stations voisines doit être effectué selon des critères qui permettent de satisfaire cette condition. Nous avons choisi des stations voisines en utilisant les critères fixés par Yagouti et Boulet (2003). Ainsi, nous avons retenu trois stations voisines pour l'homogénéisation de chaque série de base, ce choix est justifié par la densité du réseau climatologique québécois. La série de référence est la moyenne pondérée des séries de températures correspondant aux trois stations voisines. Les poids sont calculés à partir de la corrélation entre les températures annuelles transformées de la station de base et celles de chaque station voisine. Les températures transformées sont obtenues à partir de la différence de températures entre deux années consécutives. Ainsi, la série de référence est calculée de la manière suivante :

$$T_R = w_1 T_{v1} + w_2 T_{v2} + w_3 T_{v3} ; w_i = \frac{\rho_{vi}^b}{\rho_{v1}^b + \rho_{v2}^b + \rho_{v3}^b} \quad (1)$$

où :

T_R représente le vecteur des anomalies annuelles de la série de référence;

T_{vi} représente le vecteur des anomalies annuelles de la série voisine i , ($i=1,2,3$);

ρ_{vi}^b est la corrélation entre les températures annuelles transformées de la série de base et celles de la série voisine i ; et

w_i sont des poids calculés à partir des coefficients de corrélation.

2.4 Estimation des valeurs manquantes

L'estimation des valeurs manquantes est une étape nécessaire avant d'aborder la problématique de l'homogénéisation. En effet, la présence de plusieurs valeurs manquantes dans la série de températures constitue un handicap majeur pour calculer les valeurs de températures mensuelle, saisonnière et annuelle et par la suite un handicap majeur pour l'homogénéisation de la série de températures. Ainsi, nous avons utilisé la procédure d'estimation des valeurs manquantes développée par Yagouti et Boulet (2003) et Yagouti et *al.*, (2006) pour l'estimation des valeurs manquantes de la température quotidienne maximale et minimale. Notons que les

valeurs manquantes ont été estimées dans la série de la station de base et également dans les séries des stations voisines.

2.5 Le processus d'homogénéisation

2.5.1 Introduction

La première étape du processus d'homogénéisation consiste à utiliser un modèle statistique pour détecter la présence ou non d'un ou de plusieurs sauts dans la série de base. La technique d'homogénéisation utilisée dans le cadre de ce projet est celle développée originalement par Vincent (1998) et adaptée par Yagouti et Boulet (2004a et b). Cette technique est basée sur le **Modèle de Régression Linéaire, MRL**. Elle permet d'estimer les positions des sauts statistiquement significatifs et également d'estimer les amplitudes de ces sauts.

Étant donnée la forte variabilité présente dans les séries de températures quotidiennes, nous avons décidé d'appliquer la technique d'homogénéisation MRL aux séries de températures annuelles. Les positions des sauts détectés et leurs amplitudes sont, par la suite, utilisées pour l'homogénéisation des séries de températures mensuelles, saisonnières et quotidiennes. En effet, les positions des sauts obtenues après l'homogénéisation des séries annuelles nous permettent de calculer des facteurs de correction mensuels et quotidiens. Ces facteurs sont utilisés pour homogénéiser (ajuster) les séries de températures mensuelles et quotidiennes. Les séries de températures saisonnières homogénéisées sont tout simplement obtenues à partir des séries de températures mensuelles homogénéisées.

2.5.2 Homogénéisation des séries de températures annuelles

2.5.2.1 Méthodologie

Le processus d'homogénéisation des séries de températures annuelles est réalisé en quatre étapes. La première étape consiste à vérifier par la technique MRL la présence ou non de sauts dans la série de base. La série de référence qui constitue la variable explicative dans le modèle de régression est calculée selon l'équation (1). La seconde étape consiste à vérifier, par la technique MRL, la présence de sauts dans la série de base en utilisant chaque série voisine individuellement. Dans ce cas, la série voisine devient la série de référence. Cette étape est très importante dans le processus d'homogénéisation des séries de températures annuelles, principalement, si les séries voisines ne sont pas homogènes. La troisième étape consiste à

examiner visuellement les graphiques des différences de températures entre la série de base et chacune des séries voisines. Finalement, la dernière étape est la consultation des dossiers des stations de base et des voisines. Ainsi, un saut est retenu s'il correspond à un événement enregistré dans le dossier de station. Toutefois, l'information disponible dans ces dossiers n'est pas toujours complète surtout durant les années soixante et soixante-dix. Dans cette situation, nous utilisons les résultats de la technique d'homogénéisation et les résultats de l'interprétation des graphiques des différences pour décider de la signification réelle du saut détecté. On comprend donc que l'homogénéisation d'une série de températures est un processus complexe et que l'identification d'un saut par la technique d'homogénéisation ne signifie pas que ce saut appartient nécessairement à la série de base.

2.5.2.2 Exemple : cas de la station de Oka

Nous présentons dans cette section, à titre d'illustration, les résultats des quatre étapes du processus d'homogénéisation décrites dans la section 2.5.2.1 concernant l'homogénéisation des températures minimales annuelles de la station de Oka. Le tableau 2 présente les caractéristiques de cette station ainsi que celles des stations voisines utilisées pour l'homogénéisation.

Tableau 2 : Caractéristiques de la station de base et de ses voisines.

Station	Période d'observation	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance* (km)
Oka	08/1937 – en fonction	91	45.50	-74.07	0
Pointe-au-Chêne	01/1962 – en fonction	61	45.63	-74.75	55
Les Cèdres	02/1913 – en fonction	45	45.34	-74.06	18
Valleyfield	02/1952 – en fonction	46	45.28	-74.10	24

* : distance par rapport à la station de base (Oka).

La technique d'homogénéisation a permis de détecter quatre sauts dans la série des températures minimales annuelles de Oka. Le premier saut est détecté en 1963 et son amplitude est estimée à 0.7 °C. Le deuxième saut est détecté en 1968 et son amplitude est estimée à -1.2 °C. Le troisième saut est détecté en 1988 et son amplitude est estimée à 0.4 °C. Finalement, le dernier saut est détecté en 2000 et son amplitude est estimée à 0.7 °C.

La deuxième étape du processus d'homogénéisation consiste à vérifier l'homogénéité de la série de base en considérant chaque station voisine individuellement dans le modèle de régression de la technique d'homogénéisation. Les résultats de cette étape ont montré que le saut 1968 a été détecté 3 fois, les sauts 1963 et 1988 ont été détectés 2 fois, et le saut 2000 a été détecté une seule fois. Ceci nous indique que les sauts 1963, 1968 et 1988 appartiennent, éventuellement, à la série de base, puisqu'ils ont été détectés plus qu'une fois en utilisant les différentes séries voisines.

La figure 2 représente la série de différences entre la station de base et la station de référence. On constate que les sauts détectés par la technique d'homogénéisation peuvent être identifiés visuellement en utilisant la figure 2. Toutefois, nous ne pouvons pas confirmer que les quatre sauts identifiés appartiennent tous à la station de base. D'où le grand intérêt de la quatrième étape du processus d'homogénéisation (section 2.5.2.1). Ainsi, nous avons consulté les métadonnées des stations de Oka et de ses voisines. La station Oka a été déplacée à deux reprises en 1963 et 1968. Le plan de cette station montre que plusieurs arbres ont été plantés aux alentours du site de mesure durant l'année 1987. Ces informations coïncident avec les dates des trois sauts détectés par la technique d'homogénéisation. Toutefois, il n'existe aucune information dans le dossier de la station de Oka concernant le saut détecté en 2000. Alors, nous avons consulté les métadonnées des stations voisines et nous avons trouvé que la station Les Cèdres (station voisine à Oka) a été déplacée durant l'année 2000. Ce qui laisse croire que le saut détecté en 2000 appartient à la station Les Cèdres et non pas à la station de base, Oka.

Finalement, nous avons décidé de retenir pour la série des températures minimales de Oka les sauts détectés en 1963, 1968 et 1988 et de rejeter le saut détecté en 2000. L'ajustement (l'homogénéisation) de la série de base est effectué en utilisant les amplitudes des trois sauts retenus.

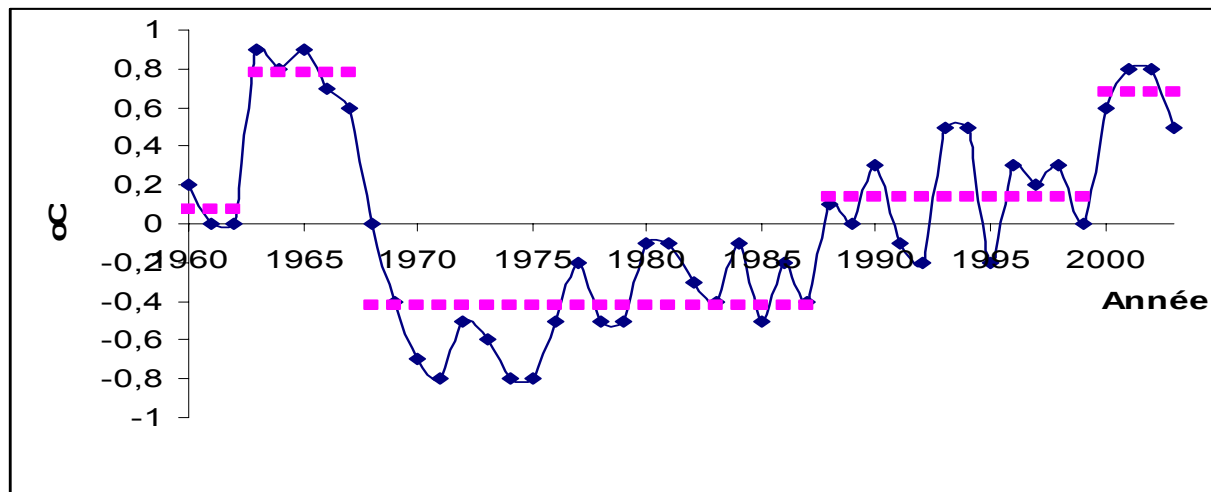


Figure 2 : Série des différences de la température entre la station de Oka et la série de référence.

La figure 3 représente les données des températures annuelles brutes et homogénéisées observées entre 1960 et 2003. Les tendances linéaires des données brutes et homogènes calculées sur la période 1960 à 2003 sont, respectivement, égales à $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/44\text{ ans}$ et $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/44\text{ans}$.

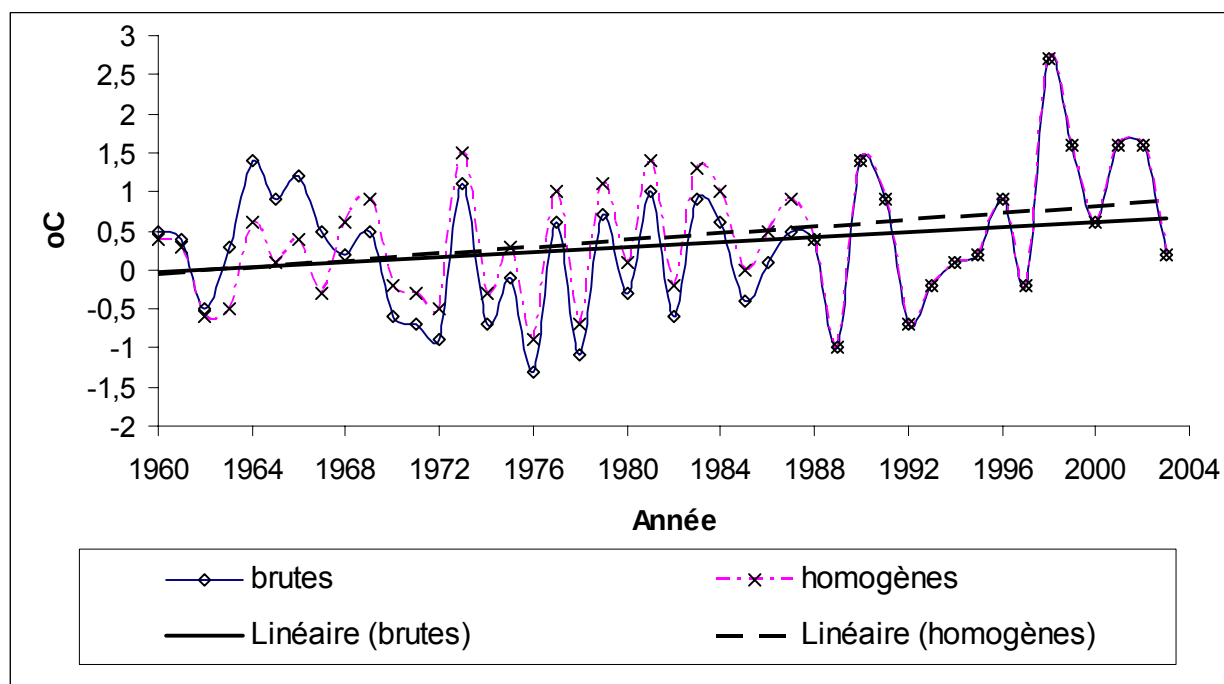


Figure 3 : Températures minimales annuelles, brutes et homogénéisées de la station de Oka.

2.5.2.3 Résultats de l'homogénéisation

Nous présentons dans cette section les résultats du processus d'homogénéisation de 106 séries de températures maximales et minimales annuelles correspondant aux 53 stations retenues dans le cadre de ce projet. Le tableau 3 présente le pourcentage des séries des températures maximales et minimales annuelles en fonction du nombre de sauts détectés par la technique d'homogénéisation MRL. La première constatation est que la technique MRL identifie un nombre très faible de stations homogènes (4% des 53 séries de températures maximales annuelles et 6 % des 53 séries de températures minimales annuelles). Ceci indique que le pourcentage des séries non homogènes risque d'être relativement élevé une fois que le processus d'homogénéisation sera complété.

Tableau 3 : Pourcentage des séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction du nombre de sauts détectés par la technique d'homogénéisation MRL

Nombre de sauts	Maximales annuelles	Minimales annuelles
0	4%	6%
1	30 %	19 %
2	32 %	23 %
3	17 %	25 %
4	11 %	17 %
5	2 %	6 %
6	4 %	6 %

Le tableau 4 nous fournit plus de détail sur l'amplitude des sauts détectés dans les séries de températures par la technique MRL. On remarque que la répartition de l'amplitude des sauts détectés dans les séries de températures maximales et minimales annuelles n'est pas identique. En effet, 41 % des 118 sauts détectés dans les séries de températures maximales ont des amplitudes comprises entre 0.2 et 0.4 °C. Alors que pour les séries de températures minimales, ce pourcentage est de 28 %. De même, 18 % des 141 sauts détectés dans les séries de températures minimales ont des amplitudes supérieures strictement à 1 °C. Alors, que pour les séries de températures maximales, ce pourcentage ne dépasse pas 3 %. Ce résultat suggère que

les températures minimales sont plus sensibles à certains événements d'origine anthropique, à savoir les déplacements de station. Or, nous savons que l'environnement immédiat d'un site de mesure (vallons, collines ou autres obstacles à l'écoulement de l'air) peut influencer les températures minimales dans certaines situations notamment lorsque les vents sont très faibles. Il en résulte que les températures minimales risquent d'être davantage influencées que les températures maximales lors du déplacement d'une station.

Tableau 4 : Nombre des sauts détectés par la technique MRL dans les séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction de leurs amplitudes

Cas	Amplitude absolue, A	Maximales annuelles	Minimales annuelles
1	$0 < A \leq 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	37	11
2	$0.2 < A \leq 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$	48	40
3	$0.4 < A \leq 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	20	36
4	$0.6 < A \leq 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	9	17
5	$0.8 < A \leq 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	1	12
6	$A > 1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	3	25
Nombre cumulé de sauts		118 sauts	141 sauts

Il est important de rappeler que les tableaux 3 et 4 ne constituent pas le résultat final du processus d'homogénéisation. En effet, on présente dans ces tableaux les sauts détectés par la technique d'homogénéisation MRL, qui constitue une étape parmi les quatre étapes du processus d'homogénéisation (section 2.5.2.1). En réalité, il existe un grand nombre de sauts qui doivent appartenir aux séries voisines. L'homogénéité de ces dernières est vérifiée dans les étapes subséquentes du processus d'homogénéisation.

Nous avons démontré dans l'exemple de la section 2.5.2.2 que le processus d'homogénéisation est complexe et que l'on doit prendre en compte, pour chaque station, plusieurs informations, dont les métadonnées. Ainsi, il serait trop long, dans le cadre de ce rapport, de présenter toutes les étapes du processus d'homogénéisation pour chacune des séries de températures maximales et minimales des 53 stations climatiques. Le tableau 5 présente le nombre de sauts retenus après la réalisation des quatre étapes du processus d'homogénéisation. On constate que le nombre des séries de températures homogènes a augmenté nettement par rapport à celui présenté dans le tableau 3. Ceci est expliqué en grande partie par le fait que plusieurs stations voisines utilisées

par la technique d'homogénéisation ne vérifient pas l'hypothèse d'homogénéité. Il faut également mentionner que certains sauts peuvent être rejetés s'ils ne sont pas supportés par les métadonnées, qui justifient leur présence réelle dans la série de base. C'est une stratégie relativement "prudente", car nous ne désirons pas sur ajuster une série de températures, qui peut être homogène.

Tableau 5 : Pourcentage des séries de températures maximales et minimales annuelles en fonction du nombre de sauts retenus après application du processus d'homogénéisation

Nombre de sauts	Maximales annuelles	Minimales annuelles
0	40 %	36 %
1	42 %	32 %
2	13 %	13 %
3	4 %	15 %
4	2 %	4 %

Le tableau 6 présente le pourcentage des sauts retenus à la fin du processus d'homogénéisation. Ces pourcentages sont présentés en fonction de la valeur des amplitudes des sauts retenus. A titre d'exemple, le processus d'homogénéisation a permis de retenir 67% et 80 % des sauts appartenant, respectivement, aux séries de températures maximales et minimales ayant une amplitude supérieure strictement à 1 °C. On rappelle qu'un saut d'amplitude supérieure à 1 °C est considéré comme un "saut important" et que celui-ci risque de fausser le comportement du signal climatique mesuré à la station.

Tableau 6 : Nombre des sauts retenus en fonction de leurs amplitudes à la fin du processus d'homogénéisation.

Cas	Amplitude absolue, A	Maximales annuelles	Minimales annuelles
1	$0 < A \leq 0.2$ °C	9	0
2	$0.2 < A \leq 0.4$ °C	<u>17</u>	9
3	$0.4 < A \leq 0.6$ °C	10	14
4	$0.6 < A \leq 0.8$ °C	7	13
5	$0.8 < A \leq 1.0$ °C	2	7

6	$A > 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	2	<u>20</u>
Nombre cumulé de sauts		47	63

L'examen du tableau 6 montre que les séries de températures maximales annuelles contiennent moins de sauts (47 sauts) comparativement aux séries de températures minimales annuelles (63 sauts). On constate également que les amplitudes des sauts retenus dans les séries de températures maximales annuelles sont généralement plus faibles que les sauts retenus dans les séries de températures minimales annuelles. En effet, le processus d'homogénéisation a permis de retenir dans le cas des températures maximales seulement 2 sauts dont l'amplitude est supérieure à $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, alors que 20 sauts, ayant des amplitudes supérieures à $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ont été retenus dans le cas des températures minimales. On constate, également, qu'un grand nombre de petits sauts (dont l'amplitudes $0 < A \leq 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) identifiés pas la technique d'homogénéisation MRL n'ont pas été retenus à la fin du processus d'homogénéisation. Finalement, la comparaison des résultats présentés dans les tableaux 4 et 6 montre des différences importantes, ce qui indique qu'un grand nombre de stations voisines ne sont pas homogènes.

2.5.2.4 Validation inter-station : analyse régionale

Le processus d'homogénéisation permet de filtrer les résultats obtenus par la technique MRL pour chaque station traitée individuellement. Il est important de comparer le comportement des stations homogénéisées qui se situent dans la même région climatique. Il s'agit donc d'examiner le comportement régional des séries homogénéisées. Cette étape est nécessaire afin de s'assurer que nous n'avons pas sur ajusté ou sous ajusté une série de températures donnée. En effet, le processus d'homogénéisation ne garantit pas, principalement quand les métadonnées sont incomplètes, que tous les sauts soient correctement identifiés. Pour cette raison, nous avons choisi de calculer les tendances sur la période 1960 à 2003 (période choisie pour ce projet) des séries de températures homogénéisées et de cartographier ces tendances afin d'identifier l'existence de séries, dont l'homogénéisation n'aurait pas été effectuée adéquatement. Ainsi, l'analyse régionale des tendances de températures nous permet d'identifier les cas problématiques, et au besoin de vérifier à nouveau, pour ces cas, les différentes étapes du processus d'homogénéisation.

Les résultats de l'analyse régionale des tendances calculées à partir des données de températures annuelles homogénéisées sont présentés au chapitre 3.

2.5.3 Homogénéisation des séries de températures mensuelles

2.5.3.1 Méthodologie

L'homogénéisation des températures mensuelles est réalisée en ajustant les données de températures mensuelles observées avant la date du saut par des facteurs de correction mensuels. Ces facteurs de correction sont calculés en prenant en considération la position des sauts et leurs amplitudes obtenues à partir de l'homogénéisation des séries de températures annuelles. Les facteurs de correction mensuels sont obtenus en utilisant la méthode d'estimation de l'amplitude d'un saut développée par Yagouti et Boulet (2004b). Cette méthode permet d'obtenir une estimation de l'amplitude d'un saut en connaissant sa position. On rappelle que les positions des sauts ont été identifiées à partir de l'homogénéisation des séries de températures annuelles (section 2.5.2).

Les facteurs de correction mensuels doivent satisfaire la condition suivante :

$$A^j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} FCM_i^j \quad (2)$$

où A^j est l'amplitude du saut j détecté dans la série de températures annuelle et FCM_i^j est le facteur de correction mensuel correspondant au mois i et au saut j .

Cette condition permet de conserver la cohérence entre les corrections appliquées aux séries des températures annuelles et mensuelles. Toutefois en pratique, les facteurs de corrections calculés à partir des séries mensuelles ne respectent pas toujours la condition décrite par l'équation 2. Ainsi, nous avons calculé l'erreur moyenne absolue associée à l'estimation des 12 facteurs de correction mensuels (correspondant aux 12 mois de l'année):

$$E_j = \left| \hat{A}^j - A^j \right| = \left| \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \hat{FCM}_i^j - A^j \right| \quad (3)$$

où $\hat{FCM}_i^j$ représente l'estimation du facteur de correction correspondant au mois i et au saut j , obtenue par la méthode d'estimation de l'amplitude.

Afin de respecter la condition décrite par l'équation 2, nous avons décidé de "répartir" cette erreur moyenne sur chaque facteur de correction mensuel selon la grandeur de son amplitude. Ainsi, nous définissons des poids W_i^j que nous devons attribuer à chaque facteur mensuel :

$$W_i^j = \frac{\hat{F}\hat{C}M_i^j}{\hat{A}^j}; \text{ tel que } \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} W_i^j = 1 \quad (4)$$

Chaque valeur du coefficient de correction mensuel doit être corrigé par la quantité suivante :

$$K_i^j = W_i^j E^j \quad (5)$$

Finalement, l'estimation d'un facteur de correction mensuel "ajusté" est égale à :

$$\hat{F}\hat{C}M_i'^j = \hat{F}\hat{C}M_i^j + K_i^j \quad (6)$$

Rappelons que cette procédure permet de conserver la cohérence entre corrections appliquées sur les séries mensuelles et annuelles. Ainsi, la moyenne de ces facteurs mensuels ajustés est égale à l'amplitude du saut j détecté à partir de la série des températures annuelles.

2.5.3.2 Exemple : cas de la station de Oka

Nous reprenons dans cette section le cas de la série des températures minimales de la station Oka, présenté dans la section 2.5.2.2. Rappelons que le processus d'homogénéisation nous a permis de retenir trois sauts dans la série des températures minimales (1963 avec une amplitude de 0.7 °C, 1968 avec une amplitude de -1.2 °C et 1988 avec une amplitude de 0.4 °C). A partir des positions des sauts et de leurs amplitudes, nous calculons les facteurs de correction mensuels correspondant aux 12 mois de l'année. Le tableau 7 présente les valeurs de ces facteurs relatifs aux trois sauts identifiés à partir de la série des températures minimales annuelles. L'analyse du tableau 7 montre que les facteurs de correction mensuels ne sont pas distribués selon une loi uniforme. Ainsi, les corrections apportées aux températures mensuelles diffèrent d'un mois à un autre. Ceci constitue un point fort de la méthode d'homogénéisation des températures mensuelles utilisée dans ce projet. En effet, l'influence d'origine anthropique du processus de mesure à la station climatique n'a pas le même impact sur la mesure réalisée au cours des différentes périodes de l'année.

Tableau 7 : Facteurs de correction mensuels calculés à partir des températures minimales mensuelles de la station de Oka

Saut (amplitude)*	1963 (0.7 °C)	1968 (-1.2 °C)	1988 (0.4 °C)
Mois	Facteurs de correction mensuels (en °C)		
1	0.5	-0.8	0.5
2	1.0	-1.3	0.2
3	0.5	-1.0	0.4
4	0.5	-0.9	0.7
5	0.8	-1.4	0.6
6	1.1	-1.5	0.8
7	0.9	-1.4	0.0
8	1.3	-1.8	0.8
9	0.7	-1.4	0.8
10	0.6	-1.1	0.5
11	0.5	-0.8	0.9
12	0.4	-1.2	0.8
Moyenne	0.7	-1.2	0.6

* : représente la position du saut détecté dans la série annuelle et l'amplitude de ce saut.

Les moyennes des facteurs de corrections mensuels correspondant aux sauts détectés en 1963 et en 1968 sont exactement égales aux amplitudes respectives de ces sauts estimées à l'échelle annuelle. Alors que la moyenne des facteurs de correction mensuels correspondant au saut détecté en 1988 est légèrement différente de l'amplitude de ce saut estimée à partir de la série des températures minimales annuelles. L'erreur moyenne absolue, donnée par l'équation (3), est égale à 0.2 °C. Puisque l'homogénéisation des températures mensuelles est basée sur l'hypothèse décrite par l'équation (2), alors, nous devons ajuster les facteurs de correction mensuels correspondant au saut de 1988 afin d'obtenir une erreur moyenne absolue nulle. Ainsi, on utilise la méthode de correction par les poids décrite par les équations (4) à (6) pour obtenir les facteurs de corrections mensuels ajustés, présentés dans le tableau 8. Pour des fins de comparaison, nous illustrons dans ce tableau les facteurs de correction correspondant au saut de 1988 sans ajustement (valeurs présentés dans le tableau 7) et les valeurs des facteurs de

correction ajustés. On constate que la moyenne de ces derniers facteurs est égale à l'amplitude du saut détecté en 1988 (0.4 °C) à partir de la série annuelle, et ainsi la condition décrite par l'équation 2 est bien respectée.

Tableau 8 : Facteurs de correction mensuels "ajustés" correspondant au saut 1988

Mois	Avant ajustement	Après ajustement
	Facteurs de correction mensuels (en °C) du saut 1988	
1	0.5	0.3
2	0.2	0.1
3	0.4	0.3
4	0.7	0.5
5	0.6	0.4
6	0.8	0.5
7	0.0	0.0
8	0.8	0.5
9	0.8	0.5
10	0.5	0.3
11	0.9	0.6
12	0.8	0.5
Moyenne	0.6	0.4

Une fois les facteurs de correction mensuels calculés et ajustés (au besoin), nous pouvons donc homogénéiser les séries des températures minimales mensuelles. Ceci nous permet également de calculer les séries de températures minimales saisonnières homogénéisées à partir des séries mensuelles homogénéisées.

2.5.3.3 Résultats de l'homogénéisation

Les facteurs de correction mensuels ont été calculés pour l'ensemble des séries de températures minimales et maximales mensuelles correspondant aux 53 stations retenues dans cette étude. Nous avons également ajustée les facteurs de correction quand la valeur de l'erreur moyenne absolue (équation 3) n'est pas égale à zéro. Par la suite, nous avons homogénéisé les

séries des températures mensuelles en utilisant les facteurs de correction mensuels relatifs à chaque saut détecté à partir des séries des températures annuelles.

Les figures 4 et 5 représentent la distribution de l'amplitude des facteurs de correction mensuels appliqués, respectivement, aux séries de températures mensuelles maximales et minimales. L'ensemble des constatations concernant l'analyse des amplitudes des sauts estimées à l'échelle des températures annuelles (tableau 6) reste valide dans le cas de l'homogénéisation des températures mensuelles. L'analyse des figures 4 et 5 montre également que la plus petite correction ($0 < A_m \leq 0.2^\circ\text{C}$) apportée aux séries des températures mensuelles maximales est effectuée durant les mois de janvier et de novembre, tandis que la plus grande correction ($A_m > 1.0^\circ\text{C}$) appliquée à ces séries est effectuée durant les mois de mai et décembre. Quant aux séries de températures mensuelles minimales, la plus petite correction touche le mois d'avril et la plus grande correction est effectuée durant le mois de février. Il est difficile d'associer ces constatations à des facteurs physiques ou anthropiques, ainsi, on considère que ces résultats sont propres au réseau des 53 stations retenues dans cette étude.

Dans la section 2.5.2, nous avons présenté les différentes étapes pour obtenir des séries de températures annuelles homogénéisées. Par la suite, nous avons présenté dans la section 2.5.3. une méthode pour homogénéiser les séries de températures mensuelles, en utilisant les résultats de l'homogénéisation des séries annuelles. Pour des fins de comparaison entre les séries annuelles et mensuelles homogénéisées, nous avons calculé la moyenne annuelle des données de températures mensuelles homogénéisées. Ces séries sont comparées avec les séries de températures annuelles homogénéisées obtenues à la section 2.5.2. Afin de faciliter cette comparaison, nous avons calculé, pour les deux séries de températures annuelles, la moyenne de températures de chaque station durant la période 1960 à 2003. La figure 6 présente les valeurs des moyennes de températures par station pour l'ensemble des 53 stations retenues dans cette étude. Il est à noter que dans la figure 6, la lettre (a) représente les températures maximales et la lettre (b) représente les températures minimales. L'analyse de ces deux figures montre clairement la cohérence entre les températures mensuelles homogénéisées et les températures annuelles homogénéisées.

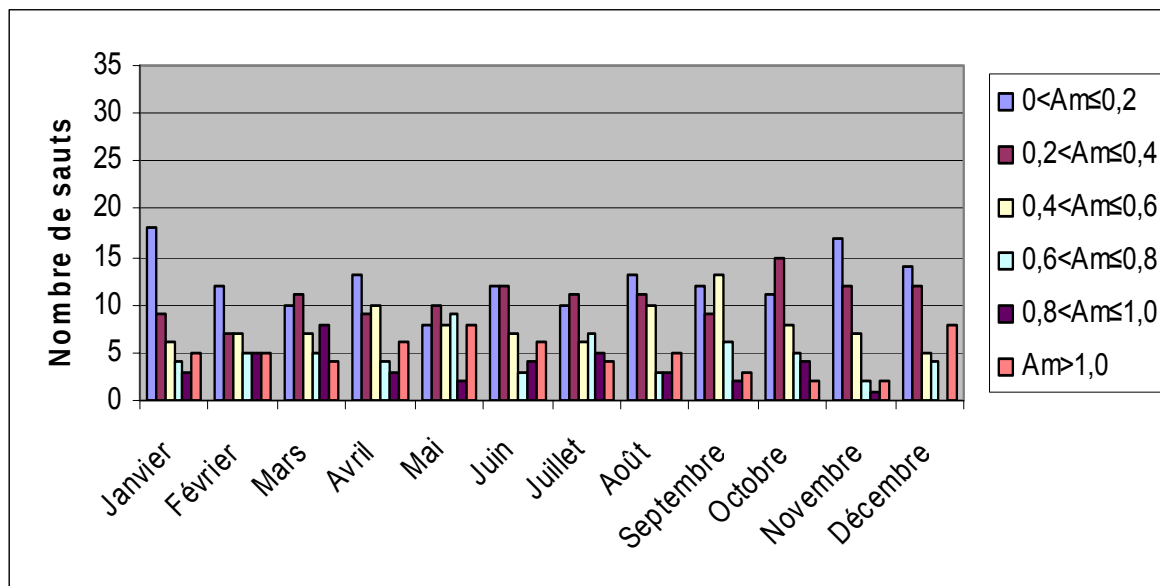


Figure 4 : Facteurs de correction mensuels appliqués aux températures mensuelles maximales (A_m étant l'amplitude absolue à l'échelle mensuelle du saut)

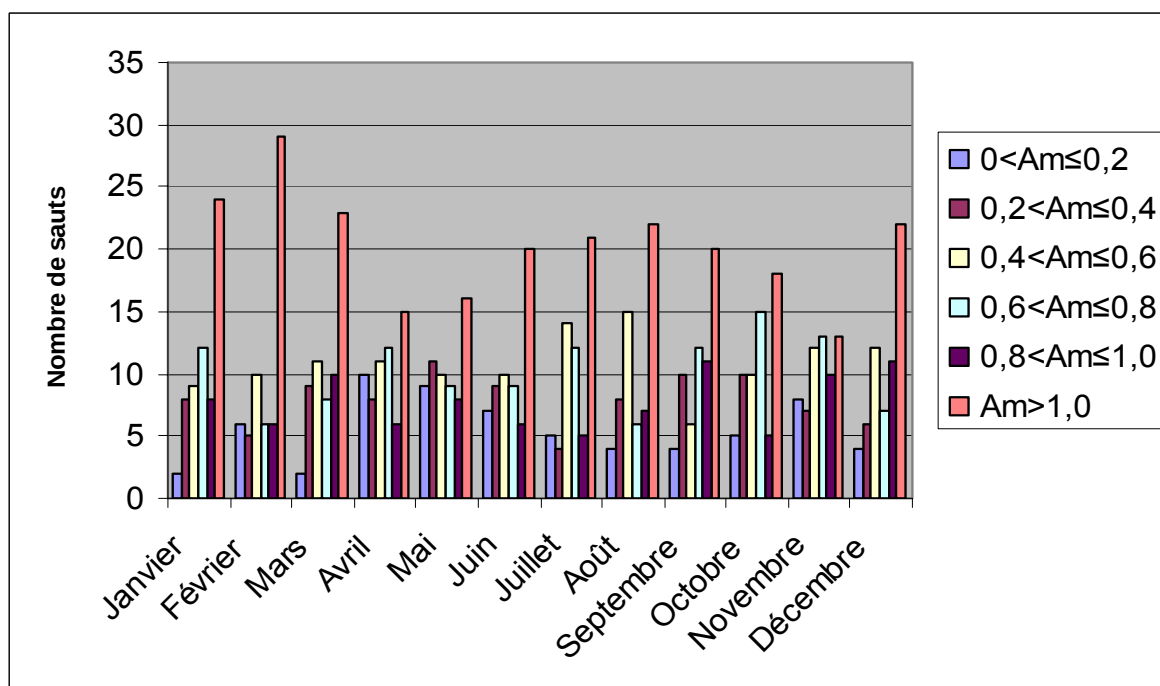


Figure 5 : Facteurs de correction mensuels appliqués aux températures mensuelles minimales (A_m étant l'amplitude absolue à l'échelle mensuelle du saut)

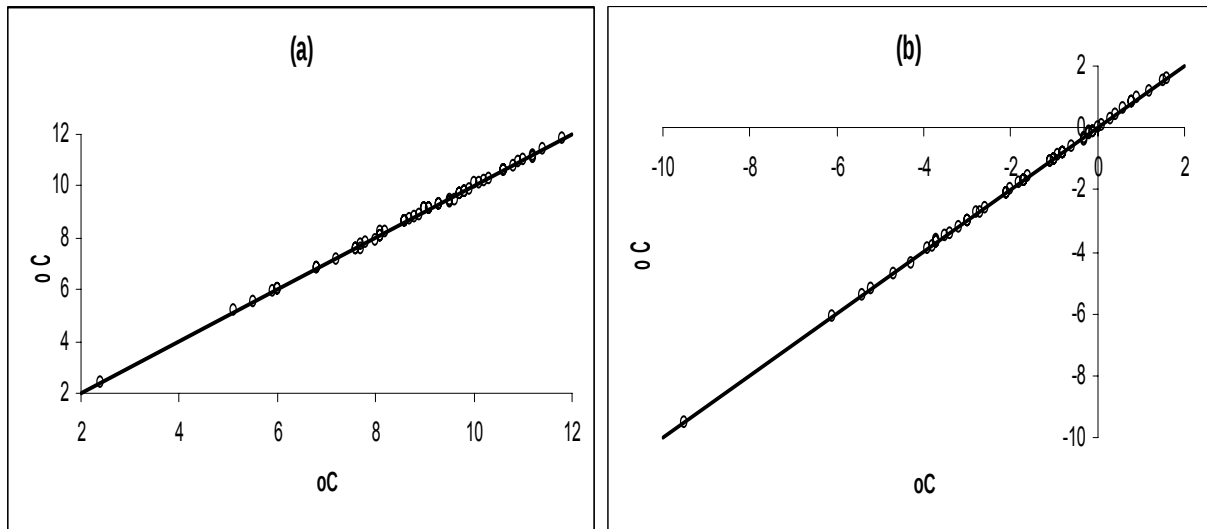


Figure 6 : Comparaison entre les températures annuelles calculés à partir des températures mensuelles homogénéisées et les températures annuelles homogénéisées par la technique MRL. (a) représente les températures maximales et (b) représente les températures minimales.

2.5.3.4 Validation inter-station : analyse régionale

Pour permettre une validation des séries mensuelles homogénéisées, nous aurions pu comparer les tendances des températures mensuelles pour des stations situées dans une région supposée climatiquement homogène. Cependant, nous avons jugé plus utile de réaliser cette étape en utilisant les données de températures saisonnières. Ce choix est justifié par deux raisons : la faible variabilité temporelle des températures saisonnières par rapport aux températures mensuelles et le temps alloué à l'analyse des températures saisonnières (8 cartes saisonnières à valider au lieu de 24 cartes correspondant aux données mensuelles). Ainsi, nous avons calculé les séries de températures minimales et maximales des saisons de l'hiver (moyenne des températures mensuelles des mois de décembre, janvier et février), du printemps (moyenne des températures mensuelles des mois de mars, avril et mai), de l'été (moyenne des températures mensuelles des mois de juin, juillet et août) et de l'automne (moyenne des températures mensuelles des mois de septembre, octobre et novembre). Les résultats de l'analyse régionale des tendances des séries saisonnières sont présentés au chapitre 3.

2.5.4 Homogénéisation des séries de températures quotidiennes

2.5.4.1 Méthodologie

L'homogénéisation des séries de températures quotidiennes découle des facteurs de correction mensuels calculés dans la section 2.5.3.1. Nous utilisons une méthode d'interpolation développée par Sheng et Zwiers (1998) et utilisée par Vincent et *al.* (2001) pour l'homogénéisation des séries de températures quotidiennes à l'échelle du Canada. Les étapes de cette méthode d'interpolation sont bien décrites dans ces deux travaux, ainsi, nous présentons seulement dans ce rapport le principe général de cette méthode. Les facteurs de correction quotidiens sont obtenus à partir des facteurs de correction mensuels en trois étapes :

- **Étape 1** : calculer des valeurs, dites facteurs cibles, à partir de la méthode développée par Sheng et Zwiers (1998). Les valeurs cibles sont obtenues en utilisant l'égalité matricielle suivante :

$$[A].[F_c]=[CFM] \quad (7)$$

où :

[CFM] représente le vecteur [1x12] des facteurs mensuels correspondant à un saut donné,

[F_c] représente un vecteur [1x12] des facteurs cibles correspondant à un saut donné. Chaque facteur cible représente le facteur de correction quotidien correspondant à la moitié d'un mois (figure 4),

[A] est une matrice tridiagonale d'interpolation [12x12] développée par Sheng et Zwiers (1998).

- **Étape 2** : A partir des facteurs cibles correspondant aux 12 mois de l'année, proposer un modèle de régression linéaire qui lie chaque deux valeurs consécutives des facteurs cibles. Ainsi, on estime les deux paramètres de chaque modèle linéaire qui couvre environ un mois de l'année.
- **Étape 3** : estimer à partir des modèles linéaires les facteurs de correction quotidiens relatifs à chaque journée de l'année (366 jours).

Finalement, l'homogénéisation des séries de températures quotidiennes est effectuée en ajustant les valeurs de températures quotidiennes brutes par les facteurs de corrections quotidiens, correspondant à chaque saut détecté à partir de la série des températures annuelles.

2.5.4.2 Exemple : cas de la station de Oka

La figure 7 présente les facteurs de correction mensuels correspondant au saut détecté en 1963 dans la série des températures minimales annuelles de la station Oka. Nous représentons également dans cette figure les valeurs cibles obtenues par la méthode d'interpolation présentée dans la section 2.5.4.1. Les points des valeurs cibles sont liés par un modèle linéaire simple. C'est à partir de cette droite entre deux points que nous calculons les facteurs de correction quotidiens. À titre d'exemple, la droite qui lie les valeurs cibles des mois de janvier et de février est utilisée pour estimer les facteurs de correction quotidiens pour les journées allant du 16 janvier au 15 février (du 16^{ème} jour julien au 46^{ème} jour julien).

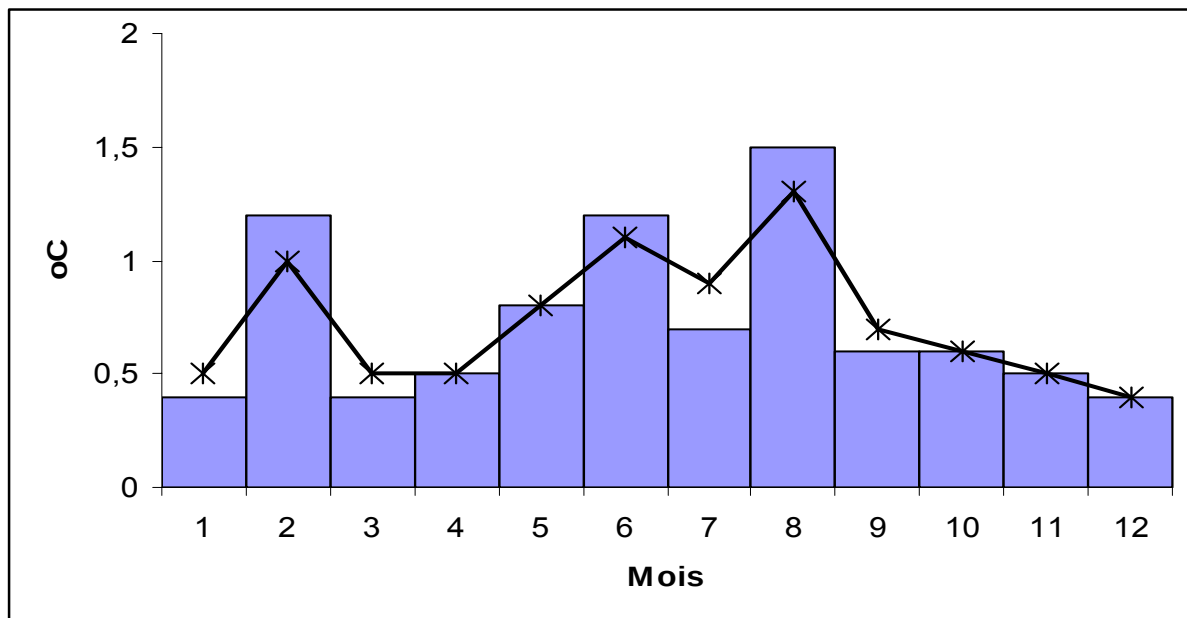


Figure 7 : Facteurs de correction mensuels (histogramme) et les facteurs de correction cibles (point-étoile) correspondant au saut détecté en 1963 à la station Oka.

2.5.4.3 Résultats de l'homogénéisation

Les facteurs de correction quotidiens ont été calculés pour l'ensemble des séries de températures minimales et maximales quotidiennes correspondant aux 53 stations retenues dans cette étude. Par la suite, nous avons homogénéisé les séries des températures quotidiennes en utilisant les facteurs de correction quotidiens relatifs à chaque saut détecté à partir des séries des températures annuelles.

Nous présentons dans les figures 8 à 11 la distribution de l'amplitude des facteurs de correction quotidiens appliqués aux séries de températures quotidiennes maximales et minimales. Dans ces figures, la lettre (a) représente les températures maximales et la lettre (b) représente les températures minimales. On constate clairement la cohérence existant entre les résultats représentés dans ces figures et ceux correspondant aux facteurs de correction mensuels (figures 4 et 5). Ainsi, on constate que les corrections appliquées aux données de températures quotidiennes maximales sont différentes de celles appliquées aux séries de températures quotidiennes minimales.

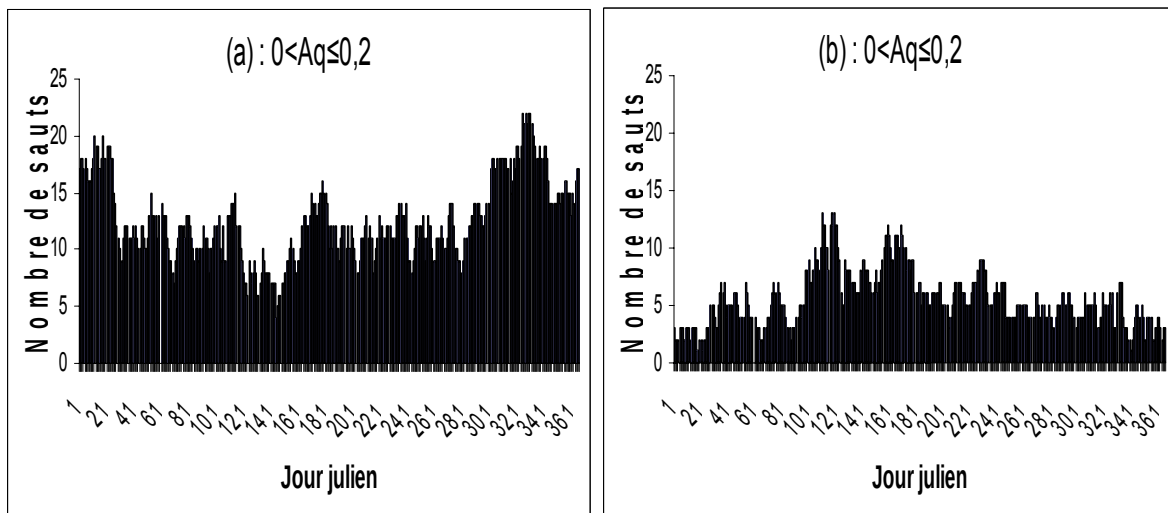


Figure 8 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0 et 0.2 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

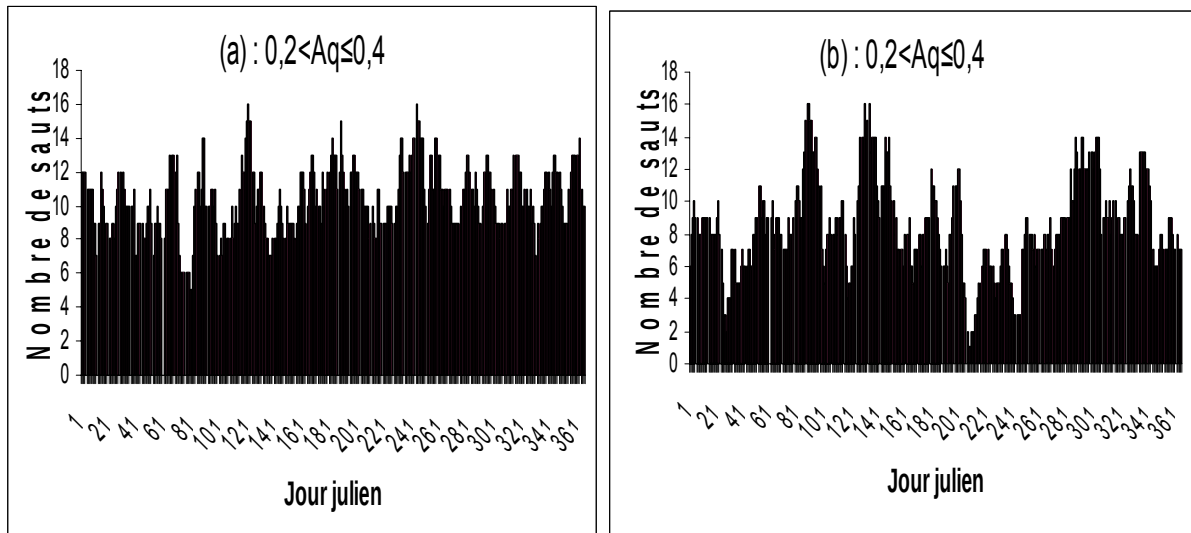


Figure 9 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.2 et 0.4 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

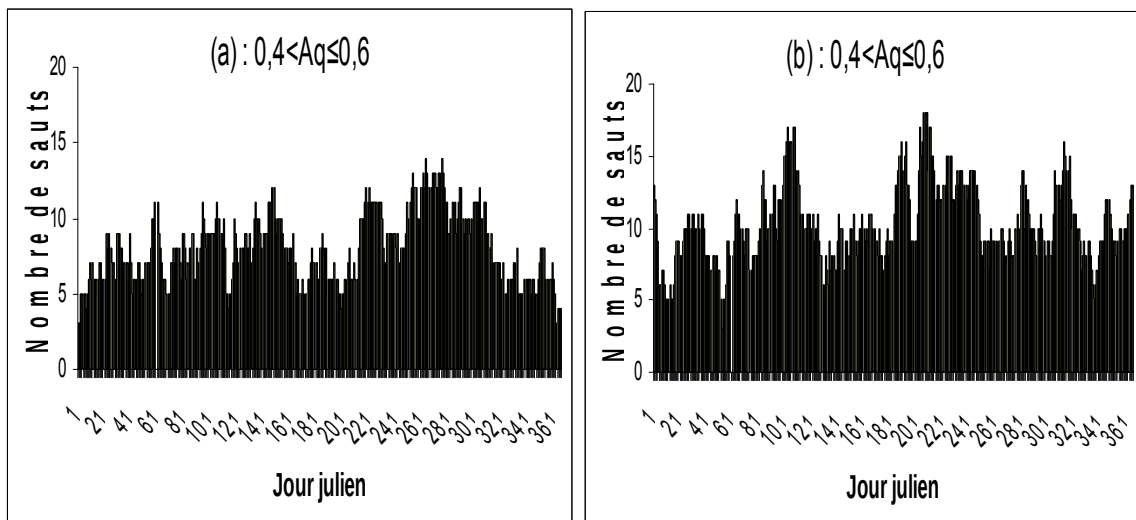


Figure 10 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.4 et 0.6 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

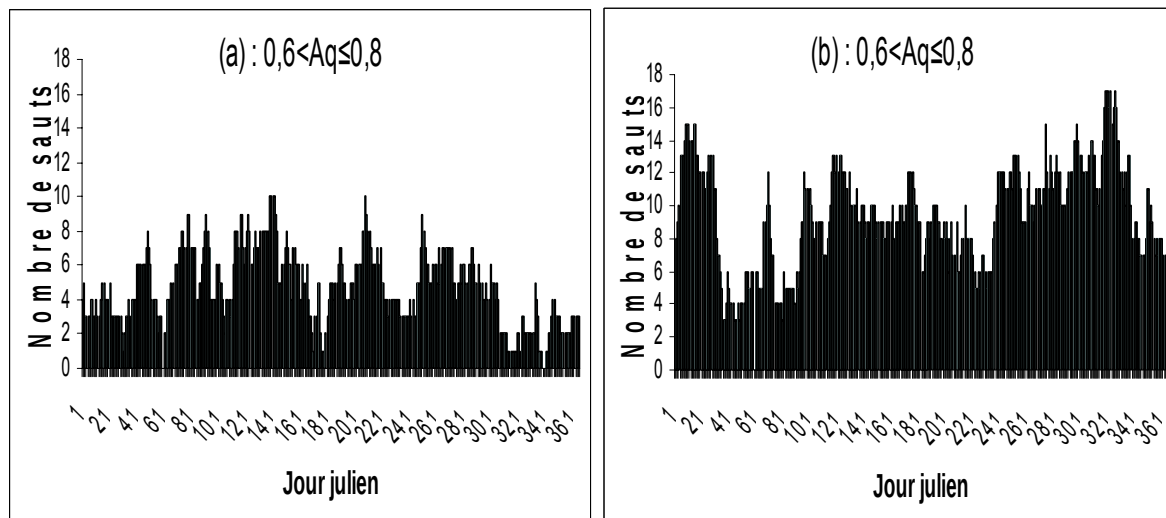


Figure 11 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.6 et 0.8 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

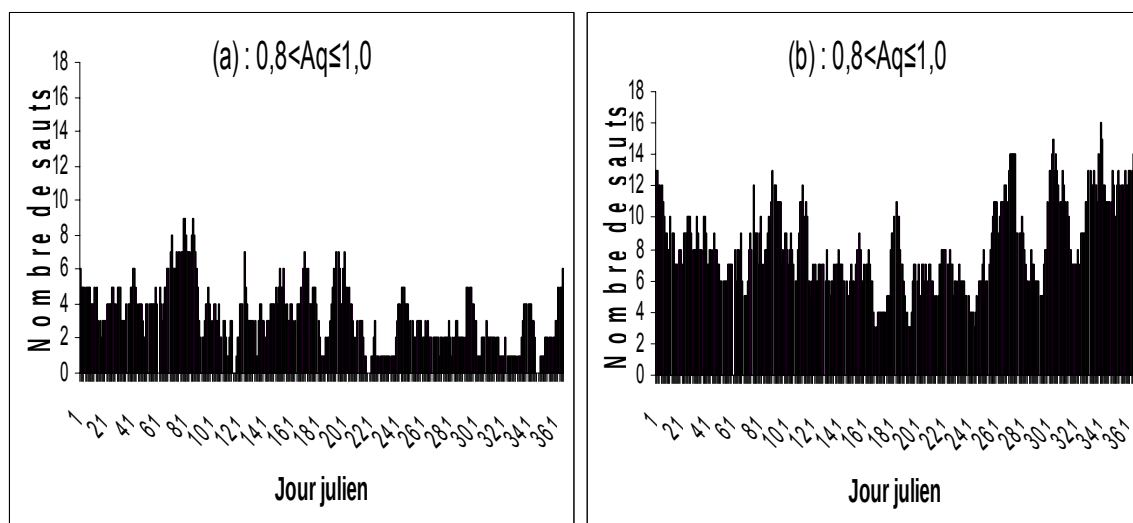


Figure 12 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , compris entre 0.8 et 1.0 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

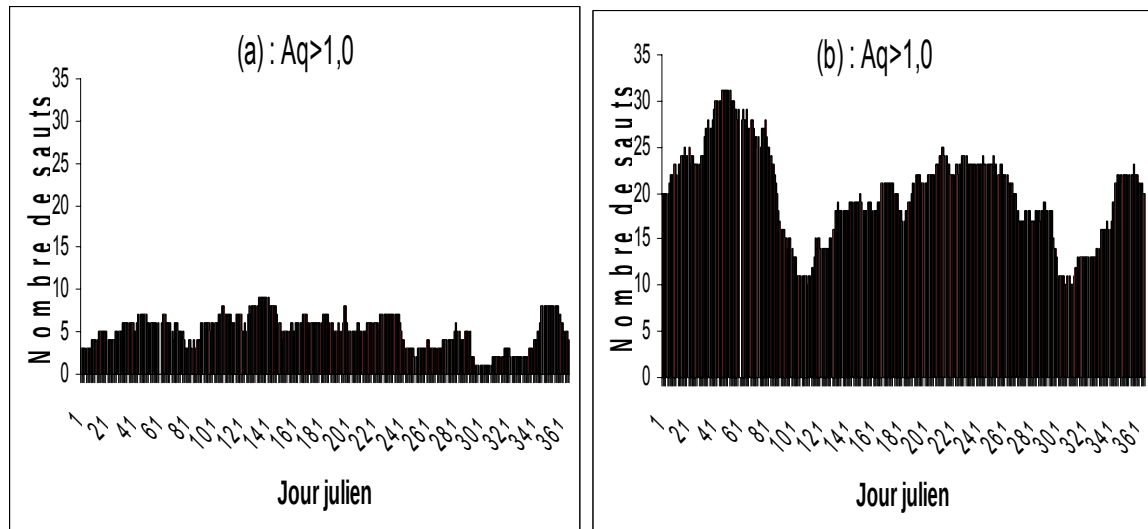


Figure 13 : Distribution du nombre de sauts correspondant aux facteurs de correction quotidiens, notés A_q , supérieurs à 1.0 °C pour les séries de températures maximales (a) et minimales (b).

Nous avons calculé la moyenne annuelle à partir des séries de températures quotidiennes maximales et minimales homogénéisées. Ces séries sont par la suite comparées avec les séries de températures annuelles homogénéisées obtenues dans la section 2.5.2. Cette comparaison nous permet de vérifier la cohérence entre l'homogénéisation des séries de températures quotidiennes et l'homogénéisation des séries de températures annuelles. Pour la comparaison, nous avons calculé la moyenne de températures par station, durant la période 1960 à 2003, en utilisant les deux séries annuelles homogénéisées. La figure 14 présente les valeurs des moyennes de températures par station pour l'ensemble des 53 stations retenues dans cette étude ((a) représente les résultats pour les températures maximales et (b) représente les résultats pour les températures minimales). L'analyse de cette figure montre clairement la cohérence entre l'homogénéisation des températures quotidiennes et des températures annuelles.

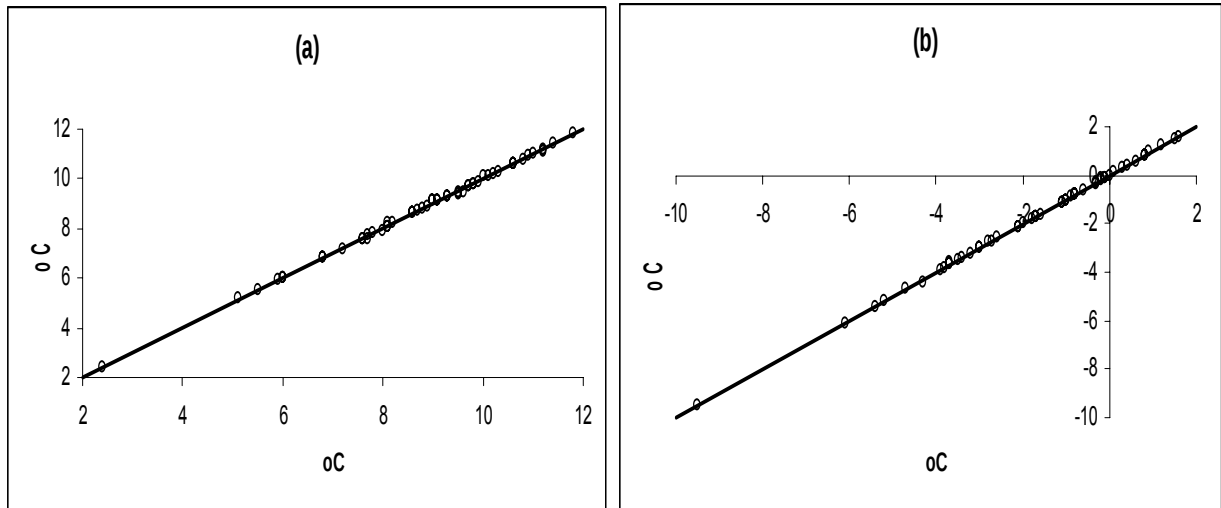


Figure 14 : Comparaison entre les températures annuelles calculées à partir des températures quotidiennes homogénéisées et les températures annuelles homogénéisées par la technique MRL (a) représente les températures maximales et (b) représentent les températures minimales.

2.5.4.4 Validation inter-station : analyse régionale par des indicateurs climatiques.

La validation inter-station des données de températures quotidiennes homogénéisées est une tâche très complexe, à cause de la grande variabilité présente dans ces séries de données. Ainsi, nous avons jugé plus utile d'analyser le comportement de quelques indicateurs climatiques, calculés à partir des températures quotidiennes homogénéisées durant la période 1960 à 2003. Les définitions des indicateurs retenus dans ce projet sont présentées dans le chapitre 3. Nous présentons également dans ce chapitre l'analyse régionale des tendances de chaque indicateur durant la période 1960 à 2003.

2.6 Conclusions

Nous avons retenu dans le cadre de ce projet 53 stations climatologiques, localisées au Québec méridional. Sachant que les métadonnées de plusieurs stations sont incomplètes avant 1960, nous nous sommes intéressés seulement aux stations de base ayant des observations entre 1960 et 2003. Ainsi, nous avons homogénéisé 106 séries de températures maximales et minimales à différentes échelles temporelles : quotidienne, mensuelle, saisonnière et annuelle. Les résultats du processus d'homogénéisation ont montré que seulement 36 % des 106 séries de températures sont homogènes.

L'analyse régionale des tendances calculées à partir des séries homogénéisées durant la période 1960 à 2003 permet de valider les résultats obtenus par le processus d'homogénéisation. Les résultats finaux de cette analyse sont présentés dans le chapitre 3. Une seule station a été retirée de la base de données des 53 stations retenues initialement, il s'agit de la station de Gaspé. En effet, l'homogénéisation des données de cette station a été compliquée par plusieurs facteurs, à savoir le grand nombre de valeurs manquantes qui ont dû être estimées et le faible nombre de stations voisines. De plus, la consultation du dossier de cette station a également révélé que cette dernière a été déplacée à plusieurs reprises (12 localisations du site entre 1965 et 1996).

Finalement, il est important de mentionner que le processus d'homogénéisation est un processus complexe, qui ne se limite pas seulement à l'application d'une technique statistique pour obtenir une série de températures homogénéisée. Ainsi, chaque station a des particularités, qui lui sont propres, et dont il faut absolument tenir compte lors de l'homogénéisation.

3 ANALYSE RÉGIONALE DES TEMPÉRATURES HOMOGÉNÉISÉES ET DE LEURS INDICATEURS DÉRIVÉS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'analyse régionale de la tendance des températures annuelles et saisonnières homogénéisées. Nous analysons également le comportement régional de la tendance des indicateurs climatiques calculés à partir des séries de températures quotidiennes homogénéisées. Les résultats présentés dans ce chapitre constituent un moyen important pour valider et compléter le processus d'homogénéisation présenté dans le chapitre précédent. En effet, nous examinons dans les différentes régions du Québec méridional l'évolution temporelle de chaque indicateur durant la période 1960 à 2003.

Les tendances ont été calculées par la méthode non paramétrique de Sen (Sen, 1968) et leur degré de signification a été calculé en utilisant le test non paramétrique de Mann-Kendall (Mann, 1945 et Kendall, 1975).

3.2 Indicateurs calculés à partir des données annuelles

Nous avons examiné l'évolution de trois indicateurs climatiques calculés à partir des données de températures annuelles homogénéisées. Il s'agit de la :

1. tendance des températures maximales annuelles de 52 stations climatiques durant la période 1960 à 2003;
2. tendance des températures minimales annuelles de 52 stations climatiques durant la période 1960 à 2003;
3. tendance des températures annuelles moyennes de 52 stations climatiques durant la période 1960 à 2003.

3.3 Indicateurs calculés à partir des données saisonnières

Nous avons examiné l'évolution de deux indicateurs climatiques calculés à partir des données saisonnières homogénéisées. Il s'agit de la :

1. tendance des températures maximales observées durant les quatre saisons de l'année : l'hiver, le printemps, l'été et l'automne. La tendance est estimée pour chacune des 52 stations climatiques durant la période 1960 à 2003.

2. tendance des températures minimales observées durant les quatre saisons de l'année : l'hiver, le printemps, l'été et l'automne. La tendance est estimée pour chacune des 52 stations climatiques durant la période 1960 à 2003.

La température moyenne de l'hiver de l'année A_1 est calculée en effectuant la moyenne de la température du mois de décembre de l'année (A_1-1), de la température du mois de janvier de l'année A_1 et de la température du mois de février de l'année A_1 . La température moyenne du printemps de l'année A_1 est calculée en effectuant la moyenne des températures des mois de mars, avril et mai de l'année A_1 . La température moyenne de l'été de l'année A_1 est calculée en effectuant la moyenne des températures des mois de juin, juillet et août de l'année A_1 . La température moyenne de l'automne de l'année A_1 est calculée en effectuant la moyenne des températures des mois de septembre, octobre et novembre de l'année A_1 .

3.4 Indicateurs calculés à partir des données quotidiennes

Nous avons examiné, pour chacune des 52 stations retenues, l'évolution de 14 indicateurs climatiques calculés à partir des données quotidiennes homogénéisées. Il s'agit des indicateurs suivants :

1. Percentiles 10 et 90 en °C des températures maximales durant les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne. L'analyse du comportement de ces percentiles nous donne une idée de l'évolution des valeurs extrêmes des températures maximales (les queues de la distribution de la température maximale) durant la période 1960 à 2003.
2. Percentile 98 en °C des températures maximales durant la saison de l'été. L'examen de cet indicateur nous permet d'analyser indirectement l'évolution des événements extrêmes de chaleur en été durant la période 1960 à 2003.
3. Percentiles 10 et 90 en °C des températures minimales durant les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne. L'analyse du comportement de ces percentiles nous donne une idée de l'évolution des valeurs extrêmes des températures minimales (les queues de la distribution de la température minimale) durant la période 1960 à 2003.
4. Percentile 2 en °C des températures minimales durant la saison de l'hiver. L'examen de cet indicateur nous permet d'analyser indirectement l'évolution des événements extrêmes de froid en hiver durant la période 1960 à 2003.
5. Écart diurne moyen en °C durant les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne : l'écart diurne moyen saisonnier est obtenu en calculant la moyenne de toutes

- les différences entre les températures quotidiennes maximales et minimales pour une saison donnée. Cet indicateur nous permet d'examiner si l'augmentation ou la diminution des températures minimales et maximales s'est effectuée avec une même amplitude durant la période 1960 à 2003.
6. Longueur de la saison de croissance en jours : le début de la saison de croissance est la date du début de la première séquence où la température quotidienne moyenne est supérieure strictement à 5 °C pendant au moins 6 jours. La fin de la saison de croissance est la date du début de la première séquence où la température quotidienne moyenne est inférieure strictement à 5 °C pendant au moins 6 jours. Grâce à cet indicateur, on s'intéresse à la période de croissance de la végétation.
 7. Longueur de la saison de gel soutenu en jours : le début de la saison de gel soutenu est la date du début de la première séquence où la température quotidienne moyenne est inférieure strictement à 0 °C pendant au moins 6 jours. La fin de la saison de gel soutenu est la date du début de la première séquence où la température quotidienne moyenne est supérieure strictement à 0 °C pendant au moins 6 jours.
 8. Longueur de la saison de gel non soutenu en jours : le début de la saison de gel non soutenu correspond à la date de la première journée où la température quotidienne minimale est inférieure strictement à 0 °C. La fin de la saison de gel non soutenu correspond à la date de la première journée où la température quotidienne minimale est supérieure strictement à 0 °C.
 9. Le nombre de jours où il y a eu gel et dégel dans la même journée en jours : une journée de gel et dégel est observée lorsque, dans la même journée, la température quotidienne maximale dépasse le point de congélation et la température quotidienne minimale reste au dessous du point de congélation. Le nombre de jours de gel et dégel est calculé pour les saisons de l'hiver, du printemps et de l'automne. Cet indicateur peut être d'un grand intérêt pour illustrer la pression climatique subie par les infrastructures (i.e. routières, des hydrauliques etc) ou les risques d'inondations par embâcles.
 10. La durée en jours et la fréquence (nombre de séquences) de la vague de froid : une vague de froid correspond à une séquence d'au moins trois jours consécutifs où la température quotidienne minimale est inférieure à la température quotidienne minimale normale (1971-2000) moins 5 °C.

11. Le cumul annuel des degrés-jours en °C au dessus de 5 °C : la valeur des degrés-jours pour une journée donnée est obtenue en calculant la différence entre la température quotidienne moyenne et la température de référence (dans ce cas 5 °C). Si la différence est négative, alors la valeur des degrés-jours de cette journée est nulle. Cet indicateur permet d'analyser l'évolution de la quantité totale de chaleur disponible lors de la saison de croissance de la végétation.
12. Le cumul annuel des degrés-jours en °C au dessus de 22 °C : la valeur des degrés-jours pour une journée donnée est obtenue en calculant la différence entre la température quotidienne moyenne et la température de référence (dans ce cas 22 °C). Si la différence est négative, alors la valeur des degrés-jours de cette journée est nulle. Cet indicateur permet d'analyser l'évolution de la demande en énergie pour des besoins en climatisation.
13. Le cumul annuel des degrés-jours en °C au dessous de 0 °C : les degrés-jours pour une journée donnée est obtenue en calculant la différence entre la température de référence (dans ce cas 0 °C) et la température quotidienne moyenne. Si la différence est négative, alors la valeur des degrés-jours de cette journée est nulle.
14. Le cumul annuel des degrés-jours en °C au dessous de 18 °C : la valeur des degrés-jours pour une journée donnée est obtenue en calculant la différence entre la température de référence (dans ce cas 18 °C) et la température quotidienne moyenne. Si la différence est négative, alors la valeur des degrés-jours de cette journée est nulle. Cet indicateur permet d'analyser l'évolution de la demande en énergie pour les besoins de chauffage des bâtiments.

3.5 Traitement des valeurs manquantes

Un grand nombre des valeurs quotidiennes manquantes présentes dans les séries de températures maximales et minimales des 52 stations ont été estimées par la méthode développée par Yagouti et Boulet (2003). Toutefois, il reste toujours un nombre restreint de valeurs quotidiennes manquantes non estimées et ceci pour deux raisons. La première est l'absence d'observations aux stations voisines la journée qui correspond à la date de la valeur quotidienne manquante de la série de base. La seconde raison découle de la méthode d'estimation des valeurs manquantes. Dans certaines situations, l'incertitude de l'estimation est

relativement élevée et dans ce cas, on préfère garder la valeur manquante au lieu de la remplacer par une estimation de qualité "douteuse" (Yagouti et Boulet, 2003 et Yagouti et *al.* 2006).

La présence des valeurs manquantes constitue un handicap majeur pour le calcul des indicateurs climatiques. Dans notre cas, nous disposons de séries de températures quotidiennes avec un très faible pourcentage de valeurs manquantes. Toutefois, il est quand même nécessaire de prendre en considération le nombre et la répartition de ces valeurs lors du calcul de chaque indicateur climatique. A titre d'exemple, la valeur de la longueur de la saison de croissance n'est pas influencée par la présence d'un grand nombre de valeurs manquantes durant l'été ou l'hiver. En effet, le début et la fin de la saison de croissance sont, respectivement, enregistrés au cours du printemps et de l'automne. Donc, la longueur de la saison de croissance ne dépend que de ces deux dates, et par la suite la présence de valeurs manquantes en été, par exemple, n'a aucun impact sur le calcul de la valeur de cet indicateur.

Le tableau 9 résume les différents traitements que nous avons retenus pour minimiser l'impact de la présence des valeurs manquantes lors du calcul de chaque indicateur climatique.

Tableau 9 : Traitement des valeurs manquantes lors du calcul des indicateurs climatiques.

N.	Indicateur	Traitement
1	Percentiles 10 et 90 de tmax (en °C) (saisonnier*)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne maximale.
2	Percentile 98 de tmax (en °C) (été)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne maximale.
3	Percentiles 10 et 90 de tmin (en °C) (saisonnier*)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne minimale.
4	Percentile 2 de tmin (en °C) (Hiver)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne minimale.
5	Vague de froid : durée (en jour) et fréquence (nombre des séquences) (Hiver* et printemps)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne minimale.
6	Indice de gel/dégel (en jours) (mensuel ou saisonnier*)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne moyenne.
7	Longueur de saison de croissance (en jours) (annuelle).	Connaissant les dates du début et de fin de la période de croissance, on dénombre durant les 30 jours précédant chacune de ces dates le nombre de valeurs manquantes (VM). Si ce nombre est inférieur ou égale à 5 jours dans chaque cas, alors la valeur de la période de croissance est retenue. Sinon, voir la figure 15.
8	Longueur de la saison de gel soutenu (en jours) (annuelle mais en utilisant deux années consécutives)	Connaissant les dates du début et de fin de la saison de gel soutenu, on dénombre durant les 30 jours précédant chacune de ces dates le nombre de valeurs manquantes (VM). Si ce nombre est inférieur ou égale à 5 jours dans chaque cas, alors la valeur de la saison de gel soutenu est retenue. Sinon, voir la figure 16.
9	Longueur de la saison de gel non soutenu (en jours) (annuelle mais en utilisant deux années consécutives)	Connaissant les dates du début et de fin de la saison de gel non soutenu, on dénombre durant les 30 jours précédant chacune de ces dates le nombre de valeurs manquantes (VM). Si ce nombre est inférieur ou égale à 5 jours dans chaque cas, alors la valeur de la saison de gel non soutenu est retenue. Sinon, voir la figure 16.
10	Cumul de degrés jours (en °C) <0 °C (annuelle)	Remplacer la valeur manquante par la normale quotidienne 1971-2000. Les températures observées durant la période de novembre à fin mars (5 mois) sont importantes pour le calcul de cet indicateur. Ainsi, on tolère la présence d'un maximum de 25 jours manquants pendant cette période (5 jours manquants par mois, dont les températures sont estimées par les normales quotidiennes). Les valeurs manquantes hors cette période auront peu d'impact sur la valeur de l'indicateur.

11	Cumul de degrés jours (en °C) >5 °C (annuelle)	Remplacer la valeur manquante par la normale quotidienne 1971-2000. Les températures observées durant la période de avril à fin octobre (7 mois) sont importantes pour le calcul de cet indicateur. Ainsi, on tolère la présence d'un maximum de 35 jours manquants pendant cette période (5 jours manquants par mois, dont les températures sont estimées par les normales quotidiennes). Les valeurs manquantes hors cette période auront peu d'impact sur la valeur de l'indicateur.
12	Cumul de degrés jours (en °C) <18 °C (annuelle)	Remplacer la valeur manquante par la normale quotidienne 1971-2000. Les températures observées durant la période de octobre à fin avril (7 mois) sont importantes pour le calcul de cet indicateur. Ainsi, on tolère la présence d'un maximum de 35 jours manquants pendant cette période (5 jours manquants par mois, dont les températures sont estimées par les normales quotidiennes). Les valeurs manquantes hors cette période auront peu d'impact sur la valeur de l'indicateur.
13	Cumul de degrés jours (en °C) >22 °C (annuelle)	Remplacer la valeur manquante par la normale quotidienne 1971-2000. Les températures observées durant la période de juin à septembre mars (4 mois) sont importantes pour le calcul de cet indicateur. Ainsi, on tolère la présence d'un maximum de 20 jours manquants pendant cette période (5 jours manquants par mois, dont les températures sont estimées par les normales quotidiennes). Les valeurs manquantes hors cette période auront peu d'impact sur la valeur de l'indicateur.
14	Écart diurne (en °C) (saisonnier)	La valeur de l'indice est manquante, si un des mois de la saison a plus que 5 valeurs manquantes de la température quotidienne moyenne.

* L'indicateur correspondant à la saison de l'hiver de l'année A_1 est calculée en utilisant les données du mois de décembre de l'année précédente à A_1 et des mois de janvier et février de l'année A_1 .

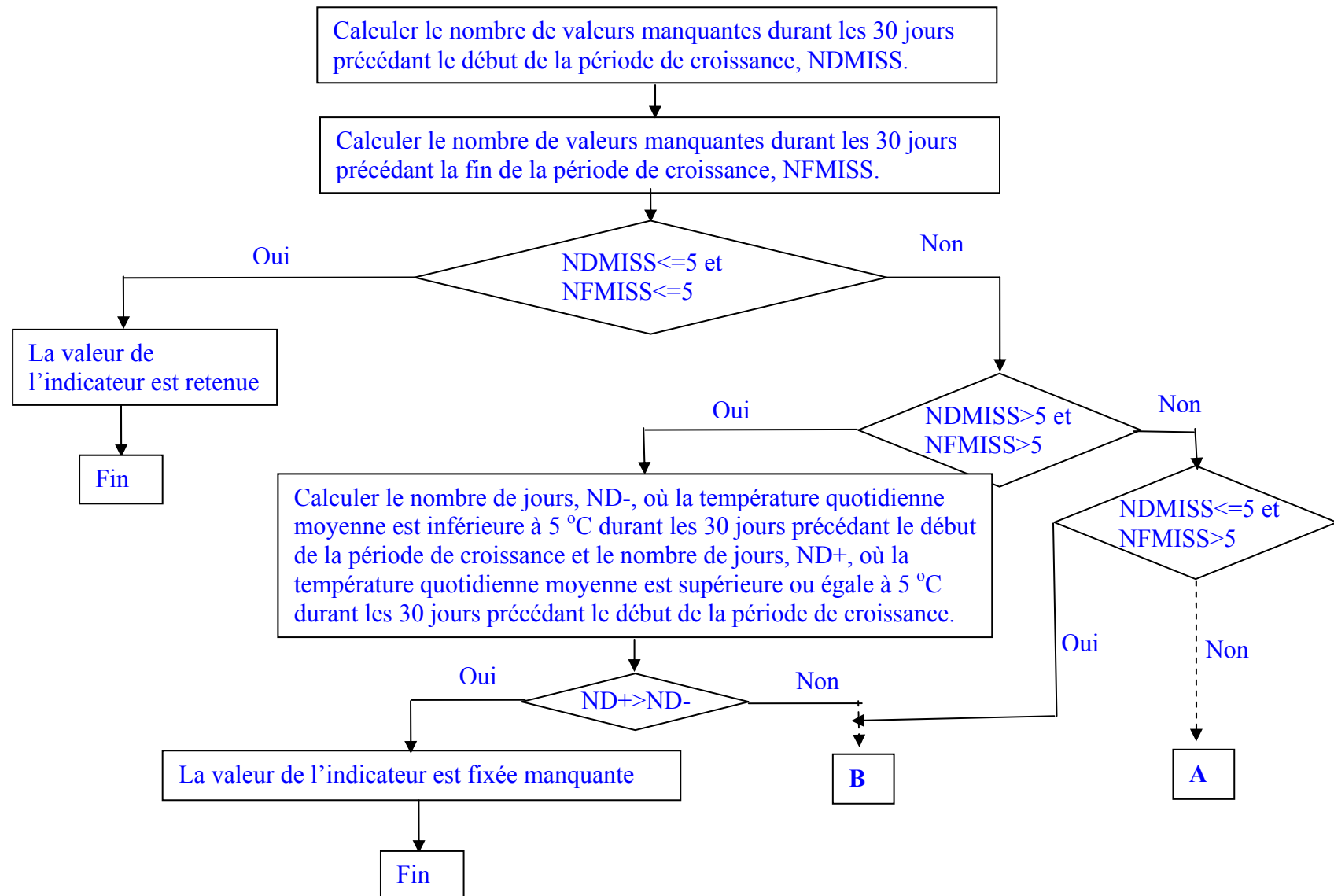


Figure 15 : Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de croissance

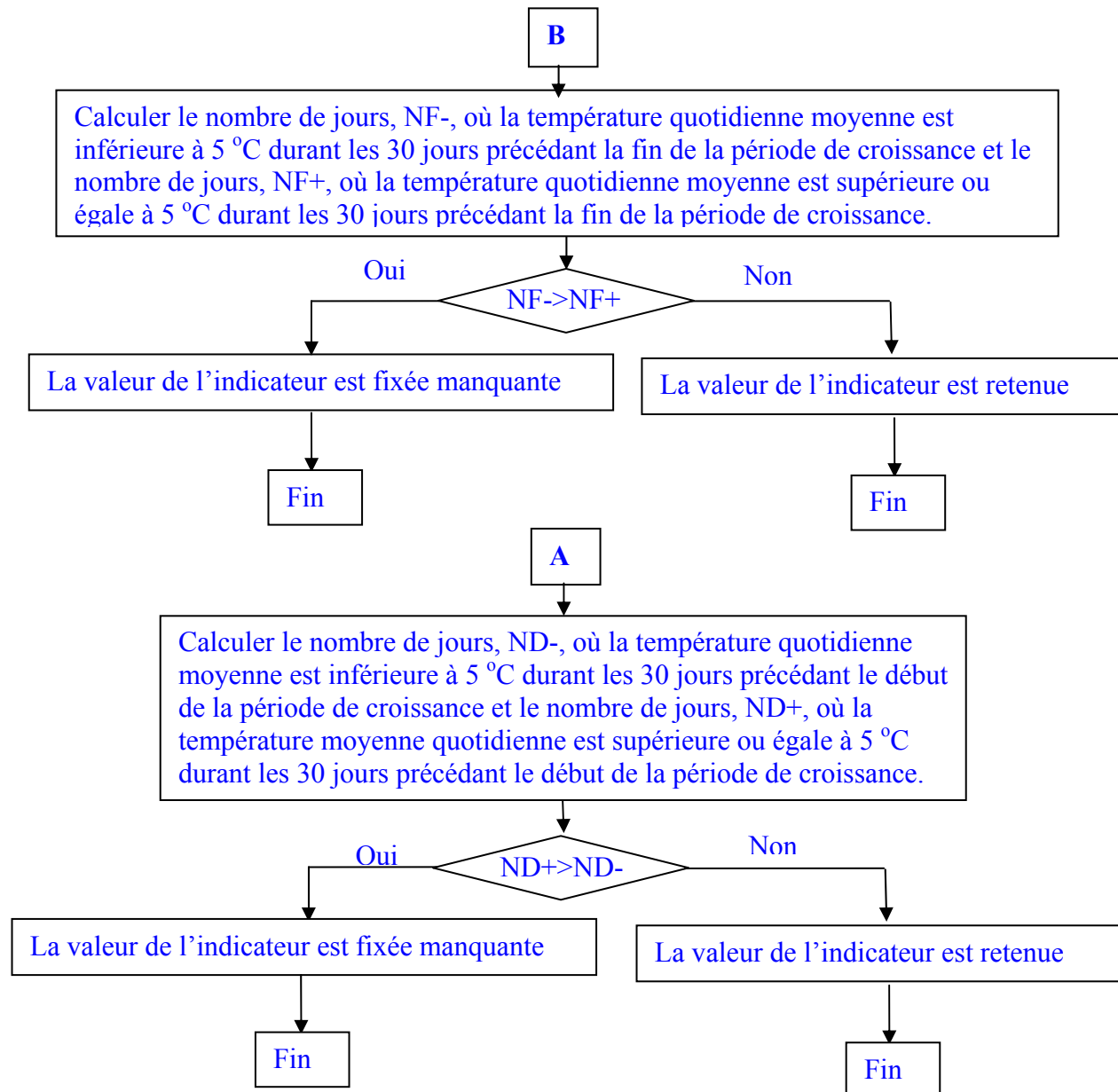
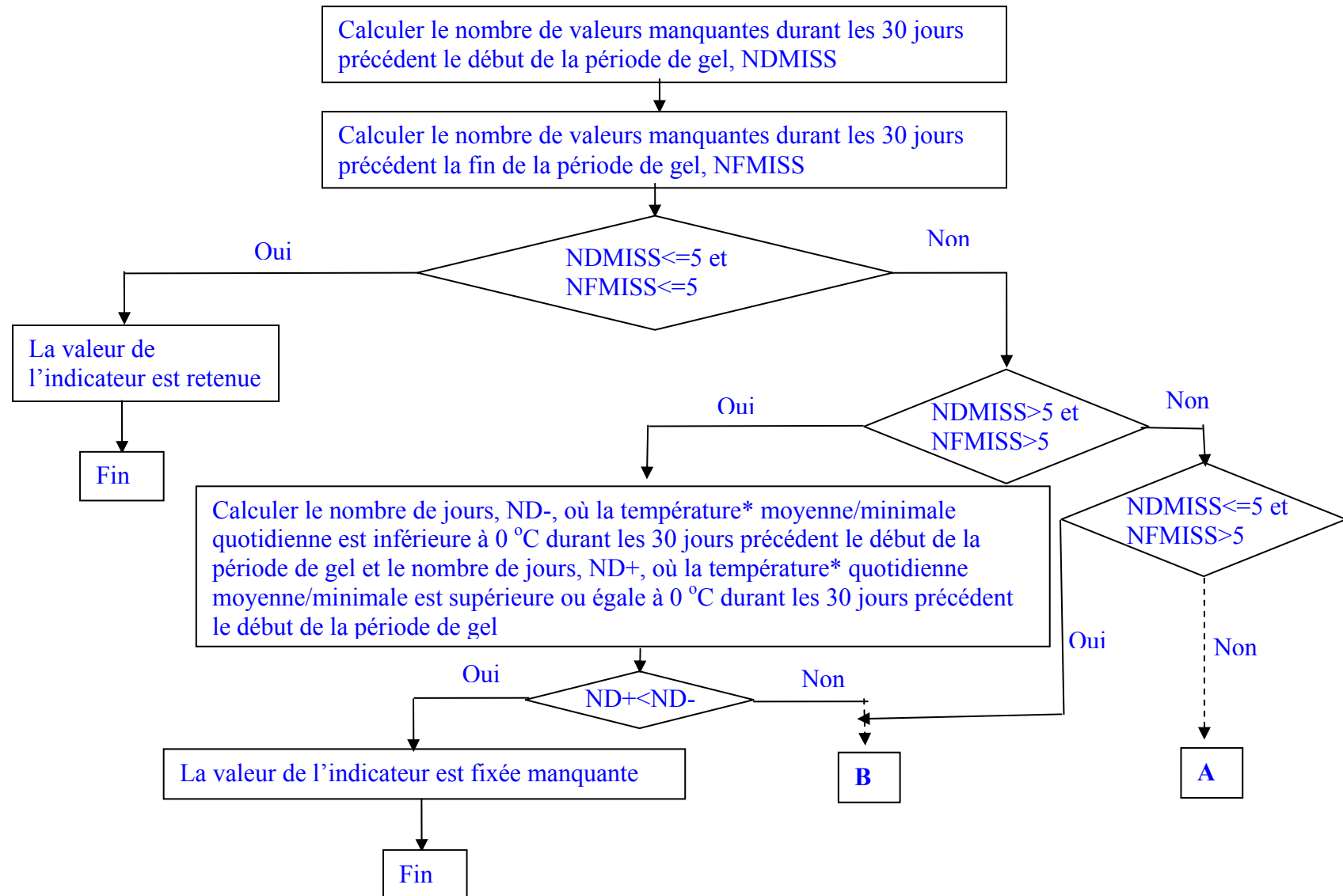
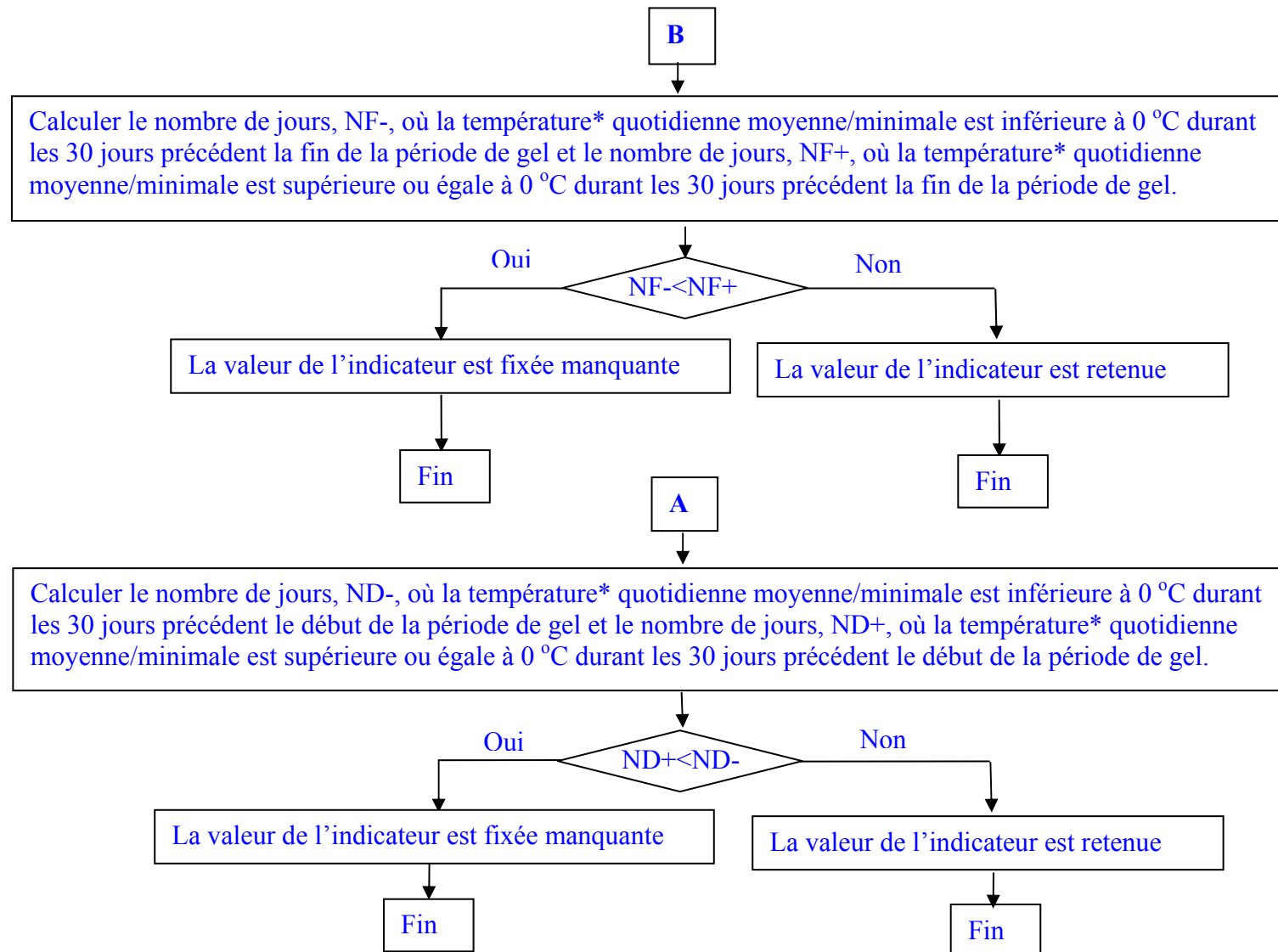


Figure 15 (suite) : Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de croissance



* : Nous utilisons la température quotidienne moyenne dans le cas de la saison de gel soutenu et la température quotidienne minimale dans le cas de la saison de gel non soutenu.

Figure 16 : Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de gel soutenu et de la longueur de la saison de gel non soutenu.



* : Nous utilisons la température quotidienne moyenne dans le cas de la saison de gel soutenu et la température quotidienne minimale dans le cas de la saison de gel non soutenu.

Figure 16 (suite): Traitement des valeurs manquantes pour le calcul de la longueur de la saison de gel soutenu et de la longueur de la saison de gel non soutenu.

3.6 Résultats

Nous présentons en trois sections les résultats de l'analyse des tendances des indicateurs calculés à partir des températures annuelles, des températures saisonnières et des températures quotidiennes.

3.6.1 Résultats : indicateurs calculés à l'échelle annuelle

Le tableau 10 présente la liste des indicateurs calculés à partir des températures annuelles homogénéisées. Il s'agit de la tendance des températures maximales annuelles, minimales annuelles et moyennes annuelles durant la période 1960 à 2003. Tel que indiqué dans la section 3.1, les tendances ont été estimées par la méthode de Sen et la signification statistique de chaque valeur de la tendance estimée est vérifiée par le test de Mann-Kendall. Nous avons fixé, pour ce test, deux niveaux de signification $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$.

Tableau 10 : Liste des indicateurs calculés à partir des données annuelles

Indice	Unité
Tendances des températures maximales annuelles.	°C/44 ans
Tendances des températures minimales annuelles.	°C/44 ans
Tendances des températures moyennes annuelles.	°C/44 ans

Nous résumons dans le tableau 11 les résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux valeurs des tendances correspondant aux 52 stations retenues. Ainsi, on dénombre les stations dont les séries de températures annuelles présentent, aux niveaux de signification 5% et 10%, une tendance négativement significative, positivement significative ou non significative. À un niveau de signification égal à 5%, 29 séries des températures minimales annuelles (56% des stations) et 16 séries de températures maximales annuelles (31% des stations) affichent des tendances à la hausse statistiquement significatives. Lorsque le niveau de signification est fixé à 10%, le nombre de séries des températures maximales annuelles ayant une tendance statistiquement significative est passé à 26 stations (augmentation de 20% par rapport aux résultats obtenus avec un niveau $\alpha=5\%$). Le nombre de séries des températures minimales annuelles ayant une tendance statistiquement

significative à un niveau $\alpha=10\%$ est égal à 31 stations. Ce qui constitue une légère augmentation de 4% par rapport aux résultats obtenus avec un niveau $\alpha=5\%$.

La tendance des températures moyennes annuelles est statistiquement significative au niveau de signification $\alpha=5\%$ à 22 stations (42 % des séries). Ce nombre passe à 34 stations en fixant le niveau de signification égal à 10%, ce qui constitue une augmentation de 23 % par rapport au résultat obtenu avec le niveau de signification $\alpha=5\%$.

L'analyse du tableau 11 montre également que les tendances significatives sont toutes positives, c'est-à-dire qu'on observe à ces stations une tendance à la hausse des températures annuelles (maximales, minimales et moyennes) durant la période 1960 à 2003. Nous avons également constaté que, si l'on considère uniquement les résultats au niveau de signification de 5%, les stations dont les températures minimales annuelles présentent des tendances significatives sont environ deux fois plus nombreuses que celles qui présentent des tendances significatives des températures maximales annuelles. Toutefois, cette différence tend à disparaître lorsqu'on fixe le niveau de signification α à 10% (31 versus 26 stations).

Tableau 11 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des températures annuelles (niveaux de signification 5% et 10%)

Indice	Négative ⁽¹⁾		NS ⁽²⁾		Positive ⁽³⁾	
	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$
Tendances des températures maximales annuelles.	0	0	36	26	16	26
Tendances des températures minimales annuelles.	0	0	23	21	29	31
Tendances des températures moyennes annuelles.	0	0	30	18	22	34

(1): la tendance est négativement significative

(2): la tendance est non significative

(3): la tendance est positivement significative

Les amplitudes des tendances correspondant aux 52 stations climatiques ont été calculées et cartographiées pour chaque station. Les figures 17, 18 et 19 représentent, respectivement, les valeurs des tendances des températures minimales annuelles, maximales annuelles et moyennes annuelles durant la période 1960 à 2003. La signification statistique des tendances a été fixée au niveau de signification $\alpha=5\%$ pour ces figures. Afin de faciliter l'interprétation des cartes présentées dans ce rapport, nous avons choisi les représentations suivantes :

- une tendance statistiquement significative et positive est représentée par un triangle plein, de couleur rouge et orienté vers le haut.
- une tendance statistiquement non significative et positive est représentée par un triangle "vide" de bordure rouge et orienté vers le haut.
- une tendance statistiquement significative et négative est représentée par un triangle plein, de couleur bleu et orienté vers le bas.
- une tendance statistiquement non significative et négative est représentée par un triangle "vide" de bordure bleu et orienté vers le bas.
- Finalement, une tendance nulle est représentée par un cercle vide.

Il est également important de noter que la grandeur du triangle est proportionnelle à la valeur de la tendance.

L'analyse des figures 17 et 18 montre, qu'en général, **les températures minimales annuelles ont connu une augmentation plus prononcée que les températures maximales annuelles au cours de la période 1960 à 2003. Les valeurs des tendances significatives sont situées principalement dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional.** Dans ces régions, les tendances des températures minimales annuelles (figure 17) et maximales annuelles (figure 18) varient, respectivement, entre 0.0 et 1.8 °C et entre 0.0 et 1.3 °C. **Un constat important est que le réchauffement ne s'est pas produit uniformément sur l'ensemble des régions du Québec méridional.** Ainsi, on note que ce réchauffement est plus marqué dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional et qu'il diminue progressivement lorsqu'on se déplace vers l'est de la province. Ce constat s'applique aussi bien aux températures minimales annuelles (figure 17) qu'aux températures maximales annuelles (figure 18) et aux températures annuelles moyennes (figure 19). Nous présentons en annexe la cartographie des tendances des températures maximales annuelles (figure 66) et moyennes annuelles (figure 67) en fixant le niveau de signification $\alpha=10\%$. Ainsi, le grand nombre des tendances significatives appuie les conclusions tirées des figures 18 et 19.

Les résultats décrits ci-dessus révèlent que la tendance des températures annuelles a un comportement qui varie selon les régions. Ce comportement "régional" de la tendance peut d'ailleurs être mis en évidence, si on utilise une technique d'interpolation appropriée. En effet, à l'exception de la région du nord du Québec (région au nord de l'Abitibi), nous disposons d'un réseau relativement dense et qui représente spatialement les différentes régions du Québec méridional (territoire au dessous du 51° parallèle). Rappelons que l'objectif de l'interpolation

spatiale est ici de mettre en évidence le comportement régionale de la tendance des températures moyennes annuelles, tel que constaté à partir des figure 19 et 67.

La figure 20 représente le résultat de l'interpolation par la technique IDW (*Inverse Distance Weignting*). Nous avons utilisé des contours, qui facilitent l'interprétation et l'analyse de cette figure. Ainsi, on constate clairement l'existence d'un gradient de tendance orienté d'ouest en est. Le réchauffement de la température moyenne annuelle durant la période 1960 à 2003 est plus marqué dans le sud, dans l'ouest et dans le centre du Québec. Dans ces régions, les températures annuelles moyennes ont enregistré une augmentation se situant entre 0,5 °C et 1,2 °C. En se déplaçant vers l'est du Québec, le réchauffement diminue graduellement (inférieur à 0,5 °C) et il est quasiment nul dans les régions de la Côte-Nord et de la Gaspésie.

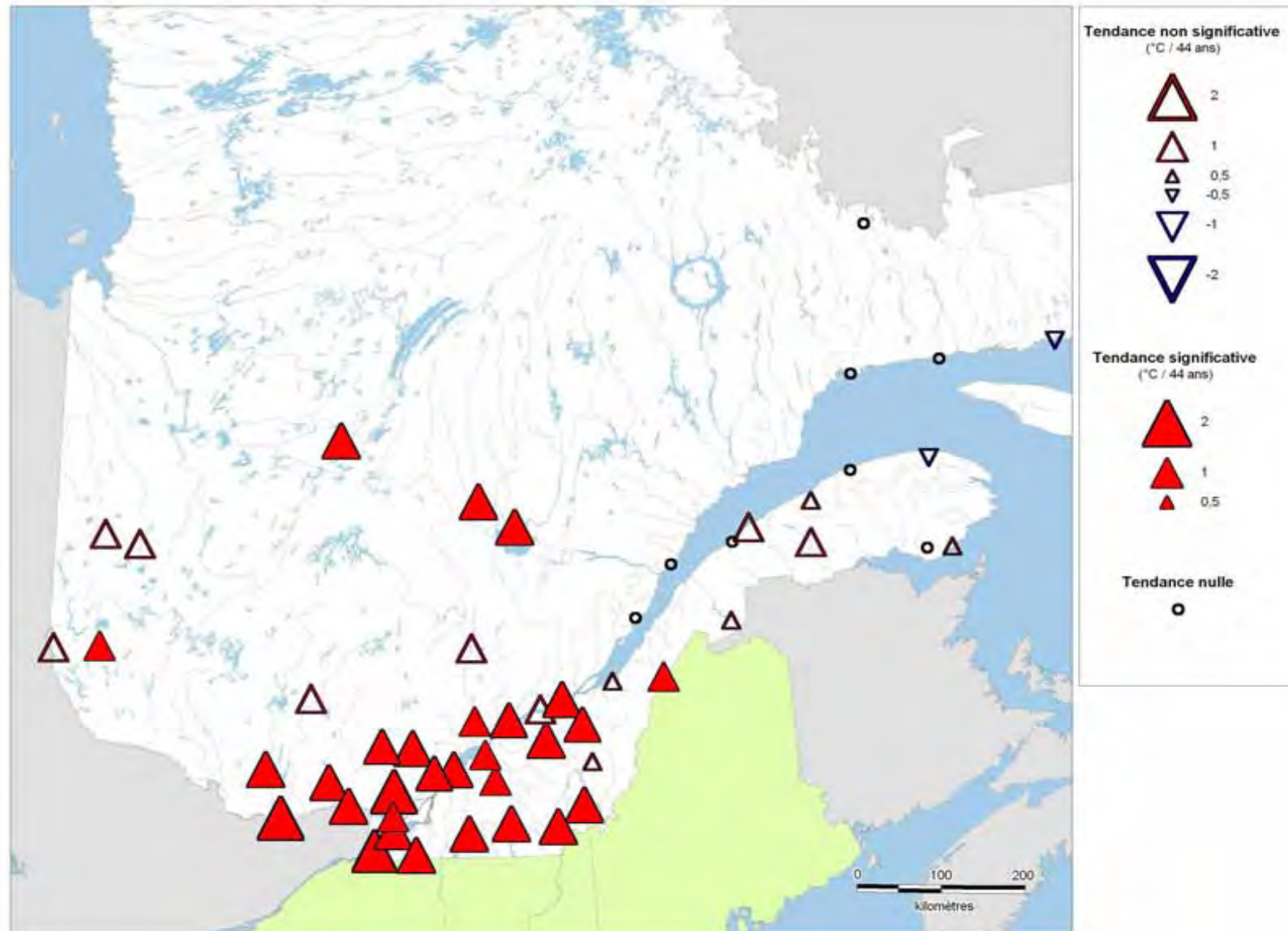


Figure 17 : Tendances des températures annuelles minimales entre 1960 et 2003.

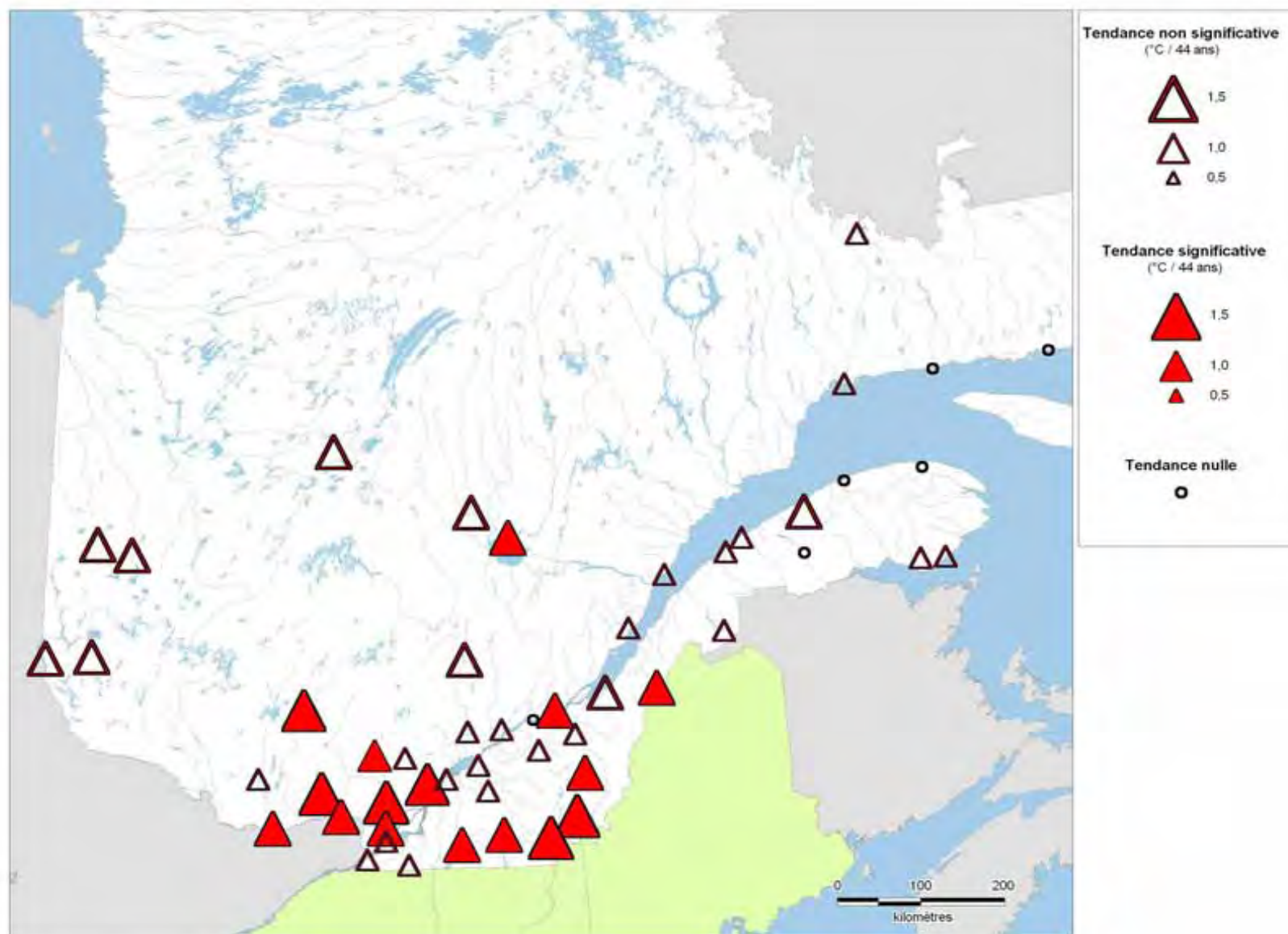


Figure 18 : Tendances des températures annuelles maximales entre 1960 et 2003.

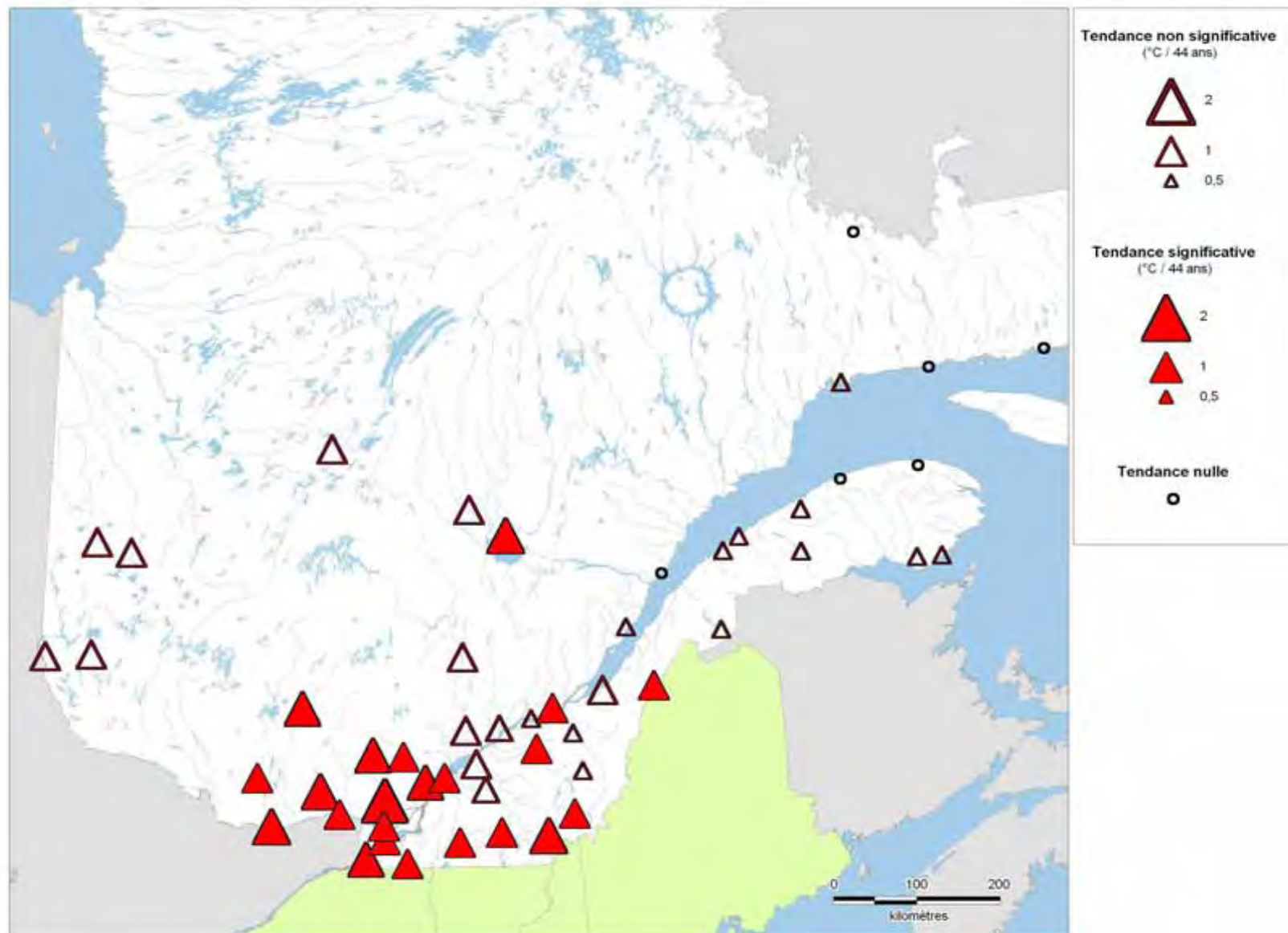


Figure 19 : Tendances des températures annuelles moyennes entre 1960 et 2003

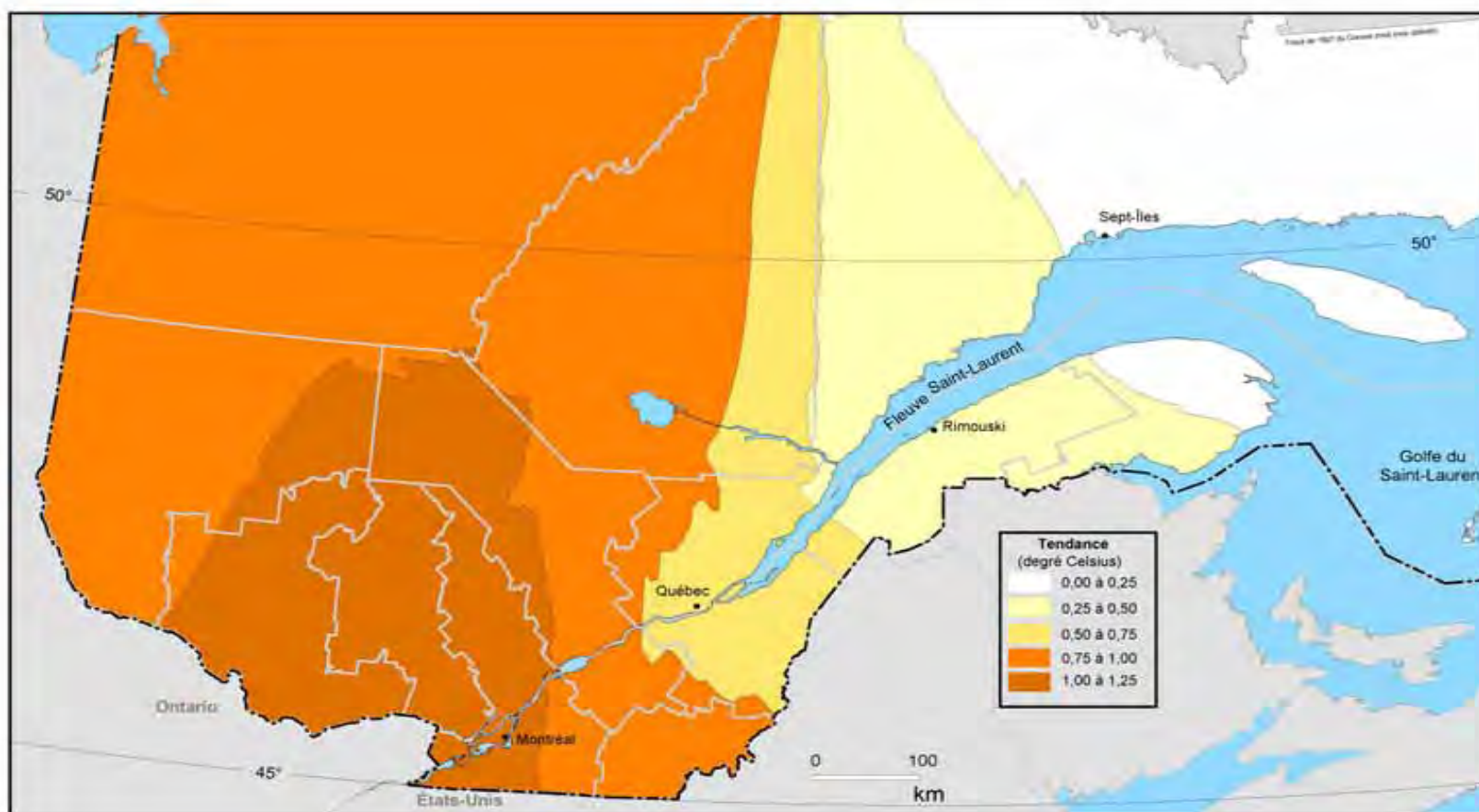


Figure 20 : Interpolation des tendances des températures annuelles moyennes entre 1960 et 2003.

3.6.2 Résultats : indicateurs calculés à partir des données saisonnières

Le tableau 12 présente la liste des indicateurs calculés à partir des températures saisonnières homogénéisées. Il s'agit de la tendance des températures maximales saisonnières et minimales saisonnières durant la période 1960 à 2003.

Tableau 12 : Liste des indicateurs calculés à partir des données saisonnières

Indice	unité
Tendances des températures maximales de la saison de l'hiver.	°C/44 ans
Tendances des températures maximales de la saison du printemps	°C/44 ans
Tendances des températures maximales de la saison de l'été.	°C/44 ans
Tendances des températures maximales de la saison de l'automne.	°C/44 ans
Tendances des températures minimales de la saison de l'hiver.	°C/44 ans
Tendances des températures minimales de la saison du printemps.	°C/44 ans
Tendances des températures minimales de la saison de l'été.	°C/44 ans
Tendances des températures minimales de la saison de l'automne.	°C/44 ans

Au tableau 13, on dénombre les stations dont les séries de températures saisonnières présentent, aux niveaux de signification 5% et 10%, une tendance négativement significative, positivement significative ou non significative. Ainsi, on constate que les valeurs statistiquement significatives de la tendance des températures saisonnières sont observées essentiellement durant les saisons de l'hiver et de l'été (tableau 13). En fait, à un niveau de signification de 5%, les tendances des températures maximales de l'hiver et de l'été sont significatives à 32 et 21 stations, respectivement. Ces deux valeurs respectives augmentent à 40 et 27 stations, lorsqu'on fixe le niveau de signification à 10%. Les tendances des températures minimales de l'hiver et de l'été sont statistiquement significatives à 28 et 36 stations, respectivement. Ces deux valeurs augmentent à 33 et 43 stations, lorsqu'on fixe le niveau de signification égal à 10%. On constate qu'en hiver, le nombre de stations ayant des tendances significatives est plus grand pour les températures maximales que pour les températures minimales. En été, c'est l'inverse qui est observé, c'est-à-dire que le nombre de stations ayant des tendances significatives pour les températures minimales est plus grand que pour les températures maximales.

L'analyse des tendances des températures durant la saison du printemps montre qu'il existe peu de stations où la tendance est significative. En effet, à un niveau de signification 5%, les tendances des températures maximales et minimales sont significatives à 1 et 4 stations, respectivement. Lorsque le niveau de signification est fixé à 10%, ces deux nombres augmentent, respectivement, à 8 et 7 stations. Finalement, les tendances des températures minimales et maximales de l'automne ne montrent pas de valeurs significatives.

Tableau 13 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des températures saisonnières (niveaux de signification 5% et 10%)

Indice	Négative ⁽¹⁾		NS ⁽²⁾		Positive ⁽³⁾	
	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$
Tendances des températures maximales de la saison de l'hiver.	0	0	20	12	32	40
Tendances des températures maximales de la saison du printemps	0	0	51	44	1	8
Tendances des températures maximales de la saison de l'été.	0	1	31	24	21	27
Tendances des températures maximales de la saison de l'automne.	0	0	52	52	0	0
Tendances des températures minimales de la saison de l'hiver.	0	0	25	20	28	33
Tendances des températures minimales de la saison du printemps.	0	0	48	45	4	7
Tendances des températures minimales de la saison de l'été.	0	0	16	9	36	43
Tendances des températures minimales de la saison de l'automne.	0	0	52	52	0	0

(1): la tendance est négativement significative

(2): la tendance est non significative

(3): la tendance est positivement significative

Nous présentons aux figures 21 à 28 la cartographie des tendances des températures saisonnières maximales et minimales ($\alpha=5\%$). L'examen des figures 21 et 25 suggère que les tendances des températures maximales et minimales en hiver sont distribuées sur le Québec méridional selon un gradient de tendance orienté d'ouest en est. Rappelons que ce comportement a été observé précédemment pour les tendances des températures annuelles (figures 17 à 20). Lorsqu'on fixe le niveau de signification α à 10 %, ce gradient devient légèrement moins clair (présence de valeurs significatives dans l'est du Québec) pour les tendances des températures maximales (figure 67) alors, qu'il est bien confirmé pour les tendances des températures minimales (figure 70). Le gradient de tendance est moins évident durant la saison de l'été, principalement dans le cas des tendances de

la température maximale de l'été. Les stations affichent, durant l'été, des tendances significatives dans les différentes régions du Québec méridional, même dans l'est de la province (figures 23, 27 et 71).

Durant la période 1960 à 2003, la saison de l'hiver a connu un réchauffement plus marqué dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. Ainsi dans ces régions, les températures minimales et maximales de l'hiver ont connu une augmentation variant, respectivement, entre 0.3 et 3.7 °C et entre 1.2 et 3.0 °C. Dans l'est de la province, la majorité des stations affichent des tendances non significatives en hiver.

Durant la période 1960 à 2003, la saison d'été a connu un réchauffement moins marqué que l'hiver. En effet, les stations situées dans l'ouest, le sud et dans le centre du Québec méridional ont connu une augmentation de la température minimale et maximale de l'été variant, respectivement, de 0.4 à 2.2 °C et de 0.0 à 1.8 °C. Dans l'est de la province, le nombre de stations ayant une tendance significative est plus faible et les valeurs des tendances des températures minimales et maximales varient, respectivement entre -0.2 et 1.0 °C et entre -1.0 et 1.0 °C.

L'analyse régionale des tendances calculées à partir des températures de la saison du printemps et de l'automne est difficile à effectuer, en raison du grand nombre de valeurs de la tendance qui sont non significatives. Seules les tendances des températures minimales du printemps semblent organisées selon un patron régional cohérent avec des valeurs de tendance plus élevées dans l'ouest et le centre, comparativement à la partie est du Québec méridional (figures 26 et 71 en annexe). Dans l'extrême sud-ouest de la province, les températures minimales du printemps ont enregistré des variations atteignant 1.8 °C.

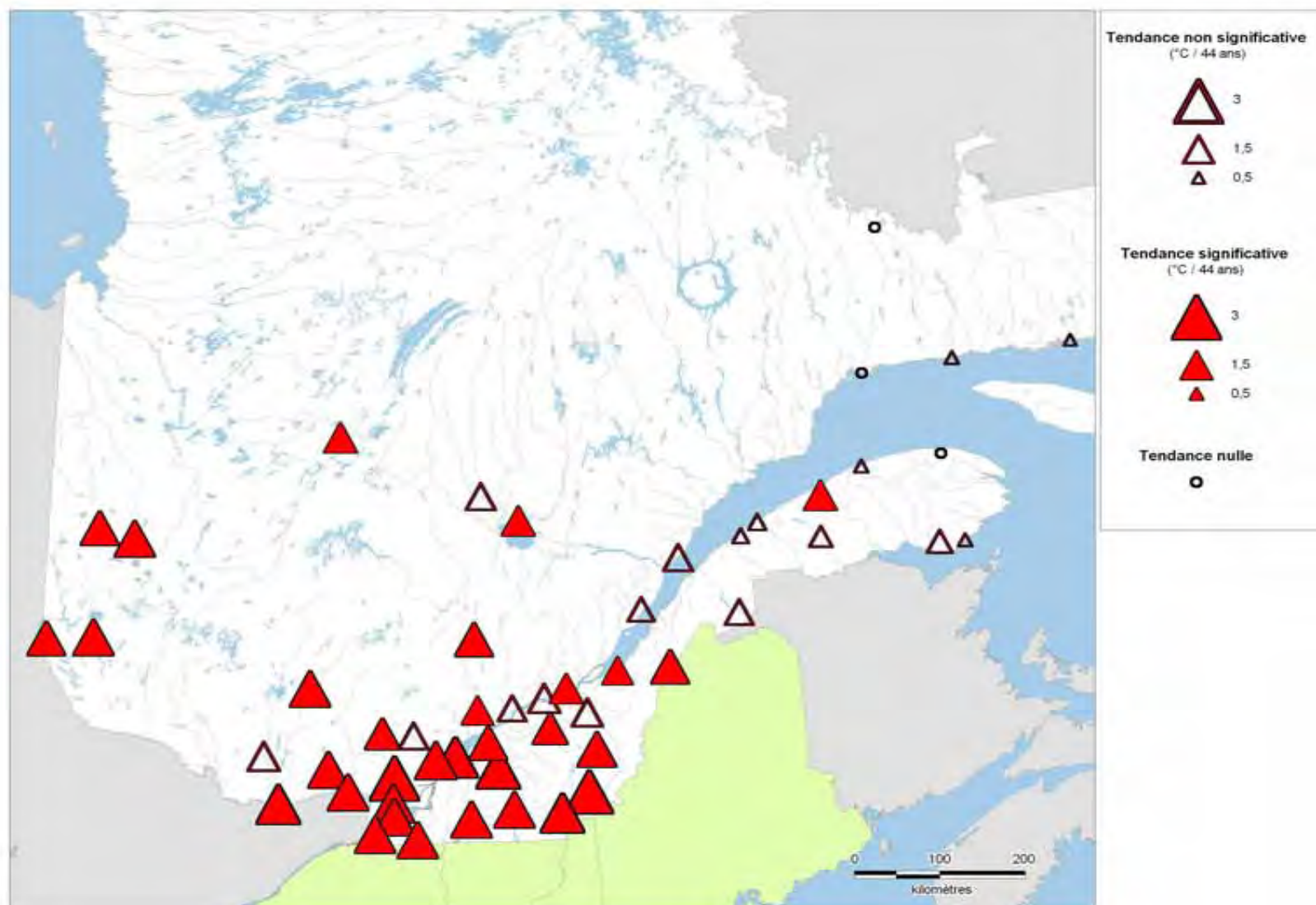


Figure 21 : Tendances des températures maximales de l'hiver entre 1960 et 2003.

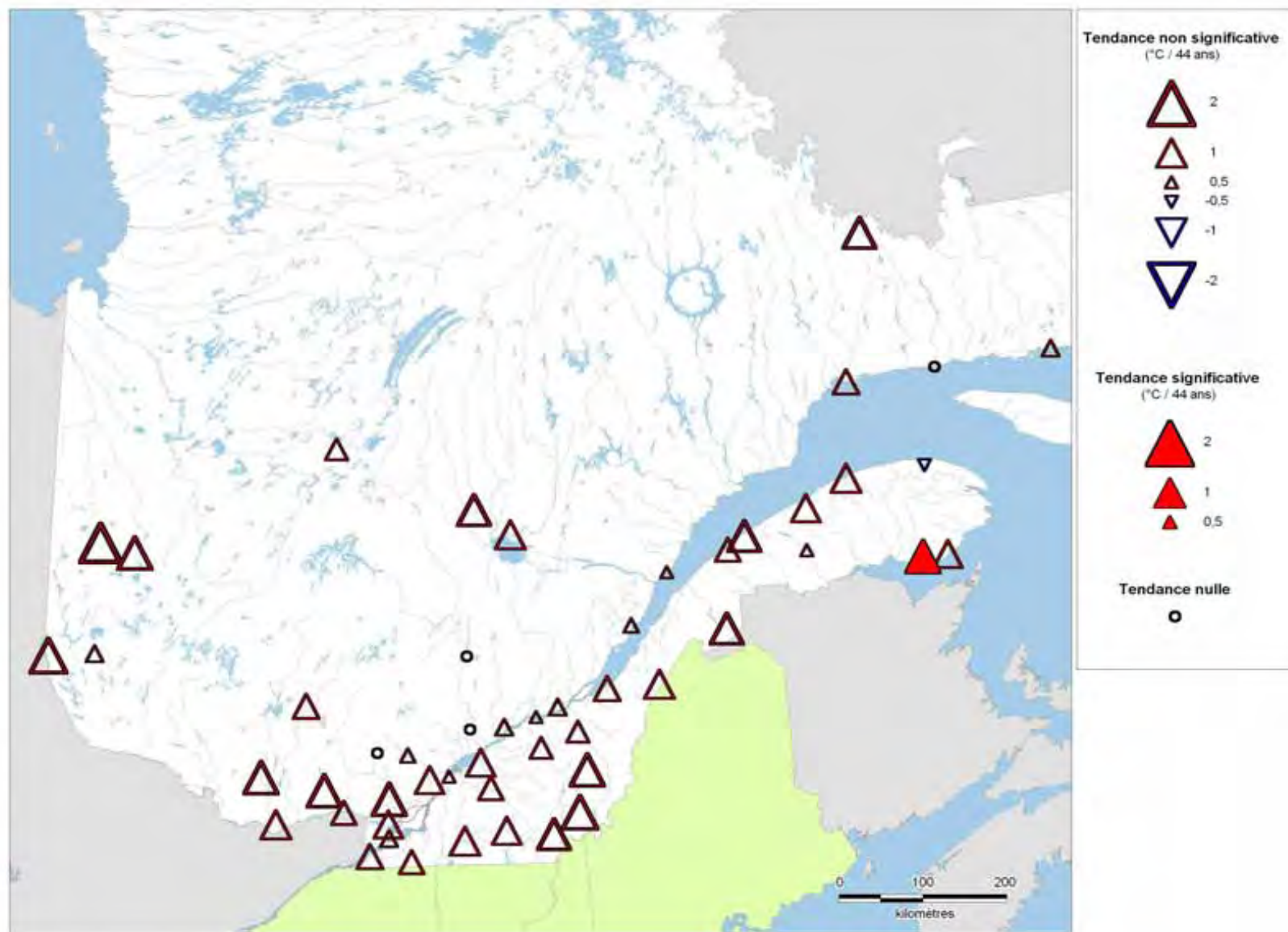


Figure 22 : Tendances des températures maximales du printemps entre 1960 et 2003.

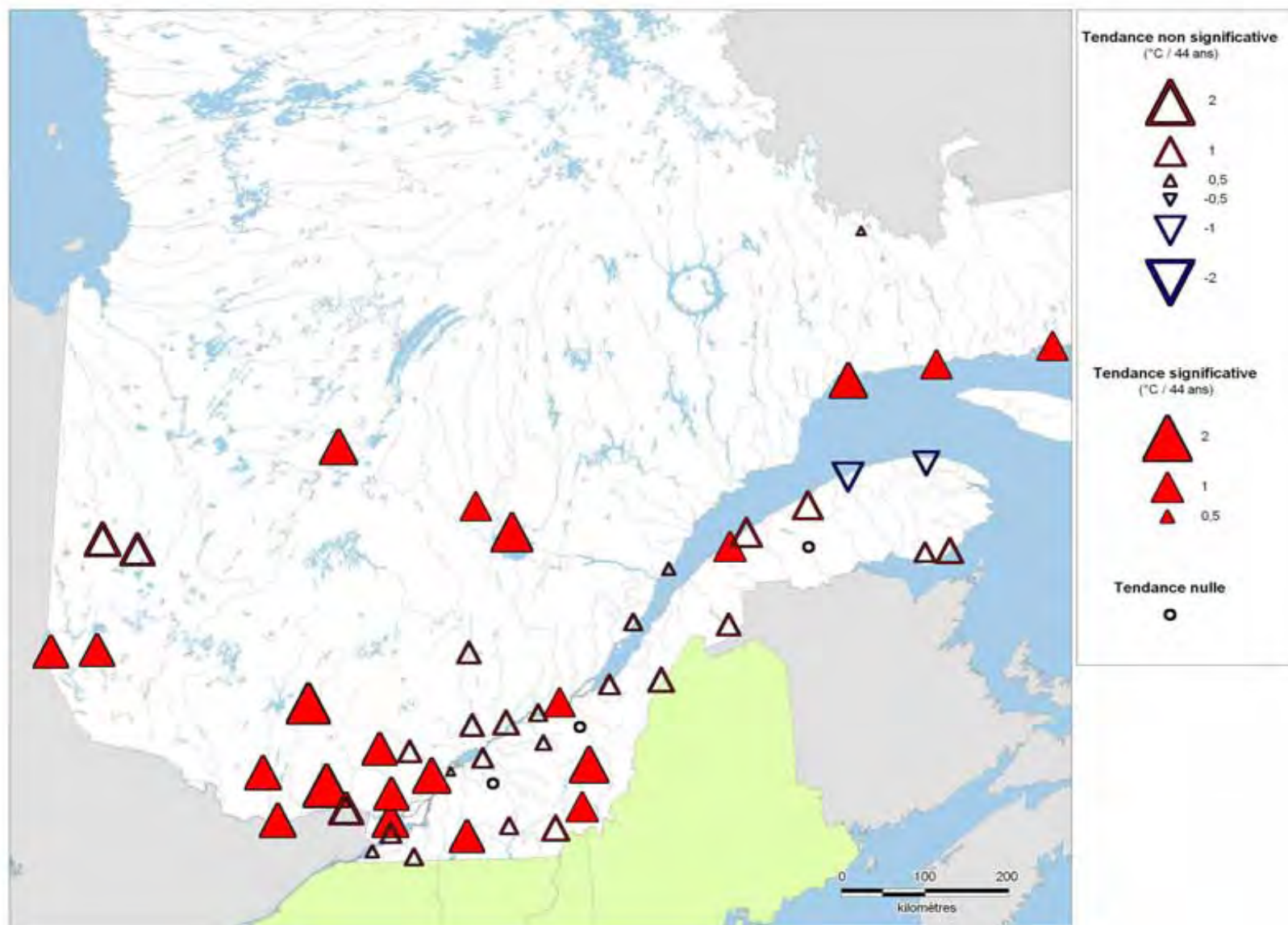


Figure 23 : Tendances des températures maximales de l'été entre 1960 et 2003.

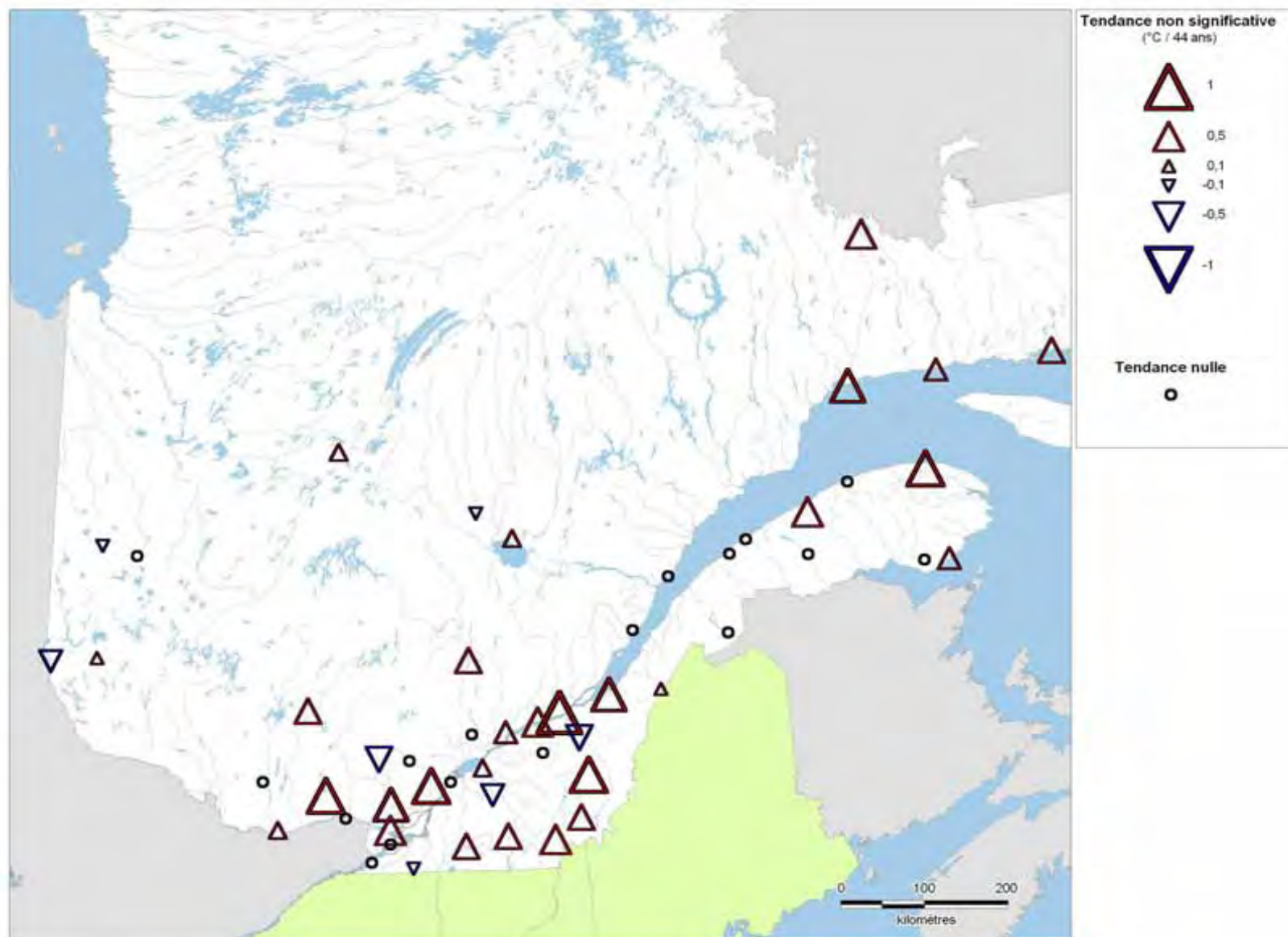


Figure 24 : Tendances des températures maximales de l'automne entre 1960 et 2003.

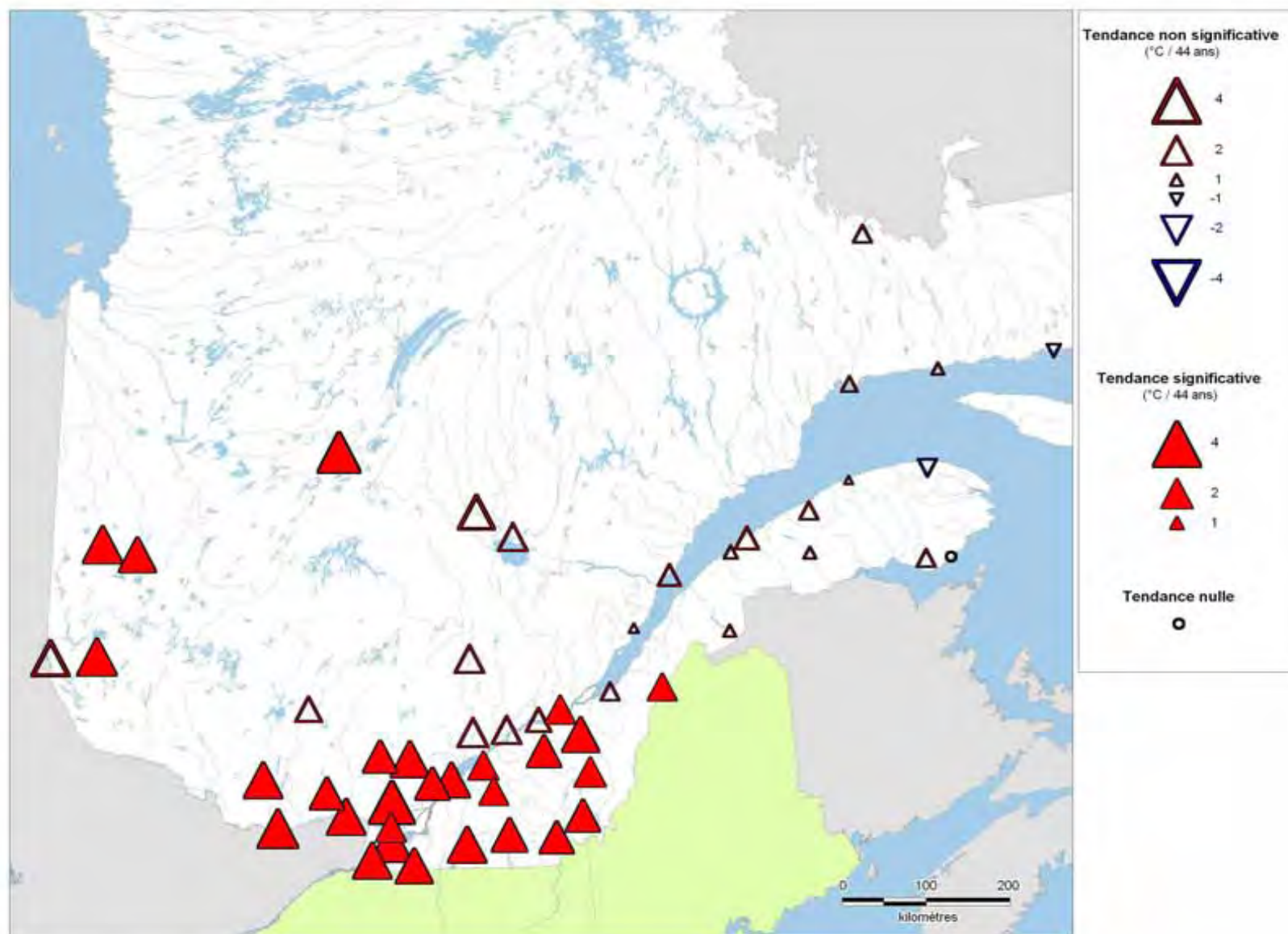


Figure 25 : Tendances des températures minimales de l'hiver entre 1960 et 2003.

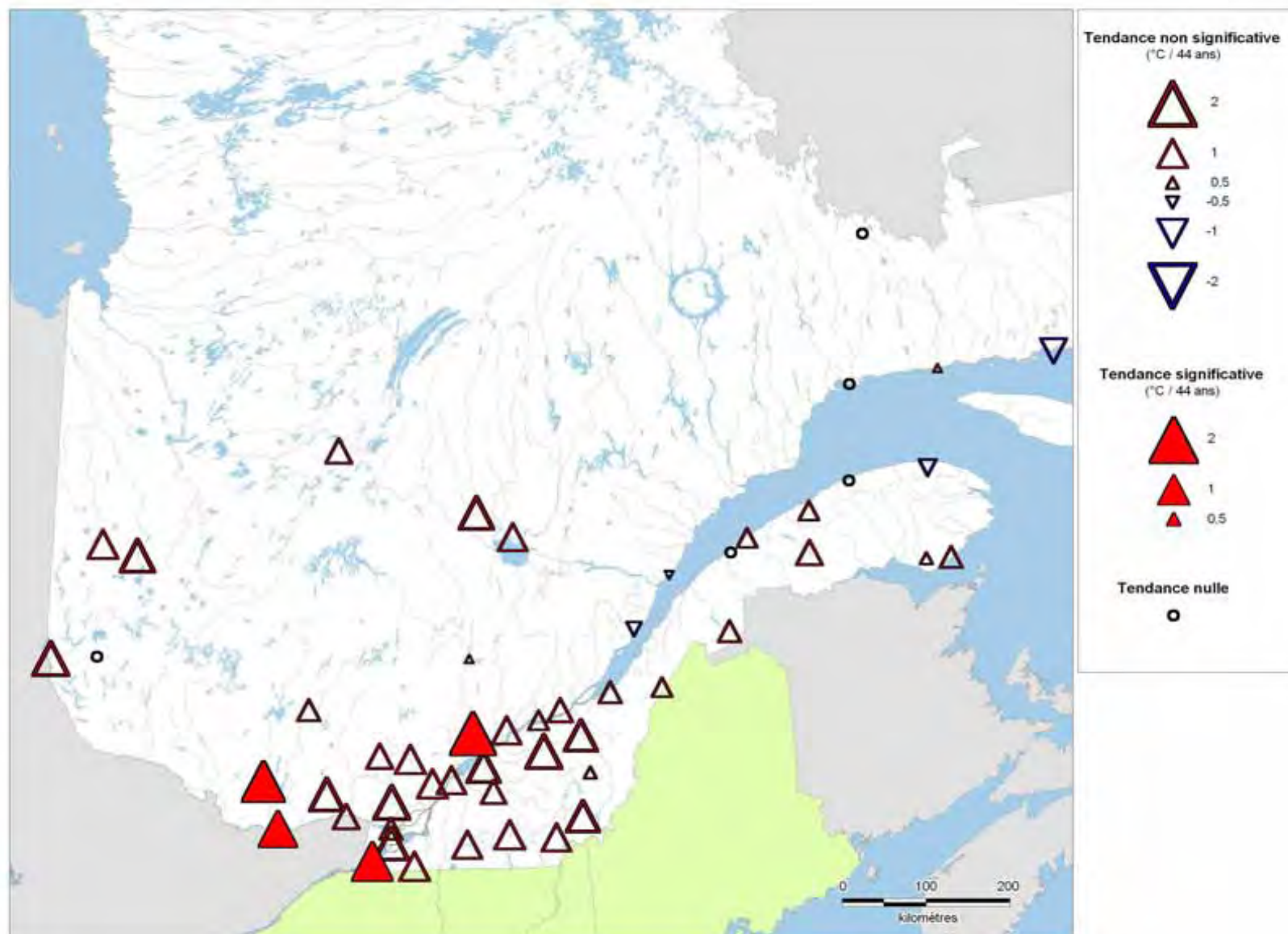


Figure 26 : Tendances des températures minimales du printemps entre 1960 et 2003.

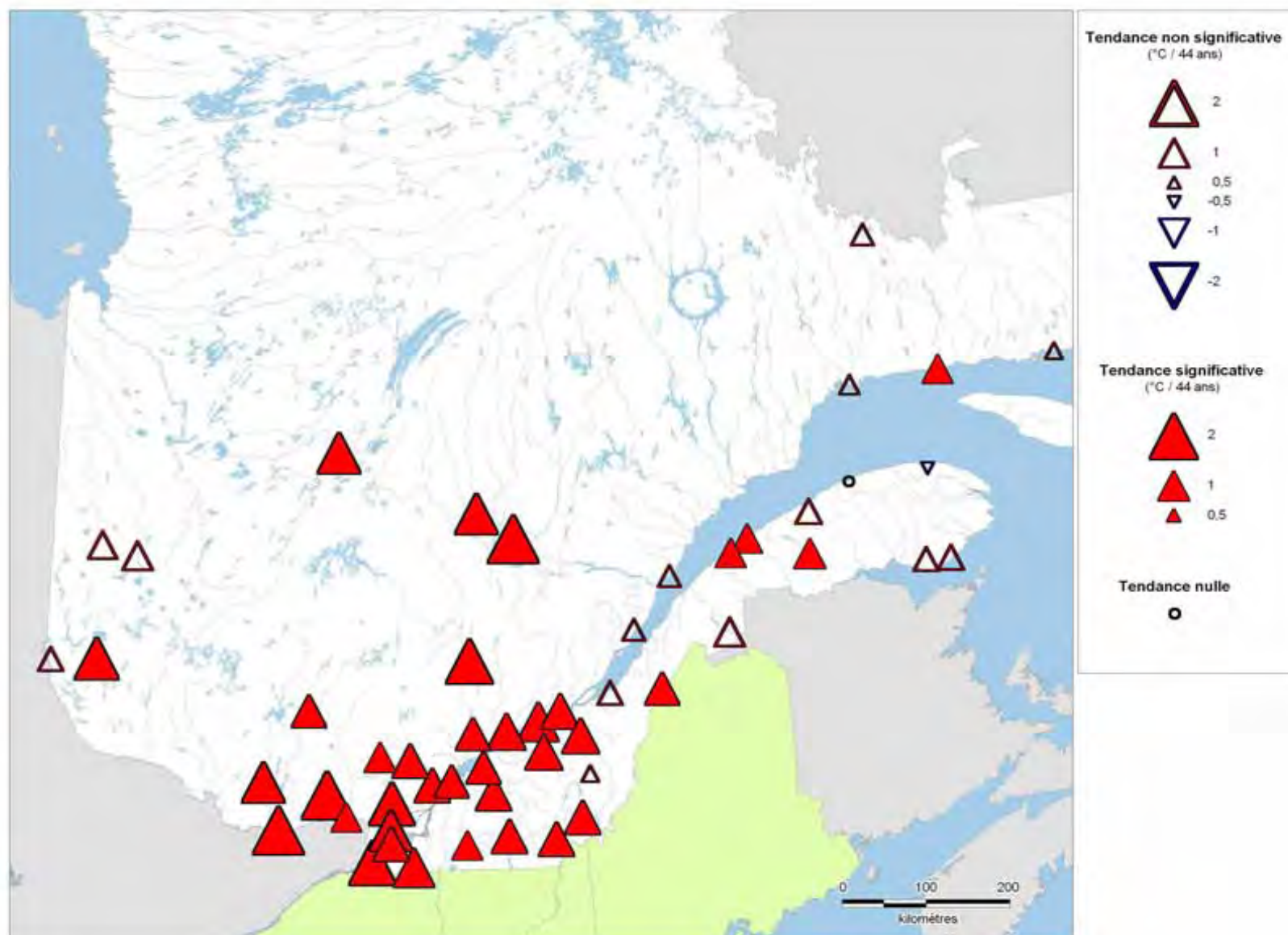


Figure 27 : Tendances des températures minimales de l'été entre 1960 et 2003.

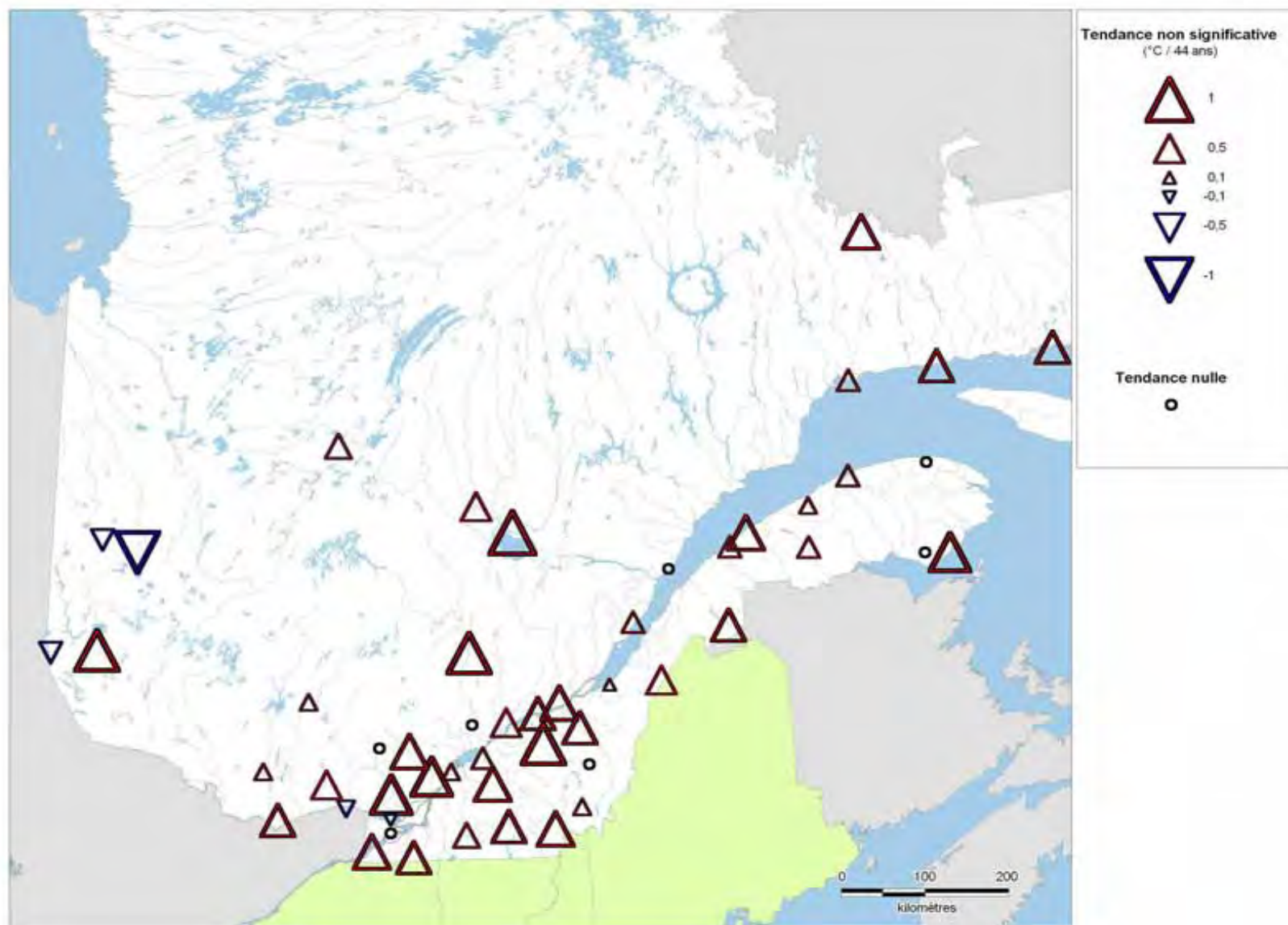


Figure 28 : Tendances des températures minimales de l'automne entre 1960 et 2003.

3.6.3 Résultats : indicateurs calculés à partir des données quotidiennes

Nous avons calculé 36 indicateurs à partir des données de températures quotidiennes. Ces indicateurs sont présentés au tableau 14. Les indicateurs représentent les variations temporelles entre 1960 et 2003 aux échelles annuelle et saisonnière.

Tableau 14 : Liste des indicateurs calculés à partir des données quotidiennes

Indice	Unité
Tendance du percentile 90 des températures maximales de l'hiver	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures maximales du printemps	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures maximales de été	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures maximales de l'automne	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures maximales de l'hiver	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures maximales du printemps	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures maximales de été	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures maximales de l'automne	°C/44 ans
Tendance du percentile 98 des températures maximales de l'été	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures minimales de l'hiver	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures minimales du printemps	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures minimales de été	°C/44 ans
Tendance du percentile 90 des températures minimales de l'automne	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures minimales de l'hiver	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures minimales du printemps	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures minimales de été	°C/44 ans
Tendance du percentile 10 des températures minimales de l'automne	°C/44 ans
Tendance du percentile 2 des températures minimales de l'hiver	°C/44 ans
Tendance de l'écart diurne moyen de l'hiver	°C/44 ans
Tendance de l'écart diurne moyen du printemps	°C/44 ans
Tendance de l'écart diurne moyen de l'été	°C/44 ans
Tendance de l'écart diurne moyen de l'automne	°C/44 ans
Tendance de la longueur de la saison de croissance	jours/44 ans

Tendance de la longueur de la saison de gel soutenu	jours/44 ans
Tendance de la longueur de la saison de gel non soutenu	jours/44 ans
Tendance du nombre de jours de gel et dégel de l'hiver	jours/44 ans
Tendance du nombre de jours de gel et dégel du printemps	jours/44 ans
Tendance du nombre de jours de gel et dégel de l'automne	jours/44 ans
Tendance de la durée en jours des vagues de froid en hiver	jours/44 ans
Tendance de la durée en jours des vagues de froid au printemps	jours/44 ans
Tendance de la fréquence des vagues de froid en hiver	épisodes/44 ans
Tendance de la fréquence des vagues de froid au printemps	épisodes/44 ans
Tendance du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 5 °C	degrés-jours/44 ans
Tendance du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 22 °C	degrés-jours/44 ans
Tendance du cumul annuel des degrés-jours au dessous de 0 °C	degrés-jours/44 ans
Tendance du cumul annuel des degrés-jours au dessous de 18 °C	degrés-jours/44 ans

Nous présentons dans le tableau 15, pour les différents indicateurs retenus, le nombre de stations dont les séries présentent aux niveaux de signification 5% et 10% une tendance négativement significative, positivement significative ou non significative. Rappelons que le nombre total des stations retenues dans cette étude est de 52. Nous analysons les résultats par groupe d'indicateurs, étant donné le grand nombre d'indicateurs retenus. Nous incluons, également, dans notre analyse, l'interprétation de la cartographie de la tendance pour chacun des indicateurs (figures 29 à 64).

Rappelons que l'un des objectifs de ce travail est de dresser un portrait général de l'évolution du climat au Québec méridional entre 1960 et 2003. Les indicateurs retenus dans le cadre de ce travail visent à dresser ce portrait global et nous estimons que les résultats présentés ici sont susceptibles d'intéresser plusieurs usagers de données climatologiques. Ces usagers pourront, s'ils le désirent, compléter la présente analyse en utilisant d'autres indicateurs plus spécifiques à leur domaine d'expertise. En somme, les indicateurs présentés ici visent à donner un premier aperçu global de l'évolution du climat au Québec méridional.

Tableau 15 : Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux tendances des indicateurs climatiques (niveaux de signification 5% et 10%)

Indice	Négative ⁽¹⁾		NS ⁽²⁾		Positive ⁽³⁾	
	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$
Percentile 90 des températures maximales de l'hiver	0	0	31	20	21	32
Percentile 90 des températures maximales du printemps	0	0	51	50	1	2
Percentile 90 des températures maximales de l'été	1	1	43	36	8	15
Percentile 90 des températures maximales de l'automne.	0	0	49	46	3	6
Percentile 10 des températures maximales de l'hiver	0	0	31	29	21	23
Percentile 10 des températures maximales du printemps	0	0	52	52	0	0
Percentile 10 des températures maximales de l'été	0	0	49	46	3	6
Percentile 10 des températures maximales de l'automne.	0	0	51	51	1	1
Percentile 98 des températures maximales de l'été.	0	0	45	41	7	11
Percentile 10 des températures minimales de l'hiver,	0	0	50	45	2	7
Percentile 10 des températures minimales du printemps,	0	0	52	51	0	1
Percentile 10 des températures minimales de l'été	0	0	34	24	18	28
Percentile 10 des températures minimales de l'automne	0	0	52	52	0	0
Percentile 90 des températures minimales de l'hiver	0	0	20	15	32	37
Percentile 90 des températures minimales du printemps	0	0	43	36	9	16
Percentile 90 des températures minimales de l'été	0	0	26	21	26	31
Percentile 90 des températures minimales de l'automne	0	0	20	18	32	34
Percentile 2 des températures minimales de l'hiver	0	0	41	34	11	18
Écart diurne moyen de l'hiver	5	7	46	43	1	2
Écart diurne moyen du printemps	1	5	46	37	5	10
Écart diurne moyen de l'été	13	16	38	34	1	2
Écart diurne moyen de l'automne.	8	8	43	39	1	5
Longueur de la saison de croissance	0	0	52	51	0	1
Longueur de la saison de gel soutenu	11	16	41	36	0	0
Longueur de la saison de gel non	6	11	46	41	0	0

soutenu						
Le nombre de jours de gel et dégel de l'hiver	0	0	44	40	8	12
Le nombre de jours de gel et dégel du printemps	12	18	40	33	0	1
Le nombre de jours de gel et dégel de l'automne.	8	10	44	42	0	0
La durée en jours des vagues de froid en hiver	6	13	46	39	0	0
La durée en jours des vagues de froid au printemps	0	0	52	52	0	0
La fréquence des vagues de froid en hiver	7	15	45	37	0	0
La fréquence des vagues de froid au printemps	0	0	52	52	0	0
Le cumul annuel des degrés-jours au dessus de 5 °C	0	0	19	8	33	44
Le cumul annuel des degrés-jours au dessus de 22 °C :	0	1	42	38	10	13
Le cumul annuel des degrés-jours au dessus de 25 °C	0	0	52	51	0	1
Le cumul annuel des degrés-jours au dessous de 0 °C :	11	20	41	32	0	0
Le cumul annuel des degrés-jours au dessous de 18 °C	20	29	32	23	0	0

3.6.3.1 Évolution des percentiles 2, 10, 90 et 98

Nous avons examiné dans les sections 3.6.1 et 3.6.2 l'évolution, entre 1960 et 2003, des températures maximales et minimales aux échelles annuelles et saisonnières. En fait, nous avons examiné le comportement de la valeur annuelle et saisonnière moyenne de la température durant les quatre dernières décennies. Dans cette section, nous nous intéressons à l'évolution des températures extrêmes. D'où l'intérêt de définir des indicateurs, tels que les percentiles de températures. Nous avons donc calculé les 10^e et 90^e percentiles à partir des séries de températures quotidiennes pour les quatre saisons de l'année (tel que défini dans la section 3.3).

L'analyse du tableau 15 montre que **les tendances des 10^e et 90^e percentiles des températures maximales sont significativement à la hausse à un grand nombre de stations uniquement durant la saison de l'hiver.** En effet, les tendances du 90^e percentile des températures maximales de l'hiver sont significatives à 21 et 32 stations en fixant le niveau de signification à $\alpha=5\%$ et 10%, respectivement. Les tendances du 10^e percentile des températures maximales de l'hiver sont significatives à 21 et 23 stations en fixant le niveau de signification à $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement. Les tendances du 90^e percentile des températures maximales de l'été sont

significatives à seulement 8 stations en fixant α égal à 5%. Toutefois, ce nombre augmente à 15 stations, lorsque le niveau de signification α est fixé à 10%.

La cartographie des tendances des 10^e et 90^e percentiles des températures maximales de l'hiver (figure 29 et 33) montre qu'il y a davantage de stations qui présentent une tendance significative dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional comparativement à l'est de la province. Pour les autres saisons (figures 30 à 32 et 34 à 36), il est difficile de tirer des comportements régionaux, malgré que plusieurs valeurs des tendances non significatives sont positives et d'une amplitude considérable.

En ce qui concerne l'évolution des 10^e et 90^e percentiles des températures minimales, le portrait est un peu plus complexe à présenter. Il ressort du tableau 15 que les tendances des 10^e et 90^e percentiles des températures minimales sont significativement à la hausse à un grand nombre de stations uniquement dans les cas suivants :

- **10^e percentile lors de la saison de l'été (18 et 28 stations présentent une augmentation significative aux niveaux 5% et 10%, respectivement);**
- **90^e percentiles lors de la saison d'été (26 et 31 stations présentent une augmentation significative aux niveaux 5% et 10%, respectivement);**
- **90^e percentile lors de la saison de l'hiver (32 et 37 stations présentent une augmentation significative aux niveaux 5% et 10%, respectivement);**
- **90^e percentile lors de la saison de l'automne (32 et 34 stations présentent une augmentation significative aux niveaux 5% et 10%, respectivement);**

Soulignons également que pour le printemps, le 90^e percentile est à la hausse à 9 et 16 stations en fixant le niveau de signification à 5% et 10%, respectivement.

En somme, **le réchauffement noté à la section 3.6.2 pour les moyennes hivernales et estivales des températures minimales et maximales s'accompagne d'une augmentation des extrêmes chauds (90^e percentile) des températures minimales.** Par contre le réchauffement du 90^e percentile des températures minimales en automne est particulier, puisque aucune augmentation significative de la température moyenne de l'automne (section 3.6.2) n'a été notée.

Nous avons cartographié les tendances du 10^e percentiles des températures minimales. L'analyse des figures correspondant aux saisons de l'hiver, du printemps et de l'automne (figures 41, 42, 44)

ne nous permet de tirer des conclusions sur le comportement régional de cet indicateur. Ceci est justifié par le faible nombre de stations ayant des valeurs significatives de la tendance de cet indicateur. Toutefois, nous avons constaté durant la saison de l'hiver que plusieurs valeurs des tendances non significatives sont positives et peuvent atteindre un maximum de 3.5 °C. La cartographie des tendances du 10^e percentile des températures minimales de l'été (figure 43) montre que les valeurs significatives sont concentrées principalement, dans le sud du Québec méridional. Toutefois, quelques valeurs significatives sont également présentes dans l'est du Québec.

La cartographie des tendances du 90^e percentile des températures minimales de l'hiver (figure 37) montre à nouveau l'existence du gradient de tendance orienté d'ouest en est. Ce gradient est moins clair pour les autres saisons (figures 38 à 40). En effet, les valeurs significatives de la tendance sont localisées dans les différentes régions du Québec méridional pour ces autres saisons.

Dans le même cadre de l'analyse des valeurs extrêmes, nous avons tenté d'examiner la tendance des événements de froid intense ou de chaleur intense. Dans ce but, nous avons examiné les tendances du 2^e percentile des températures minimales de l'hiver et du 98^e percentile des températures maximales de l'été. L'examen du tableau 15 montre que 7 et 11 stations affichent des tendances significatives à la hausse du 98^e percentile en été, lorsqu'on fixe, respectivement, le niveau de signification $\alpha=5\%$ et 10%. Alors, que 11 et 18 stations affichent des tendances significatives à la hausse du 2^e percentile en hiver, lorsqu'on fixe, respectivement, le niveau de signification $\alpha=5\%$ et 10%.

La cartographie des tendances du 98^e percentile des températures maximales de l'été (figure 45) n'indique pas de comportement régional de cet indicateur. Alors que la cartographie des tendances du 2^e percentiles des températures minimales de l'hiver indique une augmentation de cet indicateur principalement dans l'ouest et le sud du Québec méridional (figures 46 et 76 en annexe).

3.6.3.2 Évolution de l'écart diurne

L'examen du tableau 15 montre qu'en été, l'écart diurne moyen diminue significativement à 13 ou 16 stations selon que l'on fixe $\alpha=5\%$ ou $\alpha=10\%$. Pour les autres stations, la variation de l'écart diurne moyen est non significative en été. En ce qui a trait aux saisons d'hiver, de printemps et d'automne, la grande majorité des stations n'enregistre aucune tendance significative de l'écart diurne moyen.

La cartographie des tendances de l'écart diurne nous permettra de bien analyser les résultats (figures 47 à 50 et 77 en annexe). Ainsi, on constate durant les saisons de l'hiver, du printemps et de l'automne qu'il est difficile de dégager un comportement régional, étant donné le faible nombre stations ayant des tendances significatives. Toutefois, on constate la présence de quelques tendances significatives à la hausse dans l'est du Québec, principalement durant le printemps. **En été, la diminution de l'écart diurne est plus claire et plusieurs stations affichent des tendances significatives dans le sud et dans l'est du Québec (figures 49 et 77).** Ceci est cohérent avec les constatations tirées de l'évolution des températures minimales et maximales de l'été. En effet, on a constaté qu'en été la température minimale a subi une augmentation plus forte que la température maximale entre 1960 et 2003.

3.6.3.3 Évolution de la saison de gel

Nous avons défini deux indicateurs pour analyser l'évolution de la longueur de la saison de gel entre 1960 et 2003 (section 3-4). Le tableau 15 montre que les tendances de la longueur de la saison de gel soutenu et non soutenu sont significativement à la baisse à 11 et 6 stations, respectivement ($\alpha=5\%$). Ces deux résultats augmentent, respectivement, à 16 et 11 stations lorsqu'on fixe le niveau de signification $\alpha=10\%$.

La cartographie de ces deux indicateurs montre qu'une majorité des stations ont une tendance à la baisse de la longueur de la saison de gel soutenu et non soutenu dans le sud et le centre du Québec (figures 51 et 52 et 78 et 79 en annexe). Les valeurs significatives sont concentrées principalement dans le sud du Québec. Lorsqu'on se déplace vers l'est du Québec, le signal est moins clair dans le cas de la saison de gel soutenu, alors qu'il existe, dans cette région, des tendances significativement négatives dans le cas de la saison de gel non soutenu.

3.6.3.4 Évolution de la fréquence et de la durée des vagues de froid

Nous avons défini deux types d'indicateurs pour analyser l'évolution des vagues de froid : l'un a trait à la fréquence et l'autre à la durée des vagues de froid entre 1960 et 2003 (section 3.4). Ces indicateurs ont été évalués pour les saisons de l'hiver et du printemps. Le tableau 15 montre qu'il n'existe pas de tendances significatives de la fréquence et de la durée des vagues de froid durant le printemps. Par contre, ces deux indicateurs ont connu, à quelques stations, une baisse significative entre 1960 et 2003 durant l'hiver. En effet, les tendances de la durée (en jours) des vagues de froid sont significativement à la baisse à 6 et 13 stations en fixant $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$,

respectivement. Les tendances de la fréquence des vagues de froid sont significativement à la baisse à 7 et 15 stations en fixant $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement.

La cartographie des tendances de la fréquence et de la durée des vagues de froid au printemps (figure 54 et 56) n'indique aucun signal significatif. Ce qui est concordant avec les interprétations tirées des indicateurs précédents.

La cartographie des tendances de la fréquence des vagues de froid en hiver (figure 53) ne permet pas de dégager un comportement régional clair de cet indicateur, malgré la présence de valeurs significatives dans toutes les régions du Québec méridional (à l'exception de la Côte-Nord). Cette constatation est confirmée lorsqu'on fixe le niveau de signification $\alpha=10\%$ (figure 81 en annexe).

La cartographie des tendances de la durée des vagues de froid en hiver montre que la majorité des stations affichent une tendance à la baisse (figures 55 et 80 en annexe). Les valeurs significatives sont réparties dans toutes les régions du Québec méridional, à l'exception de la Côte-Nord. Ces résultats sont cohérents avec les constatations tirées des autres indicateurs analysés dans ce rapport. En effet, nous avons constaté que les températures minimales ont connu une augmentation durant l'hiver.

3.6.3.5 Évolution du nombre de jours de gel et dégel

Nous avons calculé les tendances de cet indicateur durant les saisons de l'hiver, du printemps et de l'automne. Le tableau 15 montre que le nombre de jours de gel et dégel est significativement à la hausse à plusieurs stations durant la saison de l'hiver. Par contre, au printemps et en automne, le nombre de jours de gel et dégel est significativement à la baisse à plusieurs stations. En effet, durant l'hiver, les tendances de cet indicateur sont significativement positives à 8 et 12 stations, lorsqu'on fixe $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement. Durant les saisons du printemps et de l'automne, les tendances de cet indicateur sont significativement négatives à un niveau $\alpha=5\%$ à 12 et 8 stations, respectivement. Ces valeurs augmentent, respectivement, à 18 et 10 stations, lorsqu'on fixe le niveau de signification α à 10%.

La cartographie des tendances du nombre de jours de gel et dégel entre 1960 et 2003 durant l'hiver (figure 57) montre que la majorité des stations localisées dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional ont connu une augmentation de cet indicateur. Cependant, cette augmentation n'est pas statistiquement significative à toutes les stations. Lorsqu'on se déplace vers l'est du Québec, le signal devient moins clair. Ces résultats sont cohérents avec ceux tirés de

l'analyse de l'évolution des températures minimales et maximales durant l'hiver. En effet, nous avons constaté une augmentation des températures maximales et minimales de l'hiver, ce qui augmente la probabilité d'occurrence des journées de gel et dégel durant cette saison.

Les valeurs significatives de la tendance du nombre de jours de gel et dégel durant le printemps sont localisées dans le sud, le centre et l'est du Québec méridional (figures 58 et 82 en annexe). Alors que durant l'automne, les valeurs significatives de la tendance sont distribuées dans presque toutes les régions du Québec méridional (figure 59). Nous avons constaté que la baisse du nombre de jours de gel et dégel est plus importante au printemps comparativement à l'automne.

3.6.3.6 Évolution du cumul annuel des degrés-jours

Nous avons calculé le cumul annuel des degrés-jours pour différents seuils (section 3.4). Le tableau 15 montre que la quantité totale de chaleur disponible pour la croissance de la végétation est significativement à la hausse à plusieurs stations entre 1960 et 2003. En effet, les tendances du cumul annuel des degrés-jours de croissance (au dessus de 5 °C) sont significativement à la hausse à 33 et 44 stations en fixant $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement.

La cartographie de cet indicateur (figures 60 et 83 en annexe) montre que toutes les régions du Québec méridional ont connu une augmentation du cumul annuel des degrés-jours de croissance. Ce résultat est cohérent avec les constatations faites précédemment sur l'augmentation des températures minimales et maximales estivales.

À titre d'illustration, nous avons quantifié l'augmentation des degrés-jours de croissance observée durant les années 1960 à 2003, par rapport à la valeur normale (1971-2000) de cet indicateur. **Ainsi, les stations climatologiques situées dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional ont enregistré une augmentation des degrés-jours de croissance variant entre 4,1 % et 20,1 % (moyenne de 9,5 %) selon les stations.**

Le tableau 15 montre que les degrés-jours de climatisation sont également à la hausse à plusieurs stations entre 1960 et 2003. En effet, les tendances du cumul annuel des degrés-jours de climatisation (au dessus de 22 °C) sont significativement à la hausse à 10 et 13 stations en fixant, respectivement, $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$.

La cartographie de cet indicateur (figures 61 et 84 en annexe) montre que l'augmentation du cumul annuel des degrés-jours de climatisation touche principalement le sud et le centre du

Québec méridional. Ce résultat est cohérent avec l'augmentation des températures minimales et maximales constatée durant l'été.

Le tableau 15 montre que les degrés-jours de chauffe et de gel sont significativement à la baisse à plusieurs stations entre 1960 et 2003. En effet, les tendances du cumul annuel des degrés-jours de chauffe (au dessous de 18 °C) sont significativement à la baisse à 20 et 29 stations en fixant $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement. De même, les tendances du cumul annuel des degrés-jours de gel (au dessous de 0 °C) sont significativement à la baisse à 11 et 20 stations en fixant $\alpha=5\%$ et $\alpha=10\%$, respectivement.

La cartographie de ces deux indicateurs (figures 62 et 63; 85 et 86 en annexe) montre que la diminution du cumul annuel des degrés-jours de chauffe et de gel touche principalement l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. On constate également la présence d'un gradient de tendance orienté d'ouest en est. Ces résultats sont cohérents avec l'augmentation des températures minimales et maximales constatée durant l'hiver et également avec la présence d'un gradient de tendance orienté d'ouest en est durant la saison de l'hiver.

À titre d'illustration, nous avons quantifié en pourcentage la diminution des degrés-jours de chauffe observée durant les années 1960 à 2003, par rapport à la normale (1971-2000) de cet indicateur. **Ainsi, les stations climatologiques situées dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional ont enregistré une diminution des degrés-jours de chauffe variant entre 1,1 % et 10 % (moyenne de 5,5 %) selon les stations.**

3.6.3.7 Évolution de la longueur de la saison de croissance

L'analyse du tableau 15 indique que la longueur de la saison de croissance n'a pas subi de changement significatif durant la période 1960 à 2003. **La cartographie de cet indicateur (figure 64) ne permet pas de dégager des conclusions claires à partir des tendances non significatives.** Nous pensons qu'il pourrait être utile d'examiner séparément l'évolution des dates du début et de fin de la saison de croissance. En effet, si ces deux dates ont subi un décalage identique durant la période 1960 à 2003, on ne détectera probablement aucune tendance dans la série des longueurs de la saison de croissance. Rappelons que l'indicateur utilisé dans le cadre de ce travail est obtenu en calculant le nombre de jours qui séparent le début et la fin de la saison de croissance.

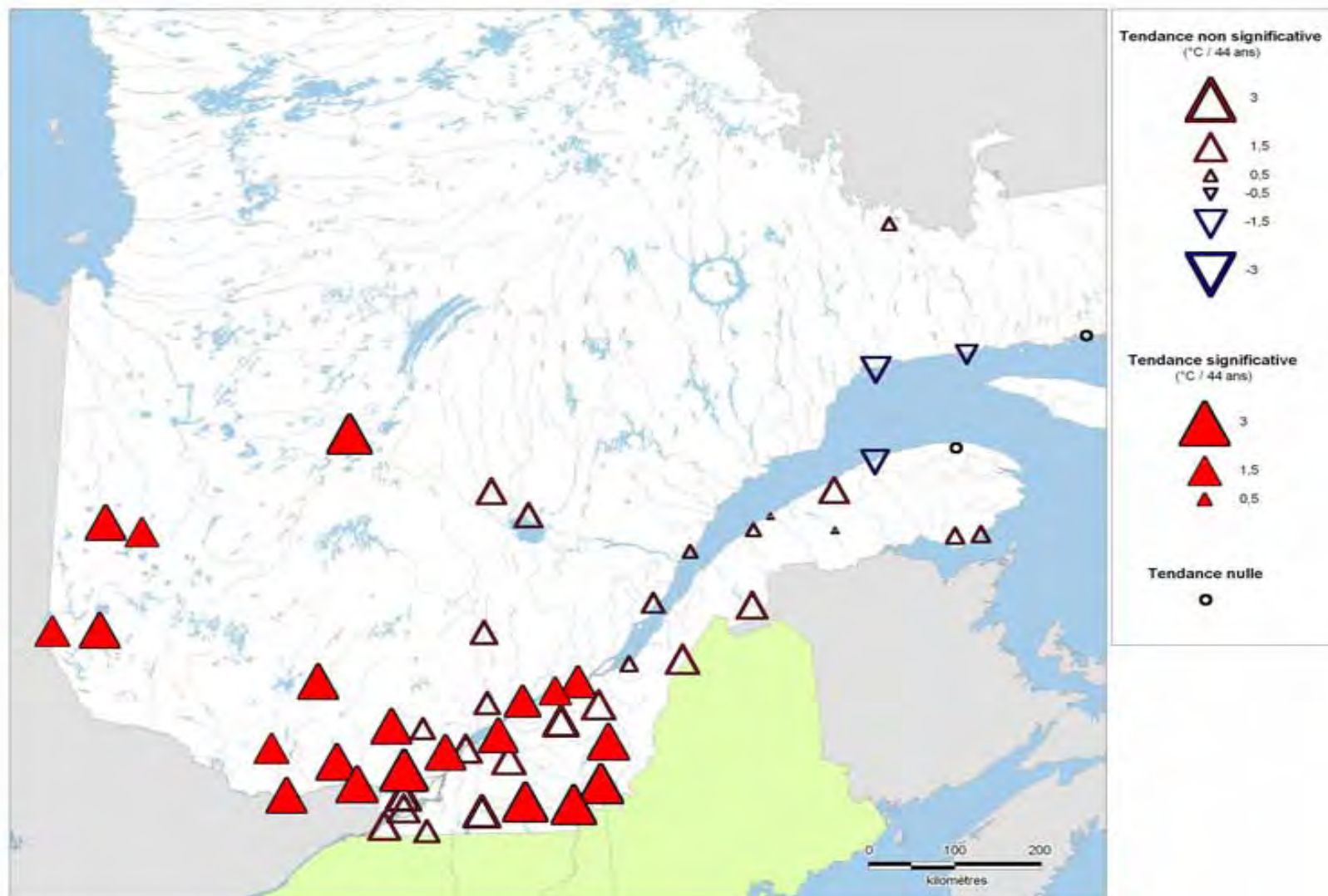


Figure 29 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'hiver entre 1960 et 2003.

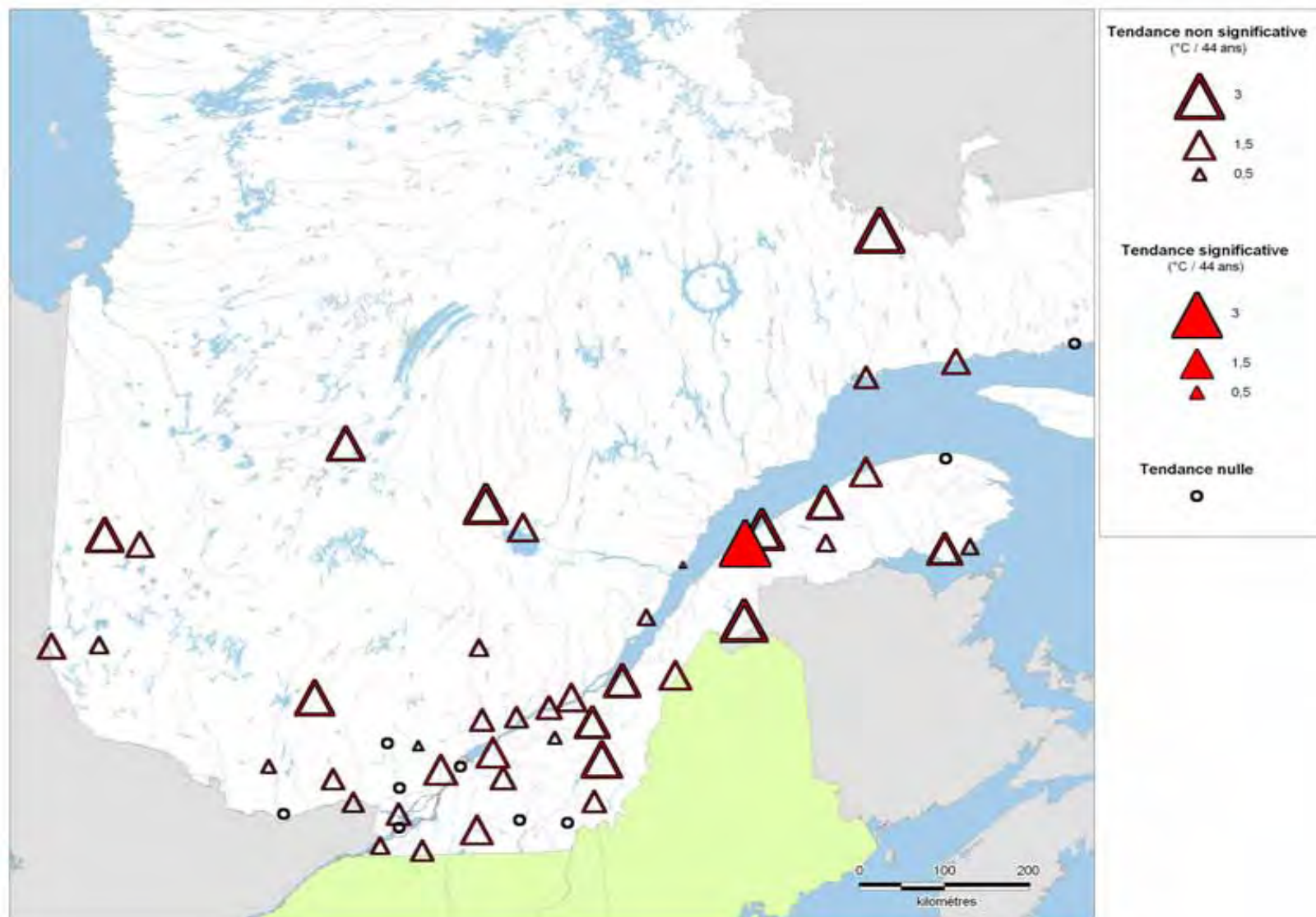


Figure 30 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant le printemps entre 1960 et 2003.

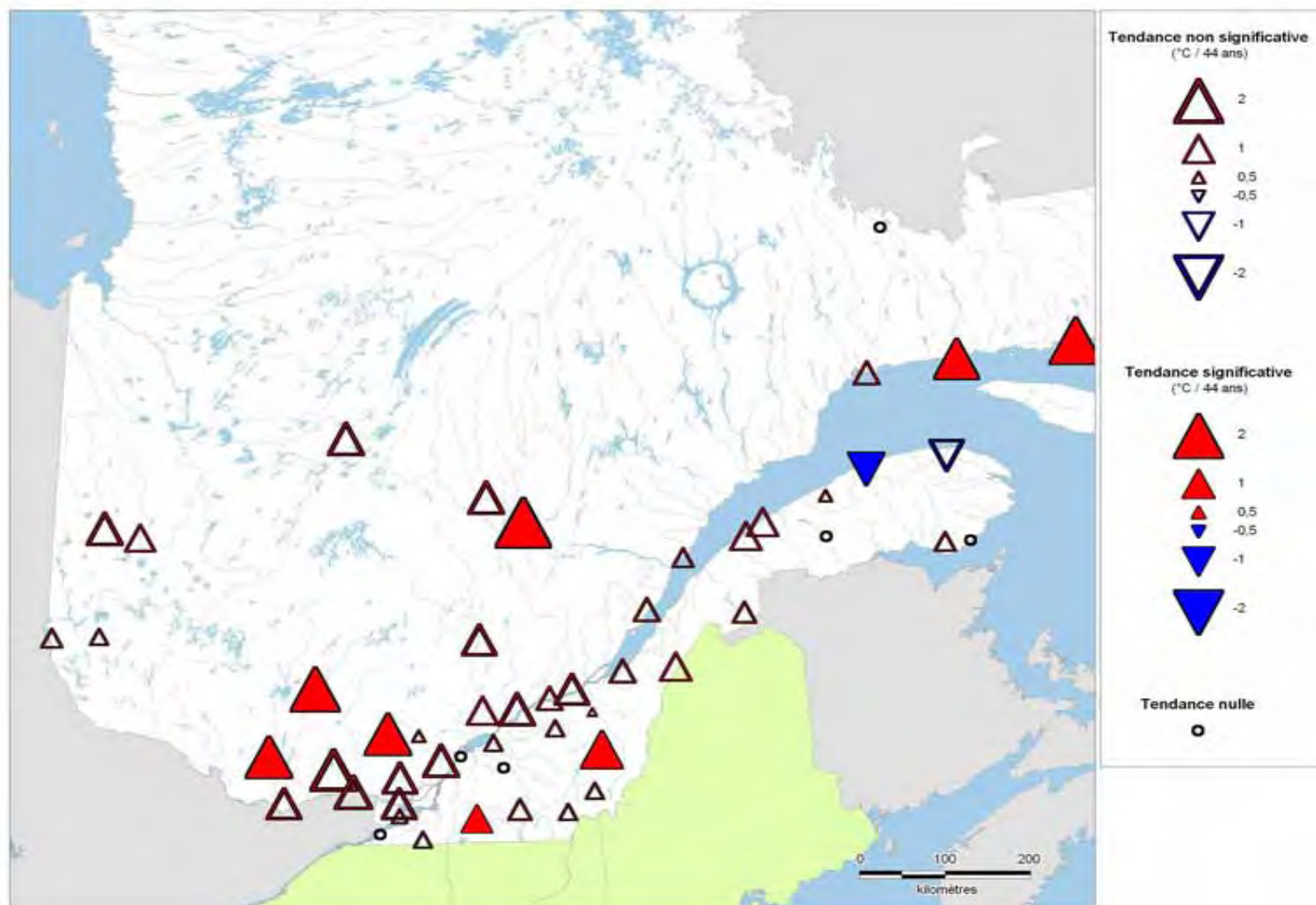


Figure 31 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.

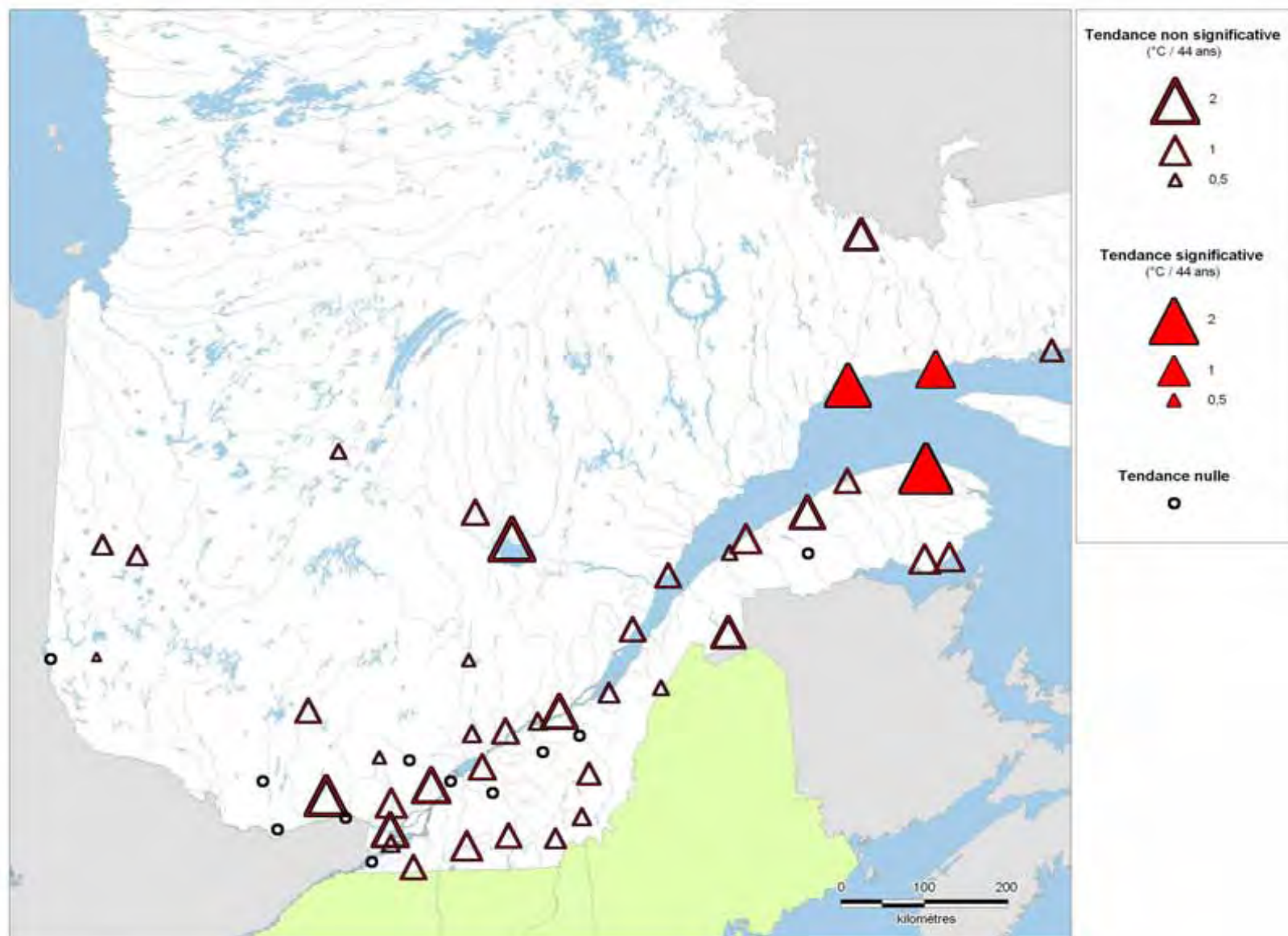


Figure 32 : Tendances du percentile 90 des températures maximales durant l'automne entre 1960 et 2003.

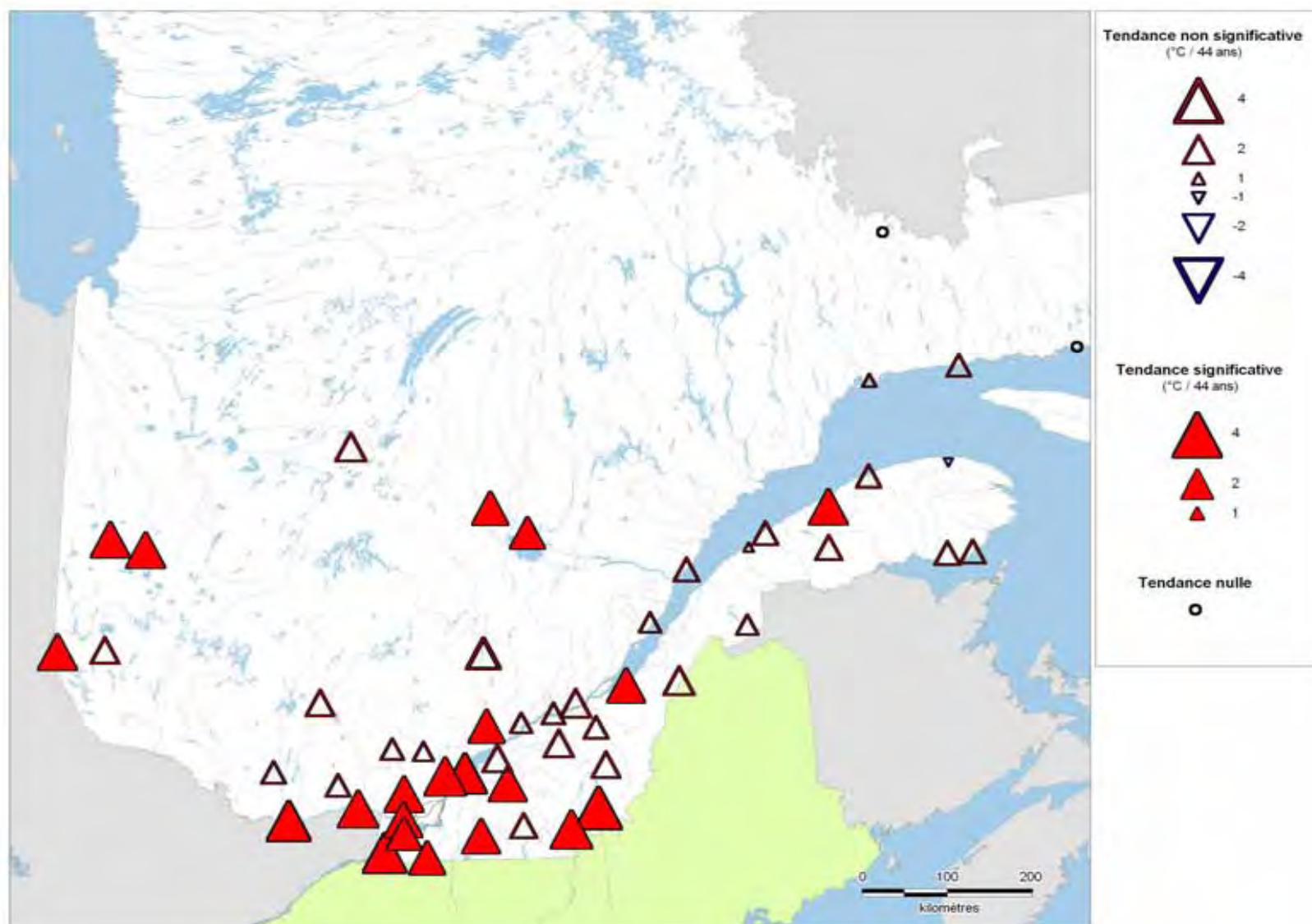


Figure 33 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'hiver entre 1960 et 2003.

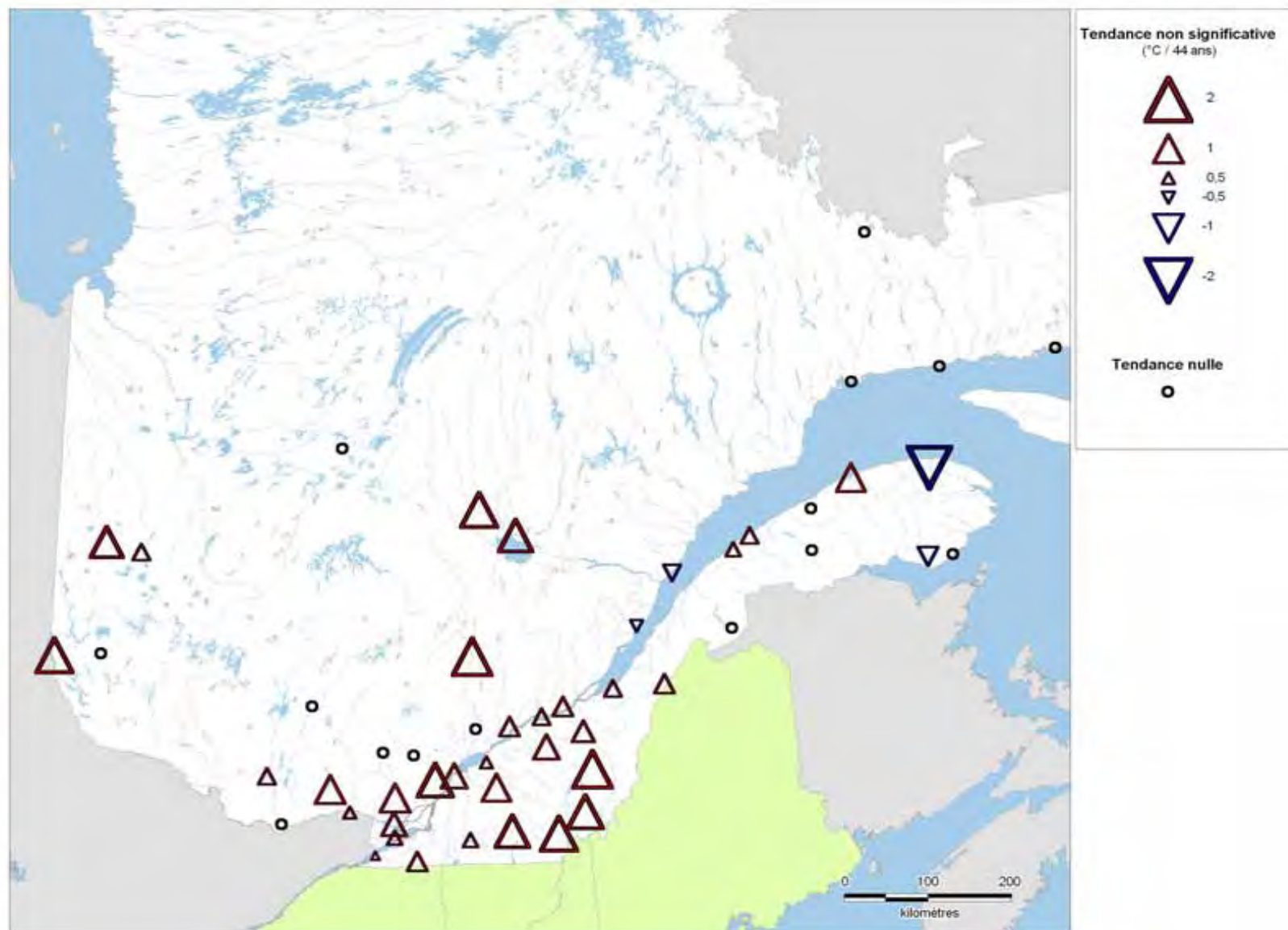


Figure 34 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant le printemps entre 1960 et 2003.

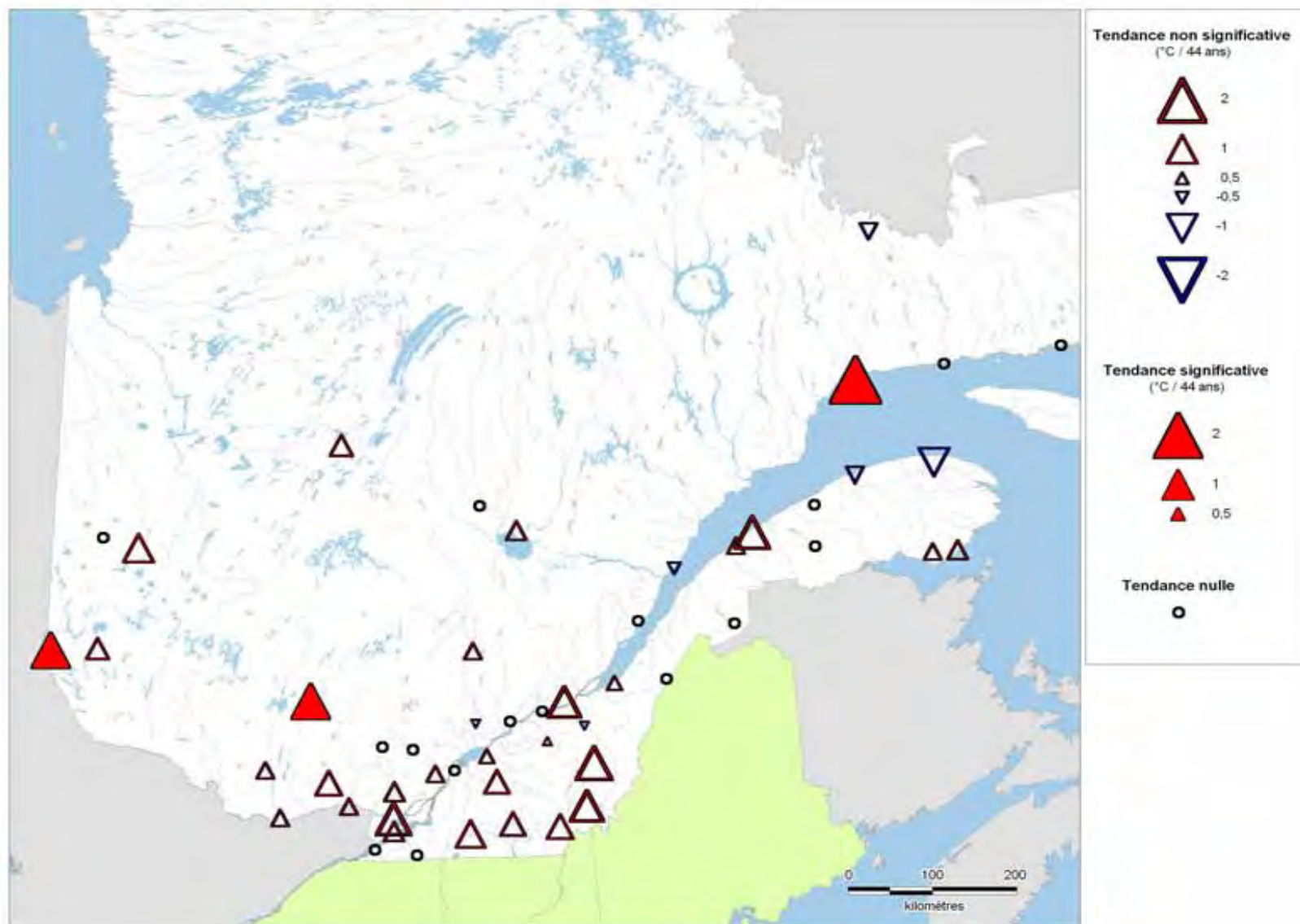


Figure 35 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.

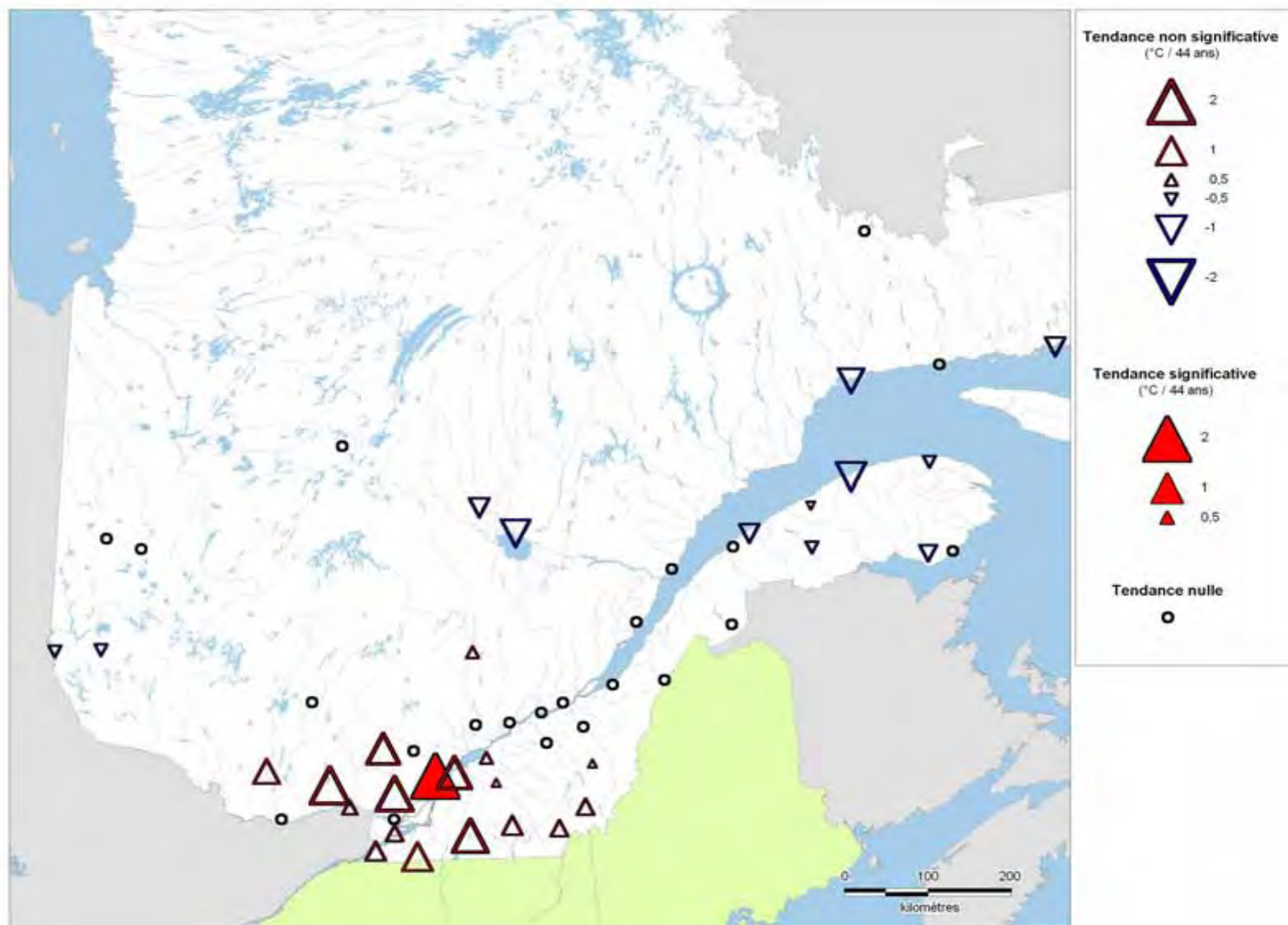


Figure 36 : Tendances du percentile 10 des températures maximales durant l'automne entre 1960 et 2003.

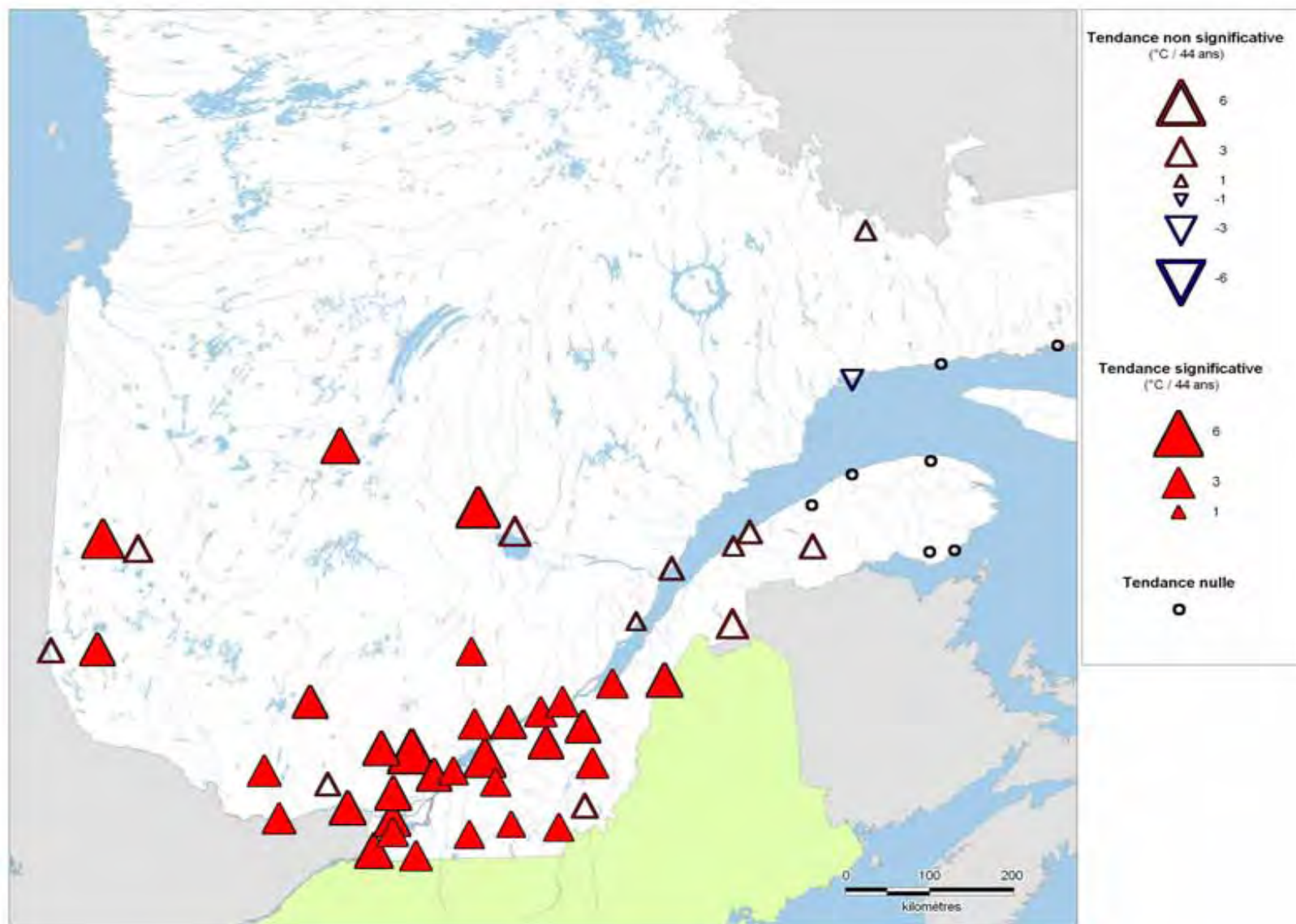


Figure 37 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.

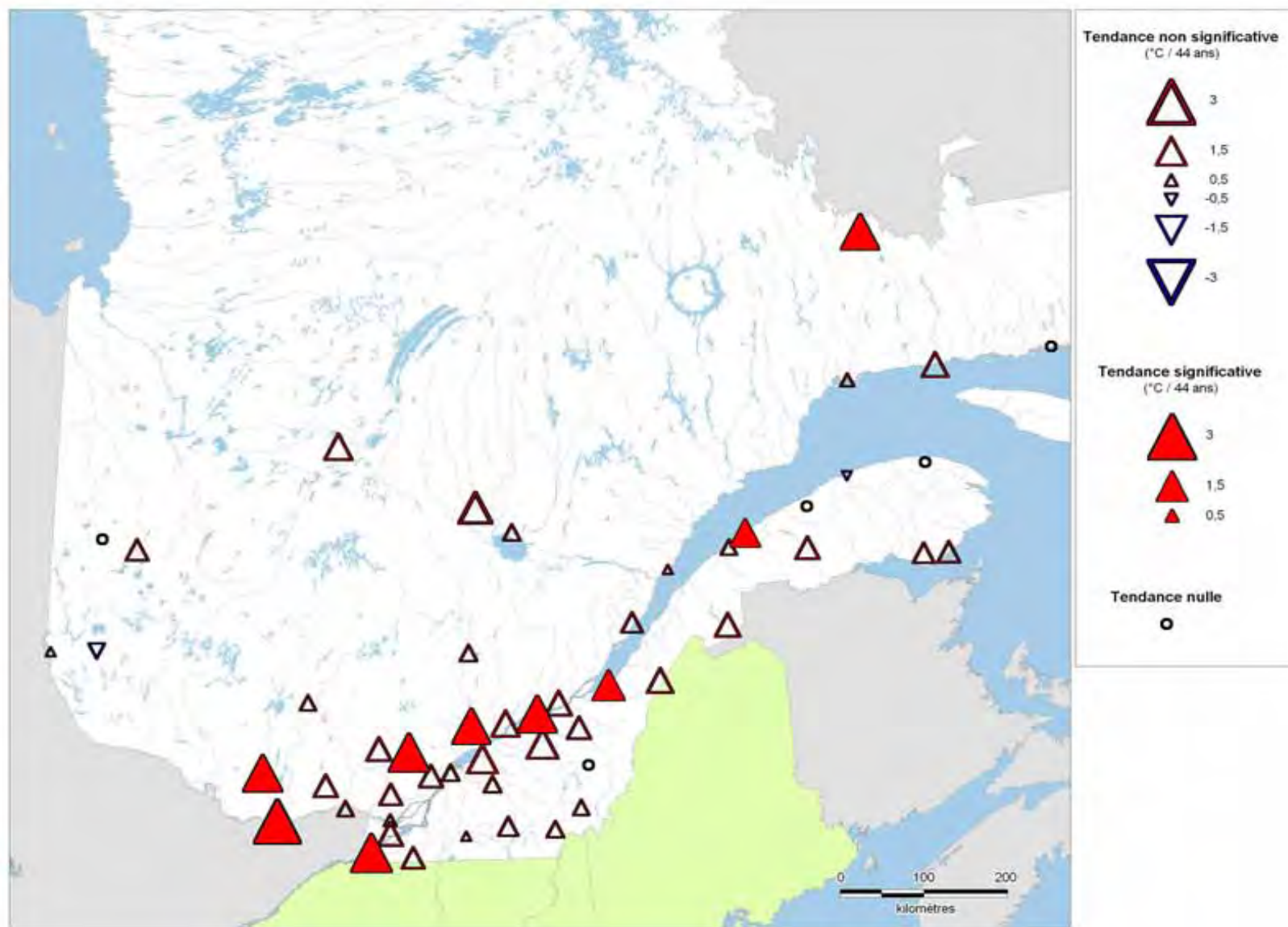


Figure 38 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant le printemps entre 1960 et 2003.

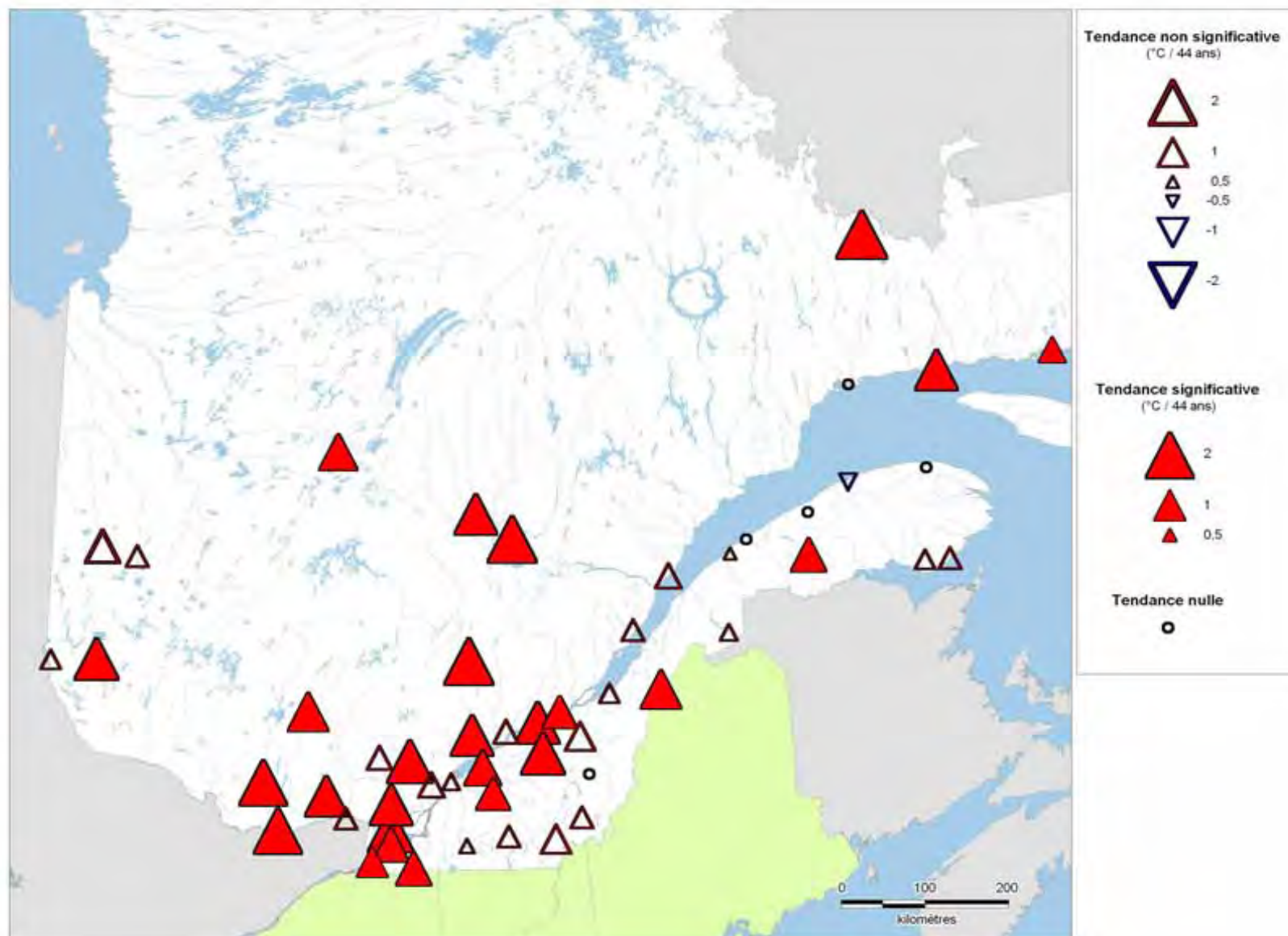


Figure 39 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'été entre 1960 et 2003.

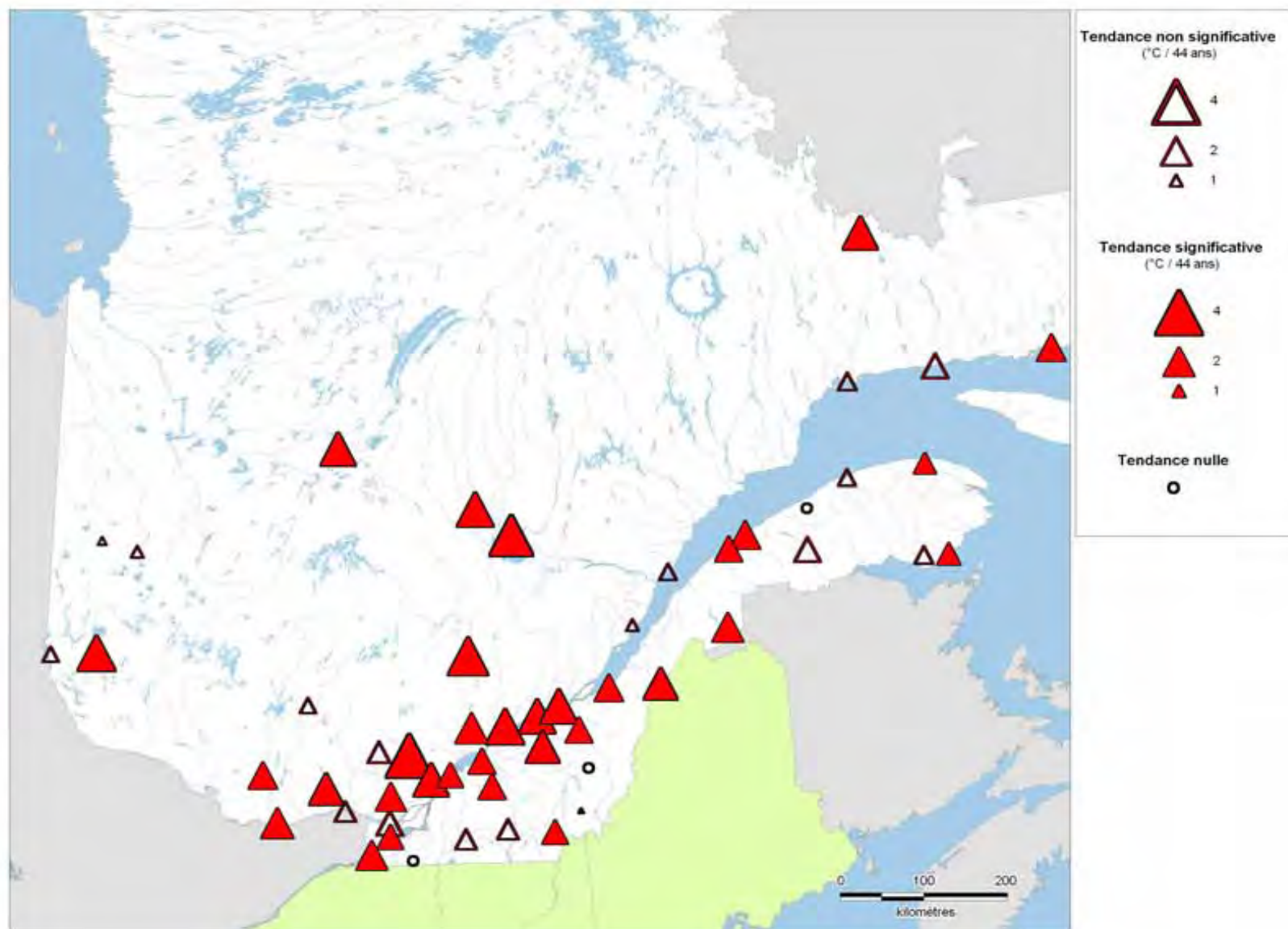


Figure 40 : Tendances du percentile 90 des températures minimales durant l'automne entre 1960 et 2003.

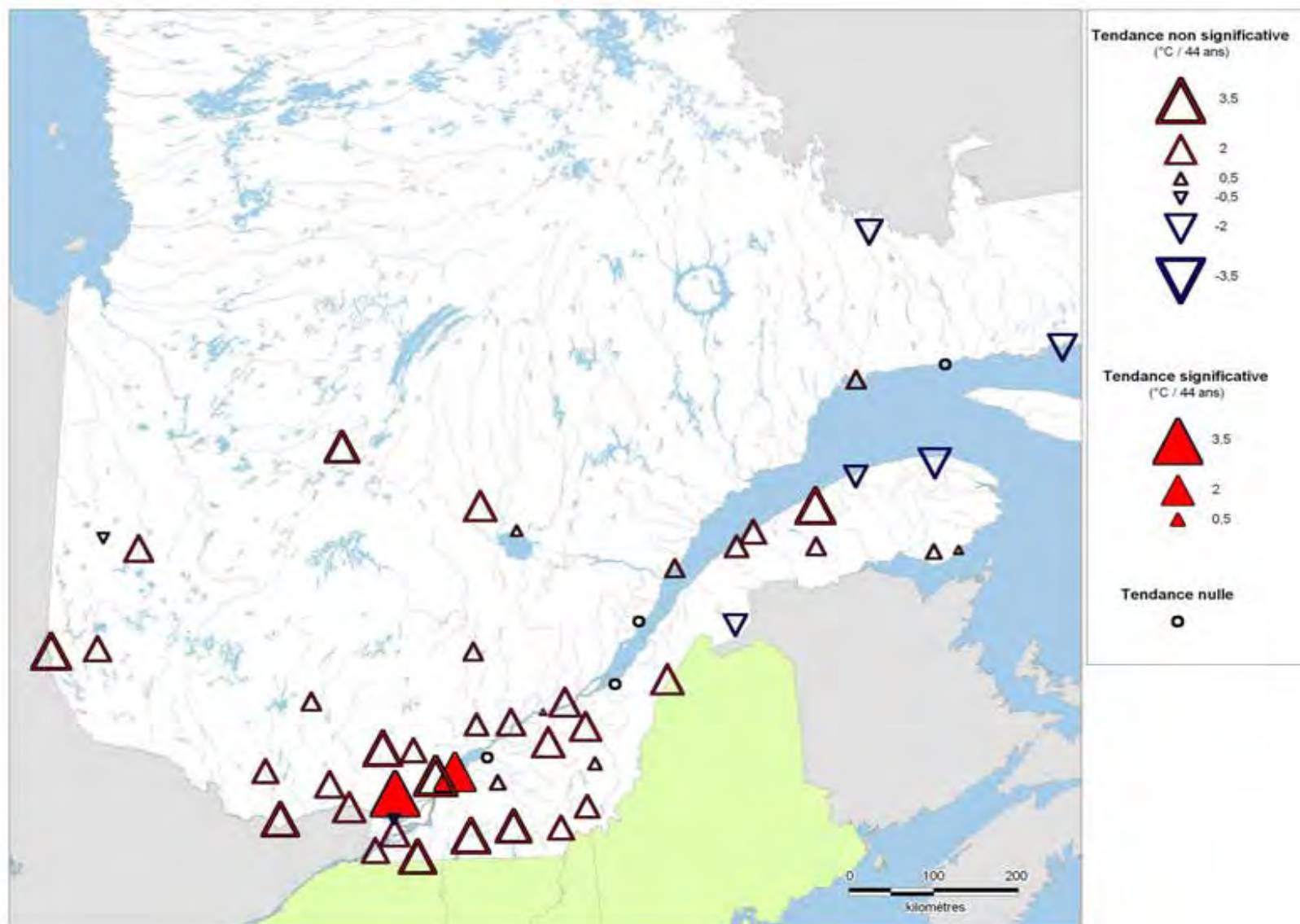


Figure 41 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.

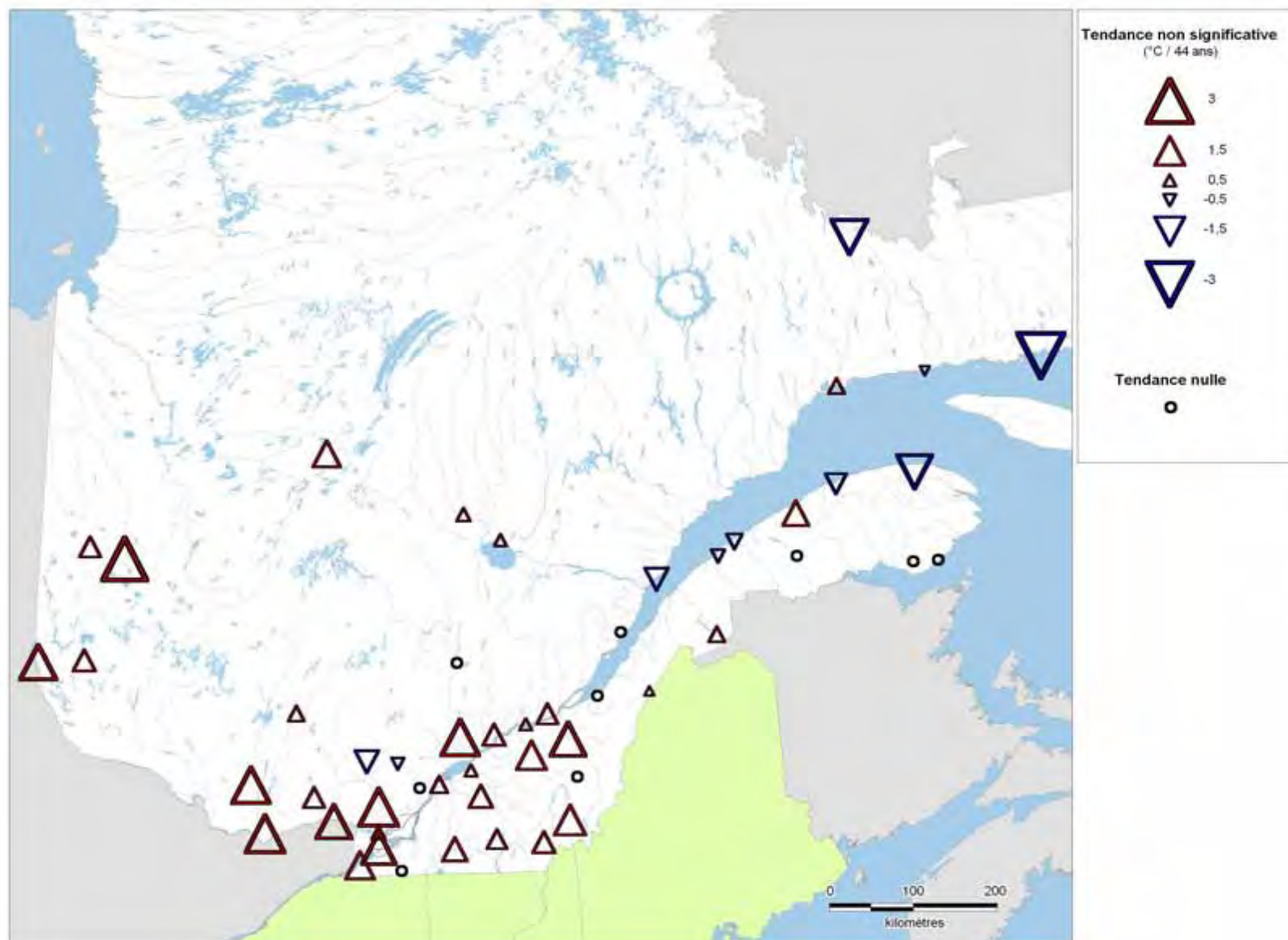


Figure 42 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant le printemps entre 1960 et 2003.

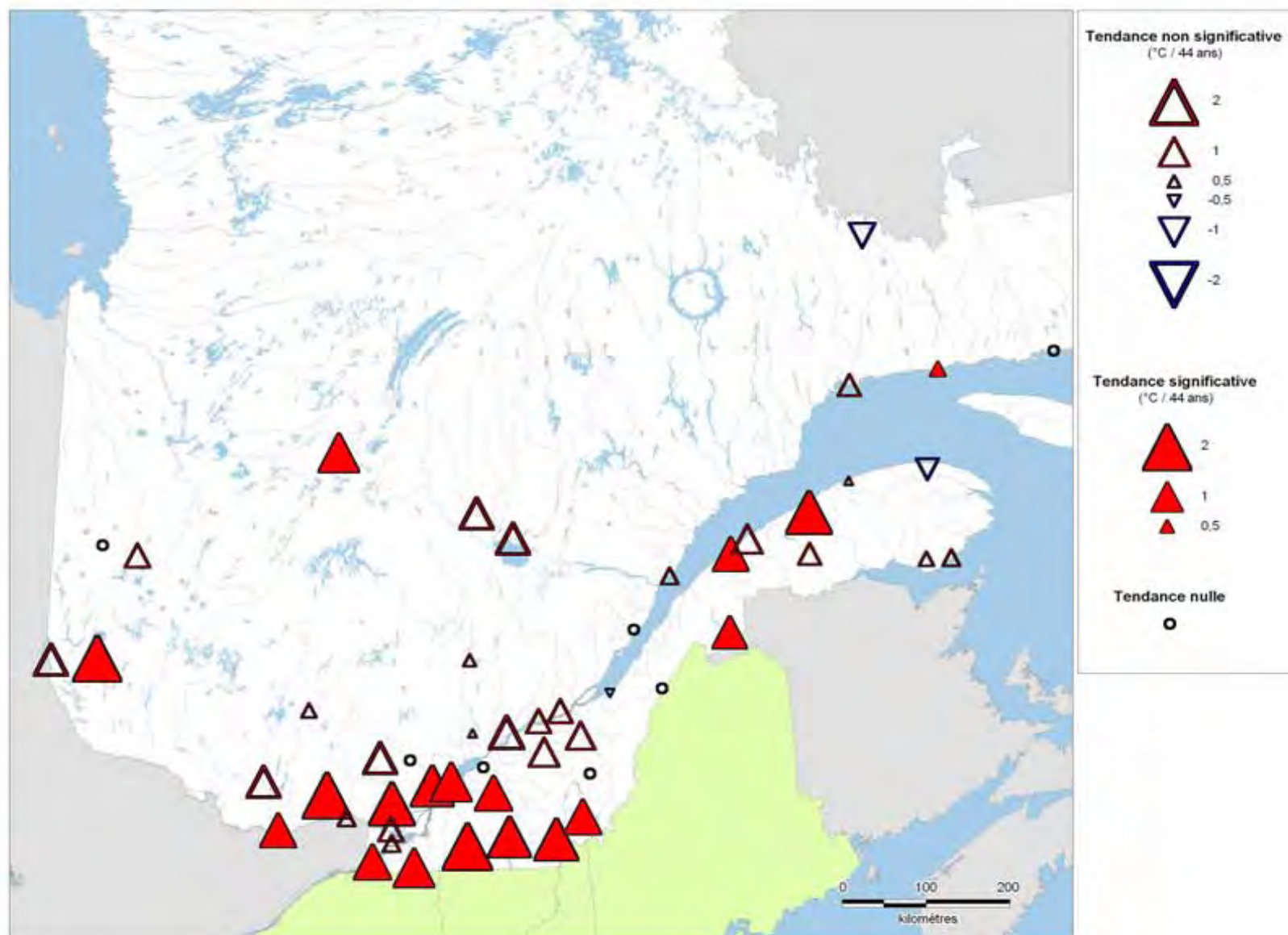


Figure 43 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'été entre 1960 et 2003.

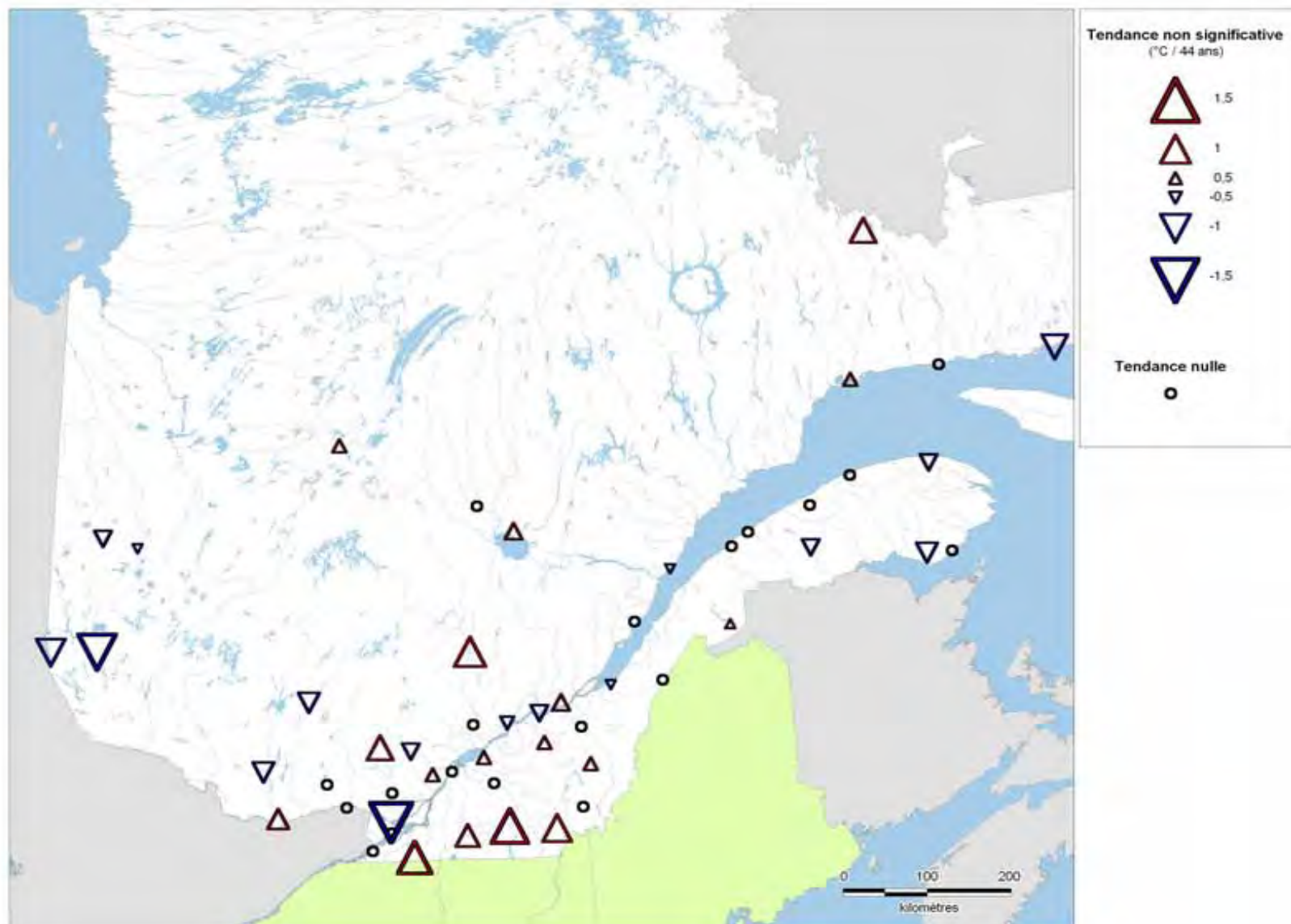


Figure 44 : Tendances du percentile 10 des températures minimales durant l'automne entre 1960 et 2003.

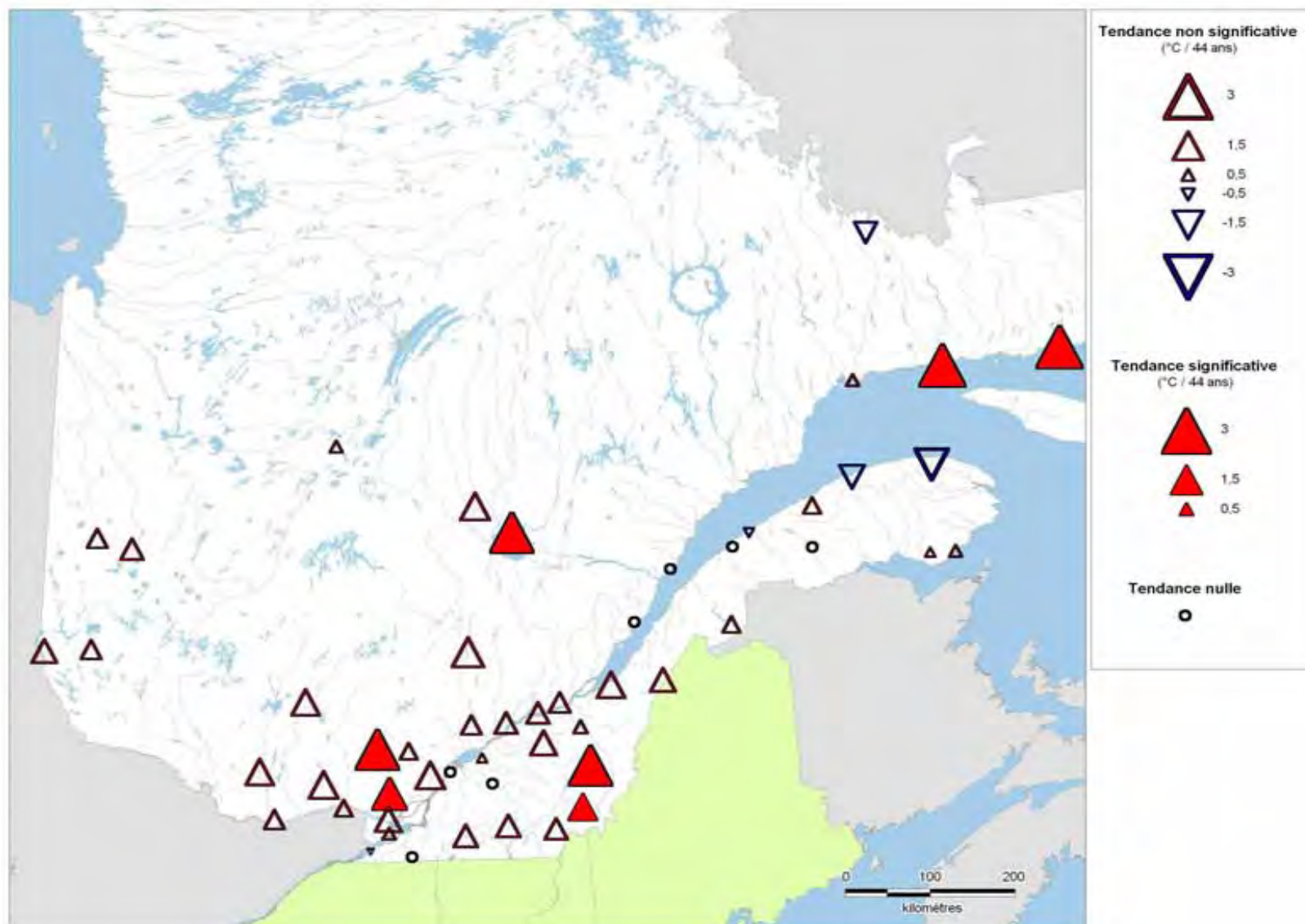


Figure 45 : Tendances du percentile 98 des températures maximales durant l'été entre 1960 et 2003.

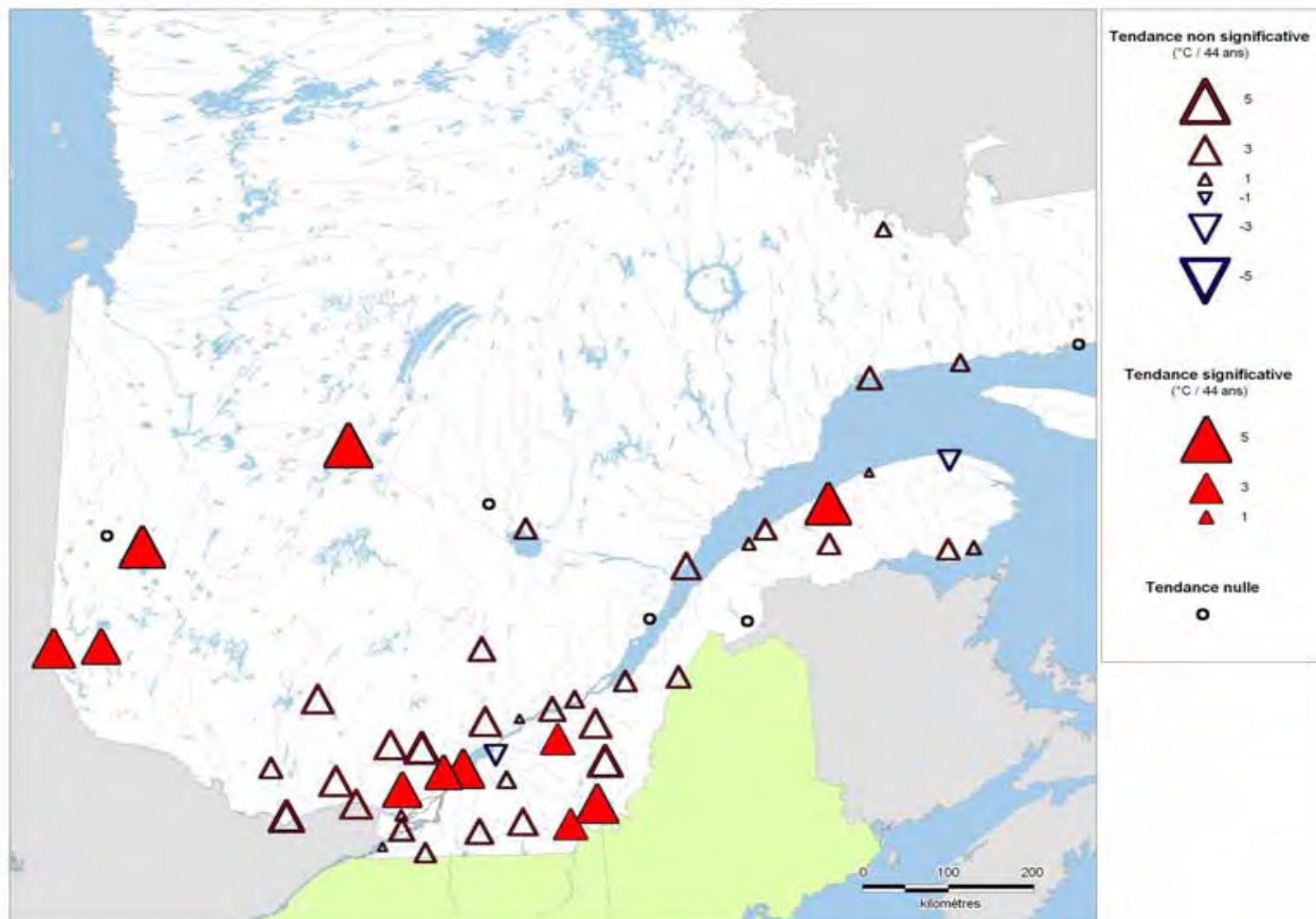


Figure 46 : Tendances du percentile 2 des températures minimales durant l'hiver entre 1960 et 2003.



Figure 47 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'hiver entre 1960 et 2003.



Figure 48 : Tendances de l'écart diurne moyen du printemps entre 1960 et 2003.

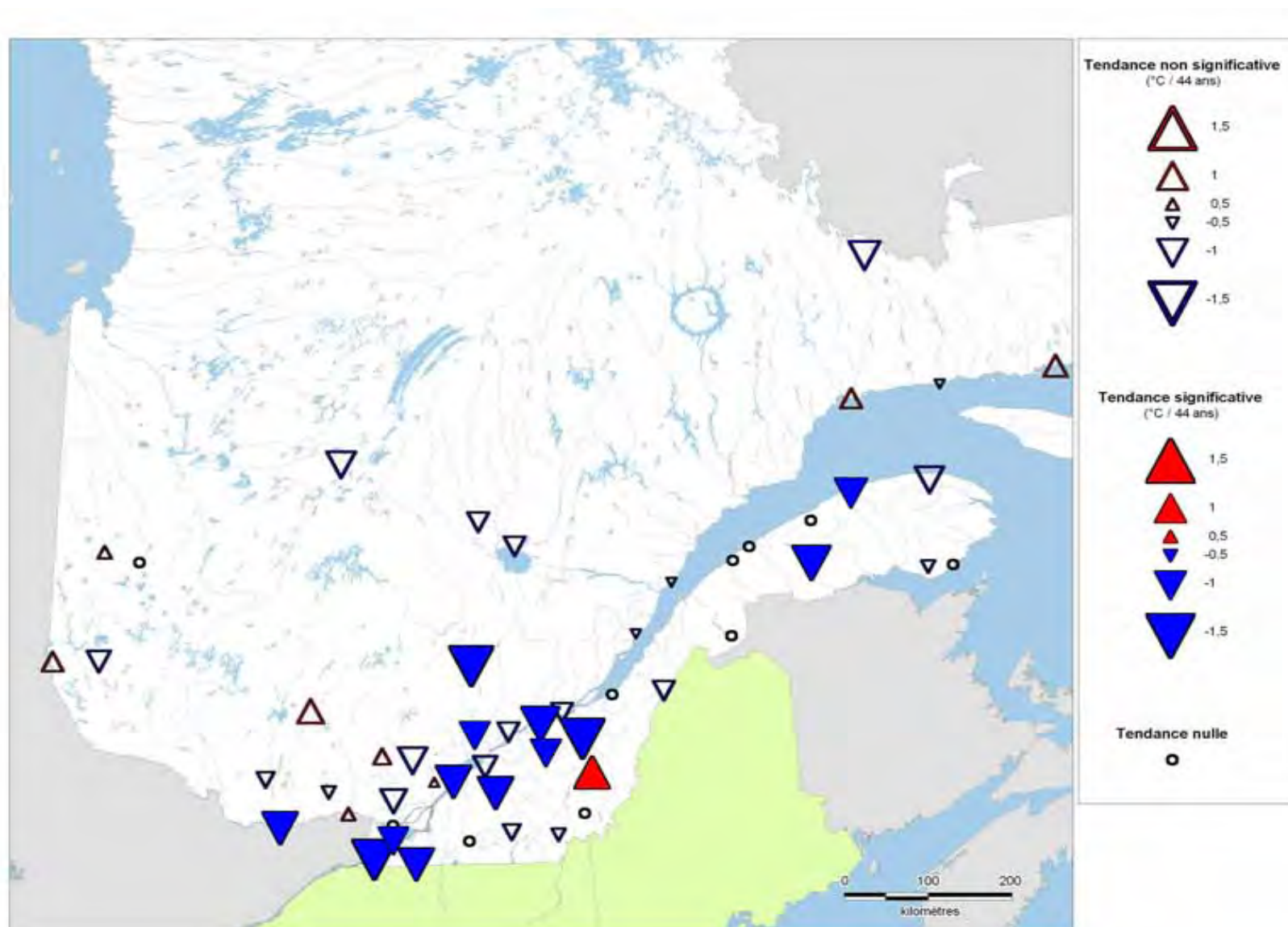


Figure 49 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'été entre 1960 et 2003.



Figure 50 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'automne entre 1960 et 2003.

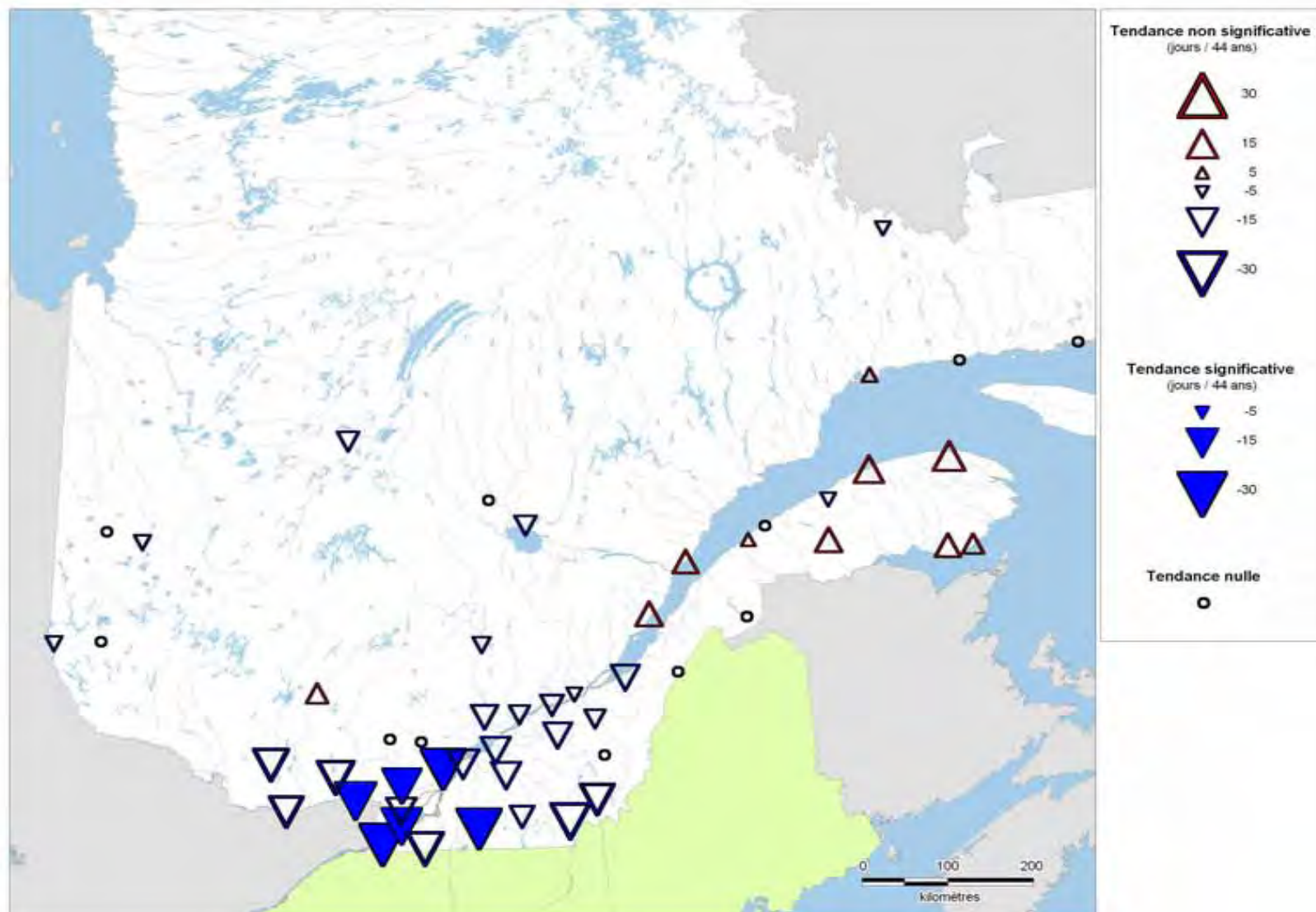


Figure 51 : Tendances de la longueur de la saison de gel soutenu entre 1960 et 2003.



Figure 52 : Tendances de la longueur de la saison de gel non soutenu entre 1960 et 2003.



Figure 53 : Tendances de la fréquence des vagues de froid durant l'hiver entre 1960 et 2003.

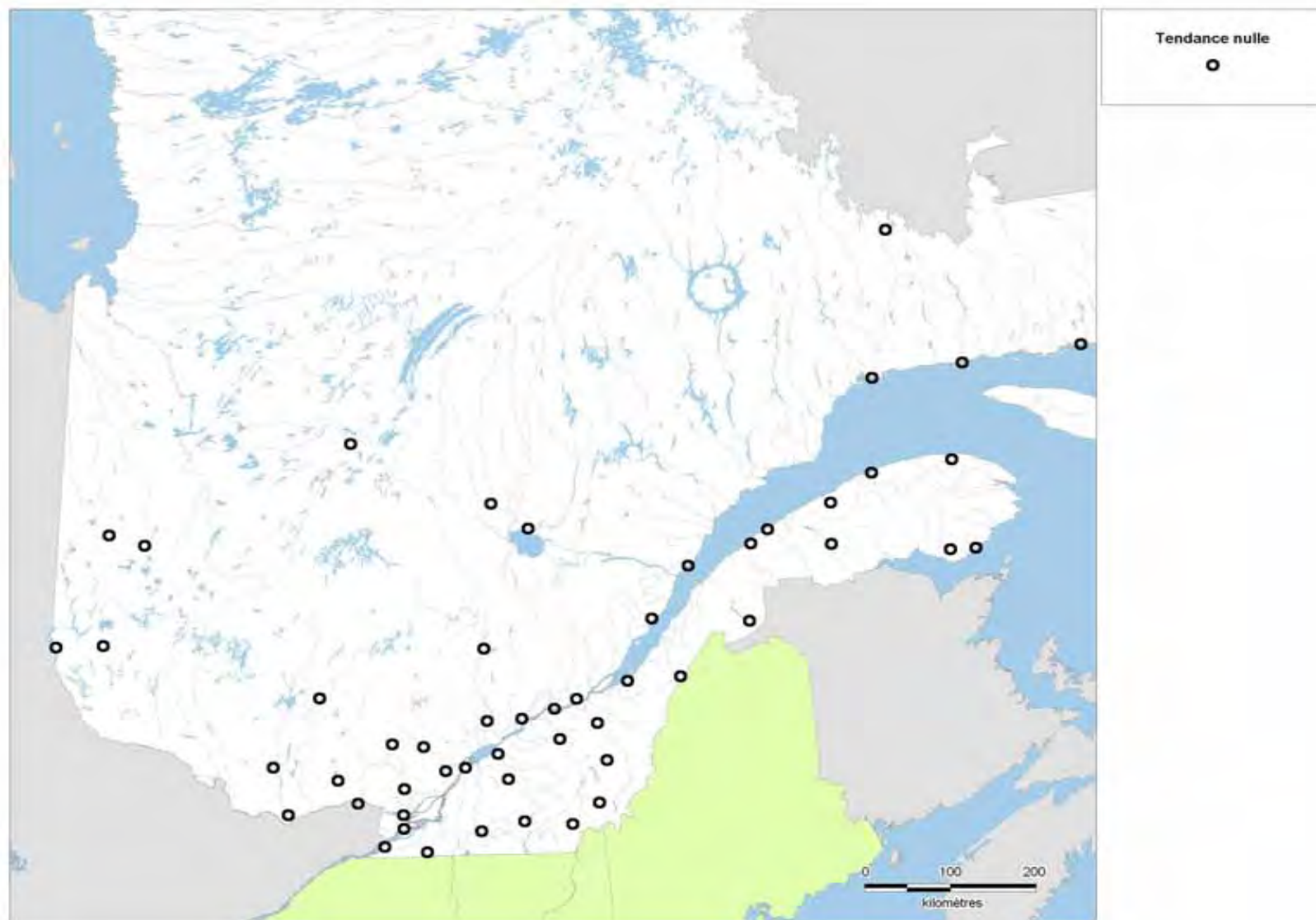


Figure 54 : Tendances de la fréquence des vagues de froid durant le printemps entre 1960 et 2003.



Figure 55 : Tendances de la durée des vagues de froid durant l'hiver entre 1960 et 2003.



Figure 56 : Tendances de la durée des vagues de froid durant le printemps entre 1960 et 2003.

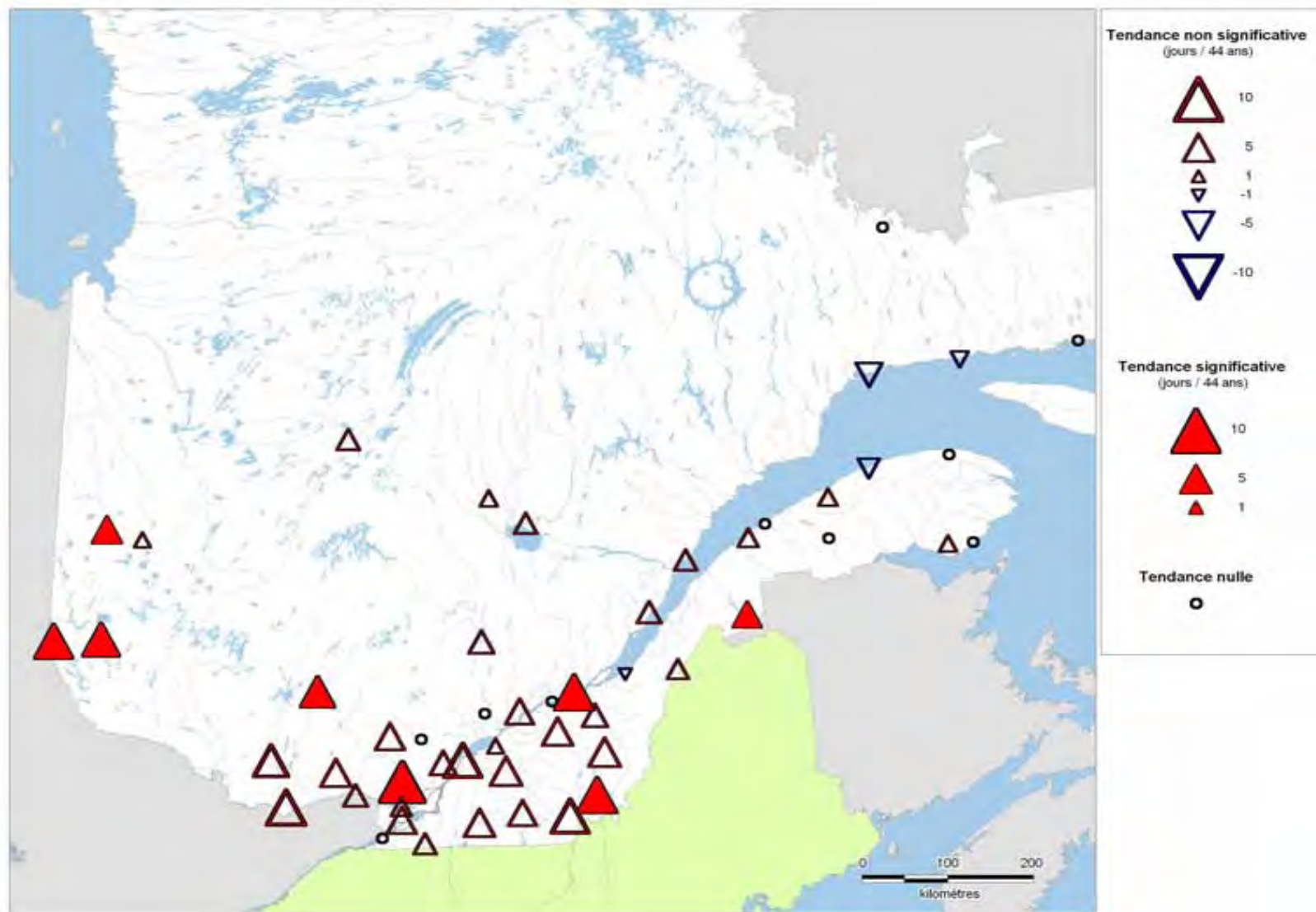


Figure 57 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant l'hiver entre 1960 et 2003.

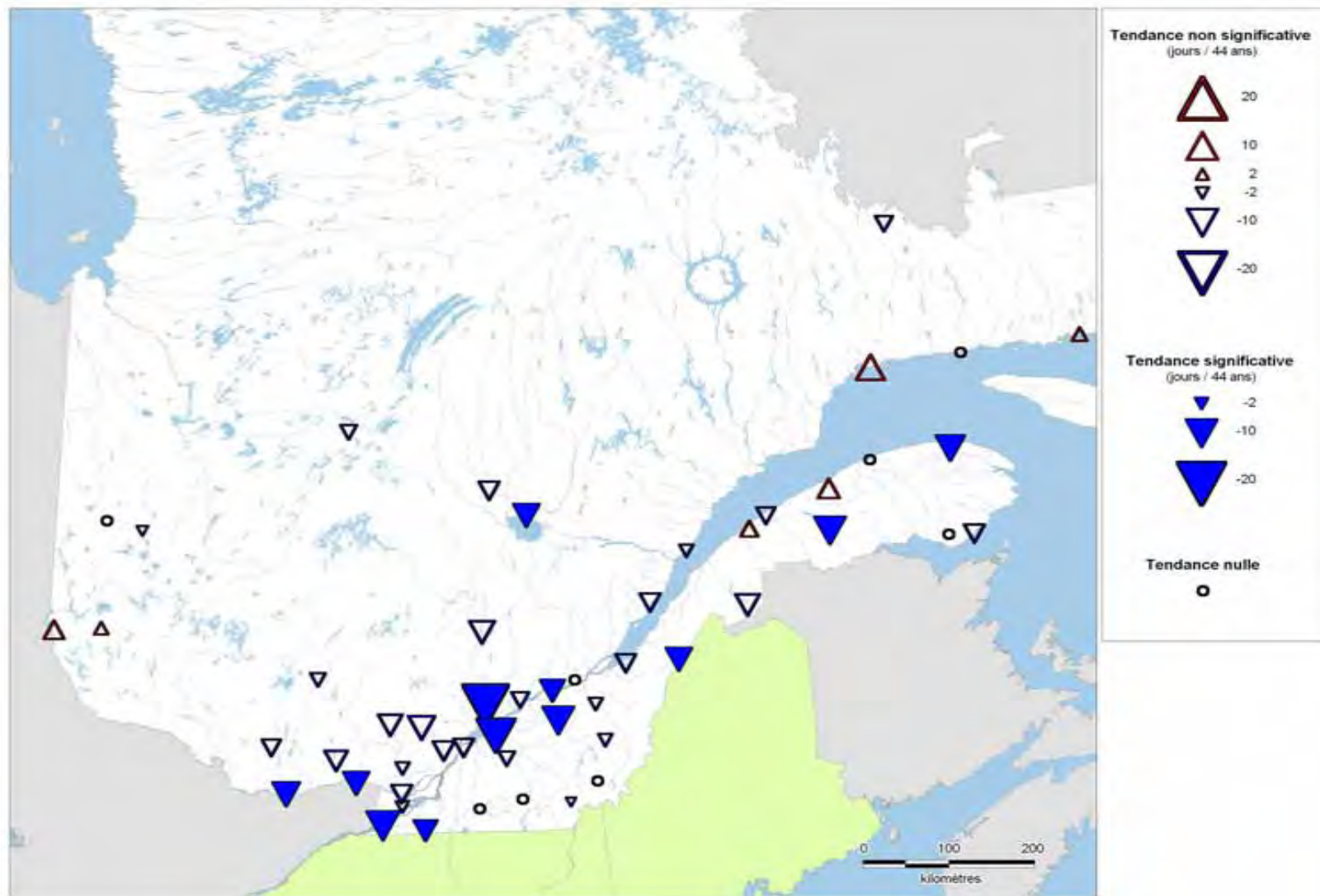


Figure 58 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant le printemps entre 1960 et 2003.



Figure 59 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel durant l'automne entre 1960 et 2003.

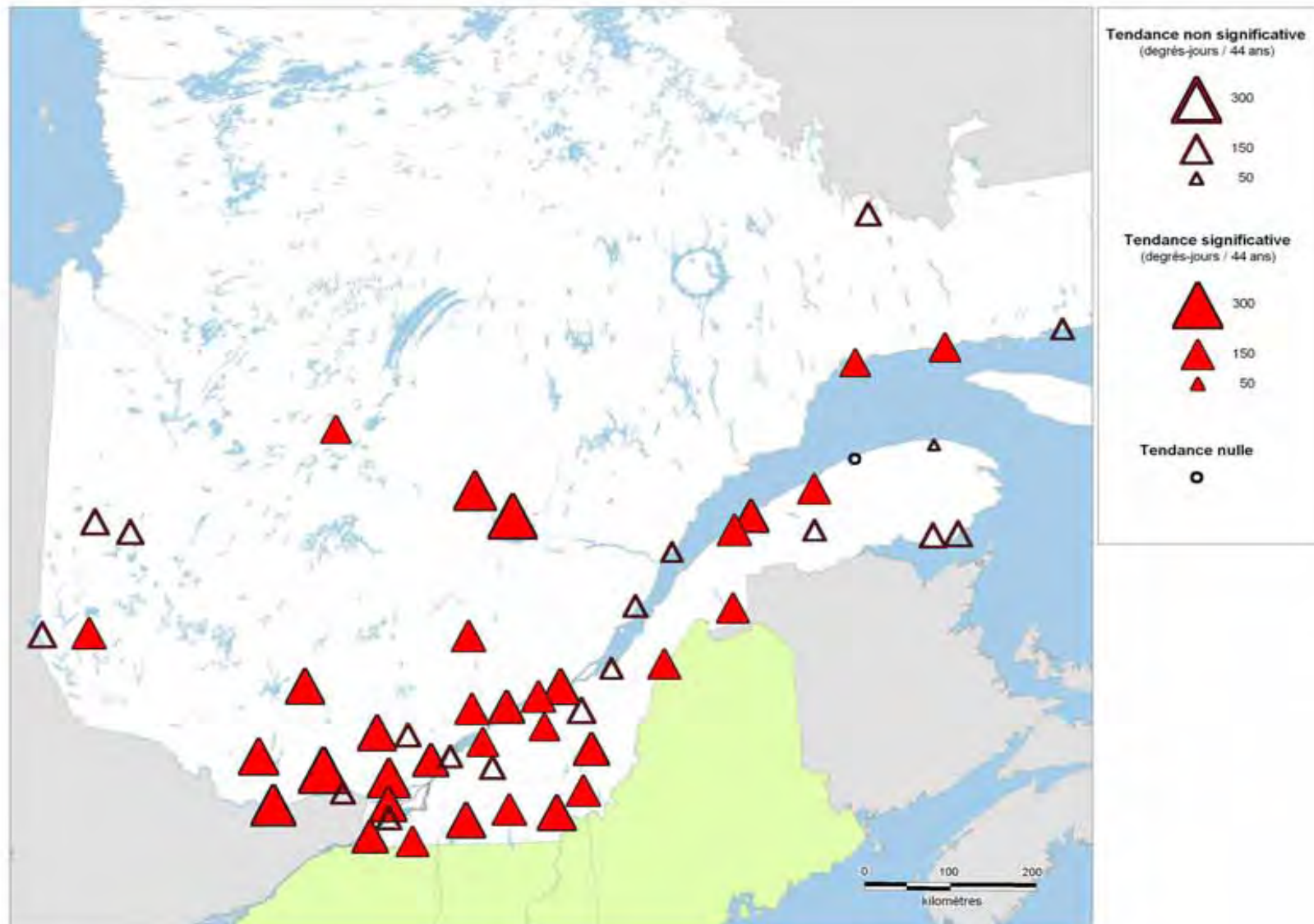


Figure 60 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 5 degrés Celsius entre 1960 et 2003.

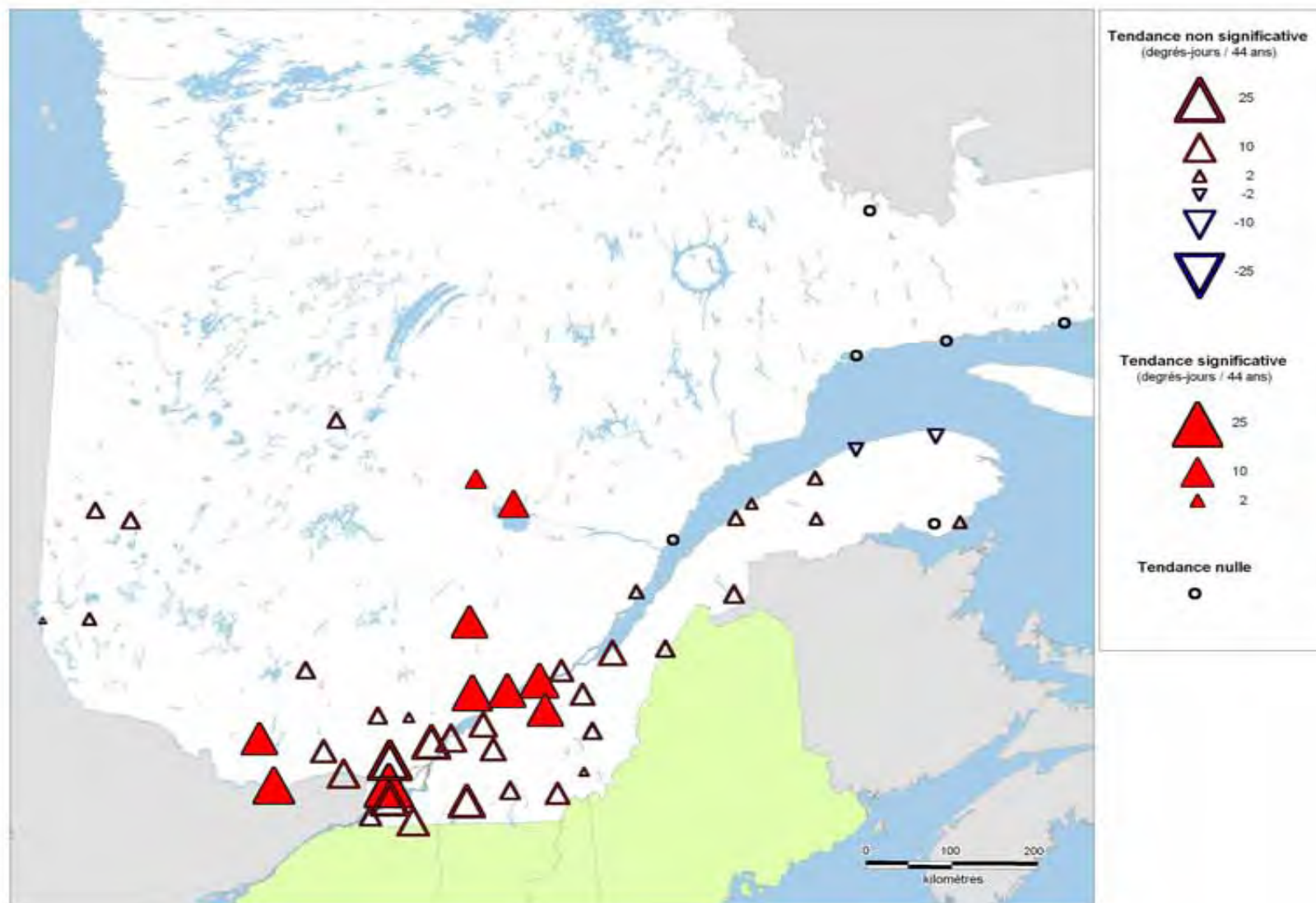


Figure 61 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessus de 22 degrés Celsius entre 1960 et 2003.

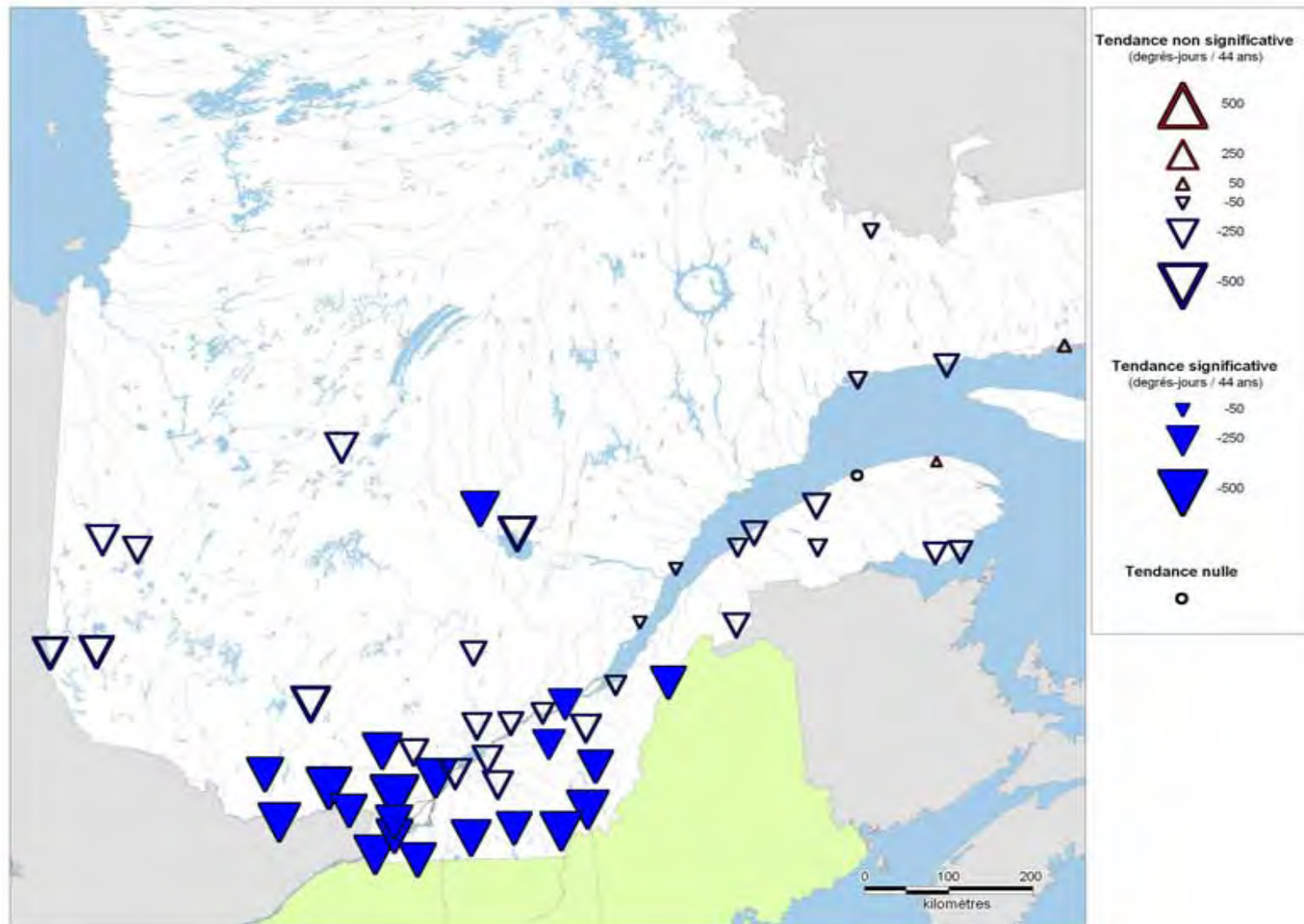


Figure 62 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessous de 18 degrés Celsius entre 1960 et 2003.

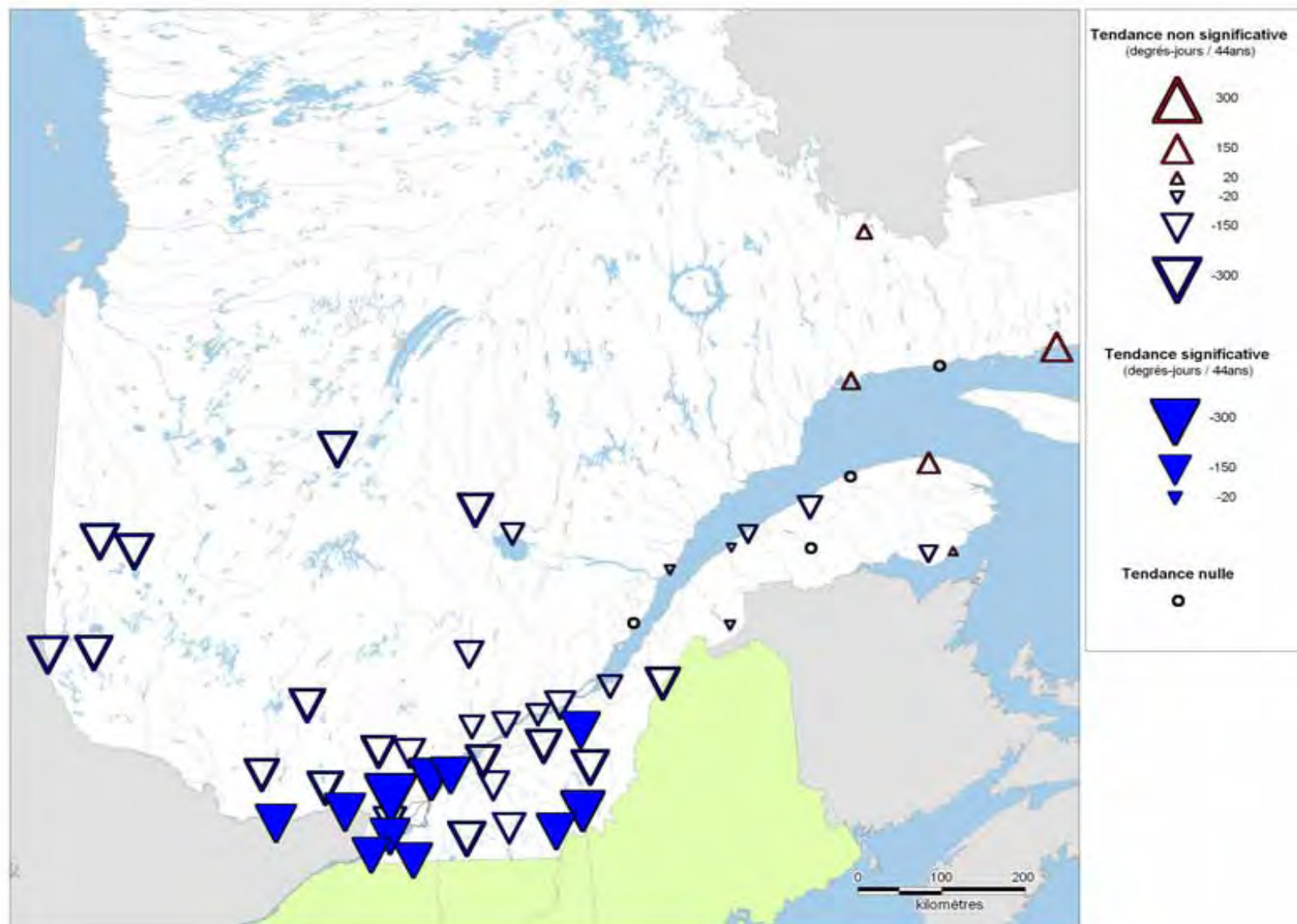


Figure 63 : Tendances du cumul annuel des degrés-jours au dessous de zéro degrés Celsius entre 1960 et 2003.



Figure 64 : Tendances de la longueur de la saison de croissance entre 1960 et 2003.

3.7 Conclusions et discussion

Nous avons défini dans ce chapitre trois types d'indicateurs climatiques pour analyser l'évolution du climat au Québec méridional entre 1960 et 2003. Le premier type d'indicateurs est calculé à partir des séries de températures annuelles homogénéisées. Il s'agit de la tendance non paramétrique des températures annuelles maximales, minimales et moyennes. Ces indicateurs nous permettent d'analyser l'évolution de la température à l'échelle annuelle. Le second type d'indicateurs est calculé à partir des séries de températures saisonnières homogénéisées. Il s'agit de la tendance non paramétrique des températures saisonnières maximales et minimales. Ces indicateurs permettent d'analyser individuellement l'évolution de la température observée durant les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne. Cette analyse permet notamment d'identifier la ou les saisons qui influencent le comportement annuel des températures maximales et minimales. Finalement, le dernier type d'indicateur est calculé à partir des séries de températures quotidiennes homogénéisées. Ces indicateurs permettent d'affiner notre analyse de l'évolution des températures et sont des exemples que des usagers peuvent utiliser ou utilisent pour planifier des activités spécifiques (e.g. degrés-jours de chauffe ou de climatisation). Au total quelques 36 indicateurs ont été calculés à l'aide des données quotidiennes homogénéisées.

La cartographie de ces trois types d'indicateurs permet de dresser un portrait régional de l'évolution de la température au Québec méridional entre 1960 et 2003. Ces résultats permettent également de poursuivre la validation des séries de températures homogénéisées. En effet, lorsque les données d'une station ne sont pas homogénéisées adéquatement, ceci peut se traduire, lors de la cartographie des indicateurs, par des incohérences entre les stations situées dans la même région climatique.

La cartographie de la tendance des températures et des indicateurs n'a pas fait ressortir de stations où l'homogénéisation demeure systématiquement problématique.

Les séries homogénéisées ont servi à tracer un portrait régional de l'évolution des températures et des indicateurs dérivés pour la période 1960 à 2003. Voici une synthèse des principaux résultats obtenus.

PORTRAIT ANNUEL

Les résultats obtenus montrent qu'à plusieurs stations au Québec méridional, les températures annuelles sont à la hausse et que le réchauffement observé varie d'une région à l'autre. Ainsi, les températures annuelles minimales et maximales ont augmenté entre 1960 et 2003 dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. Dans l'est du Québec méridional le réchauffement observé est nettement moins marqué. Un gradient orienté d'ouest en est de la tendance des températures annuelles a donc été mis en évidence. Afin de bien faire ressortir ce gradient et également pour permettre une analyse régionale des résultats, une interpolation des valeurs de la tendance des températures annuelles moyennes a été réalisée. Les résultats obtenus montre que les températures annuelles moyennes ont connu une augmentation se situant entre 0,5 °C et 1,2 °C dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional au cours des années 1960 à 2003. Dans l'est du Québec méridional, c'est à dire dans les régions situées à l'est de la région de la Capitale-Nationale, le réchauffement s'est produit à un rythme moins prononcé, inférieur à 0,5 °C durant la même période. D'autre part, soulignons que le réchauffement a été plus marqué pour les températures de nuit que pour les températures de jour. Ainsi, on peut dire qu'entre 1960 et 2003 les nuits sont devenues moins « fraîches » et les jours un peu plus chauds dans le sud de la province.

PORTRAIT SAISONNIER

L'analyse de l'évolution des températures saisonnières a montré que les températures hivernales et estivales ont connu une augmentation significative à plusieurs stations. Plus spécifiquement, il ressort que, lors de la saison d'été, les températures minimales ont connu une plus forte augmentation que les températures maximales. Pour la saison d'hiver, ce sont plutôt les températures maximales qui ont enregistré la plus forte augmentation. Nous avons également constaté que le gradient de tendance orienté d'ouest en est plus évident pour l'hiver comparativement aux autres saisons.

L'évolution des températures annuelles et saisonnières décrite précédemment est étroitement liée à l'évolution des indicateurs retenus dans cette étude. Ainsi, le réchauffement des températures hivernales entre 1960 et 2003 s'est traduit par les faits suivants :

- une diminution du cumul annuel des degrés jours de chauffe et de gel, principalement dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. On constate,

pour ces deux indicateurs, la présence d'un gradient de tendance orienté d'ouest en est;

- une diminution de la longueur de la saison de gel dans le sud et le centre du Québec méridional;
- une augmentation du nombre de jours de gel et dégel à la majorité des stations localisées dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional;
- une augmentation des 10^e et 90^e percentiles des températures maximales, principalement dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional;
- une augmentation du 90^e percentile des températures minimales dans l'ouest, le sud et le centre du Québec méridional. On constate également l'existence du gradient de tendance orienté d'ouest en est pour cet indicateur;
- une augmentation du 2^e percentile des températures minimales, principalement dans l'ouest et le sud du Québec méridional;
- une diminution de la durée des vagues de froid à la majorité des stations, à l'exception de celles localisées dans la région de la Côte-Nord;
- Enfin, le réchauffement des températures hivernales entre 1960 et 2003 ne semble pas avoir un impact direct sur l'évolution des indicateurs suivants : 10^e percentile des températures minimales, l'écart diurne et la fréquence des vagues de froid.

Le réchauffement des températures estivales s'est traduit par les faits suivants :

- une augmentation du cumul annuel des degrés-jours de croissance dans toutes les régions du Québec méridional;
- une augmentation du cumul annuel des degrés-jours de climatisation, principalement dans le sud et le centre du Québec méridional;
- une diminution de l'écart diurne à plusieurs stations situées dans le sud et l'est du Québec méridional;
- une augmentation du 10^e percentile des températures minimales, principalement, dans le sud du Québec méridional. Toutefois, on dénombre également quelques stations situées dans l'est du Québec ayant des tendances significativement à la hausse.

- une augmentation du 90^e percentile des températures minimales à plusieurs stations situées dans l'ensemble des régions du Québec méridional;
- Le réchauffement des températures estivales entre 1960 et 2003 ne semble pas avoir d'impact direct sur l'évolution des indicateurs suivants : 10^e, 90^e et 98^e percentiles des températures maximales,

Au printemps et à l'automne, les températures minimales et maximales montrent des tendances moins significatives par rapport aux saisons de l'hiver et de l'été. Toutefois, nous avons constaté que, durant les saisons du printemps et de l'automne, les amplitudes des tendances des températures sont relativement importantes à plusieurs stations. L'analyse des indicateurs, concernant ces deux saisons, a permis de tirer les conclusions suivantes :

- une diminution du nombre de jours de gel et dégel durant le printemps principalement dans le sud, le centre et l'est du Québec méridional;
- une diminution du nombre de jours de gel et dégel durant l'automne à quelques stations situées dans presque toutes les régions du Québec méridional;
- une augmentation du 90^e percentile des températures minimales durant l'automne à plusieurs stations du Québec méridional;
- une augmentation du 90^e percentile des températures minimales durant le printemps, principalement dans le sud et le centre du Québec méridional;
- aucune augmentation significative de la longueur de la saison de croissance n'a été observée, alors que, le cumul annuel des degrés-jours de croissance a connu une augmentation significative à plusieurs stations du Québec méridional. Ceci nous amène à recommander d'analyser l'évolution de la saison de croissance par d'autres indicateurs. À titre d'exemple, il serait sans doute intéressant d'analyser séparément l'évolution des dates de début et de fin de la saison de croissance.

Les résultats présentés dans ce chapitre constituent une source d'informations de la plus haute importance pour les différents usagers de données climatologiques qui tentent de comprendre l'évolution récente du climat en particulier dans le cadre d'études sur les changements climatiques. Enfin, rappelons que les résultats présentés dans ce rapport reposent sur des séries de températures

dont l'homogénéité a été vérifiée et que cette vérification constitue une étape incontournable à toute analyse de l'évolution du climat.

4 CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

Dans ce rapport, nous avons présenté les résultats de l'homogénéisation des séries de températures correspondant à 53 stations climatiques localisées au Québec méridional. Nous avons ensuite dressé, à partir de ces séries, un portrait régional de l'évolution de la température entre 1960 et 2003. Ces résultats représentent la réalisation des objectifs principaux d'une étude ayant bénéficiée d'un financement conjoint du consortium Ouranos et du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

Le processus d'homogénéisation développé dans le cadre de ce travail a d'abord permis de constater que seulement 36 % des 106 séries de températures traitées sont homogènes. Des ajustements ont ensuite été apportés aux séries identifiées comme hétérogènes afin de les rendre homogènes. Les conclusions liées à cette partie de cette étude sont décrites à la fin du chapitre 2 du présent rapport. L'homogénéisation des séries de températures a permis de dresser un portrait régional de l'évolution de la température et d'indicateurs climatiques au Québec méridional entre 1960 et 2003. Les différentes conclusions retenues sont décrites à la fin du chapitre 3 de ce rapport. Ainsi, à titre d'illustration, les résultats obtenus montrent qu'à plusieurs stations au Québec méridional, les températures annuelles sont à la hausse durant la période 1960 à 2003 et que le réchauffement observé varie d'une région à l'autre. Au niveau saisonnier, l'analyse de l'évolution des températures saisonnières montre que les températures hivernales et estivales ont connu une augmentation significative à plusieurs stations.

Outre les conclusions décrites à la fin des chapitres 2 et 3 de ce rapport, nous tenons à mentionner que la réalisation de ce travail a permis de :

- Identifier un réseau de 114 stations climatiques ayant des observations comprises entre 1960 et 2003 et couvrant les différentes régions du Québec méridional;
- développer une technique pour l'estimation des valeurs manquantes présentes dans les séries de températures quotidiennes,
- développer une méthode pour l'estimation de l'amplitude des sauts détectés dans les séries de températures;
- établir un processus de décision basé sur plusieurs outils statistiques pour retenir ou non les sauts détectés dans les séries de températures;

- tester sur plusieurs séries de températures simulées les adaptations apportées à la technique d'homogénéisation;
- établir un processus d'homogénéisation basé sur l'analyse graphique, les résultats des techniques statistiques, l'information tirée des métadonnées et la validation régionale des séries homogénéisées ;
- rendre disponible à la communauté scientifique une base de données des séries de températures homogénéisées correspondant à 52 stations climatiques.

Finalement, quelques recommandations découlent de cette étude. Ainsi les usagers de données climatologiques intéressés par une analyse de l'évolution du climat devraient :

- favoriser l'utilisation de données homogénéisées lorsqu'elles sont disponibles pour la région et la période d'intérêt;
- consulter les métadonnées des stations dont les séries d'observations n'ont pas été homogénéisées. Idéalement, avant d'utiliser les séries non homogénéisées, on devrait s'assurer qu'aucun évènement susceptible d'influencer la mesure n'est rapporté dans le dossier de ces stations pour la période d'intérêt (déplacement de stations, changements de la procédure d'observation et/ou de l'instrumentation, etc).
- réaliser une comparaison sur une base régionale des tendances obtenues à partir des séries non homogénéisées qui sont retenues et des séries homogénéisées disponibles pour la région et la période considérée.
- consulter les gestionnaires des réseaux climatologiques qui connaissent généralement très bien leurs stations et leurs données et qui sont, de ce fait, en mesure de conseiller les usagers sur les meilleurs choix à faire.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été rendu possible grâce à la contribution financière d'Ouranos et du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Nous tenons à exprimer tous nos remerciements à Lucie Vincent d'Environnement Canada pour ses judicieux commentaires et ses nombreuses suggestions. Un grand merci également à Frédéric Guay d'Ouranos pour sa précieuse collaboration à la production des cartes illustrant ce rapport. Merci également à Diane Chaumont d'Ouranos pour ses suggestions sur le choix de certains indicateurs.

Finalement, nous tenons à remercier tous ceux et celles qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail de recherche.

5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kendall M.G. (1975), *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London
- Mann H.B. (1945), Nonparametric Tests against Trend, *Econometrica* 13, 245-259
- Sen, P.K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Sheng, J. and F.W. Zwiers, 1998: An improved scheme for time-dependent boundary conditions in atmospheric general circulation models. *Climate Dynamics*, 14, 609-613.
- Vincent, L.A. (1998). A technique of the identification of inhomogeneities in canadian temperature series. *Journal of Climate*, Vol. 11 : 1094-1104.
- Vincent, L.A., Zhang, X., Bonsal, B.R. and Hogg, W.D. (2001). Homogenization of daily temperature over Canada. *Journal of climate*, Vol. 15 :1322-1334.
- Yagouti A., G. Boulet et L.A. Vincent, 2006. On the estimation of missing data in daily temperature series, À soumettre : *International Journal of Climatology*.
- Yagouti A., G. Boulet, 2003, Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec. Rapport d'étape no 1 : Constitution de la base de données et estimation des valeurs manquantes dans les séries de températures quotidiennes, rapport interne Consortium Ouranos, Montréal, Canada, 89 p.
- Yagouti A., G. Boulet, 2004a, Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec. Rapport d'étape no 3 : Application des techniques d'homogénéisation sur des séries synthétiques, rapport interne, Consortium Ouranos, Montréal, Canada, 40 p.
- Yagouti A., G. Boulet, 2004b, Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec. Rapport d'étape no 2-2 : L'homogénéisation par le modèle de régression : méthodologie et résultats, rapport interne, Consortium Ouranos, Montréal, Canada, 18 p.

6 ANNEXE : ANALYSE DES TENDANCES À UN NIVEAU DE SIGNIFICATION ÉGAL À 10%

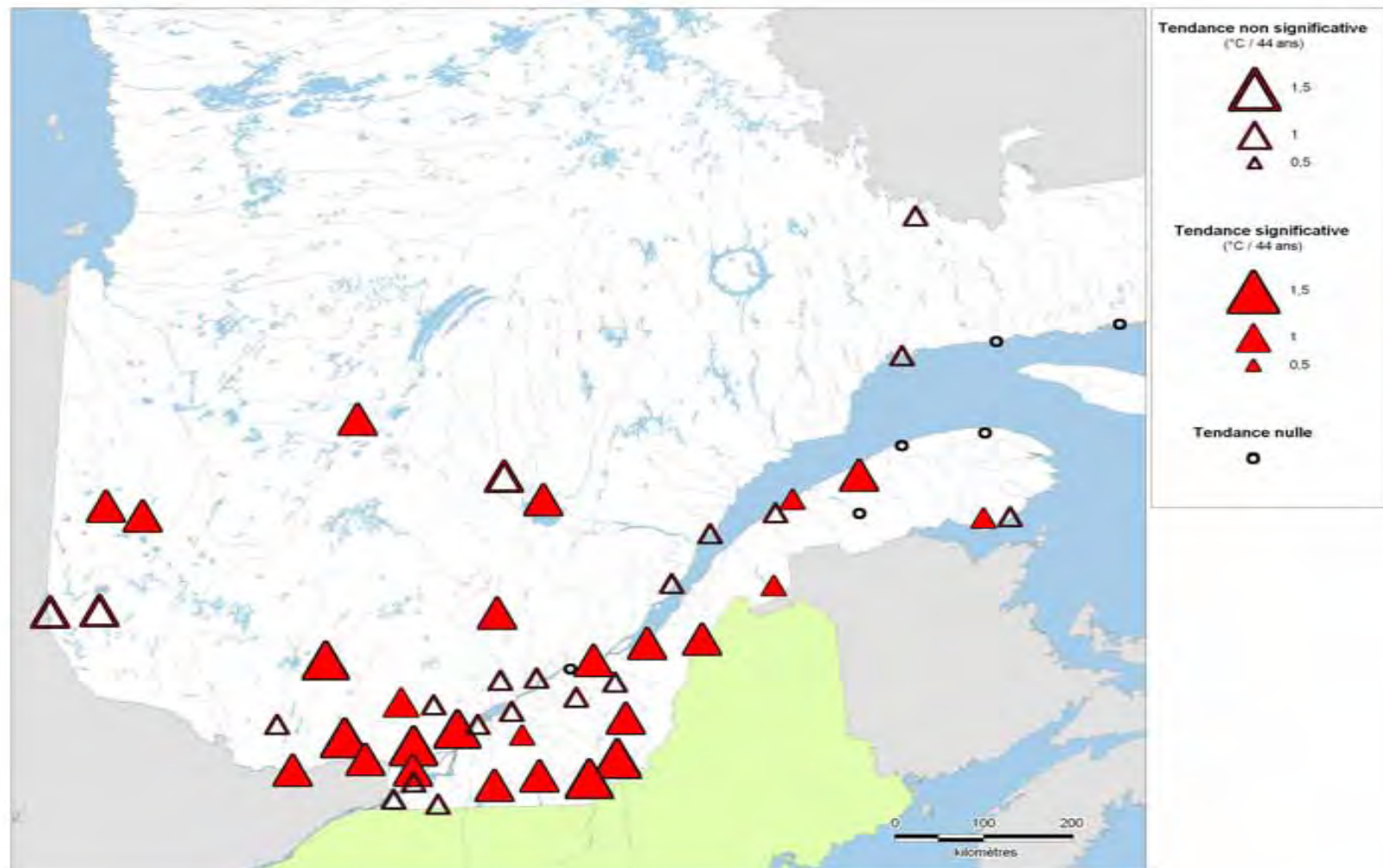


Figure 65 : Tendances des températures maximales annuelles durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

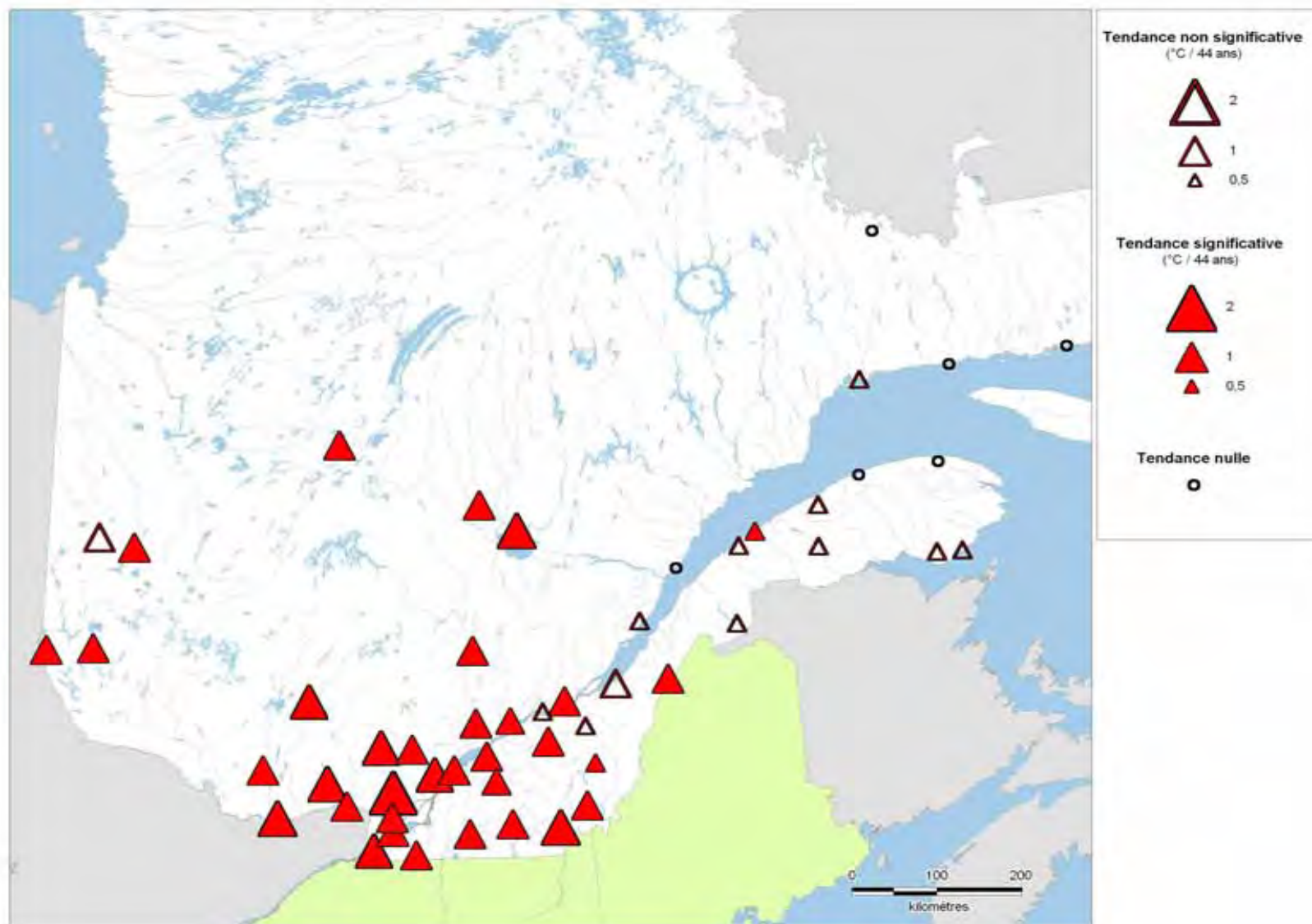


Figure 66 : Tendances des températures moyennes annuelles durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

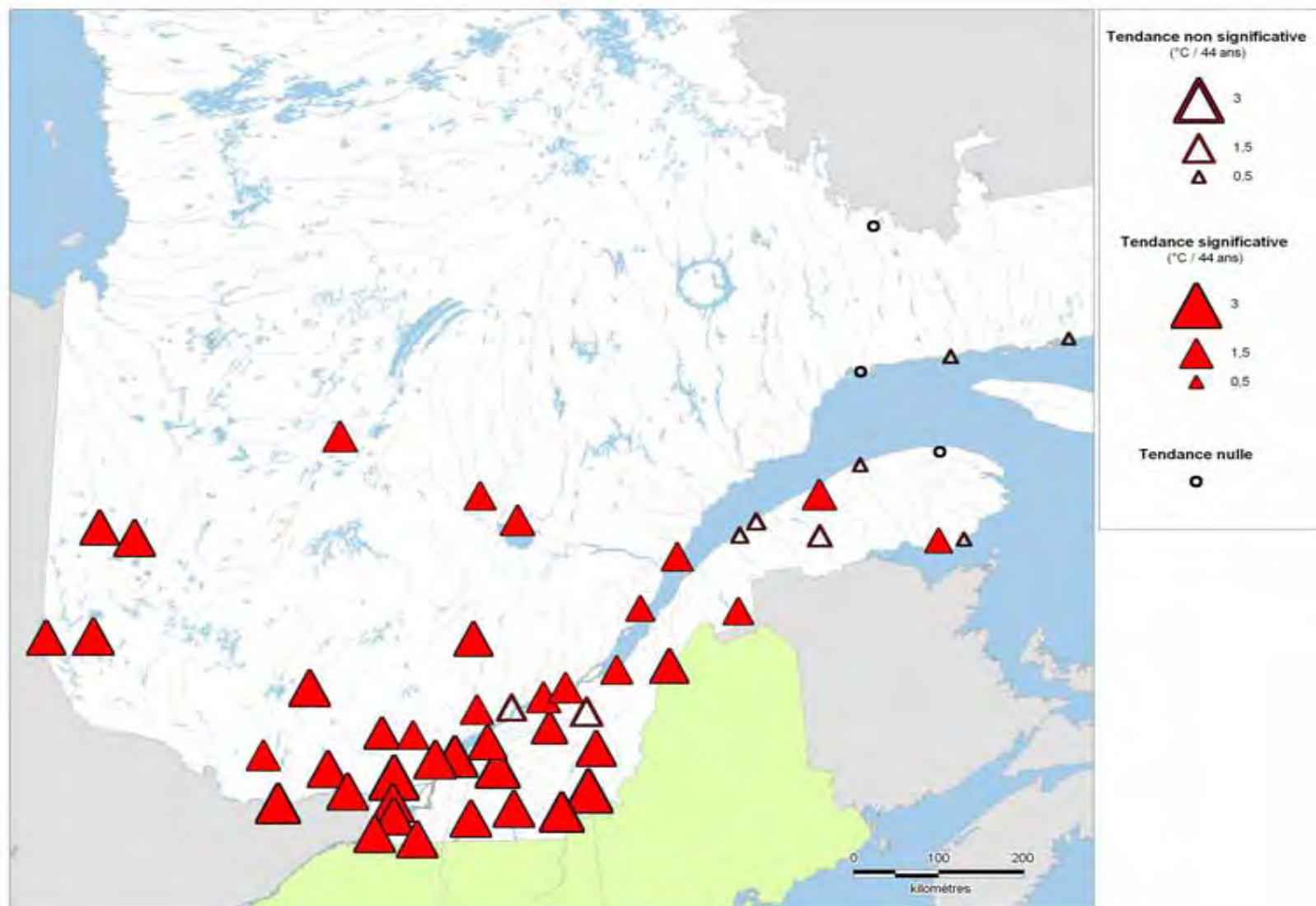


Figure 67 : Tendances des températures maximales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

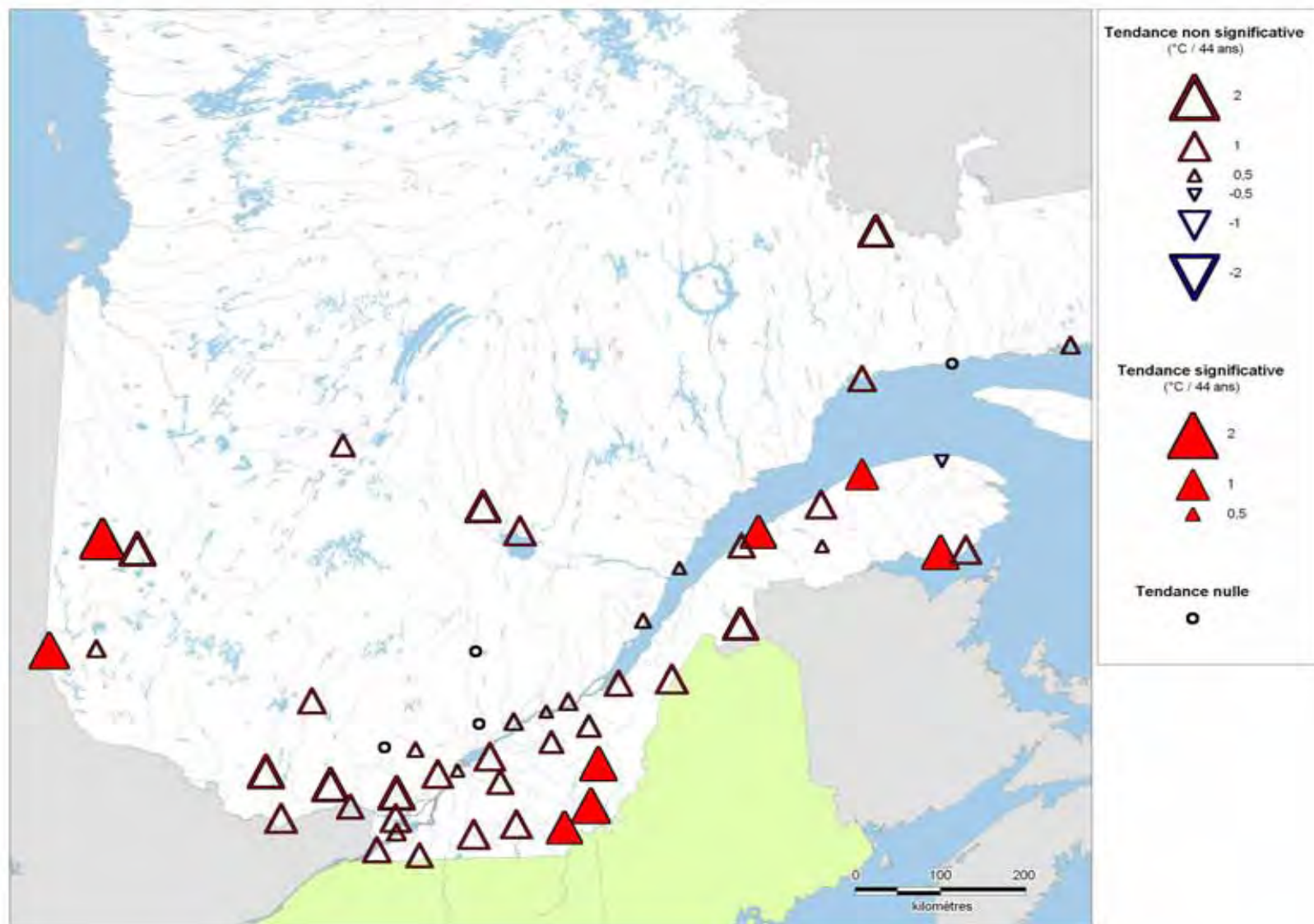


Figure 68 : Tendances des températures maximales du printemps durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

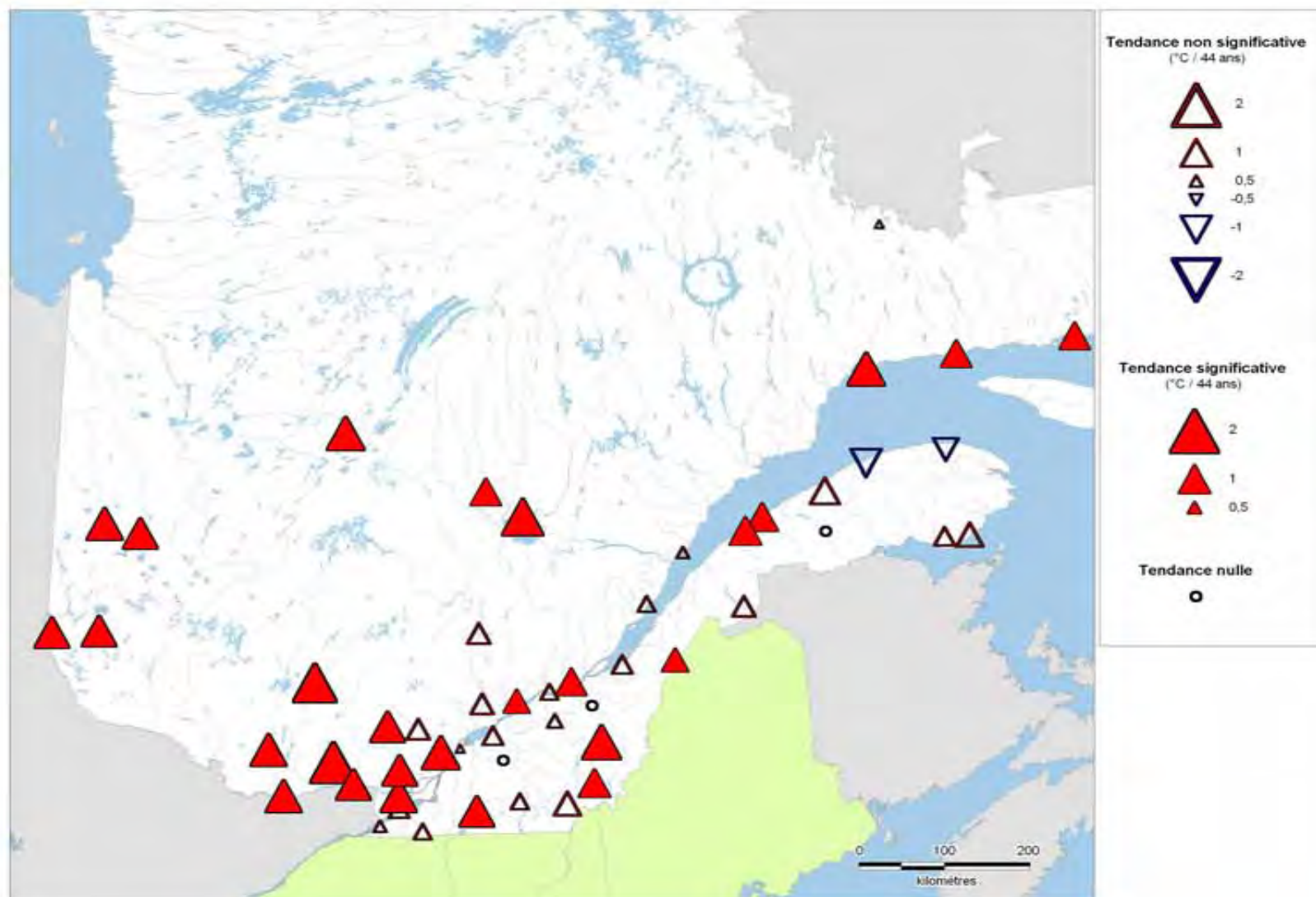


Figure 69 : Tendances des températures maximales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

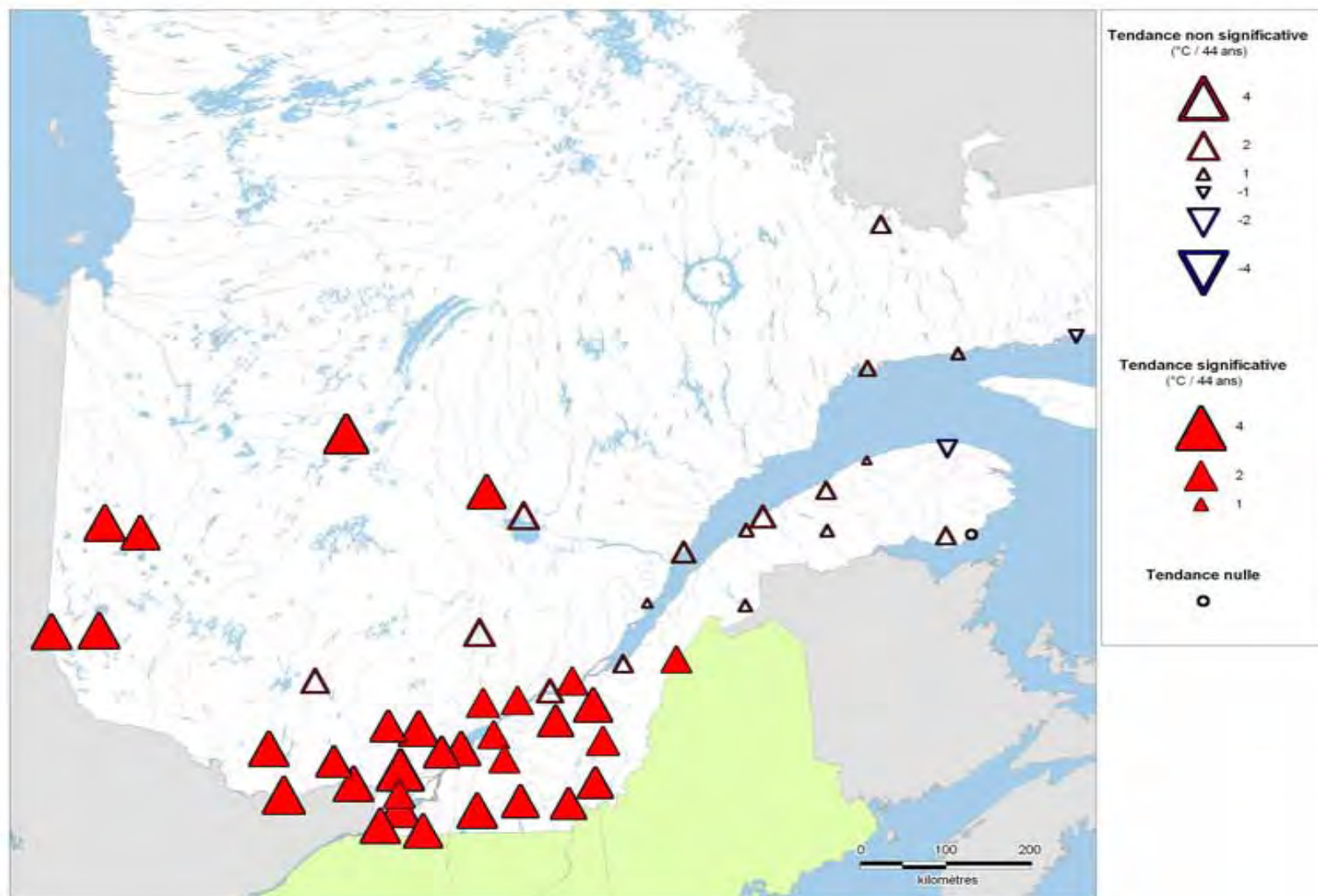


Figure 70 : Tendances des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

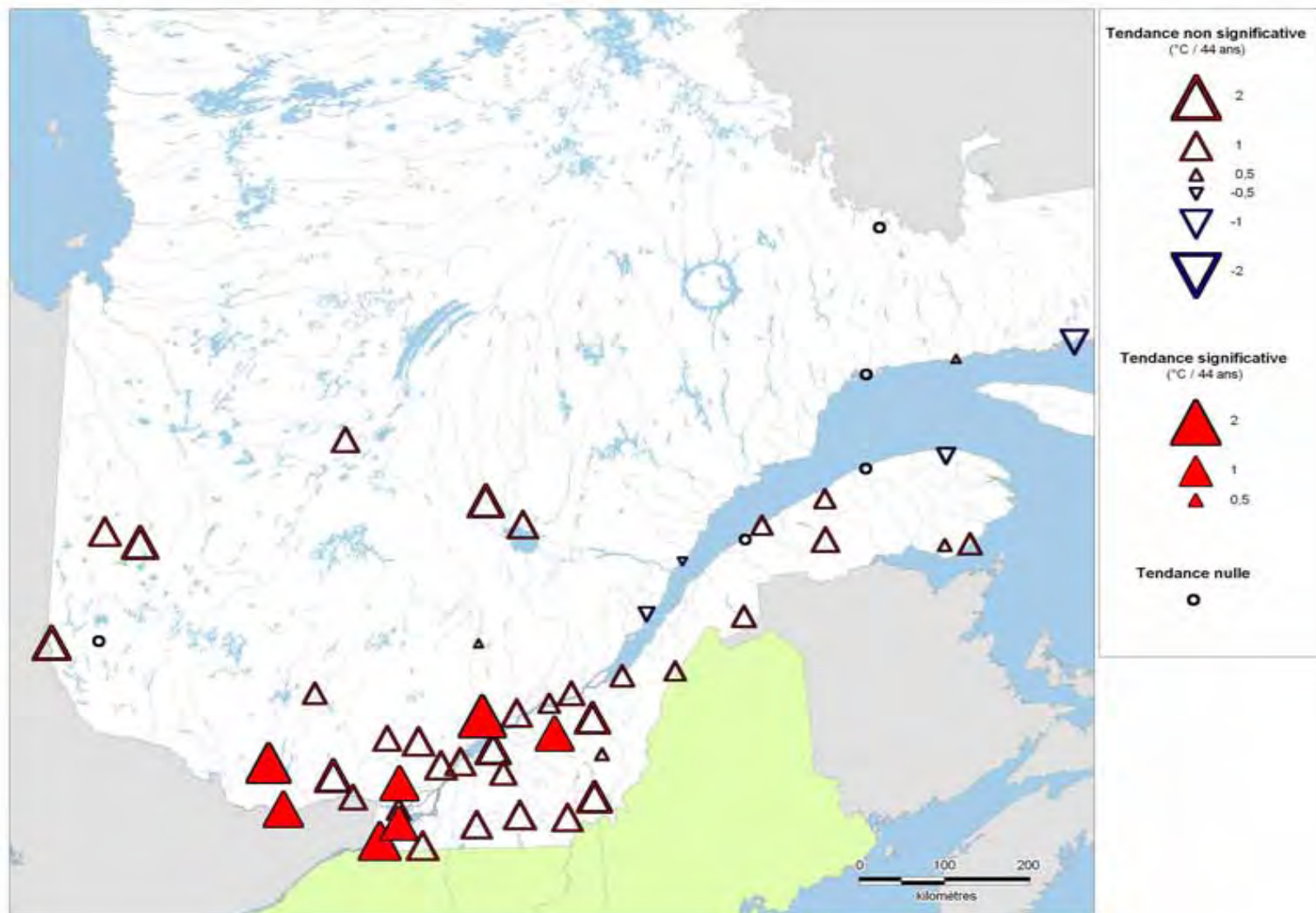


Figure 71 : Tendances des températures minimales du printemps durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

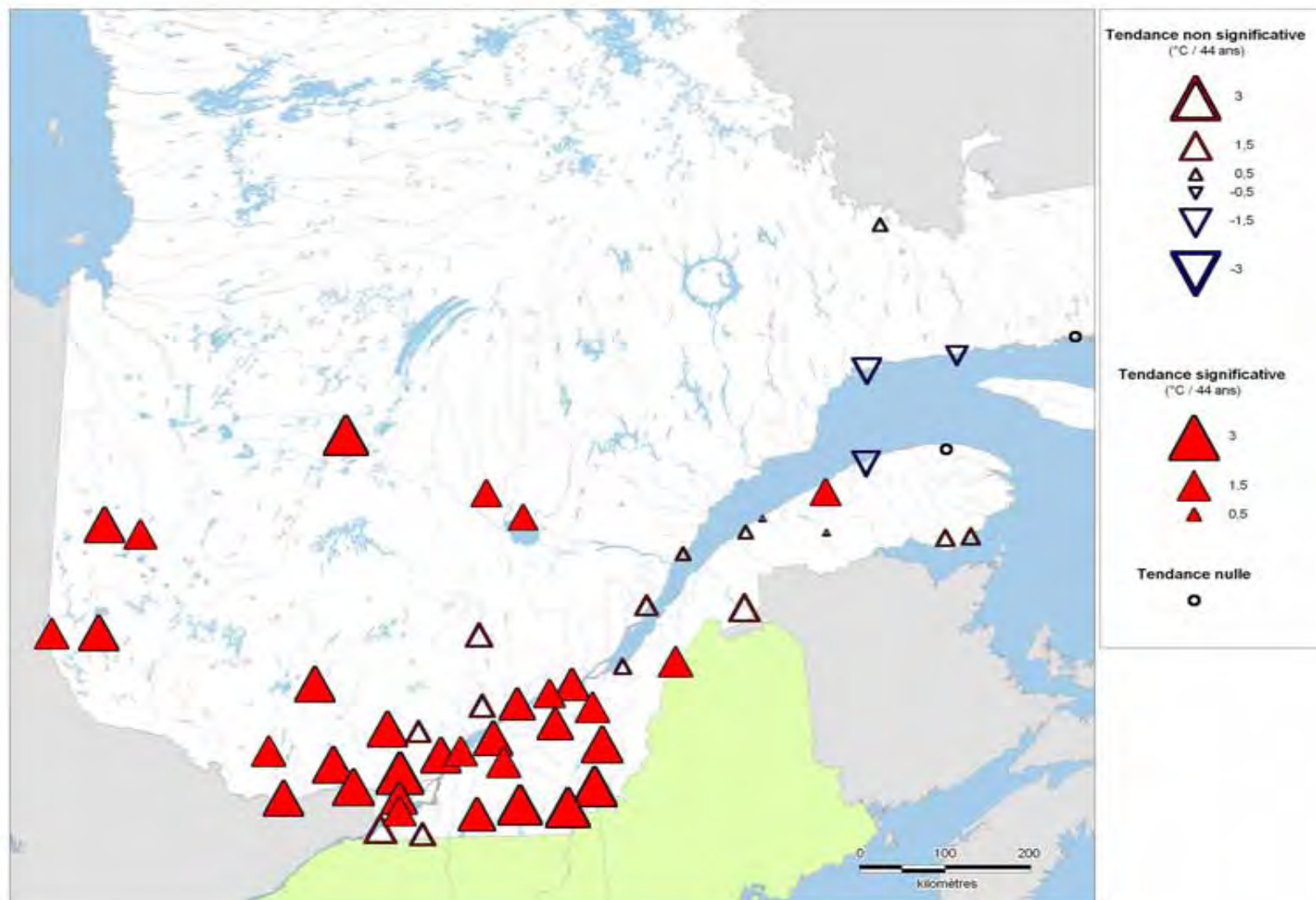


Figure 72 : Tendances du percentile 90 des températures maximales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

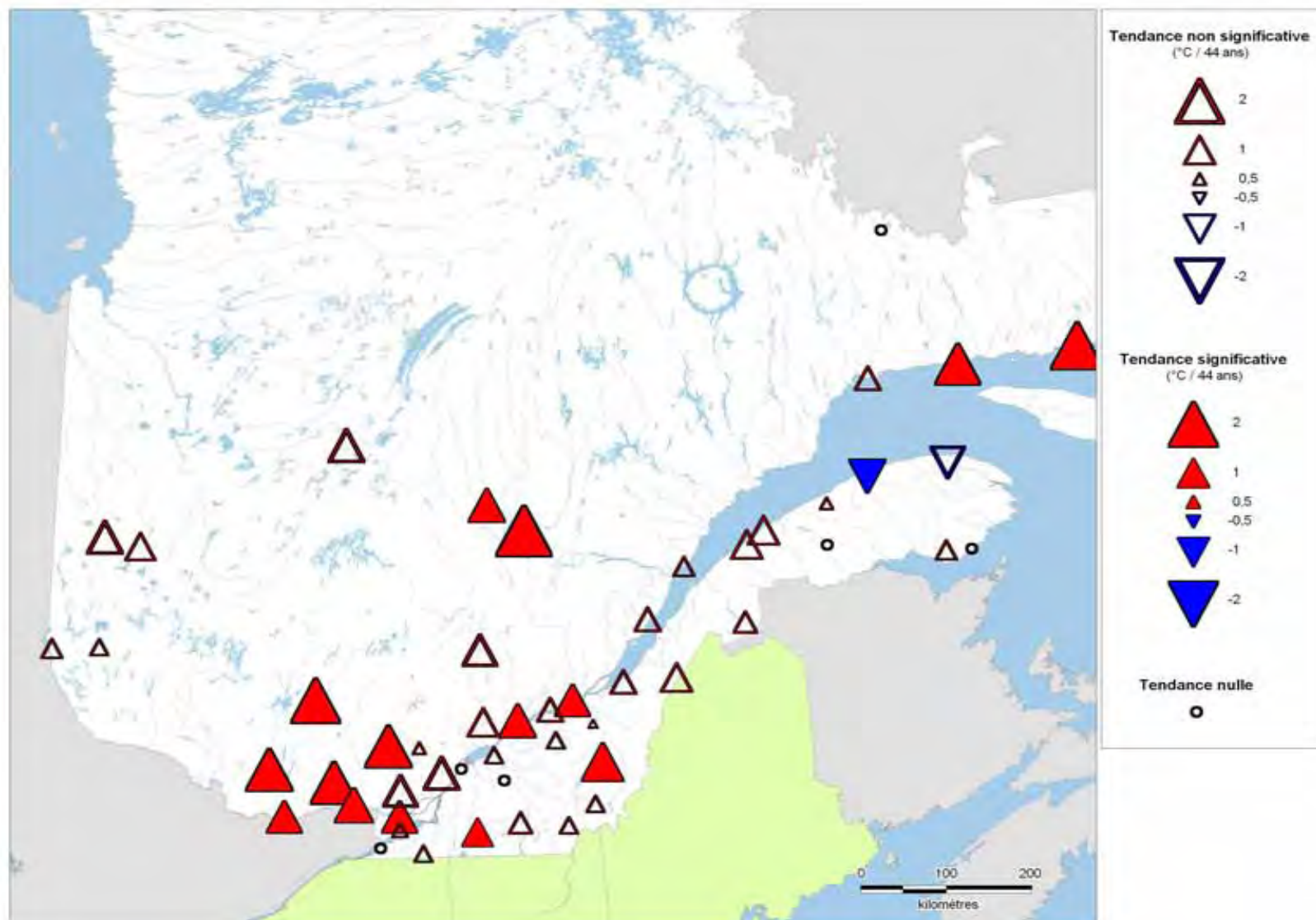


Figure 73 : Tendances du percentile 90 des températures maximales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

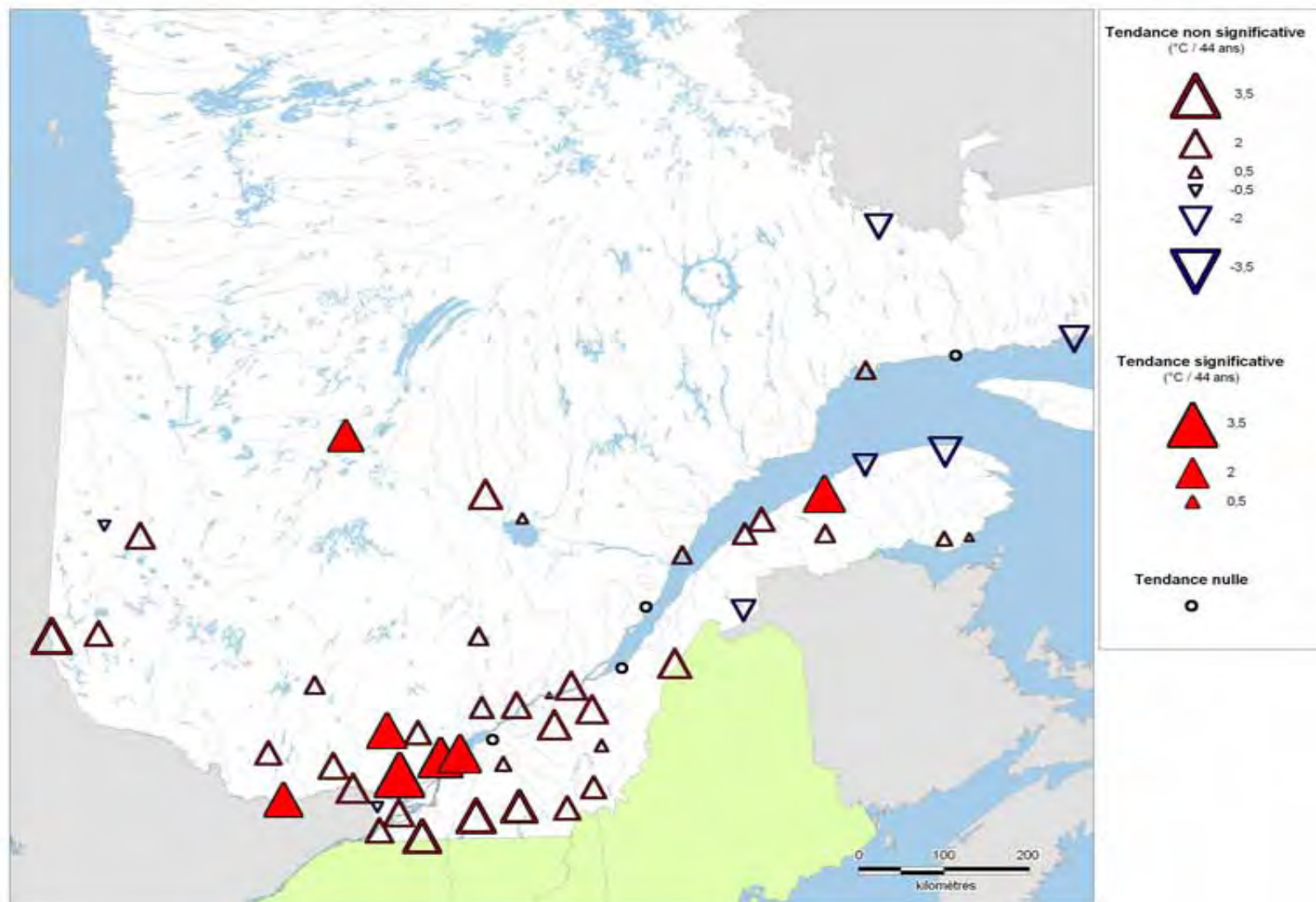


Figure 74 : Tendances du percentile 10 des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

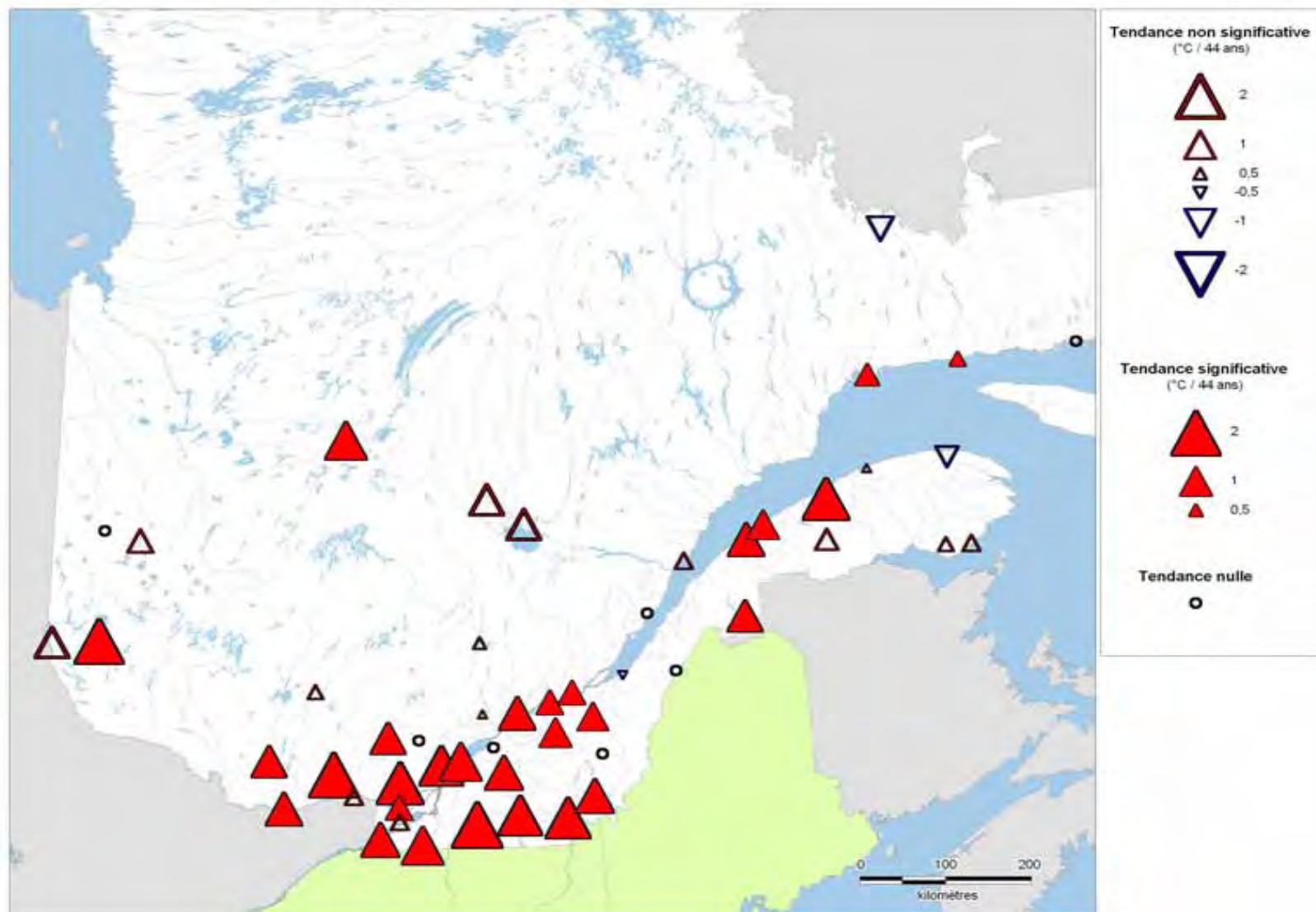


Figure 75 : Tendances du percentile 10 des températures minimales de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

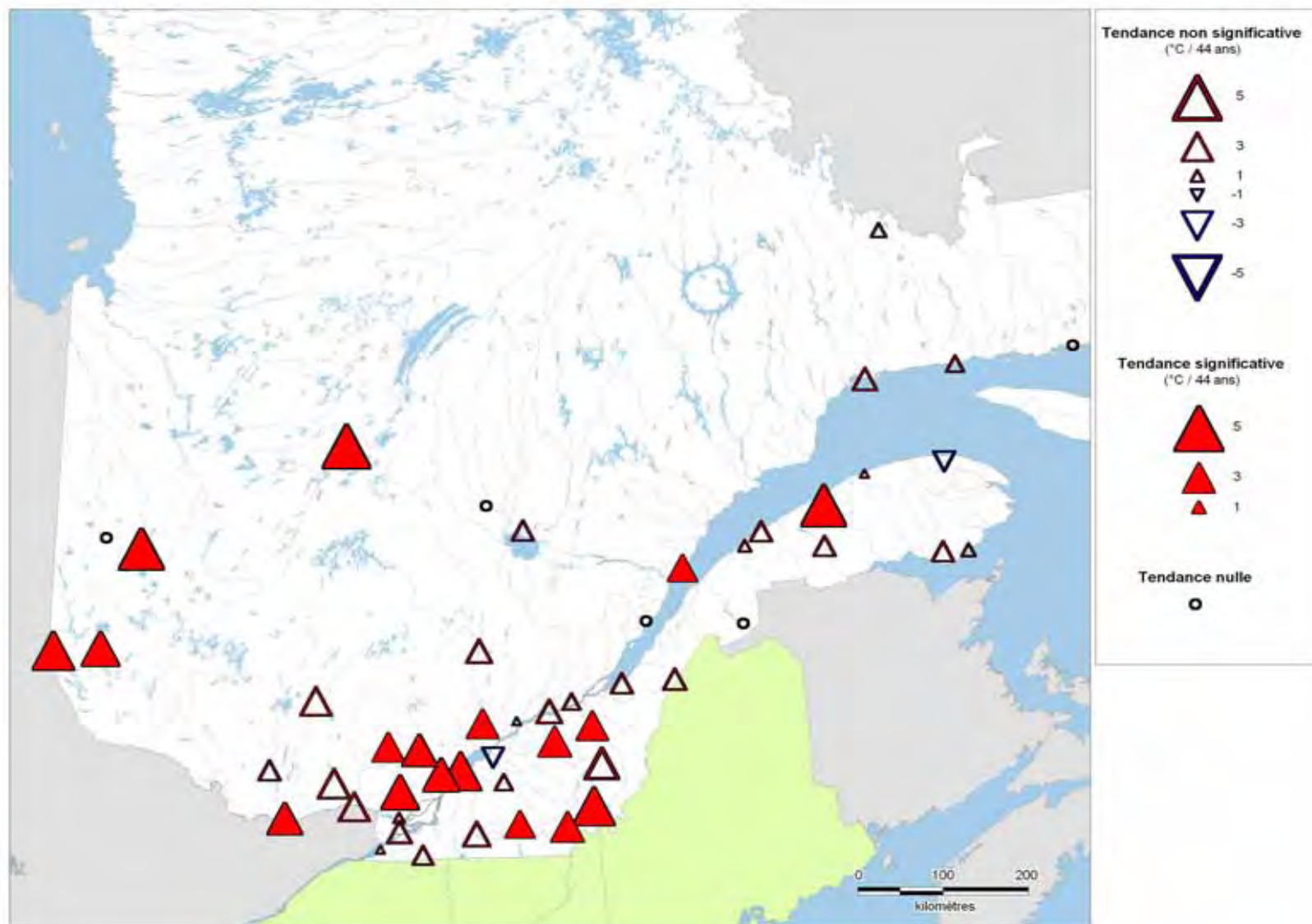


Figure 76 : Tendances du percentile 2 des températures minimales de l'hiver durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

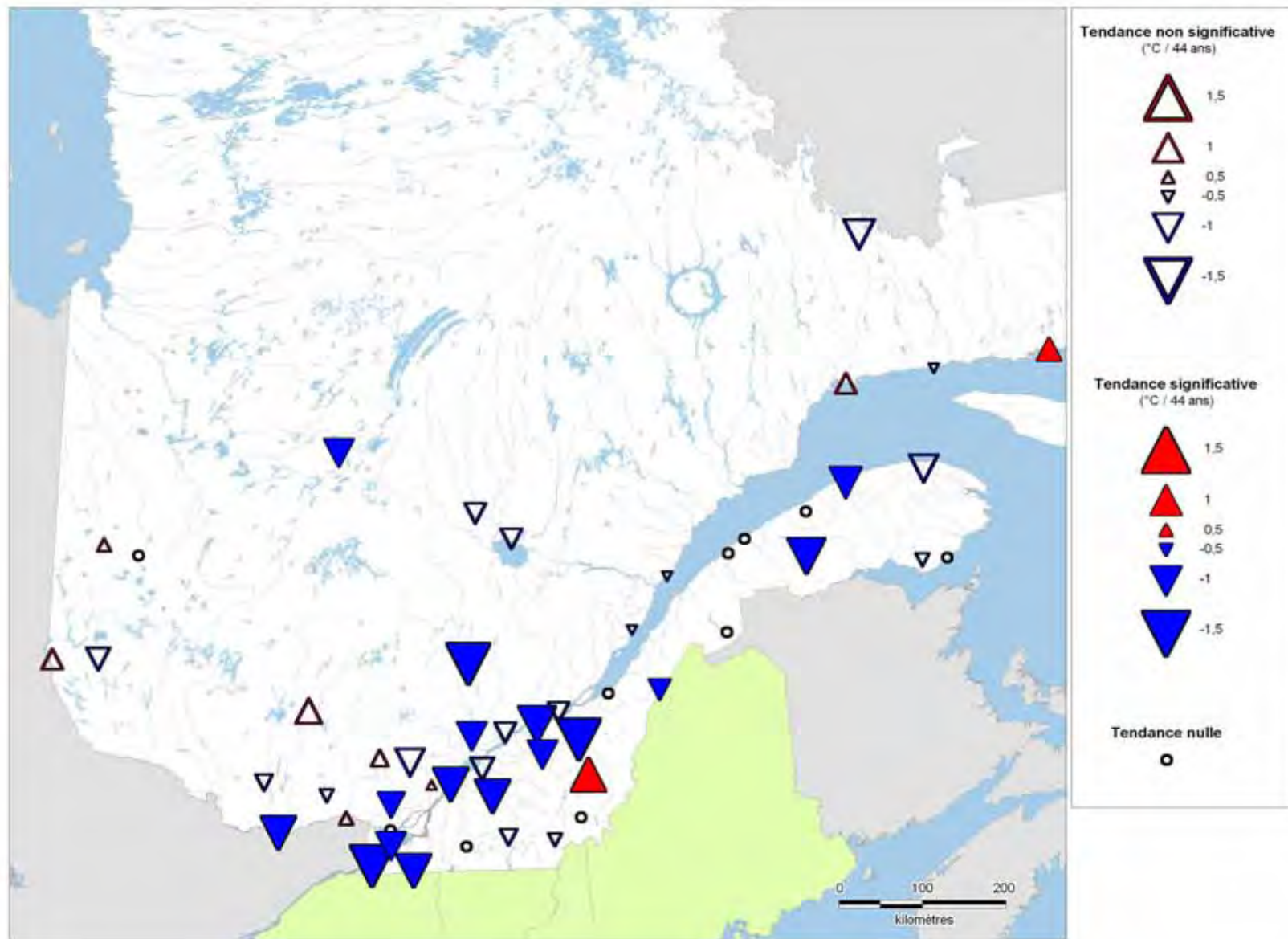


Figure 77 : Tendances de l'écart diurne moyen de l'été durant la période 1960 et 2003, avec un niveau de signification de 10%.

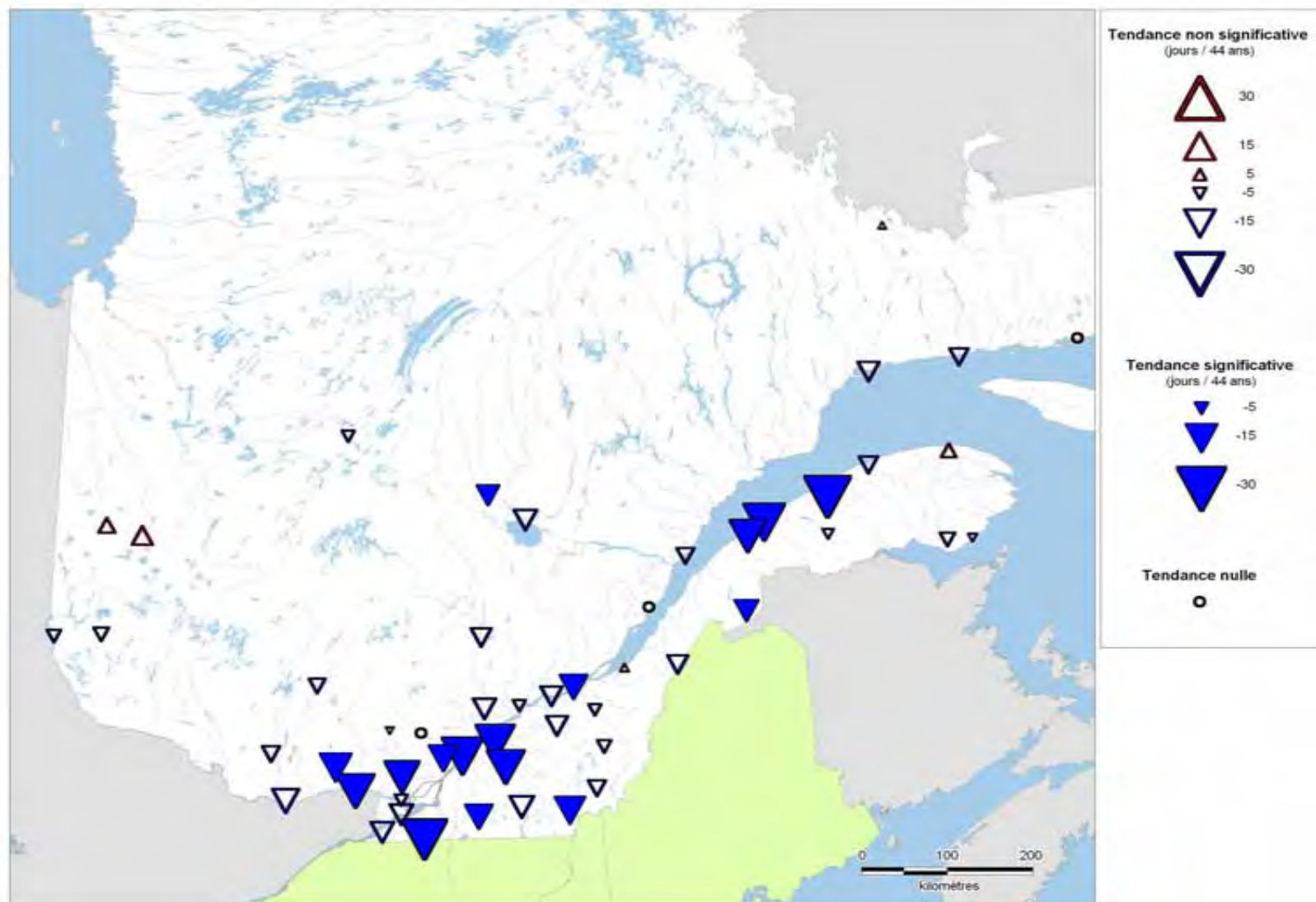


Figure 78 : Tendances de la longueur de la saison de gel non soutenu durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

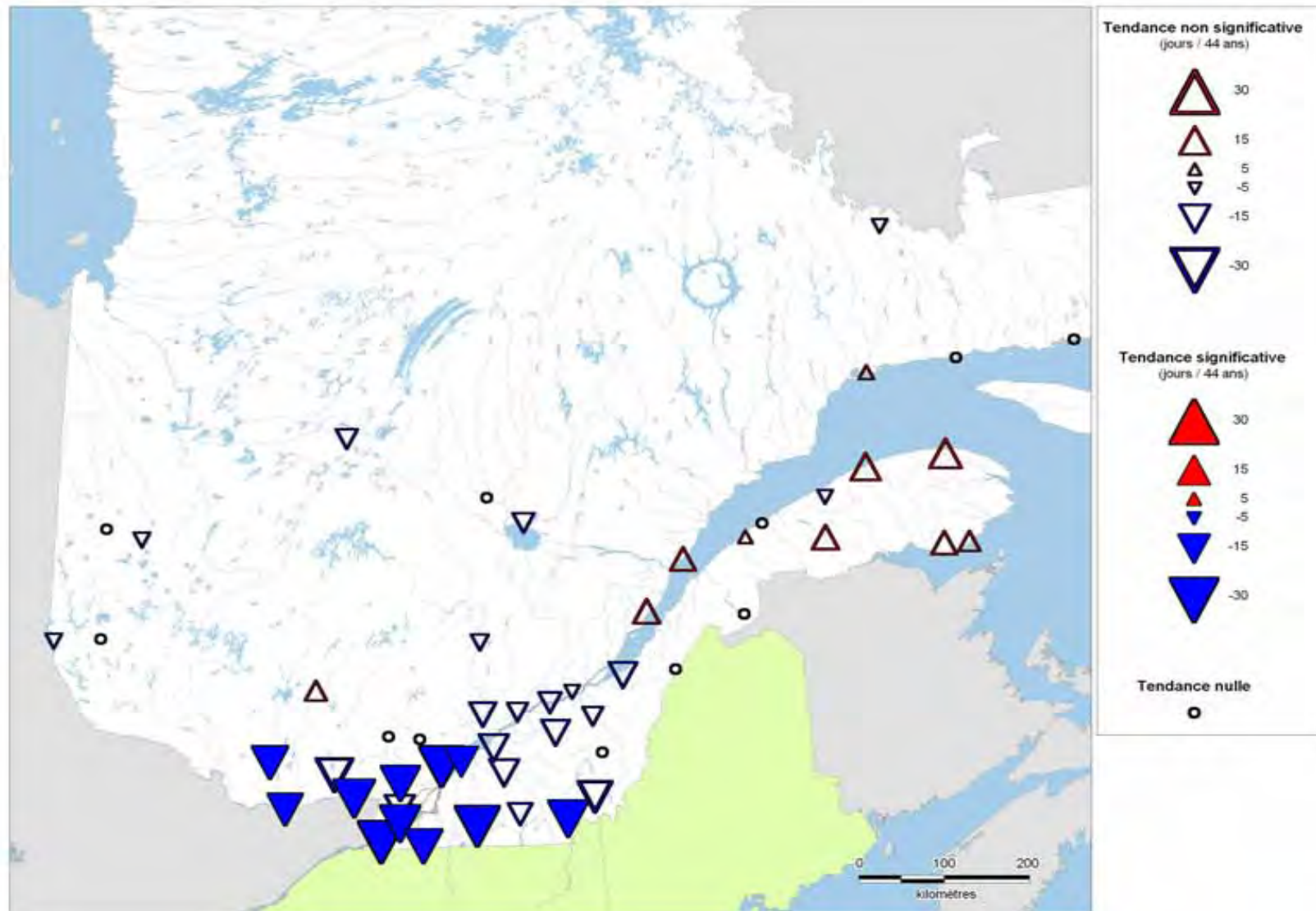


Figure 79 : Tendances de la longueur de la saison de gel soutenu durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

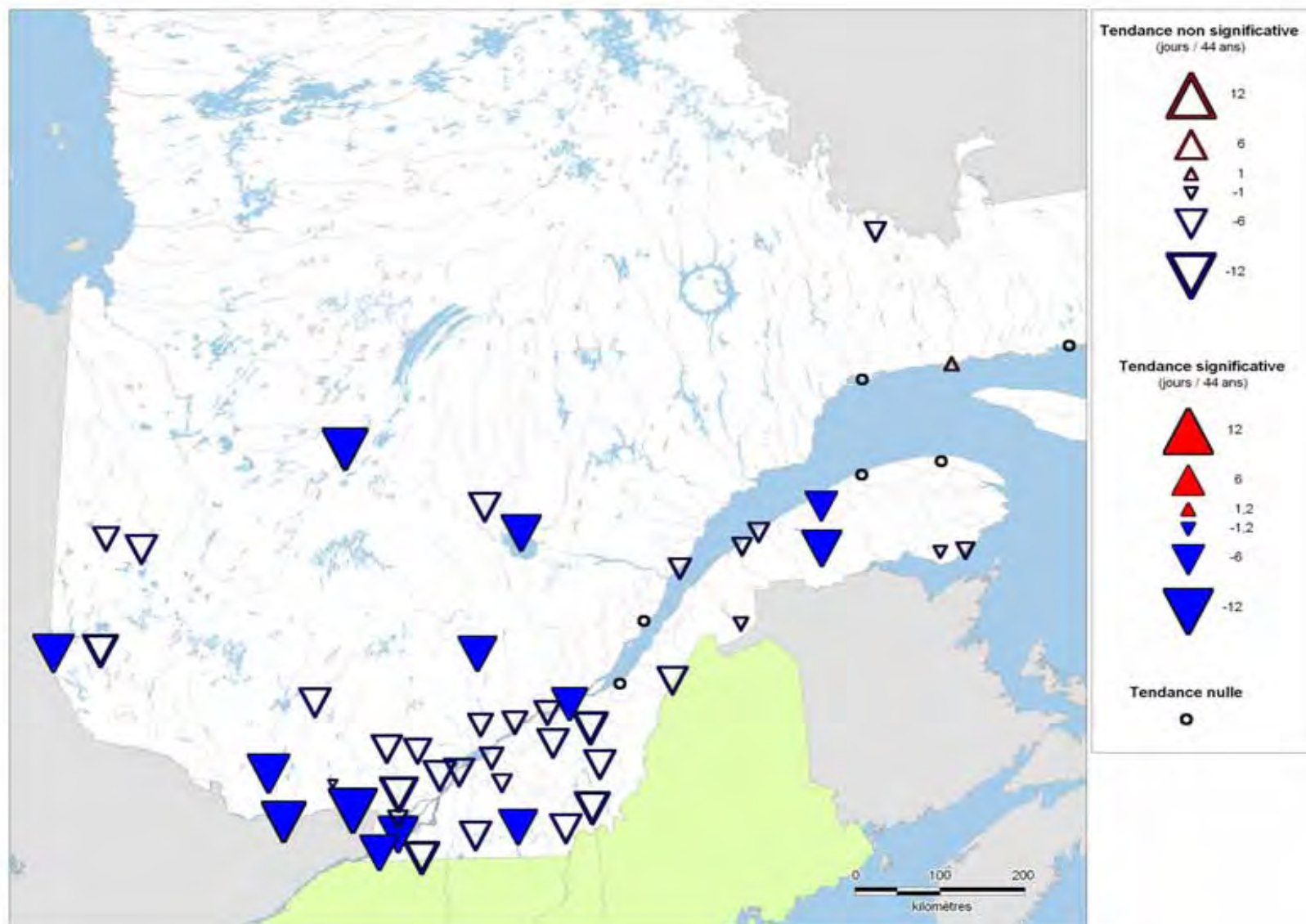


Figure 80 : Tendances de la durée de la vague de froid de l'hiver durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

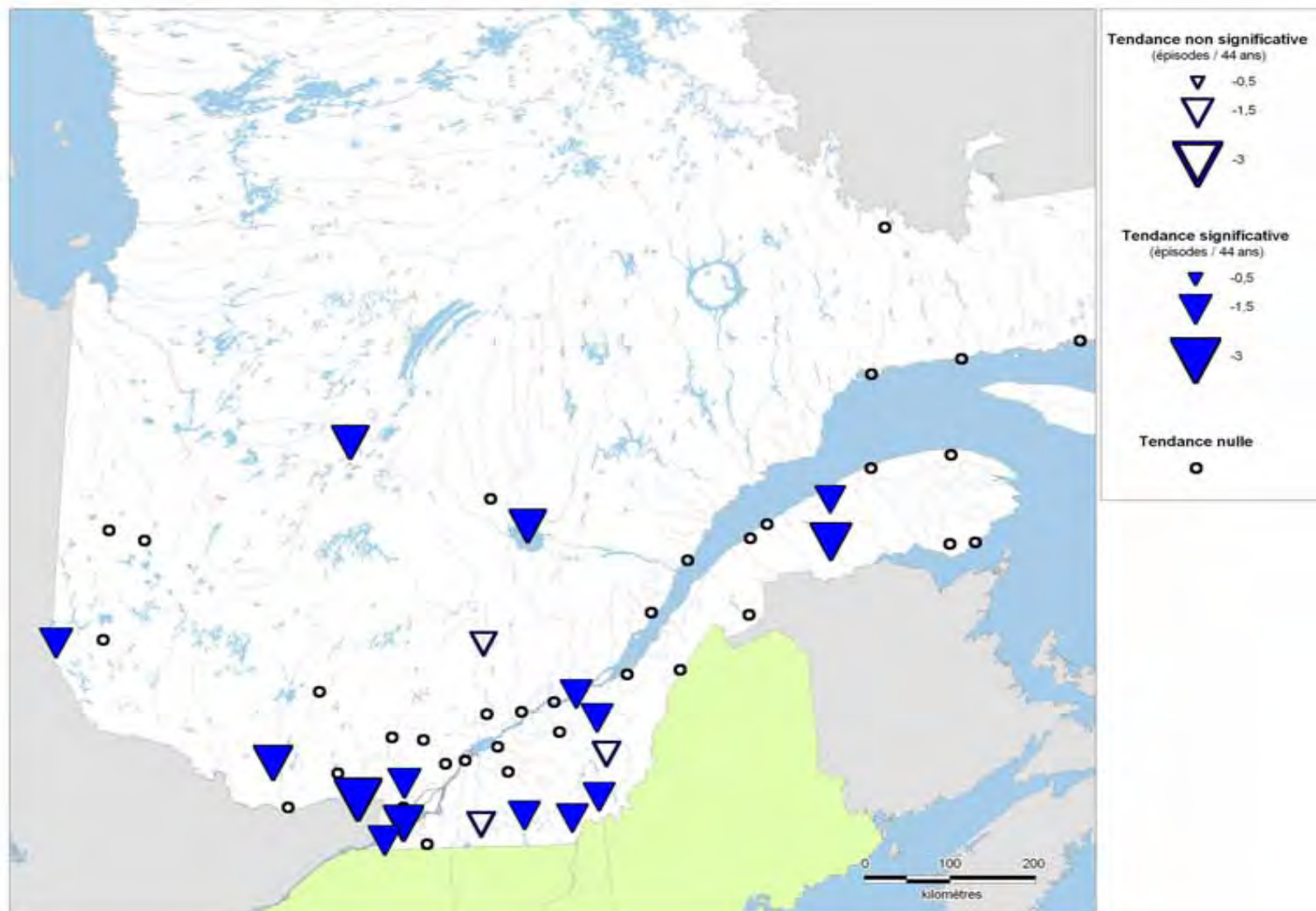


Figure 81 : Tendances du nombre de vagues de froid de l'hiver durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

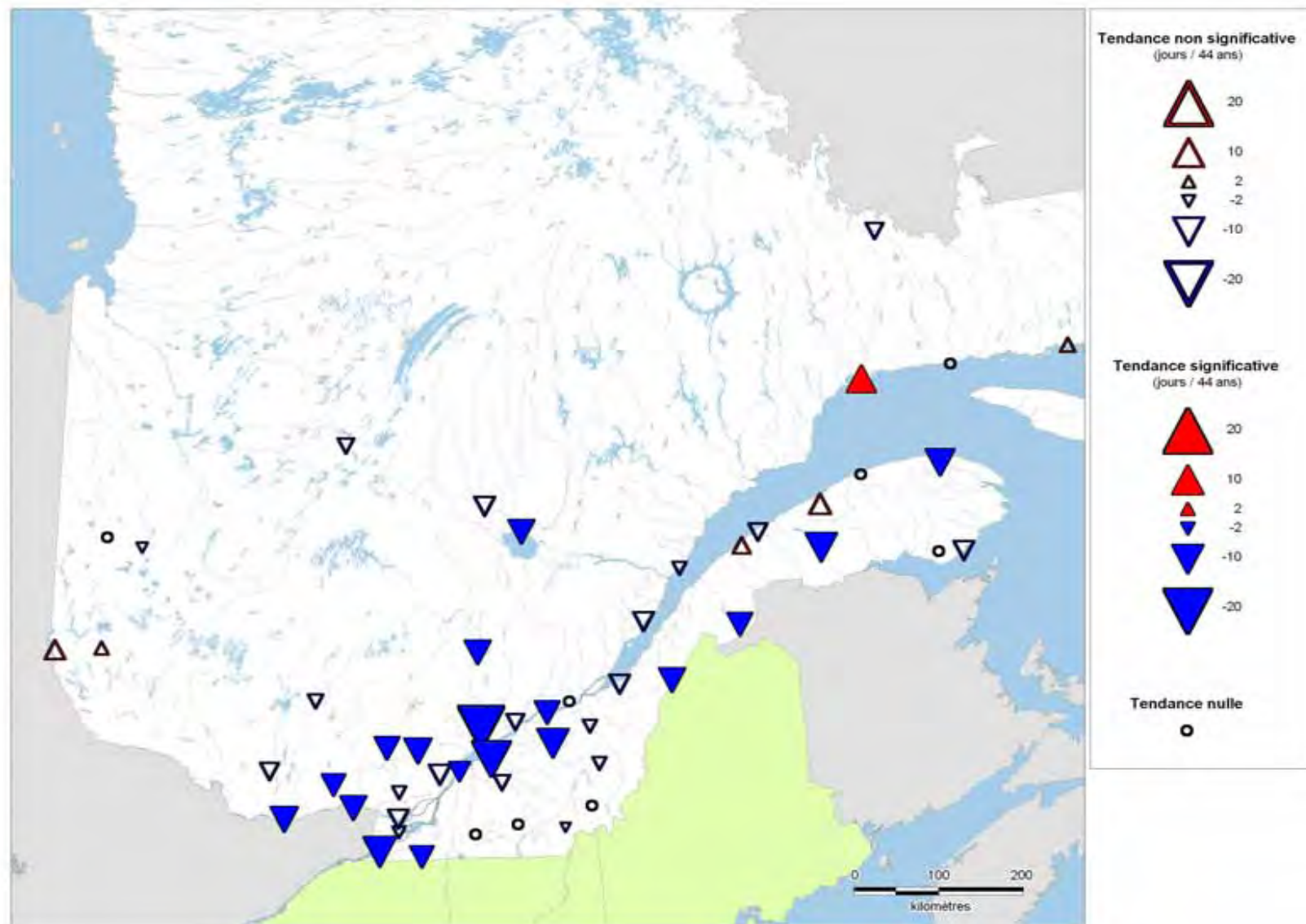


Figure 82 : Tendances du nombre de jours de gel et dégel du printemps durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%



Figure 83 : Tendances du cumul annuel des degrés jours supérieurs à 5 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

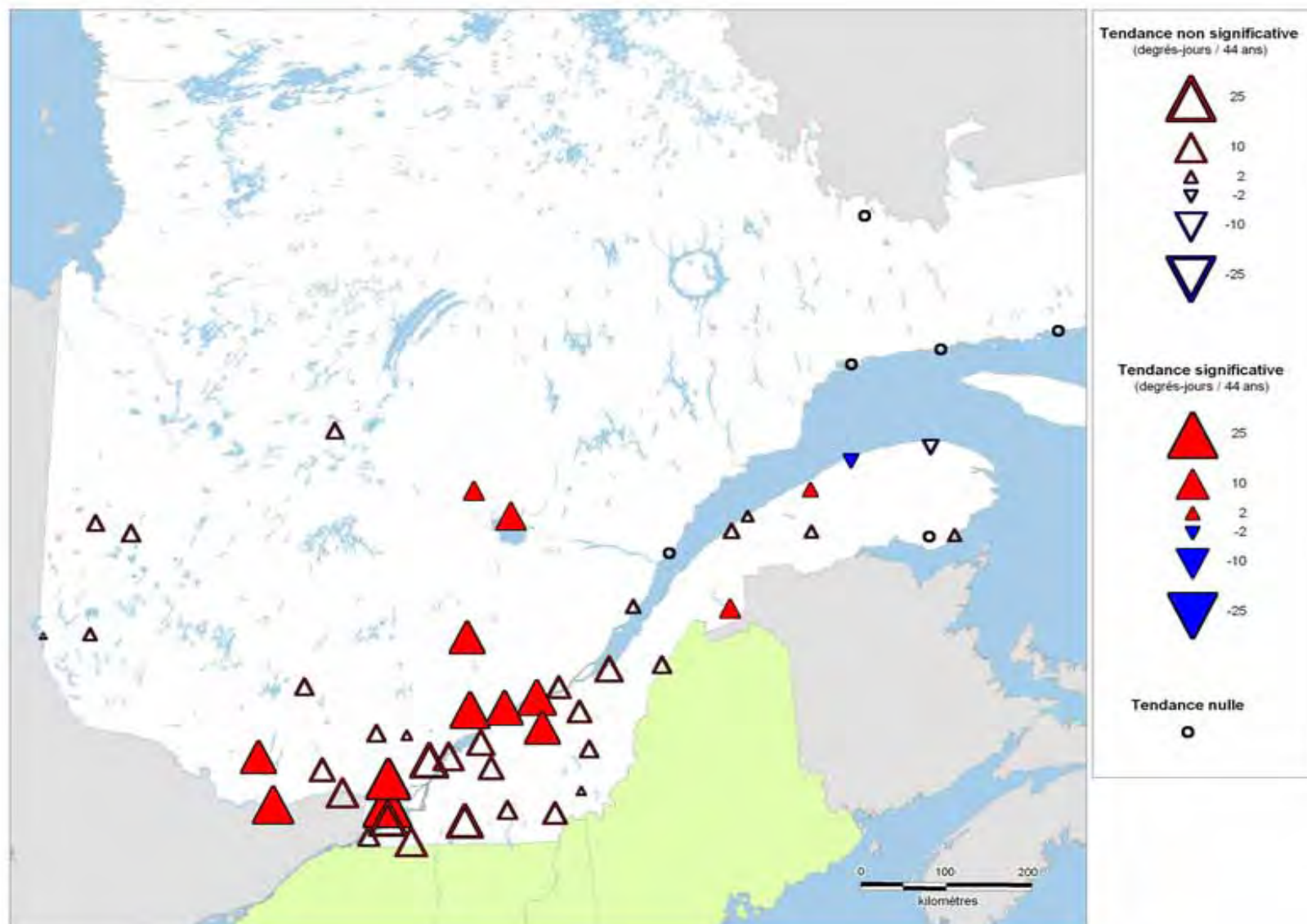


Figure 84 : Tendances du cumul annuel des degrés jours supérieurs à 22 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

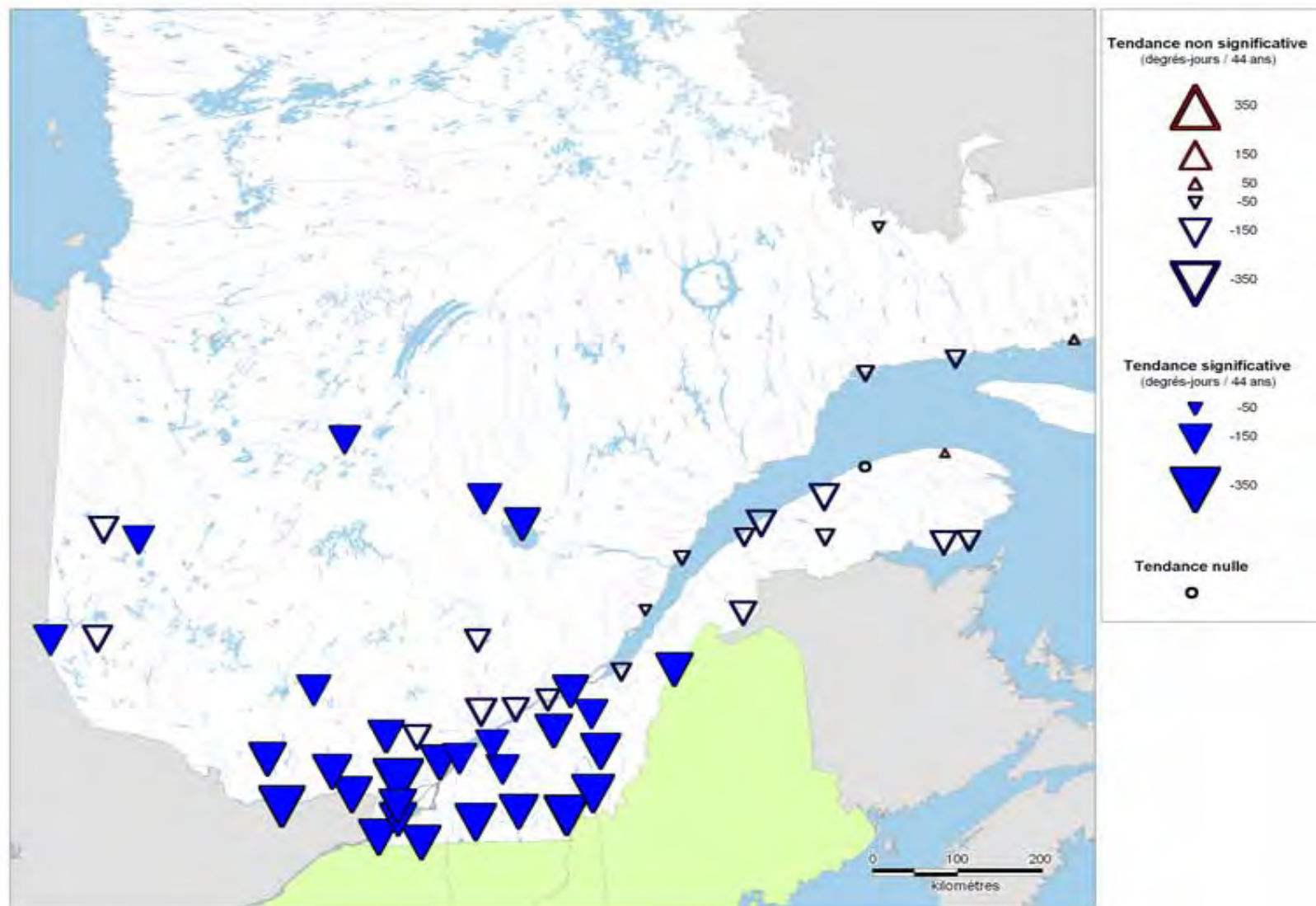


Figure 85 : Tendances du cumul annuel des degrés jours inférieurs à 18 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%

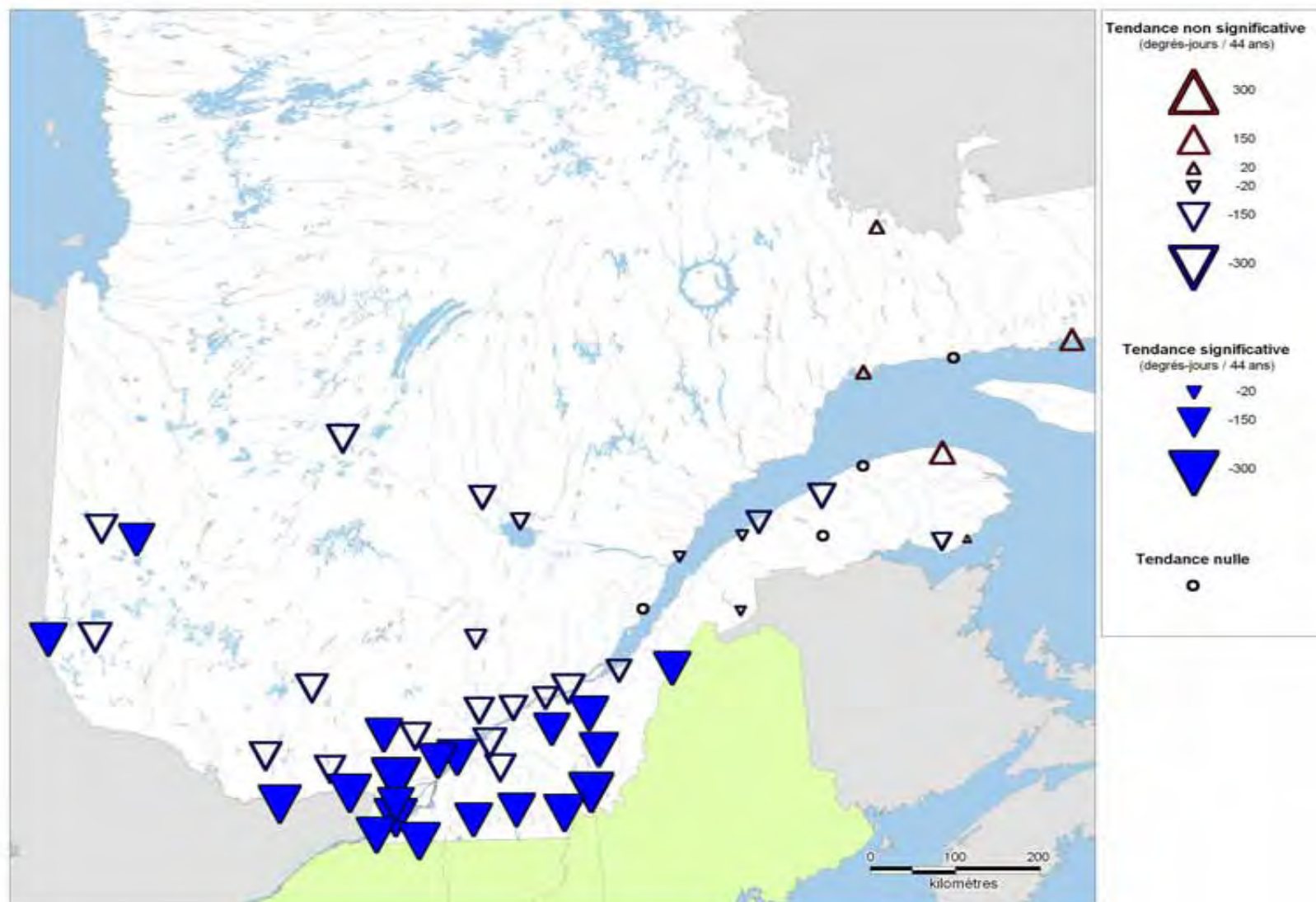


Figure 86 : Tendances du cumul annuel des degrés jours inférieurs à 0 °C durant la période 1960 à 2003, avec un niveau de signification égal à 10%