



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services Branch

Direction des acquisitions et
des services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa, Ontario
K1A 0N4

395, rue Wellington
Ottawa (Ontario)
K1A 0N4

Your file / Votre référence

Our file / Notre référence

NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.

Canada

**ÉTUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES (1921-1990) DES PRAIRIES
CANADIENNES À PARTIR DE LA CLASSIFICATION DE KÖPPEN:
UNE APPLICATION DES SIG DANS L'ÉTUDE DES CHANGEMENTS
ENVIRONNEMENTAUX**

Henri Amyotte

B.A. (Spéc. Géographie physique), Université d'Ottawa, 1990

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Déposé au département de géographie
de l'Université d'Ottawa

Juin 1995



Henri Amyotte, Ottawa, Canada, 1995



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services Branch

395 Wellington Street
Ottawa, Ontario
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Direction des acquisitions et
des services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa (Ontario)
K1A 0N4

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-612-07786-1

Canada



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

RÉSUMÉ

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier, à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), les variations climatiques survenues entre 1921 et 1990, à l'intérieur de la province écoclimatique des Prairies canadiennes. En même temps, il s'agissait d'évaluer le potentiel des SIG et de la classification climatique de Köppen, en tant qu'outils permettant de réaliser des analyses climatiques. Cette étude était basée sur la classification de Köppen, établie à l'aide de dBASE IV, à partir de données provenant d'Environnement Canada et d'Agriculture Canada, et ce, pour 17 stations principales de la région étudiée. De nombreux tableaux ont été produits, afin d'analyser les résultats d'une classification décennale et annuelle, ainsi que certaines statistiques calculées à partir de cette dernière, telles que la distribution des différentes classes climatiques pour chaque station, ainsi que le nombre annuel de stations classées BSk (semi-aride). D'autres analyses ont ensuite été effectuées à l'aide de cartes climatiques, produites et visualisées à l'intérieur d'un SIG (PC ARC/INFO).

Ces diverses formes d'analyse climatique ont permis de faire ressortir plusieurs aspects intéressants, concernant les variations climatiques affectant les Prairies entre 1921 et 1990. La classification annuelle démontrait beaucoup de variations climatiques pendant la période étudiée. L'analyse effectuée à partir de la distribution des différentes classes climatiques pour chaque station, a permis de faire ressortir le caractère climatique de chaque station. Nous avons pu constater qu'aucune station ne pouvait être associée qu'à une seule classe climatique, mais à plusieurs catégories, d'après les fréquences observées. Par exemple, la station de Medicine Hat ne peut être considérée purement semi-aride (31 années classées BSk), car on y observe aussi des fréquences relativement élevées dans les catégories Dvb (12) et Dsb (11). L'année ayant le plus grand nombre de stations (9) classées BSk était celle de 1987-88, suivie de 30-31, 60-61 et 83-84 (7 stations classées BSk), et de 23-24, 29-30, 39-40, 76-77 et 80-81 (6 stations).

Les cartes climatiques, produites pour chaque décennie (1921-30 à 1981-90), démontraient beaucoup plus d'information, surtout au niveau des superficies impliquées dans les variations climatiques observées pour les Prairies. La période de 1981-90 est celle qui présentait la plus grande étendue classée semi-aride (BSk), représentant 7,73% (44 800 km²) du territoire couvert par cette étude (579 800 km²). Sur ce point, la décennie de 1921-30, venait au deuxième rang, avec 33 600 km² (5,8%) classé BSk, suivie de 1971-80 (31 200 km²: 5,38%) et 1961-70 (25 600 km²: 4,42%). Cette zone semi-aride, généralement située autour de Medicine Hat, disparaissait complètement ou presque, entre 1931 et 60. La carte de 1931-40 ne permettait pas de déceler la présence des sécheresses importantes affectant les Prairies, pendant la période du "Dust Bowl" (1936 à 38). La création des cartes annuelles pour cette période, donnait des résultats qui concordaient un peu plus avec les informations mentionnées par Phillips (1990) et Jones (1991), concernant les régions affectées par ce phénomène du "Dust Bowl". Par contre l'année 1936 ne présentait aucune région BSk, malgré le fait que cette année là était particulièrement sèche. Ce qui ressortait pour 1936 était plutôt une zone plus chaude que la normale (à été chaud) couvrant presque tout le sud des Prairies. Ceci a permis de déceler des températures d'été plus élevées que la normale, ce qui ne ressortait pas au niveau des moyennes annuelles présentées par Gullett et Skinner (1992).

L'utilisation de la classification de Köppen, permet de faire une étude climatique en fonction de certains seuils critiques de températures et de précipitations, qui favorisent ou limitent la croissance de végétation. Les SIG facilitent le traitement d'importantes quantités de données, de sorte à créer et visualiser de cartes climatiques basées sur cette classification. Ces cartes démontrent bien les superficies touchées par certains changements climatiques, tout en donnant des indications sur les impacts environnementaux qui peuvent s'en suivre. Cette forme de traitement des données pourrait servir à la validation des résultats ressortant de simulations climatiques du passé, permettant ainsi de créer des modèles pouvant mieux prédire les changements à venir.

ABSTRACT

The primary objective of this thesis was to study climatic variations that occurred in the Grassland Ecoclimatic Province (Canadian Prairies), between 1921 and 1990, using a geographic information system (GIS). This research was also meant to evaluate the potential of GIS and the Köppen classification, for climatic analysis. DBASE IV was used to establish the Köppen classification, with data coming from 17 climate stations obtained from Environment Canada and Agriculture Canada. Various tables were produced in order to analyze the results of an annual and decennial classification, as well as for other statistics calculated from the annual classification, such as the distribution of various classifications for each station and the annual number of stations classified as BSk. Further analysis was made from climatic maps conceived and visualized with a GIS (PC ARC/INFO).

These various analysis have shown interesting aspects, concerning the climatic variations affecting the Prairies between 1921 and 1990. The annual classification, showed important climatic variations within the study period. The distribution of various classifications for each station provided an interesting overview of climatic characteristics for each station. No station could be associated to only one climatic classification, but to many categories. For example, the climate for Medicine Hat cannot be considered as purely semiarid (31 years classified as BSk) because it also has many years classified as Dvb (12) and Dsb (11). The year with the most stations (9) classified as BSk was 1987-88, followed by 30-31, 60-61 and 83-84 (7 stations with BSk), and 23-24, 29-30, 39-40, 76-77 and 80-81 (6 stations).

The climatic maps, representing each decade (1921-30 to 1981-90), showed much more information, concerning the spatial variations of the Prairies climate. The 1981-90 period had the most important surface classified as semiarid (BSk), this classification representing 7.73% (44 800 km²) of the total area covered by this study (579 800 km²). The period having the second most important surface classified as BSk, was 1921-30 (33 600

km²: 5.8%), followed by 1971-80 (31 200 km²: 5.38%) and 1961-70 (25 600 km²: 4.42%). This semiarid area, generally situated around Medicine Hat, completely disappeared if not almost between 1931 and 60. The 1931-40 map did not show the presence of very dry conditions reported for the Prairies during the Dust Bowl period (1936-38). Yearly maps created for this important dry spell, agreed with some of the information published by Phillips (1990) and Jones (1991), concerning the areas affected by the Dust Bowl droughts. However, the map for 1936 showed no station classified as BSk, despite the fact that it was very dry that year. What came out of this particular map (1936) was a large area classified as abnormally warm (warm summer). This area presented higher than normal summer temperatures for 1936, which did not show in annual temperatures published by Gullett et Skinner (1992).

The use of the Köppen's classification, permitted a climatic analysis based on critical thresholds of temperatures and precipitation, which favor or limit vegetation growth. The use of a GIS, helped to easily process large amounts of data, in order to create climatic maps according to this climatic classification. These climatic maps give a better idea of the areas affected by climatic change and give out some indications concerning the environmental impacts following these changes. The process used for this climate analysis could eventually be used to validate results of climate simulations for the past, in order to build more reliable models for predicting future climate change.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche n'aurait pu se réaliser sans l'aide de plusieurs personnes et organismes, envers lesquels je suis grandement reconnaissant. Je voudrais particulièrement remercier mon directeur de thèse, Claude Duguay, pour ses longues heures consacrées à la supervision de ce projet, ainsi que pour ses commentaires des plus utiles.

Je voudrais aussi souligner ma gratitude envers les membres du comité d'évaluation, pour le temps précieux qu'ils ont passé à lire ce texte et pour leurs conseils pertinents.

J'aimerais remercier le Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (F.C.A.R.), pour son support financier durant la deuxième année de ce projet. Ma reconnaissance également à l'École des études supérieures et de la recherche, de l'Université d'Ottawa, pour les Bourses offertes pendant les deux premières années de cette recherche.

Toute ma gratitude pour l'aide financière et professionnelle fournie par le Centre canadien de cartographie (Ressources naturelles, Canada) et surtout par les gens qui y travaillent. Bien sûr, toute cette recherche n'aurait été possible sans la contribution fort appréciée des données climatiques, provenant d'Environnement Canada et d'Agriculture Canada.

Je voudrais aussi remercier Denis Leroux pour ses précieux conseils, entre autres lorsque mes chers programmes ne fonctionnaient pas.

Merci aussi à Yves Crevier pour ses nombreux conseils fort utiles.

Un grand merci à Martine Clément pour son expertise en infographie, ainsi que pour bien d'autres services inestimables.

Finalement, je remercie ma compagne Anne pour sa patience inégalée, ses encouragements constants et pour le beau petit garçon qui nous rend si heureux.

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Échelles d'interactions entre les climats, les écosystèmes et les sociétés. Source: Clark, 1985.....	4
Figure 2	Localisation de la région d'étude.....	8
Figure 3	Moyennes mobiles (sur dix ans) des températures annuelles (en °F) pour l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba. Source: Thomas, 1970.....	14
Figure 4	Écarts entre les moyennes annuelles des températures et la moyenne de 1950-79, pour la moitié méridionale de l'ouest canadien. Source: Hengeveld, 1991.....	18
Figure 5	Graphique démontrant la tendance de la température des Prairies (1895-1991), de même que les écarts entre les températures annuelles et la moyenne de 1951-1980. Source: Gullet et Skinner, 1992.....	19
Figure 6	Variation des températures en hiver de 1959-73 à 1974-88. Source: Hengeveld, 1991.....	21
Figure 7	Limites des provinces écoclimatiques du Canada selon un scénario de CO ₂ doublé. Source: Zoltai, 1988.....	26
Figure 8	Limites estimées des provinces écoclimatiques du Canada selon un scénario de CO ₂ doublé dans l'atmosphère. Source: Rizzo et Wiken, 1989.	27
Figure 9	Carte climatique du Canada établie à partir de la méthode de classification de Köppen. Source: Connor, 1936.....	43
Figure 10	Régions climatiques établies pour les Prairies canadiennes et autour (1921-50), d'après la méthode de classification de Köppen. Source: Canada, 1957.....	44
Figure 11	Limites annuelles de certaines régions climatiques, établies d'après la méthode de classification de Köppen, pour la partie centrale et orientale des États-Unis. Source: Trewartha, 1968.....	47
Figure 12	Schéma représentant les étapes principales de cette thèse.....	49
Figure 13	Localisation des stations principales choisies pour cette étude.....	52
Figure 14	Illustration de la couverture REGION3.....	67
Figure 15	Illustration d'un réseau de triangles irréguliers (TIN). construit à partir des points reliés aux 17 stations choisies pour l'étude.....	74
Figure 16	Illustration de la couverture POLYXYZ, constituée de 1459 polygones de Thiessen construits autour des 1459 points de la grille d'origine.....	78
Figure 17	Illustration d'une carte climatique (couverture POLY2130) démontrant les régions climatiques, telles que définies selon la classification de Köppen...	79

Figure 18	Répartition spatiale du nombre d'années classées BSk pour chaque station..	88
Figure 19	Répartition spatiale du nombre d'années classées dans le groupe du type continental humide à été frais (classes finissant par un "b").....	90
Figure 20	Histogramme représentant le nombre de stations classées BSk, d'après la classification climatique de Köppen.....	94
Figure 21	Carte climatique établie pour la région des Prairies et autour (1921-50), d'après la méthode de classification de Köppen.....	103
Figures 22a - 22g	Cartes décennales (1921-30 à 1981-90) établies pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.....	107 à 113
Figures 23a - 23e	Cartes annuelles (1933-34 à 37-38) établies pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.....	122 à 126
Figure 24	Carte annuelle (1936-37) établie, à partir de 74 stations, pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.....	131
Figure 25	Carte de localisation des 74 stations utilisées pour créer la carte illustrée à la figure 24.....	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Développement chronologique de quelques classifications climatiques du globe. Source: Hidore et Oliver, 1992.....	38
Tableau 2	Critères établis pour la classification de Köppen modifiée (basés sur les moyennes annuelles et mensuelles des précipitations (mm) et des températures (°C). Source: Henderson-Sellers, 1986 et Trewartha, 1968...	41
Tableau 3	Liste des stations principales choisies dans le cadre de cette thèse, ainsi que des stations complémentaires dont les données ont servi à compléter celles des stations principales.....	53
Tableau 4	Exemple du fichier des coordonnées pour les stations météorologiques provenant d'Environnement Canada.....	55
Tableau 5	Exemple d'un fichier de données (températures et précipitations) provenant d'Environnement Canada.....	55
Tableau 6	Exemple d'un fichier de données provenant d'Agriculture Canada.....	57
Tableau 7	Exemple du fichier STAT3.DBF résultant du programme STAT1.PRG.....	59
Tableau 8	Exemple du fichier STAT5.DBF résultant du programme STAT1.PRG.....	61
Tableau 9	Exemple d'un fichier de données (températures et précipitations) résultant du programme STRTP.PRG (fichier TEMPR41.DBF).....	61
Tableau 10	Exemple d'un fichier des températures résultant du programme STRTP.PRG (fichier TEMPER41.DBF).....	62
Tableau 11	Exemple d'un fichier des précipitations résultant du programme STRTP.PRG (fichier PRECI41.DBF).....	62
Tableau 12	Exemple des dix dernières années d'un fichier de températures extrait pour la station Edmonton Int A (3012205).....	64
Tableau 13	Exemple du fichier STAT51.TXT.....	69
Tableau 14	Exemple du fichier TPVAR1.DBF ressortant du programme TPVAR.PRG.....	71
Tableau 15	Exemple du fichier KOPPEN1.DBF ressortant du programme KOPPEN.PRG.....	71
Tableau 16	Exemple du fichier TMOY.DBF suite au calcul des moyennes pour chaque période en question.....	72
Tableau 17	Fichier d'attributs (BASE2130.PAT) de la couverture BASE2130 après l'opération JOINITEM.....	74
Tableau 18	Exemple du fichier GRI2130R.TXT.....	76

Tableau 19	Exemple d'un des fichiers de points (KOP2130.DBF) ressortant du programme KOPPEN.PRГ (modifié).....	76
Tableau 20	Exemple du fichier d'attributs (POLYXYZ.PAT), suite à l'opération "JOINITEM" effectuée avec le fichier K2130.DBF.....	78
Tableau 21	Exemple du fichier d'attributs (POLY2130.PAT) de la couverture POLY2130, additionné des colonnes KM2 et PCT.....	79
Tableau 22	Définition des classes climatiques mentionnées dans cette étude, d'après la classification de Köppen.....	83
Tableau 23	Classification annuelle de Köppen, pour 17 stations des Prairies canadiennes (1921-1990), basée sur 12 mois qui chevauchent 2 années.....	84
Tableau 24	Nombre d'années où chaque station se retrouve dans une classe particulière, d'après la classification de Köppen (1921-1990).....	85
Tableau 25	Nombre annuel de stations se retrouvant dans chaque classe climatique de Köppen.....	91
Tableau 26	Classification décennale pour chaque station, d'après la classification climatique de Köppen.....	97
Tableau 27	Superficie totale (en km ²) ressortant pour chaque classe climatique, pour les périodes de 1921-50 et de 1921-30 à 1981-90, ainsi que le pourcentage de ces superficies par rapport au total des étendues classées...	104
Tableau 28	Superficie totale (en km ²) ressortant pour chaque classe climatique, pour les années de 1933-34 à 37-38, ainsi que le pourcentage de ces superficies par rapport au total des étendues classées.....	127
Tableau 29	Noms des stations météorologiques, ayant servi à la création de la carte illustrée à la figure 24, ainsi que leur numéro d'identification et le numéro permettant de localiser ces stations sur la figure 25:.....	132

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Introduction.....	1
1.2 Problématique	2
1.3 Localisation et description de la région étudiée	7
1.4 Objectifs de la thèse.....	9
1.5 Structure de la thèse.....	9

CHAPITRE 2 L'ÉTUDE DES VARIATIONS ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CONTEMPORAINS DANS LES PRAIRIES CANADIENNES

2.1 Introduction.....	11
2.2 Analyses de données provenant de stations météorologiques	12
2.3 Modèles de circulation générale (MCG) et systèmes d'information géographique (SIG)	22
2.4 Sommaire	29

CHAPITRE 3 LES CLASSIFICATIONS CLIMATIQUES: COMPARAISONS ET CHOIX DE LA MÉTHODE

.....	34
-------	----

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

4.1 Introduction.....	48
4.2 Le choix des stations.....	50
4.3 Les données de base et leur structure	54
4.4 Le prétraitement des données	56
4.4.1 Structurer et transformer les données	58
4.4.2 Remplacer les données manquantes	63
4.5 Le traitement et la visualisation des données	66
4.5.1 La création de couvertures ARC/INFO	66
4.5.2 Le premier traitement (une classification annuelle)	68
4.5.3 Le deuxième traitement	70
4.5.4 Le troisième traitement (création de cartes climatiques)	73
4.5.5 La visualisation des résultats pour fin d'analyse	80

CHAPITRE 5 LES RÉSULTATS: ANALYSE ET DISCUSSION

5.1 Introduction.....	81
5.2 La classification annuelle	82
5.3 La classification décennale	96
5.4 Les cartes climatiques	99
5.4.1 La carte de 1921-50	102
5.4.2 Les cartes décennales.....	106
5.4.3 Les cartes de 1933-34 à 37-38	121
5.4.4 Carte de 1936-37 à partir de 74 stations	130

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Introduction.....	140
6.2 Points majeurs ressortant de cette thèse.....	140
6.3 Les retombées possibles du projet	150
6.4 Recommandations pour des travaux futurs.....	152

RÉFÉRENCES.....	155
------------------------	------------

ANNEXES

Annexe 1	159
Annexe 2	160
Annexe 3	161
Annexe 4	162
Annexe 5	163
Annexe 6	163
Annexe 7	164
Annexe 8	164
Annexe 9	165
Annexe 10	167
Annexe 11	169
Annexe 12	170
Annexe 13	174
Annexe 14	174

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Introduction

Depuis la fin du dernier siècle, on a observé une augmentation importante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, surtout causée par les activités humaines. En se référant aux modèles climatiques, quelques chercheurs prédisent que la température moyenne à la surface du globe risque de s'élever de 1,5 à 4,5°C au cours des 50 prochaines années (Mckay et Hengeveld, 1990). À partir d'analyses de données de températures, Jones (1990) et Vinnikov *et al.*(1990) ont observé une augmentation des températures des deux hémisphères à un rythme moyen de 0,5°C par siècle. Jones (1990) ajoute que les années 1980 sont sans aucun doute les plus chaudes enregistrées depuis la décennie de 1860, puisqu'elles regroupent les six années les plus chaudes qui furent par ordre décroissant: 1989, 1988, 1987, 1983, 1981 et 1980. Cependant, ces tendances peuvent être très variables d'une région à l'autre du globe (*i.e.* certains endroits ont subi un réchauffement plus important, tandis que d'autres un refroidissement).

Si ces tendances s'avèrent justes, nous pourrions voir des changements climatiques d'une importance variable d'une région à l'autre du Canada. Des températures plus élevées dans les Prairies canadiennes augmenteraient l'évaporation, ce qui pourrait résulter en une plus grande sécheresse. La zone aride du sud des Prairies canadiennes pourrait ainsi s'étendre sur une plus grande superficie, ce qui diminuerait ses capacités agricoles, tout en modifiant sérieusement tout l'écosystème de la région affectée.

Toute prédiction climatique doit être traitée avec un sens critique, du fait qu'il s'agit d'un phénomène très complexe qui dépend d'une multitude de facteurs étroitement interdépendants. Il importe donc de développer diverses méthodes de traitement et d'analyse des données climatiques, afin de vérifier les changements climatiques passés et actuels, et

ainsi mieux prévoir ceux qui pourraient survenir du moins dans un proche avenir. Les travaux dans ce domaine se multiplient sans cesse, mais il reste encore beaucoup à faire avant d'en arriver à prédire, avec plus de précision, les modifications climatiques à venir. Les recherches élaborées à partir de la combinaison de plusieurs variables climatiques permettent de faire une étude plus représentative du climat dans toute sa complexité.

La présente thèse a pour but d'étudier les variations climatiques qui ont eu lieu dans les Prairies canadiennes, de 1921 à 1990, avec l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Les études des variations climatiques ont souvent été réalisées à partir d'un seul élément climatique à la fois, soit les températures ou les précipitations. Les analyses effectuées dans la présente recherche, sont basées sur la classification de Köppen. Cette dernière est établie selon des seuils critiques de températures ou de niveaux d'humidité qui permettent ou limitent la croissance de divers types de végétation (Henderson-Sellers, 1986). L'utilisation de cette méthode de classification climatique permet donc d'étudier le climat passé, d'une façon plus complète, tout en donnant un sens aux données climatiques, en fonction de certains grands types de végétation.

1.2 Problématique

Le climat est un déterminant essentiel à l'apparition ou à la disparition d'un écosystème particulier. Deux des facteurs les plus évidents pouvant influencer le caractère et la distribution d'écosystèmes sont: le degré et la variabilité des températures, et la quantité de précipitations (Rizzo et Wiken, 1992). L'équilibre entre l'énergie et l'humidité, les taux de productivité et le caractère principal de ces écosystèmes peuvent être altérés par une augmentation de seulement 2°C des moyennes annuelles des températures. Les effets des changements climatiques sur les divers écosystèmes peuvent avoir des conséquences plus importantes qu'on ne pourrait s'imaginer.

Les phénomènes climatiques ont des impacts environnementaux très variables, tout dépendant des échelles temporelles et spatiales de ces phénomènes, ainsi que des

écosystèmes et des activités humaines (des sociétés). Clark (1985) nous démontre, à l'aide d'un graphique, les échelles d'interactions entre ces trois types d'éléments (Figure 1). Ce graphique permet de mieux illustrer l'importance relative des impacts que peut avoir chaque phénomène sur les autres. Par exemple, les activités violentes telles que les tornades et les orages (dans l'aire "a" du graphique) ont un impact sur des superficies limitées (quelques km²), habituellement pendant quelques heures seulement. Ces activités violentes ont relativement peu d'impact sur le développement régional en agriculture ("R") ou sur l'écologie géographique ("G"), car ces derniers touchent des superficies beaucoup plus importantes (jusqu'à des centaines de km²) pendant une période de temps plus longue (de plusieurs années à plusieurs siècles).

Par contre, il est plus difficile d'établir une relation claire entre un réchauffement global de plusieurs décennies (w) et d'autres phénomènes. Par rapport au réchauffement global, les échelles de temps sont très courtes en ce qui a trait à l'accumulation de la biomasse animale et végétale, au cycle de croissance des cultures et même à la substitution régionale de cultures traditionnelles pour d'autres à hauts rendements. Une première approximation nous permet de croire que ces processus écologiques et sociaux pourraient suivre le rythme du réchauffement global. D'autre part, les extensions à grande échelle des arbres, telles que celles qui ont eu lieu suite à la dernière glaciation, se sont opérées à une échelle de plusieurs milliers d'années comparativement à la centaine d'années ou moins que l'on prédit pour le réchauffement global. Ceci dit, la réponse végétative ne pourrait suivre le rythme des changements climatiques associés au réchauffement global (Clark, 1985).

Un réchauffement climatique, tel qu'anticipé par certains chercheurs (1.5 à 4.5°C pendant les prochains 30 à 50 ans), serait de 10 à 40 fois plus rapide que le réchauffement survenu suite à la dernière glaciation (Rizzo et Wiken, 1992). D'après des prédictions de Zoltai (1988), basées sur des simulations de doublement du CO₂, la province écoclimatique appelée Prairies arides pourrait s'étendre de quelques 150 km au nord et à l'est, occupant les régions de forêts-parcs à trembles. Une réduction du niveau d'eau dans les mares et étangs

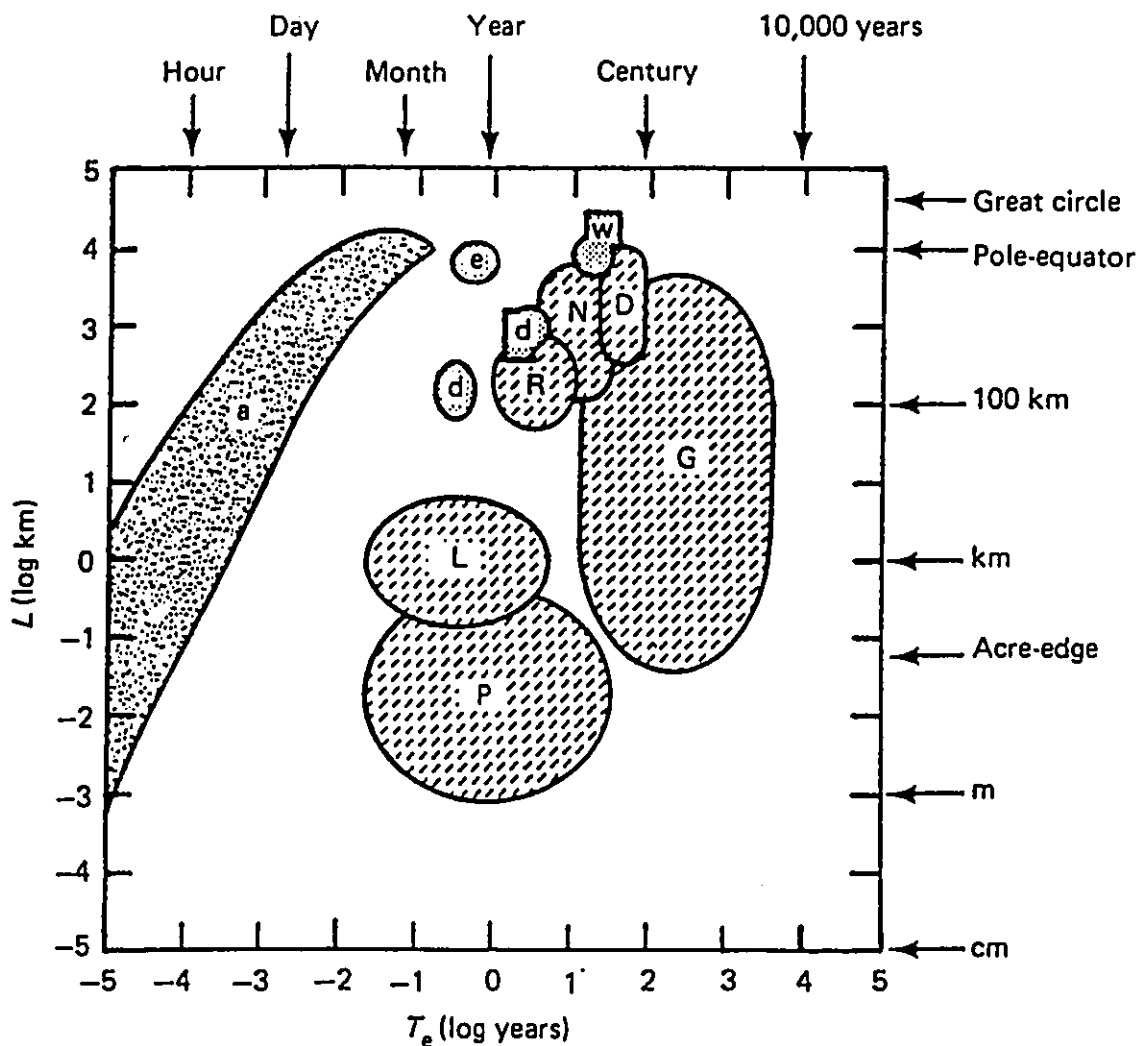


Figure 1 Échelles d'interactions entre les climats, les écosystèmes et les sociétés. Les aires en pointillé représentent des phénomènes climatiques: (a) phénomènes atmosphériques, (e) El Niño, (d) sécheresses, (w) réchauffement global. Les aires hachurées représentent les phénomènes sociaux et écologiques: (P) écologie des populations, (G) écologie géographique, (L) activités locales en agriculture, (R) développement régional en agriculture, (N) modernisation nationale en industrie, (D) tendances globales en politique et démographie. Source: Clark, 1985.

des Prairies pourrait non seulement résulter en une perte d'habitats pour la faune, mais aussi représenter une baisse de la disponibilité en eau dans cette région (Rizzo et Wiken, 1992).

Les Prairies les plus sèches, donc plus fragiles, illustrent bien les risques menaçant l'agriculture lorsqu'il y a dégradation du sol ou passage vers des conditions plus arides ou plus chaudes (Stewart et Tiessen, 1990). Le manque d'eau a fortement restreint la culture du blé, notamment dans le sud de la Saskatchewan, l'une des principales régions productrices du Canada; le rendement n'y correspond qu'au tiers du rendement observé en France où le climat est plus humide. S'il s'affaiblit encore par suite de la détérioration du sol ou d'une tendance vers un climat plus sec et plus chaud, la culture du blé deviendra une entreprise précaire, même pour un gestionnaire prudent (Stewart et Tiessen, 1990). Un comité canadien s'est penché sur ce qu'un réchauffement pourrait provoquer dans les Prairies canadiennes (Centre climatologique canadien, 1991):

- migration de l'agriculture vers le nord et expansion agricole dans la région des rivières La Paix et Athabaska grâce à d'autres cultures;
- diminution de la teneur en eau dans le bassin de la rivière Saskatchewan avec des sécheresses agricoles plus fréquentes et plus graves;
- possibilités d'extrême sécheresse pendant certaines années dans la Saskatchewan avec des pertes d'environ 2 milliards de dollars et de 8000 années-personnes;
- la capacité de charge des Prairies herbeuses baissera, de même que les besoins en fourrage, en raison des températures plus élevées; les maladies affecteront davantage le bétail et les ravageurs détruiront encore plus de cultures.

Toutes ces prédictions doivent être prises au sérieux, mais il faut avant tout développer davantage les méthodes permettant de vérifier les changements climatiques à venir, ainsi que les impacts environnementaux qui peuvent s'en suivre. Les travaux accomplis dans le cadre de cette thèse pourront donc nous aider à mieux prévoir les changements qui pourraient survenir dans les Prairies, d'après les tendances observées à partir de données historiques sur les températures et les précipitations. L'analyse uniquement

basée sur les variations de températures limite encore trop l'information nécessaire à la prédiction d'impacts environnementaux. En combinant les données de températures et de précipitations, il est possible de mieux estimer comment les changements de ces deux éléments peuvent affecter les écosystèmes. Cette étude est donc mieux appuyée par l'utilisation d'une classification climatique, telle que celle de Köppen. Cette classification utilise des seuils, établis pour différencier les divers types de climats, basés sur des observations climatiques en rapport avec la présence de certains types de végétation. Par exemple, la limite de 10°C (moyenne), pour le mois le plus chaud (limite entre les climats subarctiques (D) et polaires (E), coïncide avec la limite polaire des forêts localisées à l'intérieur des continents (Trewartha, 1968). D'autres méthodes de classification existent (Voir chapitre 3), mais l'utilisation de celle de Köppen se justifie par la plus grande disponibilité des données nécessaires à son élaboration (températures et précipitations mensuelles), surtout pour une période qui remonte jusqu'à 1921.

Cette étude sera basée sur les résultats ressortant d'une classification annuelle et décennale, de sorte à vérifier les variations climatiques sur deux différentes échelles de temps. La classification annuelle servira à vérifier certaines variations climatiques reliées à des événements, tels que les sécheresses. La classification décennale sera surtout utile à détecter des tendances climatiques à plus long terme, d'après les déplacements temporels de limites séparant deux groupes climatiques, tels que BSk (climat semi-aride) et D (climats humides microthermiques). L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) permettra de visualiser les résultats sous forme de cartes climatiques, celles-ci fournissant beaucoup plus d'information concernant les variations spatiales et temporelles du climat des Prairies, pour la période de 1921 à 1990.

Cette recherche contribue donc au développement d'une méthode d'analyse climatique, servant à vérifier les variations climatiques et leurs effets possibles sur l'environnement des Prairies. Cette méthode pourrait éventuellement être utile à la validation

de modèles de prédiction des changements climatiques pour cette région et ailleurs sur le globe.

1.3 Localisation et description de la région étudiée

La région étudiée consiste surtout en une région nommée Province écoclimatique des Prairies (Figure 2), d'après la classification des Régions écoclimatiques du Canada (expliquée dans le chapitre 3). Cette zone, qui fait partie de ce qu'on appelle les grandes Prairies de l'Amérique du Nord, couvre une superficie d'environ 500 000 km², située au sud des provinces de l'Alberta de la Saskatchewan et du Manitoba. On y retrouve généralement un climat continental extrême avec une grande amplitude des températures, les minimums de janvier étant de -35°C à -40°C et les maximums de juillet entre 35°C et 40°C (Longley, 1972). De plus, les températures varient beaucoup à l'intérieur d'une même journée, surtout en hiver, mais des changements rapides peuvent survenir un peu à tout temps de l'année. Les précipitations annuelles, entre 250 mm et 450 mm, tombent pour les deux tiers durant l'été (mai-août).

À l'extrémité sud des Prairies canadiennes, où il pleut rarement et où le taux d'évaporation élevé restreint la productivité, la steppe de graminées à paille courte s'est emparée des sols bruns à peine lessivés mais pauvres en matière organique. Suit une zone où l'agropyre de l'Ouest et le pâturin des prés se mélangent à des arbustes nains comme l'églantier et la symphorine blanche. Un peu plus au nord, où il pleut davantage et où il fait plus frais, les pâturages à fétuque et les bosquets de trembles servent de zone tampon avant la forêt, et prospèrent sur des terres noires épaisses et riches en éléments nutritifs, caractérisées par la plus haute concentration de matière organique qui soit dans un sol minéral (Stewart et Tiessen, 1990).

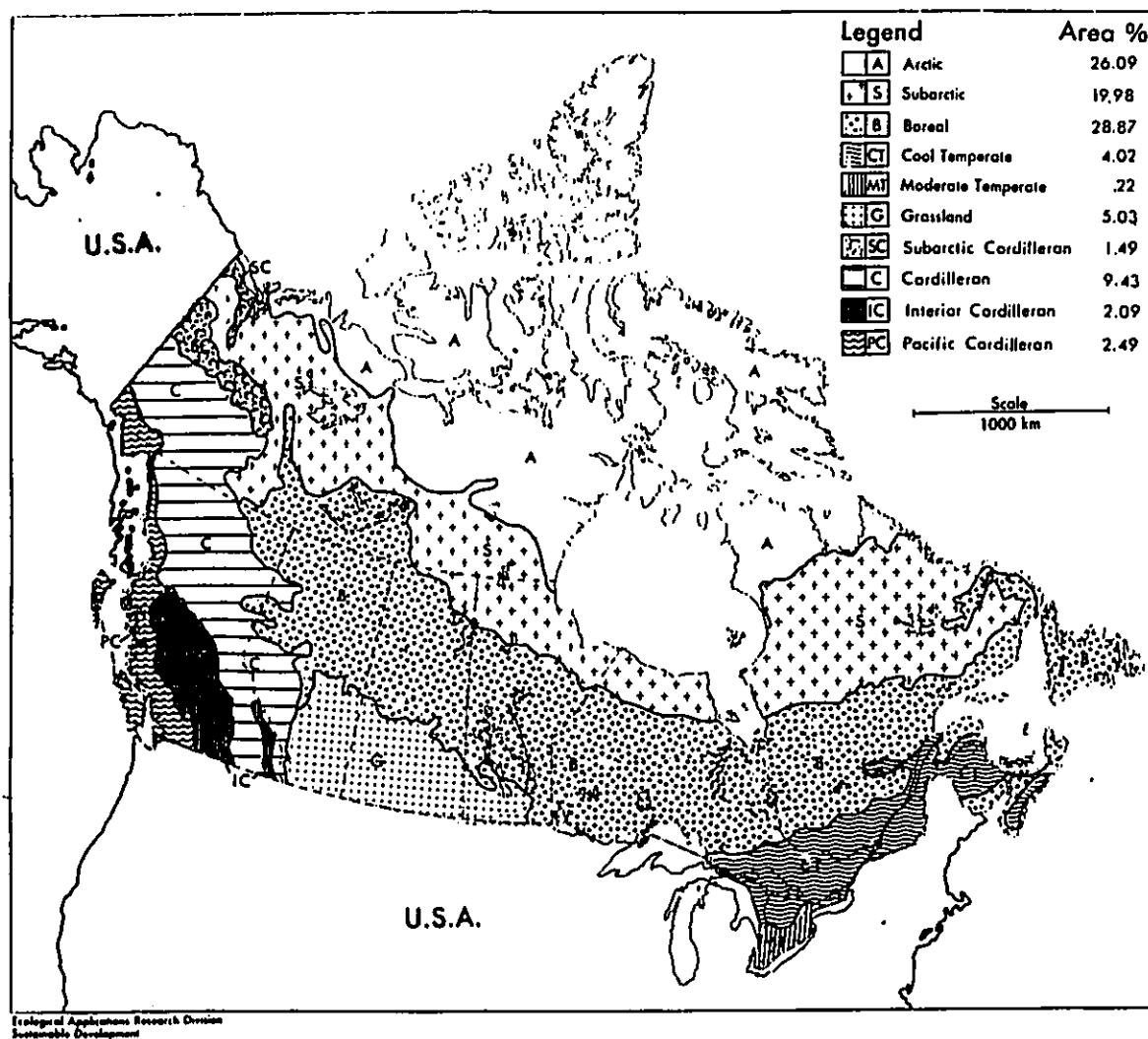


Figure 2 Localisation de la région d'étude, cette dernière correspondant à la Province éoclimatique des Prairies (zone G), d'après le système de classification des Provinces éoclimatiques du Canada. Source: Rizzo et Wiken, 1989.

1.4 Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les variations climatiques entre 1921 et 1990 pour la province écoclimatique des Prairies canadiennes, avec l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Afin de réaliser ce projet, deux objectifs secondaires seront visés:

1. évaluer le potentiel de la classification climatique de Köppen, telle qu'implantée dans un SIG, afin d'étudier les changements climatiques;
2. démontrer le potentiel d'un SIG en tant qu'outils servant à l'étude des changements environnementaux et plus spécifiquement au niveau de l'analyse et de la visualisation des données climatiques.

1.5 Structure de la thèse

Les chapitres de cette thèse se présentent de la façon suivante. Le chapitre 2 traite de diverses études réalisées au niveau des variations et changements climatiques contemporains, dans les Prairies canadiennes. Une première partie concerne surtout les analyses effectuées à partir de données climatiques contemporaines. Ensuite, il est question de travaux fait à l'aide de modèles de circulation générale, ainsi que des systèmes d'information géographique.

Le troisième chapitre présente certaines classifications climatiques proposées par plusieurs chercheurs, ainsi que celle de Köppen, telle qu'utilisée pour la présente étude. Le quatrième chapitre comprend les étapes principales de la méthodologie utilisée pour cette recherche, en commençant par la schématisation de ces étapes. Ensuite, le choix des stations est expliqué en détail, ainsi que les multiples étapes impliquées dans le prétraitement et le traitement des données, et dans la visualisation des résultats.

Le chapitre 5 traite de l'analyse et l'évaluation des résultats, visualisés sous forme de tableaux ou de cartes climatiques. Une comparaison est souvent effectuée entre ces diverses formes de représentation, ainsi qu'entre les résultats de cette recherche et d'autres provenant d'études antérieures. Finalement, le chapitre 6 contient les conclusions ressortant de cette

thèse, suivies des retombées pouvant découler de cette dernière, en ce qui a trait à l'utilisation des SIG pour l'analyse des changements climatiques. En dernier lieu, des recommandations sont proposées pour la poursuite de travaux ultérieurs.

CHAPITRE 2

L'ÉTUDE DES VARIATIONS ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CONTEMPORAINS DANS LES PRAIRIES CANADIENNES

2.1 Introduction

Le climat des Prairies canadiennes a beaucoup changé avec le temps, ces changements ayant été plus ou moins importants selon les facteurs responsables ainsi que la période en question. Le pétrole, le charbon et les fossiles de dinosaures démontrent qu'il y a plusieurs millions d'années, il y avait un climat tropical dans les prairies (Longley, 1972). Au courant des derniers 800 000 ans, de grandes glaciations semblent s'être produites à des intervalles d'environ 100 000 ans, chacune d'elles étant suivie d'un réchauffement marqué de 4 à 6°C (phases interglaciaires) (Hengeveld, 1991). Depuis la fin de la dernière période glaciaire, il y a quelque 10 000 ans, le climat des prairies a été assez stable à l'exception de certaines fluctuations. Par exemple, un réchauffement a eu lieu entre 950 et 1250 approximativement; les températures moyennes de l'hémisphère Nord auraient alors été d'environ 0,5°C supérieures à celles du début de notre siècle (Gullet et Skinner, 1992). Il y a eu ensuite le "petit âge glaciaire" qui a duré à peu près de 1400 à 1900, où les températures sont restées jusqu'à 0,5°C inférieures à celles d'aujourd'hui (Gullet et Skinner, 1992).

Les précipitations des Prairies ont aussi fluctué avec le temps. Au cours des deux derniers siècles, l'ouest canadien a connu au moins 40 sécheresses graves (Phillips, 1990). La plus désastreuse fut sans aucun doute celle des années 1930, qui vit un quart de million de personnes désertir l'ouest. Au cours des années sèches, entre 1933 et 1937, les Prairies ne reçurent que 60% des précipitations normales. Les années 1936 et 1937 furent particulièrement difficiles. Des milliers de têtes de bétail moururent de faim et de suffocation et les récoltes se desséchèrent. Au coeur de la région touchée, on enregistra en certains endroits que 45% des précipitations normales. L'année 1988 a été particulièrement

désastreuse pour les producteurs de grains et les propriétaires de ranchs des Prairies. Phillips (1990) mentionne aussi plusieurs autres sécheresses qui ont sérieusement affecté les Prairies:

- 1816-19 sécheresse presque ininterrompue et nuées de sauterelles sur les Prairies;
- 1868 perte des récoltes des Prairies; les sauterelles s'abattent telles une plaie;
- 1890 neuf années de sécheresse forcent les agriculteurs à l'exode;
- 1967 sécheresse frappant un territoire qui s'étend de la rivière de la Paix au sud du Manitoba;
- 1977 grave sécheresse dans le sud de l'Alberta et l'ouest de la Saskatchewan;
- 1979-80 deux années médiocres pour le blé dans les Prairies; pertes pour l'économie estimées à 2 500 000 000 \$;
- 1985 le sud-est des Prairies ne reçoit que la moitié de la quantité normale de pluie.

Les données météorologiques, enregistrées depuis la fin du dix-neuvième siècle, ont permis d'observer certaines variations climatiques pour les Prairies canadiennes, soit par l'analyse statistique de ces données, ou par la représentation de ces dernières sous diverses formes de graphiques ou de cartes climatiques. Ces données servent aussi à la validation de modèles de circulation générale (MCG), qui eux, permettent de prédire les changements climatiques à venir. Depuis peu, on utilise de plus en plus des systèmes d'information géographique (SIG) pour traiter les résultats de MCG, de sorte à en faciliter l'interprétation. Dans ce chapitre, nous présenterons d'une part certaines analyses climatiques effectuées surtout pour les Prairies canadiennes, à partir de données météorologiques, et d'autre part, les résultats de certains MCG, et quelques exemples d'utilisation de SIG pour l'interprétation de ces résultats.

2.2 Analyses de données provenant de stations météorologiques

Le climat des Prairies canadiennes a souvent été analysé à partir de divers types de données météorologiques, représentées soit sous forme de tableaux ou de graphiques. Plusieurs études de ce genre seront abordées dans la première partie de la présente section.

Ensuite, suivra d'autres analyses climatiques, cette fois-ci basées sur des cartes généralement composées d'isolignes reliées à certaines valeurs climatiques.

Études climatiques à partir de données reportées sur tableaux ou graphiques

Plusieurs études climatiques ont été effectuées pour les Prairies canadiennes, à partir de données météorologiques reportées sur des tableaux ou des graphiques. Afin d'analyser les variations des températures et précipitations de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba (de 1880 à 1963), Thomas (1970) a établi des courbes à l'aide de moyennes mobiles calculées sur dix ans (Figure 3), basées sur les températures et précipitations provenant de quelques stations choisies pour chacune de ces provinces. Il a donc observé, pour l'ensemble des Prairies, une augmentation des températures (de 2 à 3°F) de 1880 au début des années 1930, suivie d'un léger refroidissement jusque vers 1945. Le refroidissement s'est ensuite accentué jusqu'à 1956, suivi d'une augmentation des températures, avec des valeurs au Manitoba se rapprochant des maximums retrouvés en fin des années 1940 (environ 36,5°F). L'auteur note des précipitations relativement abondantes durant les premières années du siècle, mais devenant moins importantes pendant les trois ou quatre décades suivantes. Les précipitations ont augmentées durant les années 1950, pour ensuite diminuer de 1960 à 1963 en Alberta et au Saskatchewan, à l'exception du Manitoba.

Longley (1972) a aussi construit des courbes représentant des moyennes mobiles décennales de sorte à analyser les variations des températures (1890 à 1970) pour la partie des Prairies située au sud du 55° parallèle. Il constate une augmentation des températures d'environ 0,8°C de 1890 à 1910. Entre 1920 et 1950, la moyenne demeurait relativement stable entre 2,8 et 3,3°C, la décade la plus chaude étant de 1925 à 1934. Les années 1945-1960 étaient généralement plus froides avec une diminution de la moyenne mobile à 2,2°C pour la période de 1946-1956.

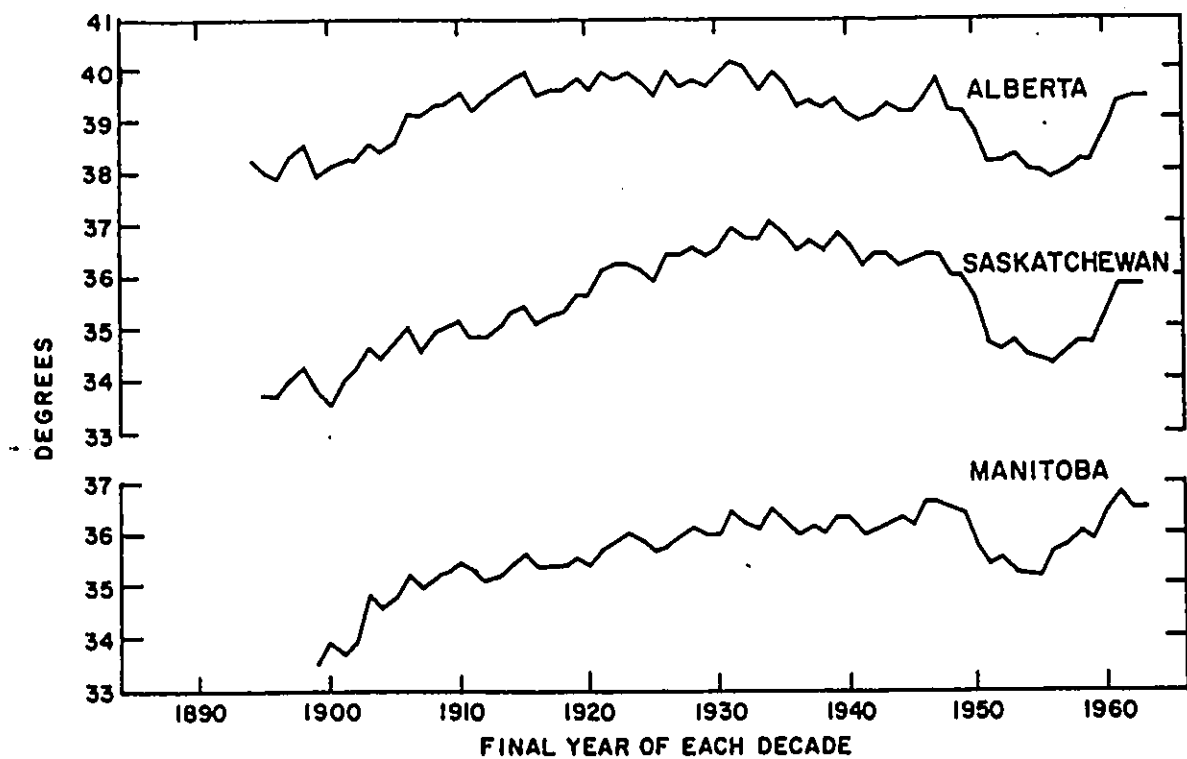


Figure 3 Moyennes mobiles (sur dix ans) des températures annuelles (en °F) pour l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba. Source: Thomas, 1970.

Longley (1972) a utilisé la même méthode pour analyser les variations des précipitations (1885 à 1970) dans cinq bassins hydrographiques des Prairies. Il note un niveau bas des précipitations pour toutes les stations ayant des données pour la période de 1885-1895, suivi d'une augmentation rapide vers un maximum à la première décennie du vingtième siècle. Pour le bassin de la rivière Assiniboine en Saskatchewan, la période de 1905-1969 démontre des fluctuations cycliques, avec des maximums d'environ 41,9 cm pour les décades de 1901-1910 et 1918-1927, et environ 44,5 cm pour 1946-1955. Des minimums sous les 35,6 cm sont observés pour les périodes de 1910-1919 et 1928-1937, et de 36,8 cm pour 1957-1966. Ces cycles sont aussi apparents pour les bassins adjacents. Dans le bassin de la Saskatchewan Sud de l'Alberta, ces cycles sont un peu moins apparents, mais la décade la plus humide, de 1942-1951 (moyenne de 53,8 cm), possède des précipitations supérieures de plus de 12,7 cm par rapport aux périodes sèches de 1928-1937 (39,1 cm) et 1955-1964 (38,6 cm). Il n'y avait pas de cycles évidents dans les bassins de l'est, tels que celui de Saskatchewan Forks (Saskatchewan) et de Red River (Manitoba). Dans la région de Western Manitoba Lakes, il y avait une hausse de 10,2 cm entre la période finissant en 1931 et celle se terminant en 1950. La période la plus sèche était de 1922 à 1931, et les précipitations ont augmenté durant les années 1930 pendant que d'autres districts devenaient plus secs. Dans le bassin de la Saskatchewan Nord en Alberta et en Saskatchewan, ainsi que celui de Saskatchewan Forks, il y a eu une augmentation des précipitations à partir des sécheresses des années 1890 jusqu'à la période humide finissant autour de 1917. Autrement, les précipitations sont demeurées relativement stables à ces endroits.

Dans une autre étude, Thomas (1975) a analysé les fluctuations climatiques à partir de données de températures, de précipitations, d'insolation effective, de nébulosité, d'enneigement et de pression, toutes enregistrées, de 1940 à 1974, à 37 stations du Canada. Les variations au niveau de quelques stations choisies, ont été démontrées à l'aide de courbes représentant les données annuelles et des moyennes mobiles sur dix ans. De plus, on a regroupé plusieurs stations de sorte à créer 11 districts du pays, pour lesquels les données

étaient reportées sur des courbes de moyennes mobiles décennales. Pour le district de l'ouest des Prairies, l'auteur note des moyennes décennales de températures, du début des années 1950, inférieures de près de 1,1°C à celles des décennies centrées sur les années ultérieures à 1960. Ensuite il y a eu une baisse de 0,8°C vers la fin de la période d'étude. Pour le district de l'est des Prairies, les moyennes décennales des températures annuelles ont augmenté de 1,5% vers 1955, mais ont baissé de 1,1°C durant les 13 dernières années. Pour le district de l'ouest des Prairies, Thomas observe une plus grande variation des précipitations annuelles, celles-ci étant plus abondantes en été qu'en hiver. Il ajoute aussi que les hauteurs annuelles dépassent généralement les hauteurs normales de la première moitié de la période étudiée, mais au cours des décennies centrées sur la fin des années 1950, l'indice s'est abaissé d'environ 20%. Les moyennes décennales, centrées sur les années 1960, sont inférieures aux moyennes de la période précédente. Pour l'est des Prairies, le régime des précipitations ressemble à celui de l'ouest des Prairies, mais la moyenne décennale est moins variable. Le retour aux conditions normales s'effectue de façon prononcée dans le sud du Manitoba et de la Saskatchewan, et en Alberta.

Raddatz *et al.* (1991) ont analysé les variations de températures pour sept stations de la Saskatchewan et du Manitoba, à l'aide de courbes démontrant des moyennes normales (moyennes sur trente ans) de 1901-30 à 1961-90. Ces auteurs ont remarqué un réchauffement appréciable pour la période de 1961-90, ce qui marque la fin du refroidissement progressif constaté pendant trois périodes normales successives (1931-60, 1941-70 et 1951-80). De 1961 à 90, ils ont aussi observé pour les huit premiers mois de l'année, des normales supérieures à celles enregistrées de 1951 à 1980. De plus, ils constatent des normales les plus chaudes du siècle dans le cas des mois de février et mars de la période de 1960-90. Par contre, ils ont aussi remarqué, pour cette même époque, des normales du mois d'octobre inférieures à celles des périodes précédentes, et les plus froides du siècle pour les mois de novembre et décembre.

Hengeveld (1991) a utilisé des courbes représentant les écarts entre les températures moyennes annuelles et la moyenne de 1950-79, afin d'analyser les variations enregistrées de 1860 à 1989 pour le Canada en entier, ainsi que pour l'ouest (de 1900 à 1989) (Figure 4) et l'est du pays. On note pour le Canada un réchauffement de 1860 au début des années 1940, puis un refroidissement modéré jusque vers 1975, suivi d'un réchauffement prononcé persistant jusque dans les années 1980. Le refroidissement du milieu du siècle était plus prononcé dans l'ouest, où il débute presque une décade plus tôt que dans l'est.

Une approche différente de ces dernières était utilisée par Jones (1991), afin d'étudier les sécheresses affectant les Prairies de 1929 à 89. Cet auteur a calculé l'indice de sécheresse de Palmer ("Palmer Drought Index" ou "PDI") (expliqué dans Karl et Knight, 1985), pour 33 stations de cette région et pour la période de 1950 à 89. Les résultats de cette technique étaient comparés à d'autres provenant d'une étude antérieure (Williams, 1983), où on avait établi pour la période de 1929 à 80, la relation entre des estimations d'humidité dans les sols et les récoltes de blé. Ceci permettait à Jones de faire ressortir les années ayant les plus importantes sécheresses dans les Prairies, telles que 1933, 36-38, 61, 66-67, 77-78, 80-81, 84 et 88.

Gullett et Skinner (1992) ont étudié les variations des températures entre 1895 et 1991, pour le Canada et pour les 11 régions climatiques du pays telles que définies par le Service de l'environnement atmosphérique du Canada. Pour ce faire, ils ont créé des courbes à partir des écarts entre les températures moyennes annuelles et la moyenne des températures pour la période de 1951-80. On a aussi ajouté à ces graphiques une droite de régression simple représentant la tendance des changements de températures pour l'ensemble de la période étudiée (Figure 5). Pour la région climatique des Prairies, ces auteurs ont dénoté un réchauffement graduel des années 1890 aux années 1940, suivi d'un refroidissement jusqu'aux années 1970 et d'un second réchauffement depuis cette décennie. Une tendance statistiquement significative indique pour cette région un réchauffement de 0,9°C au cours du dernier siècle.

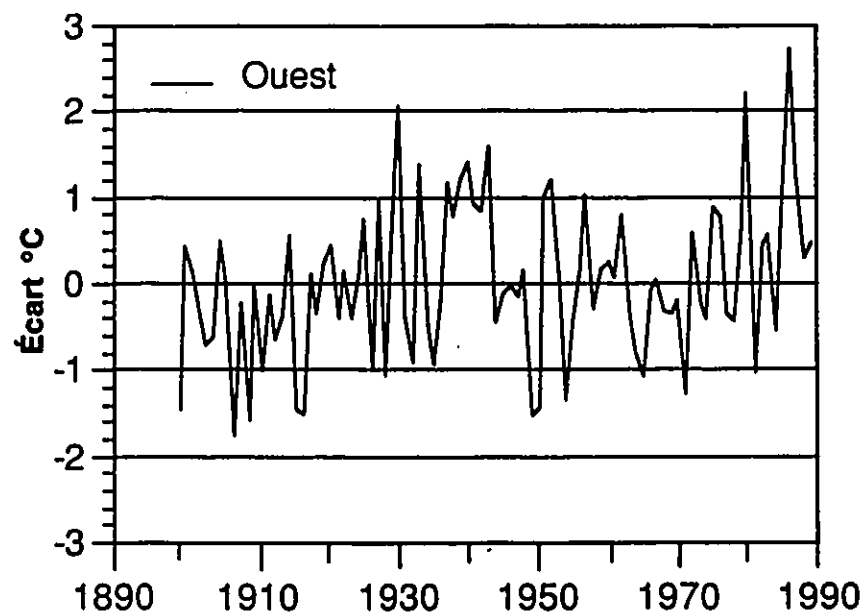


Figure 4 Écarts entre les moyennes annuelles des températures et la moyenne de 1950-79, pour la moitié méridionale de l'ouest canadien. Source: Hengeveld, 1991.

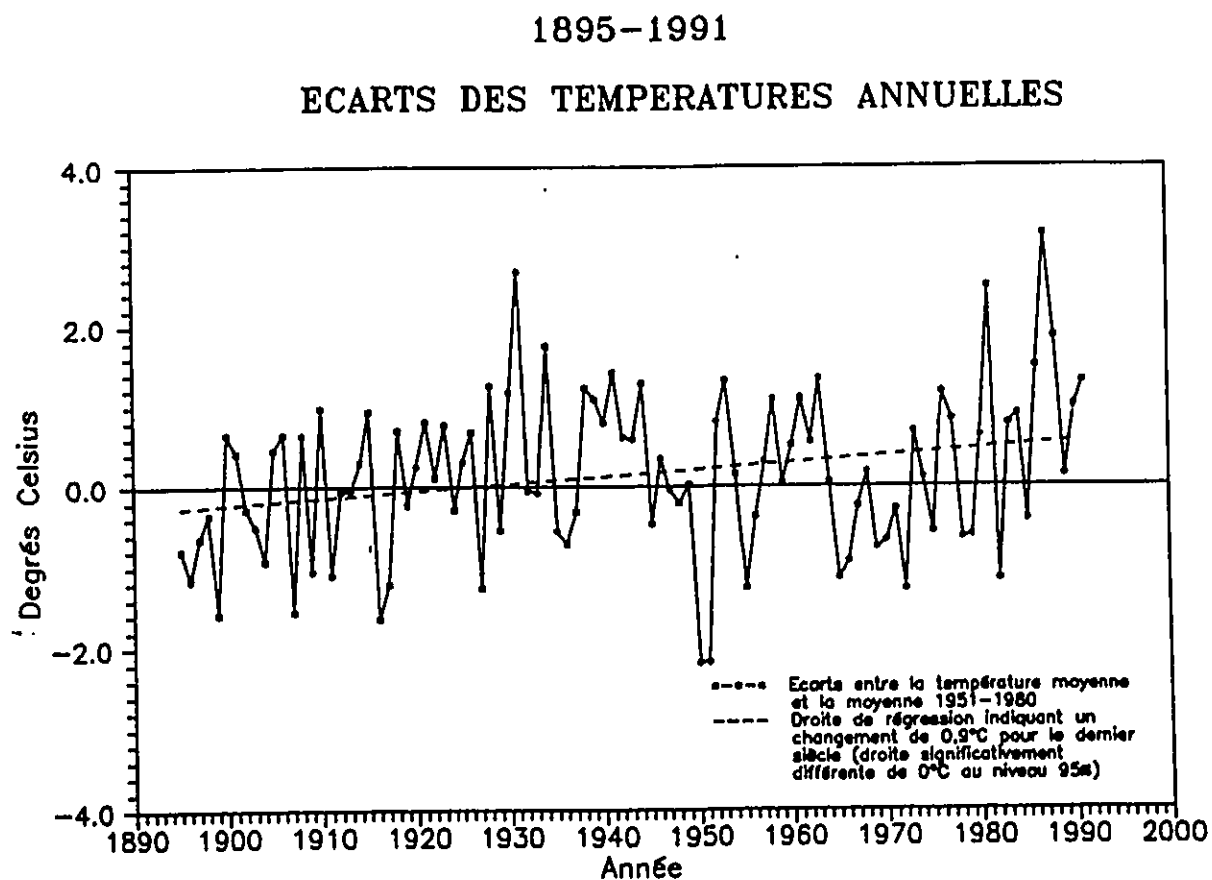


Figure 5 Graphique démontrant la tendance de la température des Prairies (1895-1991), de même que les écarts entre les températures annuelles et la moyenne de 1951-1980. Source: Gullett et Skinner, 1992.

Études climatiques à partir de représentation cartographique des données

D'autres études climatiques ont été réalisées à partir de données représentées sous forme cartographique. Olukayode Oladipo (1987) a fait une étude à partir des données de précipitations pendant la saison de croissance (avril à septembre) de 1931 à 1978, pour 407 stations météorologiques des plaines intérieures de l'Amérique du Nord et pour un nombre décroissant de stations avec des données datant jusqu'à 1875. L'auteur a vérifié la différence entre la moyenne de chaque décade (1911-20 à 1971-78) par rapport à la moyenne de 1941 à 1970. Cette différence était reportée sur une carte pour chaque décennie incluant des zones définies comme étant au dessus ou en dessous de la moyenne de 1941 à 1970. Cette analyse lui a permis de constater que les décennies de 1940 et 1960 étaient généralement plus humides et celles de 1930 et 1950 particulièrement plus sèches. Olukayode Oladipo a aussi calculé le coefficient de variation (en %) des précipitations pour chaque station, pour ensuite reporter ces valeurs sous forme d'isolignes sur une carte. Ceci a permis de déceler une variabilité plus élevée des précipitations dans le sud-ouest de la Saskatchewan et le sud-est de l'Alberta, comparativement à l'est du Manitoba.

Hengeveld (1991) a étudié, pour tout le Canada, les variations des températures saisonnières moyennes des périodes de 1959-73 à 1974-88. Pour ce faire, celui-ci a créé pour chaque saison, des cartes avec des isolignes représentant l'écart des températures entre les périodes de 1959-73 et 1974-88 (Figure 6). D'après ses résultats, aucune différence significative n'est ressortie pour la période d'été. Par contre, les cartes d'hiver et du printemps démontrent une large bande, représentant un réchauffement substantiel, s'étendant du sud des Prairies jusqu'au Yukon et dans la région ouest des Territoires du Nord-Ouest à l'Alaska. Durant l'automne, l'ouest canadien a subi un réchauffement substantiel, tandis que l'est du Canada a connu un refroidissement devenant plus intensif en allant vers le Québec et l'Ontario.

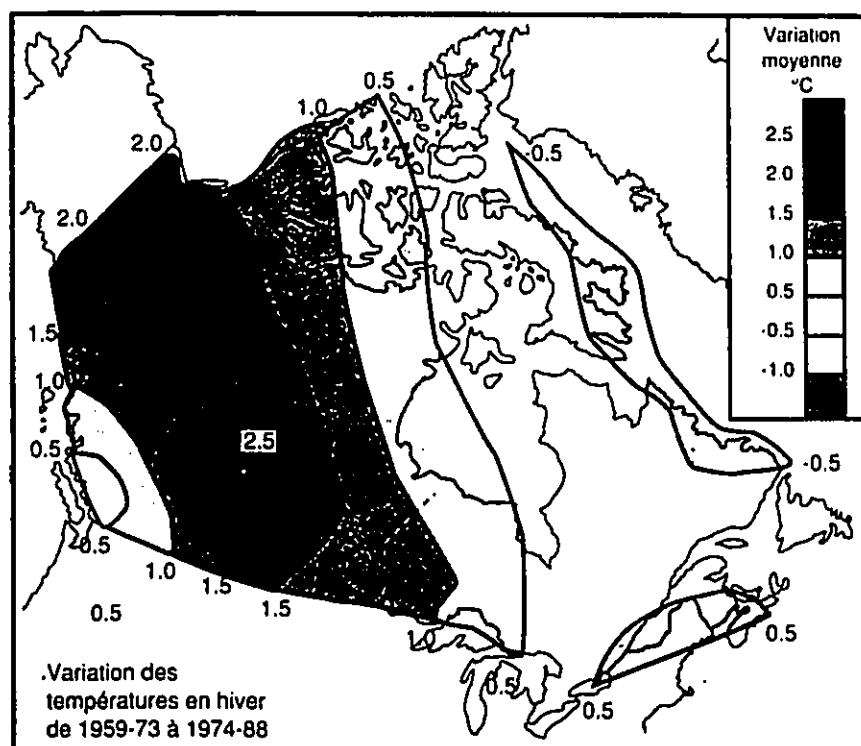


Figure 6 Écarts des températures moyennes en hiver des périodes de 1959-73 à 1974-88. Une valeur positive correspond à un réchauffement de 1959-73 à 1974-88. Source: Hengeveld, 1991.

Gullett et Skinner (1992) ont utilisé une méthode un peu semblable à celle mentionnée ci-dessus, en créant des cartes démontrant les variations inter-décennales de la température pour l'ensemble du pays. Ces cartes montrent, à l'aide de zones colorées, la différence de températures entre chacune des neuf décennies écoulées depuis 1900, et la moyenne des températures pour la période de 1951-80. En ce qui concerne les Prairies, les deux premières décennies du siècle ont été plus froides que la normale (entre -0,25 et 0°C). Pour la décennie de 1920, on remarque des températures supérieures à la normale (entre 0,25 et 0,5°C) dans une région bien définie centrée sur le centre-sud des Prairies. Durant les années 1930, les températures ont été nettement supérieures à la moyenne (entre 0,5 et 0,75°C) dans presque toutes les Prairies. Pendant la décennie de 1940, la majorité de cette région était plus chaude que la moyenne (entre 0,25 et 0,5°C), sauf pour sa partie nord-est où c'était encore plus chaud (entre 0,5 et 0,75°C). Pour les années 1950, les températures des Prairies étaient généralement inférieures à la moyenne (entre -0,5 et 0°C), et dans la moyenne pendant la décennie de 1960. Pour la décennie 1970, les températures des Prairies ont été inférieures à la moyenne (entre -0,25 et 0°C). Au cours des années 1980 il y a eu des températures de loin supérieures à la moyenne, avec une large bande allant du Yukon jusqu'au Manitoba qui dépassait la normale de plus de 0,8°C.

2.3 Modèles de circulation générale (MCG) et systèmes d'information géographique (SIG)

Certains modèles de circulation générale (MCG) ont été construits afin de prédire les changements climatiques à venir pour le Canada, y compris les Prairies. Les MCG sont conçus pour simuler les multiples processus qui affectent le climat, en appliquant les lois de physique de conservation de la quantité de mouvement, de la masse, de l'humidité et de l'énergie; ce qui donne dans le cas des MCG les plus complexes et évolués, une représentation tridimensionnelle très détaillée des océans et de l'atmosphère (Henderson-Sellers et Robinson, 1989). Des modèles de simulation de doublement de CO₂ ont été

développés par plusieurs groupes aux États-Unis tels que: le Goddard Institute for Space Studies (GISS); le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL); le Oregon State University (OSU); et le National Center for Atmospheric Research (NCAR). Les résultats de ces modèles ont été comparés à ceux qui ressortaient du même type de simulations provenant du MCG du Centre climatologique canadien (Centre climatologique canadien, 1991). Tous ces MCG indiquent qu'un changement climatique considérable résulterait du doublement de CO₂. En ce qui concerne l'Amérique du Nord, ces modèles prévoient les mêmes changements à grande échelle (Centre climatologique canadien, 1991):

- aux hautes latitudes, accroissement du réchauffement en hiver et augmentation des précipitations en toute saison;
- dans le centre du continent, réchauffement supérieur à la moyenne mondiale et réduction générale de la teneur en eau des sols.

Hengeveld (1991) mentionne des projections de réchauffement global de 3,5°C, d'après les simulations de doublement de CO₂ produites à l'aide du MCG du Centre climatologique canadien. Cette estimation se situe au milieu de la gamme trouvée par les autres MCG. Le modèle canadien prédit une augmentation de 3,8% de la moyenne de l'évaporation et des précipitations à l'échelle de la planète, ce qui est nettement inférieur à celle des autres groupes (de 7,1 à 15,8%), mais qui indique toutefois la même tendance. Pour ce qui est du Canada, le MCG canadien montre un réchauffement de 4,8°C dans le sud, avec peu de variation d'une saison à l'autre. Dans le nord, le réchauffement atteindrait 8 à 12°C en hiver, mais resterait entre 0 et 6°C en été. L'évaporation augmentant plus que les précipitations, la disponibilité de l'humidité du sol diminuerait en toute saison dans la plus grande partie du pays, la baisse étant plus marquée (plus de 20%) dans la région du centre-sud (Hengeveld, 1991). Dans ce même rapport (Hengeveld, 1991), on indique plusieurs résultats communs aux simulations de doublement de CO₂ produites par divers MCG:

- un important réchauffement global des températures de surface (1,5 à 4,5°C) dû au doublement de CO₂;

- le réchauffement sera nettement plus marqué dans les régions polaires en hiver;
- une augmentation du taux moyen de précipitation et d'évaporation à l'échelle de la planète; il est très probable que la teneur en humidité des sols en été sera plus basse aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, et que les régions polaires connaîtront des hivers généralement plus humides.

Plusieurs chercheurs ont utilisé des systèmes d'information géographique (SIG) afin de visualiser de diverses façons, les résultats de simulations provenant de MCG. Les SIG sont des outils très utiles permettant l'interpolation et la représentation, sous forme graphique ou cartographique, de bases de données à référence spatiale. Ce n'est que depuis la fin des années 1980 que l'on a commencé à utiliser les SIG pour des études climatiques. D'ailleurs, la première conférence internationale sur l'intégration d'information géographique et la modélisation environnementale a eu lieu en 1991, à Boulder, Colorado, et la deuxième en 1993, à Breckenridge, Colorado. Dans ces deux conférences, plusieurs autres articles ont été présentés sur l'utilisation des SIG dans l'étude des variations et changements climatiques, notamment au niveau de la modélisation. Grâce aux SIG, on peut utiliser plusieurs facteurs climatiques pour assembler et visualiser des résultats d'effets de changements globaux. Certains chercheurs ont pu démontrer l'utilité des SIG pour l'étude des variations et changements climatiques.

Zoltai (1988) a réalisé une étude sur la prédiction des conditions climatiques au Canada en présence d'une teneur double en CO₂. Ces projections ont été calculées à l'aide du modèle de circulation général (MCG) du Goddard Institute for Space Sciences (GISS), à partir de moyennes des températures et précipitations mensuelles. Pour résumer les effets des éventuels changements du climat sur la distribution de la végétation, les données climatiques calculées, tant actuelles que projetées, ont été analysées à l'aide d'un SIG en fonction des provinces écoclimatiques du Canada (voir chapitre 3: Les Régions écoclimatiques du Canada). Les gammes des degrés-jours annuels de croissance et des précipitations annuelles, établies pour chaque province écoclimatique à partir des cartes climatologiques, ont servi à

déterminer les limites des provinces écoclimatiques selon un scénario de double teneur en CO₂, sans tenir compte des effets des extrêmes climatiques. D'après les résultats estimés dans cette étude (Figure 7), les changements suivants ont été remarqués pour la province écoclimatique des prairies:

- dans la portion de transition de cette province écoclimatique, les températures plus chaudes, accompagnées de précipitations très légèrement supérieures, créent des conditions favorables à une végétation de prairies et de forêts-parcs à trembles qui s'étendrait vers le nord et l'est;
- les limites de cette portion de la province devraient se déplacer de quelques 300 km vers le nord et l'est;
- dans la portion "aride" de la province, les conditions favorables à l'établissement des prairies domineront, le climat étant plus aride au sud. Cette province écoclimatique s'étendra de quelques 100-150 km au nord et à l'est, occupant les anciennes régions de forêts-parcs à trembles.

Rizzo et Wiken (1989) ont aussi effectué, à l'aide d'un SIG, une analyse des changements climatiques estimés d'après un scénario avec doublement de CO₂ (ces mêmes auteurs ont ensuite publié cette étude en 1992, dans *Climatic Change*). Des résultats, provenant du MCG du Goddard Institute for Space Studies (GISS) ont servi pour calculer ce scénario à partir de variables climatiques qui caractérisent des provinces écoclimatiques du Canada, d'après la classification produite par le Comité canadien de la classification écologique du Territoire (voir chapitre 3: Les Régions écoclimatiques du Canada). Le but de cette étude était de déterminer de quelle façon les changements climatiques estimés pourraient influencer la distribution des écosystèmes canadiens. Les résultats ont démontré des changements majeurs au niveau des écosystèmes canadiens (Figure 8). En général les provinces écoclimatiques relativement plus chaudes se sont déplacées vers le nord, démontrant les signes d'un réchauffement du climat et ses effets sur l'écosystème. Par exemple, la province écoclimatique des Prairies ("Grasslands") s'est étendue vers le nord et

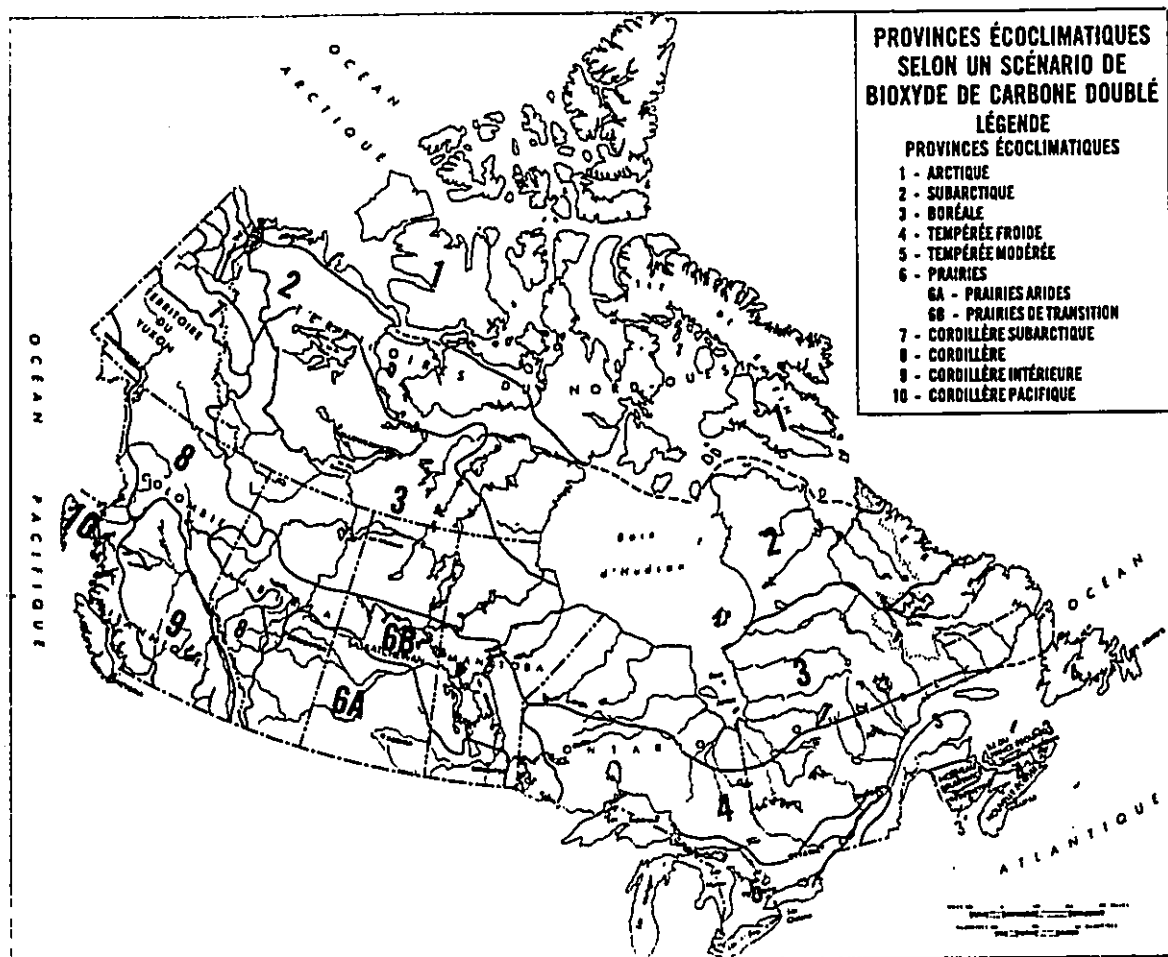


Figure 7 Limites des provinces écoclimatiques du Canada selon un scénario de CO₂ doublé. Source: Zoltai, 1988.

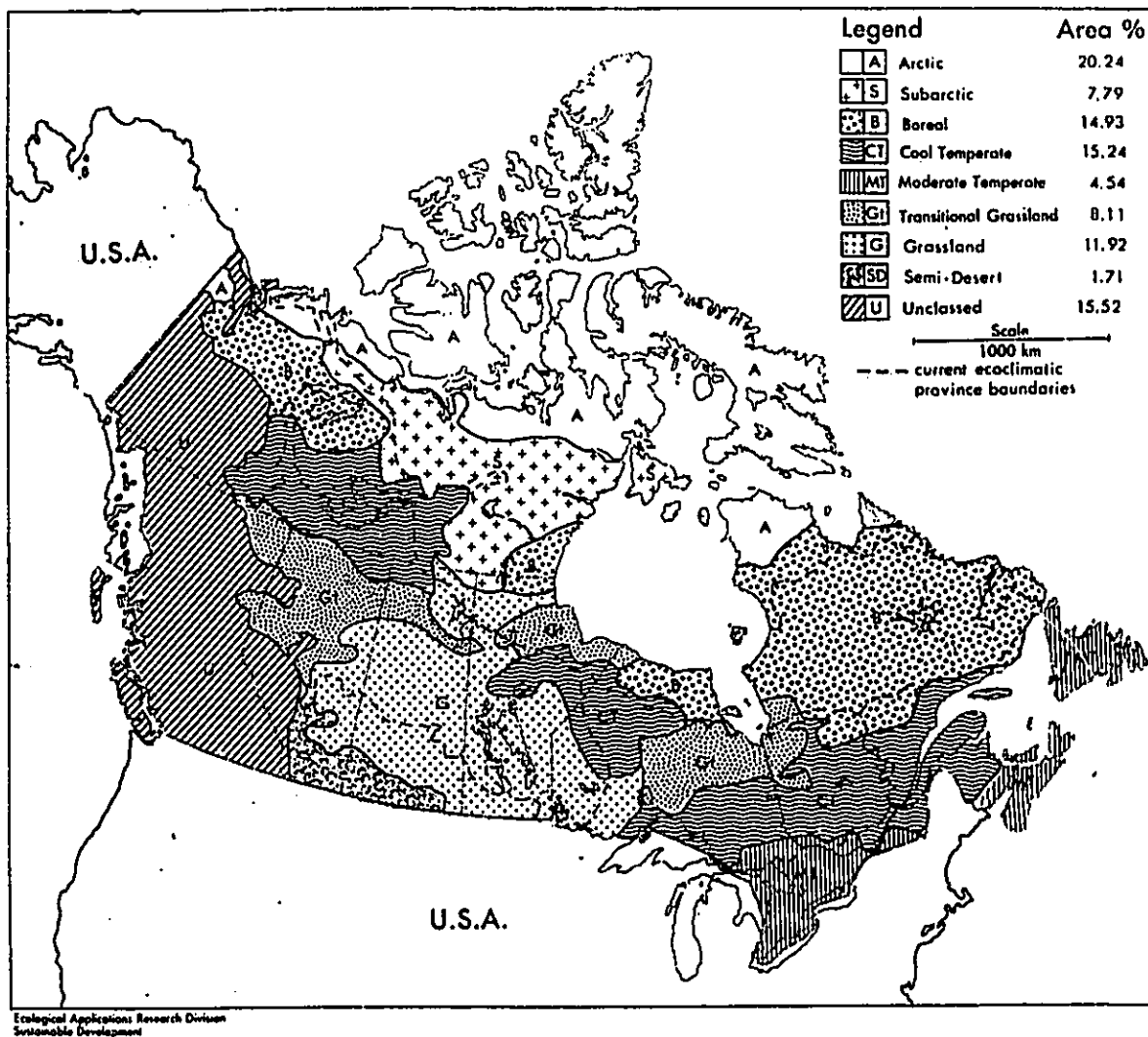


Figure 8 Limites estimées des provinces éoclimatiques du Canada selon un scénario de CO₂ doublé dans l'atmosphère. Source: Rizzo et Wiken, 1989.

vers l'est, surtout aux dépens de la province dite Boréal continental sec ("Dry Cont. Boreal"). On note aussi l'apparition de nouvelles Provinces écoclimatiques, telles que celles des Prairies de transition ("Transitional grasslands"), une d'elles étant située dans la partie nord de l'Alberta et nord-ouest de la Saskatchewan, et l'autre au nord-est du Manitoba. Un autre fait marquant est l'apparition d'une autre nouvelle Province, classée Semi-désertique ("Semi-Desert") dans la partie sud-ouest des Prairies.

D'autres classifications climatiques ont aussi été utilisées pour interpréter les résultats ressortant de plusieurs MCG, surtout sur une échelle globale. Claussen et Esch (1994) ont intégré des données de simulation climatique, provenant d'un MCG (ECHAM), à l'intérieur d'un modèle basé sur divers types de biomes, tels que définis par Prentice et al. (1992). Ceci leur a permis de vérifier les effets des changements climatiques du passé et du futur, d'après les prédictions ressortant de ce MCG. Ce modèle des biomes tient compte de plusieurs types de végétation, qui diffèrent en fonction de certains paramètres climatiques, tels que des seuils critiques de températures et de niveaux d'humidité. La performance de ce système était testée en comparant des biomes, simulés pour la période de 1979-1988, avec d'autres élaborés à partir de données observées pendant cette même époque. On a aussi utilisé ce modèle, afin de recréer les biomes pouvant exister il y a 18 000 ans, ainsi que pour en faire des prédictions dans le futur, d'après une estimation moyenne de 1145 ppm pour le CO₂, et une moyenne globale des températures de surface à 2,4°C de plus qu'aujourd'hui. En général, ce modèle permettait de recréer, pour ces diverses périodes, des biomes qui ressemblaient assez bien, soit aux biomes réels ou à d'autres, estimés suite à certaines recherches antérieures, selon le cas.

Guetter et Kutzbach (1990) ont appliqué une version modifiée de la classification de Köppen, à partir de résultats provenant de simulations des changements climatiques, effectuées à l'aide d'un MCG (COHMAP, 1988). Ceci leur permettait ainsi de plus facilement interpréter les résultats estimés pour la période 18 000 ans B.P. à aujourd'hui, à une intervalle de 3 000 ans, ainsi que pour celle de 126 000 ans B.P. Pour le climat moderne,

les résultats de cette classification se comparaient assez bien à une autre ("Climate-vegetation maps" de Walter, 1984), démontrant des zones de végétation naturelle. L'utilisation de cette méthode de classification permettait aussi de recréer une représentation facile à assimiler, au niveau des variations climatiques du passé, de par les changements spatio-temporels des limites des diverses régions climatiques. Les résultats démontraient qu'à 18 000 B.P., 45% de la surface terrestre était classée différemment d'aujourd'hui, et pour 126 000 B.P., cette différence n'était qu'à 32 %. Pour l'ensemble de ces simulations, seulement 30 % de la surface terrestre ne démontrait aucun changement de classification climatique, ce qui se voyait surtout dans le Bassin de l'Amazonie, au nord du Sahara et en Australie.

Lohmann *et al.* (1993) ont vérifié les changements de zones climatiques de Köppen, telles que définies à partir des résultats ressortant des versions T21 et T42 du "Hamburg atmosphere general circulation model" (ECHAM3) (décrits dans Roeckner *et al.*, 1992) et d'un autre MCG (ECHAM1/LSG) développé par Cubasch *et al.* (1992). La classification de Köppen était donc appliquée sur des moyennes décennales, calculées à partir de cent années/modèle de simulation pour divers scénarios (un scénario prévoyait le doublement du niveau de CO₂ en cent ans). Les régions climatiques, établies pour ces périodes simulées, étaient comparées à celles qu'on avait créées à partir de la moyenne décennale de 1979-88, d'après des observations publiées par Jones *et al.* (1991) et Legates et Wilmott (1990). Plusieurs changements ont ainsi été observés, tel qu'un accroissement de la zone Cf (continental humide à été chaud) aux dépens de la région Df (continental humide à été frais) située dans la partie centrale de l'Amérique du nord, d'après le doublement du niveau de CO₂ en cent ans .

2.4 Sommaire

Les travaux présentés dans ce chapitre démontrent un vaste éventail d'études climatiques, chacune d'elles ayant ses particularités. La méthode utilisée pour traiter et visualiser les données peut varier énormément d'une recherche à l'autre. Des différences

marquées sont observées, entre autres, au niveau du nombre de stations choisies, la façon dont ces dernières sont regroupées et le mode de calcul utilisé, ce qui rend parfois difficile toute comparaison entre certaines de ces études. Malgré ces différences, il est possible d'en ressortir certaines tendances climatiques pouvant s'appliquer surtout pour les Prairies canadiennes.

En ce qui concerne les températures, nous pouvons constater un réchauffement graduel des années 1890 aux années 1940, suivi d'un refroidissement jusqu'aux années 1970 et d'un second réchauffement depuis cette décennie jusqu'à 1991. Ces tendances sont celles mentionnées par Gullett et Skinner (1992), qui elles, correspondent généralement assez bien à ce qui ressort des autres études similaires, du moins pour ce qui est possible de comparer. D'ailleurs, parmi les graphiques de ce genre qui ont été présentés dans le présent chapitre, la figure 5 peut être considérée comme étant la plus intéressante, surtout parce qu'elle représente la plus longue série de données enregistrées (1895-1991), tout en s'appliquant uniquement aux Prairies canadiennes. Malgré les importantes variations des températures observées sur la figure 5, il en ressort pour le dernier siècle une tendance générale vers un réchauffement de 0.9°C , d'après la droite de régression. La représentation cartographique des températures permet d'ajouter beaucoup d'information au niveau de la répartition spatiale de ces données. Hengeveld (1991), ainsi que Gullett et Skinner (1992) démontrent de bons exemples de ce qui peut ressortir de ce mode de représentation des données (voir Représentation cartographique des données, section 2.2). Parmi les cartes illustrées par Gullett et Skinner (1992), celle de 1980-89 démontre le plus important réchauffement, particulièrement sur les Prairies.

Pour ce qui est des précipitations, il est possible de combiner les résultats de Thomas (1970), Longley (1972) et Olukayode Olapido (1987) pour en ressortir certaines tendances pour l'ensemble des Prairies. Les précipitations auraient été relativement moins abondantes durant les périodes de 1885-1895, 1910-1919, 1928-1937 et 1957-1966, et relativement plus importantes de 1895 à 1910 et durant les années 1940. En combinant les informations

fournies par Phillips (1990) et Jones (1991), nous pouvons faire ressortir un assez grand nombre d'années de sécheresse importante pour les Prairies: 1816-19, 1868, 1890, 1933, 1936-38, 1961, 1966-67, 1977-81, 84, 85 et 88. D'après Phillips (1990), ces derniers événements ont eu des conséquences désastreuses pour l'agriculture des Prairies canadiennes, ce qui démontre la fragilité de cette région du pays. Toutes ces formes d'études climatiques nous permettent d'en savoir davantage sur les variations climatiques des Prairies. Par contre, il faut généralement combiner plusieurs de ces travaux, afin d'avoir un portrait plus complet du climat des Prairies, dans toute sa complexité. Afin d'en arriver à des études climatiques plus complètes, il faut développer des techniques permettant d'analyser plusieurs variables à la fois.

Afin de prédire les tendances futures du climat, certains chercheurs ont utilisé des modèles de circulation générale (MCG) pour créer des simulations de changements climatiques, d'après différents niveaux de CO₂ dans l'air. Tous les MCG arrivent à des résultats assez semblables, tel qu'une augmentation des températures de 4,8°C dans le sud du Canada et une baisse marquée d'humidité dans le sol (plus de 20%) dans la région centre-sud (Hengeveld, 1991). L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) a permis de traiter et visualiser les résultats de simulations ressortant de quelques MCG, de sorte à pouvoir interpréter ces résultats en fonction de certaines classifications reliées au climat. On a ainsi fait ressortir l'impact des changements climatiques prévus sur les écosystèmes du pays. Par exemple, d'après une simulation de CO₂ doublé, Zoltai (1988) démontre l'extension, d'environ 300 km vers le nord et l'est, de la Province éoclimatique des prairies de transition, de même que le déplacement de la portion aride de cette même Province de quelque 100-150 km vers le nord et l'est. Rizzo et Wiken (1992) apportent des résultats allant généralement dans le même sens, tout en ajoutant l'apparition de nouvelles Provinces éoclimatiques: Prairies de transition dans la partie nord de l'Alberta et nord-ouest de la Saskatchewan, et au nord-est du Manitoba; Semi-désertique dans la partie sud-ouest des Prairies.

D'autres chercheurs ont aussi appliqué des méthodes de classifications différentes (Köppen et types biomes d'après Prentice *et al.*, 1992) aux résultats ressortant de divers MCG, afin d'évaluer l'impact des changements climatiques estimés pour le passé ou pour le futur, sur la répartition de la végétation du globe. Toutes les études, ayant recours à ces divers types de classification, démontrent l'utilité de telles méthodes en tant qu'outils permettant de mieux interpréter l'influence de tout changement climatique sur les écosystèmes. La plupart de ces classifications permettent de bien reproduire les écosystèmes du globe, ou du Canada selon le cas, grâce au traitement de plusieurs variables climatiques, en fonction de seuils critiques à l'existence de ces écosystèmes. Les tâches nécessaires à cette fin peuvent souvent devenir très complexes, mais l'utilisation des SIG facilite grandement le travail, en permettant de traiter et visualiser d'importantes quantités d'information de façon rapide et efficace.

Les résultats ressortant des MCG peuvent donner une bonne idée des changements climatiques à venir, mais toujours de façon plus ou moins précise, du fait que ce sont des estimations basées sur ce que nous connaissons des processus impliqués dans les changements climatiques. La validité de ces modèles doit être vérifiée, en comparant les résultats de simulations effectuées pour des périodes passées, avec les variations et changements climatiques observés, pour ces mêmes intervalles de temps, à partir de données provenant de stations météorologiques. Ces comparaisons se font plus facilement en utilisant une classification qui permet de combiner de multiples variables climatiques, de sorte à interpréter ces dernières en fonction de leur influence sur des écosystèmes en particulier. Plusieurs chercheurs (Guetter et Kutzbach, 1990; Lohmann *et al.* 1993) ont su démontrer l'utilité de la classification de Köppen dans l'interprétation des changements climatiques globaux, simulés par des MCG autant pour le passé que pour l'avenir. Il est donc intéressant de voir comment cette méthode de classification peut servir dans le cadre d'une étude climatique régionale.

Dans le cadre de la présente thèse, le climat passé (de 1921 à 1990) des Prairies canadiennes sera étudié, en appliquant la méthode de Köppen aux données (températures et précipitations) provenant de stations météorologiques de cette région. Cette tâche sera accomplie à l'aide d'un SIG, ce qui permettra de développer des méthodes plus efficaces de traitement et de visualisation de données climatiques, basées sur cette classification. Les résultats de cette recherche seront ainsi présentés sous forme de tableaux, de graphiques et de cartes climatiques, de sorte à pouvoir analyser le climat passé des Prairies, en fonction de l'impact qu'ont pu avoir certaines variations climatiques sur la végétation. Ces informations s'ajouteront à ce qu'on a ressorti dans les études antérieures, ce qui donnera un portrait plus complet du climat passé de cette région. Encore plus, cette méthode de traitement des données, basée sur la classification de Köppen, pourrait éventuellement servir à évaluer les simulations climatiques provenant de divers MCG, et surtout de mieux comprendre les impacts environnementaux impliqués dans toute prédiction à venir. Avant d'aborder la méthodologie impliquée dans la présente étude, il est essentiel de bien expliquer en quoi consiste certaines classifications climatiques, en particulier celle de Köppen, afin de mieux démontrer l'utilité de cette méthode de classification pour une étude climatique.

CHAPITRE 3

LES CLASSIFICATIONS CLIMATIQUES: COMPARAISONS ET CHOIX DE LA MÉTHODE

Le climat varie énormément d'un endroit à l'autre du globe, au point où il existe une combinaison infiniment grande de facteurs pouvant affecter chaque région. Afin de permettre une meilleure compréhension des diverses conditions existant sur la Terre, plusieurs classifications climatiques ont été proposées. Ces classifications permettent en sorte de simplifier la représentation de régions géographiques, d'après certaines caractéristiques climatiques qui leur sont propres. Wladimir Köppen développa le système qui est probablement le plus utilisé de tous (Hidore et Oliver, 1992). Avant de présenter ce système, certaines autres classifications seront abordées, en commençant par une des plus populaires d'entre elles; celle de C.W. Thornthwaite.

Les classifications de Thornthwaite

Thornthwaite créa une première méthode de classification basée sur une formule permettant le calcul, pour chaque mois, de ce qu'on appelle précipitations efficaces (*precipitation efficiency* = P-E):

$$P-E = 11 \cdot 5(r/t - 10)^{10/9}$$

où: r = la moyenne des précipitations mensuelles (en pouces)

t = la température moyenne mensuelle (°F)

Le total de ce rapport pour les douze mois de l'année donne l'indice P-E (Barry et Chorley, 1982). Des seuils ont été déterminés pour ces valeurs, afin de délimiter les frontières de certaines régions végétales:

	Index P-E
A Forêt pluviale (<i>Rain forest</i>)	>127
B Forêt (<i>forest</i>)	64-127
C Prairies (<i>Grasslands</i>)	32-63
D Steppe	16-31
E Désert (<i>Desert</i>)	<16

Le deuxième élément de cette classification est l'indice d'efficacité thermique (*thermal efficiency* = $T-E$), exprimé par une valeur de départ pour les moyennes mensuelles des températures, qui est positive à partir du point de congélation (Barry et Chorley, 1982). L'indice est en fait la somme annuelle de $(t - 32)/4$ pour chaque mois. À cette échelle, le zéro représente le climat de congélation (*frost climat*), et plus de 127 est considéré comme étant tropical. Thornthwaite fait de l'humidité le facteur primaire de sa classification, avec l'indice $T-E$ supérieur à 31 représentant la frontière séparant les classes taïga et tempéré frais (*cool temperate*). Plusieurs cartes publiées dans le passé étaient basées sur cette méthode de classification, mais elles sont maintenant surtout d'intérêt historique (Barry et Chorley, 1982).

La contribution la plus importante de Thornthwaite était son deuxième type de classification, basée sur le concept d'évapotranspiration potentielle (PE) et du régime d'humidité (*moisture budget*) (Barry et Chorley, 1982). Le PE est calculé à partir de la moyenne mensuelle des températures (en °C), avec des corrections pour la longueur de jours. Pour un mois de 30 jours (journées de 12 heures):

$$PE \text{ (en cm)} = 1 \cdot 6(10t/I)^a$$

où: I = la somme des 12 mois de $(t/5)^{1.514}$

a = une fonction complexe pour I

Des tableaux peuvent être consultés afin de faciliter le calcul de ces fonctions (Thornthwaite, 1948). Le surplus mensuel en eau (S) ou le déficit (D) est déterminé selon l'évaluation du

régime d'humidité, en considérant l'humidité emmagasinée dans le sol. Un indice d'humidité (Im) est calculé par:

$$Im = (100S - 60D)/PE$$

Les classes climatiques sont donc déterminées selon les critères suivants (Barry et Chorley, 1982):

Im^*		$PE (cm)$	
> 100	Perhumide (A)	>114	Mégathermal (A')
20 à 100	Humide (B_1 à B_4)	57 à 114	Mésothermal (B'_1 à B'_4)
0 à 20	Subhumide humide (C_2)	28,5 à 57	Microthermal (C'_1 à C'_2)
-33 à 0	Subhumide sec (C_1)	14,2 à 28,5	Toundra (D')
-67 à -33	Semi-aride (D)	< 14,2	Gel (E')
-100 à -67	Aride (E)		

* $Im = 100(S - D)/PE$ est équivalent à $100(r/PE - 1)$, où r = précipitations annuelles

Les deux éléments sont subdivisés selon la saison du déficit ou surplus d'humidité, et la concentration saisonnière de l'efficience thermique.

La classification de Budyko

M. I. Budyko a développé une approche similaire mais plus fondamentale, en utilisant le rayonnement net au lieu de la température (Barry et Chorley, 1982). Budyko relia le rayonnement net, disponible à l'évaporation des surfaces humides (R_o), avec la chaleur requise pour évaporer la moyenne annuelle des précipitations (Lr). Ce rapport R_o/Lr (où L = la chaleur latente d'évaporation) est appelé indice radiatif de sécheresse (*radiational index of dryness*). Cette valeur est inférieure à 1 dans les régions humides et supérieure à 1 aux endroits secs. Les critères sont:

R_o/Lr	
> 3.0	Désert
2.0-3.0	Semi-désert
1.0-2.0	Steppe
0.33-1.0	Forêt
< 0.33	Toundra

Pour comparer cet indice avec celui de Thornthwaite (révisé) ($Im = 100(r/PE - 1)$), on peut noter que $Im = 100(Lr/R_o - 1)$ si le rayonnement net est utilisé pour l'évaporation d'une

surface humide (c'est-à-dire si aucun n'est transmis au sol par conduction ou dans l'air par convection) (Barry et Chorley, 1982).

Bien d'autres classifications climatiques ont été proposées et plusieurs d'entre elles ont été modifiées à quelques reprises (Tableau 1). Un autre système intéressant à mentionner est celui des régions éoclimatique du Canada, établi par le Comité canadien de classification écologique du territoire (CCCET).

Les Régions éoclimatiques du Canada

Le Comité canadien de classification écologique du territoire (CCCET) a établi un mode de classification permettant d'identifier des régions éoclimatiques pour tout le Canada (Rizzo, 1988). Ils en ont dressé une carte nationale décrivant les grandes régions éoclimatiques du Canada, recensant 72 régions éoclimatiques distinctes, qui représentent 10 provinces éoclimatiques (Figure 2). Contrairement au modèle de classification qui, au départ intègre des expressions numériques du climat afin de faciliter le processus de classification, la carte des régions éoclimatiques a été dressée à partir de l'interprétation, par les chercheurs, de l'évolution de la végétation et des sols dans les emplacements normaux ou mésoïques. On a donc identifié des régions géographiques similaires à partir de ces derniers principes, pour ensuite les regrouper par régionalisation. Une description plus détaillée des Régions éoclimatiques du Canada est fournie dans un ouvrage du même nom, écrit par le Groupe de travail sur les changements climatiques (1989). Parmi tous les systèmes mentionnés dans ce chapitre, c'est celle de Köppen qui a été choisie pour la réalisation de la présente étude.

La classification de Köppen

Wladimir Köppen a apporté une des plus importantes contributions au domaine des classifications climatiques. Botaniste de formation, cet homme s'est surtout intéressé aux indices climatiques pouvant expliquer les couverts végétaux et les pratiques agricoles. C'est

Tableau 1 Développement chronologique de quelques classifications climatiques du globe.
Source: Hidore et Oliver, 1992.

Auteurs	Année	Base du système
de Martonne	1909	Divisions de premier ordre basées sur des critères de températures et précipitations; de nombreuses subdivisions nommées d'après certaines régions d'Europe; une attention particulière donnée aux limites des déserts, mais la plupart des limites sont tirées de façon non quantitative.
Penck	1910	Physiographie et climat du globe; 3 principaux types de climat déterminant l'altération et l'érosion: humide, aride et nival; chaque type est subdivisé en deux parties.
Köppen	1918	Basée sur des régions végétatives, avec des limites définies entre ces régions à l'aide de valeurs climatiques bien spécifiques.
Vahl	1919	5 zones définies à l'aide de limites de températures, d'après des données pour les mois les plus chauds et plus froids; subdivisions d'après les précipitations exprimées en % de jours humides pour un mois humide en particulier.
Passarge	1924	Reconnaissance de 5 zones climatiques, subdivisées en 10 régions, mettant l'emphase sur la distribution de la végétation.
Miller	1931	5 zones de températures, chacune d'elles étant divisée en 3 zones de niveau d'humidité: régions avec précipitations en toute saison, sécheresses saisonnières marquées, ou sécheresses à l'année.
Thornthwaite	1931	Utilisation d'efficience des précipitations et températures, pour la création de 5 provinces à divers niveaux de précipitation et de 6 autres basées sur les températures; 30 grands types de climats.
Phillipson	1933	Basée sur les températures du mois le plus chaud et le plus froid, et sur des caractéristiques reliées aux précipitations; 5 zones climatiques avec 21 types de climats et 63 provinces climatiques.
Blair	1942	5 grandes zones climatiques: tropical (T), subtropical (ST), intermédiaire (I), subpolaire (SP) et polaire (P); 14 types et 6 sous-types identifiés à l'aide de lettres; basés sur des données de précipitations et températures reliées à des types de végétation.
Gorczynski	1945	10 types "décimaux" associés à 5 grandes zones climatiques; avec emphase sur les climats continentaux versus maritimes, et sur la définition de l'aridité.
Von Wissman	1948	Reliée à l'approche de Köppen; 5 zones de températures, subdivisées en fonction des régimes de températures et de précipitations.
Thornthwaite	1948	9 climats principaux basés sur l'indice d'humidité, 9 divisions basées sur l'indice des températures; l'évapotranspiration est introduite comme indice.
Creutzberg	1950	Rythmes annuels du climat basés sur l'identification d'isolignes reliées à la durée des mois humides (Isohygromen) et d'isolignes égales à la durée journalière de couverture nivale (Tag-Isochione); 4 grandes zones subdivisées en fonction de valeurs mensuelles d'humidité.

Tableau 1 Développement chronologique de quelques classifications climatiques du globe (suite).

Auteurs	Année	Base du système
Geiger-Pohl	1953	Modification du système de Köppen.
Brazol	1954	Zones de confort humain; utilisation de températures à bulbe humide et sèche afin d'établir des mois de confort; 12 classes graduées de 12 (chaleur mortelle) à 1 (froid glacial).
Trewartha	1954	Modifications majeures du système de Köppen.
Budyko	1958	Distribution de l'énergie en fonction du budget hydrique.
Peguy	1961	Modification du système de de Martonne.
Troll	1963	Climats différenciés selon des saisons thermales et hydriques.
Carter et Mather	1966	Modification du système de Thornthwaite (1948).
Papadakis	1966	Potentiel agricole des régions climatiques; caractéristiques climatiques, axées sur l'écologie et les récoltes, et basées sur des valeurs critiques déterminées de façon empirique; 10 grands groupes climatiques, chacun étant divisé en sous-groupes, qui eux, sont subdivisés.
Hidore	1966	Basée sur la dominance des masses d'air; 10 principaux climats identifiés d'après la distribution annuelle des fréquences des masses d'air.
Terjung	1968	Classification thermique des climats de la Terre.
Oliver	1970	Classification génétique basée sur les fréquences des masses d'air.

dans cet ordre d'idée que Köppen a conçu un système de classification climatique, fondé sur une série de subdivisions du globe par l'application de critères successifs: bilan annuel de l'évaporation et des précipitations, existence d'une période froide significative, présence d'une saison sèche, caractères thermiques de la saison la plus chaude (Durand-Dastès, 1990). Depuis 1918, Köppen publia plusieurs versions de sa classification, la dernière étant présentée et analysée par lui-même en 1936 (Köppen, 1936). D'autres chercheurs (entre autres, Rudolph Geiger et Wolfgang Pohl, et Glenn T. Trewartha) ont modifié certains critères ou ajouté de nouveaux symboles, mais la base de ce système est demeuré le même (Trewartha, 1968). Pour la présente étude, la version utilisée est celle présentée par Henderson-Sellers (1986), à l'exception de quelques modifications mineures (de 0 à -3°C pour les catégories C et D, et de 40 à 30 mm pour la lettre s) effectuées d'après les critères publiés par Trewartha (1968) (pp. 393-399: "Köppen's Classification of Climates"; à ne pas confondre avec la version modifiée par Trewartha, qui elle, est aussi publiée dans ce même livre: pp. 247-251). La classification appliquée dans le cadre des travaux actuels, correspond aussi à celle publiée par Köppen (1936), à l'exception du critère pour la lettre "s" qui est à 40 mm (dans Köppen, 1936) au lieu de 30 mm (dans Trewartha, 1968).

Les variables utilisées pour cette méthode de classification sont les moyennes annuelles et mensuelles des températures, ainsi que les précipitations totales. Chaque catégorie est identifiée par deux ou trois lettres, en se basant sur des valeurs critiques se rapportant à la végétation (Tableau 2). Cinq grands groupes de climats sont premièrement identifiés par une lettre majuscule:

- A Climats tropicaux pluvieux
- B Climats secs
- C Climats humides mésothermiques
- D Climats humides microthermiques
- E Climats polaires

Tableau 2 Critères établis pour la classification de Köppen modifiée (basés sur les moyennes annuelles et mensuelles des précipitations (mm) et des températures (°C). Source: Henderson-Sellers, 1986, et Trewartha, 1968.

Symboles			Critères
1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	
A			Température moyenne du mois le plus froid $\Rightarrow 18^{\circ}\text{C}$
	f		Précipitations du mois le plus sec $\Rightarrow 60\text{ mm}$
	m		Précipitations du mois le plus sec $< 60\text{ mm}$ mais $\Rightarrow (100 - r)/25^a$
	w		Précipitations du mois le plus sec $< (100 - r)/25^a$
B			70% ou plus des précipitations tombent durant les 6 mois les plus chauds (avril à sept. pour l'hémisphère Nord) et $r/10 < 2t + 28^a$
			70% ou plus des précipitations tombent durant les 6 mois les plus froids (oct. à mars pour l'hémisphère Nord) et $r/10 < 2t$
			Aucune moitié de l'année avec 70% des précipitations et $2t + 14$
	W		$r < 1/2$ de la limite supérieure des critères applicables pour B
	S		$r < \text{la limite supérieure des critères de B mais } > 1/2 \text{ de ce montant}$
		h	$t > 18^{\circ}\text{C}$
		k	$t < 18^{\circ}\text{C}$
C			Température moyenne du mois le plus chaud $> 10^{\circ}\text{C}$ et mois le plus froid entre 18 et -3°C
	s		Précipitations du plus sec des 6 mois chauds $< 30\text{ mm}$, et moins que $1/3$ de ce montant pendant le plus humide des 6 mois froids
	w		Précipitations du plus sec des 6 mois froids $< 1/10$ du montant retrouvé dans le plus humide des 6 mois chauds
	f		Précipitations ne correspondant pas aux critères de s ou w
		a	Température moyenne du mois le plus chaud $\Rightarrow 22^{\circ}\text{C}$
		b	Température moyenne de chacun des 4 mois les plus chauds $\Rightarrow 10^{\circ}\text{C}$; température du mois le plus chaud $< 22^{\circ}\text{C}$
		c	Température moyenne de 1 à 3 mois $\Rightarrow 10^{\circ}\text{C}$; température du mois le plus chaud $< 22^{\circ}\text{C}$
D			Température moyenne du mois le plus chaud $> 10^{\circ}\text{C}$ et mois le plus froid $\Rightarrow < -3^{\circ}\text{C}$
	s		Mêmes critères que dans C
	w		Mêmes critères que dans C
	f		Mêmes critères que dans C
	a		Mêmes critères que dans C
	b		Mêmes critères que dans C
	c		Mêmes critères que dans C
		d	Température moyenne du mois le plus froid $< 38^{\circ}\text{C}$ (d est alors utilisé au lieu de a, b ou c)
E			Température moyenne du mois le plus chaud $< 10^{\circ}\text{C}$
	T		Température moyenne du mois le plus chaud entre 10 et 0°C
	F		Température moyenne du mois le plus chaud $\Rightarrow < 0^{\circ}\text{C}$

^a Dans la formule, t = moyenne annuelle des températures ($^{\circ}\text{C}$), r = moyenne annuelle des précipitations (mm)

Ces grands groupes sont tous identifiés à partir de critères de températures, sauf pour les climats secs (B), qui eux, sont déterminés à l'aide de formules qui utilisent les températures et les précipitations. Une seconde lettre définit ensuite le degré d'aridité pour les climats secs et la distribution temporelle des précipitations pour les autres groupes. Finalement, une dernière lettre est utilisée pour caractériser les variations saisonnières des climats de moyennes et hautes latitudes.

Les seuils établis pour différencier les divers types de climats, sont basés sur des observations climatiques en rapport avec la présence de certains types de végétation. Par exemple, la limite de 10°C (moyenne), pour le mois le plus chaud (limite entre D et E), coïncide avec la limite polaire des forêts localisées à l'intérieur des continents (Trewartha, 1968). Une période de quatre mois avec 0°C ou plus est utilisée pour distinguer l'été modéré (b) de l'été court (c). Les climats, avec moins de quatre mois de 10°C en moyenne, sont considérés comme ayant un potentiel agricole significativement limité (Trewartha, 1968). C'est ainsi que cette classification permet de donner une certaine signification aux données climatiques (températures et précipitations), en relation avec des grands types de végétation.

Plusieurs cartes mondiales ont été créées à partir de la classification de Köppen, la dernière de l'auteur même apparaissant dans son livre intitulé "Grundriss der Klimakunde" (Köppen, 1931). Connor (1936) a probablement été le premier à présenter une carte climatique du Canada, basée sur le système de Köppen (Figure 9). Les données utilisées couvraient des périodes variables selon les stations; par exemple, de 1875 à 1924 pour Sydney et de 1903 à 1935 pour Nelson. Plus tard une autre carte climatique du Canada fut présentée dans la troisième édition de l'Atlas du Canada (Canada, 1957), cette fois-ci en appliquant la classification de Köppen à partir de moyennes sur trente ans (1921-50) (Figure 10).

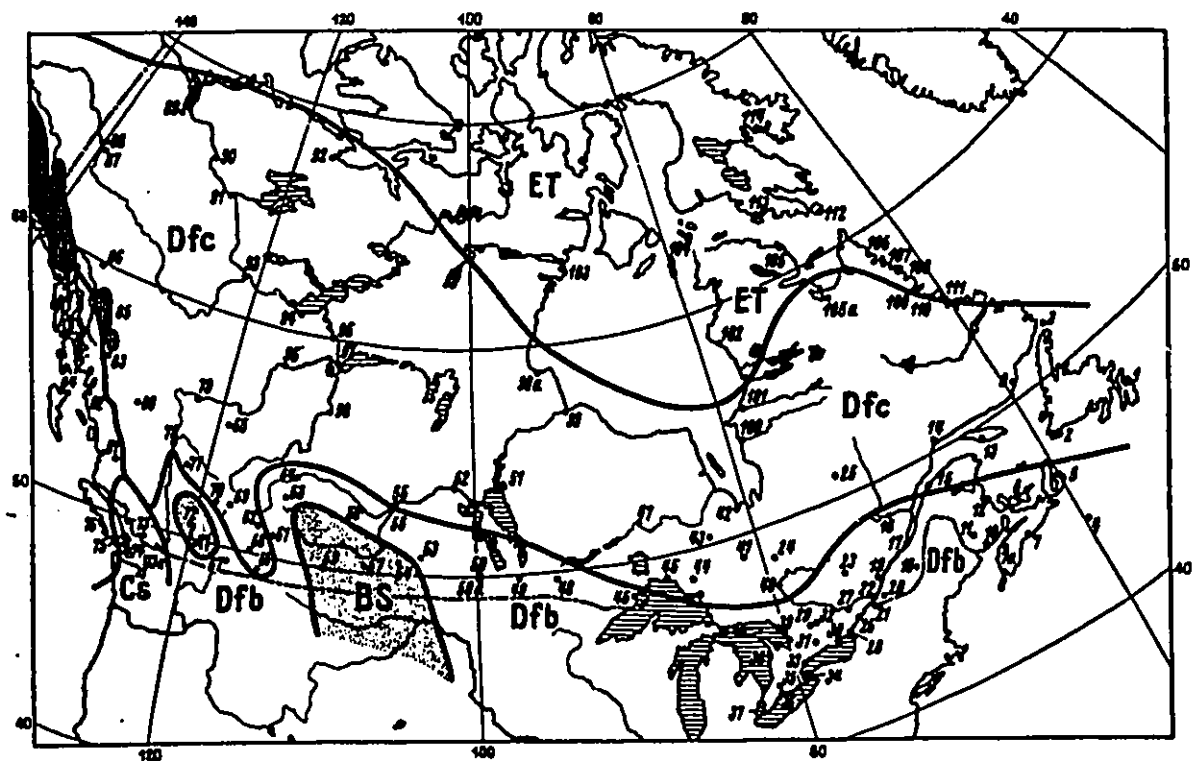


Figure 9 Carte climatique du Canada établie à partir de la méthode de classification de Köppen. Source: Connor, 1936.

Depuis peu de temps, plusieurs études climatiques ont été réalisées en appliquant le système de Köppen aux résultats de simulations des changements climatiques, ressortant de divers modèles de circulation générale (MCG). L'établissement des régions climatiques de Köppen, à partir des résultats des MCG, a permis à plusieurs chercheurs (Guetter et Kutzbach, 1990; Lohmann *et al.*, 1993) d'évaluer l'impact des changements climatiques estimés pour le passé ou le futur, sur la répartition de la végétation du globe. Plusieurs autres systèmes peuvent aussi offrir les mêmes avantages, comme celui des biomes utilisé par Claussen et Esch (1992), mais celui de Köppen est plus facile à appliquer (Lohmann *et al.*, 1993). Cette facilité d'application, combinée au fait que plusieurs chercheurs ont démontré son utilité dans ce domaine, nous a amené à choisir la méthode de Köppen comme outil servant à l'interprétation des changements climatiques des Prairies canadiennes (1921-90). Une autre raison très importante qui a justifié le choix de ce système, est la meilleure disponibilité des données (moyennes mensuelles des températures et précipitations totales) servant à l'application de cette classification, en particulier pour une aussi longue période de temps (1921-90). Ceci n'est pas toujours le cas pour d'autres classifications.

Les études des variations climatiques se sont souvent effectuées à partir d'une seule variable climatique à la fois; telle que les températures ou les précipitations. À l'aide de la classification de Köppen, il sera possible de combiner ces deux variables, afin de vérifier les variations climatiques des Prairies canadiennes (1921-90), en fonction de critères reliés à certains grands types de végétation. Ces critères qui différencient les divers types de climats, sont basés sur des années d'observations de certaines caractéristiques climatiques associées à plusieurs limites végétales. Le système de Köppen permet ainsi de donner une certaine signification aux données de températures et précipitations, au niveau de leur influence possible sur la végétation. Je dis bien "possible" car bien sûr il n'y a pas que ces variables qui ont un effet sur la végétation. Par exemple, le type de sol aura sûrement une influence sur l'existence ou non de certaines espèces végétales, peu importe le climat.

Comme pour bien d'autres classifications climatiques, les limites habituellement définies sur les cartes climatiques de Köppen peuvent donner une fausse impression d'exactitude (Trewartha, 1968). En réalité, ces limites représentent une zone de transition relativement large, où chaque limite annuelle peut se déplacer jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres par année (Figure 11). Il faut donc traiter ces limites comme étant des limites moyennes et non des limites qui se doivent d'être très précises. La classification de Köppen est habituellement appliquée à partir de moyennes calculées sur trente ans ou plus. Dans le cas de la présente étude, cette classification sera établie surtout sur une base annuelle et décennale, afin de voir de façon plus détaillée les variations climatiques sur les Prairies canadiennes. Bien sûr que l'interprétation des résultats devra tenir compte de l'influence réelle que peut avoir chaque variation climatique sur la végétation, tout dépendant de l'amplitude et surtout de la durée de ces variations. Par exemple, des conditions arides observées pour une année seulement, n'aura que des effets qu'à très court terme sur la végétation, mais l'apparition fréquente et à long terme de ces mêmes conditions pourrait modifier le type de végétation pour un endroit donné. Cette classification annuelle et décennale permettra de vérifier la stabilité régionale et temporelle du climat observé pour chaque station climatique choisie pour cette étude, ainsi que pour les limites climatiques établies à partir des données provenant de ces stations. Cette stabilité sera particulièrement observé autour de la limite séparant les régions classées B et D. La diminution ou l'agrandissement de la région BSk donne un indice important sur le niveau d'aridité pour les endroits concernés, et peut-être même leur niveau de vulnérabilité selon le cas.

Afin d'en arriver à l'application de cette méthode de classification, telle que proposée dans la présente étude, de nombreuses étapes devaient être franchies au niveau du prétraitement, du traitement et de la visualisation des données. Le prochain chapitre traitera donc de la méthodologie impliquée dans cette recherche.

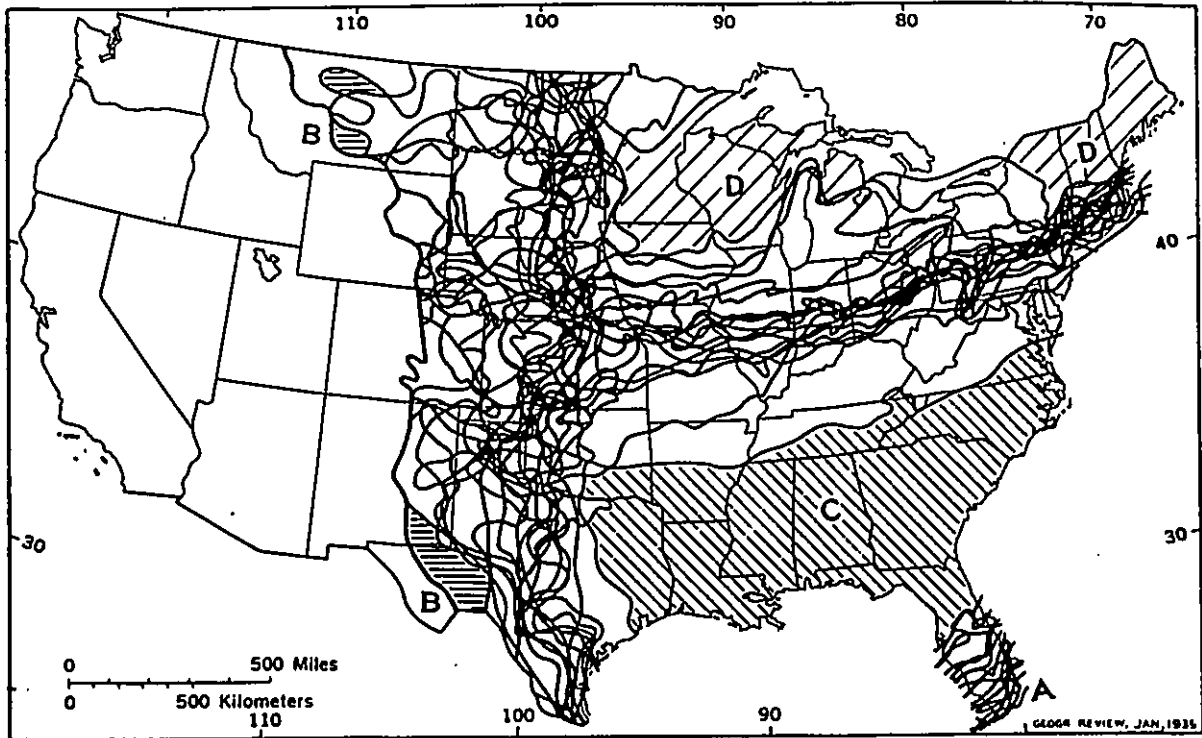


Figure 11 Limites annuelles de certaines régions climatiques, établies d'après la méthode de classification de Köppen, pour la partie centrale et orientale des États-Unis. Chaque ligne relativement épaisse représente la limite climatique, pour une seule année, entre le climat sec (B) et les climats humides (D ou C), ou entre les climats mésothermiques (C) et microthermiques (D). Ceci démontre clairement les changements de ces limites d'une année à l'autre. Les limites établies normalement sur les cartes climatiques représentent tout simplement les moyennes des positions de nombreuses limites climatiques annuelles. Source: Trewartha, 1968.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

4.1 Introduction

De nombreuses tâches ont été accomplies afin de poursuivre les objectifs énoncés pour cette thèse. Le schéma à la Figure 12 donne une vue d'ensemble des étapes principales de cette étude. Des données de températures et de précipitations, provenant d'Environnement Canada et d'Agriculture Canada, étaient premièrement importées dans le logiciel dBASE IV, afin de les restructurer et d'en extraire les données reliées aux stations choisies. Certaines données manquantes ont ensuite été remplacées par d'autres provenant de stations avoisinantes, ce qui a permis d'avoir des séries complètes de données pour toute la période d'étude (Expliqué dans 4.4.2: Remplacer les données manquantes). À ce stade, les étapes variaient selon les types d'analyses effectués. D'une part, ces séries de données complètes servaient au processus d'extraction des variables nécessaires à la classification de Köppen et à l'établissement de cette classification pour chaque station et pour chaque année. Les résultats étaient alors représentés sur des tableaux pour fin d'analyse.

D'autre part, les séries complètes de données ont servi aux calculs de moyennes mensuelles pour chaque période de 10 ans (1921-30 à 1981-90), d'où étaient extraites les variables nécessaires à la classification de Köppen. À ce stade, les traitements variaient selon les besoins. Premièrement, la classification de Köppen était appliquée à partir des ces dernières variables, pour ensuite représenter les résultats sur des tableaux, pour fin d'analyse. Deuxièmement, les mêmes variables étaient intégrées dans PC ARC/INFO, afin de créer (par interpolation) des grilles de points à distance égale, auxquels étaient rattachées des nouvelles variables interpolées. Ces dernières ont ensuite été transférées dans dBASE IV, de sorte à en établir la classification de Köppen. Les résultats de cette classification étaient après réintroduits dans PC ARC/INFO, afin de créer des polygones représentant les régions

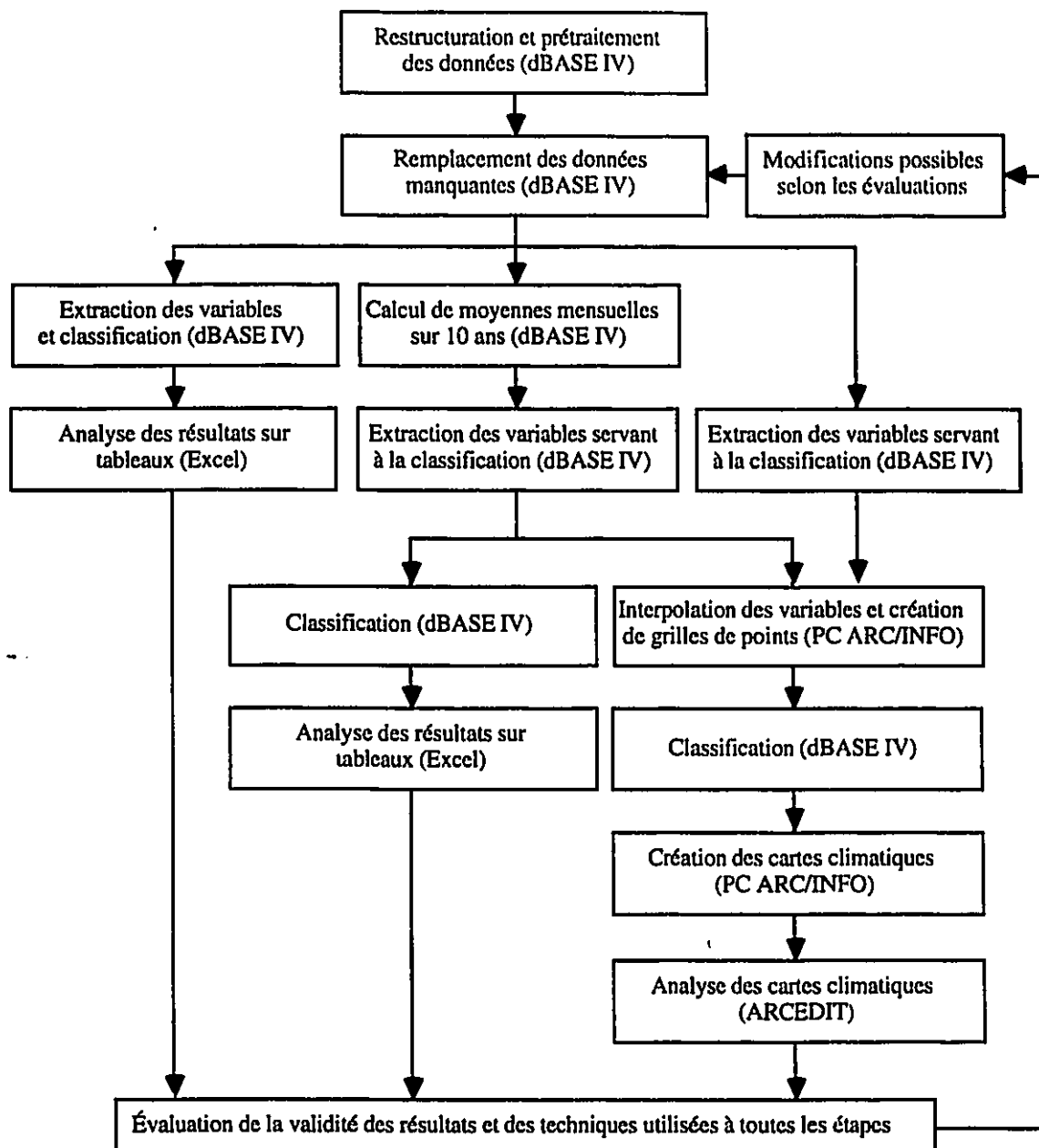


Figure 12 Schéma représentant les étapes principales de cette thèse.

climatiques pour chaque période donnée. D'autres cartes climatiques (annuelles de 1934 à 38 et pour la période de 1921-50) ont plus tard été construites, à l'aide des procédures mentionnées ci-dessus. ARCEDIT servait à la manipulation et à la visualisation de toutes ces cartes climatiques, permettant ainsi l'analyse des variations climatiques pour la région d'étude. La qualité et la validité des résultats étaient évaluées à la fin de chacune des étapes, ce qui permettait de retourner aux procédures antérieures pour faire les modifications nécessaires selon les besoins.

Ce chapitre est donc consacré à présenter en détail chacune de ces étapes, en commençant d'abord par quelques explications sur le choix des stations météorologiques qui ont fourni les données pour cette étude.

4.2 Le choix des stations

Le choix des stations météorologiques utiles à cette recherche, était un problème assez difficile à résoudre. L'enregistrement officiel de données météorologiques ne remonte pas aussi loin dans le temps pour le Canada que pour l'Europe. La plus longue série continue de données climatologiques provient de la ville de Toronto. La collecte des données y a commencé en 1840 à Fort York, et s'est poursuivie à quelques kilomètres du premier site jusqu'à aujourd'hui (Gullett et Skinner, 1992). La plupart des autres stations canadiennes sont apparues beaucoup plus tard, mais un certain nombre fournissent des données depuis la fin du XIX^e siècle. Certaines régions septentrionales n'ont été couvertes de façon continue qu'à partir du milieu des années 1940 (Gullett et Skinner, 1992).

La plus grande difficulté rencontrée dans cette étude était de trouver un nombre suffisant de stations ayant des données complètes pendant les derniers 70 ans, tout en assurant une couverture homogène de la région étudiée. Ceci était nécessaire, car l'intention de cette recherche était d'avoir un nombre fixe de stations pendant toute la période d'étude (1921-90), pour assurer une interpolation constante d'une carte climatique à l'autre. Un nombre de points qui varie d'une interpolation à l'autre provoque des changements dans les

résultats, au niveau de la position des limites calculées entre les stations. Ceci est à éviter si nous voulons analyser uniquement les changements dus aux variations des valeurs rattachées aux stations. Le Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada a sélectionné 131 stations à travers le Canada, pour en faire des séries de données complètes pouvant servir à l'analyse des températures actuelles et historiques, autant au niveau régional que national. Ces stations ont été choisies en fonction de critères bien précis (Canadian Climate Centre, 1992):

- a- ces stations ont des données avec peu d'hétérogénéité, ces dernières étant plus corrigibles lorsqu'elles ont lieu; ces stations ont de très bonnes chances d'exister encore longtemps;
- b- afin d'avoir des séries de données historiques remontant assez loin dans le temps, des données provenant parfois de plus d'une station sont jointes à une station principale située à proximité de ces dernières; par exemple, la série de données pour la station d'Estevan A., dont l'ouverture date de 1945, est prolongée en y ajoutant les données provenant des stations de Midale (1925) et d'Estevan (autre station ouverte en 1901);
- c- la distribution géographique des stations est relativement égale, ce qui est nécessaire à l'analyse spatiale et à une cartographie objective.

Sur les 131 stations en question, seulement 17 se retrouvent à l'intérieur et un peu autour de la province écoclimatique des Prairies, tout en ayant des données remontant aussi loin que 1921 (Figure 13). Ces 17 stations principales ont donc été choisies pour cette étude (Tableau 3), ainsi que plusieurs autres stations qui ont servi à compléter les données de ces dernières, lorsque nécessaire (voir section 4.4.2: Remplacer les données manquantes). Malgré les multiples contraintes rencontrées à cet égard, ce choix de stations devrait permettre une représentation aussi juste que possible (pour ce type d'analyse climatique) du climat des Prairies, entre 1921 et 1990.

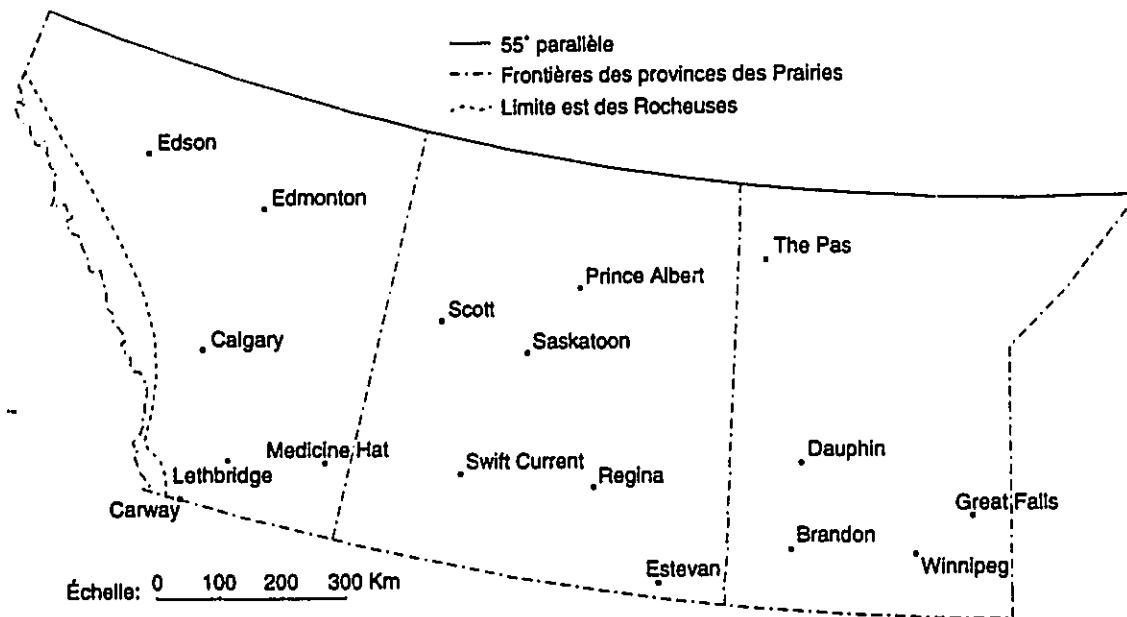


Figure 13 Localisation des stations principales choisies pour cette étude.

Tableau 3 Liste des stations principales choisies dans le cadre de cette thèse, ainsi que des stations complémentaires dont les données ont servi à compléter celles des stations principales. Les données proviennent d'Environnement Canada (E) ou d'Agriculture Canada (A). Des facteurs de correction ont servi dans certains cas (E*).

Stations principales (N° d'identification)	Stations complémentaires (N° d'identification)
Alberta:	
Calgary Int A (3031093) (E)	
Carway (3031400) (E)	Caldwell (3031000) (A*), Cardston (3031320) (E*), Lethbridge CDA (3033890) (E*)
Edmonton Int A (3012205) (E)	Edmonton Munic. A (3012208) (E), Edmonton (3012195) (E)
Edson A (3062244) (A)	Edson (3062241) (E), Edson (3062240) (E), Campsie (3061200) (E*)
Lethbridge CDA (3033890) (A)	Lethbridge A (3033880) (E)
Medicine Hat A (3034480) (A)	
Saskatchewan:	
Estevan A (4012400) (E)	Estevan (4012390) (E), Midale (4015160) (E*), Yellowgrass (4019040) (E*)
Prince Albert A (4056240) (A)	Prince Albert (4056230) (E)
Regina A (4016560) (A)	
Saskatoon A (4057120) (A)	
Scott CDA (4047240) (A)	
Swift Current A (4028040) (A)	Swift Current (4028035) (E)
Manitoba:	
Brandon CDA (5010485) (A)	
Dauphin A (5040680) (A)	Dauphin A (5040680) (E), Dauphin (5040675) (E), Brandon CDA (5010485) (E*)
Great Falls (5031200) (A)	Great Falls (5031200) (E), Pinawa (5032160) (E*)
The Pas A (5052880)	The Pas (5052864) (E), Prince Albert (4056230) (E*)
Winnipeg Int A (5023222) (A)	Win. St Johns Col. (5023243) (E)

Malheureusement, la base de données historiques d'Environnement Canada n'était pas disponible au moment où le traitement des données devait se faire pour cette thèse. Des données officielles ont toutefois été envoyées par Environnement Canada (Service de l'environnement atmosphérique), mais une bonne partie des stations présentaient des données manquantes. D'autres données ont donc été reçues d'Agriculture Canada, où on avait substitué certaines données manquantes pour plusieurs stations (voir section 4.4.2), ce qui permettait d'avoir des données plus complètes. La section suivante permet d'expliquer le contenu et la structure des données provenant de ces deux sources.

4.3 Les données de base et leur structure

Les données de base qui ont servi pour cette étude ont été fournies sur disquettes par Environnement Canada et Agriculture Canada, sous forme de fichiers de texte "ASCII". Le contenu et la structure de ces fichiers variaient selon la provenance.

Les données d'Environnement Canada

Les données d'Environnement Canada consistaient d'un premier fichier contenant les coordonnées de toutes les stations météorologiques du Canada et de quatre autres fichiers composés de moyennes mensuelles des températures et des précipitations totales enregistrées pour toutes les stations depuis leur ouverture jusqu'à 1990. Ces fichiers étaient tous sous forme de texte sans délimiteur; c.-à-d. d'une série de caractères représentant, selon leur ordre, une information spécifique. Dans le premier cas, chaque ligne représentait des données particulières à une station; dont le code d'identification, le nom de la station, la province, la latitude et longitude (en degrés et en minutes), ainsi que l'altitude en pieds (Tableau 4).

Dans le deuxième type de fichier, les températures (en °C) et les précipitations (en mm) s'alternaient d'une ligne à l'autre, et ce pour une station et une année particulière (Tableau 5). Il y avait donc sur chaque ligne le code d'identification de la station, suivi de l'année, du code identifiant le type de données (températures ou précipitations), et des

Tableau 4 Exemple du fichier des coordonnées pour les stations météorologiques provenant d'Environnement Canada.

301AR54DAYSLAND	ALTA 52 52 112 17 2260
301BBBFEDMONTON TELEPHONE	ALTA 53 34 113 34 2209
301BB03EDMONTON CBC	ALTA 53 31 113 17 2400
301BHLRGOLDSTROM	ALTA 52 2 113 43 3232
301BK03EDMONTON CORONATION	ALTA 53 34 113 34 2200
301B6L0FLEET	ALTA 52 9 111 44 2750
301B8LRGOLDEN VALLEY	ALTA 53 12 110 9 2100
301C3D4HORBURG	ALTA 52 24 115 12 3399
301E2B2PINE RIDGE GEN	ALTA 54 5 112 15 1920
301FFNJU OF A METABOLIC CENTRE	ALTA 53 31 113 32 2193

Tableau 5 Exemple d'un fichier de données (températures et précipitations) provenant d'Environnement Canada.

5061001	974	050	165	180	231	84	145	505	757	945	422	76	251	345
5061001	975	042	-282	-222	-185	-30	55	124	159	134	65	1	-95	-236
5061001	975	050	188	127	175	58	297	681	333	1138	455	295	145	445
5061001	976	042	-260	-231	-184	-7	54	127	157	145	83	-11	-124	-272
5061001	976	050	358	208	145	323	371	612	1382	658	340	549	178	424
5061001	977	042	-257	-205	-121	-13	83	123	148	106	78	41	-104	-222
5061001	977	050	194	169	277	309	432	594	470	860	386	340	178	139
5061001	978	042	-246	-190	-184	-58	46	88	133	109	49	-15	-142	-235
5061001	978	050	114	64	274	422	450	422	1338	1181	823	618	146	196
5061001	979	042	-260	-299	-188	-52	22	107	155	111	47	-18	-118	-165

données pour les douze mois de l'année. Afin de comprimer les fichiers, le premier chiffre de l'année était supprimé (ex.: 974=1974), ainsi que le point décimal pour les températures et les précipitations (ex.: 165=16.5). Les cases ayant des données manquantes étaient identifiées à l'aide du nombre -999.

Les données d'Agriculture Canada

Les données d'Agriculture Canada ont été fournies en fichiers individuels pour chaque station choisie, sous forme de texte avec des colonnes délimitées par une espace (Tableau 6). Ces fichiers étaient composés de quatre lignes pour chaque année, représentant soit les moyennes mensuelles des températures ("MEAN"), les précipitations totales ("PRCP") ou le nombre de jours où les données ont été enregistrées ("DAYS"). Sur chacune de ces lignes étaient inscrits l'année, suivie de l'identification du type de données ("MEAN", "PRCP" ou "DAYS") et de la série de données pour les douze mois de l'année. Les cases ayant des données manquantes étaient signalées à l'aide du nombre 999.9. Tous ces fichiers, ainsi que ceux provenant d'Environnement Canada, ont été importés dans dBASE IV afin de les prétraiter pour les rendre utilisables dans le système.

4.4 Le prétraitement des données

Le prétraitement des données s'est réalisé en plusieurs étapes, afin de structurer les données de base, d'en extraire les données reliées aux stations choisies et de remplacer les données manquantes. Plusieurs programmes ont été conçus à l'aide de dBASE IV, pour effectuer la plupart des tâches impliquées dans ce processus. Ce chapitre expliquera donc en détails chaque stade du prétraitement, en commençant par la structuration et la transformation des données.

Tableau 6 Exemple d'un fichier de données provenant d'Agriculture Canada.

41 MEAN	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	20.7	17.9	11.3	5.4	-4.5	-10.0
41 DAYS	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
41 PRCP	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	55.4	57.0	111.4	13.3	35.7	10.2
41 DAYS	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	999.9	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
42 MEAN	-10.2	-14.2	-2.7	4.8	9.1	14.9	17.8	17.6	10.8	7.2	-6.4	-16.4
42 DAYS	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
42 PRCP	8.5	16.6	53.1	42.7	44.5	23.0	71.9	80.4	37.0	8.7	20.5	46.1
42 DAYS	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0

4.4.1 Structurer et transformer les données

La structuration des données s'est effectuée différemment selon la provenance et le type de données. Les données d'Environnement Canada ont été structurées à l'aide de programmes conçus (sur dBASE IV) pour les deux types de fichiers; premièrement pour les coordonnées des stations et deuxièmement pour les données des températures et précipitations. Ensuite suivra l'explication concernant le procédé utilisé pour effectuer des tâches similaires avec les fichiers d'Agriculture Canada.

La structuration du fichier de coordonnées des stations s'est effectuée en plusieurs phases à l'aide d'un programme conçu sur dBASE IV, afin de donner à ce fichier la structure voulue et pour modifier certaines de ces données. Le programme STAT.PRG (Annexe 1) permettait premièrement d'importer dans une structure préconçue, le fichier de coordonnées des stations provenant d'Environnement Canada (STN.F01). Ensuite, chaque série de données était placée dans la colonne appropriée. Il en résultait un fichier (STAT1.DBF: juxtaposer les Tableaux 4 et 7 afin d'en avoir un exemple) ayant une grosse colonne (ENTIER) représentant les données importées, suivie de plusieurs colonnes ayant respectivement le numéro d'identification des stations (IDENTIF), leur nom (NOM), la province (PROV), la latitude et la longitude en degrés (LAD et LOD) et en minutes (LAM et LOM), et finalement l'élévation en pieds (ELEV). Une deuxième phase de ce programme importait dans une nouvelle structure préconçue, la partie nouvellement structurée du fichier STAT1.DBF. Ensuite, le fichier résultant (STAT2.DBF) était filtré de sorte à conserver uniquement les stations de l'Alberta, de la Saskatchewan et du Manitoba. Un nouveau fichier (STAT3.DBF: Tableau 7) était donc sauvegardé avec les coordonnées se rapportant seulement aux stations des provinces choisies pour ce travail, avec toutes les colonnes énumérées ci-dessus, sauf ENTIER.

La dernière partie du même programme permettait ensuite de transformer en degrés décimales les coordonnées des stations qui étaient auparavant en degrés et en minutes. Cette opération était nécessaire pour la création future des fichiers ARC/INFO à partir de ces

Tableau 7 Exemple du fichier STAT3.DBF résultant du programme STAT1.PRG.

IDENTIF	NOM	PROV	LAD	LAM	LOD	LOM	ELEV
301AR54	DAYS LAND	ALTA	52	52	112	17	2260
301BBBF	EDMONTON TELEPHONE	ALTA	53	34	113	34	2209
301BB03	EDMONTON CBC	ALTA	53	31	113	17	2400
301BHLR	GOLDSTROM	ALTA	52	2	113	43	3232
301BK03	EDMONTON CORONATION	ALTA	53	34	113	34	2200
301B6L0	FLEET	ALTA	52	9	111	44	2750
301B8LR	GOLDEN VALLEY	ALTA	53	12	110	9	2100
301C3D4	HORBURG	ALTA	52	24	115	12	3399
301E2B2	PINE RIDGE GEN	ALTA	54	5	112	15	1920
301FFNJ	U OF A METABOLIC CENTRE	ALTA	53	31	113	32	2193

données. Premièrement, le fichier STAT3.DBF était importé dans une nouvelle structure préconçue, pour ensuite faire la transformation des coordonnées en degrés décimales. Il en résultait d'un nouveau fichier (STAT4.DBF) semblable à STAT3.DBF, mais avec l'ajout des colonnes LADEC et LODEC (latitude et longitude décimales). Ensuite, un autre fichier (STAT5.DBF: Tableau 8) était créé avec en moins les colonnes LAD, LAM, LOD et LOM. Ce dernier fichier servait plus tard à la création d'une couverture de points reliés aux stations, cette couverture étant utilisée dans le processus du remplacement des données manquantes.

Les données de températures et de précipitations d'Environnement Canada

Un autre programme (STRTP.PRG: Annexe 2) importait dans une structure préconçue, chaque fichier de données de températures et de précipitations d'Environnement Canada. Ensuite, chaque série de données était placée dans la colonne appropriée. Il en résultait donc d'un fichier (ex.: TEMPR4.DBF; juxtaposer les Tableaux 5 et 9 afin d'en avoir un exemple) ayant une grosse colonne représentant le fichier original d'Environnement Canada (ENTIER), suivie de plusieurs colonnes ayant respectivement le numéro d'identification des stations (IDENTIF), l'année (AN), le code d'identification de l'élément (EL: 42 = températures et 50 = précipitations) et les données rattachées aux douze mois de l'année. Une deuxième partie de ce programme copiait dans une nouvelle structure préconçue, la partie nouvellement structurée du fichier nommé ci-dessus (ex.: TEMPR4.DBF). Les valeurs de chaque mois étaient ensuite divisées par dix, afin d'ajouter la décimale supprimée par Environnement Canada. Un premier fichier résultait donc de ce programme (ex.: TEMPR41.DBF; Tableau 9), sans la colonne ENTIER et avec les données réelles des températures (en °C) et des précipitations (en mm).

Ce même programme créait ensuite deux autres fichiers ayant uniquement des données de températures (ex.: TEMPR41.DBF; Tableau 10) ou de précipitations (ex.: PRECI41.DBF; Tableau 11), tout en éliminant celles d'avant 1921, ainsi que le premier nombre de l'année (ex.: 921 = 21) et la colonne EL.

Tableau 8 Exemple du fichier STAT5.DBF résultant du programme STAT1.PRG.

IDENTIF	NOM	PROV	ELEV	LADEC	LODEC
301AR54	DAYS LAND	ALTA	2260	52.87	112.28
301BBBF	EDMONTON TELEPHONE	ALTA	2209	53.57	113.57
301BB03	EDMONTON CBC	ALTA	2400	53.52	113.28
301BHLR	GOLDSTROM	ALTA	3232	52.03	113.72
301BK03	EDMONTON CORONATION	ALTA	2200	53.57	113.57
301B6L0	FLEET	ALTA	2750	52.15	111.73
301B8LR	GOLDEN VALLEY	ALTA	2100	53.20	110.15
301C3D4	HORBURG	ALTA	3399	52.40	115.20
301E2B2	PINE RIDGE GEN	ALTA	1920	54.08	112.25
301FFNJ	U OF A METABOLIC CENTRE	ALTA	2193	53.52	113.53

Tableau 9 Exemple d'un fichier de données (températures et précipitations) résultant du programme STRTP.PRG (fichier TEMPR41.DBF).

IDENTIF	AN	EL	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
5061001	974	50	16.5	18.0	23.1	8.4	14.5	50.5	75.7	94.5	42.2	7.6	25.1	34.5
5061001	975	42	-28.2	-22.2	-18.5	-3.0	5.5	12.4	15.9	13.4	6.5	0.1	-9.5	-23.6
5061001	975	50	18.8	12.7	17.5	5.8	29.7	68.1	33.3	113.8	45.5	29.5	14.5	44.5
5061001	976	42	-26.0	-23.1	-18.4	-0.7	5.4	12.7	15.7	14.5	8.3	-1.1	-12.4	-27.2
5061001	976	50	35.8	20.8	14.5	32.3	37.1	61.2	138.2	65.8	34.0	54.9	17.8	42.4
5061001	977	42	-25.7	-20.5	-12.1	-1.3	8.3	12.3	14.8	10.6	7.8	4.1	-10.4	-22.2
5061001	977	50	19.4	16.9	27.7	30.9	43.2	59.4	47.0	86.0	38.6	34.0	17.8	13.9
5061001	978	42	-24.6	-19.0	-18.4	-5.8	4.6	8.8	13.3	10.9	4.9	-1.5	-14.2	-23.5
5061001	978	50	11.4	6.4	27.4	42.2	45.0	42.2	133.8	118.1	82.3	61.8	14.6	19.6
5061001	979	42	-26.0	-29.9	-18.8	-5.2	2.2	10.7	15.5	11.1	4.7	-1.8	-11.8	-16.5

Tableau 10 Exemple d'un fichier des températures résultant du programme STRTP.PRG
(fichier TEMPER41.DBF).

IDENTIF	AN	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
5061001	75	-28.2	-22.2	-18.5	-3.0	5.5	12.4	15.9	13.4	6.5	0.1	-9.5	-23.6
5061001	76	-26.0	-23.1	-18.4	-0.7	5.4	12.7	15.7	14.5	8.3	-1.1	-12.4	-27.2
5061001	77	-25.7	-20.5	-12.1	-1.3	8.3	12.3	14.8	10.6	7.8	4.1	-10.4	-22.2
5061001	78	-24.6	-19.0	-18.4	-5.8	4.6	8.8	13.3	10.9	4.9	-1.5	-14.2	-23.5
5061001	79	-26.0	-29.9	-18.8	-5.2	2.2	10.7	15.5	11.1	4.7	-1.8	-11.8	-16.5
5061001	80	-26.3	-20.9	-16.0	0.2	6.1	9.1	15.3	13.5	4.5	-1.7	-12.4	-25.2
5061001	81	-19.3	-17.0	-11.3	-9.9	3.6	10.2	16.0	15.3	7.3	0.0	-7.2	-20.6
5061001	82	-31.5	-23.7	-16.1	-7.8	6.6	8.7	14.8	12.1	7.7	1.7	-14.9	-24.7
5061001	83	-23.8	-23.2	-16.3	-6.8	-3.0	12.1	16.9	16.7	8.6	2.5	-5.5	-26.3
5061001	84	-27.7	-17.2	-15.5	0.4	2.6	13.0	16.8	16.1	5.8	1.4	-12.2	-27.9

Tableau 11 Exemple d'un fichier des précipitations résultant du programme STRTP.PRG
(fichier PRECI41.DBF).

IDENTIF	AN	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
5061001	74	16.5	18.0	23.1	8.4	14.5	50.5	75.7	94.5	42.2	7.6	25.1	34.5
5061001	75	18.8	12.7	17.5	5.8	29.7	68.1	33.3	113.8	45.5	29.5	14.5	44.5
5061001	76	35.8	20.8	14.5	32.3	37.1	61.2	138.2	65.8	34.0	54.9	17.8	42.4
5061001	77	19.4	16.9	27.7	30.9	43.2	59.4	47.0	86.0	38.6	34.0	17.8	13.9
5061001	78	11.4	6.4	27.4	42.2	45.0	42.2	133.8	118.1	82.3	61.8	14.6	19.6
5061001	79	7.7	8.6	28.8	5.5	59.4	44.9	98.1	58.0	66.9	33.7	31.3	10.5
5061001	80	21.9	9.1	23.2	11.0	37.8	120.9	134.8	124.5	81.2	17.4	38.2	47.0
5061001	81	6.2	15.0	33.6	41.2	5.5	60.3	75.8	63.7	31.0	103.0	30.5	9.8
5061001	82	22.4	23.7	31.0	18.4	54.0	55.6	75.0	61.0	54.0	24.8	42.1	49.1
5061001	83	20.1	18.0	33.3	18.2	71.4	41.2	64.2	112.2	92.0	14.8	65.8	9.6

À l'aide du système de fonctionnement par menu (dans dBASE IV), il était ensuite possible d'extraire des fichiers de températures ou de précipitations, les données rattachées aux stations choisies pour l'étude. Cette démarche permettait donc d'avoir pour chaque station choisie, des fichiers de températures et de précipitations semblables à ceux illustrés dans les Tableaux 10 et 11, mais avec la colonne IDENTIF en moins (Tableau 12).

Les données de températures et de précipitations d'Agriculture Canada

Les fichiers de données de températures et de précipitations d'Agriculture Canada, étaient beaucoup plus faciles à prétraiter car ils étaient déjà mieux structurés que ceux provenant d'Environnement Canada. Ces fichiers ont donc été importés dans dBASE IV tels que présentés dans le Tableau 6, à l'aide d'une option choisie dans le menu d'importation. Toujours à partir du mode de fonctionnement par menu, il était ensuite possible d'extraire de chaque fichier les données de températures ou de précipitations, de sorte à sauvegarder de nouveaux fichiers semblables à celui qui est illustré dans le Tableau 12. Ces derniers fichiers provenant des deux sources, ont par la suite servi à une prochaine étape essentielle au prétraitement des données; c'est-à-dire le remplacement des données manquantes.

4.4.2 Remplacer les données manquantes

Plusieurs stations présentaient des données manquantes, soit parce qu'elles ne remontaient pas jusqu'à 1921 ou qu'il y avait des trous à l'intérieur d'une série relativement complète. Afin de remédier en partie à ce problème, Agriculture Canada a pu fournir des séries plus complètes de données, en remplaçant certaines données manquantes par d'autres provenant de stations relativement près. Pour tenir compte de la différence pouvant exister entre les stations en question, un facteur de correction était calculé à partir de la différence entre les moyennes normales (autant que possible des moyennes sur 30 ans) établies pour les deux stations, et ce, où les données se recoupent pendant la période la plus près de la valeur manquante. Par exemple, on substitue une donnée manquante pour la station 1 (station

Tableau 12 Exemple des dix dernières années d'un fichier de températures extrait pour la station d'Edmonton Int A (3012205).

AN	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
81	-5.7	-7.3	0.1	4.3	11.2	12.3	15.7	18.0	12.1	4.0	-0.3	-10.9
82	-23.2	-16.2	-8.5	-0.6	10.0	15.2	16.1	12.9	10.6	4.6	-8.8	-9.4
83	-10.2	-8.4	-4.4	4.8	9.9	13.5	16.6	16.8	8.4	4.6	-4.2	-19.5
84	-7.3	-2.7	-3.0	5.9	8.7	14.0	16.7	16.9	7.6	1.6	-9.9	-16.9
85	-9.9	-12.6	-1.7	4.7	12.2	13.1	17.2	14.0	7.0	3.5	-14.0	-5.6
86	-6.1	-13.2	1.0	3.9	11.7	14.9	15.2	15.9	8.1	6.6	-8.9	-6.4
87	-6.1	-4.5	-5.1	7.0	11.2	15.5	15.8	12.6	12.8	5.7	-0.1	-5.1
88	-12.0	-8.6	1.4	6.0	12.5	15.8	15.7	15.0	10.2	6.1	-4.8	-7.2
89	-9.8	-15.5	-10.1	4.3	9.7	14.6	17.0	15.2	10.9	4.1	-3.8	-7.5
90	-8.2	-10.9	-0.5	4.1	10.5	14.7	16.4	16.1	13.0	2.6	-7.6	-14.4

principale) par la valeur de même date provenant de la station 2 (station complémentaire située raisonnablement près de la station 1), cette dernière valeur étant corrigée en ajoutant ou en soustrayant (selon le cas) la différence entre les moyennes des stations 1 et 2 pour la période en question (Bootsma, 1991).

Plusieurs de ces séries de données complétées par Agriculture Canada, ont donc été utilisées telles quelles pour cette étude, ainsi qu'une autre fournie par Environnement Canada (voir Tableau 3). Les séries incomplètes (provenant des deux sources) devaient être complétées en substituant les données manquantes par d'autres données enregistrées par des stations complémentaires. La plupart de ces dernières étaient choisies avec les stations principales comme sources de données historiques, celles-ci répondant aux critères établis à cet effet par Environnement Canada (voir section 4.2). Dans les cas où les stations complémentaires étaient relativement éloignées des stations principales (identifiées à l'aide d'un astérisque), un facteur de correction était utilisé selon la méthode mentionnée ci-dessus (utilisée par Agriculture Canada). Une recherche devait s'effectuer afin de repérer quelques stations complémentaires dont les données pouvaient servir à substituer celles qui manquaient toujours à la fin du processus (pour quelques données manquantes seulement). Cette recherche était réalisée à l'aide de l'affichage (dans ARCEDIT: module de PC ARC/INFO) de 2 couvertures ARC/INFO préalablement construites (STAT et REGION3: leur création est expliquée à la section 4.5.1), suivi de la vérification (avec dBASE IV) des données reliées aux stations repérées, à l'intérieur des fichiers de températures et précipitations rattachées aux stations en question.

La colonne d'identification des stations (IDENTIF) était ajoutée aux séries de données complétées, pour ensuite regrouper ces dernières de sorte à avoir pour l'ensemble des 17 stations, un fichier des températures (TEMPCOMP.DBF) et un autre pour les précipitations (PRECCOMP.DBF). Ces derniers fichiers étaient ensuite utilisés pour en faire un traitement différent selon le type d'analyse effectué, ce qui est abordé dans la partie suivante.

4.5 Le traitement et la visualisation des données

Le traitement et la visualisation des données variaient selon le type d'analyse effectué pour cette étude. Un premier traitement consistait à extraire des fichiers TEMPCOMP.DBF et PRECCOMP.DBF, les variables nécessaires à la classification, pour ensuite produire la classification annuelle. Ces mêmes traitements sont aussi appliqués dans une deuxième phase, avec des moyennes mensuelles sur dix ans (1921-30 à 1981-90) calculées à partir des séries de données complétées pour chaque station. Une dernière phase consistait à créer des cartes climatiques, basées sur la classification de Köppen, à l'aide de ces moyennes sur dix ans, ainsi qu'avec des moyennes sur 30 ans (1921-50) et les données annuelles de 1933 à 38. Avant d'expliquer davantage ces divers traitements, il faut tout d'abord expliquer les démarches poursuivies afin de créer des couvertures ARC/INFO qui ont servi à plusieurs étapes de cette étude.

4.5.1 La création de couvertures ARC/INFO

Deux types de couvertures ont été créées à l'aide de PC ARC/INFO afin de les utiliser pour diverses phases de cette étude. Le repérage des stations utilisées pour remplacer certaines données manquantes, était effectué par l'entremise d'une première couverture (STAT), avec comme arrière-plan une deuxième carte (REGION3: Figure 14). Cette dernière était aussi intégrée à d'autres couvertures afin de compléter les cartes climatiques servant aux dernières analyses de cette thèse.

La première version de la couverture REGION3 (REGION) a été conçue en plusieurs étapes (Annexe 3), en grande partie à partir de certains éléments provenant de trois couvertures ARC/INFO (BOUNDARY, MEDDRAIN et GRID) reçues de la section de l'Atlas national à Énergie mines et ressources, Canada. Afin de délimiter la partie ouest de la région d'étude, la limite est des Rocheuses était numérisée à partir de la carte physiographique du Canada (E.M.R., Canada, 1972), pour ensuite subir certaines transformations avant d'être finalement copiée dans REGION (voir les procédures à

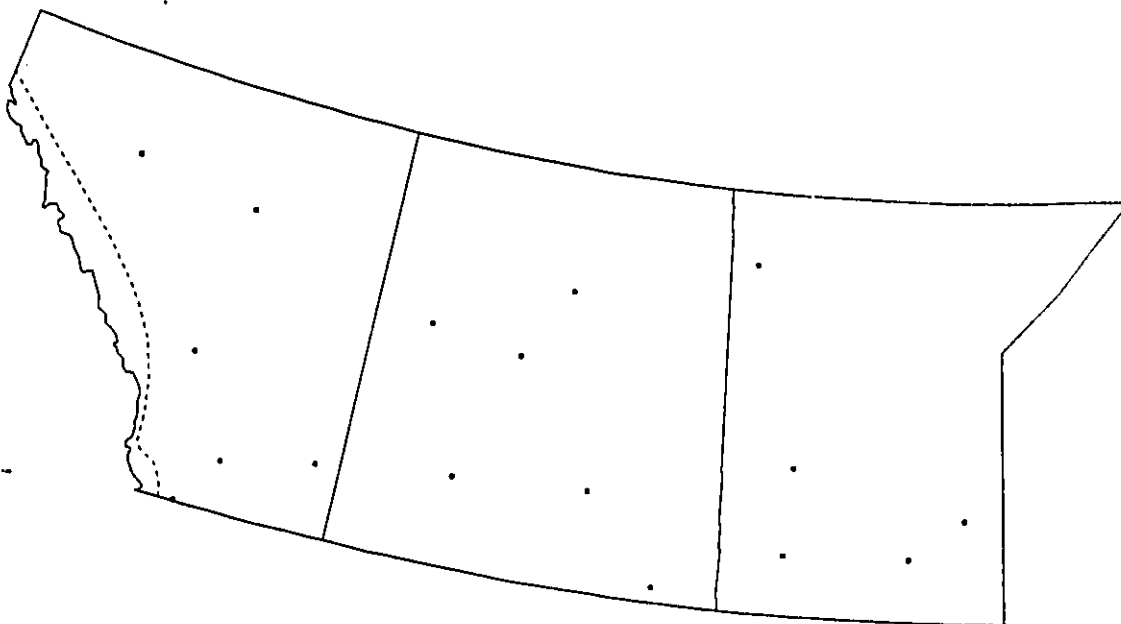


Figure 14 Illustration de la couverture REGION3. La ligne discontinue représente la limite est des Rocheuses, numérisée à partir de la carte physiographique de Bostock (1972). Les points correspondent aux 17 stations principales utilisées pour cette étude.

l'Annexe 4). REGION était ensuite copiée vers une nouvelle couverture (REGION2) dans laquelle certaines lignes trop longues (ARCS) ont été coupées (Annexe 5). Les points reliés aux 17 stations étaient ajoutés à REGION2 en les copiant de la couverture STAT (Annexe 6). La commande "CLEAN" servait ensuite à nettoyer la couverture REGION2 (à ce point renommée REGION3), et d'y construire la topologie.

STAT consistait d'une couverture de points représentant les 2812 stations qui existent ou qui ont existé à un moment donné, en Alberta, en Saskatchewan et au Manitoba. À partir du fichier STAT5.DBF (coordonnées des stations: voir Tableau 7) un nouveau fichier a été créé avec une colonne ayant un nouveau code d'identification (numéro de 1 à 2812), suivi de la longitude (LODEC) et de la latitude (LADEC). Ce fichier (STAT51.TXT: Tableau 13) était sauvegardé sous forme de texte délimité par une virgule, pour ensuite servir à créer une première version de la couverture STAT (STATION), à l'aide de la commande "GENERATE" (Annexe 7). STATION était ensuite transformée en une nouvelle couverture (STATION1) avec une projection Lambert établie à partir des mêmes coordonnées (CENTER MERIDIAN et LAT OF PROJECTION) que dans REGION (Annexe 8). STATION1 était copiée vers une nouvelle couverture (STAT), pour laquelle la topologie était construite avec "BUILD". Il était ensuite possible de joindre le reste des coordonnées des stations (STAT.DBF extrait de STAT5.DBF) au fichier d'attributs de STAT (STAT.PAT), à l'aide de la commande "JOINITEM".

4.5.2 Le premier traitement (une classification annuelle)

Le premier traitement des données s'effectuait en plusieurs étapes, de sorte à établir pour chaque année une classification de Köppen pour les 17 stations choisies. Un traitement particulier était fait aux données provenant des fichiers TEMPCOMP.DBF et PRECCOMP.DBF. Afin de ne pas couper un même hiver en deux, les années devaient se chevaucher. Par exemple, la première année de la classification commençait en octobre 1921 et finissait en septembre 1922, ce qu'on nommera plus tard l'année 1921-22. Les mois

Tableau 13 Exemple du fichier STAT51.TXT ("END" est inscrit à la fin du fichier).

```
1,-112.2833,52.8667
2,-113.5667,53.5667
3,-113.2833,53.5167
4,-113.7167,52.0333
5,-113.5667,53.5667
6,-111.7333,52.1500
7,-110.1500,53.2000
8,-115.2000,52.4000
9,-112.2500,54.0833
10,-113.5333,53.5167
```

d'hiver de 1921-22 demeurent ainsi dans la même année de classification au lieu d'être répartis sur deux années différentes. Les fichiers ressortant de ce dernier traitement, servaient ensuite à l'extraction des variables nécessaires à la classification annuelle, à l'aide de deux programmes conçus sur dBASE IV (TEMPVAR.PRG et PREVAR.PRG: Annexes 9 et 10). Les deux fichiers (TVAR1.DBF et PVAR1.DBF) qui en résultaient, étaient ensuite reliés à l'aide d'un autre programme (TPVAR.PRG: Annexe 11), de sorte à combiner dans un seul fichier (TPVAR1.DBF: Tableau 14) les variables de précipitations et de températures pour fin de classification.

À l'aide du programme KOPPEN.PRG (conçu sur dBASE IV: Annexe 12), la classification de Köppen était établie à partir du fichier TPVAR1.DBF, créant ainsi deux nouveaux fichiers: KOP1.DBF avec les variables mentionnées ci-dessus et les résultats de la classification (identifiés à l'aide de 3 lettres); et KOPPEN1.DBF avec seulement les résultats de la classification (Tableau 15).

4.5.3 Le deuxième traitement

Un deuxième traitement a été effectué selon les mêmes procédures mentionnées ci-dessus, mais cette fois-ci avec des moyennes mensuelles calculées sur dix ans (1921-30 à 1981-90) et sur 30 ans (pour la période de 1921-50). À l'aide de dBASE IV, ces moyennes étaient calculées à partir des séries de données complètes pour chaque station (mentionnées dans la section 4.4.2), pour ensuite regrouper les résultats dans un fichier de températures (TMOY.DBF: Tableau 16) et un autre de précipitations (PMOY.DBF). Ces deux fichiers étaient ensuite traités par les programmes TEMPVAR.PRG et PREVAR.PRG respectivement (mentionnés dans la section 4.5.2), afin d'en extraire les variables nécessaires à la classification. Les fichiers ressortant de cette étape (TVARMOY.DBF et PVARMOY.DBF), étaient reliés à l'aide du programme TPVAR.PRG, de sorte à regrouper toutes les variables dans un seul fichier (TPVARMOY.DBF). Ce dernier servait alors à la classification, effectuée par le programme KOPPEN.PRG. Les programmes mentionnés ci-dessus sont les

Tableau 14 Exemple du fichier TPVAR1.DBF ressortant du programme TPVAR.PRG. Les premières variables concernent les précipitations: total annuel (R); total pour les 6 mois les plus chaud (PRECCH) et plus froid (PRECFR); du mois le plus sec parmi les 6 mois les plus chaud (SECCH) et plus froid (SECFR); du mois le plus humide parmi les 6 mois les plus froid (HUMFR) et plus chaud (HUMCH). Les autres variables consistent des moyennes annuelles des températures (T), des températures du mois le plus chaud (CHAUD) et le plus froid (FROID), et du nombre de mois où les températures sont égales ou supérieures à 10°C (PLUS10).

IDENTIF	AN	R	PRECCH	PRECFR	SECCH	HUMFR	SECFR	HUMCH	T	CHAUD	FROID	PLUS10
5010485	21-22	44.15	34.20	9.95	1.68	2.92	0.33	8.82	2.32	18.6	-19.9	5
5010485	22-23	49.95	31.57	18.38	2.01	6.93	1.52	12.95	0.65	20.0	-19.1	5
5010485	23-24	55.15	46.31	8.84	0.71	2.72	0.13	13.45	1.68	17.8	-20.7	
5010485	24-25	56.52	37.00	19.52	1.44	7.29	1.52	11.34	1.56	17.9	-20.0	5
5010485	25-26	45.94	39.39	6.55	1.27	2.86	0.26	11.64	2.38	18.7	-11.6	
5010485	26-27	63.47	47.98	15.49	2.50	5.06	1.27	13.44	0.73	17.5	-18.8	4
5010485	27-28	51.88	38.17	13.71	1.14	3.96	0.13	13.35	0.62	18.2	-23.3	5
5010485	28-29	31.54	24.03	7.51	1.09	2.79	0.23	6.09	1.07	19.0	-26.3	3
5010485	29-30	52.13	36.79	15.34	0.94	5.07	0.26	13.46	2.13	19.7	-22.6	4
5010485	30-31	44.40	33.02	11.38	0.87	6.14	0.26	12.05	4.23	18.9	-10.8	5

Tableau 15 Exemple du fichier KOPPEN1.DBF ressortant du programme KOPPEN.PRG.

IDENTIF	AN	KOP
5010485	21-22	DWB
5010485	22-23	DSB
5010485	23-24	DVB
5010485	24-25	DSB
5010485	25-26	DWB
5010485	26-27	DWB
5010485	27-28	DVB
5010485	28-29	DWC
5010485	29-30	DVB
5010485	30-31	DVB

Tableau 16 Exemple du fichier TMOY.DBF suite au calcul des moyennes pour chaque période en question.

IDENTIF	AN	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
5010485	21-30	-18.5	-15.2	-7.3	2.9	10.3	15.7	18.7	16.8	11.4	4.7	-5.6	-14.7
5010485	31-40	-18.4	-15.9	-7.3	3.0	12.2	16.5	20.3	18.3	12.6	4.8	-5.9	-13.3
5010485	41-50	-16.7	-16.4	-7.6	3.7	10.2	15.4	19.1	17.8	12.1	6.2	-5.3	-14.5
5010485	51-60	-18.4	-14.1	-8.7	3.6	11.1	15.8	19.4	18.2	11.7	5.4	-4.8	-12.5
5010485	61-70	-19.6	-16.0	-8.7	2.8	10.0	16.5	19.2	18.1	12.0	6.1	-4.9	-14.6
5010485	70-80	-19.9	-15.5	-7.7	3.5	12.0	16.5	18.8	17.3	11.6	5.3	-5.2	-15.1
5010485	81-90	-15.0	-12.7	-4.9	4.8	12.1	16.9	19.6	18.5	11.8	4.8	-5.3	-14.7
5010485	21-50	-17.8	-15.8	-7.4	3.2	10.9	15.8	19.4	17.6	12.0	5.2	-5.6	-14.2
3031093	21-30	-9.2	-6.3	-1.9	4.2	10.4	14.0	17.1	15.7	10.5	5.7	-2.3	-7.6
3031093	31-40	-8.8	-9.7	-4.0	3.8	10.5	13.4	16.9	15.5	11.1	5.4	-1.9	-6.7

mêmes que ceux utilisés pour la classification annuelle (voir section 4.5.2), sauf qu'ils ont été légèrement modifiés en fonction d'utiliser et créer les fichiers se rattachant aux données en question. Le produit final de cette étape, est un fichier (KOPMOY.DBF) semblable à celui illustré au Tableau 15, avec la classification de Köppen établie pour chaque période, et pour toutes les stations choisies pour l'étude.

4.5.4 Le troisième traitement (création de cartes climatiques)

Le troisième traitement consistait à créer des cartes climatiques, basées sur la classification de Köppen, pour chaque décennie (1921-30 à 1981-90), ainsi que pour la période de 1921-50 et pour les années 1933-34 à 1937-38. Pour chacune de ces cartes, une couverture de points (ex.: BASE2130 à BASE8190, etc.), représentant les 17 stations, devait être créée (dans PC ARC/INFO) à partir de la couverture STAT (mentionnée dans la section 4.5.1, voir les procédures à l'Annexe 13). À l'aide de commandes par menu sur dBASE IV, des fichiers individuels étaient ensuite extraits de TPVAR.DBF ou VARMOY.DBF (mentionnés dans les section 4.5.2 et 4.5.3 respectivement), de sorte à avoir un fichier de variables nécessaires à la classification pour chaque période ou année en question (ex.: VARM2130 à VARM8190, etc.). Dans PC ARC/INFO, ces fichiers individuels étaient alors joints au fichier d'attributs (fichiers PAT: Tableau 17) des couvertures de points mentionnées ci-dessus (BASE2130...), avec la commande "JOINITEM".

À l'aide de la commande BUILDTIN, un réseau de triangles irréguliers (TIN) était créé pour chacune des 11 variables des 13 couvertures mentionnées ci-dessus, pour un total de 143 "TIN" (Figure 15) (ESRI Canada, 1991). Ces réseaux de triangles irréguliers étaient ainsi construits en dressant entre les points reliés aux stations, des vecteurs ayant une gradation constante des valeurs rattachées aux points en question. Dans ce cas-ci, ces valeurs correspondent aux variables spécifiées dans la commande BUILDTIN. Les limites externes de ces "TIN" sont constituées de vecteurs dressés entre les stations périphériques. Ces "TIN" ne recouvrent donc pas toute la région d'étude, mais une partie assez importante de celle-ci

Tableau 17 Fichier d'attributs (BASE2130.PAT) de la couverture BASE2130 après l'opération JOINITEM.

AREA	PERI-METER	BASE 2130-ID	IDENTIF	R	PREC CH	PREC FR	SEC CH	HUM FR	SEC FR	HUM CH	T	CHAUD	FROID	PLUS 10	
0.0000	0.0000		1	5010485	51.45	38.00	13.45	4.42	3.19	1.33	8.64	1.61	18.7	-18.4	5
0.0000	0.0000		2	3031093	47.82	35.54	12.28	3.45	3.19	1.13	10.45	4.18	17.1	-9.2	5
0.0000	0.0000		3	5040680	39.23	26.19	13.04	3.36	3.09	1.49	5.79	2.91	20.0	-16.3	5
0.0000	0.0000		4	3012205	41.88	30.16	11.72	2.38	2.41	1.47	8.04	2.74	17.0	-13.8	4
0.0000	0.0000		5	3062244	44.99	32.79	12.20	2.44	2.41	1.27	7.98	2.35	15.5	-12.1	3
0.0000	0.0000		6	4012400	45.11	30.93	14.18	2.91	3.28	1.97	9.20	3.24	19.4	-14.8	5
0.0000	0.0000		7	5031200	49.04	33.96	15.08	2.30	4.29	1.65	7.45	2.09	19.6	-18.5	5
0.0000	0.0000		8	3033890	42.24	30.45	11.79	3.40	2.41	1.37	8.33	4.93	17.8	-8.3	5
0.0000	0.0000		9	3034480	31.73	25.16	6.57	3.36	1.48	0.75	6.08	6.28	21.6	-9.7	5
0.0000	0.0000		10	4056240	40.22	30.37	9.85	3.27	2.47	1.12	6.80	1.41	18.3	-18.3	5
0.0000	0.0000		11	4016560	39.48	28.16	11.32	2.09	3.05	1.29	8.65	2.41	19.0	-16.3	5
0.0000	0.0000		12	4057120	40.97	29.55	11.42	2.66	2.58	1.13	7.22	1.76	18.8	-17.4	5
0.0000	0.0000		13	4047240	33.75	25.21	8.54	2.86	1.70	1.09	6.09	1.03	17.2	-17.4	3
0.0000	0.0000		14	4028040	39.64	30.18	9.46	2.20	2.34	1.00	8.40	4.13	19.3	-12.4	5
0.0000	0.0000		15	5052880	34.74	24.75	9.99	2.04	2.36	1.12	5.60	-0.34	17.9	-21.0	4
0.0000	0.0000		16	5023222	49.18	33.49	15.69	3.35	4.23	1.76	7.55	2.82	20.0	-17.3	5
0.0000	0.0000		17	3031400	43.25	27.76	15.49	3.39	3.39	1.88	6.26	3.98	16.4	-8.0	3

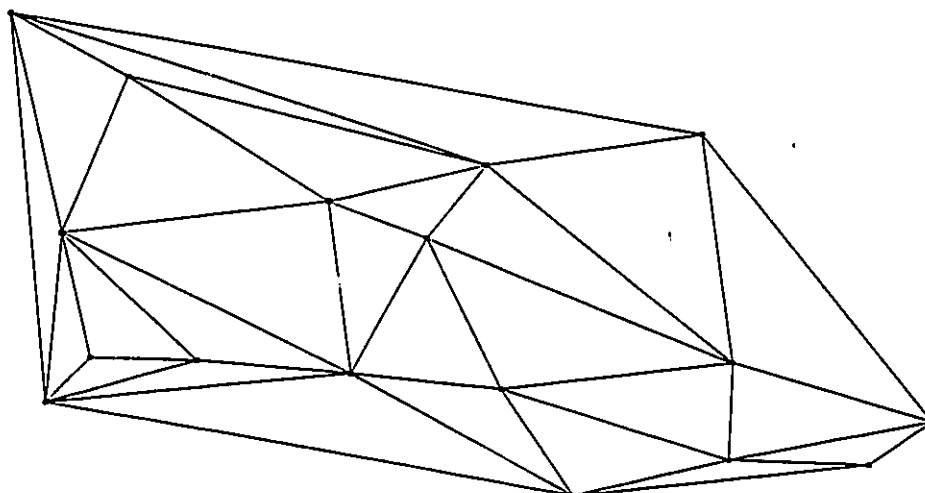


Figure 15 Illustration d'un réseau de triangles irréguliers (TIN) construit à partir des points reliés aux 17 stations choisies pour l'étude.

est toutefois assez bien représentée pour avoir une bonne idée des changements climatiques pouvant avoir eu lieu dans les Prairies canadiennes.

La commande "TINGRID" permettait ensuite de transformer les 143 "TIN" en 143 grilles de 1459 points répartis uniformément à travers la région d'étude. Les valeurs rattachées à ces 1459 points, étaient ainsi interpolées à partir des valeurs se rapportant aux vecteurs de chaque "TIN". À l'aide de la commande "UNGEN3D", ces 143 grilles de points étaient après transformées en 143 fichiers de texte ASCII, chacun d'eux étant composé des coordonnées x et y pour chaque point, suivies de la valeur interpolée correspondant à une variable particulière (ex.: GRI2130R.TXT; Tableau 18).

Les fichiers ASCII résultant de cette dernière opération, étaient ensuite importés dans dBASE IV afin de les regrouper en 13 fichiers (un pour chaque période ou années en question) ayant chacun les 11 variables interpolées pour les 1459 points. Un numéro d'identification (ID) était assigné à tous les points de ces 13 fichiers, pour ensuite établir la classification de Köppen pour chacun de ces points, à l'aide du programme KOPPEN.PRg (Annexe 12) légèrement modifié en fonction d'utiliser les fichiers en question (fichiers ressortant: KOP2130.DBF à KOP8190.DBF; etc.: Tableau 19). Cette opération était suivie de l'extraction des colonnes ID et KOP pour en faire de nouveaux fichiers (K2130.DBF à K8190.DBF) servant plus tard à la création des cartes climatiques.

Entre temps, un nouveau fichier était créé avec les mêmes données que celles illustrées au Tableau 18, sauf pour la dernière colonne qui était substituée par une autre ayant une valeur de 1 pour tous les points (colonne "Z"). Ce dernier fichier, exporté sous forme de fichier de texte ASCII délimité par une virgule (GRIDXYZ.PTS), servait à générer une nouvelle grille de points ayant tous une valeur "z" de 1 (définie par la dernière colonne du fichier de texte), à l'aide de la commande "GEN3D". Cette nouvelle grille (GRIDXYZ) était ensuite transformée en un "TIN", avec la commande "BUILDTIN". Ce "TIN" était ensuite utilisé pour la création d'une couverture (POLYXYZ) de 1459 polygones, nommés polygones de Thiessen, à l'aide de la commande "THIESS". Cette technique consistait à

Tableau 18 Exemple du fichier GRI2130R.TXT. La première colonne représente le numéro d'identification des points (0 dans ce cas-ci), suivie de leurs coordonnées x et y, et des valeurs interpolées pour la variable R (moyenne des précipitations totales pour la décennie 1921-30).

```
0,-1352142.25,650100.625,45.793
0,-1352142.25,670100.625,45.489
0,-1352142.25,690100.625,45.184
0,-1352142.25,710100.625,44.879
0,-1352142.25,730100.625,44.628
0,-1332142.25,570100.625,46.489
0,-1332142.25,590100.625,46.184
0,-1332142.25,610100.625,45.879
0,-1332142.25,630100.625,45.574
0,-1332142.25,650100.625,45.269
```

Tableau 19 Exemple d'un des fichiers de points (KOP2130.DBF) ressortant du programme KOPPEN.PRГ (modifié). La première colonne représente le numéro d'identification des points, suivie de leurs coordonnées x et y, et des lettres correspondant aux classes climatiques établies selon la méthode de Köppen (KOP).

ID	X	Y	KOP
1	-1352142.25	650100.625	DFB
2	-1352142.25	670100.625	DFC
3	-1352142.25	690100.625	DFC
4	-1352142.25	710100.625	DFC
5	-1352142.25	730100.625	DFC
6	-1332142.25	570100.625	DFB
7	-1332142.25	590100.625	DFB
8	-1332142.25	610100.625	DFB
9	-1332142.25	630100.625	DFB
10	-1332142.25	650100.625	DFB

construire autour de chaque point, des polygones dont les limites sont à distance égale entre chaque point en question et les points les plus près situés autour de ce dernier. Les points de la grille d'origine étant tous à distance égale, il en résultait d'une grille de polygones de forme carrée (Figure 16), représentant généralement une superficie de 400 km² (20 km par 20 km). Les polygones situés en périphérie de cette grille font exception à cette dernière affirmation, leur forme étant influencée par le contour du "TIN" qui délimite la grille.

Suite à la construction de sa topologie à l'aide de la commande "CLEAN", la couverture POLYXYZ était utilisée comme grille de base pour la création de toutes les cartes climatiques. Les fichiers K2130.DBF à K8190.DBF étaient modifiés en changeant le nom de la colonne "ID" à "POLYXYZ_ID" et en y ajoutant un point identifié "0" avec une classe "0". Ceci permettait ensuite d'incorporer un de ces fichiers (K2130.DBF) à l'intérieur du fichier d'attributs (POLYXYZ.PAT) de la couverture POLYXYZ, à l'aide de la commande "JOINITEM". Dans ce cas-ci, la colonne KOP du fichier K2130.DBF était ajoutée à POLYXYZ.PAT (Tableau 20), ce qui permettait d'assigner à chaque polygone de la couverture POLYXYZ, une classe climatique établie pour la période de 1921-30. Avec la commande "DISSOLVE", une nouvelle couverture (POLY2130) était créée en éliminant les lignes séparant les polygones contigus ayant la même classification, de sorte à former des polygones définissant chaque région climatique établie pour la période en question. La première carte climatique (POLY2130) étant ainsi créée (Figure 17), la colonne KOP était ensuite retranchée du fichier POLYXYZ.PAT, à l'aide de la commande "DROPITEM". Cette dernière couverture était alors prête à être réutilisée pour la création des autres cartes climatiques (POLY2150 à POLY8190), en reprenant pour chacune d'elles les procédures mentionnées ci-dessus.

Afin d'ajouter aux capacités analytiques des couvertures POLY2130 à POLY8190, les fichiers d'attributs de celles-ci étaient importés dans dBASE IV pour y ajouter certaines informations (ex.: Tableau 21). Une nouvelle colonne (KM2) était conçue, en calculant pour chaque région climatique la superficie en km², à partir de la colonne "AREA" (déjà en m²).

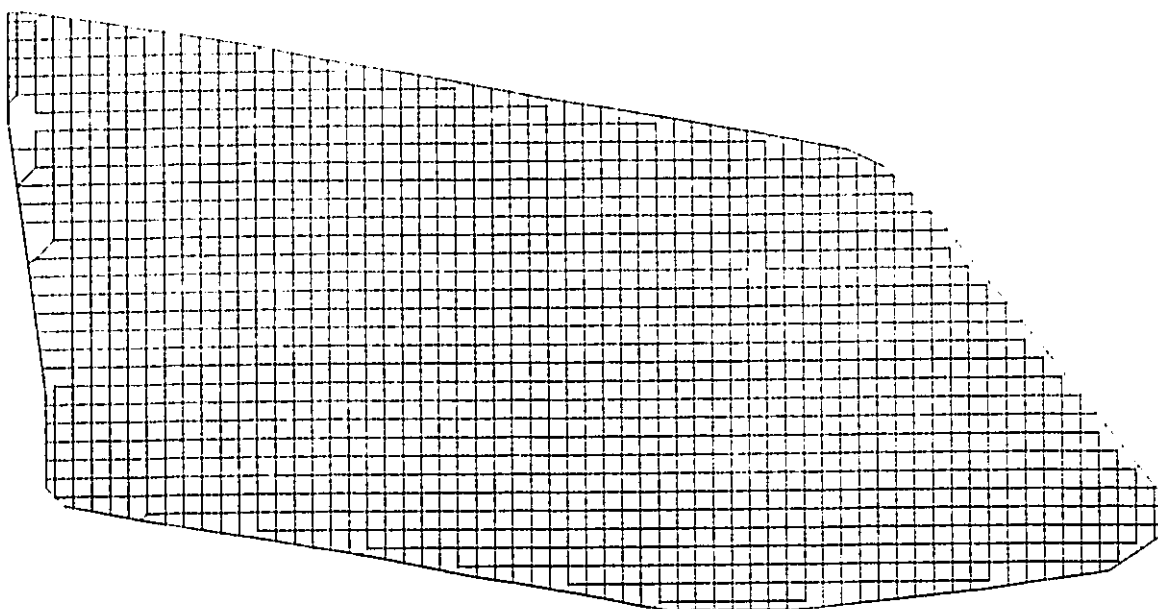


Figure 16 Illustration de la couverture POLYXYZ, constituée de 1459 polygones de Thiessen construits autour des 1459 points de la grille d'origine.

Tableau 20 Exemple du fichier d'attributs (POLYXYZ.PAT), suite à l'opération "JOINITEM" effectuée avec le fichier K2130.DBF. Cette procédure permettait d'ajouter la dernière colonne (KOP) au fichier PAT d'origine.

AREA	PERIMETER	POLYXYZ_	POLYXYZ_ID	Z	KOP
-579800000000.00	3264355.00	1	0		
100000000.00	40000.00	2	5	1	DFC
221428800.00	67480.89	3	14	1	DFC
503571600.00	88136.02	4	32	1	DFC
466666900.00	86942.56	5	59	1	DFC
400000000.00	80275.88	6	86	1	DFB
200000000.00	60000.00	7	4	1	DFB
400000000.00	80000.00	8	13	1	DFB
333333100.00	73609.19	9	113	1	DFB
266666900.00	66942.56	10	140	1	DFB

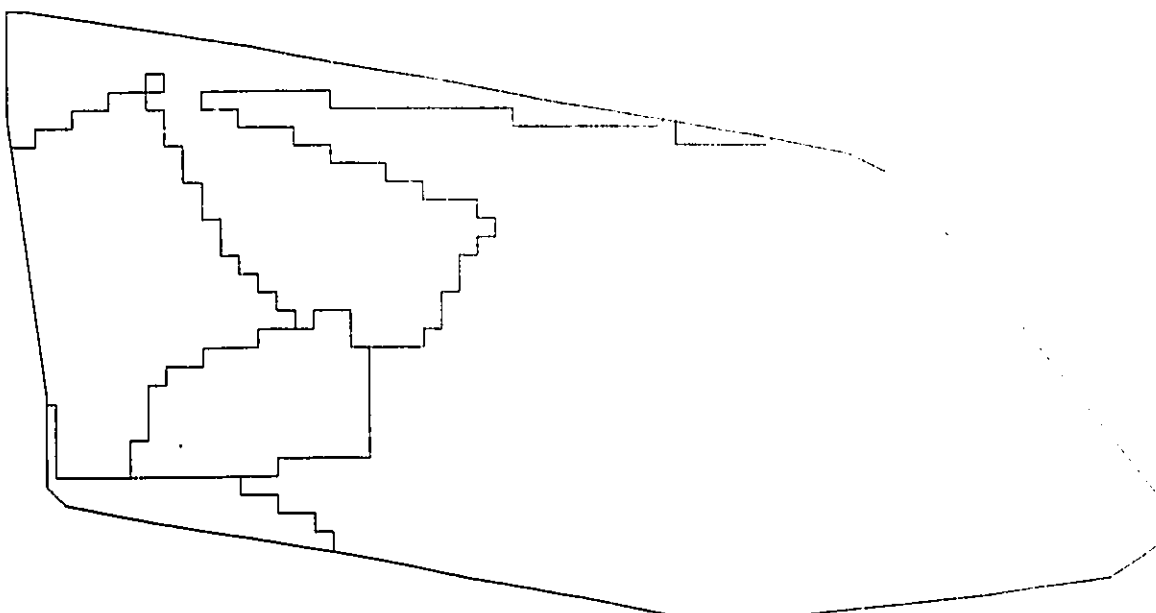


Figure 17 Illustration d'une carte climatique (couverture POLY2130) démontrant les régions climatiques, telles que définies selon la classification de Köppen.

Tableau 21 Exemple du fichier d'attributs (POLY2130.PAT) de la couverture POLY2130, additionné des colonnes KM2 et PCT, suite à l'opération "JOINITEM".

AREA	PERIMETER	POLY2130_	POLY2130_I D	KOP	KM2	PCT
-579800000000.00	3264355.00	1	0	0	-579800.00	-100.00
88861430000.00	3014328.00	2	1	DFC	88861.43	15.33
400000000.00	80000.00	3	2	DFB	400.00	0.07
70060010000.00	1418390.00	4	3	DFB	70060.01	12.08
371078600000.00	3468812.00	5	4	DFB	371078.60	64.00
1691667000.00	242666.30	6	5	DFC	1691.67	0.29
33600000000.00	880000.00	7	6	BSK	33600.00	5.80
14108330000.00	884552.20	8	7	DFC	14108.33	2.43

Une autre colonne suivait (PCT), avec le pourcentage de la superficie de chaque région par rapport à l'ensemble des régions climatiques. De nouveaux fichiers (SUP2130.DBF à SUP8190.DBF) étaient produits à partir de ces deux nouvelles colonnes et de celle qui consistait des numéros d'identification pour chaque région climatique (ex.: dans la colonne POLY2130_, du Tableau 21). Ces derniers fichiers étaient alors incorporés dans les fichiers d'attributs des couvertures POLY2130 à POLY8190, à l'aide de la commande "JOINITEM". Les couvertures qui en résultaient servaient plus tard à la dernière phase de l'analyse climatique, effectuée à l'aide de ARCEDIT.

4.5.5 La visualisation des résultats pour fin d'analyse

Le mode de visualisation des résultats, ainsi que les outils utilisés à cet effet, variaient selon le type d'analyse effectué au cours de cette recherche. Les résultats de la classification annuelle et décennale étaient analysés surtout à partir de tableaux, construit avec l'aide d'Excel (Macintosh). La dernière partie de l'analyse était effectuée à l'aide de ARCEDIT, en affichant sur écran chaque carte climatique (couvertures POLY2130 à POLY8190), avec la couverture REGION3 en arrière plan (voir procédures à l'Annexe 14). La sélection de points reliés aux régions climatiques, ainsi que l'affichage sur écran des données qui y sont rattachées (fichiers PAT des couvertures), permettaient d'étudier plusieurs aspects de ces cartes climatiques, tels que la classification de chaque région, sa superficie et le pourcentage de superficie par rapport à l'ensemble de chaque couverture. Ces dernières étaient aussi comparées entre elles, afin de vérifier les tendances spatiales, perceptibles au niveau des variations climatiques des Prairies, pendant la période de 1921 à 1990.

CHAPITRE 5

LES RÉSULTATS: ANALYSE ET DISCUSSION

5.1 Introduction

L'analyse des résultats obtenus pour cette étude, sera abordée en trois parties principales, la première touchant les résultats de la classification annuelle examinés surtout à partir de tableaux. Dans cette première section, nous ferons ressortir certaines caractéristiques climatiques des stations, d'après les statistiques compilées sur un tableau de distribution des différentes classes climatiques pour chaque station. Ensuite, il sera question d'analyser un graphique représentant le nombre annuel de stations classées BSk pour l'ensemble des Prairies. Cette figure sera aussi comparée à certaines informations publiées par Phillips (1990) et Jones (1991), au sujet des sécheresses importantes ayant affecté la région d'étude, ainsi qu'à un autre graphique démontrant les tendances de la température des Prairies, entre 1895 et 1991 (Gullett et Skinner, 1992). Dans la deuxième section, les résultats de la classification décennale seront analysés à partir d'un tableau.

La troisième partie abordera l'analyse des cartes climatiques basées sur la classification de Köppen. Une première carte, conçue pour la période de 1921-50, sera analysée et ensuite comparée à celle publiée dans l'Atlas du Canada (Canada, 1957) pour la même époque. Plus loin, il sera question d'étudier les variations climatiques pouvant se dégager, autant au niveau spatial que temporel, à partir de cartes décennales pour la période de 1921 à 90. Ces dernières seront comparées aux résultats indiqués sur le tableau de la classification décennale, ainsi qu'à certains résultats ressortant des études de Thomas (1970) et de Gullett et Skinner (1992). Finalement, une analyse sera effectuée à l'aide de cartes annuelles créées pour les années 1933-34 à 37-38. Ces cartes seront ensuite comparées aux informations publiées par Phillips (1990) et Jones (1991), au sujet des sécheresses importantes ayant affecté les Prairies. Afin de faciliter la compréhension des classes

climatiques mentionnées dans ce chapitre, une définition a été élaborée pour chacune d'elles (Tableau 22), en se basant surtout sur des termes utilisés dans l'Atlas du Canada (Canada, 1957). À ce tableau, se sont ajoutés trois nouvelles classes (Dva, Dvb et Dvc) dont le groupe (Dv) répond en même temps aux critères du groupe Ds et Dw (pour plus de détails, voir chapitre 3). Les critères établis pour la classification de Köppen (Tableau 2: chapitre 3) permettent aussi d'ajouter certaines précisions à ce niveau.

5.2 La classification annuelle

Les résultats, ressortant de la classification annuelle des stations météorologiques, sont présentés dans le tableau 23. En général, nous pouvons y observer, d'une année à l'autre, des changements fréquents de la classification pour chaque station. D'ailleurs, ces dernières sont rarement dotées de la même classe climatique pour plus de trois années de suite. Un fait particulier à remarquer est l'apparition en 1925-26, de la classe Cwb et Cvb (subtropical à hiver sec et subtropical à été et hiver sec), pour les stations de Calgary et Lethbridge respectivement, ce qui est particulièrement plus chaud que ce qui ressort habituellement pour ces endroits (habituellement "D"). Ceci s'explique par le fait que ces deux stations avaient des températures supérieures à -3°C pour le mois le plus froid (-2.1 à Calgary et -2.0 à Lethbridge), ce qui est suffisant pour être classées dans le type C (Tableau 2). Cependant cette situation n'est arrivée que pour ces deux stations et pour cette année là (1924-25).

Le tableau 24 permet de voir le nombre d'années où chaque station se retrouve à l'intérieur d'une classe particulière. Toutes les stations se retrouvent avec plusieurs classes climatiques différentes, ce nombre variant de six à dix. Par contre, certaines classes sont beaucoup plus fréquentes que d'autres. La dernière ligne du tableau 24 montre le total des fréquences pour chaque classe climatique, pour l'ensemble des stations et pour toute la période d'étude (1921-90). Ce sont surtout les catégories Dwb et Dvb qui ressortent le plus

Tableau 22 Définition des classes climatiques mentionnées dans cette étude, d'après la classification de Köppen.

Classe	Définition
BSk	Steppe de latitude moyenne; S = semi-aride
Dsa	Continental humide, à été chaud, saison sèche en été
Dva	Continental humide, à été chaud, saison sèche en été et en hiver
Dwa	Continental humide, à été chaud, saison sèche en hiver
Dfa	Continental humide, à été chaud, sans saison sèche
Dsb	Continental humide, à été frais, saison sèche en été
Dvb	Continental humide, à été frais, saison sèche en été et en hiver
Dwb	Continental humide, à été frais, saison sèche en hiver
Dfb	Continental humide, à été frais, sans saison sèche
Dsc	Subarctique, saison sèche en été
Dvc	Subarctique, saison sèche en été et en hiver
Dwc	Subarctique, saison sèche en hiver
Dfc	Subarctique, sans saison sèche

Tableau 23 Classification annuelle de Köppen, pour 17 stations des Prairies canadiennes (1921-1990), basée sur 12 mois qui chevauchent 2 années. Par exemple, l'année 21-22 commence en octobre 1921 et finit en septembre 1922.

An	Eds	Edm	Cal	Car	Let	Med	Swi	Sco	Sas	Pri	Reg	Est	Bra	Dau	Win	Gre	TPa
21-22	BSK	BSK	BSK	DVB	DVB	BSK	DVB	BSK	DVB	DVB	DFB	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB
22-23	DVC	DVB	DVB	DSB	DVB	BSK	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DSB	DSB	DSB	DSB	DSA	DVB
23-24	DWB	DWB	DWB	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	DVB	BSK	DVB	BSK	DVB	DVB	DWB	DWB	DVB
24-25	DVB	DFB	DVB	DSC	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB	DVB	DWB	DVB	DSB	DVB	DSB	DSB	DFB
25-26	DWC	DVB	CWB	BSK	CVB	BSK	DVB	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DVB	DSB	DFC
26-27	DWC	DFC	DVB	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DFB	DWB	DFB	DWB	DVB	DVB
27-28	DWB	DWB	DVB	DVB	DVB	BSK	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	BSK	DVB	DVB	DVC
28-29	DFC	DVB	BSK	DVC	DWC	BSK	DVB	BSK	DVC	DWC	DVB	DVB	DWC	BSK	DFB	DSB	DVC
29-30	DWC	BSK	DFB	DSB	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	DWB	DFB	DVB	DVB	BSK	DWB	DVB	DWC
30-31	DVC	DWB	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	BSK	BSK	DVB	BSK	DVB	DVB	DSB	DVB	DVB	DVB
31-32	DWB	DFB	DWB	DVB	DWB	DWB	DVB	DFB	DVB	DWB	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB	DSB	DSB
32-33	DSC	DFB	BSK	DSC	DFB	DSB	DWB	DFB	BSK	DFB	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DFB	DSB
33-34	DVB	DFB	DWB	DVB	DVB	DVB	DVB	DWB	DVB	DWB	DVB	DVB	DWB	DFB	DFB	DFB	DWB
34-35	DVB	DVB	DVB	DSB	DSB	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DVB	DVA	DWB	DVA	DVA	DVA	DWB
35-36	DFB	DWB	DSB	DVB	DSB	DSA	DFA	DVB	DVA	DSB	DSA	DSA	DFA	DSA	DSA	DVA	DWC
36-37	DVB	DWB	DWB	DSB	DSB	DSA	BSK	DFB	DVB	DSB	BSK	DSA	DWB	DFB	DWB	DFB	DSB
37-38	DWB	DVB	DWB	DFB	DFB	DVB	DSB	DFB	DFB	DSB	DFB	DSB	DSB	DSB	DSB	DVB	DVB
38-39	DVB	DSB	DVB	DVB	DVB	DSB	DWB	DVB	DVB	DSB	DSB	DWA	DWB	DVB	DWB	DWB	DWC
39-40	DSB	DSB	DVB	DVB	BSK	DVB	BSK	DSB	DSB	DSB	BSK	DWB	DWB	BSK	BSK	BSK	DFB
40-41	DVC	DVB	DSC	DFC	DWB	DVA	BSK	DSB	DSB	DSB	DVB	DWB	DWB	DWB	DVB	DVB	DFB
41-42	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	BSK	DWB	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DWC
42-43	DSC	DSB	DSB	DSC	DFB	DSB	DSB	DVB	DVB	DSB	DSB	DVB	DVB	DVB	DVB	DSB	DSC
43-44	DWB	DWB	DWB	DVB	BSK	BSK	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DVB	DVB	DSB
44-45	DWC	DVC	DWC	DVC	DWB	BSK	DFC	BSK	DWC	DWC	DWC	DVB	DWB	DVC	DFB	DVB	DFC
45-46	DVC	DWB	DVB	DFB	BSK	BSK	BSK	DWC	DWB	DFB	DWB	DSB	DFB	DWB	DFB	DSB	DFB
46-47	DWC	DWB	DFB	DSC	DSB	DSA	DFB	DVC	DFB	DVC	DWB	DVA	DFB	DWB	DWB	DFB	DFC
47-48	DWC	DFB	DVB	DSB	DSB	DSB	DSB	DSB	DFB	DVB	DSB	DVB	DSB	DSB	DSB	DSB	DVB
48-49	DVB	BSK	DVB	DVB	DVB	BSK	DVB	DWB	DWB	DVB	BSK	DVB	DVB	DVB	DSB	DVB	DFB
49-50	DVB	DWB	DWB	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DFB	DWB	DSB	DWB
50-51	DSC	DWB	DWB	DFC	DWB	DWB	DFB	DSB	DFB	DSB	DSB	DSB	DWB	DSB	DFB	DFB	DWB
51-52	DVB	DSB	DWB	DVB	DVB	DSB	DSB	DVB	DSB	DVB	DVB	DWB	DVB	DSB	DVB	DFB	DVB
52-53	DVC	DVB	DWB	DVB	DVB	DWB	DVB	BSK	BSK	DSB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB	DFB	DSB
53-54	DWC	DWB	DWC	DVC	DWB	DWB	DWB	DWC	DWB	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DFB	DWB
54-55	DWC	DWC	DVC	DVC	DVB	BSK	DVB	DWC	DFB	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DVB	DWC
55-56	DSC	DVB	DWB	DFB	DFB	DSB	DWB	DSB	DSB	DSB	DWB	DFB	DVB	DSC	DSB	DSC	DSB
56-57	DWB	DFB	DFB	DSB	DSB	DSB	DVB	BSK	DVB	DWB	DSB	DVA	DWB	DSB	DFA	DWB	DWB
57-58	DVB	DVB	DVB	DVB	DWB	DVB	DWB	DSB	DVB	DFB	DVB	BSK	DSB	DFB	DWB	DWB	DFB
58-59	DWC	DVC	DWC	DSC	DWB	DSB	DWB	BSK	DVB	DSC	DWB	DVB	DWB	DWB	DVB	DVB	DVC
59-60	DVB	DVB	DVB	DSB	DVB	DVA	DVB	BSK	DSB	DVB	DVB	DVB	DVB	DSB	DSB	DFB	DFB
60-61	DWC	DVB	BSK	DVC	BSK	BSK	DVB	BSK	BSK	DVB	BSK	BSK	DVB	DVB	DVB	DVB	DSC
61-62	DSC	DWB	BSK	DFB	DSB	DSB	DSB	DSB	DSB	DSB	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB	DVB	DVB
62-63	DFB	DWB	DWB	DVB	BSK	BSK	BSK	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DFB	DWB	DVB	DVB	DVB
63-64	DWC	DWB	BSK	DWC	DWB	BSK	BSK	DWB	BSK	DSB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DWB
64-65	DWC	DVC	DWC	DWC	DWB	DWB	DVC	DWC	DWB	DVC	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DVC
65-66	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DVB	DVB	DVB	DWB	DVB	DWB	BSK	DVB	DWB	DWB	DFB	DVB
66-67	DSB	DSB	DVB	DVB	DVB	DSB	DSB	DSB	DSB	DVB	DVB	DSB	DSB	DSB	DWB	DSB	DWB
67-68	DVC	DWC	DWB	DVB	DWB	BSK	DVB	DVB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB
68-69	DWC	DWC	DWB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DWB	DFB	DWB	DSB	DWB	DVB	DFC
69-70	DWB	DSB	DVC	DVC	BSK	BSK	DVB	DVB	DVC	DVB	DVB	DWB	DWB	DFB	DWB	DWB	DWB
70-71	DVB	DVB	DFB	DSC	DFB	DSA	DSB	DWB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DWB	DSB
71-72	DWC	DWB	DWB	DFC	DSB	BSK	DFB	DVB	DSB	DFB	DFB	DWB	DSB	DSB	DVB	DSB	DSB
72-73	DWC	DWB	DWB	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	DWB	DWB	DWB	BSK	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB
73-74	DFC	DSC	DWB	DWB	BSK	DSB	DWB	DWC	DWC	DVC	DWC	DSB	DFC	DSC	DWC	DWC	DSC
74-75	DWB	DWB	BSK	DWB	DVB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DWB	DWA	DWB	DWB	DWB	DWB	DWC
75-76	DWB	DWB	DWB	DVC	BSK	BSK	DVB	DVB	BSK	DVB	BSK	DSB	DSB	DVB	DVB	DVB	DWB
76-77	DWC	DWB	DVC	DVC	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	DVB	BSK	BSK	DVB	DVB	DVB	DWB	DWB

Tableau 23 Classification annuelle de Köppen, pour 17 stations des Prairies (suite).

An	Eds	Edm	Cal	Car	Let	Med	Swi	Sco	Sas	Pri	Reg	Est	Bra	Dau	Win	Gre	TPa
77-78	DWC	DWC	DWB	DWB	DWB	DWB	DVB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB	DWB
78-79	DWB	DWB	BSK	DSB	BSK	BSK	BSK	DWB	DWB	DWB	DWB	DFB	DFB	DSB	DWB	DWB	DWC
79-80	DVC	DVB	DWB	DWB	DWB	BSK	BSK	DWB	DVB	DVB	DWB	BSK	DVB	DVB	DSB	DVB	DSB
80-81	DVB	DVB	DVB	DSB	DVB	DVB	BSK	BSK	BSK	BSK	BSK	BSK	DWB	DWB	DWB	DVB	DVB
81-82	DVC	DVB	DVB	DSB	DSB	DFB	DWB	DWB	DWB	DVB	DSB	DVB	DWB	DWB	DVB	DWB	DSB
82-83	DWC	DVC	BSK	DVC	BSK	BSK	BSK	DVC	DWB	DWC	DVB	DVA	DVB	DVB	DVA	DVA	DWB
83-84	DVC	DVC	BSK	DWC	BSK	BSK	BSK	DVC	BSK	DWC	DVB	BSK	BSK	DWC	DWB	DWB	DSC
84-85	DWC	DWB	DWB	DWC	DSB	BSK	DFB	DSB	DSB	DFB	DSB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB	DVB
85-86	DVC	DWB	DWB	DSC	DWB	DVB	DWB	DVB	DVB	DWB	DWB	DWB	DFB	DFB	DWB	DWB	DWB
86-87	DVB	DWB	BSK	DVB	DWB	DVB	BSK	DWB	BSK	DWB	BSK	DVB	DVB	DWB	DVB	DVB	DSB
87-88	DVB	DWB	BSK	DSB	BSK	BSK	BSK	BSK	BSK	DVB	BSK	BSK	BSK	DWB	DVA	DVB	DFB
88-89	DWC	DWB	DWB	DWB	BSK	BSK	DFB	DWB	BSK	DWB	DWB	DWB	BSK	DVB	DVA	DVB	DVB
89-90	DWB	DVB	DWB	DSB	DSB	BSK	BSK	DVB	DVB	DWB	DVB	DVB	DWB	DFB	DWB	DWB	DFB

Tableau 24 Nombre d'années où chaque station se retrouve dans une classe particulière, d'après la classification de Köppen (1921-1990). Les trois dernières colonnes correspondent à certains groupes de climats, tels que les climats du type subarctique (dernière lettre = "c"), ainsi que ceux du type continental humide à été chaud ("a"), et à été frais ("b").

Stations	BSk	Cvb	Cwb	Dsa	Dva	Dwa	DfA	Dsb	Dvb	Dwb	Dfb	Dsc	Dvc	Dwc	Dfc	D..a	D..b	D..c
Edson	1							2	14	12	2	5	10	21	2	0	30	38
Edmonton	3							6	16	27	6	1	5	4	1	0	55	11
Calgary	12							2	18	24	4	1	3	4		0	48	8
Carway			1	2				12	20	7	4	7	9	5	3	3	43	24
Lethbridge	15							11	18	18	5			1		0	52	1
Med. Hat	31	1		4	2			11	12	8	1					7	32	0
Swift Cur.	19						1	7	22	13	5		1		1	1	47	2
Scott	15							9	16	16	4		3	6		0	45	9
Saskatoon	13				1			10	18	20	4		1	2		1	52	3
Prince Alb.	2							12	18	19	6	1	4	7		0	55	12
Regina	9			1				6	24	22	4			3		1	56	3
Estevan	10			2	4	2		7	20	20	4					8	51	0
Brandon	3						1	8	19	31	5			1	1	1	63	2
Dauphin	4			1	1			12	17	21	8	2	1	2		2	58	5
Winnipeg	1			1	3	1	1	8	17	31	5			1		6	61	1
Great Falls	1			1	3			10	23	19	10	1		1		4	62	2
The Pas								11	15	16	8	4	4	7	4	0	50	19
Total	139	1	1	12	14	3	3	144	307	324	85	22	41	65	12	34	860	140

souvent, avec respectivement 324 et 307 années/stations. Ensuite, suivent les classes Dsb (144 années/stations) et BSk (139), qui elles, se retrouvent avec un peu moins de la moitié des fréquences observées pour les deux catégories précédentes. Presque toutes les stations ont été le plus souvent classées Dwb ou Dvb, avec des fréquences variant de 16 à 31 années, à l'exception d'Edson et Medicine Hat, où ce sont respectivement les classes Dwc (21 années) et BSk (31) qui prédominent.

Ces fréquences observées sur le tableau 24 permettent aussi de faire ressortir certaines caractéristiques climatiques pour chaque station. Chacune de ces dernières a ses particularités, mais il est possible de voir des ressemblances parmi quelques unes de ces stations, en retenant surtout les fréquences les plus importantes (neuf et plus dans ce cas-ci). Edmonton, Brandon et Winnipeg ont été le plus souvent classées Dwb (27, 31 et 31 années respectivement) ou Dvb (16, 19 et 17), ce qui représente un climat continental humide, à été frais et à saison sèche en hiver (Dwb), ou avec saison sèche en hiver et en été (Dvb). C'est aussi le cas pour Calgary (24 années Dwb et 18 Dvb), Regina (22 et 24), Estevan (20 et 20) et Swift Current (13 et 22), mais ces stations se distinguent des trois précédentes par des conditions semi-arides qui surviennent assez souvent, d'après les fréquences de BSk (12, 9, 10 et 19 respectivement). La station de Swift Current se différencie davantage de ces dernières, par un nombre encore plus élevé d'années classées BSk (19), cette dernière catégorie étant la deuxième en importance pour cette station, après le Dvb (22). Lethbridge, Scott et Saskatoon ont aussi des caractéristiques semblables aux quatre dernières stations, avec les fréquences les plus importantes dans le Dwb (18, 16 et 20) Dvb (18, 16 et 18) et BSk (15, 15 et 13), elle sont aussi assez souvent classées Dsb (11, 9 et 10).

Les stations de Prince Albert, Dauphin, The Pas et Great Falls ressemblent à celles d'Edmonton, Brandon et Winnipeg, avec plusieurs années de catégories Dwb (19, 21 16) et Dvb (18, 17 et 15), mais en plus elles (Prince Albert...Great Falls) ont des fréquences relativement élevées de Dsb (12, 12 et 11 années = climat continental humide, à été frais et sec). Carway est plus fréquemment classé Dvb (20) et Dsb (12), et un peu moins dans le Dvc

(9). Cette dernière station, ainsi que celle de The Pas, se retrouvent assez souvent dans les classes dites subarctiques, d'après le total des fréquences pour les catégories finissant par la lettre "c" (24 et 19 respectivement). Edson est encore plus souvent classé subarctiques (38 années), la fréquence la plus élevée étant dans le Dwc (21), suivi de Dvb (14), Dwb (12) et Dvc (10). Medicine Hat semble être l'endroit le plus souvent semi-aride, avec 31 années de catégorie BSk. Cette station a aussi plusieurs années classées Dvb (12) et Dsb (11).

C'est ainsi que nous pouvons constater qu'aucune station ne peut être associée qu'à une seule classe climatique, mais à plusieurs catégories, d'après les fréquences observées sur le tableau 24. Par exemple, la station de Medicine Hat ne peut être considérée purement semi-aride (BSk = 31 années), car on y observe aussi des fréquences relativement élevées dans le Dvb (12) et le Dsb (11). Ceci démontre donc des variations importantes, d'une année à l'autre, au niveau des conditions climatiques qui affectent les Prairies. Malgré ce fait, des fréquences plus élevées peuvent indiquer une stabilité relative de certains types de climats pour des régions particulières. Ce niveau de stabilité relative, pour divers types de classes climatiques, varie d'une station à l'autre, ce qui laisse voir certaines tendances spatiales à ce niveau. En reportant sur une carte les fréquences observées pour la catégorie BSk (Figure 18), nous pouvons facilement voir les variations spatiales de cette stabilité relative pour cette classe (BSk). La station de Medicine Hat démontre le niveau de stabilité le plus élevé, avec 31 années classées BSk. Cette station a donc subi plus souvent des conditions semi-arides. À partir de cet endroit (Medicine Hat), la stabilité relative de la classe BSk diminue graduellement vers l'ouest, le nord et l'est. La station de Swift Current a la deuxième plus haute fréquence BSk (19 années), suivie de Lethbridge (15), Scott (15) Saskatoon (13), Calgary (12), Estevan (10) et Regina (9). Les autres stations, encore plus éloignées de Medicine Hat, ont des fréquences très peu élevées sinon inexistantes, variant de quatre à aucune année classée BSk.

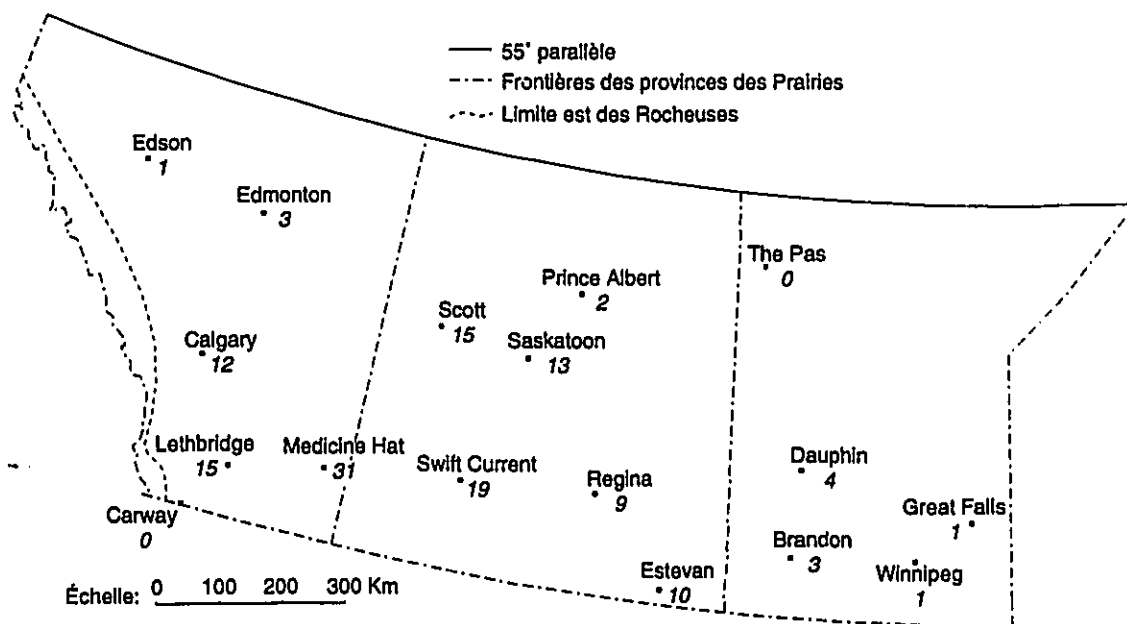


Figure 18 Répartition spatiale du nombre d'années classées BSk pour chaque station.

En regroupant les classes climatiques commençant par la lettre "D" en fonction de la dernière lettre, nous pouvons évaluer la stabilité relative de certains groupes de climats, tels que les climats du type subarctique (dernière lettre = "c"), ainsi que ceux du type continental humide à été chaud ("a"), et à été frais ("b") (voir tableau 24). La figure 19 présente la répartition spatiale du groupe climatique le plus fréquent; c'est-à-dire continental humide à été frais (dernière lettre = "b"). Les fréquences pour ce dernier groupe climatique sont relativement élevées pour presque toutes les stations. Edson possède les fréquences les moins élevées (30 années) à ce niveau, suivi de Medicine Hat (32). À partir de cette dernière station, les fréquences augmentent graduellement en allant vers l'ouest, le nord et l'est, pour ensuite diminuer lorsqu'on s'approche d'Edson (30) et de Carway (43). Ce groupe de climats (continental humide à été frais) est le plus stable surtout au sud-est des Prairies, avec des valeurs de 58, 63, 61 et 62 respectivement à Dauphin, Brandon, Winnipeg et Great Falls.

Les climats subarctiques sont généralement moins fréquents que pour le groupe précédent; les nombres les plus élevés se retrouvant spécialement à Edson (38 années), Carway (24), The Pas (19), Prince Albert (12) et Edmonton (11). Ces valeurs s'expliquent surtout par la position nordique de ces dernières stations, à l'exception de Carway, où c'est surtout l'altitude (1359 m) qui en est responsable. Les climats de type continental humide à été chaud (dernière lettre = "a") sont assez peu fréquents, avec les valeurs les plus élevées se retrouvant à Estevan (8), Medicine Hat (7) et Winnipeg (6). Ces conditions relativement plus chaudes se reproduisent donc au sud des Prairies.

Les fréquences observées dans cette partie de l'étude permettent donc de faire ressortir les variations spatiales, au niveau de certains types de climats qui apparaissent à une fréquence variable selon les stations. En calculant le nombre annuel de stations se retrouvant dans chaque classe climatique, il est possible de vérifier certaines variations temporelles pour l'ensemble des Prairies (Tableau 25). Le nombre annuel de stations classées BSk devrait donner certains indices concernant les années ayant subi des sécheresses importantes, du fait que cette catégorie représente un climat semi-aride.

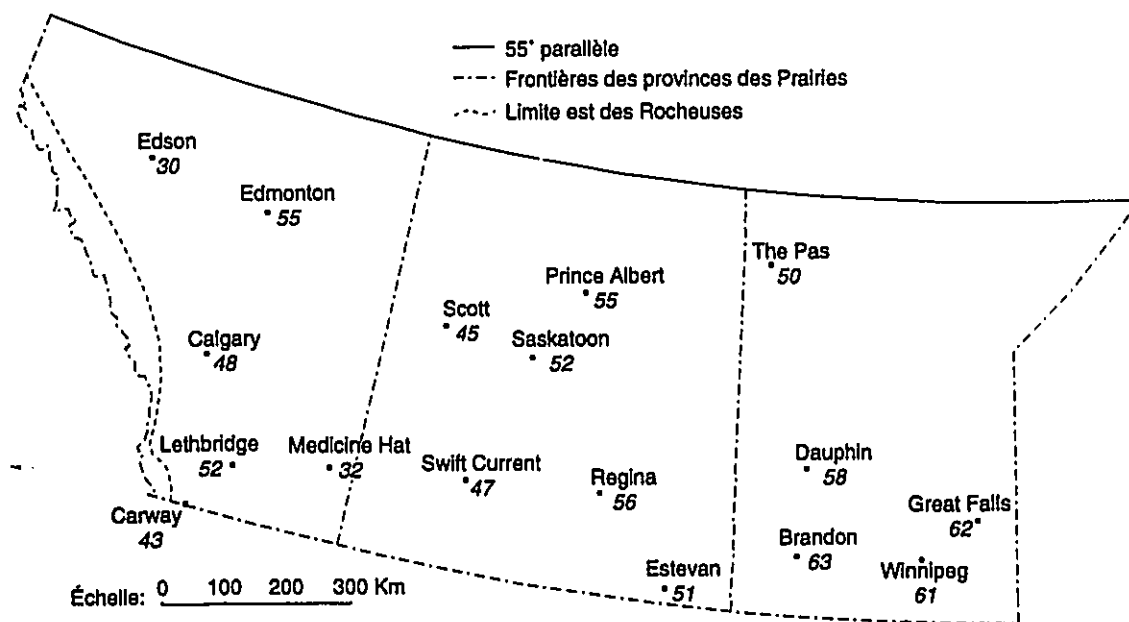


Figure 19 Répartition spatiale du nombre d'années classées dans le groupe du type continental humide à été frais (classes finissant par un "b")

Tableau 25 Nombre annuel de stations se retrouvant dans chaque classe climatique de Köppen. Les trois dernières colonnes correspondent à certains groupes de climats, tels que les climats du type subarctique (dernière lettre = "c"), ainsi que ceux du type continental humide à été chaud ("a"), et à été frais ("b").

Années	BSk	Dsa	Dva	Dwa	Dfa	Dsb	Dvb	Dwb	Dfb	Dsc	Dvc	Dwc	Dfc	D..a	D..b	D..c
21-22	5						6	5	1					0	12	0
22-23	1	1				5	6	3			1			1	14	1
23-24	6						6	5						0	11	0
24-25						3	8	3	2	1				0	16	1
25-26	2	Cwb	Cvb			1	5	5				1	1	0	11	2
26-27							4	8	2			2	1	0	14	3
27-28	2						12	2			1			0	14	1
28-29	4					1	4		1		3	3	1	0	6	7
29-30	6					1	4	2	2			2		0	9	2
30-31	7					1	7	1			1			0	9	1
31-32						2	6	7	2					0	17	0
32-33	2					2	2	4	5	2				0	13	2
33-34							8	5	4					0	17	0
34-35			3	1		2	6	5						4	13	0
35-36		5	2		2	3	2	1	1			1		9	7	1
36-37	2	2				4	2	4	3					2	13	0
37-38						6	2	4	5					0	17	0
38-39			1			4	7	4				1		1	15	1
39-40	6					5	3	2	1					0	11	0
40-41	1		1			3	4	4	1	1	1		1	1	12	3
41-42	1					2		11				3		0	13	3
42-43					7	6			1	3				7	7	3
43-44	2					1	8	6						0	15	0
44-45	2						2	2	1		3	5	2	0	5	10
45-46	3					2	1	4	5		1	1		0	12	2
46-47		1	1			1		4	5	1	2	1	1	2	10	5
47-48						10	4		2			1		0	16	1
48-49	3					1	10	2	1					0	14	0
49-50						1	4	11	1					0	17	0
50-51						5		6	4	1			1	0	15	2
51-52						5	9	2	1					0	17	0
52-53	2					2	5	6	1		1			0	14	1
53-54								11	1		1	4		0	12	5
54-55	1						4	4	1		2	5		0	9	7
55-56						6	2	3	3	3				0	14	3
56-57	1		1		1	5	2	5	2					2	14	0
57-58	1					2	7	4	3					0	16	0
58-59	1					1	4	5		2	2	2		0	10	6
59-60	1		1			4	10		1					1	15	0
60-61	7						7			1	1	1		0	7	3
61-62	1					6	5	3	1	1				0	15	1
62-63	3						4	8	2					0	14	0
63-64	4					1	1	9				2		0	11	2
64-65								7			4	6		0	7	10
65-66	1						7	8	1					0	16	0
66-67						10	5	2						0	17	0
67-68	1						4	10			1	1		0	14	2
68-69						1	8	4	1			2	1	0	14	3
69-70	2					1	4	5	1		3	1		0	11	4

Tableau 25 Nombre annuel de stations se retrouvant dans chaque classe climatique de Köppen (suite).

Années	BSk	Dsa	Dva	DwA	DfA	Dsb	Dvb	Dwb	Dfb	Dsc	Dvc	Dwc	Dfc	D..a	D..b	D..c
70-71		1				2	8	3	2	1				1	15	1
71-72	1					6	2	3	3			1	1	0	14	2
72-73	5						1	10				1		0	11	1
73-74	1					2		3		3	1	5	2	0	5	11
74-75	1			1			2	12				1		1	14	1
75-76	3					2	7	4			1			0	13	1
76-77	6						5	3			2	1		0	8	3
77-78							2	13				2		0	15	2
78-79	4					2		8	2			1		0	12	1
79-80	3					2	6	5			1			0	13	1
80-81	6					1	7	3						0	11	0
81-82						4	5	6	1		1			0	16	1
82-83	4		3				3	2			3	2		3	5	5
83-84	7						1	2		1	3	3		0	3	7
84-85	1					4	6	2	2			2		0	14	2
85-86							3	10	2	1	1			0	15	2
86-87	4					1	7	5						0	13	0
87-88	9		1			1	3	2	1					1	7	0
88-89	3		1				3	8	1			1		1	12	1
89-90	2					2	5	6	2					0	15	0

La figure 20 permet de faire ressortir les années ayant plusieurs stations classées BSk. L'année avec la fréquence la plus élevée est celle de 1987-88, avec neuf stations de catégorie semi-aride (BSk). Ensuite viennent les années 30-31, 60-61 et 83-84 (7 stations classées BSk), suivies de 23-24, 29-30, 39-40, 76-77 et 80-81 (6 stations classées BSk). La figure 20 démontre aussi certaines périodes ayant plusieurs années avec des fréquences plus élevées. De 1921 à 31, nous retrouvons quatre années (avec des fréquences de cinq et plus (stations classées BSk). La période de 1931 à 72 n'a que deux années avec six (39-40) et sept stations (60-61) classées BSk. De 1972 à 88, il y a cinq années avec cinq stations ou plus de catégories BSk.

Afin de comparer ces résultats (années classées BSk) aux années de sécheresse mentionnées par Phillips (1990) (voir section 2.1) et Jones (1991) (voir section 2.2), il faut tenir compte de la distribution des mois utilisés pour cette classification. Dans le cas de la présente étude, l'année 1921-22 correspond à la période d'octobre 1921 à septembre 1922. Cette période étant plus longue en 1922, nous pouvons associer l'année 1921-22 de la figure 20 à l'année 1922 des autres études. Les résultats, concernant les années classées BSk, ne se comparent pas toujours bien à ceux provenant de Phillips (1990) et de Jones (1991). Les sécheresses énoncées par ces deux auteurs, pour les années 1961, 77, 81, 84 et 88, correspondent à des années ayant des fréquences relativement élevées; c'est-à-dire, de six à neuf stations classées BSk. Par contre les années 1933, 36-38, 66, 67, 79, 80 et 85 (années de sécheresse) ont très peu sinon aucune station classée BSk (de 0 à 4 stations).

En comparant la figure 20 à celle de Gullett et Skinner (Figure 5), nous constatons que les années ayant un nombre élevé de stations classées BSk correspondent très souvent aux années relativement plus chaudes. C'est surtout le cas pour les années 1930 (29-30 pour la présente étude), 31, 40, 61, 73, 77, 81, 84 et 88, où les fréquences des stations BSk sont de cinq et plus. Ceci démontre le lien entre la classification BSk et les températures relativement élevées, surtout si on considère que des températures plus élevées peuvent contribuer à un plus haut taux d'évaporation.

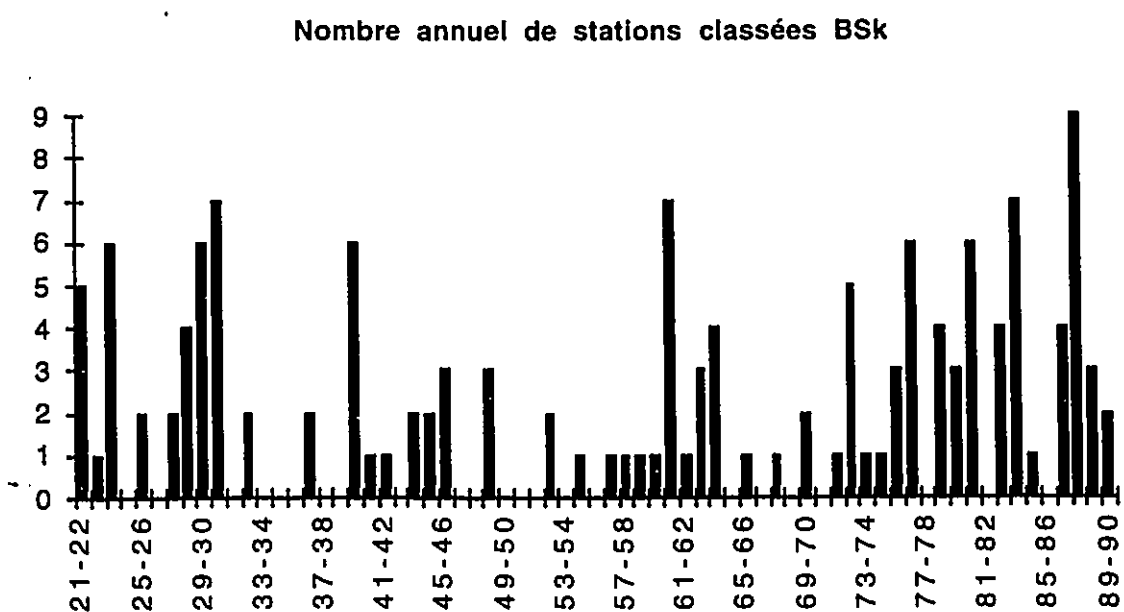


Figure 20 Histogramme représentant le nombre de stations classées BSk, d'après la classification climatique de Köppen.

En combinant ces deux dernières analyses, nous pouvons remarquer que les nombres de stations classées BSk correspondent aux années de sécheresse (Phillips, 1990 et Jones, 1991), surtout lorsque les températures sont relativement élevées (pour 1961, 77, 81, 84 et 88), d'après la figure 5 (Gullett et Skinner, 1992). La comparaison se fait moins bien, entre les fréquences BSk et les années de sécheresse, surtout lorsque les températures sont en bas de la moyenne pour 1951-80. Ceci est le cas pour les années 1933, 36, 37, 66, 67, 79 et 85, sauf pour les années 1938 et 80, où les températures sont relativement élevées. L'explication vient du fait que dans la classification de Köppen, les moyennes annuelles des températures jouent un très grand rôle dans le calcul du niveau d'aridité qui définit le groupe "B". Les formules utilisées pour définir les climats secs ("B") (voir Tableau 2) sont basées sur le fait que le taux d'évaporation augmente avec l'accroissement des températures, ce qui peut contribuer à un assèchement assez important, si les précipitations sont peu abondantes. Les moyennes annuelles de températures ou de précipitations peuvent parfois masquer des événements climatiques très importants. Par exemple, l'année 1936 apparaît relativement froide, d'après la figure 5 (Gullett et Skinner, 1992), ce qui ne semble pas concorder avec certaines informations que Jones (1991) mentionne; c'est à dire que l'année 1936 était inégalée au niveau des températures maximums, par exemple à Regina on a enregistré 45 jours avec des températures supérieures à 30°C. Ces températures élevées en été n'apparaissent pas dans les moyennes annuelles, car elles ont été contrebalancées par des températures plus froides d'une autre partie de l'année. Dans ce cas-ci, la moyenne annuelle ne reflétait pas ces températures élevées, qui elles, ont sûrement contribué à un assèchement important des Prairies. Dans ce cas-ci, la classification de Köppen aurait sous-estimé le niveau d'aridité de cette région pour cette année là.

D'autre part, certaines contradictions peuvent parfois ressortir entre ces diverses études, mais ces différences peuvent s'expliquer lorsqu'on regarde certains détails de plus près. Par exemple, nous retrouvons en 1936 neuf stations classées dans le groupe climatique dit continental humide à été chaud (classes finissant par la lettre "a"), ce qui représente, dans

la présente étude, la fréquence la plus élevée pour ces types de climats relativement chauds. La différence, observée entre ces derniers résultats et ceux de Gullett et Skinner (1992), peut premièrement s'expliquer par le fait que le mode de calcul n'est pas le même pour ces études. Dans le cas de la présente étude, les résultats sont basés sur la moyenne des températures pour le mois le plus chaud ($\Rightarrow 22^{\circ}\text{C}$). L'étude de Gullett et Skinner (1992) est plutôt basée sur des températures moyennes pour toute l'année. Ces moyennes peuvent donc cacher certains événements climatiques importants tels que des températures anormalement élevées en été.

Un autre facteur important à considérer est l'aspect spatial de ces diverses études. La figure 5 (Gullett et Skinner, 1992) présente des moyennes établies pour l'ensemble des Prairies, ce qui peut cacher des variations spatiales importantes au niveau des températures pouvant exister aux différents endroits. C'est pourquoi il est important de tenir compte de l'aspect spatial de ces données, en traitant ces dernières de sorte à faciliter l'analyse spatiale du climat des différentes parties de la région d'étude. Cette tâche peut surtout être facilitée par la création de cartes climatiques. La création de telles cartes au niveau annuel peut exiger un temps considérable. C'est pourquoi nous nous sommes limité à quelques cartes annuelles seulement. La période du "Dust Bowl" (1936-38) était très importante pour l'histoire des Prairies, d'après Phillips (1990) et Jones (1991). C'est ce qui nous a amené à créer des cartes climatiques annuelles de 1933-34 à 37-38, afin de voir comment la climat a pu varier pour cette région, autant au niveau spatial que temporel, pendant cette époque particulière, ainsi que durant les deux années précédentes (1934-35). Mais avant d'aborder l'analyse des ces cartes, nous feront l'étude de la classification décennale.

5.3 La classification décennale

En vérifiant les résultats sur le tableau 26, nous voyons d'abord que la classification décennale démontre beaucoup moins de variations que dans le cas de la classification annuelle. D'ailleurs, plusieurs stations ont la même classification pendant toute la période

Tableau 26 Classification décennale pour chaque station, d'après la classification climatique de Köppen.

Stations	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90
Edson	Dfc	Dfc	Dfc	Dfc	Dfc	Dfc	Dfc
Edmonton	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dwb
Calgary	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Carway	Dfc	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfc
Lethbridge	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Medicine Hat	BSk	Dfb	Dfb	Dfb	BSk	BSk	BSk
Swift Current	Dfb	BSk	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Scott	Dfc	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Saskatoon	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	BSk
Prince Albert	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Regina	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Estevan	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Brandon	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Dauphin	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Winnipeg	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
Great Falls	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb
The Pas	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfb	Dfc

d'étude, telles qu'à Calgary, Lethbridge, Prince Albert, Regina, Estevan, Brandon, Dauphin, Winnipeg et Great Falls (classées Dfb), ainsi qu'à Edson (classée Dfc). Les autres stations se retrouvent avec seulement deux classes différentes. Edmonton est presque toujours dans le Dfb, sauf pour la décennie de 1981-90 où les hivers sont relativement plus secs (Dwb). Carway, Scott et The Pas se retrouvent aussi presque toujours dans le Dfb, à l'exception de certaines périodes relativement plus froides (Dfc), telles que celle de 1921-30 pour Scott et Carway, 1971-80 pour The Pas et 1981-90 pour Carway. Saskatoon et Swift Current sont généralement classés Dfb, sauf pour une décennie plus sèche (BSk) de 1931 à 40 pour Swift Current, et de 1981 à 90 pour Saskatoon. Finalement, Medicine Hat est la seule station à être la plus souvent classée BSk (1921-30, et de 1961 à 90), mais le Dfb (plus humide) apparaît de 1931 à 60.

Un fait important à remarquer, est le nombre beaucoup moins élevé de classes différentes qui apparaissent dans la classification décennale par rapport à la classification annuelle (voir tableau 24). Nous remarquons la disparition complète, ou presque, des classes de type Ds, Dw et Dv (respectivement avec saison sèche en été, en hiver ou les deux), surtout que ces deux derniers (Dw et Dv) dominaient pour toutes les stations, sauf pour Medicine Hat (BSk dominant). Ceci s'expliquerait du fait que le calcul des moyennes mensuelles sur dix ans, diminue énormément les écarts entre les valeurs extrêmes. Par exemple, lors de la classification annuelle, il arrivait plus souvent qu'au moins un mois, parmi les six mois les plus froids, soit suffisamment sec pour que les précipitations de ce mois comptent pour moins de 1/10 des précipitations du mois le plus humide, parmi les six mois les plus chauds (voir Tableau 2). Ces conditions, combinées avec d'autres, permettaient alors une classification Dwb. Par contre, ce mois le plus sec n'est pas toujours le même d'une année à l'autre, et peut aussi être beaucoup plus humide pendant certaines années. En incluant ces mois plus humides dans les calculs, les moyennes décennales pour ces mois les plus secs devenaient assez élevées pour ne plus remplir les conditions nécessaires à une classification Dwb. Dans ces cas-ci, c'était plutôt la catégorie Dfb qui apparaissait. Ce genre de nivelage des données

extrêmes expliquerait aussi la disparition totale des onze autres classes climatiques (Cvb, Cwb, Dsa, Dva, Dwa, Dfa, Dsb, Dvb, Dsc, Dvc et Dwc) qui apparaissaient dans la classification annuelle.

La classification décennale diminue ainsi les détails ressortant de la classification annuelle, au niveau de certaines variations climatiques importantes qui se produisent à l'intérieur de chaque décennie. Par contre, les tendances qui ressortent de cette classification décennale devraient avoir une importance accrue, du fait que ces tendances représentent un nombre plus important d'années (10). Les résultats illustrés au tableau 26 correspondent beaucoup plus aux classes observées sur les cartes de Köppen, illustrées sur les figures 9 et 10 (voir chapitre 3). Ceci s'explique du fait que la classification décennale se rapproche beaucoup plus du mode de calcul habituellement utilisé pour l'établissement de cette classification. D'après le tableau 26, seulement sept stations démontrent certaines variations climatiques. Par contre, en créant des cartes climatiques à partir de la classification décennale il est possible de vérifier comment ces variations se produisent au niveau spatial.

5.4 Les cartes climatiques

Les cartes climatiques, conçues à partir de la classification de Köppen, démontrent des résultats très intéressants (ex.: Figure 21). Une superficie totale de 579 800 km² a été classée pour toutes les cartes, ce qui couvre assez bien la région d'intérêt pour cette recherche. En principe, cette superficie devrait être plus étendue, de sorte à englober les stations situées à l'extérieur de cette dernière. Cette situation est due à une perte d'information en périphérie, lors des multiples étapes nécessaires à la création des régions climatiques. Les "TIN" (réseaux de triangles irréguliers: voir la section 4.5.4) construits au premier stade de la conception, incluaient les stations périphériques servant à ce processus. L'étape suivante créait des grilles de points situés à l'intérieur des limites de ces premiers "TIN". Ces mêmes points servaient plus tard à construire une deuxième série de "TIN", où les limites externes s'arrêtaient cette fois-ci aux points périphériques de ces mêmes grilles;

c'est-à-dire à l'intérieur des limites établies pour les premiers "TIN". Nous pouvons donc assumer que la zone classée pourrait s'étendre au moins jusqu'aux stations périphériques, car ces dernières ont fourni les informations nécessaires à la création des régions climatiques ressortant de ces multiples étapes.

Il peut aussi y avoir un facteur d'erreur plus important près des limites externes de la zone classée, surtout aux endroits où les stations sont très espacées. Ceci peut être le cas entre Edson et The Pas, où presque 1000 km séparent ces deux stations. Lors de la construction des premiers "TIN", un vecteur s'était dressé entre ces deux stations, du fait qu'aucune autre station n'était située entre celles-ci. Les valeurs interpolées entre Edson et The Pas, pourraient être moins fiables, en sachant que la différence pouvant exister entre le climat de ces deux stations, n'est pas nécessairement répartie uniformément dans l'espace. Plus la distance est grande entre les stations, plus il y a de chances que le climat entre celles-ci puisse être très différent de ce qui est interpolé. Par exemple, sur la carte de 1921-30 (Figure 22a), il y a une zone classée Dfc formant une pointe qui s'étend presque jusqu'à The Pas. S'il y avait eu une autre station, classée Dfb et localisée à mi-chemin entre Edson et The Pas, cette pointe Dfc aurait diminué par plus de la moitié de sa longueur actuelle, se limitant surtout à l'ouest de la carte.

Cette situation pourrait aussi être semblable entre Carway et Estevan, ces dernières étant espacées par près de 800 km. Dans ce cas-ci, le facteur d'erreur pourrait être beaucoup plus évident du fait qu'il y a une importante différence d'altitude entre ces deux stations (788 m). En tenant compte de l'influence que peut avoir ce facteur sur les températures, nous pouvons déduire que la classification Dfc (relativement plus froid que Dfb) attribuée à Carway, pour la période de 1921-30, serait en partie due à l'altitude plus élevée pour cette station (1359 m). Cette différence d'altitude entre Carway et Estevan (571 m) n'est pas nécessairement répartie de façon graduelle dans l'espace. En connaissant la topographie de cette région, nous savons que l'altitude diminue beaucoup plus rapidement dans la partie des "Foothills", que ce qui est observé à cet égard pour les Prairies. En comparant l'élévation de

Carway et Lethbridge (899 m), nous pouvons remarquer un écart de 460 m d'altitude, réparti sur moins de 100 km de distance qui sépare ces deux stations. Une autre station placée entre Carway et Estevan, à près de 100 km de Carway, aurait probablement été classée Dfb, en 1921-30, à cause d'une altitude moins élevée. La présence d'une telle station aurait ainsi contribué, pour la période de 1921-30, à une zone Dfc s'étendant beaucoup moins à l'est de Carway.

Il faut donc tenir compte de ces facteurs d'erreur pendant l'analyse des cartes climatique. Par contre, ces facteurs d'erreur ne sont pas toujours aussi importants d'une période à l'autre de l'étude. La meilleure façon d'éviter ce genre de problème, serait d'avoir un nombre plus important de stations encore mieux réparties dans l'espace. Malheureusement, il est impossible de trouver plus de stations ayant des données complètes pour une aussi longue période de temps (1921-90). Par contre, la distance séparant la majorité des stations, est loin d'être aussi importante que celles mentionnées plus haut. Ce fait, combiné à une assez bonne répartition entre la plupart des stations, devrait contribuer à une représentation assez fiable de la répartition spatiale des conditions climatiques affectant toute la zone classée, surtout pour la partie intérieure de cette dernière.

Les cartes climatiques construites pour cette étude, seront donc analysées en trois phases. La carte de 1921-50 sera premièrement comparée à une autre construite de façon manuelle, à partir de la classification de Köppen établie pour la même période de temps. Cette dernière, publiée dans la troisième édition de l'Atlas du Canada (Canada, 1957), servira à vérifier la validité des cartes conçues pour la présente recherche. La deuxième partie de l'analyse se fera au niveau des cartes décennales, et en troisième lieu à partir des cartes de 1933-34 à 37-38. Aussi dans cette dernière section, il sera question de comparer une de ces dernières cartes (1936-37) avec une autre, pour la même année, cette fois-ci créée à l'aide des données provenant de 74 stations. Les Tableaux 27 et 28 présentent des statistiques reliées à toutes ces cartes climatiques, concernant les superficies totales (en km²) pour chaque classe climatique, ainsi que le pourcentage de ces superficies par rapport au total de la zone classée

(579 800 km²). Ces superficies doivent toujours être interprétées avec certaines réserves, car leur précision n'est sûrement pas ce qu'elle pourrait être avec plus de stations. Par contre, ces superficies, combinées à la position des limites séparant les régions climatiques, peuvent donner une idée approximative de certaines variations spatiales et temporelles du climat des Prairies pour la période d'étude.

5.4.1 La carte de 1921-50

La carte construite pour la période de 1921-50 (Figures 21) démontre une classification Dfb pour la plus grande partie de la zone classée (579 800 km²) avec une superficie totale de 567 592 km² (97,89% de la superficie classée) (Tableau 27). Trois polygones sont classés BSk, deux d'entre eux étant situés juste au nord de Medicine Hat (4 000 km²: 0,69% ; 400 km²: 0,07%) et le troisième à l'est de cette station. L'étendue totale de ces zones semi-arides représente 9 200 km² (1,59%). La partie nord-ouest de la région étudiée, est dotée de quatre petites zones relativement froides (Dfc), la première étant localisée près d'Edson (721 km²: 0,12%) et les trois autres se situant entre cette dernière et la frontière est de l'Alberta (1 229 km²: 0,21%; 825 km²: 0,14%; 231 km²: 0,04%). La surface totale ainsi classée, est de 3 007 km² (0,51%).

En comparant cette carte à celle publiée dans l'Atlas du Canada (Figure 10: voir chapitre 3), nous pouvons voir certaines ressemblances, mais aussi quelques différences notables. Premièrement, dans les deux cas nous retrouvons une classification Dfb pour la plus grande partie de la région étudiée. Aussi, les zones classées BSk sont situées dans le même secteur pour les deux cartes, sauf que l'étendue totale est beaucoup plus réduite sur la carte de la présente étude. La superficie classée BSk dans l'Atlas, s'étend un peu plus dans toutes les directions, pour un total d'environ 149 000 km². Deux petites zones classées Dfb,

Page suivante:

Figure 21 Carte climatique établie pour la région des Prairies et autour (1921-50), d'après la méthode de classification de Köppen.

Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1921-1950)

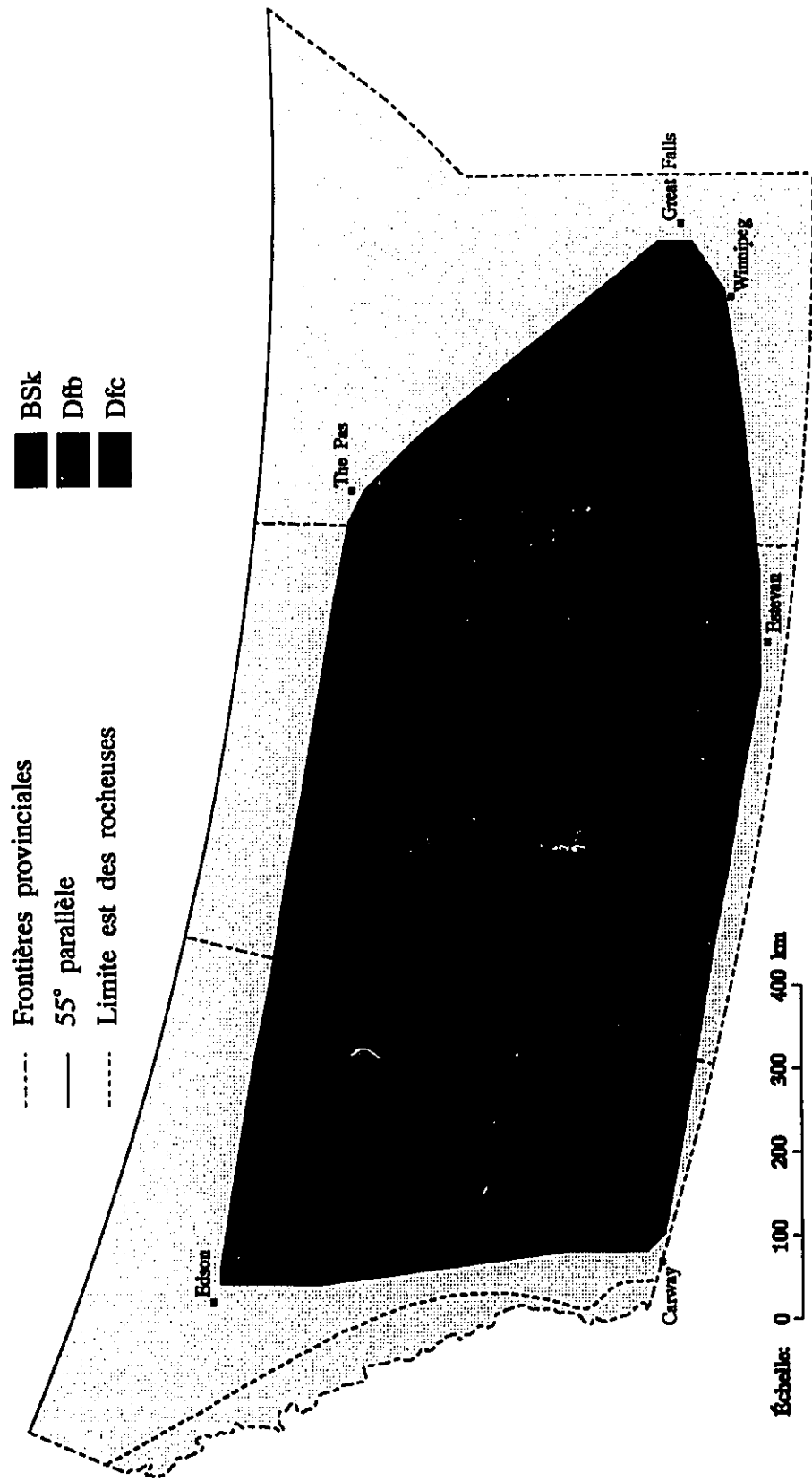


Tableau 27 Superficie totale (en km²) ressortant pour chaque classe climatique, pour les périodes de 1921-50 et de 1921-30 à 1981-90, ainsi que le pourcentage de ces superficies par rapport au total des étendues classées (579 800 km²).

Classe	21-50	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90
BSk	9200 1.59%	33600 5.8%	3200 0.55%	2800 0.48%		25600 4.42%	31200 5.38%	44800 7.73%
Dwb								37200 6.42%
Dfb	567592 97.89%	441538 76.15%	575048 99.18%	573142 98.85%	575942 99.33%	543761 93.78%	509910 87.95%	492417 84.93%
Dfc	3007 0.51%	104661 18.05%	1551 0.26%	3857 0.66%	3857 0.66%	10438 1.8%	38690 6.67%	5382 0.92%

se retrouvent à l'intérieur de cette dernière, une première étant localisée au sud-est de Medicine Hat et l'autre autour de Swift Current. Dans les deux cas, les parties classées Dfc sont situées aux mêmes endroits, sauf qu'elles sont plus étendues dans l'Atlas. La zone Dfc de cette dernière carte, s'approche beaucoup plus d'Edmonton dans le secteur nord-ouest de la région, et descend plus près de Scott et Prince Albert. Toutes les stations ont la même classification sur ces deux cartes, sauf pour Medicine Hat qui se retrouve avec BSk pour l'Atlas, et Dfb pour la présente étude.

Les différences observées entre ces deux cartes peuvent sembler assez importantes, mais elles peuvent s'expliquer par certains détails importants à mentionner. Premièrement, la station de Medicine Hat n'a pas été classée BSk, mais aurait pu l'être en ayant légèrement modifié les critères utilisés pour établir cette catégorie. À Medicine Hat, les précipitations pour les six mois d'été (23,09 cm) représentent 69,11% des précipitations annuelles (33,41 cm), ce qui résultait de l'application de la formule $2t + 14$ (voir tableau 2 pour critères de classification) lors de la classification de cette station et de ses environs. Le résultat de cette formule (25,36) étant inférieur aux précipitations annuelles (33,41 cm), Medicine Hat n'était pas classée BSk. Par contre, 69,11% est tellement près de 70%, que l'on pourrait facilement considérer d'utiliser la formule $2t + 28$, d'où le résultat (39,36) serait supérieur aux précipitations annuelles. Medicine Hat et ses environs pourraient ainsi être classés BSk, ce qui donnerait des résultats plus près de ce qui ressort sur la carte de l'Atlas national (Figure 10). La station de Swift Current avait des précipitations d'été (27,37 cm) supérieures à 70% des précipitations annuelles (37,94 cm), mais le calcul de la formule $2t + 28$ donnait un résultat (35,94) à peine inférieur aux précipitations annuelles, donc aucune classification BSk pour cette station. Swift Current n'était donc pas très loin d'être classée BSk, malgré le fait que ça ne ressortait pas sur la carte de 1921-50 (Figure 21).

Dans le cas de l'Atlas national, on a utilisé plus de stations pour établir les régions climatiques. Quelques stations de plus, telles que celle de Drumheller, devait sûrement contribuer à avoir une plus importante zone BSk dans l'Atlas national (Figure 10). Aussi, sur

cette dernière carte, on a interpolé manuellement en assumant que les conditions climatiques autour des stations classées BSk devaient être les mêmes jusqu'à la frontière Canada/États-Unis. Dans le cas de la carte illustrée à la figure 21, l'interpolation s'est faite entre les stations de Carway et Estevan, ce qui donnait des résultats moins représentatifs du climat au sud de Medicine Hat. Si nous avions utilisé plus de stations pour construire notre carte, les résultats seraient beaucoup plus près de ceux obtenus dans l'Atlas National. Malheureusement, il nous fut impossible d'avoir plus de stations comprenant des données complètes pour toute la période d'étude. Malgré ce fait, nous pouvons ressortir beaucoup d'information fiable, à partir des stations choisies pour cette recherche. Les cartes conçues pour la présente thèse, permettent de voir plusieurs aspects importants, concernant les variations climatiques des Prairies pour la période de 1921-90.

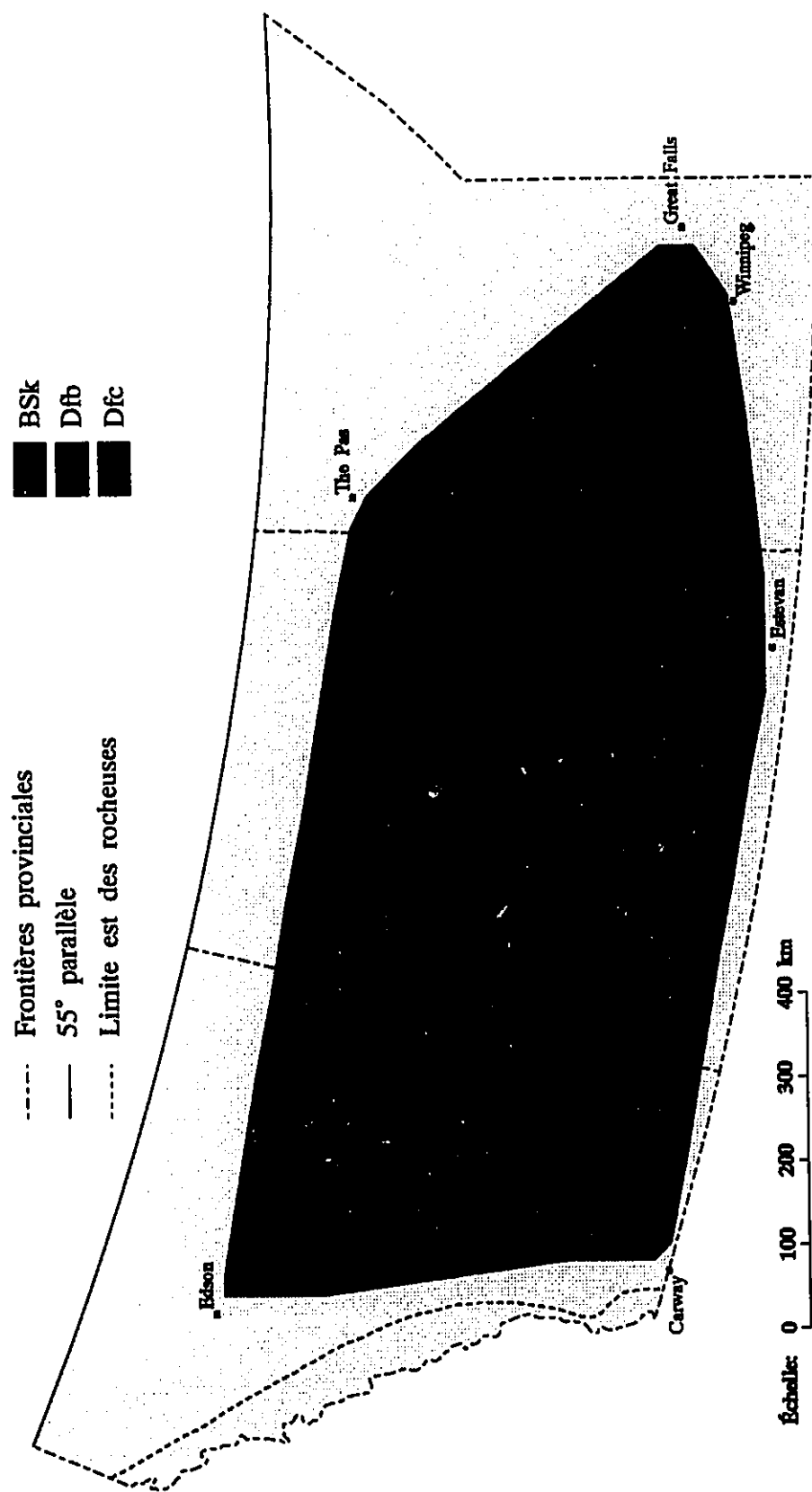
5.4.2 Les cartes décennales

Les cartes décennales (Figures 22a à 22g) semblent nous apporter beaucoup plus d'information, concernant les variations climatiques des Prairies, lorsque nous le comparons avec le tableau 26. Pendant toute la période étudiée, la classe Dfb est la plus importante au niveau spatial, avec une superficie variant de 441 538 km² (76,15% de la superficie totale) à 575 942 km² (99,33%), pour les périodes de 1921-30 et 1951-60 respectivement (voir Tableau 27). Pendant la décennie de 1921-30, cette superficie est surtout divisée en deux zones distinctes, la plus étendue étant située dans la moitié est de la région d'étude (371 078 km²: 64%), et l'autre plus à l'ouest, entre Edmonton et Lethbridge (70 060 km²: 12,08%). La carte de 1921-30 possède la plus importante surface classée Dfc (104 661 km²: 18,05%). Celle-ci est divisée en trois zones, la plus importante étant située au nord-ouest des Prairies (88 861 km²: 15,33%), formant entre autres un prolongement relativement large, qui descend

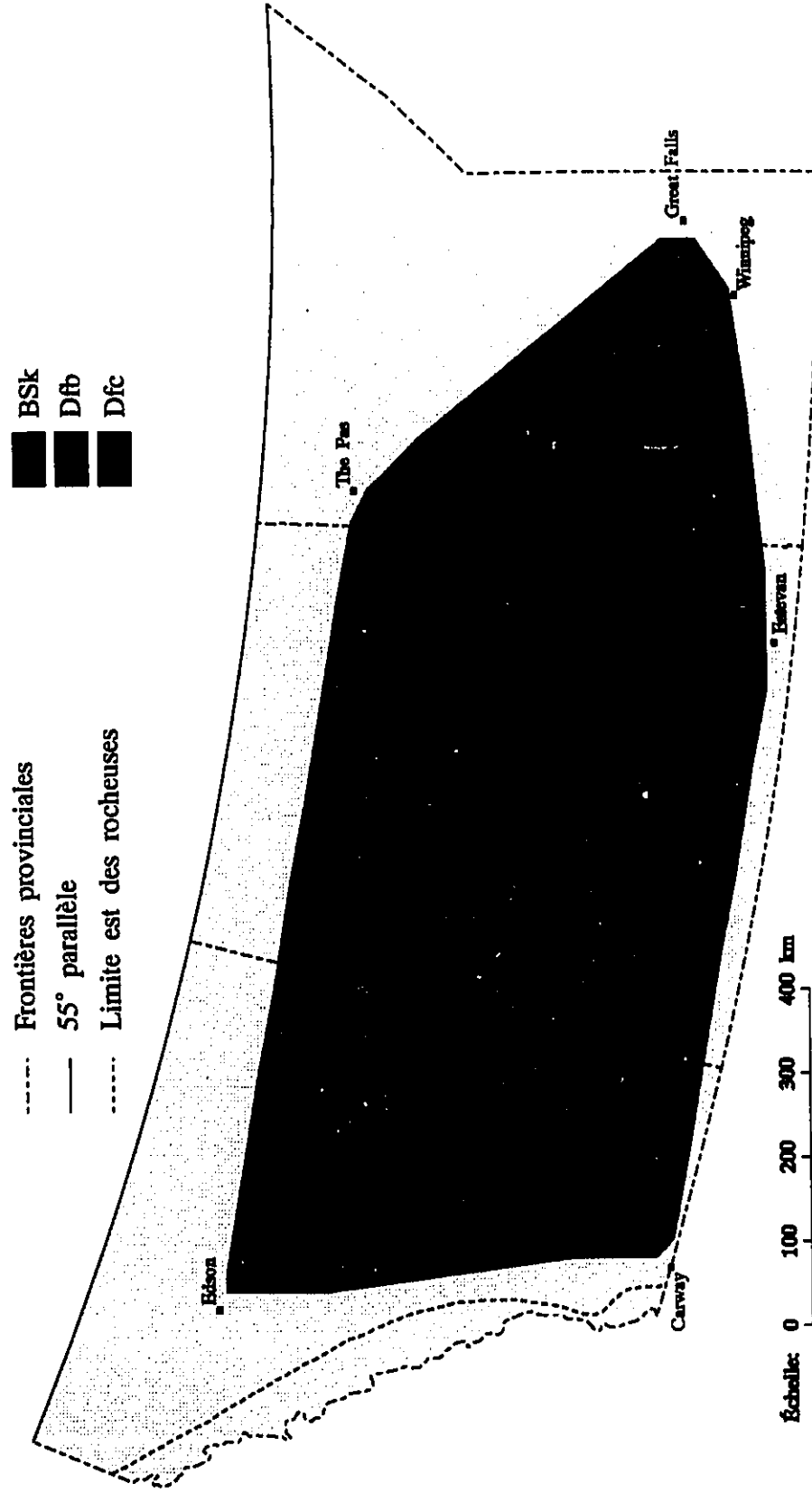
Pages suivantes:

Figures 22a à 22g Cartes décennales (1921-30 à 1981-90) établies pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.

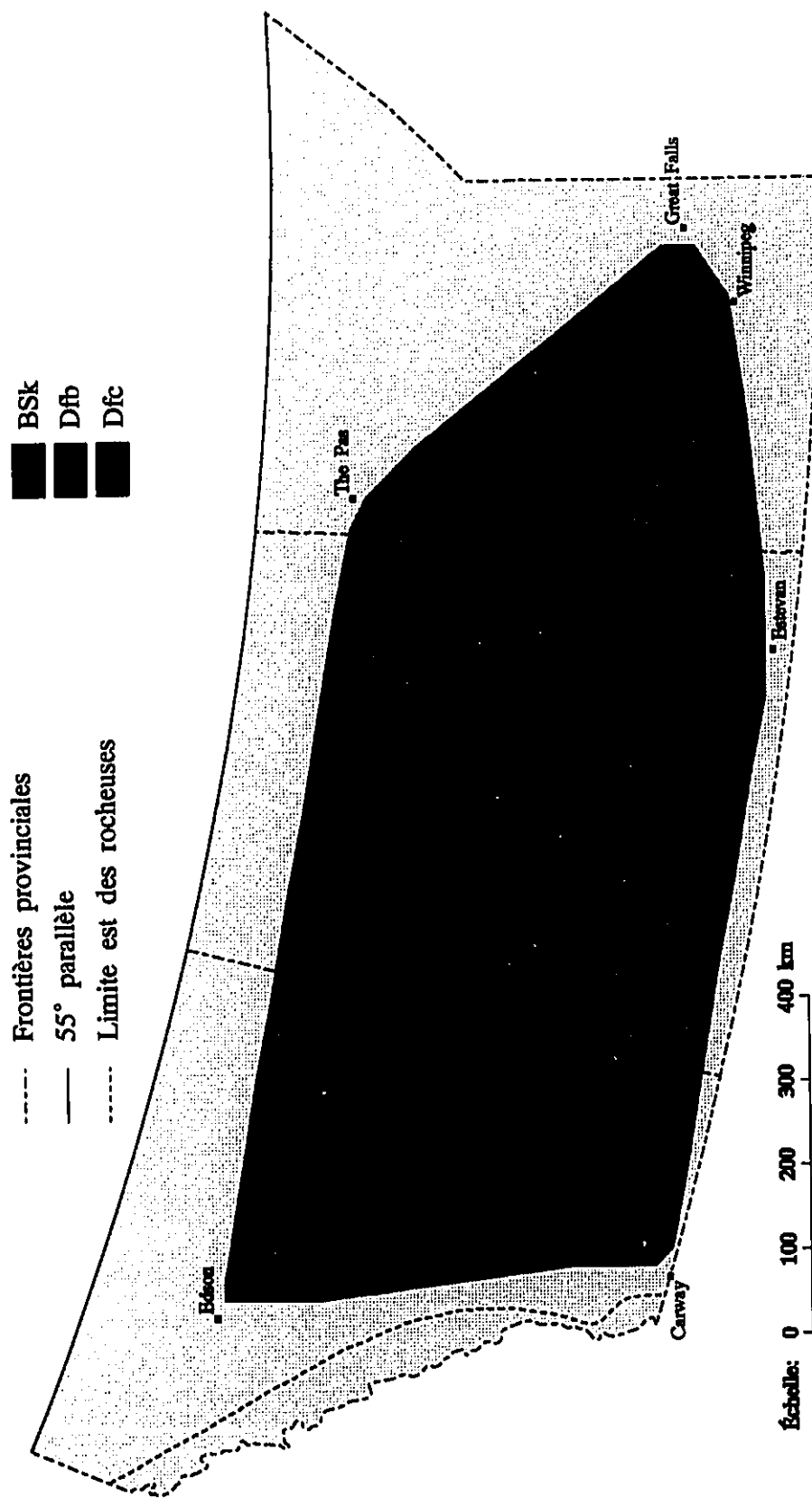
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1921-1930)



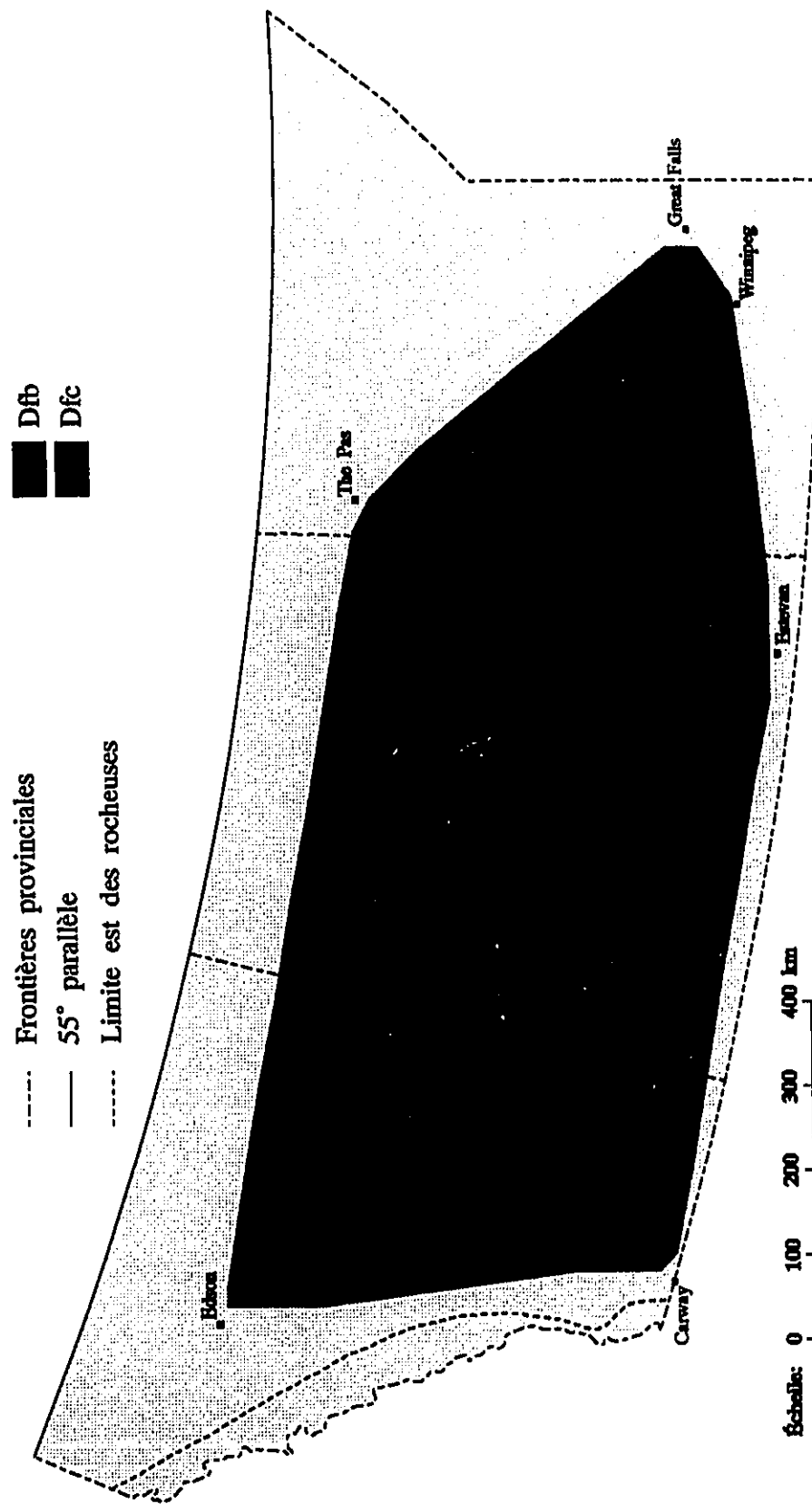
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1931-1940)



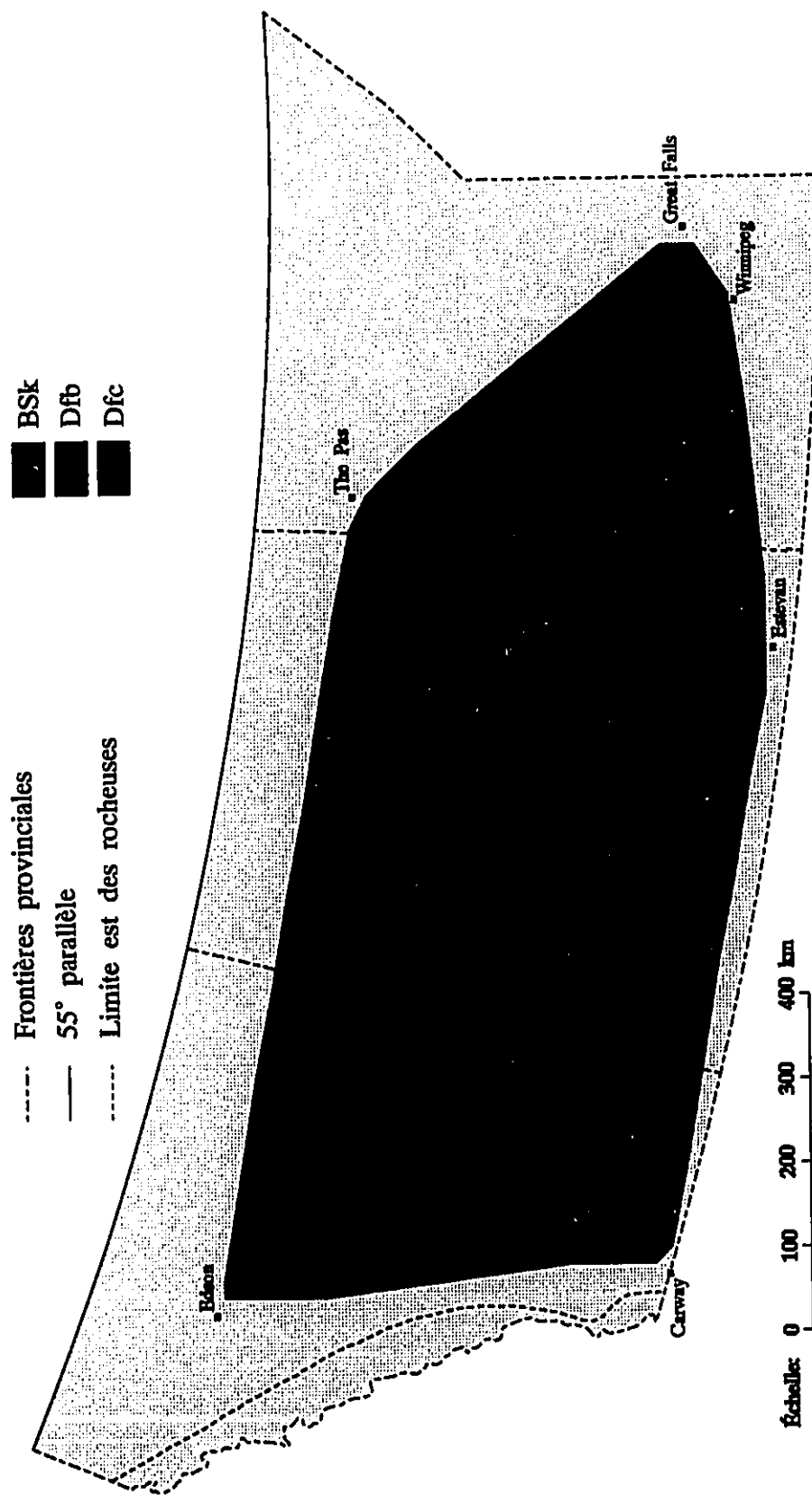
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1941-1950)



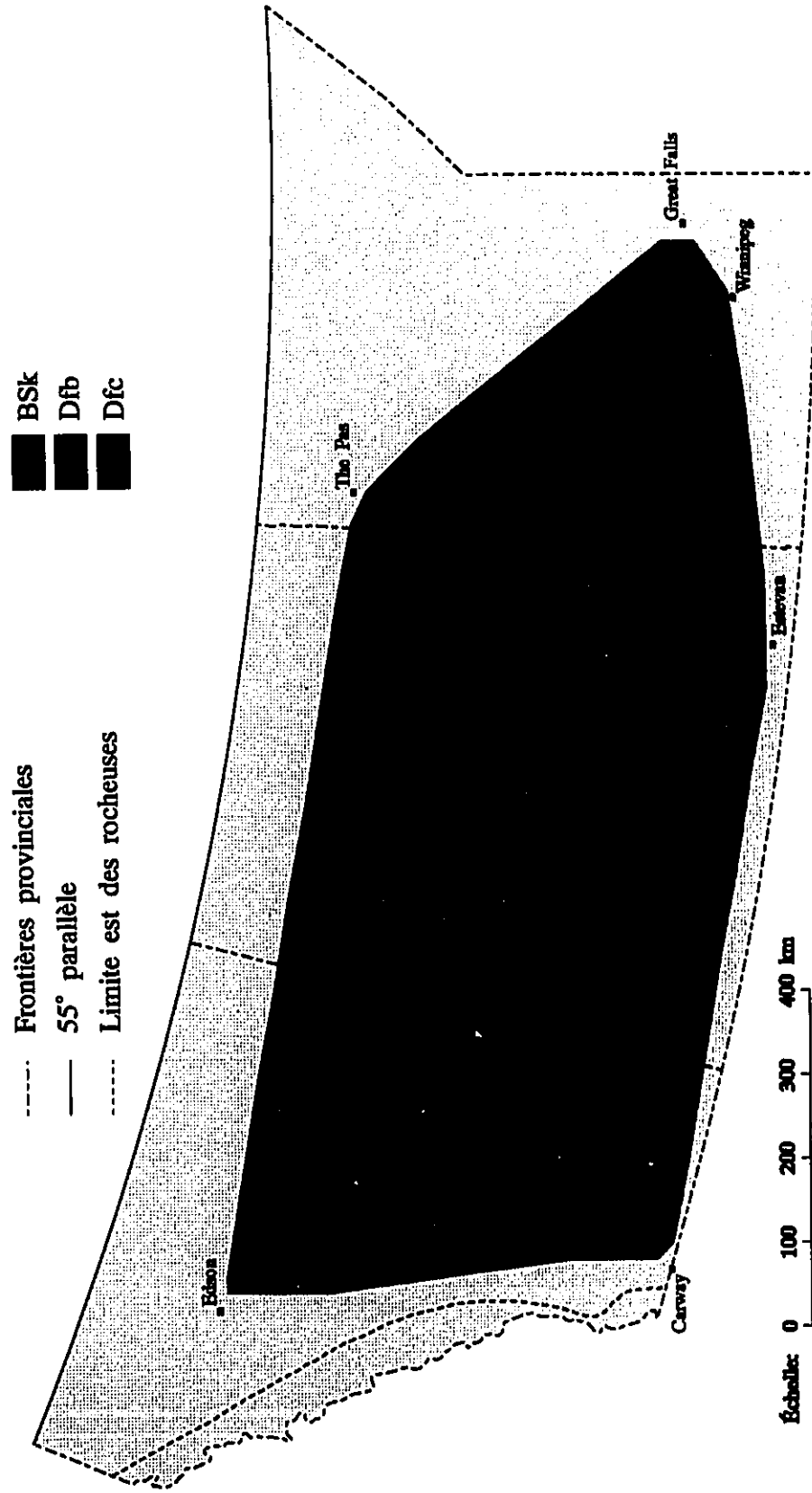
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1951-1960)



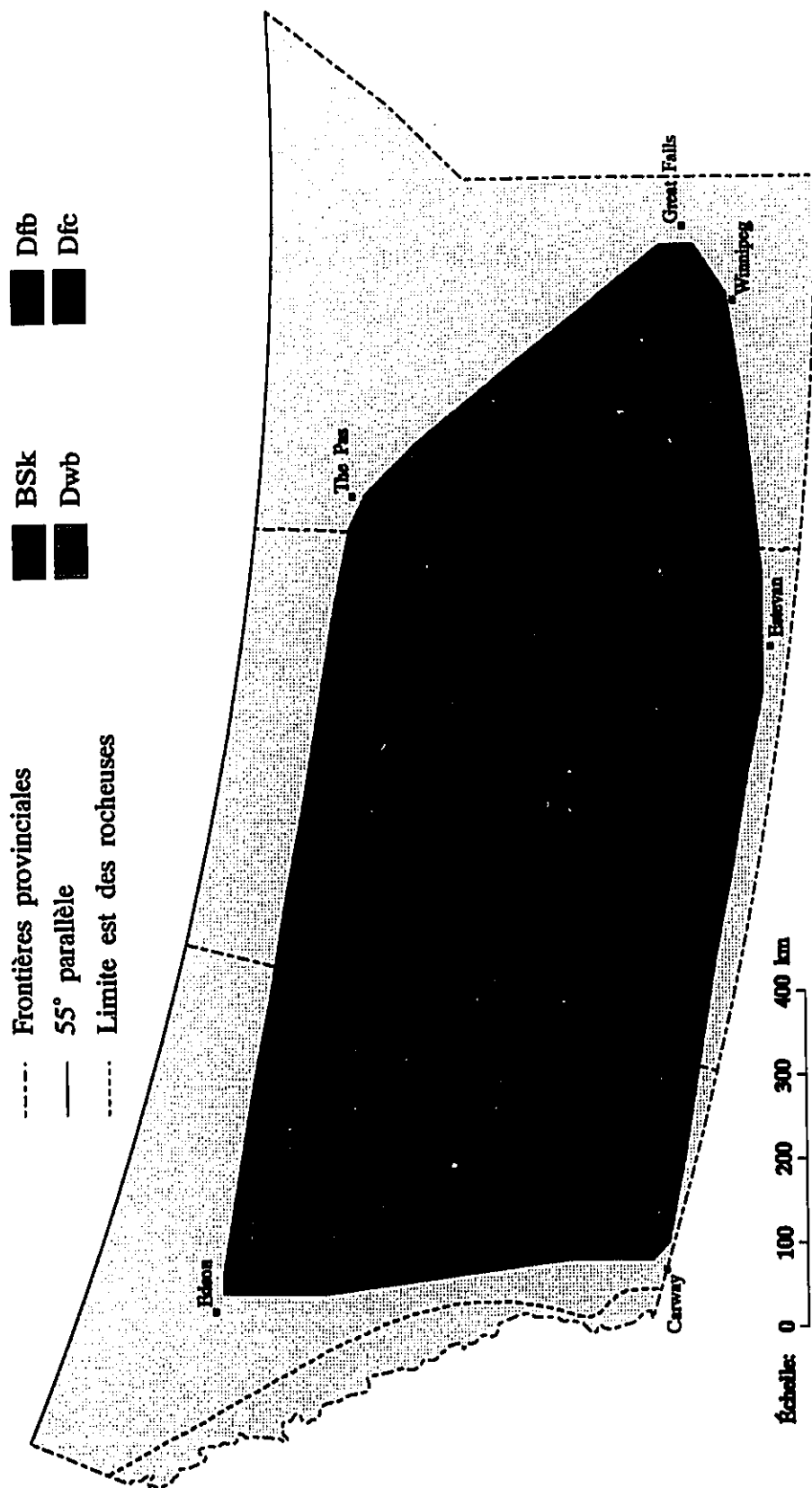
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1961-1970)



Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1971-1980)



Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1981-1990)



vers le sud-est jusqu'à mi-chemin entre Scott et Swift Current. Au bout de cette dernière, est localisée une deuxième zone Dfc (1 691 km²: 0,29%), au nord-est de Prince Albert. Finalement, la troisième étendue classée Dfc se retrouve autour de Carway (14 108 km²: 2,43%), avec une bande qui se rend jusqu'à l'extrémité sud-ouest de la Saskatchewan. Cette décennie (1921-30) possède la deuxième plus importante superficie classée BSk (33 600 km²: 5,8%), celle-ci étant située autour de Medicine Hat et qui remonte jusqu'à mi-chemin entre cette dernière station et celle de Scott.

La période de 1931-40 possède la deuxième plus vaste région classée Dfb, couvrant presque toutes les Prairies (575 048 km²: 99,18%). Nous remarquons la disparition totale de la zone déjà classée Dfc en 1921-30, près de Carway. Cette catégorie se retrouve uniquement dans deux très petites étendues (721 km²: 0,12%; 829 km²: 0,14%), situées près d'Edson. D'ailleurs, celles-ci représentent la plus petite surface ainsi classée pour toute la période d'étude (1 551 km²: 0,26%). La zone BSk, qui apparaissait en 1921-30, est disparue en 1931-40 pour être remplacée par une autre beaucoup moins importante, autour de Swift Current (3 200 km²: 0,55%). Sur la carte de 1941-50, cette dernière superficie BSk disparaît à son tour pour être substituée par une autre encore plus petite (2 800 km²: 0,48%), située au nord de Medicine Hat. Mis à part ce dernier détail, cette période (1941-50) est très semblable à celle qui précède. L'autre changement observé pour la décennie de 1941-50, est le faible accroissement de la superficie classée Dfc (3 857 km²: 0,66%). Pour cette dernière période, les deux zones classées Dfc à la période précédente, s'étendent à 1 571 km² (0,27%) et 1 229 km² (0,21%) respectivement. À celles-ci, s'ajoutent deux autres surfaces de même catégorie (825 km²: 0,14%; 231 km²: 0,04%), réparties le long de la limite nord de la superficie classée, presque jusqu'à la frontière est de l'Alberta. La partie classée Dfb diminue de très peu en 1941-50 (573 142 km²: 98,85%), par rapport à 1931-40. La carte de 1951-60, présente des zones Dfc qui sont identiques à celles de la décennie antérieure. Par contre, la catégorie BSk disparaît complètement en 1951-60. Cette période possède ainsi la plus importante superficie classée Dfb (575 942 km²: 99,33%) de toute l'étude.

Pour la période de 1961-70, l'étendue classée Dfc devient plus importante, avec une superficie totale de 10 438 km² (1,8%), maintenant répartie sur deux zones seulement (9 566 km²: 1,65%; 871 km²: 0,15%). Aussi, il y a réapparition d'une zone BSk à peu près au même endroit qu'en 1921-30, mais qui s'étend un peu moins vers le nord (25 600 km²: 4,42%). La décennie de 1971-80 démontre une région BSk (31 200 km²: 5,38%) encore plus grande que celle de la période précédente, s'étendant un peu plus vers le nord-est et plus près de Swift Current. Cette carte se distingue des autres par une importante zone classée Dfc (38 690 km²: 6,67%), composée d'une bande relativement large qui traverse toute la partie nord de la superficie classée.

La carte de 1981-90 est un peu plus complexe que celle de 1921-30 et beaucoup plus que toutes les autres. Il y a apparition d'une zone Dfc (2 375 km²: 0,41%), un peu semblable mais plus petite que celle observée près de Carway en 1921-30. Aussi en 1980-90, quatre petites étendues Dfc, presque toutes identiques à celles retrouvées en 1951-60, sont situées entre Edson et la frontière est de l'Alberta (721 km²: 0,12%; 1 229 km²: 0,21%; 825 km²: 0,14%; 231 km²: 0,04%). La superficie totale classée Dfc pour cette période, est de 5382 km² (0,92%). La surface totale, classée BSk pour 1981-90 (44 800 km²: 7,73%), est la plus importante de toute la période d'étude. La plus grande zone ainsi classée (43 200 km²: 7,45%), se situe au même endroit qu'en 1971-80, mais s'étend plus vers l'ouest, jusqu'au dessus de Lethbridge. Deux petites surfaces classées BSk (1 200 km²: 0,21%; 400 km²: 0,07%), se retrouvent juste au sud de Saskatoon, ceci étant complètement nouveau pour toute la période d'étude. Une autre nouvelle apparition, est celle d'une région Dw b (sec en hiver), recouvrant une importante superficie de 37 200 km² (6,42%), située autour d'Edmonton. Ce dernier fait, combiné à la présence de la plus importante superficie BSk, permet de qualifier la décennie de 1981-90 comme étant la plus sèche de toute la période étudiée.

En interprétant les observations effectuées pour toutes ces cartes, nous pouvons voir des variations climatiques particulièrement marquées pour certaines périodes de l'étude. Aussi, certaines comparaisons peuvent être faites avec les résultats de travaux antérieurs, tels

que ceux de Thomas (1970) et de Gullett et Skinner (1992). Dans le cas de Gullett et Skinner, il s'agit des cartes (mentionnées à la fin de la section 2.2) démontrant la différence entre les moyennes des températures pour chaque décennie et la moyenne des températures pour la période de 1951-80. La décennie 1921-30 semblerait être la plus froide de toute la période d'étude, celle-ci démontrant la plus importante superficie ayant un climat relativement froid (Dfc). Les secteurs les plus affectés sont surtout la partie nord-ouest des Prairies, ainsi que près de Carway. Ces zones relativement froides concordent avec ce que nous retrouvons sur la carte de Gullett et Skinner (1992), où nous retrouvons, à peu près aux mêmes endroits, des températures inférieures à la normale. Cette décennie est en même temps très sèche pour une région relativement grande (classée BSk), située autour de Medicine Hat et un peu plus au nord. Ceci est reflété sur un graphique de Thomas (1970), montrant un niveau relativement bas des précipitations pour Medicine Hat, pendant cette même période.

La carte de 1931-40 démontre un réchauffement important, par rapport à la période de 1921-30, suite à la disparition presque complète des zones auparavant classées Dfc. Gullett et Skinner (1992) montrent pour ces endroits, des températures plus près de la normale, donc relativement plus chaudes que pour la décennie précédente. Aussi pour 1931-40, la région autour de Medicine Hat est devenue plus humide, avec la disparition de la catégorie BSk dans ce secteur, tandis qu'une étendue relativement petite devenait plus sèche autour de Swift Current (classée BSk). Les graphiques de Thomas (1970) démontrent plutôt des précipitations relativement basses pour Medicine Hat, ce qui diffère de nos résultats. Un autre graphique de Thomas illustre les plus bas niveaux de précipitations pour la Saskatchewan, mais ce n'est pas très visible sur la carte de Köppen, d'après le peu de superficie classée Bsk dans cette province.

La période de 1941-50 présente très peu de changements, par rapport à celle de 1931-40, sauf pour un retour vers un climat plus humide autour de Swift Current (classée Dfb), de même que des conditions plus sèches dans une zone située au nord de Medicine Hat (classée BSk). Les graphiques de Thomas (1970) démontrent des précipitations relativement plus

élevées pour Medicine Hat, ainsi que pour toutes les provinces de l'ouest. La carte de Gullett et Skinner (1992) présente des températures plus chaudes que la normale, ce qui n'est pas vraiment reflété par la zone Dfc de la carte de Köppen, cette zone étant même un plus grande que pour la décennie précédente.

Le climat semble demeurer stable pour la décennie de 1951-60, sauf pour les conditions devenant plus humides dans le secteur situé au nord de Medicine Hat (maintenant classé Dfb). D'ailleurs, cette dernière période serait la plus humide de l'étude, du fait qu'elle est uniquement dotée de classes relativement humides (Dfb et Dfc). Ceci rejoint les résultats de Thomas (1970) qui mentionne d'importantes précipitations pour toutes les Prairies. La carte de Gullett et Skinner (1992) montre des températures inférieures à la normale, mais la zone Dfc reste sensiblement la même pour cette étude.

La carte de 1961-70 démontre un refroidissement pour une étendue un peu plus importante, près d'Edson (classée Dfc). La carte de Gullett et Skinner (1992) concorde assez bien avec ces résultats, avec une zone plus froide que la normale, à peu près au même endroit. Le climat est devenu plus sec (BSk) dans une région relativement grande autour de Medicine Hat. Malheureusement, l'étude de Thomas (1970) s'arrête un peu avant la fin de cette période, mais les tendances semblaient démontrer une baisse importante des précipitations pour Medicine Hat. En 1971-80, une plus grande partie de cette dernière zone devient très sèche, tout en ayant un refroidissement dans une bande relativement importante (classée Dfc), qui traverse tout le secteur nord des Prairies. Ce refroidissement concorde assez bien avec la carte de Gullett et Skinner (1992), qui présente des températures inférieures à la normale pour toutes les Prairies.

La décennie de 1981-90 devient la période la plus sèche, d'après la taille de sa superficie classée BSk. Cette région semi-aride autour de Medicine Hat, s'étend davantage vers l'ouest, et une autre petite étendue devient plus sèche, juste au sud de Saskatoon. Une autre région relativement importante devient plus sèche en hiver (Dwb), autour d'Edmonton. La superficie Dfc n'occupe maintenant qu'une petite portion du nord-ouest des Prairies, ainsi

que son extrémité sud-ouest. La carte de Gullett et Skinner (1992) ne présente pas nécessairement le même résultat, du fait qu'on y voit des températures nettement supérieures à la normale.

Nous voyons donc que certaines variations climatiques peuvent se ressembler d'une étude à l'autre, tandis que d'autres changements ne se comparent pas toujours aussi bien. Ce qui peut expliquer ces différences observées entre ces divers travaux est surtout le fait que les données ne sont pas traitées de la même façon. Par exemple, les cartes de Gullett et Skinner (1992) présentent les différences entre les moyennes décennales des températures et les moyennes pour la période de 1951-80. Ces différences sont basées sur des moyennes annuelles, tandis que dans le cas de la classification de Köppen, c'est plutôt les moyennes mensuelles qui déterminent la classification de la dernière lettre, telle que "c" (moyennes mensuelles des températures de un à trois mois $\Rightarrow 10^{\circ}\text{C}$) (voir tableau 2: chapitre 3). Pour la décennie des années 1980, la carte de Gullett et Skinner présente des moyennes annuelles de températures nettement supérieures à la normale, mais ces moyennes relativement élevées ne vont pas nécessairement affecter le nombre de mois avec des températures égales ou supérieures à 10°C . Un hiver relativement doux peut hausser la moyenne annuelle sans pour autant changer les températures d'été. Par ailleurs, nous pouvons conclure que l'étude actuelle et celle de Gullett et Skinner démontrent deux facettes différentes qui peuvent souvent être complémentaires. Dans ce cas-ci, la classification de Köppen fait ressortir, par l'intermédiaire de la classe Dfc, plus d'information reliée à certaines limitations possibles au niveau du rendement agricole. La classe Dfc (climat à été court: de 1 à 3 mois $\Rightarrow 10^{\circ}\text{C}$) permet de définir les zones où le potentiel agricole serait significativement limité (lorsqu'il y a moins de 4 mois de 10°C en moyenne) (Trewartha, 1968). La comparaison entre l'étude actuelle et celle de Gullett et Skinner doit donc être interprétée en tenant compte de ce que représente réellement les résultats de chacun de ces travaux.

La comparaison entre la classe BSk (semi-aride) et les moyennes décennales des précipitations (Thomas, 1970) doit aussi se faire avec certaines réserves, car le calcul

déterminant la catégorie BSk, tient compte aussi des températures (voir Tableau 2: chapitre 3). C'est ainsi qu'une décennie pouvant présenter des niveaux bas de précipitations annuelles, ne résultera pas nécessairement d'une classification BSk pour une région en particulier, dans les cas où les températures sont relativement moins élevées. Ceci s'explique par le fait que la formule utilisée pour la classe BSk, combine la moyenne annuelle des températures avec celle des précipitations, dans le but de déterminer un niveau d'aridité basé sur un certain équilibre entre les précipitations et le niveau d'évaporation estimé d'après les températures (Trewartha, 1968).

En comparant le tableau 26 aux cartes climatiques, nous pouvons constater que ces dernières fournissent beaucoup plus d'information, concernant les variations climatiques des Prairies, pour la période de 1921 à 90. Ces cartes nous permettent non seulement de voir ces changements pour les stations, mais aussi ce qui semble se produire entre ces dernières, d'après les déplacements des limites qui séparent deux classes climatiques différentes. Aussi, la position de ces mêmes limites permet de faire ressortir certaines nuances, au niveau de la classification de certaines stations. Par exemple, pendant la période de 1981-90, la station de Lethbridge est classée Dfb. Par contre, nous pouvons remarquer sur la carte de cette époque, une zone BSk presque collée au dessus de cette station. En sachant que cette superficie BSk était influencée par les variables rattachées à Lethbridge, nous pouvons en déduire que cette station devait avoir des valeurs très près des critères nécessaires à une classification BSk. Ce genre de détail peut facilement passer inaperçu lorsque nous observons le tableau 26, du fait que la station doit absolument être classée BSk pour que cette catégorie ressorte sur ce tableau.

Les méthodes de classification climatique sont très catégoriques et ne nous montrent pas les nuances entre deux stations d'une même classe, même si celles-ci peuvent parfois être assez différentes. Par contre il faut réaliser que les limites de cette classification sont déterminées en fonction de certains seuils de précipitations ou de températures, qui permettent ou limitent la croissance de certains types de végétation (Henderson Sellers,

1986). Ces seuils doivent être clairement définis afin de permettre l'interprétation des résultats de la classification de Köppen en fonction de critères reliés à celle-ci. Toutefois, malgré le caractère catégorique de cette classification, il est possible de déceler certaines nuances autrement cachées, à l'aide de la méthode utilisée pour créer ces cartes climatiques. Les variables particulières à chaque station, déterminent la position des limites pour chaque région climatique en fonction de l'intensité de ces variables. Par exemple, plus les températures pour une station sont très près des limites établies pour une classe climatique, plus la station sera près des limites séparant deux régions climatiques différentes. Nous pouvons donc voir certaines nuances au niveau du caractère climatique d'une station particulière, d'après la position relative de cette station par rapport aux limites climatiques créées à l'aide des données provenant de cette station. Ces cartes climatiques nous permettent aussi de vérifier les variations pouvant avoir lieu entre les stations, d'après les changements observés au niveau de la localisation et l'étendue des régions climatiques ainsi interpolées.

L'utilisation des moyennes décennales, pour la création de ces cartes climatiques, permet de faire ressortir des tendances relativement importantes au niveau des variations climatiques observées pour les Prairies. Par contre, en regroupant ainsi les données, nous perdons parfois des détails très importants, du fait que les valeurs extrêmes sont généralement nivelées par d'autres. Par exemple, la période du "Dust Bowl" (1936-38) ne semble pas ressortir sur la carte de 1931-40, malgré le fait que ces trois années ont été très sèches pour une bonne partie des Prairies. Cette constatation peut s'expliquer par l'existence de plusieurs autres années plus humides, contribuant à contrebalancer les valeurs des années 1936 à 38, lors du calcul des moyennes décennales pour la période de 1931-40. La création de cartes climatiques à partir des données annuelles, permettrait de voir plus en détails les variations climatiques affectant les Prairies. Par contre, le travail nécessaire à la conception de 70 cartes climatiques, exigerait trop de temps. Toutefois, nous avons décidé de créer de telles cartes pour les années 1933-34 à 1937-38, afin de vérifier si la classification de Köppen

permet de bien refléter les conditions climatiques de cette époque, particulièrement pour les années 1936 à 38.

5.4.3 Les cartes de 1933-34 à 37-38

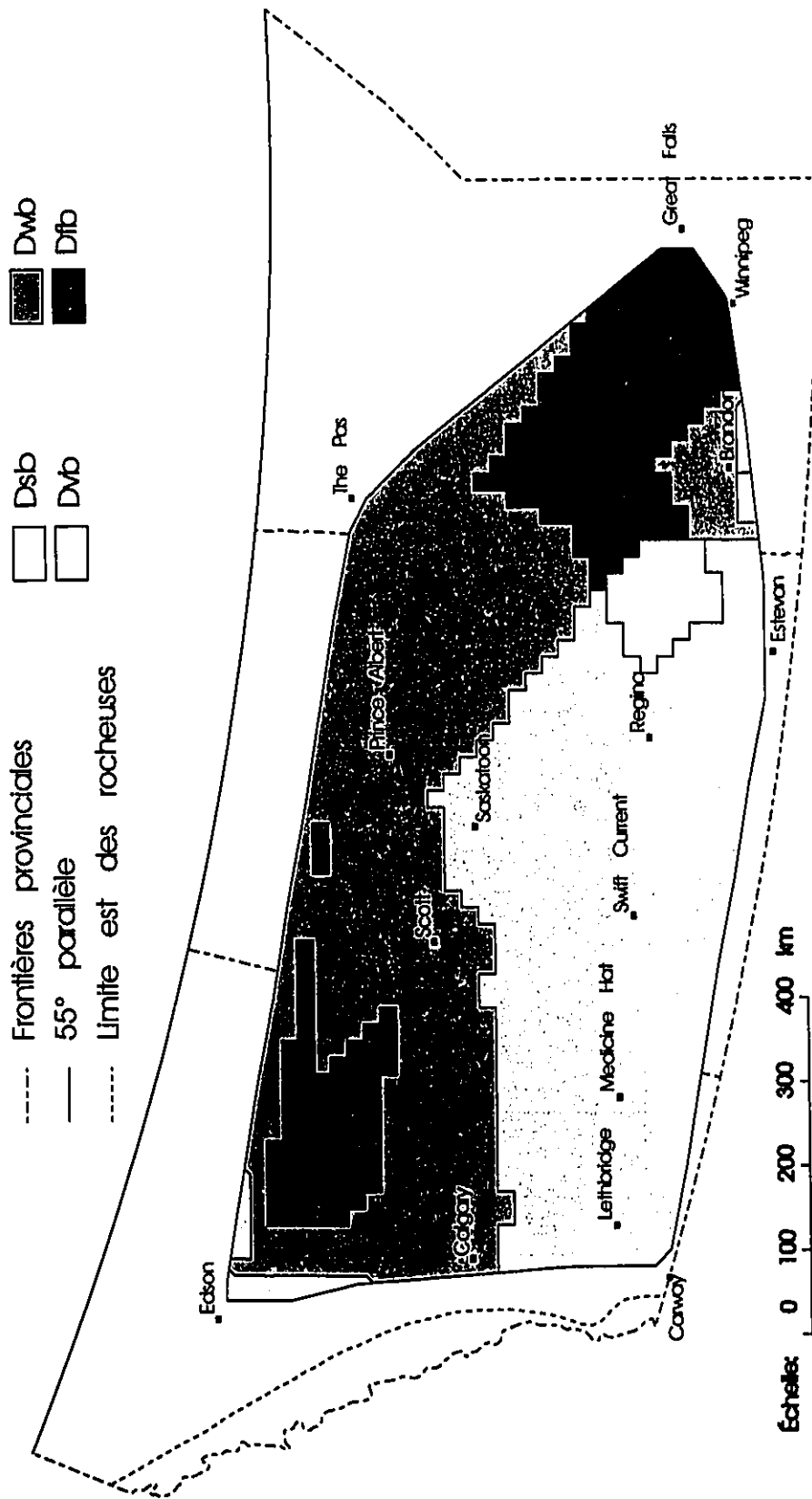
Les cartes climatiques des années 1933-34 à 37-38 (Figures 23a à 23e), sont généralement plus complexes que celles observées pour chaque décennie. Le nombre de classes ressortant pour ces cartes annuelles, est beaucoup plus important pour les années 1935-36 (10), et 1936-37 (8). Aussi, nous y observons beaucoup plus de variations climatiques que dans le cas des cartes décennales. Les superficies classées Dfb sont beaucoup moins importantes, lorsque présentes, la plus étendue étant de 179 518 km² (31,1% de l'ensemble des régions) en 1935-36 (voir Tableau 28: suivant la Figure 23e).

La carte de 1933-34 démontre un climat relativement sec en hiver sur une grande partie de la région d'étude, avec une superficie classée Dwb qui totalise 234 466 km² (40,62%). Cette dernière est surtout divisée en deux zones distinctes, la première (222 275 km²: 38,51%) couvrant presque toute la moitié nord de la région d'étude. Une deuxième étendue Dwb (12 191 km²: 2,11%) est située près de Brandon. Une importante superficie (227 540 km²: 39,42%) est classée Dvb (avec hiver et été secs), avec une grande surface qui couvre toute la partie sud-ouest et centre-sud des Prairies. L'extrémité nord-ouest de cette région présente aussi ce même climat (Dvb, 5753 km²: 1,1%), ainsi qu'une très petite portion juste au sud-ouest de Brandon (1200 km²: 0,21%). Des conditions plus humides (Dfb) sont observées dans la partie sud-est de la région d'étude (67 324 km²: 11,66%), de même qu'autour d'Edmonton (30 400 km²: 5,27%). Enfin, une zone Dsb (sec en été, 15 200 km²: 2,63%) est localisée surtout au sud-est de la Saskatchewan.

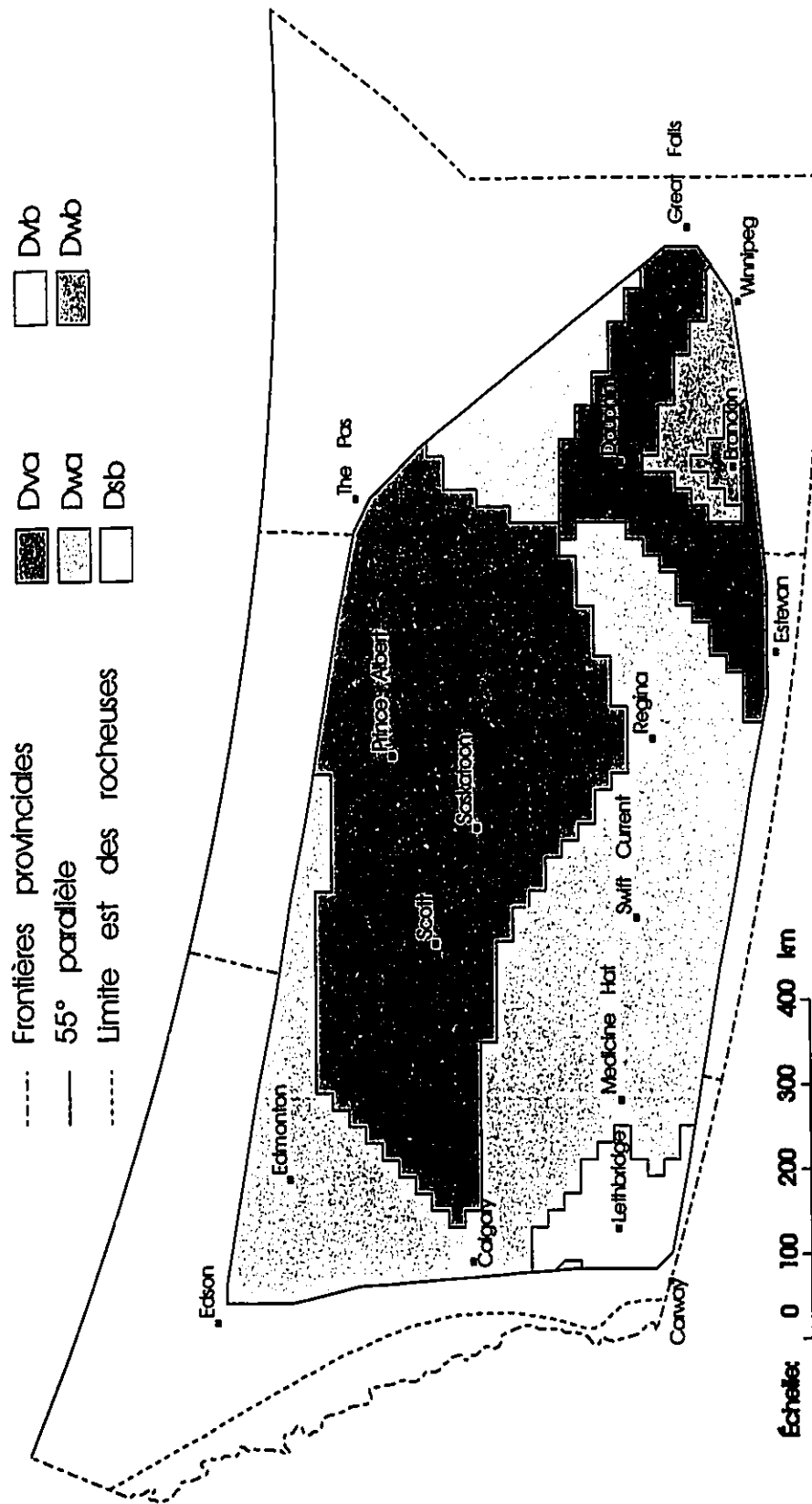
Pages suivantes:

Figures 23a à 23e Cartes annuelles (1933-34 à 37-38) établies pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.

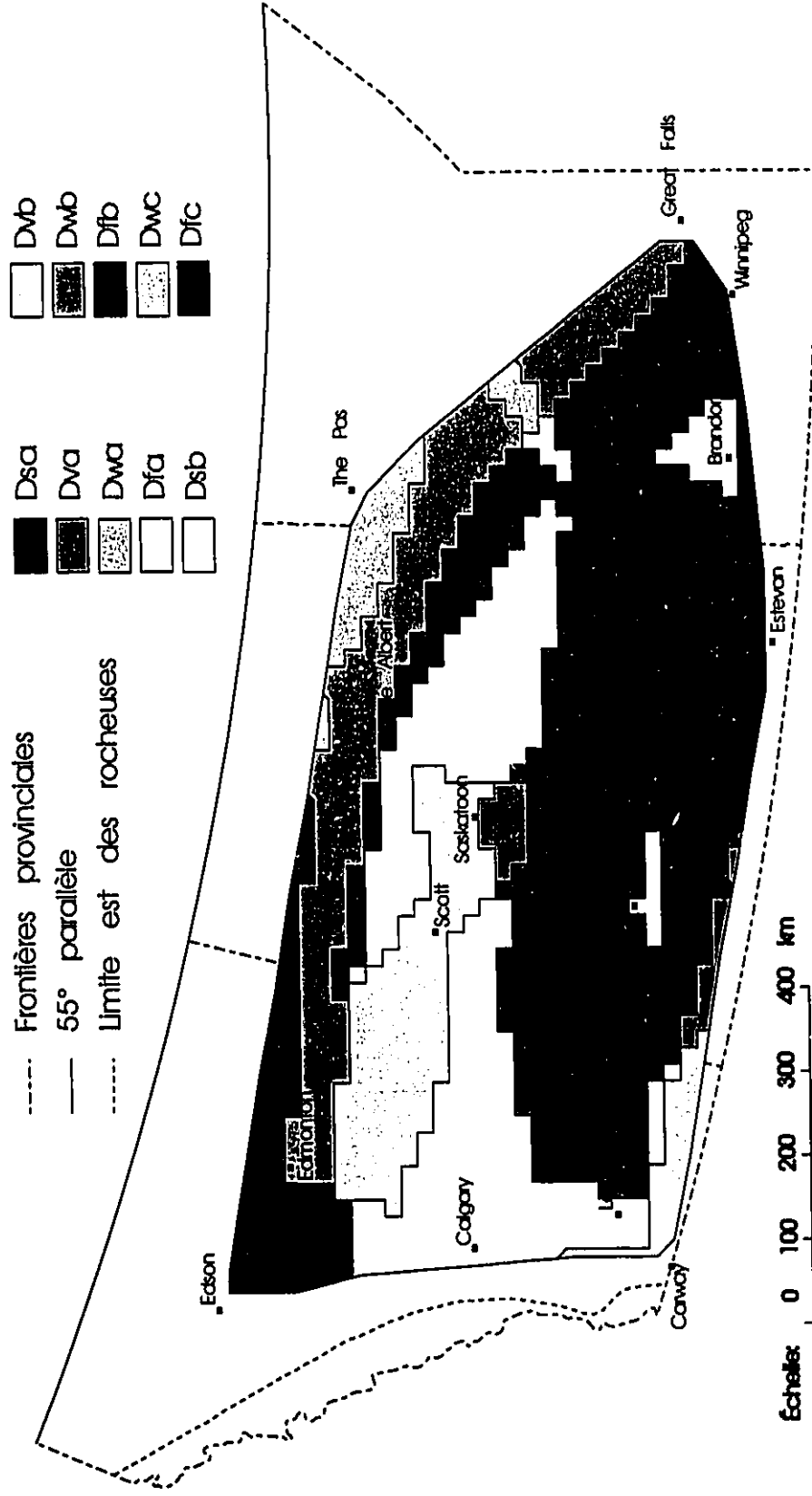
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1933-1934)



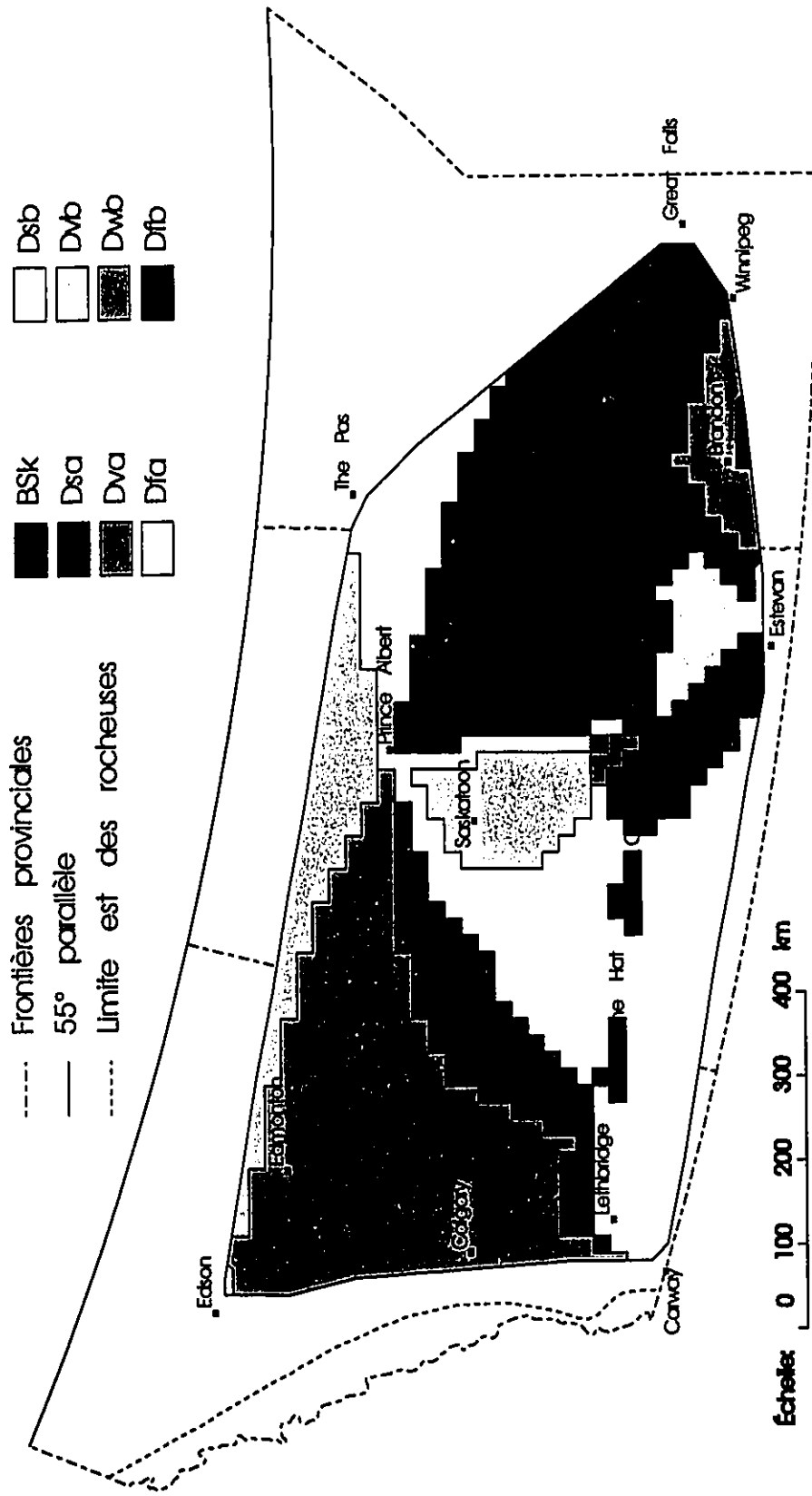
Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1934-1935)



Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1935-1936)



Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1936-1937)



Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1937-1938)

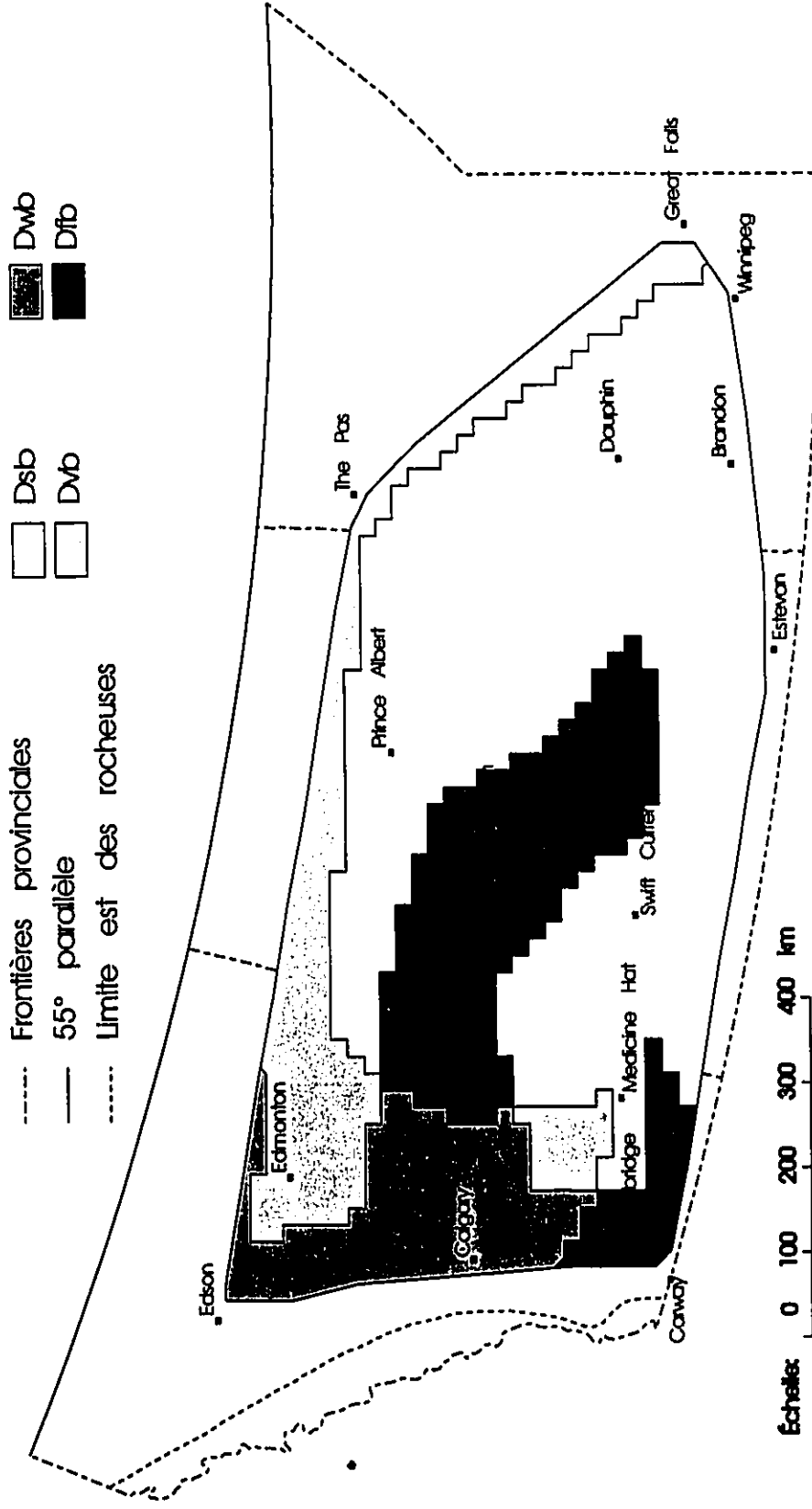


Tableau 28 Superficie totale (en km²) ressortant pour chaque classe climatique, pour les années de 1933-34 à 37-38, ainsi que le pourcentage de ces superficies par rapport au total des étendues classées (577 200 km²). La colonne 1936-37b correspond à la carte créée à partir de 74 stations (analysée à la section 5.4.4).

Classe	1933-34	1934-35	1935-36	1936-37	1936-37b	1937-38
BSk				19600 3.40%	65159 12.17%	
Dsa			230918 40.01%	23710 4.11%	9983 1.86%	
Dva		58355 10.11%	24801 4.30%	2000 0.35%	4758 0.89%	
Dwa		16905 2.93%	3067 0.53%		400 0.07%	
Dfa			12800 2.22%	14832 2.57%	630 0.12%	
Dsb	16270 2.82%	20738 3.59%	114146 19.78%	142020 24.60%	67023 12.52%	322922 55.95%
Dvb	227540 39.42%	260054 45.05%	59242 10.26%	56440 9.78%	92825 17.34%	85653 14.84%
Dwb	234466 40.62%	221148 38.31%	61539 10.66%	139081 24.10%	172356 32.19%	60850 10.54%
Dfb	98924 17.14%		57078 9.89%	179518 31.10%	121866 22.76%	107775 18.67%
Dvc					400 0.07%	
Dwc			13378 2.32%			
Dfc			231 0.04%			
Total	577200	577200	577200	577200	535400	577200

Par rapport à cette dernière carte, celle de 1934-35 démontre un réchauffement important au sud-est des Prairies, avec deux zones classées continental humide à été chaud (dernière lettre = "a"), une d'elles étant à hiver sec (Dwa: 16 905 km²: 2,93%), et l'autre à été et hiver sec (Dva: 58 355 km²: 10,11%). Un autre fait important à mentionner est la disparition complète de la classe Dfb, ce qui laisse la place aux catégories avec au moins une saison sèche (Dv, Ds ou Dw). La plus importante zone (230 077 km²: 39,86%), classée Dvb (à été frais avec hiver et été secs), occupe surtout la partie centre-sud de la région d'étude, ainsi que la partie nord-ouest. Nous retrouvons aussi une autre région Dvb (29 710 km²: 5,15%) juste au nord-est de cette dernière. Presque toute la partie centre-nord des Prairies est classée sec en hiver (Dwb: 217 148 km²: 37,62%), ainsi qu'une petite zone située autour de Brandon (4000 km²: 0,69%). Le coin sud-ouest des Prairies est maintenant devenu sec en été uniquement (Dsb), pour une superficie de 20 738 km² (3,59%).

L'année 1935-36 est nettement la plus chaude des cinq années analysées dans cette section, avec presque tout le sud de la région d'étude (sauf le sud-ouest) classée à été chaud (dernière lettre = "a"), la presque totalité de ce secteur est de catégorie Dsa (230 918 km²: 40,01%), donc à été sec. À l'intérieur de cette dernière zone, se trouve deux petites superficies relativement plus humides (Dfa: sans saison sèche), autour de Swift Current (2400 km²: 0,42%) et de Brandon (7200 km²: 1,25%). Trois zones sont classées Dva (été et hiver sec); une d'elles étant située au sud de Swift Current (3815 km²: 0,66%), une autre juste au sud de Saskatoon (5600 km²: 0,97 %) et une dernière à l'extrémité est des Prairies (14 894 km²: 2,58%). Le coin sud-est de la région d'étude (10 042 km²: 1,74%) est classé Dvb (été frais avec hiver et été sec), tandis qu'un autre secteur de même catégorie forme une sorte de couloir qui englobe Saskatoon et Scott, pour ensuite s'étendre jusqu'au sud d'Edmonton. Le centre-ouest des Prairies (60 946 km²: 10,56%) est devenu sec en été (Dsb), ainsi qu'une partie du centre de la Saskatchewan (50 400 km²: 8,73%). Un peu plus haut, s'est formé une bande plus ou moins étroite (20 000 km²: 3,47%), classée Dfb (sans saison sèche). Le coin nord-ouest de la région d'étude est aussi classé Dfb. Une longue bande (61

539 km²: 10,66%) classée Dwb (avec hiver sec) traverse presque toute la partie nord des Prairies, jusqu'à Edmonton. Finalement, deux zones relativement plus froides (Dwc) occupent ensemble 2,31% (13 378 km²) du coin nord-est de la région d'étude. Il y a aussi quelques petits polygones que nous ne considérons pas assez importants pour les mentionner.

Par rapport à la carte de 1935-36, celle de 1936-37 démontre des surfaces beaucoup moins importantes avec les classes à été chaud (finissant avec un "a"). Ces régions relativement chaudes se retrouvent surtout au sud-est de la Saskatchewan, avec surtout une zone Dsa (sec en été; 20 910 km²: 3,62%) un peu plus au centre de cette province et une autre plus humide (Dfa: 14 032: 2,43%) juste à l'est de cette dernière. Aussi, dans ce groupe de climats relativement chauds, nous retrouvons une petite superficie de catégorie Dsa autour de Medicine Hat (2400: km²: 0,42%). Un autre point marquant, est l'apparition de deux régions semi-arides (BSk); l'une d'elles étant située autour et à l'est de Regina (16 800 km²: 2,91%) et l'autre autour de Swift Current (2800 km²: 0,49%). Cependant, une bonne partie (139 648 km²: 24,19%) de l'est des Prairies est relativement humide (Dfb: sans saison sèche), ainsi qu'un couloir (38 800 km²: 6,72%) englobant Scott et s'arrêtant au nord de Lethbridge. Une importante zone (142 020 km²: 24,6%), classée Dsb (sec en été), couvre la partie sud-ouest, le centre-sud et un peu le nord-est des Prairies. Autour de Saskatoon, se trouve une région Dvb (sec en été et en hiver; 23 200 km²: 4,02%). Une autre zone Dvb (32 918 km²: 5,70%) forme une mince bande qui traverse presque tout le nord de la région d'étude. Finalement, presque tout le nord-ouest des Prairies (125 170 km²: 21,69%) démontre un climat avec hiver sec (Dwb), ainsi qu'une région située autour de Brandon (13 911 km²: 2,41%).

La carte de 1937-38 s'est nettement simplifiée par rapport aux précédentes, avec seulement quatre classes différentes. Premièrement, il y a disparition complète des classes du groupe à été chaud (dernière lettre = "a"). Le sud-ouest devient plus humide (Dfb: sans saison sèche), pour une superficie de 18 175 km² (3,15%). C'est aussi le cas pour une bonne partie du centre des Prairies, avec une étendue Dfb de 89 600 km² (15,52%). Par contre, une

grande partie de l'est est devenue plus sèche en été, suite au remplacement de la zone Dfb (en 1937-37) par une autre de type Dsb (sec en été). D'ailleurs cette région Dsb (322 922 km²: 55,95%) occupe presque tout le centre sud, centre nord et l'est des Prairies. Une bande classée Dvb (sec en été et en hiver; 75 653 km²:13,11%) longe presque toute la limite nord et est de la région d'étude. Finalement, une dernière zone Dvb (10 000 km²: 1,73 %) apparaît au nord-est de Lethbridge. Avant d'aller plus loin dans cette analyse, nous ferons la comparaison de la carte de 1936-37 avec une autre créée pour la même année à partir des données provenant de 74 stations.

5.4.4 Carte de 1936-37, à partir de 74 stations

Une deuxième carte a été créée pour 1936-37 (figure 24), à partir des données provenant de 74 stations. Ceci a pour but de comparer les résultats ressortant de ces deux cartes et de voir comment le nombre de stations peut influencer l'interpolation des régions climatiques. Le nom de ces stations se retrouve au tableau 29 (suivant la figure 24), ainsi qu'un numéro permettant de localiser ces stations sur la figure 25. Pour alléger le texte dans cette partie de l'analyse nous qualifierons le nom de carte 17 à celle de 1936-37 faite à partir de 17 station, et de carte 74 à celle qui était construite à l'aide de 74 stations.

Une première chose à remarquer est la forme un peu différente de l'ensemble des zones classées, ainsi que la superficie totale qui est un peu moins importante pour la carte 74. Ceci s'explique par le fait que les 74 stations de cette dernière carte étaient toutes situées à l'intérieur du périmètre formé par les stations périphériques. La triangulation ("TIN") s'est effectuée différemment dans les deux cas. Par exemple, pour la carte 17, un vecteur était dressé entre Edson et Estevan, ce qui déterminait la limite externe de cette partie du "TIN" (voir figure 15). Dans le cas de la carte 74, des vecteurs étaient dressés entre plusieurs

Page suivante:

Figure 24 Carte annuelle (1936-37) établie à partir de 74 stations, pour la région des Prairies et autour, d'après la méthode de classification de Köppen.

Régions climatiques établies d'après la classification de Köppen (1936-1937), à partir de 74 stations météorologiques.

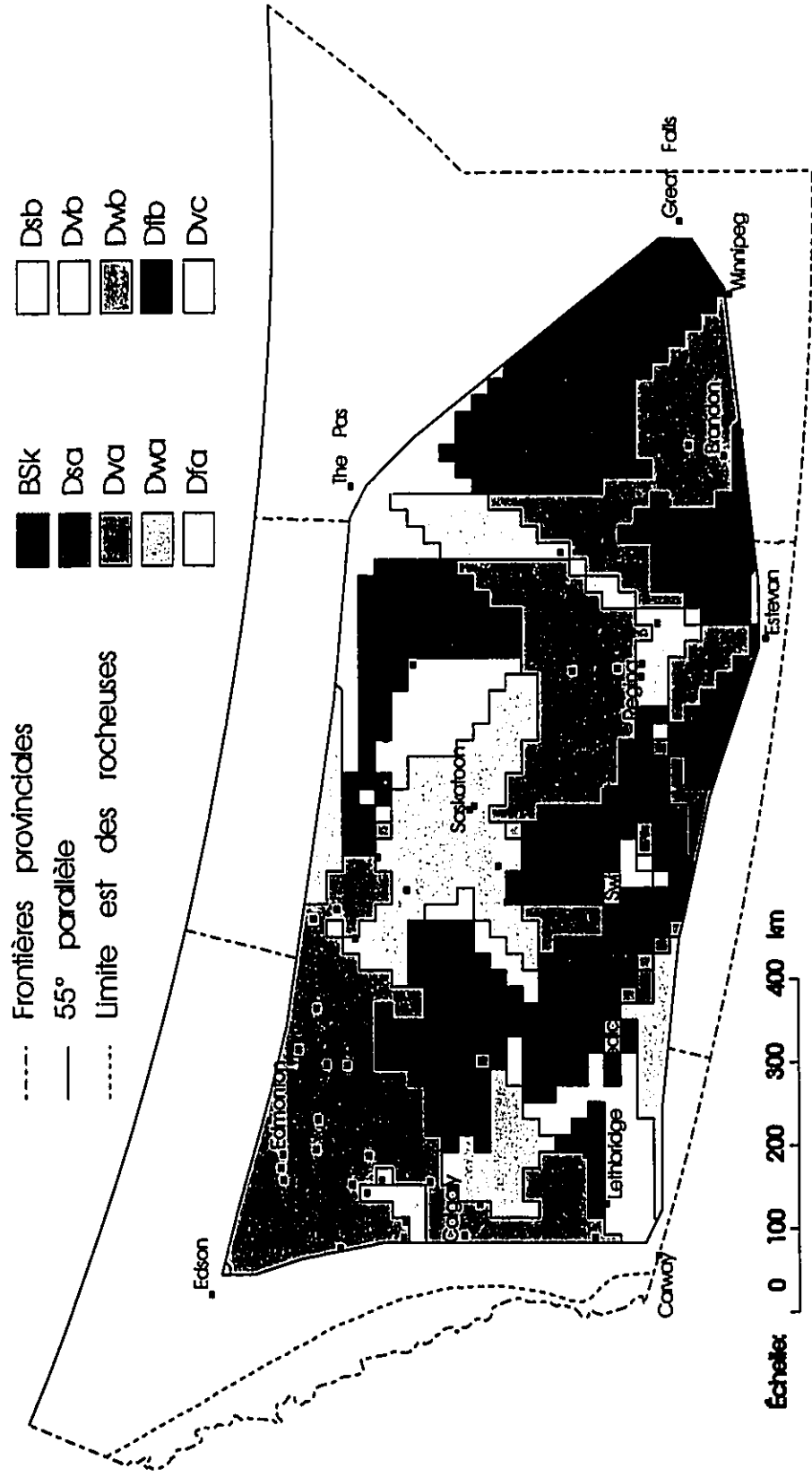


Tableau 29 Noms des stations météorologiques, ayant servi à la création de la carte illustrée à la figure 24, leur numéro d'identification et le numéro permettant de localiser ces stations sur la figure 25.

No	IDENTIF	NOM	No	IDENTIF	NOM
1	3011120	CALMAR	38	4055720	OUTLOOK
2	3016440	THORSBY	39	3023560	JENNER
3	3012205	EDMONTON INTL A	40	4024160	LEADER
4	3015400	RANFURLY	41	4013640	KAMSACK
5	4047080	ST WALBURG	42	4014325	LESTOCK
6	3017280	WETASKIWIN	43	3036680	VAUXHALL
7	3016790	VERMILION	44	4020560	BEECHY
8	3011239	CAMROSE	45	3032680	FORT MACLEOD
9	3016840	VIKING	46	4026840	ROADENE
10	4048240	TURTLEFORD	47	4027960	SURPRISE
11	3015530	ROCKY MOUNTAIN HOUSE	48	3062244	EDSON A
12	4069010	WITCHEKAN	49	5041800	MOOSEHORN
13	3015800	SEDGEWICK	50	3033890	LETHBRIDGE CDA
14	3023720	LACOMBE CDA	51	3034480	MEDICINE HAT A
15	4048520	WASECA	52	5040680	DAUPHIN A
16	3025440	RED DEER	53	4012600	FORT QU'APPELLE
17	3020120	ALIX	54	4028040	SWIFT CURRENT A
18	4046360	RABBIT LAKE	55	4011280	CARON
19	3023280	HILLSDOWN	56	5012520	RUSSELL
20	4056240	PRINCE ALBERT A	57	4015325	MOOSE JAW CHAB
21	4075520	NIPAWIN 2	58	4016320	QU'APPELLE
22	3023055	HARMATTAN	59	4013480	INDIAN HEAD CDA
23	3024920	OLDS	60	4016560	REGINA A
24	4040420	BATTLEFORD	61	4016640	REGINA CDA
25	4076790	RIDGEDALE	62	4013030	GRENFELL
26	4047240	SCOTT CDA	63	4018880	WHITEWOOD
27	3026480	THREE HILLS	64	5010240	BIRTLE
28	3016960	WASTINA HEMARUKA	65	4020160	ANEROID
29	3031400	CARWAY	66	5011760	MINNEDOSA
30	3014760	NACO	67	4012400	ESTEVAN A
31	3031093	CALGARY INTL A	68	5010485	BRANDON CDA
32	4057120	SASKATOON A	69	4011160	CARLYLE
33	4057200	SASKATOON U OF S	70	5012540	ST ALBANS
34	3036200	STRATHMORE	71	4015160	MIDALE
35	4053120	HARRIS	72	5023222	WINNIPEG
36	4040180	ANGLIA	73	5031200	GREAT FALLS
37	4084440	LINTLAW	74	5052880	THE PAS A

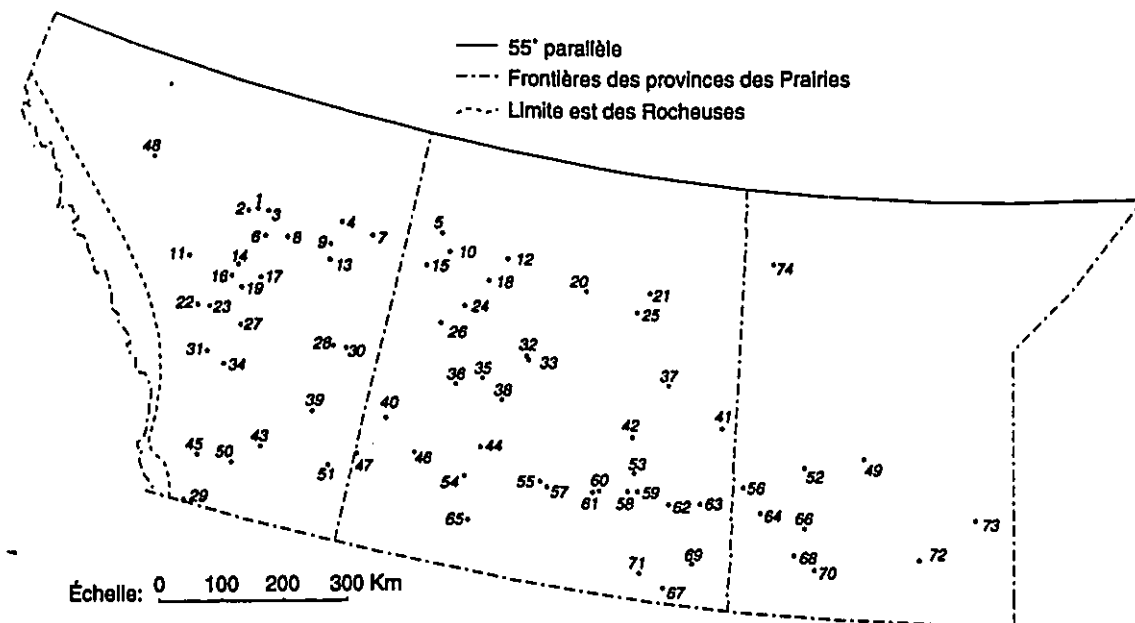


Figure 25 Carte de localisation des 74 stations utilisées pour créer la carte illustrée à la figure 24. Les numéros d'identification permettent de repérer le nom de ces stations au tableau 29.

stations situées entre ces deux dernières. Il en résulte donc une superficie totale un peu diminuée pour la carte 74 par rapport à la carte 17. Cette différence n'est toutefois pas assez importante pour empêcher la comparaison de ces deux cartes.

Au premier coup d'oeil, nous remarquons que ces deux cartes présentent des différences importantes au niveau des superficies classées. Premièrement, la carte 74 a nettement une plus grande superficie totale, classée BSk (65 159 km² au lieu de 19 600 km² pour la carte 17). La région BSk observée autour de Regina, sur la carte 17, a presque disparue sur la carte 74. Par contre cette dernière présente une importante zone BSk sur une bonne partie du centre sud des Prairies (45 559 km²) ainsi qu'une autre située un peu plus vers le nord-ouest (12 800 km²), et une dernière sur la partie sud de la frontière Saskatchewan-Manitoba (4800 km²). La superficie totale de la classe Dfb a diminué sur la carte 74 (121 866 km²) en se morcelant en plusieurs zones différentes. Celle qui était située à l'est des Prairies s'est divisée en trois parties; une étant située à l'est de la région (54 466 km²), l'autre à la partie sud de la frontière Saskatchewan-Manitoba (13 800 km²) et une dernière au nord-est des Prairies (30 000 km²). Les superficies Dwb se sont beaucoup agrandies sur la carte 74, surtout aux dépens de la classe Dsb. La carte de 74 présente une surface totale de 172 356 km², classée Dwb, occupant le nord-ouest (85 703 km²), ainsi que le centre (40 800 km²) et le sud-est de la région d'étude (38 764 km²). La partie Dsb est ainsi beaucoup diminuée sur la carte 74, totalisant maintenant 67 023 km². Les plus importantes régions de cette classe (Dsb) sont situées au sud-est (15 517 km²), et au nord-est des Prairies (15 200 et 19 907 km²). La superficie totale pour la classe Dvb a augmenté sur la carte 74 (92 825 km²). La plus importante zone Dvb se retrouve au centre des Prairies (40 800 km²), suivie d'une autre au sud-est de Calgary (12 800 km²), une au nord-ouest de cette dernière (3000 km²), une au sud de Medicine Hat (6000 km²), une à l'est de Regina (8394 km²) et une dernière au nord-est des Prairies (11 200 km²). En même temps, il y a eu une diminution de zone Dsa (8383 km²), située au centre-sud de la région d'étude, ainsi que l'apparition d'une petite région Dva (3158 km²) à l'ouest de cette dernière.

Nous voyons donc que le nombre de stations influence énormément les résultats ressortant de la création des cartes climatiques. L'ajout de certaines stations peut modifier sérieusement la superficie et la position des limites des zones climatiques ainsi créées. La carte 74 est certainement plus précise que celle qui a été conçue à partir de 17 stations, surtout du fait qu'on ajoute de l'information basée sur des données mesurées sur place et non sur une estimation calculée pour un endroit particulier. Par contre, certaines stations peuvent présenter des erreurs possibles au niveau des mesures effectuées sur place. Par exemple, sur la carte 74 nous voyons que la station de Hillsdown (station No. 19) se retrouve dans une classe plus froide (Dwc) que les autres stations autour d'elle, car seulement trois mois (juin, juillet et août) ont des températures supérieures à 10°C. Les stations qui entourent celle de Hillsdown possèdent 5 mois avec des températures égales ou supérieures à 10°C. Cette différence existe au niveau des mois de mai et septembre, où les températures sont de 9,6°C à Hillsdown, respectivement 10,9 et 11°C à Alix (station No. 17), 10,6 et 11,2°C à Lacombe (No. 14), ainsi que 10,5 et 10,9°C à Red Deer (No. 16). Cette différence observée pourrait en partie s'expliquer par une altitude un peu plus élevée à Hillsdown (896 m), par rapport à Alix (788 m) Lacombe (847 m) et Red Deer (860 m), sachant que les températures diminuent généralement avec l'altitude. Par contre, l'écart d'élévation entre ces diverses stations ne semble pas suffisant pour justifier une différence de 0,9 à 1,6°C entre les températures provenant de ces multiples endroits pour les mois de mai et septembre. D'autres facteurs ont pu contribuer à une telle situation, tels que la mauvais entretien d'instruments de mesure, des erreurs au niveau du relevé des températures ou la présence de végétation à proximité des lieux d'observation. Certaines stations peuvent donc être moins fiables, ce qui peut fausser les résultats d'interpolation lors de la création des cartes climatiques. Il faut donc être très prudent lors du choix des stations requises pour effectuer une telle opération.

La comparaison de ces deux cartes de 1936-37 démontre aussi l'importance d'avoir un nombre de stations qui ne varie pas d'une période à l'autre, si on veut bien visualiser les variations spatiales et temporelles du climat avec un certain contrôle des variables observées.

Un changement, d'une période à l'autre, du nombre et de la répartition spatiale des stations, provoque des déplacements des limites créées dans le processus d'interpolation. Une telle situation peut apporter beaucoup de confusion lors de l'interprétation des résultats, puisque certains changements spatio-temporels des limites climatiques seraient causés par l'apparition et la disparition de diverses stations avec le temps, au lieu des variations climatiques réelles. Ceci justifie l'utilisation des mêmes stations, pour toute la période de la présente étude. En même temps, ceci limite le nombre de stations disponibles pour toute la période étudiée, du fait que relativement peu de stations ont des données qui remontent aussi loin que 1921.

L'interprétation des cartes annuelles doit être faite avec prudence, toujours en pensant que le degré de précision peut varier d'une carte à l'autre. Malgré tout, il est possible de vérifier l'exactitude de ces cartes afin de refléter certaines variations climatiques ressortant des études de Jones (1991), en particulier pour les années 1936 à 38. Les années 1934 et 35 ne sont pas considérées comme des années de sécheresse, mais nous avons choisi d'insérer les cartes pour ces années (1933-34 et 1934-35) afin de les comparer avec celles des trois années suivantes. Cette analyse est aussi la suite de celle effectuée à la fin de la section 5.2 (La classification annuelle), sauf que cette fois-ci l'emphase est plutôt mise sur l'aspect spatial de l'étude.

La carte de 1933-34 démontre un climat relativement plus humide, avec des zones Dfb (sans saison sèche) situées à l'est des Prairies, ainsi qu'au nord-ouest de cette région. Le reste de la carte présente un climat avec au moins une saison sèche (Dsb, Dvb, Dwb). En 1934-35, le climat est devenu plus sec suite à la disparition des zones Dfb observées en 1933-34. D'ailleurs, toutes les Prairies sont classées avec au moins une saison sèche. Le fait le plus important à remarquer est la présence de régions à été chaud (Dva: avec été et hiver secs; Dwa: avec hiver sec) dans la partie sud-est des Prairies.

En 1935-36, ce réchauffement s'est étendu sur presque toute la partie sud de la région d'étude (sauf pour le sud-ouest), avec des zones classées Dsa (avec été sec), Dva, Dwa et Dfa

(sans saison sèche). Ces régions relativement chaudes sont surtout à saison sèche (Dsa, Dva, Dwa) sauf pour trois petites superficies autour de Swift Current et Brandon, ainsi qu'au nord de Dauphin. Jones (1991), mentionne, qu'en 1936 une sécheresse importante affectait tout le Manitoba, ainsi que la partie sud de la Saskatchewan et le centre sud de l'Alberta. Aucune région BSk n'est présente sur la carte de 1935-36, ce qui ne correspond pas exactement aux conditions de sécheresse mentionnées par Jones. Ceci confirme le fait que la classification a sous-estimé le niveau d'aridité des régions affectées par les sécheresses, tel que mentionné vers la fin de la section 5.2. Par contre, la présence d'une aussi importante zone à été chaud (Dsa, Dva, Dwa et Dfa) correspond aux informations de Jones (1991); c'est-à-dire que l'année 1936 était inégalée au niveau des températures maximales, telles qu'à Regina, où on a enregistré 45 jours avec des températures supérieures à 30°C. D'ailleurs ce fait ne ressort pas dans l'étude de Gullett et Skinner (1992) qui démontre une moyenne relativement froide pour 1936. Dans ce cas-ci, la carte de Köppen permet de déceler une information qui passe inaperçue au niveau de la moyenne annuelle des températures; c'est à dire la présence d'un été particulièrement chaud.

Ce qui est exceptionnel sur cette carte (1933-36) est l'étendue des zones classées du type à été chaud (Dsa, Dva, Dwa et Dfa), surtout que les superficies ainsi classées correspondent à presque toute la région affectée par les sécheresses, d'après Jones (1991), à l'exception de la partie nord du Manitoba, où on retrouve des zones Dsb, Dfb et Dwc. La presque totalité de ces régions à été chaud (Dsa, Dva, Dwa et Dfa) consiste en une zone Dsa (à été sec). La combinaison des températures relativement élevées avec un été sec peut certainement augmenter les chances d'avoir des sécheresses importantes, ce qui pourrait représenter un indice de conditions pouvant causer des sécheresses.

Parmi les deux cartes créées pour 1936-37, celle qui a été conçue à partir de 74 stations démontre beaucoup plus de superficie semi-aride (BSk), surtout dans le centre-sud des Prairies, ainsi qu'à l'est de l'Alberta et sur la partie sud de la frontière Saskatchewan-Manitoba. Pour l'année 1937, Jones (1991) mentionne que presque toute la Saskatchewan

est touchée par la sécheresse, de même que l'est du Manitoba et de l'Alberta. Ceci correspond en partie aux superficies classées BSk, mais certains endroits présentent des conditions climatiques différentes de ce que mentionne Jones (1991). Par exemple l'est du Manitoba est en bonne partie classé Dfb (sans saison sèche), ainsi que l'extrême sud de la frontière Saskatchewan-Manitoba, une autre région au sud-ouest de Scott et une dernière autour de Prince Albert. Le centre de la région d'étude est classé Dvb, Dwb ou Dsb. Par contre, la présence des classes Dsa et Dva, au centre-sud de la Saskatchewan, pourrait aussi être considérée comme représentant des conditions climatiques pouvant provoquer une sécheresse, tel que mentionné auparavant.

La carte de 1937-38 ne montre plus de zone BSk, mais surtout une importante région Dsb (sec en été) qui occupe presque toute la moitié est des Prairies, ainsi que le centre nord et sud de cette région. Jones (1991) indique une sécheresse dans le nord de l'Alberta, et de la Saskatchewan, ainsi que la partie sud-ouest de cette dernière province. Ces régions étant surtout occupées par une zone Dsb, il ne semble pas y avoir d'indication possible d'une telle sécheresse.

Suite à l'analyse de ces cartes, nous pouvons conclure que la classification de Köppen, telle qu'appliquée dans cette partie de l'étude ne permet pas toujours de voir clairement les conditions d'aridité associées aux sécheresses des Prairies. Les critères qui déterminent la classe BSk semble sous-estimer le niveau d'aridité pour certaines régions données. L'année 1936 est un bel exemple de cette constatation, du fait que cette année de sécheresse intensive ne présentait aucune classification BSk. Ceci pouvait être causé par le mode de calcul utilisé pour établir cette classe, tel qu'expliqué dans la section 5.2. Par contre la classification a toutefois permis de déceler des températures anormalement élevées pour cette même année, ce qui ne se voit pas au niveau des moyennes annuelles, telles que présentées par Gullett et Skinner (1992). La classification de Köppen peut certainement être utile pour l'analyse des changements, mais en y faisant certaines modifications au niveau de l'estimation du niveau d'aridité. L'utilisation des cartes climatiques ont permis de démontrer

leur utilité dans l'analyse de ce type de données, en permettant de voir d'un coup d'oeil des variations climatiques, autant au niveau spatial que temporel.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

6.1 Introduction

L'objectif principal de cette thèse était d'étudier les variations climatiques, entre 1921 et 1990, pour la région éoclimatique des Prairies canadiennes, avec l'aide d'un système d'information géographique (SIG). En même temps, il s'agissait d'évaluer le potentiel de la classification climatique de Köppen, telle qu'implantée dans un SIG, afin d'effectuer ce genre d'étude. Un autre objectif était de démontrer le potentiel des SIG en tant qu'outils servant à l'étude des changements environnementaux, et plus spécifiquement au niveau de l'analyse et de la visualisation des données climatiques. Les travaux effectués pour la présente thèse ont permis d'atteindre ces objectifs de plusieurs façons. L'utilisation de la classification de Köppen à l'intérieur d'un SIG fournissait généralement des graphiques et cartes offrant beaucoup d'information facile à interpréter, au niveau des variations climatiques affectant les Prairies entre 1921 et 1990. Les résultats ainsi obtenus démontraient divers aspects de ces variations climatiques, autant au niveau spatial que temporel. Ce chapitre est consacré, en première partie, à la présentation des nombreuses conclusions ressortant des multiples analyses effectuées pour ce projet, autant au niveau des variations climatiques observées, que pour la méthodologie utilisée et la qualité des sorties graphiques. La deuxième partie traite des retombées possibles de cette recherche face à d'autres applications similaires pouvant s'en suivre. La dernière partie concerne les recommandations pouvant faciliter la réalisation future d'études semblables à celle-ci.

6.2 Points majeurs ressortant de cette thèse

Les points majeurs, pouvant ressortir de cette thèse, sont nombreux et touchent plusieurs aspects de cette étude, tel que mentionné ci-dessus. Avant d'aborder les faits reliés

aux résultats, nous traiterons d'un problème important qui affecte constamment ce genre d'étude, c'est-à-dire la qualité des données de base et leur continuité.

La qualité des données de base et leur continuité

Une des difficultés majeures, rencontrée lors des travaux effectués pour cette thèse, est le manque de données complètes pour toute la période choisie (1921-90) et pour un nombre suffisant de stations. Dans ce cas-ci, le but était d'avoir un nombre fixe de stations, afin d'assurer une interpolation constante pour toutes les cartes climatiques à créer pour l'étude. Des données plus complètes, fournies par Agriculture Canada, ont permis de résoudre une partie de ce problème, mais certaines séries de données devaient toutefois être complétées à l'aide de données provenant de stations avoisinantes. Malgré ce fait, le nombre de stations principales demeurait limité à 17, de par l'impossibilité d'en trouver d'autres pouvant remonter aussi loin que 1921. Cette lacune diminuait beaucoup la précision au niveau de la position des limites de certaines régions climatiques, surtout en périphérie des cartes, où l'interpolation des variables peut parfois se faire entre deux stations très distantes l'une de l'autre. En tenant compte de ces limitations, il était toutefois possible de retirer beaucoup d'information valable à partir des données fournies par ces stations choisies, du fait que ces dernières sont fiables et représentent bien le climat de leur région, d'après Environnement Canada (Canadian Climate Centre, 1992). Aussi, la distribution spatiale de ces stations permettait d'avoir une bonne représentation des multiples régions climatiques des Prairies. Les données provenant de ces sources ont fourni des résultats intéressants et fiables à bien des niveaux.

La classification annuelle

Les résultats obtenus de cette classification ont permis de faire ressortir les caractéristiques climatiques propres à chaque station, autant au niveau des températures que des précipitations. Les résultats démontraient beaucoup de variations climatiques pour

chaque station. Aussi, il y eu création de trois nouvelles classes (Dva, Dvb et Dvc), afin de résoudre un problème où certaines stations répondaient en même temps aux critères du groupe Ds et Dw. Il en ressortait 15 classes différentes, mais deux d'entre elles (Cwb et Cvb) ont apparu seulement une fois pendant l'année 1925-26. Ce qui était surprenant était l'apparition de catégories habituellement absentes pour cette région, tel que le Ds. Ceci était dû à la présence de valeurs extrêmes qui sont habituellement nivelées lors du calcul des moyennes sur plusieurs années. Toutes les stations se retrouvaient avec plusieurs classes climatiques différentes, ce nombre variant de six à dix. Dans l'ensemble, ce sont surtout les catégories Dwb (324 années/stations) et Dvb (307) qui ressortent le plus souvent, suivies des classes Dsb (144) et BSk (139).

D'après la distribution des différentes classes climatiques pour chaque station, presque toutes les stations ont été le plus souvent classées Dwb ou Dvb, à l'exception d'Edson et Medicine Hat, où ce sont respectivement les classes Dwc (21 années) et BSk (31) qui prédominaient. Nous avons pu constater qu'aucune station ne pouvait être associée qu'à une seule classe climatique, mais à plusieurs catégories, d'après les fréquences observées. Par exemple, la station de Medicine Hat ne pouvait être considérée purement semi-aride (31 années classées BSk), car on y observait aussi des fréquences relativement élevées dans les catégories Dvb (12) et Dsb (11). Ces fréquences démontraient des variations importantes, d'une année à l'autre, au niveau des conditions climatiques qui affectent les Prairies. Malgré ce fait, des fréquences plus élevées pouvaient indiquer une stabilité relative de certains types de climats pour des régions particulières. Ce niveau de stabilité relative, pour divers types de classes climatiques, variaient d'une station à l'autre, ce qui laissait voir certaines tendances spatiales à ce niveau. Une tendance très évidente était celle de la classe BSk, où la station de Medicine Hat démontrait le niveau de stabilité le plus élevé (31 années classées BSk). À partir de cette station, la stabilité relative de la classe BSk diminuait graduellement vers l'ouest, le nord et l'est.

Une autre analyse, effectuée à partir d'un graphique illustrant le nombre annuel de stations classées BSk (semi-aride), permettait de faire ressortir les années et les périodes où le climat semblait relativement aride. L'année avec la fréquence la plus élevée était celle de 1987-88, (9 stations classées BSk) suivie des années 30-31, 60-61 et 83-84 (7), et de 23-24, 29-30, 39-40, 76-77 et 80-81 (6). De 1921 à 31, quatre années ont eu des fréquences de cinq et plus (stations classées BSk), tandis que celle de 1931 à 72 n'avait que deux années avec six et sept stations classées BSk. De 1972 à 88, il y avait cinq années avec cinq stations ou plus, de catégorie BSk.

Les périodes de sécheresse énoncées par Phillips (1990) et Jones (1991) correspondaient, pour les années 1961, 77, 81, 84 et 88, aux années ayant de fréquences relativement élevées de stations classées BSk (de 6 à 9). Par contre, les années 1933, 36-38, 66, 67, 79, 80 et 85 (années de sécheresse) ont eu très peu sinon aucune station classée BSk (de 0 à 4). En comparant ces résultats à ceux de Gullett et Skinner, nous constatons que les années ayant un nombre élevé de stations classées BSk correspondaient très souvent aux années relativement plus chaudes, pour les années 1930, 31, 40, 61, 73, 77, 81, 84 et 88, où les fréquences des stations BSk étaient de cinq et plus. Ceci démontrait le lien entre la classification BSk et les températures relativement élevées, surtout si on considère que des températures plus élevées contribue à un plus haut taux d'évaporation.

En combinant ces deux dernières analyses, nous avons remarqué que les nombres des stations classées BSk correspondaient aux années de sécheresses (Phillips, 1990 et Jones, 1991), surtout lorsque les températures étaient relativement élevées (pour 1961, 77, 81, 84 et 88), d'après les résultats de Gullett et Skinner (1992). La comparaison se faisait moins bien entre les fréquences BSk et les années de sécheresse, surtout lorsque les températures étaient en bas de la moyenne pour 1951-80. Ceci était le cas pour les années 1933, 36, 37, 66, 67, 79 et 85, sauf pour 1938 et 80, où les températures étaient relativement élevées. Ces différences observées semblaient coïncider avec la présence de températures élevées en été, combinées à une moyenne annuelle relativement basse des températures. Dans une telle

situation, la classification de Köppen semblait sous-estimer le niveau d'aridité relié à la classe BSk, du fait que les moyennes annuelles de températures, utilisées dans les calculs servant à estimer le niveau d'aridité, n'étaient pas toujours assez élevées pour permettre une classification BSk, même si l'été pouvait être très chaud. Par exemple, l'année 1936 a eu un nombre important de jours avec des températures supérieures à 30°C, ce qui aurait provoqué des sécheresses importantes dans tout le Manitoba, ainsi que pour le sud de la Saskatchewan et le sud-ouest de l'Alberta (Jones 1991). Malgré tout, la moyenne annuelle pour 1936 n'était pas assez élevée pour attribuer la classe BSk aux stations des endroits affectés par la sécheresse.

Par contre la classification de Köppen a permis de faire ressortir pour l'année 1936, la présence de températures élevées pour l'été, avec la plus haute fréquence de stations (9) classées dans un groupe climatique relativement plus chaud que la normale; c'est-à-dire, avec climats à été chaud (dernière lettre de ces classes = "a"). C'est ainsi que cet événement important a pu être décelé, de façon indirecte, à travers les résultats de cette classification. D'ailleurs, ces températures anormalement élevées, en 1936, n'apparaissaient pas dans les résultats de Gullett et Skinner (1992), au niveau des écarts entre les températures annuelles et la moyenne de 1951-1980. Ceci a permis de démontrer un avantage important de la classification de Köppen; c'est-à-dire, la capacité pour cette dernière de faire ressortir certains événements climatiques saisonniers, tels que des températures d'été anormalement élevées.

La classification décennale

La classification décennale des stations, démontrait beaucoup moins de variations climatiques que dans le cas de la classification annuelle. D'ailleurs, plusieurs stations se retrouvaient dans une même catégorie pendant toute la période d'étude, telles que celles de Calgary, Lethbridge, Prince Albert, Regina, Estevan, Brandon, Dauphin, Winnipeg et Great Falls (classées Dfb), ainsi que celle d'Edson (classée Dfc). Les autres stations se retrouvaient

avec seulement deux classes différentes. Edmonton était toujours dans le Dfb, sauf pour la décennie de 1981-90 (Dwb). Carway, Scott et The Pas se retrouvaient aussi presque toujours dans le Dfb, à l'exception de certaines périodes relativement plus froides (Dfc), telles que celles de 1921-30 pour Scott et Carway, 1971-80 pour The Pas et 1981-90 pour Carway. Saskatoon et Swift Current étaient généralement classés Dfb, sauf pour une décennie plus sèche (BSk) de 1931 à 40 pour Swift Current, et de 1981 à 90 pour Saskatoon. Finalement, Medicine Hat était la seule station à être le plus souvent classée BSk (1921-30, et de 1961 à 90), mais le Dfb (plus humide) apparaissait de 1931 à 60.

Un autre fait qui ressortait de la classification décennale était la disparition totale, ou presque, des classes de type Ds, Dw et Dv (respectivement avec saison sèche en été, en hiver ou les deux), surtout que ces deux dernières (Dw et Dv) dominaient dans la classification annuelle pour toutes les stations, sauf pour Medicine Hat (BSk dominant). Bien sûr, ceci s'expliquait par le fait que le calcul des moyennes décennales diminuait énormément les écarts entre les valeurs extrêmes, qui elles, étaient souvent responsables de l'établissement de catégories telles que des types Ds, Dw et Dv, lors de la classification annuelle. La classification décennale démontrait ainsi beaucoup moins de classes climatiques, mais ces dernières s'approchaient beaucoup plus des résultats ressortant habituellement pour ce système de classification, tels que sur les cartes de Köppen, publiées dans l'Atlas national (Canada, 1957) et par Connor (1936).

Les cartes décennales

Les cartes climatiques, conçues à partir de la classification décennale, permettaient de faire ressortir beaucoup plus d'information, surtout au niveau des superficies impliquées dans les variations climatiques. La décennie de 1921-30 était la période avec la plus grande étendue classée Dfc (relativement froid et humide), surtout située au nord-ouest des Prairies, représentant 18,05% (104 661 Km²) de toute la superficie classée pour cette étude. En même temps, cette période possédait la deuxième plus importante superficie classée BSk (semi-

aride) (33 600 Km²: 5,8%), celle-ci étant située autour de Medicine Hat et remontant jusqu'à mi-chemin entre cette station et celle de Scott. Les décennies de 1931-40 et de 1941-50 avaient beaucoup moins de surfaces semi-arides (BSk), les zones affectées se déplaçant autour de Swift Current pour 1931-40 (3 200 Km²: 0,55%), et au nord de Medicine Hat pour 1941-50 (2 800 Km²: 0,48%). Aussi, ces deux périodes présentaient des étendues beaucoup moins importantes, avec une classification Dfc, comptant pour 1 551 Km² (0,26%) en 1931-40, et 3 857 Km² (0,66%) en 1941-50. La carte de 1951-60 demeurait très semblable à la précédente, la seule différence étant la disparition complète de la catégorie BSk pour cette décennie (1951-60). Par rapport à cette dernière, la période de 1961-70 devenait relativement plus froide dans la partie nord-ouest des Prairies, où il y avait un accroissement de la superficie classée Dfc (10 438 Km²: 1,8%). Aussi, il y avait la réapparition d'une zone BSk à peu près au même endroit qu'en 1921-30, mais qui s'étendait un peu moins vers le nord (25 600 Km²: 4,42%). Cette dernière s'agrandit en 1971-80 (31 200 Km²: 5,38%), s'étendant un peu plus vers le nord-est et plus près de Swift Current. En même temps, une partie beaucoup plus importante de la région devenait relativement plus froide, avec une bande relativement large, classée Dfc (38 690 Km², 6,67%), qui traversait toute la partie nord de la région d'étude. La carte de 1981-90 était la plus complexe de toutes celles observées pour la période d'étude (1921-90), surtout par l'apparition d'une nouvelle classe (Dwb: sec en hiver) attribuée à une région relativement importante autour d'Edmonton (37 200 Km²: 6,42%). Cette dernière, combinée à la plus importante superficie classée BSk (44 800 Km²: 7,73%), font de cette décennie la plus sèche de cette étude.

Ces résultats étaient comparés à ceux de Thomas (1970) et de Gullett et Skinner (1992), en tenant compte, autant que possible, de certaines différences importantes au niveau du mode de calcul et de représentation des données pour ces diverses études. Parfois, certains résultats concordaient avec ceux des autres travaux, mais aussi, plusieurs différences étaient observées entre ces multiples recherches. Par exemple, pour la décennie 1921-30, la zone classée Dfc (subarctique, sans saison sèche), concordaient avec ce qui ressortait sur la

carte de Gullett et Skinner (1992); c'est-à-dire la présence des températures inférieures à la normale de 1951-80, à peu près aux mêmes endroits. Aussi pour 1921-30, la région classée BSk (semi-aride), correspondait au niveau relativement bas des moyennes décennales des précipitations, illustrées par Thomas (1970). Ces comparaisons donnaient des résultats qui variaient d'une décennie à l'autre, ce qui pouvait s'expliquer par le fait que les données ne sont pas traitées de la même façon dans tous les cas. Gullett et Skinner (1992) utilise de moyennes annuelles pour en arriver à représenter des écarts de températures. Les changements dans les moyennes annuelles n'ont pas toujours le même effet sur le nombre de mois avec des températures de 10°C . Dans le cas de Thomas, (1970), il s'agit de moyennes de précipitations, ce qui ne représente qu'un élément (l'autre étant les températures) utilisé dans les calculs servant à évaluer le niveau d'aridité (pour la classe BSk) pour une région donnée. Des niveaux bas de précipitations ne donnerons pas nécessairement les mêmes résultats au niveau de la classification de Köppen, car les températures contribuent aussi au fait qu'une région sera classée BSk.

En comparant le tableau 27 aux cartes climatiques, nous pouvons constater que ces dernières fournissent beaucoup plus de détails sur l'étendue géographique des variations climatiques observées d'une période à l'autre. La position des limites pour chaque région climatique, permet non seulement de voir ces changements pour chaque station, mais aussi ce qui se produit entre celles-ci. Encore plus, il est possible de savoir si une station est près ou loin d'être classée autrement, d'après sa distance relative aux limites qui séparent deux catégories différentes. Ce genre de détail ne se voit pas sur les tableaux, du fait qu'une telle méthode de classification soit aussi catégorique. Par contre, il faut réaliser que les limites de cette classification sont déterminées en fonction de certains seuils de précipitations ou de températures, qui permettent ou limitent la croissance de certains types de végétation (Henderson Sellers, 1986). Ces seuils doivent être clairement définis afin de permettre l'interprétation des résultats de la classification de Köppen en fonction de critères liés à celle-ci.

L'utilisation des moyennes décennales, pour la création de ces cartes climatiques, ont permis de faire ressortir certaines tendances climatiques pour les Prairies. Par contre, en regroupant ainsi les données, nous perdons parfois des détails très importants, du fait que les valeurs extrêmes sont généralement nivelées par d'autres. Par exemple, la période du "Dust Bowl" (1936-38) ne semble pas ressortir sur la carte de 1931-40, malgré le fait que ces trois années ont été très sèches pour une bonne partie des Prairies. La création de cartes annuelles, de 1933-34 à 37-38, nous permettaient de voir plus en détails, les variations climatiques affectant les Prairies pendant la période du "Dust Bowl" et un peu avant.

Les cartes annuelles de 1933-34 à 37-38

Les cartes annuelles, de 1933-34 à 37-38, démontraient généralement une plus grande variété de classes climatiques (jusqu'à 10 pour 1935-36), par rapport aux cartes décennales. Aussi, les variations climatiques y étaient beaucoup plus importantes d'une année à l'autre. Les superficie classées Dfb (sans saison sèche) étaient beaucoup moins importantes, lorsque présentes, la plus étendue étant de 179 518 km² (31,1% de l'ensemble des régions) en 1935-36.

La carte de 1933-34 démontrait un climat relativement plus humide, avec des zones Dfb (sans saison sèche) situées à l'est des Prairies, ainsi qu'au nord-ouest de cette région. Les reste de la carte présentait un climat avec au moins une saison sèche (Dsb, Dvb, Dwb). En 1934-35, le climat était devenu plus sec suite à la disparition des zones Dfb observées en 1933-34. D'ailleurs, toutes les Prairies étaient classées avec au moins une saison sèche. Le fait le plus important à remarquer était la présence de régions à été chaud (Dva: avec été et hiver secs; Dwa: avec hiver sec) dans la partie sud-est des Prairies. En 1935-36, ce réchauffement s'est étendu sur presque toute la partie sud de la région d'étude (sauf pour le sud-ouest), avec des zones classées Dsa (avec été sec), Dva, Dwa et Dfa (sans saison sèche). Ces régions relativement chaudes sont surtout à saison sèche (Dsa , Dva, Dwa) sauf pour trois petites superficies autour de Swift Current et Brandon, ainsi qu'au nord de Dauphin.

La carte de 1936-37 démontrait des surfaces beaucoup moins importantes avec les classes à été chaud (finissant avec un "a"), surtout au sud-est de la Saskatchewan. Il y avait apparition de deux régions semi-arides (BSk); l'une d'elles étant située autour et à l'est de Regina et l'autre autour de Swift Current. Cependant, une bonne partie de l'est des Prairies était relativement humide (Dfb: sans saison sèche), ainsi qu'un couloir englobant Scott et s'arrêtant au nord de Lethbridge. Une importante zone classée Dsb (sec en été), couvrait la partie sud-ouest, le centre-sud et un peu le nord-est des Prairies. Presque tout le nord-ouest des Prairies démontrait un climat avec hiver sec (Dwb), ainsi qu'une région située autour de Brandon. La carte de 1937-38 s'était nettement simplifiée par rapport aux précédentes, avec seulement quatre classes différentes. Le sud-ouest des Prairies devenait plus humide (Dfb: sans saison sèche), ainsi qu'une bonne partie du centre des Prairies. Par contre, presque tout le centre sud, centre nord et l'est des Prairies sont devenus plus secs en été, suite à l'apparition d'une zone Dsb (sec en été) dans ces régions. Une bande classée Dvb (sec en été et en hiver) longeait presque toute la limite nord et est de la région d'étude, et une autre zone de même catégorie apparaissait au nord-est de Lethbridge.

Les cartes annuelles étaient comparées aux informations fournies par Jones (1991), au sujet des sécheresses observées de 1936 à 38. Ceci a permis de voir que la classification de Köppen, tel qu'appliquée dans cette partie de l'étude, ne permettait pas toujours de voir clairement les conditions d'aridité associées aux sécheresses sur les Prairies. Les critères qui déterminent la classe BSk semblaient sous-estimer le niveau d'aridité pour certaines régions données. L'année 1936 est un bel exemple de cette constatation, du fait que cette année de sécheresse intensive ne présentait aucune classification BSk.

La comparaison effectuée, entre les deux cartes de 1936-37 (avec 17 et 74 stations), démontrait que le nombre de stations pouvait influencer énormément les résultats ressortant de la création des cartes climatiques. L'ajout de certaines stations a sérieusement modifié la position des limites qui séparaient les zones climatiques ainsi que les superficies concernées. La carte ayant 74 stations était certainement plus précise que celle qui a été conçue à partir

de 17 stations, surtout du fait qu'on ajoutait de l'information basée sur des données mesurées sur place et non sur une estimation calculée pour un endroit particulier. Par contre, il faut faire attention de ne pas insérer des stations ayant des erreurs au niveau de l'enregistrement des mesures, ce qui peut donner des résultats faussés, tels que des températures plus ou moins élevées qu'elles devraient habituellement être à un endroit particulier.

La comparaison de ces deux cartes de 1936-37 démontrait aussi l'importance d'avoir un nombre de station qui ne varie pas d'une période à l'autre, si on veut bien visualiser les variations spatiales et temporelles du climat avec un certain contrôle des variables observées. Un changement, d'une période à l'autre, du nombre et de la répartition spatiale des stations, provoque des déplacements des limites créées dans le processus d'interpolation. Une telle situation peut apporter beaucoup de confusion lors de l'interprétation des résultats, puisque certains changements spatio-temporels des limites climatiques seraient causés par l'alternance de diverses stations avec le temps, au lieu des variations climatiques réelles. Ceci justifie l'utilisation des mêmes stations, pour toute la période de la présente étude. En même temps, ceci limite le nombre de stations disponibles pour toute la période étudiée, du fait que relativement peu de stations ont des données qui remontent aussi loin que 1921.

L'utilisation de la méthode de classification de Köppen, combinée à la représentation des résultats sous forme des cartes climatiques, a donc permis d'observer plusieurs aspects des variations climatiques des Prairies (de 1921 à 90), autant au niveau spatial que temporel. Cette forme d'analyse démontre beaucoup de potentiel, au niveau de son application future dans d'autres études de ce genre, celles-ci pouvant être grandement facilitées par des systèmes d'information géographique (SIG).

6.3 Les retombées possibles du projet

Les résultats obtenus dans cette recherche permettent de voir plusieurs possibilités, au niveau des formes d'applications similaires dans l'étude des changements climatiques pour diverses parties du monde. La méthode de classification de Köppen est basée sur des seuils

critiques de températures et de précipitations, qui permettent ou limitent la croissance de divers types de végétation (Henderson-Sellers, 1986). C'est ainsi que les résultats de cette méthode de classification peuvent donner certains indices importants concernant les effets possibles de certaines variations climatiques à plus ou moins long terme sur plusieurs composantes de l'environnement. La représentation de ces résultats, sous forme de cartes climatiques, ajoute beaucoup plus d'information concernant les superficies affectées par ces variations climatiques. De tels genres d'études peuvent être grandement facilités par l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG), de par leur capacité de traiter une importante quantité de données et de présenter les résultats sous diverses formes graphiques. Avec une bonne utilisation des SIG et des données ainsi traitées, il est possible d'améliorer l'interprétation des résultats, en les représentant sous forme de graphiques plus faciles à analyser.

À l'aide des SIG, il serait possible de développer plusieurs autres formes d'applications, permettant d'aller encore plus loin dans l'étude des changements climatiques. Afin de mieux faire ressortir certaines tendances climatiques du passé, il serait très intéressant de créer des cartes climatiques, basées sur des moyennes, ou des moyennes mobiles, établies sur cinq ans ou plus. Pour continuer dans le même sens, il serait possible de faire un recoupement entre les zones ayant la même classification pour plusieurs années de suite, en effectuant une superposition de multiples cartes annuelles.

La classification de Köppen, pourrait servir dans l'interprétation des résultats ressortant des modèles de circulation générale, ce qui permettrait de mieux évaluer comment les changements climatiques estimés pourraient affecter la végétation des Prairies ou d'une autre région d'étude. D'ailleurs plusieurs chercheurs ont travaillé dans ce sens, tels que Guetter et Kutzbach (1990), et Lohmann et al. (1993). Par contre, l'application de la classification de Köppen doit être réévaluée suite aux faiblesses observées à certains niveaux. Aussi plusieurs aspects de la méthodologie sont à modifier, afin d'améliorer la qualité des résultats pouvant ressortir des suites possibles de cette recherche.

6.4 Recommandations pour des travaux futurs

Cette étude a permis de faire ressortir l'utilité d'un système d'information géographique (SIG) dans l'application d'une classification climatique, pour l'étude des changements climatiques. Afin d'améliorer la qualité des résultats ressortant de travaux futurs, il serait important de considérer plusieurs recommandations, face à certaines limitations observées dans cette étude.

La classification de Köppen démontrait une sous-estimation du niveau d'aridité, d'après ce qui ressortait de la classe BSk. Il serait donc important d'évaluer si cette classification serait la plus adéquate pour bien représenter le climat des Prairies. Il serait bon d'évaluer comment d'autres versions de la classification de Köppen pourraient mieux répondre à ce problème, telles que celle proposée par Guetter et Kutzbach (1990). Ces auteurs ont changé certains critères de cette classification, de sorte à ce qu'elle corresponde mieux aux cartes climat-végétation de Walters (1984). La classification de Köppen ne tient pas compte de facteurs importants pouvant influencer la végétation, tels que l'accumulation du couvert neigeux, la quantité d'eau emmagasiné dans le sol, ou le type de sol. Il serait donc important de trouver ou de développer d'autres systèmes de classification plus complets, qui tiendraient compte de ces facteurs, afin d'avoir un portrait plus complet des variations climatiques et des effets de ces variations sur l'environnement.

Un autre problème soulevé dans cette recherche, était le nombre limité de stations ayant des données complètes pour toute la période d'étude. Cette limitation affectait l'interpolation des variables climatiques, de sorte à donner une fausse représentation du climat à certains endroits, tout en diminuant grandement la précision au niveau de la position des limites séparant deux classes climatiques. Afin de résoudre ce problème, plusieurs solutions peuvent être apportées. En remontant un peu moins loin dans le temps (par exemple, jusqu'à 1940), il serait possible d'avoir plus de stations avec des données complètes pour toute la période d'étude. Pour assurer une meilleure interpolation le long de la frontière Canada/États-Unis, il serait important d'y ajouter certaines stations des États-Unis. Il serait

aussi très utile d'avoir des séries de données qui ont déjà été complétées pour toute la période d'étude. Agriculture Canada (Bootsma, 1991) et Environnement Canada (Canadian Climate Centre, 1992) peuvent fournir des données historiques plus complètes, pour certaines stations choisies d'après la fiabilité des données en question.

L'utilisation de données climatiques sous forme de grilles déjà interpolées à partir de stations fiables, permettrait de grandement faciliter la création de cartes climatiques pour un tel genre d'étude. Environnement Canada aurait actuellement des données sous cette forme, du moins au niveau des moyennes mensuelles des température maximales, minimales et moyennes (Canadian Climate Centre, 1992). Par contre, le même type de produit serait aussi apprécié au niveau des précipitations.

Il serait encore mieux de développer des méthodes permettant d'utiliser une plus grande quantité d'information provenant des stations qui ont existé pendant de courtes périodes de temps. Par exemple, en ajoutant plusieurs de ces stations dans un modèle numérique, il serait possible d'établir un système permettant de remplacer les données manquantes par d'autres provenant de stations avoisinantes ayant un climat relativement semblable; ces données étant corrigées en fonction des différences climatiques observées à plus ou moins long terme entre les stations concernées.

Il serait aussi intéressant d'établir un nombre optimum de stations qui permettrait de bien représenter le climat de la région pendant toute la période d'étude. Ceci pourrait se faire en créant, pour une même période de temps, plusieurs cartes ayant un nombre décroissant de stations climatiques. En comparant ces cartes, il s'agirait de trouver le nombre minimum de stations qui permettrait une interpolation assez semblable à celle effectuée à partir du nombre maximum de stations. Ce nombre optimum de stations pourrait être ensuite utilisé pour toute la période d'étude en ayant la certitude d'avoir une représentation juste du climat pour toute la région concernée.

Un autre problème rencontré lors de l'interpolation des données climatiques, était la variation d'altitude entre les stations servant à cette tâche. Sachant que les températures

diminuent généralement avec l'altitude, il serait utile de développer des logiciels pouvant tenir compte de ce facteur, permettant ainsi d'effectuer une interpolation plus représentative du climat réel de toute la région étudiée. Aussi, en insérant (autant que possible) des stations à des points stratégiques il serait possible d'éviter les erreurs d'interpolation, telles que celle observée entre Carway et Estevan. Plusieurs autres méthodes d'interpolation sont offertes par certains logiciels. Il serait donc intéressant d'évaluer laquelle de ces méthodes pourrait mieux interpoler les données en fonction de ce type d'étude.

Les opérations étaient fort nombreuses, surtout lors de la création des cartes climatiques, car plus d'un logiciel devaient servir à cette fin. C'est pourquoi il est essentiel de bien vérifier les capacités des divers logiciels existant sur le marché, afin de trouver celui qui fera le travail exigé, d'une façon sûre et efficace. Une importante économie de temps résulterait de l'utilisation d'un seul logiciel pouvant, de façon automatique, extraire et interpoler les variables voulues, effectuer la classification et représenter les résultats de cette dernière, sur des cartes climatiques ou sur d'autres formes de graphiques. Il serait ainsi plus facile de concevoir des cartes annuelles, qui permettraient de donner beaucoup plus de détails, sur les variations climatiques pour une région donnée.

Afin de mieux faire ressortir certaines tendances climatiques du passé, il serait très intéressant d'appliquer cette forme d'analyse, à partir de moyennes établies sur 5 ans, ainsi que de moyennes mobiles calculées pour des périodes de longueurs variables. Pour continuer dans le même sens, il serait possible de faire un recoupement entre les zones ayant la même classification pour plusieurs années de suite, en effectuant la superposition de multiples cartes annuelles. Le développement de telles techniques peut donc apporter plus d'information utile à une meilleure compréhension du climat passé, tout en fournissant des données aux modèles qui nous aideront à mieux prédire ce qui se produira dans le futur. Peut-être ainsi, nous saurons mieux planifier notre avenir, de sorte à vivre un peu plus en harmonie avec notre belle petite planète.

RÉFÉRENCES

- **Barry, Roger G. et Chorley, Richard J., 1982.** Atmosphere, Weather & Climate, Methuen & Co, Londres et New York, quatrième édition, 407 pages.
- **Bootsma, A., 1991.** Long Term Climatic Trends for Agriculture in Canada, Paper presented at Technical Session of Canadian Society of Agrometeorology, Agriculture Institute of Canada Conference, Fredericton, N.B., July 31, 1991, Land Resource Research Centre, Agriculture Canada, Ottawa, 19 pages.
- **Canada, 1957.** Atlas du Canada, Ministère des mines et des relevés techniques, Direction de la géographie, l'Imprimeur de la Reine, Ottawa, Canada, troisième édition, 110 planches.
- **Canadian Climate Centre, 1992.** Canadian Climate Stations Selected for Analysis of Current and Historical Regional and National Air Temperature Trends, Variations and Anomalies, Historical Canadian Climate Database, Environnement Canada, february 10, 1992, 9 pages.
- **Centre climatologique canadien, 1991.** Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada: point de vue scientifique, Rapport SCC 91-01, Environnement Canada, 64 pages.
- **Clark, William C., 1985.** *Scales of Climate Impacts*, dans Climatic Change, n° 7, pp. 5-27.
- **Claussen, Martin et Esch, Monika, 1992.** Biomes computed from simulated climatologies, Report No. 89, Max-Planck-Institute für Meteorologie, Hamburg.
- **Claussen, Martin et Esch, Monika, 1994.** *Biomes computed from simulated climatologies*, dans Climate Dynamics, Vol. 9, pp. 235-243.
- **Connor, A.J., 1938.** *The Climates of North America II: Canada*, dans Handbuch der Klimatologie, publié par Köppen, W. et Geiger, R., Berlin, Vol. 2, partie J.
- **Cubasch, U., Hasselmann, K., Höck, H., Maier-Reimer, E., Mikołajewicz, U., Santer, B.D. et Sausen, R., 1992.** *Time-dependant greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model*, dans Climate Dynamics, Vol. 8, pp.55-69.
- **COHMAP Members: 1988.** *Major Climatic Changes of the Last 18 000 years: Observations and Model Simulations*, dans Science, Vol. 24, pp. 1043-1052.
- **Durand-Dastès, François, 1990.** *La mosaïque des milieux*, dans Brunet R, et Dollfus, O., Géographie universelle, Hachette/RECLUS, Paris/Montpellier, Tome 1.
- **E.M.R., Canada, 1972.** Carte physiographique du Canada, Commission géologique du Canada, Ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Canada, physiographie de H.S. Bostock, 1967, carte n° 1254A, échelle de 1 : 5 000 000.
- **ESRI, 1990a.** PC DATA CONVERSION Users Guide, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California, U.S.A.

- **ESRI, 1990b.** PC ARC/INFO STARTER KIT Users Guide, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California, U.S.A.
- **ESRI, 1990c.** PC ARCEdit Users Guide, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, California, U.S.A.
- **ESRI Canada, Limited., 1991.** pc TIN 2.2D Users Guide, Environmental Systems Research Institute Canada, Limited, Don Mills, Ontario, Canada.
- **Groupe de travail sur les changements climatiques, 1989.** Régions écoclimatiques du Canada, Série de la classification écologique du territoire n° 23, Service canadien de la faune, Environnement Canada, 118 pages.
- **Gullet, D.W. et Skinner, W.R., 1992.** L'état du climat au Canada: les variations de la température au Canada 1995-1991, Rapport sur l'état de l'environnement n° 92-2, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 36 pages.
- **Guetter, P.J. et Kutzbach, J.E., 1990.** *A Modified Köppen Classification Applied to Model Simulations of Glacial and Interglacial Climates*, dans Climatic Change, Vol. 16, pp. 193-215.
- **Henderson-Sellers, Ann et Robinson, Peter J., 1986.** Contemporary Climatology, Longman Group UK Limited, Imprimé à Hong Kong, 439 pages.
- **Hengeveld, Henry, 1991.** Understanding Atmospheric Change: A Survey of the Background Science and Implications of Climate Change and Ozone Depletion, A State of the Environment Report n° 91-2, Atmospheric Environment Service, Environment Canada, 68 pages.
- **Hidore, John J. et Oliver, John E., 1992.** Climatology: an Atmospheric Science, Maxwell Macmillan Canada, Toronto.
- **Jones, Kenneth H., 1991.** *Drought on the Prairies*, dans Symposium on the Impacts of Climate Change and Variability on the Great Plains, édité par Geoffrey Wall, Département de géographie, Université de Waterloo, pp.125-129.
- **Jones, P.D., 1990.** *Le climat des milles dernières années*, dans La Recherche, Vol.21, n° 219, pp. 304-312.
- **Jones, P.D. et Wigley, T.M.L. et Farmer, G. 1991.** *Marine and land temperature data sets: a look at recent trends*, dans Schlesinger, M.E. (ed.) Greenhouse-gas-induced climatic change: a critical appraisal of simulations and observations, Vol. 19, Elsevier, Amsterdam, pp. 153-172.
- **Karl, T.R. et Knight, R.W., 1985.** Atlas of Monthly Palmer Hydrological drought indices (1931-1983) for the Contiguous United States, Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina, 1985, 319 pages.
- **Köppen, W., 1931.** Grundriss der Klimakunde, Walter de Gruyter and Co., Berlin.
- **Köppen, W., 1936.** *Das geographische System der Klimate*, dans Handbuch der Klimatologie, publié par Köppen, W. et Geiger, R., Berlin, Vol. 1, partie C, pp. C1-C44.

- Legates, D.R., et Willmott, C.J., 1990. *Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-corrected Global Precipitation*. dans International Journal of Climatology, Vol. 10, pp. 111-127.
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, I., Cubasch, U., Perlwitz, J. et Roeckner E., 1993. *The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models*, dans Climate Research, Vol. 3, pp. 177-193.
- Longley, Richmond W., 1972. *The Climate of the Prairie Provinces*, Climatological Studies Number 13, Atmospheric Environment, Environment Canada, Toronto, 79 pages.
- McKay, Gordon A. et Hengeveld, Henry, 1990. *L'atmosphère en évolution*, dans La terre en péril, Publié par la Société Royale du Canada, sous la direction de C. Mungall et de D.J. McLaren, Les Presses de l'Université d'Ottawa, pp.49-86.
- Olukayode Oladipo, E., 1987. *Some Features of the Growing Season Precipitation Fluctuations in the Interior Plains of North America*, dans Journal of Climatology, Vol. 7, pp. 531-540.
- Phillips, David, 1990. *The climates of Canada*, Ministre des approvisionnements et services Canada, 176 pages.
- Prentice, I.C., Cramer, W., Harrison, S.P., Leemans, R., Monserud, R.A. et Solomon, A.M., 1992. *A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate*, dans Journal of Biogeography, Vol. 19, pp. 117-134.
- Raddatz, R.L., Maybank, J. et Atkinson, G.B., 1991. *Mean Daily Temperature Normals from 1901-30 to 1961-90 on the Eastern Prairies*, dans Bulletin Climatologique, Vol 25, pp. 118-123.
- Rizzo, B., 1988. *Atelier du CCCET sur les changements climatiques et création du groupe de travail sur les changements climatiques* dans Comité canadien de la classification écologique du territoire, Bulletin, n° 17, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa, pp. 10-11.
- Rizzo, B. et Wiken, E., 1989. *Assessing the Sensitivity of Canada's Ecosystems to Climatic Change*, Rapport interne d'Environnement Canada, 24 pages.
- Rizzo, B. et Wiken, E., 1992. *Assessing the Sensitivity of Canada's Ecosystems to Climatic Change*, dans Climatic change, Vol. 21, pp. 37-55.
- Roeckner E., Arpe, K., Bengtsson, I., Brinkop, S., Dümenil, Esch, M., Kirk, E., Lunkeit, F., Ponater, M., Rockel, B., Sausen, R., Schlese, U., Schubert, S. et Windelband, M., 1992. *Simulation of the present-day climate with the ECHAM model: impact of model physics and resolution*, Report No. 93, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Stewart, John D., et Tiessen, Holm, 1990. *Des plaines fertiles transformées en déserts*, dans La terre en péril, Publié par la Société Royale du Canada, sous la direction de C. Mungall et de D.J. McLaren, Les Presses de l'Université d'Ottawa, pp.206-228.

- **Thomas, Morley K., 1970.** *Climatic Trends on the Canadian Prairies*, dans Process and Method in Canadian Geography. Weather and Climate. selected readings, édité par J.G. Nelson, M.J. Chambers et R.E. Chambers, Methuen Publications, Toronto, Canada, pp. 377-394.
- **Thomas, Morley K., 1975.** Dernières fluctuations climatiques au Canada, Étude climatologique n° 28, Environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto, 92 pages.
- **Thornthwaite, C.W., 1948.** An Approach Towards a Rational classification of climate, Geographical Rev., Vol. 38, pp. 55-94.
- **Trewartha, Glenn T., 1968.** An Introduction to Climate, quatrième édition, Mcgraw-Hill, New York.
- **Vinnikov, K.Y., Groisman, P.Y. et Lugina, K.M., 1990.** *Empirical Data on Contemporary Global Climate Changes (Temperature and precipitation)* dans Journal of Climate, Vol. 3, pp. 662-677.
- **Walter, H., 1984.** Vegetation of the Earth and Ecological Systems of the Geobiosphere, troisième édition, Springer-Verlag, Berlin.
- **Williams, G.D.V., 1983.** *Agricultural Drought*, dans Canadian Journal of Plant Science, Vol. 30, pp. 12-46.
- **Zoltai, S.C., 1988.** *Les provinces éoclimatiques du Canada et les changements climatiques provoqués par l'homme*, dans Comité canadien de la classification écologique du territoire. Bulletin, n° 17, Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa, pp.14-18.

Annexe 1

* PROGRAMME: STAT.PRG

COPY FILE C:\HENRI\STRSTAT.DBF TO C:\HENRI\STAT1.DBF
USE C:\HENRI\STAT1.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\STN.F01 TYPE SDF

REPLACE ALL IDENTIF WITH LEFT(ENTIER,7)
REPLACE ALL NOM WITH SUBS(ENTIER,8,31)
REPLACE ALL PROV WITH SUBS(ENTIER,32,35)
REPLACE ALL LAD WITH SUBS(ENTIER,36,37)
REPLACE ALL LAM WITH SUBS(ENTIER,38,39)
REPLACE ALL LOD WITH SUBS(ENTIER,40,42)
REPLACE ALL LOM WITH SUBS(ENTIER,43,44)
REPLACE ALL ELEV WITH SUBS(ENTIER,45,48)

CLOSE DATABASES
COPY FILE C:\HENRI\STRSTAT2.DBF TO C:\HENRI\STAT2.DBF
USE C:\HENRI\STAT2.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\STAT1.DBF

CLOSE DATABASES
SELECT 1
USE C:\HENRI\STAT2.DBF
SET EXACT ON
SET FILTER TO ((A->PROV="ALTA") .OR. (A->PROV="SASK");
OR. (A->PROV="MAN"))
GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->NOM,A->PROV,A->LAD,A->LAM,A->LOD,A->LOM,A->
ELEV
COPY TO C:\HENRI\STAT3.DBF

CLOSE DATABASES
COPY FILE C:\HENRI\STRSTAT4.DBF TO C:\HENRI\STAT4.DBF
USE C:\HENRI\STAT4.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\STAT3.DBF

REPLACE ALL LADEC WITH LAD+(LAM/60)
REPLACE ALL LODEC WITH LOD+(LOM/60)

GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->NOM,A->PROV,A->ELEV,A->LADEC,A->LODEC
COPY TO C:\HENRI\STAT5.DBF

Annexe 2

* PROGRAMME: STRTP.PRG

COPY FILE C:\HENRI\STRT.P DBF TO C:\HENRI\TEMPR4.DBF
USE C:\HENRI\TEMPR4.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\MLY04.F04 TYPE SDF

REPLACE ALL IDENTIF WITH LEFT(ENTIER,7)
REPLACE ALL AN WITH SUBS(ENTIER,8,10)
REPLACE ALL EL WITH SUBS(ENTIER,12,13)
REPLACE ALL JAN WITH SUBS(ENTIER,14,17)
REPLACE ALL FEV WITH SUBS(ENTIER,18,21)
REPLACE ALL MARS WITH SUBS(ENTIER,22,25)
REPLACE ALL AVR WITH SUBS(ENTIER,26,29)
REPLACE ALL MAI WITH SUBS(ENTIER,30,33)
REPLACE ALL JUIN WITH SUBS(ENTIER,34,37)
REPLACE ALL JUIL WITH SUBS(ENTIER,38,41)
REPLACE ALL AOUT WITH SUBS(ENTIER,42,45)
REPLACE ALL SEPT WITH SUBS(ENTIER,46,49)
REPLACE ALL OCT WITH SUBS(ENTIER,50,53)
REPLACE ALL NOV WITH SUBS(ENTIER,54,57)
REPLACE ALL DEC WITH SUBS(ENTIER,58,61)

CLOSE DATABASES
COPY FILE C:\HENRI\STRT.P DBF TO C:\HENRI\TEMPR41.DBF
USE C:\HENRI\TEMPR41.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\TEMPR4.DBF

REPLACE ALL JAN WITH JAN/10
REPLACE ALL FEV WITH FEV/10
REPLACE ALL MARS WITH MARS/10
REPLACE ALL AVR WITH AVR/10
REPLACE ALL MAI WITH MAI/10
REPLACE ALL JUIN WITH JUIN/10
REPLACE ALL JUIL WITH JUIL/10
REPLACE ALL AOUT WITH AOUT/10
REPLACE ALL SEPT WITH SEPT/10
REPLACE ALL OCT WITH OCT/10
REPLACE ALL NOV WITH NOV/10
REPLACE ALL DEC WITH DEC/10

SET EXACT ON
SET FILTER TO ((A->AN=>921 .AND. A->EL=42))
GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->AN,A->JAN,A->FEV,A->MARS,A->AVR,A->MAI,A->
JUIN,A->JUIL,A->AOUT,A->SEPT,A->OCT,A->NOV,A->DEC
REPLACE ALL AN WITH AN-900

COPY TO C:\HENRI\TEMPER41.DBF

CLOSE DATABASES
SELECT 1
USE C:\HENRI\TEMPR41.DBF

SET EXACT ON
SET FILTER TO ((A->AN=>921 .AND. A->EL=50))
GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->AN,A->JAN,A->FEV,A->MARS,A->AVR,A->MAI,A->
JUIN,A->JUIL,A->AOUT,A->SEPT,A->OCT,A->NOV,A->DEC
REPLACE ALL AN WITH AN-900

COPY TO C:\HENRI\PRECI41.DBF

Annexe 3

Les couvertures, BOUNDARY, MEDDRAIN et GRID, fournies sur diquettes en format DXF, devaient premièrement être converties en couvertures ARC/INFO (maintenant appelées FRONTIER, DRAIN1 et GRILLE) à l'aide d'une commande ARC (ex: DXFARC BOUNDARY.DXF FRONTIER) (ESRI, 1990a). Le fichier de coordonnées de référence (fichier TIC) pour FRONTIER était ensuite copié vers une nouvelle couverture (REGION), avec une commande ARC (CREATE REGION FRONTIER) (ESRI, 1990b). Et après, certains lignes provenant de FRONTIER, DRAIN1 et GRILLE ont été sélectionnées et copiées vers REGION (à l'aide de commandes dans ARCEDIT, illustrées ci-dessous), de sorte à construire un polygone délimitant la région d'étude. Pour ce faire, certaines frontières étaient copiées de FRONTIER, ainsi que des lignes côtières (longeant la Baie d'Hudson) de DRAIN1 et le 55° parallèle de GRILLE.

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT FRONTIER
EDITCOV FRONTIER
DRAWENV ARC NODE LABEL
DRAW
EDITFEATURE ARC
SELECT MANY (Sélection des lignes faite à l'aide du curseur)
PUT REGION
QUIT
```

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT DRAIN1
EDITCOV DRAIN1
DRAWENV ARC NODE LABEL
BACKCOV REGION
BACKENV ARC
DRAW
EDITFEATURE ARC
SELECT MANY (Sélection des lignes faite à l'aide du curseur)
PUT REGION
QUIT
(Cette dernière série de commandes est aussi utilisée avec la couverture GRILLE.) (ESRI, 1990c)
```

Annexe 4

Le module ADS dans PC ARC/INFO a été utilisé pour numériser, à l'intérieur d'une couverture provisoire nommée PHYSIO, la ligne séparant la région physiographique des Rocheuses et celle des Prairies. PHYSIO était ensuite transformée en couverture réelle (PHYSIO2) à l'aide d'une commande dans ARC (CREATE PHYSIO PHYSIO2). Avec le module TABLES, les coordonnées de référence (TIC) ont été modifiées de sorte à y inscrire les coordonnées réelles (en latitudes et longitudes) utilisées lors de la numérisation des "TIC".

Commandes utilisées dans TABLES:

```
TABLES
SELECT PHYSIO2.TIC
UPDATE
(ENTER RECORD NUMBER): 1
EDIT XTIC = -120.0000
EDIT YTIC = 60.0000
(Presser sur return et le logiciel demande de nouveau à entrer un "RECORD NUMBER". En continuant ainsi,
les coordonnées ont aussi été inscrites pour les "TIC" 2, 3 et 4)
```

PHYSIO2 était ensuite transformée en une nouvelle couverture (PHYSIO3) avec une projection Lambert, établie à partir des mêmes coordonnées (CENTER MERIDIAN et LAT OF PROJECTION) que dans REGION.

Commandes utilisées dans ARC:

```
PROJECT COVER PHYSIO2 PHYSIO3
INPUT
PROJECTION GEOGRAPHIC
UNITS DD
PARAMETERS
OUTPUT
PROJECTION LAMBERT
UNITS METERS
PARAMETERS
1ST STANDARD PARALLEL: 49 00 00
2ND STANDARD PARALLEL: 77 00 00
CENTER MERIDIAN: -95 00 00
LAT OF PROJECTION ORIGIN: 49 00 00
FALSE EASTING (METERS): 0.0
FALSE NORTHING (METERS): 0.0
END
```

Annexe 4 (suite)

À l'aide de la commande TRANSFORM PHYSIO3 PHYSIO4, les coordonnées de PHYSIO sont transformées en unités correspondant à la projection Lambert. La ligne de la couverture PHYSIO4 est ensuite copiée vers la couverture REGION, à l'aide des commandes suivantes (dans ARCEDIT):

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT PHYSIO4
EDITCOV PHYSIO4
DRAWENV ARC
DRAW
EDITFEATURE ARC
SELECT (Sélection de la ligne faite à l'aide du curseur)
PUT REGION
QUIT
```

Annexe 5

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT REGION2
EDITCOV REGION2
DRAWENV ARC NODE
DRAW
EDITFEATURE ARC
SELECT (Sélection de la ligne faite à l'aide du curseur)
SPLIT VERTEX (Coupe la ligne en deux lignes distinctes)
SELECT (Sélection de la ligne excédentaire)
DELETE
(Les mêmes procédures sont répétées pour couper et enlever toutes les lignes excédentaires)
QUIT
```

Annexe 6

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT STAT
EDITCOV STAT
DRAWENV LABEL
DRAW
EDITFEATURE LABEL
SELECT STAT_ID = 89 (Sélection du numéro correspondant à la station Edmonton Int. A)
PUT REGION2
(Les deux dernières lignes de commandes se répètent de sorte à sélectionner et copier les 17 stations dans REGION2)
QUIT
```

Annexe 7

GENERATE STATION
INPUT STATS1.TXT
POINTS
QUIT

Annexe 8

PROJECT COVER STATION STATION1
INPUT
PROJECTION GEOGRAPHIC
UNITS DD
PARAMETERS
OUTPUT
PROJECTION LAMBERT
UNITS METERS
PARAMETERS
1ST STANDARD PARALLEL: 49 00 00
2ND STANDARD PARALLEL: 77 00 00
CENTER MERIDIAN: -95 00 00
LAT OF PROJECTION ORIGIN: 49 00 00
FALSE EASTING (METERS): 0.0
FALSE NORTHING (METERS): 0.0
END

Annexe 9

* PROGRAMME: TEMPVAR.PRG

COPY FILE C:\HENR\TEMPVAR.DBF TO C:\HENR\TVARI.DBF
USE C:\HENR\TVARI.DBF
APPEND FROM C:\HENR\TEMPCOMP.DBF

REPLACE ALL T WITH
(JAN+FEV+MARS+AVR+MAI+JUIN+JUIL+AOUT+SEPT+OCT+NOV+DEC)/12

GO TOP
MOIS = 0

DO WHILE .NOT. EOF()
MOIS = JAN
IF FEV > MOIS
MOIS = FEV
ENDIF
IF MARS > MOIS
MOIS = MARS
ENDIF
IF AVR > MOIS
MOIS = AVR
ENDIF
IF MAI > MOIS
MOIS = MAI
ENDIF
IF JUIN > MOIS
MOIS = JUIN
ENDIF
IF JUIL > MOIS
MOIS = JUIL
ENDIF
IF AOUT > MOIS
MOIS = AOUT
ENDIF
IF SEPT > MOIS
MOIS = SEPT
ENDIF
IF OCT > MOIS
MOIS = OCT
ENDIF
IF NOV > MOIS
MOIS = NOV
ENDIF
IF DEC > MOIS
MOIS = DEC
ENDIF
REPLACE CHAUD WITH MOIS
SKIP
ENDDO

GO TOP
MOIS = 10
DO WHILE .NOT. EOF()
MOIS = JAN
IF FEV < MOIS
MOIS = FEV
ENDIF
IF MARS < MOIS
MOIS = MARS
ENDIF
IF AVR < MOIS
MOIS = AVR
ENDIF
IF MAI < MOIS
MOIS = MAI
ENDIF

Annexe 9 (suite)

```
IF JUIN < MOIS
  MOIS = JUIN
ENDIF
IF JUIL < MOIS
  MOIS = JUIL
ENDIF
IF AOUT < MOIS
  MOIS = AOUT
ENDIF
IF SEPT < MOIS
  MOIS = SEPT
ENDIF
IF OCT < MOIS
  MOIS = OCT
ENDIF
IF NOV < MOIS
  MOIS = NOV
ENDIF
IF DEC < MOIS
  MOIS = DEC
ENDIF
REPLACE FROID WITH MOIS
SKIP
ENDDO
```

```
GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  MOIS = 0
  IF AVR => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  IF MAI => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  IF JUIN => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  IF JUIL => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  IF AOUT => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  IF SEPT => 10
    MOIS = MOIS + 1
  ENDIF
  REPLACE PLUS10 WITH MOIS
  SKIP
ENDDO
```

Annexe 10

* PROGRAMME: PREVAR.PRG

COPY FILE C:\HENRI\PRECIVAR.DBF TO C:\HENRI\PVARI.DBF
USE C:\HENRI\PVARI.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\PRECCOMP.DBF

```
REPLACE ALL JAN WITH JAN/10
REPLACE ALL FEV WITH FEV/10
REPLACE ALL MARS WITH MARS/10
REPLACE ALL AVR WITH AVR/10
REPLACE ALL MAI WITH MAI/10
REPLACE ALL JUIN WITH JUIN/10
REPLACE ALL JUIL WITH JUIL/10
REPLACE ALL AOUT WITH AOUT/10
REPLACE ALL SEPT WITH SEPT/10
REPLACE ALL OCT WITH OCT/10
REPLACE ALL NOV WITH NOV/10
REPLACE ALL DEC WITH DEC/10
REPLACE ALL R WITH JAN+FEV+MARS+AVR+MAI+JUIN+JUIL+AOUT+SEPT+OCT+NOV+DEC
REPLACE ALL PRECCH WITH AVR+MAI+JUIN+JUIL+AOUT+SEPT
REPLACE ALL PRECFR WITH JAN+FEV+MARS+OCT+NOV+DEC
```

GO TOP
MOIS = 1000

```
DO WHILE .NOT. EOF()
  MOIS = AVR
  IF MAI < MOIS
    MOIS = MAI
  ENDIF
  IF JUIN < MOIS
    MOIS = JUIN
  ENDIF
  IF JUIL < MOIS
    MOIS = JUIL
  ENDIF
  IF AOUT < MOIS
    MOIS = AOUT
  ENDIF
  IF SEPT < MOIS
    MOIS = SEPT
  ENDIF
  REPLACE SECCH WITH MOIS
  SKIP
ENDDO
```

GO TOP
MOIS = 1000

```
DO WHILE .NOT. EOF()
  MOIS = JAN
  IF FEV < MOIS
    MOIS = FEV
  ENDIF
  IF MARS < MOIS
    MOIS = MARS
  ENDIF
  IF OCT < MOIS
    MOIS = OCT
  ENDIF
  IF NOV < MOIS
    MOIS = NOV
  ENDIF
  IF DEC < MOIS
    MOIS = DEC
  ENDIF
```

Annexe 10 (suite)

```
REPLACE SECFR WITH MOIS
SKIP
ENDDO

GO TOP
MOIS = 0

DO WHILE .NOT. EOF()
  MOIS = AVR
  IF MAI > MOIS
    MOIS = MAI
  ENDIF
  IF JUIN > MOIS
    MOIS = JUIN
  ENDIF
  IF JUIL > MOIS
    MOIS = JUIL
  ENDIF
  IF AOUT > MOIS
    MOIS = AOUT
  ENDIF
  IF SEPT > MOIS
    MOIS = SEPT
  ENDIF
  REPLACE HUMCH WITH MOIS
  SKIP
ENDDO

GO TOP
MOIS = 0

DO WHILE .NOT. EOF()
  MOIS = JAN
  IF FEV > MOIS
    MOIS = FEV
  ENDIF
  IF MARS > MOIS
    MOIS = MARS
  ENDIF
  IF OCT > MOIS
    MOIS = OCT
  ENDIF
  IF NOV > MOIS
    MOIS = NOV
  ENDIF
  IF DEC > MOIS
    MOIS = DEC
  ENDIF
  REPLACE HUMFR WITH MOIS
  SKIP
ENDDO
```

Annexe 11

```
* PROGRAMME: TPVAR.PRG

USE C:\HENRIT\VAR1.DBF
INDEX ON IDENTIF+STR(AN) TAG IDENTIFAN
CLOSE DATABASES
USE C:\HENRIT\VAR1.DBF
INDEX ON IDENTIF+STR(AN) TAG IDENTIFAN

CLOSE DATABASES
SELECT 2
USE C:\HENRIT\VAR1.DBF
QBE__CT = 1
DO WHILE LEN(TAG(QBE__CT)) <> 0
  IF TAG(QBE__CT) = "IDENTIFAN"
    EXIT
  ELSE
    QBE__CT = QBE__CT+1
  ENDIF
ENDDO
IF LEN(TAG(QBE__CT)) = 0
USE C:\HENRIT\VAR1.DBF EXCLUSIVE
INDEX ON IDENTIFAN TAG IDENTIFAN
ENDIF
RELEASE QBE__CT
CLOSE DATABASES
SELECT 1
USE C:\HENRIT\VAR1.DBF NOUPDATE
USE C:\HENRIT\VAR1.DBF NOUPDATE IN 2 ORDER IDENTIFAN
SET EXACT ON
SET FILTER TO FOUND(2)
SET RELATION TO A->IDENTIF+STR(A->AN) INTO B
SET SKIP TO B
GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->AN,A->R,A->PRECCH,A->PRECFR,A->SECCH,A->
HUMFR,A->SECFR,A->HUMCH,B->T,B->CHAUD,B->FROID,B->PLUS10

COPY TO C:\HENRIT\VAR1.DBF
```

Annexe 12

* PROGRAMME: KOPPEN.PRG

COPY FILE C:\HENRI\STRKOP2.DBF TO C:\HENRI\KOP1.DBF
USE C:\HENRI\KOP1.DBF
APPEND FROM C:\HENRI\TPVAR1.DBF

```
GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  ARID = "N"
  IF PRECCH => (70*R)/100 .AND. R < (2*T)+28
    ARID = "B1"
  ENDIF
  IF PRECCH => (70*R)/100 .AND. R < (2*T)
    ARID = "B2"
  ENDIF
  IF PRECCH < (70*R)/100 .AND. R < (2*T)+14
    ARID = "B3"
  ENDIF
  IF PRECCH < (70*R)/100 .AND. R < (2*T)+14
    ARID = "B3"
  ENDIF
  REPLACE CB WITH ARID
  SKIP
ENDDO
```

```
GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  ARID = CB
  IF CB = "B1" .AND. R => T+14
    ARID = "BS"
  ENDIF
  IF CB = "B2" .AND. R => T
    ARID = "BS"
  ENDIF
  IF CB = "B3" .AND. R => T+7
    ARID = "BS"
  ENDIF
  IF CB = "B1" .AND. R < T+14
    ARID = "BW"
  ENDIF
  IF CB = "B2" .AND. R < T
    ARID = "BW"
  ENDIF
  IF CB = "B3" .AND. R < T+7
    ARID = "BW"
  ENDIF
  REPLACE CBS WITH ARID
  SKIP
ENDDO
```

```
GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  ARID = CBS
  IF CBS = "BS" .AND. T < 18
    ARID = "BSK"
  ENDIF
  IF CBS = "BS" .AND. T => 18
    ARID = "BSH"
  ENDIF
  IF CBS = "BW" .AND. T < 18
    ARID = "BWK"
  ENDIF
  IF CBS = "BW" .AND. T => 18
    ARID = "BWH"
  ENDIF
  REPLACE BSK WITH ARID
  SKIP
ENDDO
```

Annexe 12 (suite)

```

GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  CLAS = BSK
  IF BSK = "N" .AND. CHAUD > 10 .AND. FROID > -3 .AND. FROID < 18
    CLAS = "C"
  ENDIF
  IF BSK = "N" .AND. CHAUD > 10 .AND. FROID =< -3
    CLAS = "D"
  ENDIF
  IF BSK = "N" .AND. CHAUD =< 10 .AND. CHAUD > 0
    CLAS = "ET"
  ENDIF
  IF BSK = "N" .AND. CHAUD =< 0
    CLAS = "EF"
  ENDIF
  REPLACE CD WITH CLAS
  SKIP
ENDDO

GO TOP

DO WHILE .NOT. EOF()
  CLAS = CD
  IF CD = "C" .AND. SECFR < HUMCH/10
    CLAS = "CW"
  ENDIF
  IF CD = "C" .AND. SECCH < 3 .AND. SECCH < HUMFR/3
    CLAS = "CS"
  ENDIF
  IF CD = "C" .AND. CLAS # "CS" .AND. CLAS # "CW"
    CLAS = "CF"
  ENDIF
  IF CD = "C" .AND. SECCH < 3 .AND. SECCH < HUMFR/3 .AND. SECFR < HUMCH/10
    CLAS = "CV"
  ENDIF
  REPLACE CS WITH CLAS
  SKIP
ENDDO

GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
  CLAS = CS
  IF CS = "CF" .AND. CHAUD => 22
    CLAS = "CFA"
  ENDIF
  IF CS = "CW" .AND. CHAUD => 22
    CLAS = "CWA"
  ENDIF
  IF CS = "CS" .AND. CHAUD => 22
    CLAS = "CSA"
  ENDIF
  IF CS = "CV" .AND. CHAUD => 22
    CLAS = "CVA"
  ENDIF
  IF CS = "CF" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
    CLAS = "CFC"
  ENDIF
  IF CS = "CS" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
    CLAS = "CSC"
  ENDIF
  IF CS = "CW" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
    CLAS = "CWC"
  ENDIF
  IF CS = "CV" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
    CLAS = "CVC"
  ENDIF

```

Annexe 12 (suite)

```

IF CS = "CF" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "CFB"
ENDIF
IF CS = "CS" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "CSB"
ENDIF
IF CS = "CW" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "CWB"
ENDIF
IF CS = "CV" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "CVB"
ENDIF
REPLACE CSA WITH CLAS
SKIP
ENDDO

GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
CLAS = CSA
IF CSA = "D" .AND. SECFR < HUMCH/10
CLAS = "DW"
ENDIF
IF CSA = "D" .AND. SECCH < 3 .AND. SECCH < HUMFR/3
CLAS = "DS"
ENDIF
IF CSA = "D" .AND. CLAS # "DS" .AND. CLAS # "DW"
CLAS = "DF"
ENDIF
IF CSA = "D" .AND. SECCH < 3 .AND. SECCH < HUMFR/3 .AND. SECFR < HUMCH/10
CLAS = "DV"
ENDIF
REPLACE DSW WITH CLAS
SKIP
ENDDO

~ GO TOP
DO WHILE .NOT. EOF()
CLAS = DSW
IF DSW = "DF" .AND. CHAUD => 22
CLAS = "DFA"
ENDIF
IF DSW = "DW" .AND. CHAUD => 22
CLAS = "DWA"
ENDIF
IF DSW = "DS" .AND. CHAUD => 22
CLAS = "DSA"
ENDIF
IF DSW = "DV" .AND. CHAUD => 22
CLAS = "DVA"
ENDIF
IF DSW = "DF" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DFC"
ENDIF
IF DSW = "DS" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DSC"
ENDIF
IF DSW = "DW" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DWC"
ENDIF
IF DSW = "DV" .AND. CHAUD => 10 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DVC"
ENDIF
IF DSW = "DF" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DFB"
ENDIF

```

Annexe 12 (suite)

```
IF DSW = "DS" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DSB"
ENDIF
IF DSW = "DW" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DWB"
ENDIF
IF DSW = "DV" .AND. PLUS10 => 4 .AND. CHAUD < 22
CLAS = "DVB"
ENDIF
IF DSW = "DF" .AND. FROID < -38
CLAS = "DFD"
ENDIF
IF DSW = "DS" .AND. FROID < -38
CLAS = "DSD"
ENDIF
IF DSW = "DW" .AND. FROID < -38
CLAS = "DWD"
ENDIF
IF DSW = "DV" .AND. FROID < -38
CLAS = "DVD"
ENDIF
REPLACE KOP WITH CLAS
SKIP
ENDDO

CLOSE DATABASES
SELECT 1
USE C:\HENRI\KOP1.DBF
SET EXACT ON
SET FILTER TO
GO TOP
SET FIELDS TO A->IDENTIF,A->AN,A->KOP
COPY TO C:\HENRI\KOPPEN1.DBF
```

Annexe 13

Une première couverture (BASE) était créée au départ à l'aide d'une commande ARC (CREATE BASE STAT), de sorte à copier uniquement le fichier des coordonnées de référence (fichier "TIC") de la couverture STAT vers une nouvelle couverture (BASE). Les points et coordonnées, reliés aux 17 stations choisies pour l'étude, étaient ensuite copiés du fichier STAT vers BASE à l'aide des commandes suivantes:

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT STAT
EDITCOV STAT
DRAWENV LABEL
DRAW
EDITFEATURE LABEL
SELECT STAT_ID = 89 (Sélection du numéro correspondant à la station Edmonton Int. A)
PUT BASE
(Les deux dernières lignes de commandes se répètent de sorte à sélectionner et copier les 17 stations dans
BASE)
QUIT
```

Et après, BASE était copiée vers une nouvelle couverture (BASE2130) avec la commande COPYCOV BASE BASE2130. La topologie de BASE2130 était alors construite à l'aide des commandes BUILD BASE2130 POINT. BASE2130 était ensuite copiée vers 13 nouvelles couvertures (BASE2150 à BASE8190), de sorte à en avoir une pour chaque période ou année en question.

Annexe 14

Commandes utilisées pour afficher les carte climatiques à l'aide de ARCEDIT:

```
ARCEDIT
DISPLAY 4
MAPEXTENT REGION3
EDITCOV POLY2130
DRAWENV ALL
BACKCOV REGION3
BACKENV ALL
DRAW
EDITFEATURE LABEL
SELECT (Sélection à l'aide du curseur d'un point d'identification relié à une région climatique choisie sur la
carte)
LIST (Pour afficher les informations reliées au point choisi, telles que la superficie de la région en m2)
QUIT
```