

**Record Number:** 910  
**Author, Monographic:** Charbonneau, R.//Fortin, J. P.//Morin, G.//Sochanska, W.  
**Author Role:**  
**Title, Monographic:** Étude du réseau météorologique et du réseau nivométrique de la région  
du lac Saint-Jean  
**Translated Title:**  
**Reprint Status:**  
**Edition:**  
**Author, Subsidiary:**  
**Author Role:**  
**Place of Publication:** Québec  
**Publisher Name:** INRS-Eau  
**Date of Publication:** 1978  
**Original Publication Date:**  
**Volume Identification:**  
**Extent of Work:** xxi, 324  
**Packaging Method:** pages incluant 2 annexes  
**Series Editor:**  
**Series Editor Role:**  
**Series Title:** INRS-Eau, Rapport de recherche  
**Series Volume ID:** 91  
**Location/URL:**  
**ISBN:** 2-89146-089-8  
**Notes:** Rapport annuel 1977-1978  
**Abstract:** Rapport rédigé pour la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée  
55.00\$  
**Call Number:** R000091  
**Keywords:** rapport/ ok/ dl

Etude du réseau météorologique et du  
réseau nivométrique de la région du  
lac Saint-Jean

INRS-Eau  
Université du Québec  
C.P. 7500, Sainte-Foy  
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 91  
1978

Rapport rédigé pour  
l'Alcan

par

R. Charbonneau, J.P. Fortin, G. Morin, W. Sochanska

ISBN 2-89146-089-8

DEPOT LEGAL 1978

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés

© 1978 - Institut national de la recherche scientifique

Etude du réseau météorologique et  
du réseau nivométrique de la région  
du lac Saint-Jean

Résumé

Les objectifs principaux de l'étude sont de:

- procéder à une analyse critique de la qualité des données portant sur les précipitations liquides et solides du bassin versant du lac Saint-Jean;
- faire ressortir les redondances éventuelles dans l'information fournie par les stations;
- définir la fonction de structure dans l'espace en fonction du type de précipitation, du pas de temps et de la saison;
- tracer les courbes d'iso-valeurs montrant la distribution de la variable étudiée dans l'espace et les courbes d'iso-erreurs indiquant l'écart type d'estimation ponctuelle sur toute la surface étudiée;
- envisager divers scénarios d'implantation de nouvelles stations afin de chiffrer les gains obtenus sur la précision de l'estimation et de juger de l'intérêt de l'implantation effective de ces stations pour compléter le réseau en fonction des contraintes de coût et d'accessibilité.

L'analyse des réseaux de mesure des précipitations et de neige au sol a permis de faire ressortir les principales caractéristiques des réseaux actuels et d'étudier dans quelles mesures des réseaux différents pourraient permettre d'estimer les données désirées avec une précision supérieure ou au moins égale à celle des réseaux actuels.

On a pu constater qu'en général la qualité des données aux stations est satisfaisante. On dénote certaines anomalies dans la mesure des données ou l'homogénéité des séries chronologiques pour un nombre restreint de stations. Certaines stations ont des comportements assez semblables pour former des groupes. On a constaté ainsi que certaines stations demeureraient toujours dans le même groupe, alors que d'autres pourraient passer d'un groupe à un autre suivant la saison. Les cinq réseaux proposés ont été étudiés à l'aide de la méthode de l'interpolation optimale.

Mots-clé:

Réseau, météorologie, nivométrie, composante, principale, contrôle, mesure, fréquence, événement, homogénéité, série, chronologique, erreur, estimation, interpolation, précipitation, lame, estimation, ponctuel, optimum, pluie, neige, station, corrélation, coefficient, ellipse, proximité, varimax, répartition, écart type, ponctuel, lac, Saint-Jean.

Référence:

CHARBONNEAU, R., FORTIN, J.-P., MORIN, G. et SOCHANSKA, W. (1978).  
Etude du réseau météorologique et du réseau nivométrique de la région  
du lac Saint-Jean. INRS-Eau, rapport scientifique No 91, 292 p., 2 an-  
nexes. (Pour l'Alcan).

## TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
RESUME.....	i
TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	xi
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 - LE FICHIER DES DONNEES.....	7
2.1 Données météorologiques.....	9
2.2 Données nivométriques.....	9
CHAPITRE 3 - CONTROLE DE LA QUALITE DE LA MESURE.....	15
3.1 Fréquence des événements selon les jours de la semaine.....	17
3.1.1 Description de la méthode.....	17
3.1.2 Analyse des résultats.....	18
3.2 Occurrence des chiffres.....	22
3.2.1 Description de la méthode.....	22
3.2.2 Analyse des résultats.....	24
3.3 Contrôle de l'homogénéité des séries chrono- logiques.....	24
3.3.1 Description de la méthode.....	24
3.3.2 Analyse des résultats.....	35
CHAPITRE 4 - ETUDE DU RESEAU METEOROLOGIQUE ACTUEL PAR LA METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	47
4.1 Données utilisées.....	49

4.2	Application de la méthode des composantes principales.....	52
4.2.1	Période "ANNUELLE".....	56
4.2.2	Période saisonnière.....	69
4.2.3	Période 15 jours.....	91
4.2.4	Ligne de relevés de neige.....	112
4.3	Conclusion.....	128
CHAPITRE 5-	ERREURS D'ESTIMATION ASSOCIEES A L'INTERPOLATION DES PRECIPITATIONS ET DE LA NEIGE AU SOL.....	163
5.1	Données et périodes utilisées.....	165
5.2	Calcul de la fonction de structure.....	166
5.3	Interpolation optimale.....	182
5.4	Estimation des précipitations et des lames d'eau au sol sur le bassin versant du lac Saint-Jean..	185
5.5	Ecart type de l'estimation ponctuelle des précipitations et des lames d'eau au sol sur le bassin versant du lac Saint-Jean.....	200
5.5.1	"Réseau M1".....	201
5.5.2	"Réseau M2".....	212
5.5.3	"Réseau M3".....	223
5.5.4	"Réseau M4".....	236
5.5.5	"Réseau M5".....	249
5.5.6	"Réseau N1".....	261
5.5.7	"Réseau N2".....	266
5.6	Erreur sur des surfaces.....	272
5.6.1	Analyse des résultats.....	274
5.7	Conclusion.....	280
CHAPITRE 6-	CONCLUSION GENERALE.....	285
CHAPITRE 7-	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	289
ANNEXE A-	METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES.....	A-1
ANNEXE B-	METHODE DE L'INTERPOLATION OPTIMALE.....	B-1

## LISTE DES TABLEAUX

		<u>PAGE</u>
2.1	Stations météorologiques du bassin versant du lac Saint-Jean.....	10
2.2	Stations nivométriques du bassin versant du lac Saint-Jean.....	12
3.1	Variabilité des pluies mesurées entre les jours 135 et 270 selon les jours de la semaine.....	19
3.2	Variabilité de la pluie selon les jours de la semaine des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.....	20
3.3	Résultats de l'analyse par l'occurrence des chiffres des précipitations des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.....	25
3.4	Occurrence des chiffres (station Mont-Apica).....	26
3.5	Résultats de l'analyse chronologique des stations par la méthode Bois des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.....	40
3.6	Résumé de l'analyse du contrôle de la qualité des mesures.....	46
4.1	Stations météorologiques de la région du lac Saint-Jean utilisées pour l'étude du réseau par la méthode des composantes principales.....	50
4.2	Stations employées pour compléter les absences de données journalières.....	53
4.3	Périodes utilisées pour l'étude.....	54
4.4	Corrélation entre composantes et station; période "ANNUELLE".....	57
4.5	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "ANNUELLE".....	65
4.6	Corrélation entre composantes et station; période "HIVER, 1 période".....	71

4.7	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "HIVER, 1 période".....	73
4.8	Corrélation entre composantes et station; période "PRINTEMPS, 1 période".....	77
4.9	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "PRINTEMPS, 1 période".....	79
4.10	Corrélation entre composantes et station; période "ETE, 1 période".....	82
4.11	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "ETE, 1 période".....	84
4.12	Corrélation entre composantes et station; période "AUTOMNE, 1 période".....	87
4.13	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "AUTOMNE, 1 période".....	89
4.14	Corrélation entre composantes et station; période "HIVER/15 jours".....	93
4.15	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "HIVER/15 jours".....	95
4.16	Corrélation entre composantes et station; période "PRINTEMPS/15 jours".....	98
4.17	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "PRINTEMPS/15 jours".....	100
4.18	Corrélation entre composantes et station; période "ETE/15 jours".....	103
4.19	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "ETE/15 jours".....	105
4.20	Corrélation entre composantes et station; période "AUTOMNE/15 jours".....	108
4.21	Corrélation entre composantes et station après rotation; période "AUTOMNE/15 jours".....	110
4.22	Corrélation entre composantes et station; "RELEVÉ NEIGE JANVIER".....	114

4.23	Corrélation entre composantes et station après rotation; "RELEVÉ NEIGE JANVIER".....	115
4.24	Corrélation entre composantes et station; "RELEVÉ NEIGE FEVRIER".....	119
4.25	Corrélation entre composantes et station après rotation; "RELEVÉ NEIGE FEVRIER".....	121
4.26	Corrélation entre composantes et station; "RELEVÉ NEIGE MARS".....	124
4.27	Corrélation entre composantes et station après rotation; "RELEVÉ NEIGE MARS".....	126
4.28	Regroupement de la station 1 avec les autres stations météorologiques.....	144
4.29	Regroupement de la station 2 avec les autres stations météorologiques.....	144
4.30	Regroupement de la station 3 avec les autres stations météorologiques.....	145
4.31	Regroupement de la station 4 avec les autres stations météorologiques.....	145
4.32	Regroupement de la station 5 avec les autres stations météorologiques.....	146
4.33	Regroupement de la station 6 avec les autres stations météorologiques.....	146
4.34	Regroupement de la station 7 avec les autres stations météorologiques.....	147
4.35	Regroupement de la station 8 avec les autres stations météorologiques.....	147
4.36	Regroupement de la station 9 avec les autres stations météorologiques.....	148
4.37	Regroupement de la station 10 avec les autres stations météorologiques.....	148
4.38	Regroupement de la station 11 avec les autres stations météorologiques.....	149
4.39	Regroupement de la station 12 avec les autres stations météorologiques.....	149

4.40	Regroupement de la station 13 avec les autres stations météorologiques.....	150
4.41	Regroupement de la station 14 avec les autres stations météorologiques.....	150
4.42	Regroupement de la station 15 avec les autres stations météorologiques.....	151
4.43	Regroupement de la station 16 avec les autres stations météorologiques.....	151
4.44	Regroupement de la station 17 avec les autres stations météorologiques.....	152
4.45	Regroupement de la station 18 avec les autres stations météorologiques.....	152
4.46	Regroupement de la station 19 avec les autres stations météorologiques.....	153
4.47	Regroupement de la station 1 avec les autres stations nivométriques.....	154
4.48	Regroupement de la station 2 avec les autres stations nivométriques.....	154
4.49	Regroupement de la station 3 avec les autres stations nivométriques.....	154
4.50	Regroupement de la station 4 avec les autres stations nivométriques.....	155
4.51	Regroupement de la station 5 avec les autres stations nivométriques.....	155
4.52	Regroupement de la station 6 avec les autres stations nivométriques.....	155
4.53	Regroupement de la station 7 avec les autres stations nivométriques.....	156
4.54	Regroupement de la station 8 avec les autres stations nivométriques.....	156
4.55	Regroupement de la station 9 avec les autres stations nivométriques.....	156
4.56	Regroupement de la station 10 avec les autres stations nivométriques.....	157

4.57	Regroupement de la station 11 avec les autres stations nivométriques.....	157
4.58	Regroupement de la station 12 avec les autres stations nivométriques.....	157
4.59	Regroupement de la station 13 avec les autres stations nivométriques.....	158
4.60	Regroupement de la station 14 avec les autres stations nivométriques.....	158
4.61	Regroupement de la station 15 avec les autres stations nivométriques.....	158
4.62	Regroupement de la station 16 avec les autres stations nivométriques.....	159
4.63	Regroupement de la station 17 avec les autres stations nivométriques.....	159
4.64	Regroupement de la station 18 avec les autres stations nivométriques.....	159
4.65	Regroupement de la station 19 avec les autres stations nivométriques.....	160
4.66	Regroupement de la station 22 avec les autres stations nivométriques.....	160
4.67	Regroupement de la station 23 avec les autres stations nivométriques.....	160
4.68	Regroupement de la station 24 avec les autres stations nivométriques.....	161
5.1	Paramètres d'ajustement des fonctions de structure...	169
5.2	Précipitations moyenne pour la période 1966-1975.....	186
5.3	Lame moyenne d'eau au sol pour la période 1955-1977..	187
5.4	Stations météorologiques du "Réseau M3".....	225
5.5	Stations météorologiques du "Réseau M4".....	238
5.6	Stations météorologiques du "Réseau M5".....	250
5.7	Stations météorologiques du "Réseau N2".....	267

5.8	Caractéristiques des précipitations et des relevés de neige pour différentes périodes sur le bassin versant du lac Saint-Jean.....	277
5.9	Erreur relative en % des précipitations et des relevés de neige pour différentes périodes, en fonction du nombre de postes météorologiques distribués uniformément sur le bassin versant du lac Saint-Jean.....	281

## LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
2.1	Emplacement des 30 stations météorologiques sur le bassin versant du lac Saint-Jean.....	11
2.2	Emplacement des 24 stations de relevés nivométriques sur le bassin versant du lac Saint-Jean.....	13
3.1	Nombre total de jours de pluie et hauteur moyenne des pluies pour 25 stations.....	21
3.2	Nombre total de jours de pluie et hauteur moyenne des pluies pour 3 stations de plus de 50 ans d'observations.....	21
3.3	Fréquence d'observation des centièmes et des dizaines pour des pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce (a) et entre 0.10 et 0.99 pouce (b et c), à la station "Chute-des-Passes".....	23
3.4	Fréquence d'observation des hauteurs de pluies pour la station "Mont-Apica".....	27
3.5	Fréquence d'observation des centièmes et des dizaines pour des pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce (a) et entre 0.10 et 0.99 pouce (b et c), à la station "Mont-Apica".	28
3.6	Sensibilité de la méthode (Multiplication par 1,1 de 1900 à 1930, $\bar{X} = 1000$ , $\sigma = 160$ ).....	36
3.7	Double masse correspondant à la figure 5.1 (Multiplication par 1,1 de 1900 à 1930, $\bar{X} = 1000$ , $\sigma = 160$ )...	37
3.8	Cumul des résidus en fonction du temps (probabilité de dépassement à 5% (···), à 1% (---)).....	41
3.9	Cumul des résidus en fonction du temps (probabilité de dépassement à 5% (···), à 1% (---)).....	42
4.1	Emplacement sur le bassin versant du lac Saint-Jean des 19 stations météorologiques utilisées pour l'étude du réseau par la méthode des composantes principales.....	51

4.2	Représentation des coefficients de corrélation entre les stations et les trois premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ANNUELLE".....	60
4.4	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ANNUELLE".	63
4.5	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "ANNUELLE".....	68
4.6	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "HIVER, 1 période".....	72
4.7	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "HIVER, 1 période".....	74
4.8	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "PRINTEMPS, 1 période".....	78
4.9	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "PRINTEMPS, 1 période".....	80
4.10	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ETE, 1 période".	83
4.11	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "ETE, 1 période".....	85

4.12	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "AUTOMNE, 1 période".....	88
4.13	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "AUTOMNE, 1 période".....	90
4.14	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "HIVER/15 jours".	94
4.15	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "HIVER/15 jours".....	96
4.16	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "PRINTEMPS/15 jours".....	99
4.17	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "PRINTEMPS/15 jours".....	101
4.18	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ETE/15 jours"..	104
4.19	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "ETE/15 jours".....	106
4.20	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "AUTOMNE/15 jours".	109

4.21	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "AUTOMNE/15 jours".....	111
4.22	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "JANVIER".....	116
4.23	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE JANVIER".....	117
4.24	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "FEVRIER".....	120
4.25	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE FEVRIER".....	122
4.26	Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "MARS".....	125
4.27	Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE MARS".....	127
4.28	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ANNUELLE".....	132
4.29	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "HIVER".....	133
4.30	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "PRINTEMPS".....	134
4.31	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ETE".....	135

4.32	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "AUTOMNE".....	136
4.33	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "HIVER/15 jours".....	137
4.34	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "PRINTEMPS/15 jours".	138
4.35	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ETE/15 jours".....	139
4.36	Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "AUTOMNE/15 jours"...	140
4.37	Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "JANVIER".....	141
4.38	Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "FEVRIER".....	142
4.39	Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "MARS".....	143
5.1	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ANNUELLE".....	170
5.2	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "HIVER, 1 période".....	171
5.3	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "PRINTEMPS, 1 période".....	172
5.4	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ETE, 1 période".....	173
5.5	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "AUTOMNE, 1 période".....	174
5.6	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "HIVER/15 jours".....	175
5.7	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "PRINTEMPS/15 jours".....	176
5.8	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ETE/15 jours".....	177

5.9	Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "AUTOMNE/15 jours".....	178
5.10	Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "JANVIER".....	179
5.11	Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "FEVRIER".....	180
5.12	Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "MARS".....	181
5.13	Précipitation moyenne pour la période "ANNUELLE" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	188
5.14	Précipitation moyenne pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	189
5.15	Précipitation moyenne pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	190
5.16	Précipitation moyenne pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	191
5.17	Précipitation moyenne pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	192
5.18	Précipitation moyenne pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	193
5.19	Précipitation moyenne pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs à 19 stations.....	194
5.20	Précipitation moyenne pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	195

5.21	Précipitation moyenne pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.....	196
5.22	Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "JANVIER" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 23 stations.....	197
5.23	Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "FEVRIER" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 24 stations.....	198
5.24	Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "MARS" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 24 stations.....	199
5.25	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M1, 19 stations).....	203
5.26	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M1, 19 stations).....	204
5.27	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M1, 19 stations).....	205
5.28	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M1, 19 stations).....	206
5.29	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M1, 19 stations).....	207
5.30	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).....	208
5.31	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).....	209

5.32	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).....	210
5.33	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).....	211
5.34	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M2, 30 stations).....	214
5.35	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M2, 30 stations).....	215
5.36	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M2, 30 stations).....	216
5.37	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M2, 30 stations).....	217
5.38	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M2, 30 stations).....	218
5.39	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).....	219
5.40	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).....	220
5.41	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).....	221
5.42	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).....	222
5.43	Répartition géographique des 10 stations météorologiques du réseau M3.....	226

5.44	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M3, 10 stations).....	227
5.45	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M3, 10 stations).....	228
5.46	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M3, 10 stations).....	229
5.47	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M3, 10 stations).....	230
5.48	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M3, 10 stations).....	231
5.49	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).....	232
5.50	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).....	233
5.51	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).....	234
5.52	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).....	235
5.53	Répartition géographique des 18 stations météorologiques du réseau M4.....	239
5.54	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M4, 18 stations).....	240
5.55	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M4, 18 stations).....	241
5.56	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M4, 18 stations).....	242

5.57	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M4, 18 stations).....	243
5.58	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M4, 18 stations).....	244
5.59	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).....	245
5.60	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).....	246
5.61	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).....	247
5.62	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).....	248
5.63	Répartition géographique des 18 stations météorologiques du réseau M5.....	251
5.64	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M5, 18 stations).....	252
5.65	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M5, 18 stations).....	253
5.66	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M5, 18 stations).....	254
5.67	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M5, 18 stations).....	255
5.68	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M5, 18 stations).....	256

5.69	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).....	257
5.70	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).....	258
5.71	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).....	259
5.72	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).....	260
5.73	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "JANVIER" (réseau N1, 24 stations).....	263
5.74	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "FEVRIER" (réseau N1, 24 stations).....	264
5.75	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "MARS" (réseau N1, 24 stations).....	265
5.76	Répartition géographique des 17 stations de relevés de neige du réseau N2.....	268
5.77	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "JANVIER" (réseau N2, 17 stations).....	269
5.78	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "FEVRIER" (réseau N2, 17 stations).....	270
5.79	Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "MARS" (réseau N2, 17 stations).....	271
5.80	Exponentielles ajustées aux coefficients de corrélation des précipitations en fonction de la distance.....	278
5.81	Exponentielles ajustées aux coefficients de corrélation des précipitations et des relevés de neige en fonction de la distance.....	279



CHAPITRE 1

INTRODUCTION



L'ère de l'énergie à bon marché et illimitée est maintenant bien révolue. On devient donc plus conscient de la nécessité d'utiliser au mieux l'énergie disponible. Dans ce nouveau contexte, l'expansion ou la survie même d'une industrie dépend de la possibilité de satisfaire ses exigences énergétiques à un coût qui lui permet de garder ou d'améliorer sa position concurrentielle par rapport à ses compétiteurs.

La Société d'électrolyse et de chimie Alcan Limitée (SECAL) produit sa propre électricité. Comme toutefois l'électrolyse de l'aluminium requiert de très grandes quantités d'électricité, il lui importe encore plus maintenant d'optimiser le rendement de ses équipements hydro-électriques.

Compte tenu du mode de production de l'électricité, cette optimisation passe par une gestion améliorée des ressources en eau disponibles dans le bassin d'alimentation de l'usine hydro-électrique. C'est pourquoi il est apparu nécessaire d'analyser et de compléter au besoin le réseau de mesures météorologiques sur le bassin en question.

L'expansion projetée du réseau d'acquisition des données a été considérée par la SECAL comme une occasion propice à une étude complète du réseau actuel. Elle espère ainsi en faire ressortir les qualités et les faiblesses de façon à être en mesure de proposer des changements qui assureront une information optimale, compte tenu des contraintes de coûts d'installation des nouvelles stations et de l'accessibilité des sites optimaux.

La SECAL a confié à l'INRS-Eau la réalisation d'une étude portant sur la rationalisation du réseau pluviométrique et du réseau nivométrique de la région du lac Saint-Jean dont les résultats sont présentés dans ce rapport.

Dans le but de réaliser le mandat qui lui a été confié par la SECAL; l'INRS-Eau s'est donné comme objectifs principaux, en fonction du cadre de l'étude, de:

- procéder à une analyse critique de la qualité des données portant sur les précipitations liquides et solides du bassin versant du lac Saint-Jean. Cette analyse a porté plus particulièrement sur:
  - a) les précipitations annuelles;
  - b) les précipitations saisonnières;
  - c) les précipitations totales par quinzaines, pour les quatre saisons;
  - d) les relevés de neige.
  
- d'étudier le réseau actuel à l'aide des composantes principales et de l'interpolation optimale, de manière à:
  - a) faire ressortir les redondances éventuelles dans l'information fournie par les stations;
  - b) définir la fonction de structure dans l'espace en fonction du type de précipitation, du pas de temps et de la saison;
  - c) tracer les courbes d'iso-valeurs montrant la distribution de la variable étudiée dans l'espace et les courbes d'iso-erreurs indiquant l'écart type d'estimation ponctuelle sur toute la surface étudiée;

- d) étudier divers scénarios d'implantation de nouvelles stations afin de chiffrer les gains obtenus sur la précision de l'estimation et de juger de l'intérêt de l'implantation effective de ces stations pour compléter le réseau en fonction des contraintes de coût et d'accessibilité.



## CHAPITRE 2

### LE FICHER DES DONNEES



Les données utilisées qui ont été obtenues, soit du ministère des Richesses naturelles du Québec (MRN), soit directement de la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Limitée (SECAL) se divisent en deux groupes: les données météorologiques et les données nivométriques (lignes à neige).

## 2.1 DONNEES METEOROLOGIQUES

Le tableau 2.1 indique les stations obtenues du MRN et la période d'observations disponible. Sur ce fichier on retrouve les températures maximales, les températures minimales, les précipitations liquides et les précipitations solides pour les 26 stations météorologiques permanentes. Aucune information provenant des stations automatiques n'a été utilisée. La figure 2.1 montre la position de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

## 2.2 DONNEES NIVOMETRIQUES

Le tableau 2.2 indique les stations obtenues de la SECAL et du MRN ainsi que la période d'observations disponible. Chaque année d'observations comporte trois mesures, soient: les relevés de neige des mois de janvier, février et mars. La figure 2.2 montre la position de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean.



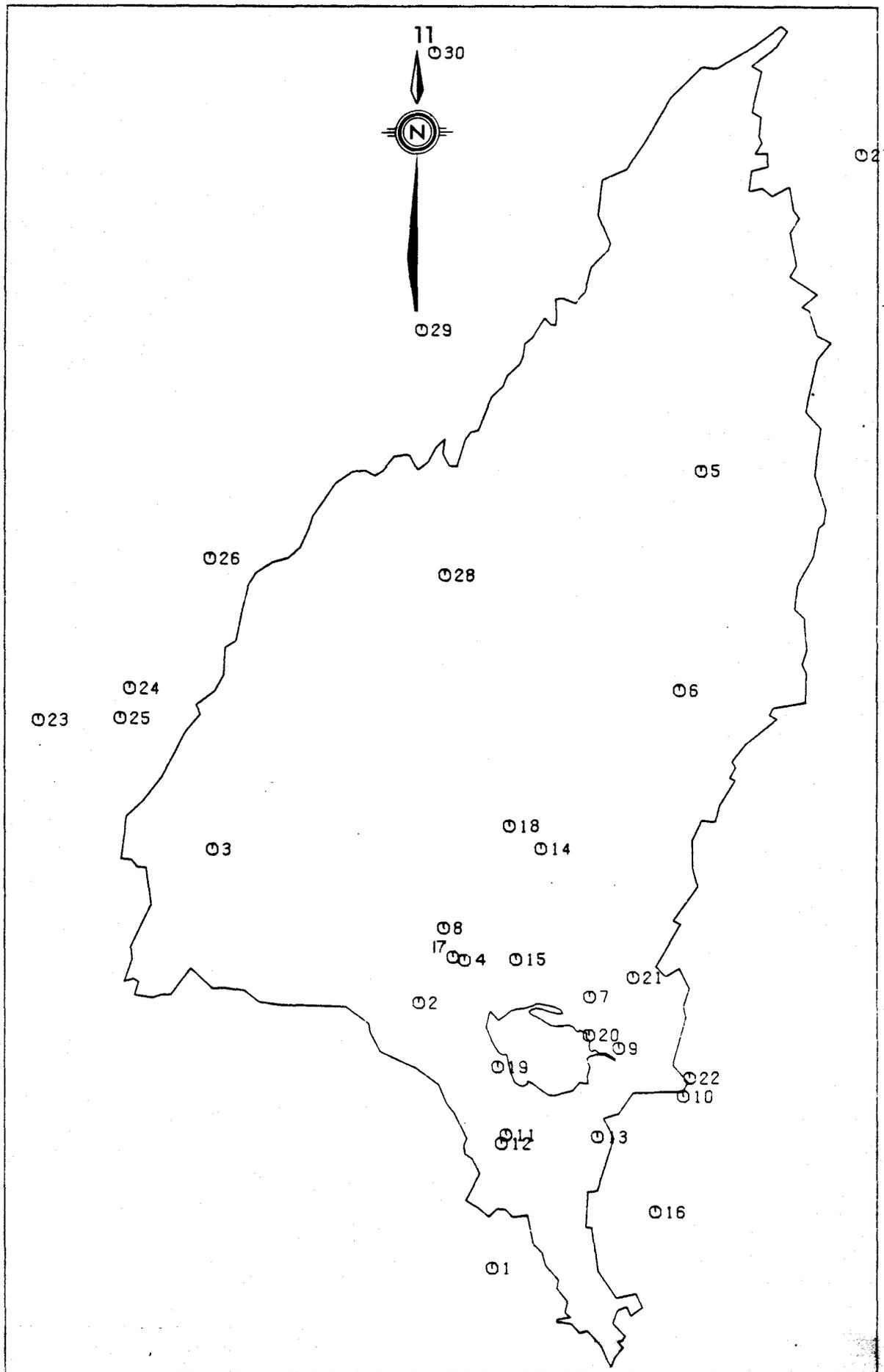


FIGURE 2.1 Emplacement des 30 stations météorologiques sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

TABLEAU 2.2 Stations nivométriques du bassin versant du lac Saint-Jean.

NUMERO FEDERAL	NOM	NUMERO	PERIODE				
			55	60	65	70	75
610010	Rivière Chicoutimi	1					
610020	Rivière aux Ecorces	2					
610040	Portage des Roches	3					
610010	Lac-des-Commissaires	4					
619010	Barrage sud du Chemin Chibougamau	5					
619020	Lac Chigoubiche	6					
619030	Barrage nord du Chemin Chibougamau	7					
619050	Lac Long	8					
621010	Barrage Gervais	9					
621020	Chemin de la rivière Mistassibi (22)	10					
621030	Chemin de la rivière Mistassibi (41)	11					
621040	Chemin de la rivière Mistassibi (55)	12					
621050	Lac des Cygnes	13					
621060	Lac Machisque	14					
622010	Lac aux Grandes Pointes	15					
622020	Lac Alex	16					
622030	Rivière au Serpent	17					
622040	Passes Dangereuses	18					
622060	Lac Manouane	19					
622080	Lac Piacouadie	20					
622090	Lac Benoît	21					
807010	Lac Caché	22					
807020	Chapais	23					
810150	Lac Albanel	24					

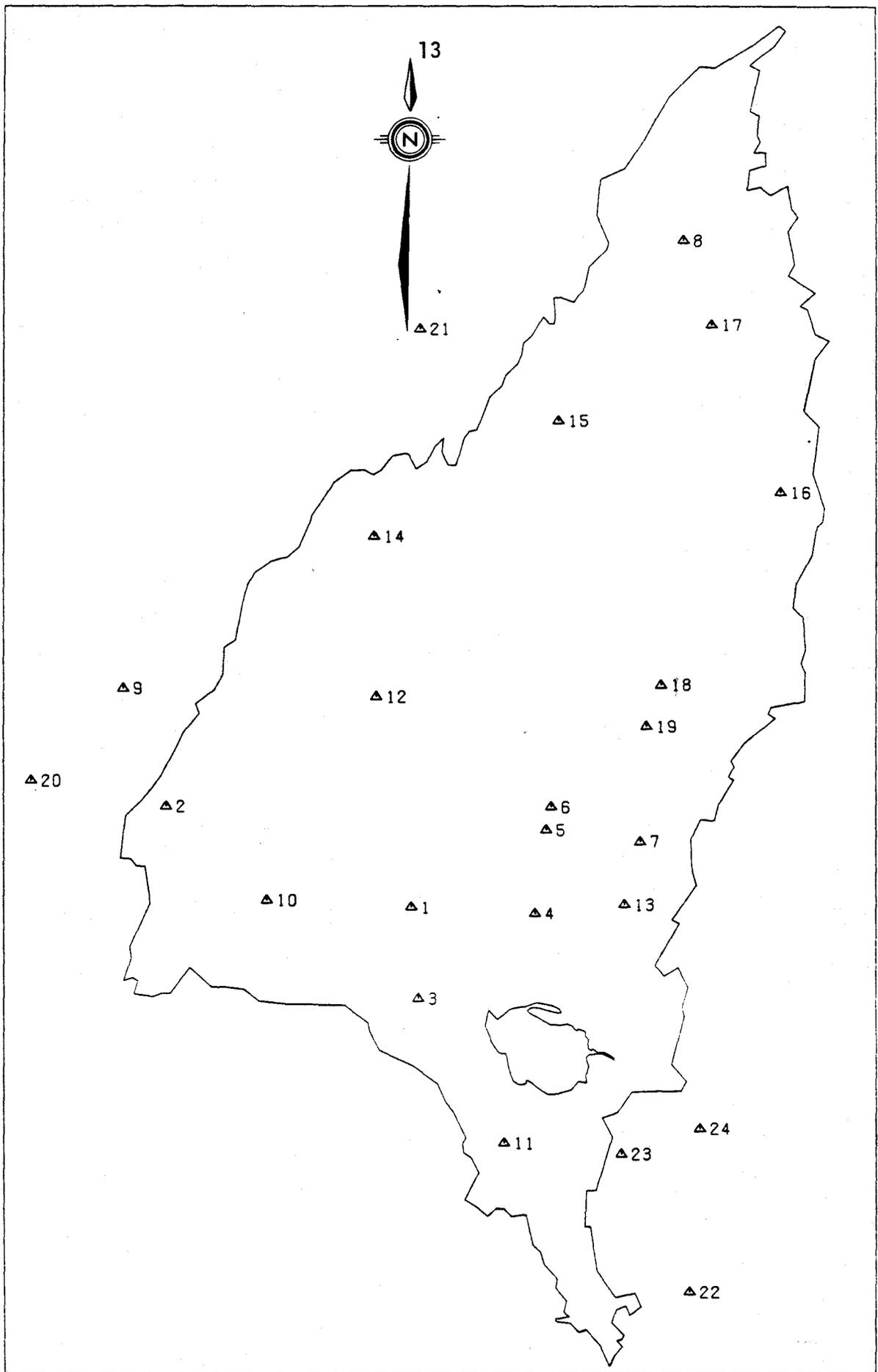


FIGURE 2.2 Emplacement des 24 stations de relevés nivométriques sur le bassin versant du lac Saint-Jean.



## CHAPITRE 3

### CONTROLE DE LA QUALITE DE LA MESURE



Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier la qualité des données disponibles entre les jours 135 à 270. Nous nous attacherons tout d'abord à vérifier avec quelle précision l'observateur effectue ses mesures et à contrôler sa ponctualité; c'est-à-dire sa tendance à cumuler les précipitations certains jours particuliers de la semaine afin d'éviter le dérangement occasionné par le relevé de la mesure. Un autre type d'analyse des séries chronologiques résultant de ces observations permettra d'en vérifier l'homogénéité temporelle.

### 3.1 FREQUENCE DES EVENEMENTS SELON LES JOURS DE LA SEMAINE

Les événements météorologiques ne sont pas liés aux jours de la semaine. L'observateur, pour sa part, a une façon de vivre qui est liée à certains jours de la semaine. Prend-il la peine d'aller lire des instruments les jours de congé? S'il y a pluie, il laisse peut-être s'accumuler l'eau et fait une seule lecture totale. La méthode d'estimation de ces sources d'erreurs est d'autant plus précise que la série de mesures est longue, à condition que l'observateur soit resté le même et que la localisation de la station soit demeurée inchangée.

#### 3.1.1 Description de la méthode

Il suffit de cumuler les hauteurs de précipitation mesurées pour chacun des jours de la semaine. Statistiquement, la distribution du nombre d'événements ainsi que les hauteurs mesurées suivent une distribution uniforme, lorsque l'observateur observe

les consignes à la lettre. Dans le cas contraire, la distribution résultante est d'autant moins uniforme que l'observateur s'écarte de façon systématique et périodique des consignes.

### 3.1.2 Analyse des résultats

Les résultats de la variabilité du nombre d'observations et de la hauteur moyenne des pluies en fonction des jours de la semaine à chacune des stations pour les jours 135 à 270 d'une année sont présentés au tableau 3.1.

Comme on le remarque au tableau 3.2 et à la figure 3.1, le nombre de jours de pluie observé pour l'ensemble des stations s'affaiblit le dimanche et le mardi, avec 4,338 et 4,358 cas respectivement; il s'élève le jeudi avec 4,700 cas, soit une augmentation de 8%. Par contre, la hauteur moyenne des pluies pour le jeudi est la deuxième plus faible valeur calculée avec 0.28 pouce. Le minimum est atteint le mardi avec une moyenne de 0.27 pouce, alors que le mercredi on enregistre une moyenne de 0.33 pouce, soit 18% d'augmentation.

Parmi toutes ces stations, trois stations ont plus de 50 années d'observations, ce sont: Albanel, Mistassini et Mistassini Post. Les hauteurs moyennes de ces trois stations sont indiquées au tableau 3.2 et à la figure 3.2.

La répartition du nombre de jours de pluie en fonction des jours de la semaine est plus uniforme, tandis que la hauteur moyenne des pluies est maximale le dimanche, avec 0.30 pouce et plus

TABLEAU 3.1 Variabilité des pluies mesurées entre les jours 135 et 270 selon les jours de la semaine.

STATION	PLUIE MOYENNE EN POUÇES, NOMBRE DE CAS							PERIODE
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	
7013642	24.42	24.32	33.34	25.34	25.33	29.28	25.31	1973 à 1975
706CP09	7.19	9.19	9.21	4.09	6.11	11.33	7.25	1975
7060070	12.18	20.31	23.31	20.26	16.34	23.31	19.27	1973 à 1975
7060080	415.30	429.31	397.28	399.29	412.31	408.29	396.30	1922 à 1975
7060825	142.23	133.21	141.27	155.28	149.27	142.23	145.30	1961 à 1975
7061541	154.27	136.29	156.32	171.28	158.27	147.29	156.25	1960 à 1975
7061560	220.28	216.27	231.31	225.29	210.32	210.29	205.28	1951 à 1975
7063090	103.29	91.24	109.30	116.31	99.30	114.26	94.32	1963 à 1975
7063320	430.31	444.31	465.29	446.29	456.28	445.25	428.27	1924 à 1975
7063370	79.30	73.27	81.33	74.31	82.26	68.34	72.30	1963 à 1975
7063560	215.30	224.28	227.27	229.27	220.31	221.29	217.26	1949 à 1975
7063610	85.30	68.26	75.35	82.32	77.38	80.35	73.34	1966 à 1975
7064890	134.27	111.28	125.37	142.27	124.30	125.30	123.30	1963 à 1975
7064993	15.32	18.31	25.32	23.21	15.19	15.45	18.33	1973 à 1975
7064998	205.26	196.25	201.28	200.27	188.30	195.24	191.29	1912 à 1975
7065100	139.35	132.34	155.40	165.33	158.34	147.34	140.35	1957 à 1975
7065640	328.29	345.26	348.24	326.26	318.28	346.26	302.27	1936 à 1975
7065583	108.29	84.28	113.30	124.31	115.37	103.26	105.34	1963 à 1974
7066685	151.28	162.22	160.27	174.26	157.27	158.26	150.31	1957 à 1975
7067060	133.31	134.31	132.36	144.31	135.37	138.23	127.33	1957 à 1975
7067460	118.30	113.28	126.36	129.33	114.35	117.25	115.30	1963 à 1975
7068160	315.28	301.27	308.29	308.27	303.27	281.28	293.27	1963 à 1975
7091305	111.35	113.26	129.31	146.29	135.35	132.26	118.26	1962 à 1975
7091400	266.29	269.30	283.27	305.27	295.28	314.28	282.30	1936 à 1975
7091401	43.25	37.20	44.31	50.25	51.22	48.28	50.23	1971 à 1975
7095000	455.26	476.29	486.30	518.27	478.26	482.28	487.30	1685 à 1975

TABLEAU 3.2 Variabilité de la pluie selon les jours de la semaine des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.

JOURS DE LA SEMAINE	26 STATIONS		3 STATIONS (Plus de 50 années d'observations)	
	Nombre de jours de pluie	Hauteur de pluie moyenne (pouce)	Nombre de jours de pluie	Hauteur de pluie moyenne (pouce)
Lundi	4407	.29	1075	.27
Mardi	4358	.27	1101	.28
Mercredi	4587	.33	1084	.29
Jeudi	4700	.28	1117	.28
Vendredi	4499	.29	1078	.29
Samedi	4499	.29	1085	.27
Dimanche	4338	.29	1074	.30

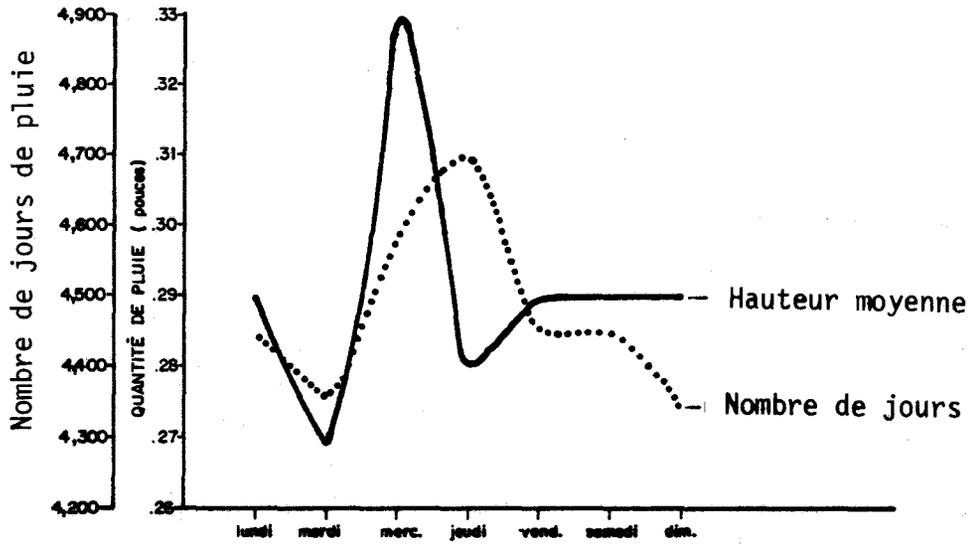


FIGURE 3.1 Nombre total de jours de pluie et hauteur moyenne des pluies pour 25 stations.

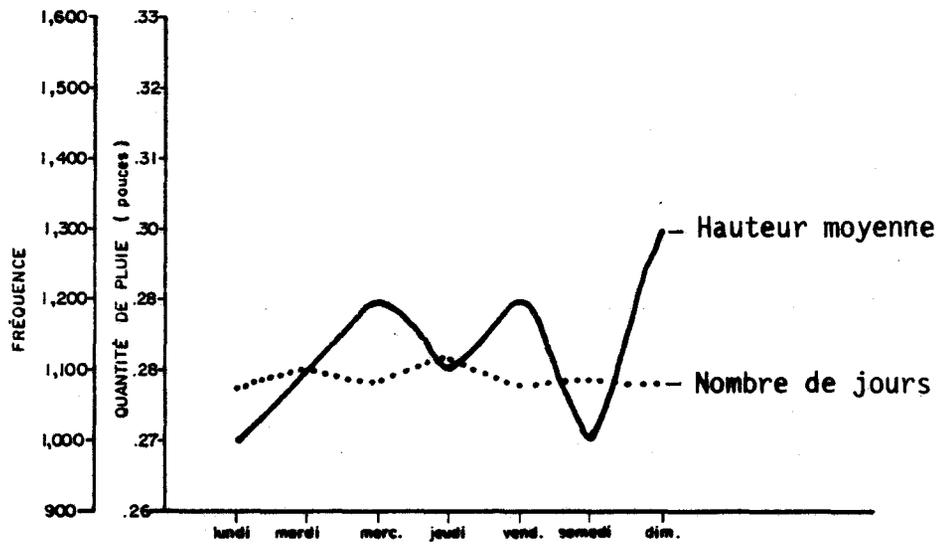


FIGURE 3.2 Nombre total de jours de pluie et hauteur moyenne des pluies pour 3 stations de plus de 50 ans d'observations.

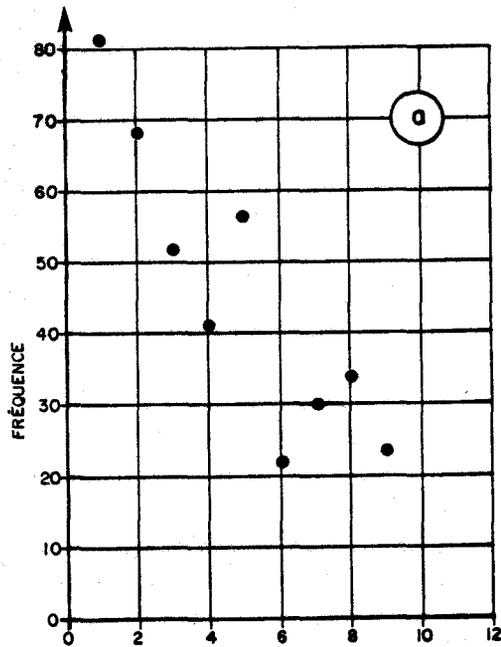
samedi et le lundi avec 0.27 pouce en moyenne. Les résultats obtenus indiquent donc certaines anomalies. Afin de confirmer ou infirmer ces anomalies, des études particulières plus poussées seraient nécessaires, tel que le calcul de l'intervalle de confiance des valeurs moyennes et du nombre de jours de pluie.

### 3.2 OCCURRENCE DES CHIFFRES

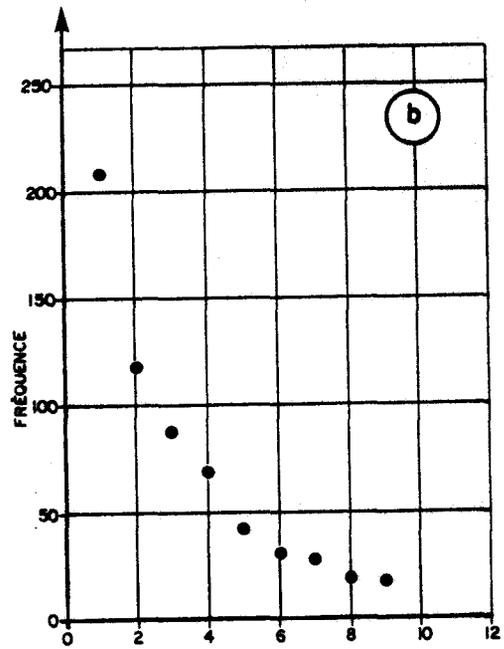
#### 3.2.1 Description de la méthode

La précipitation peut être mesurée au centième de pouce à l'aide d'un pluviomètre standard. D'autre part, on sait que les hauteurs de précipitation observées suivent une distribution exponentielle décroissante. Dans ces conditions, la courbe théorique de distribution des fréquences d'observations de la hauteur de pluie variant entre 0 et 9 centièmes de pouce (nombres à 1 chiffre) devrait avoir une décroissance exponentielle. Dans les cas de nombres à 2 chiffres, la courbe de distribution de fréquence du chiffre des dizaines est aussi une exponentielle décroissante, alors que la distribution de fréquence du chiffre des centièmes a une distribution théorique uniforme. Les résultats de la station "Chute-des-Passes" (figure 3.3) peuvent nous servir comme exemple pour la démonstration de cette méthode.

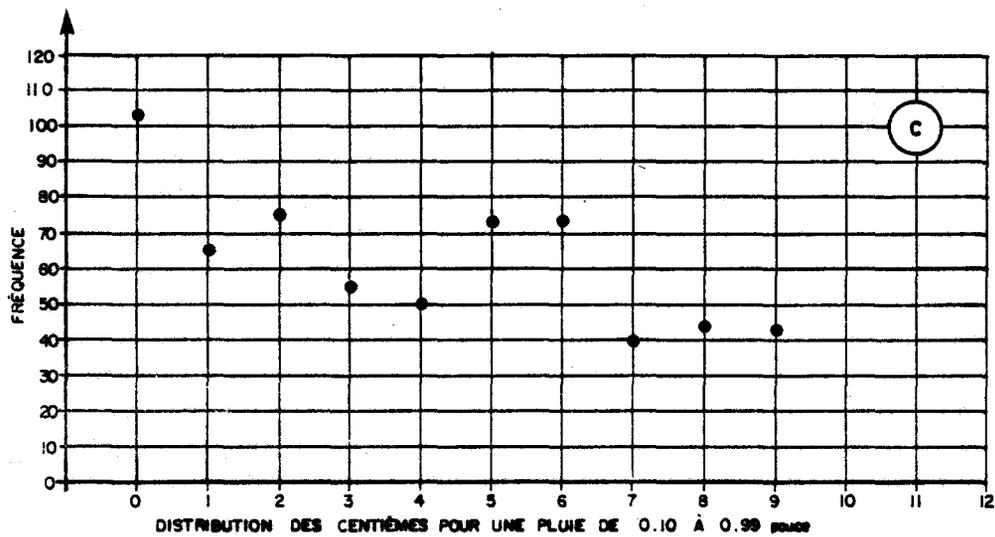
Un autre test est effectué sur les données pour vérifier des fréquences d'occurrence des hauteurs décroissantes de la précipitation. Ces tests révèlent des tendances à l'arrondissement lors des lectures effectuées par certains observateurs. La figure 3.4 montre



Distribution des centièmes pour les pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce



Distribution des dizaines pour les pluies comprises entre 0.10 et 0.99 pouce



DISTRIBUTION DES CENTIÈMES POUR UNE PLUIE DE 0.10 À 0.99 pouce

NOTE: Les deux distributions des points de la figure a) et b) devraient être des exponentielles décroissantes alors que la distribution des points de la figure c) devrait être uniforme.

FIGURE 3.3 Fréquence d'observation des centièmes et des dizaines pour des pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce (a) et entre 0.10 et 0.99 pouce (b et c), à la station "Chute-des-Passes".

les résultats de ces tests pour la station "Mont-Apica"; on remarque que les observations sont arrondies à "0" et à "5", surtout entre 0.20 et 0.40 pouce.

### 3.2.2 Analyse des résultats

Le tableau 3.3 résume les résultats obtenus pour les 26 stations où nous possédons des observations. L'ensemble des stations pluviométriques est, en général, bon, sauf pour cinq stations: Mont-Apica, Chapais-2, Mistassini Post, Mistassibi et Saint-Léon-de-Labrecque. En observant ces stations on constate que les mesures sont arrondies à "0" et à "5"; la décroissance des précipitations est difficile à identifier. A titre d'exemple, les résultats de la station Mont-Apica sont montrés au tableau 3.4 et aux figures 3.4 et 3.5.

## 3.3 CONTROLE DE L'HOMOGENEITE DES SERIES CHRONOLOGIQUES

### 3.3.1 Description de la méthode

La méthode dite des "doubles masses" ou "doubles cumuls" utilisée pour contrôler l'homogénéité temporelle de données climatologiques consiste à porter en ordonnée le cumul dans l'ordre chronologique, des valeurs d'une variable en fonction du cumul, dans le même ordre chronologique, d'une variable représentative du même phénomène pour la région, par exemple la moyenne des stations voisines pondérées parfois en fonction de leur éloignement. Si ces variables sont assez bien corrélées, ( $R > 0.7$ ), et homogènes,

TABLEAU 3.3 Résultats de l'analyse par l'occurrence des chiffres des précipitations des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.

STATION		TENDANCE A L'ARRONDISSEMENT					REMARQUES	NOMBRE D'OBSERVATIONS
NUMERO	Nom	Très fort	Fort	Moyenne	Faible	Très faible		
7013642	Lac Edouard-S		X				0.19 et 0.24 pouce n'ont jamais été observés	185
706CP09	La Doré		X				0.02 pouce plus fréquent que 0.01 et 0.03 pouce	55
7060070	Aigremont		X				0.17, 0.19 et 0.24 pouce n'ont jamais été observés	133
7060080	Albanel		X					2856
7060825	Bonnard					X		1007
7061541	Chute-des-Passes			X				1078
7061563	Chute du Diable					X		1517
7063090	Hénon				X			726
7063320	Isle-Maligne					X		3114
7063370	Jonquière			X				529
7063560	Lac Bouchette				X		0.19 et 0.24 pouce peu fréquents	1552
7063610	Lac-des-Commissaires				X		0.11 pouce n'a jamais été observé	540
7064890	Mésy		X				0.2 pouce plus fréquent que 0.19 et 0.21 pouce	884
7064993	Mistassibi						0.01 pouce peu fréquent Décroissance exponentielle mal soulignée	133
7064998	Mistassini			X				1376
7065100	Mont-Apica	X					0.01, 0.04, 0.09 et 0.11 pouce peu fréquents Décroissance exponentielle mal soulignée	1036
7065640	Normandin-CDA		X					2313
7066583	Rivière aux Rats		X				0.01 peu fréquent	752
7066685	Roberval-A			X				1112
7067060	Saint-Coeur-de-Marie		X				0.14, 0.19, 0.24 et 0.29 peu fréquents	943
7067460	Saint-Léon-de-Labrecque			X			0.01 peu fréquent Décroissance exponentielle mal soulignée	832
7068160	Shipshaw				X			2109
7091305	Chapais-2	X						883
7091400	Chibougamau					X		2020
7091401	Chibougamau-A					X		323
7095000	Mistassini Post	X						3382

TABLEAU 3.4 Occurrence des chiffres (station Mont-Apica).

NOMBRES		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	HAUTEURS DES PLUIES
1 chiffre	1	835	20	51	35	17	32	29	38	35	14	0.00 à 0.099
2 chiffres	1	0	190	135	121	73	68	39	27	28	18	0.10 à 0.99
	2	119	56	75	56	58	87	62	66	67	56	
3 chiffres	1	0	60	4	0	1	0	0	0	0	0	1.00 à 9.99
	2	11	14	10	8	7	4	2	4	2	3	
	3	11	1	10	8	5	7	9	5	4	5	

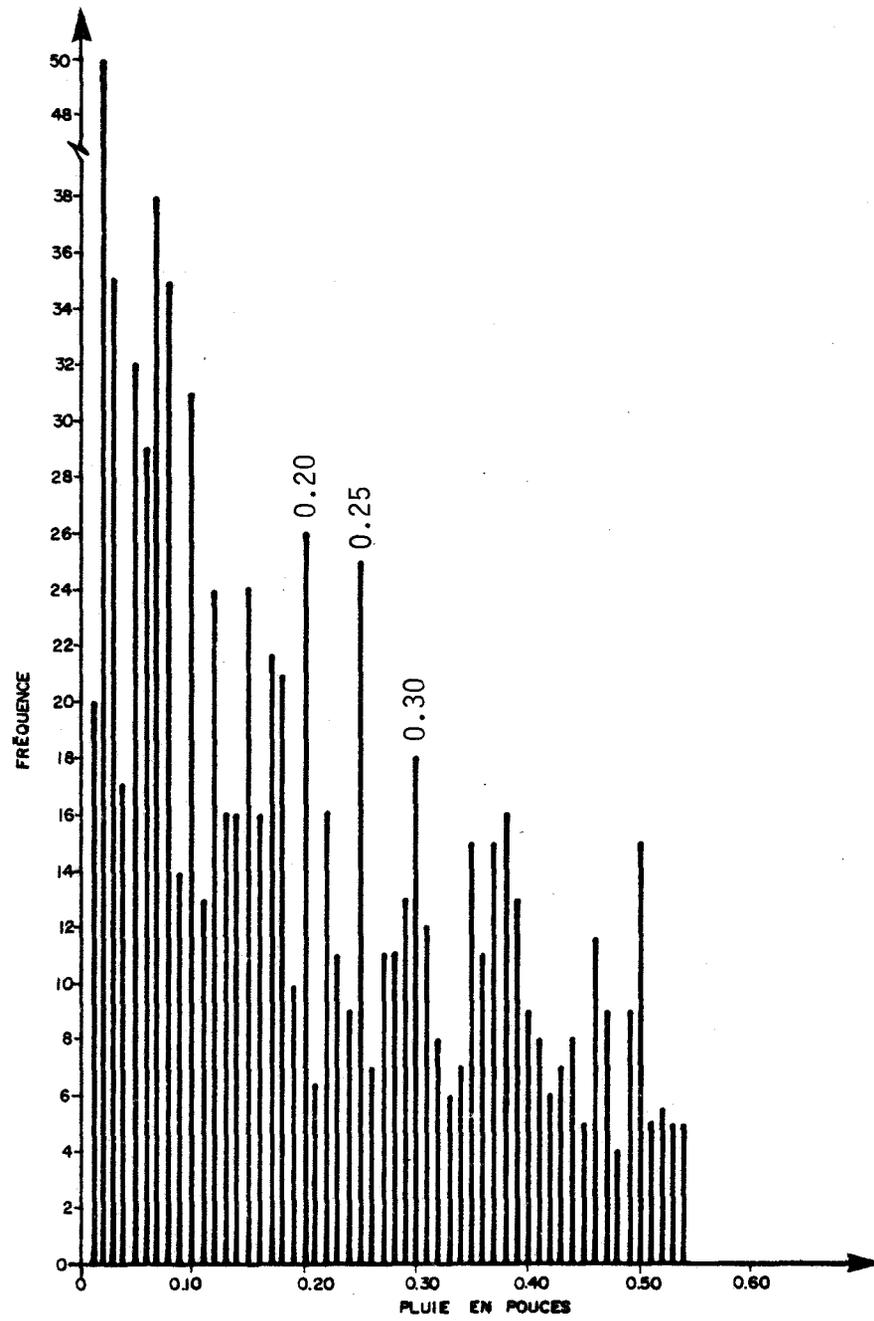
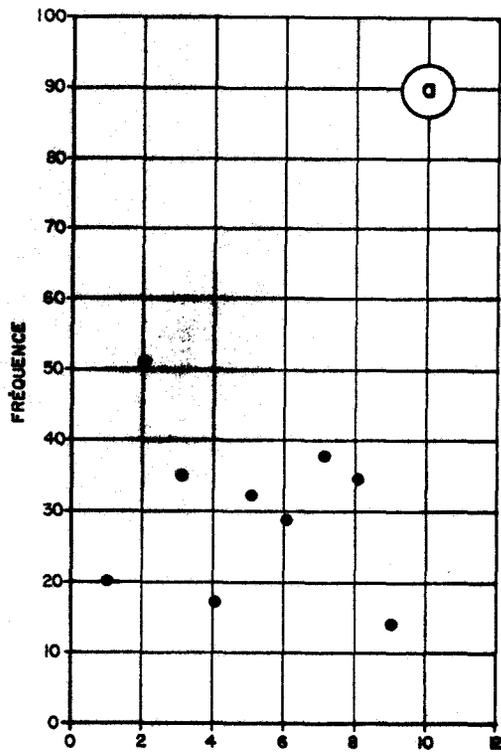
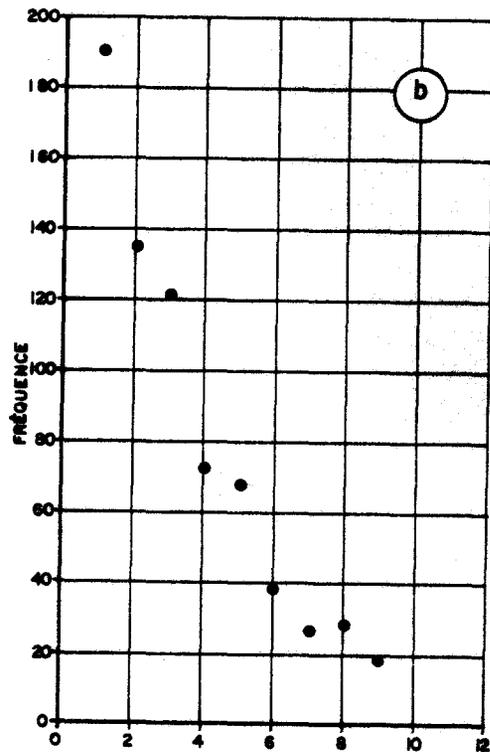


FIGURE 3.4 Fréquence d'observation des hauteurs de pluies pour la station "Mont-Apica".



Distribution des dizaines pour les pluies comprises entre 0.10 et 0.99 pouce



Distribution des centièmes pour les pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce

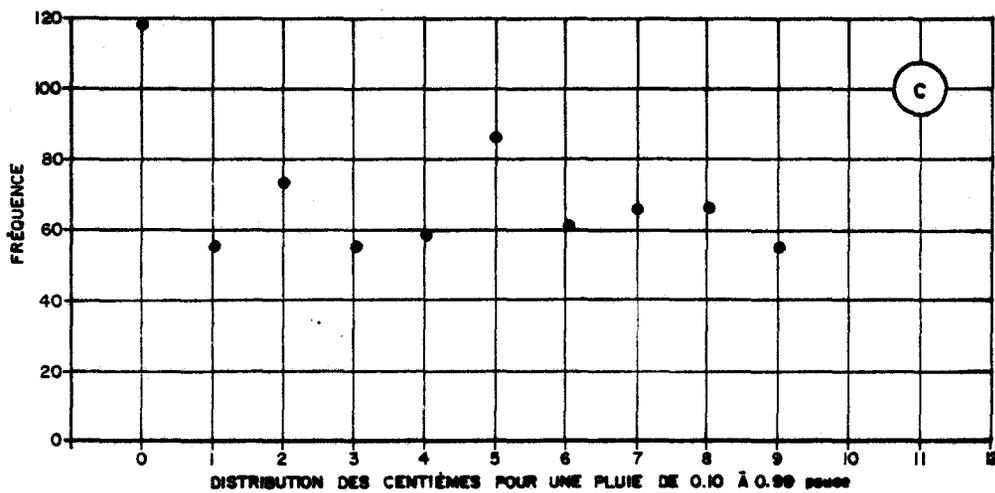


FIGURE 3.5 Fréquence d'observation des centièmes et des dizaines pour des pluies comprises entre 0.00 et 0.09 pouce (a) et entre 0.10 et 0.99 pouce (b et c), à la station "Mont-Apica".

la courbe obtenue est voisine d'une droite; au contraire lorsqu'une erreur systématique a eu lieu pendant assez longtemps, on observe une "cassure" qui permet de détecter l'hétérogénéité.

Le bref rappel de la méthode bien connue des "doubles masses" qui vient d'être fait, va servir pour présenter la méthode de contrôle de l'homogénéité des données développée par Bois (1971).

La description qui suit se divise en deux parties: la première traite de la formation de la station témoin et la seconde de la méthode proprement dite.

#### Recherche d'une station témoin

La station témoin est la résultante d'une combinaison linéaire des  $(n)$  stations représentant au mieux l'échantillon; ce qui revient à projeter chaque observation des  $(n)$  stations sur l'axe principal d'inertie ou première composante principale (voir annexe A). Cette projection est obtenue en calculant les vecteurs propres de la matrice de corrélation inter-stations puis en faisant le produit scalaire de chaque vecteur observation (les variables étant centrées réduites) par le vecteur propre ayant la plus grande valeur propre. Donc, si  $x_i(j)$ ,  $\bar{x}_i$  et  $\sigma_i$  sont respectivement les valeurs de la variable "i" pour le pas de temps "j",  $\bar{x}_i$  sa moyenne et  $\sigma_i$  son écart type, la station témoin aura pour le pas de temps "j" une valeur:

$$y(j) = a_1 \left( \frac{x_1(j) - \bar{x}_1}{\sigma_1} \right) + a_2 \left( \frac{x_2(j) - \bar{x}_2}{\sigma_2} \right) + \dots + a_n \left( \frac{x_n(j) - \bar{x}_n}{\sigma_n} \right)$$

où

$a_1, a_2, \dots, a_n$  1<sup>er</sup> vecteur propre.

### Généralités sur les composantes principales

Supposons "n" observations d'une variable à "p" stations. A cause de la dépendance qui existe entre les stations, on va rechercher une transformation linéaire de façon à obtenir des nouvelles stations "z" ou composantes principales, qui soient indépendantes en probabilité.

Cette opération revient à effectuer un changement d'axes et chaque composante principale peut s'exprimer comme une combinaison linéaire des observations.

De plus, cette transformation présente l'avantage que le premier axe (ou première composante (z)) est choisi en rendant minimum la distance entre tous les points d'observation et celui-ci, au sens des moindres carrés. Cette composante ( $z_1$ ) est donc celle qui explique le maximum de variance.

On voit l'avantage d'utiliser la technique des composantes principales pour former la station (fictive) témoin. En effet, si

dans le groupe de stations de base une station présente des anomalies qui contrastent avec l'homogénéité de l'ensemble des stations, cette station sera relativement peu corrélée avec ses voisines et de ce fait verra sa projection sur le premier axe (ou première composante  $z_1$ ) être minimum. Le vecteur formé des projections sur le premier axe est surtout constitué par les stations homogènes, ce qui ne peut pas être déterminé à priori. Et inversement, la station hétérogène donnera un axe singulier après transformation.

#### Cumul des résidus

Le vecteur témoin et la station étudiée sont désormais considérés comme deux stations normales  $y$  et  $x$ ; d'effectif " $n$ "; de moyenne  $\bar{y}$  et  $\bar{x}$ ; d'écart type  $\sigma_y$  et  $\sigma_x$ .

Par une méthode régressive on établit l'équation qui lie la station étudiée à la station témoin ainsi que le coefficient de corrélation " $r$ ".

$$x_i^* = ay_i + b$$

où

$x_i^*$  : la valeur calculée à partir de la station témoin

$y_i$  : la station témoin

$a$  et  $b$  : les constantes de régression

et

$$\mathcal{E}_i = x_i - x_i^*$$

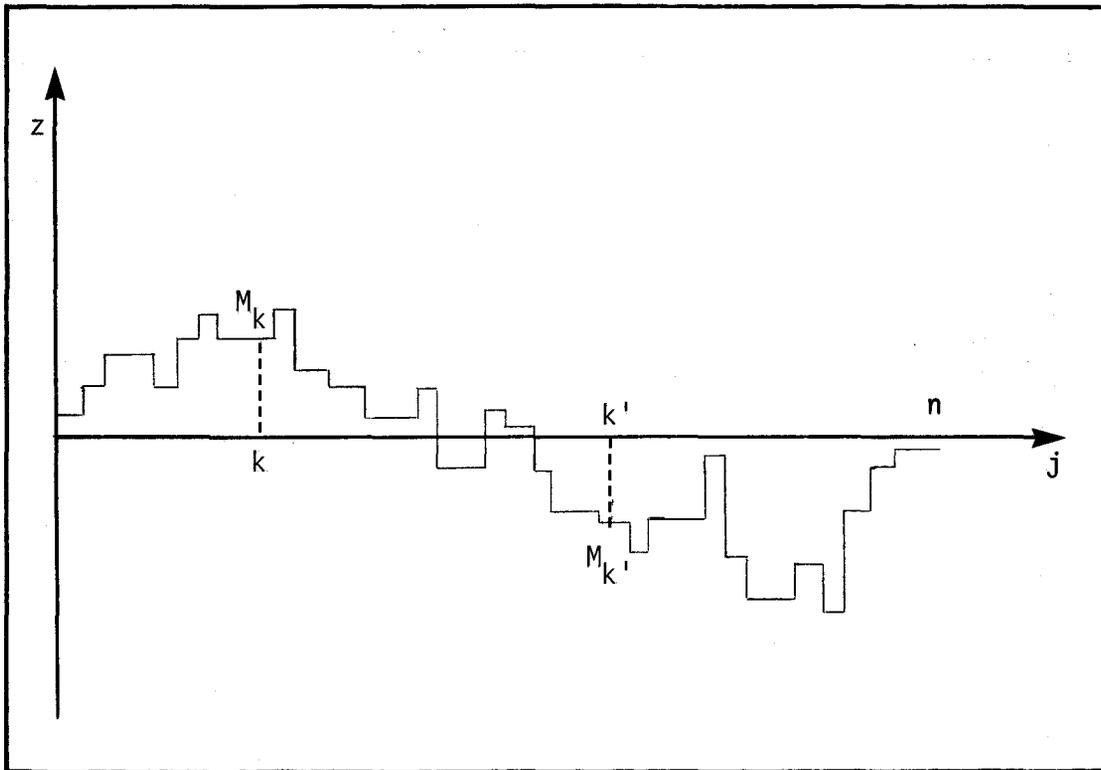
$\mathcal{E}_i$  = l'erreur résiduelle

avec

$$\overline{\mathcal{E}} = 0$$

$$\sigma_{\mathcal{E}} = \sigma_x \sqrt{1 - r^2}$$

Posons  $z_j = \sum_{k=1}^{k=j} \mathcal{E}_k$ . Si l'on porte en graphique  $z_j$  en fonction de "j", on obtient une ligne brisée partant de (0, 0) et aboutissant à (n, 0) car  $z_n = n\overline{\mathcal{E}} = 0$



Les résidus sont indépendants entre eux mais ne le sont pas dans leur ensemble (somme nulle). Si l'on fait abstraction de cette dernière contrainte, l'écart selon l'axe "z" entre deux points  $M_k$  et  $M_{k'}$ , est la somme de  $k' - k$  variables normales centrées, de variance  $\sigma_{kk'}^2 = (k' - k) \sigma_x^2 (1 - r^2)$  c'est-à-dire que la distance verticale séparant deux points représentant deux observations distantes de "m" dans la série chronologique est une variable normale centrée d'écart type.

$$\sigma_m = \sigma_x \sqrt{1 - r^2} \sqrt{m}$$

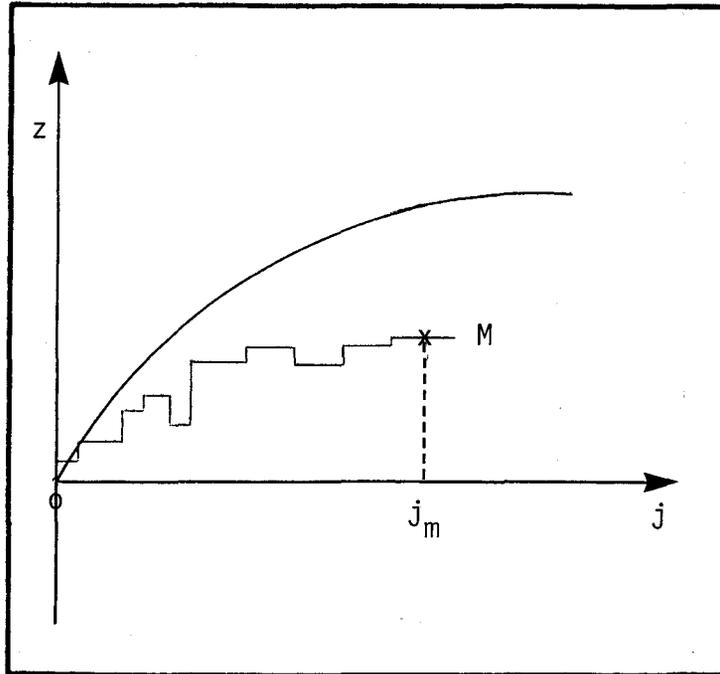
Sachant que les courbes passent par  $(0, 0)$  et  $(n, 0)$ , on en déduit, si l'on conserve l'hypothèse d'indépendance des résidus, que le chemin aléatoire est limité par deux paraboles de sommets respectifs  $(0, 0)$  et  $(n, 0)$  et d'équations:

$$\begin{aligned} z^2 &= \sigma_x^2 \cdot (1 - r^2) \cdot t^2(p) \cdot i \\ z^2 &= \sigma_x^2 \cdot (1 - r^2) \cdot t^2(p) \cdot (n - i) \end{aligned}$$

où

$t(p)$  est la valeur de la variable centrée réduite normale correspondant à la probabilité "p" de ne pas sortir de ce domaine

En effet, si l'on considère la distance verticale entre 0 et  $M$ , d'abscisse  $j_m$ , elle est la somme des  $j_m$  variables normales centrées d'écart type  $\sigma_x \sqrt{1 - r^2}$ .



Donc pour une probabilité donnée "p",  $M_{j_m}$  est la valeur d'une variable normale centrée d'écart type:  $\sigma_x \sqrt{1 - r^2} \sqrt{j_m}$

$$M_{j_m} = t(p) \cdot \sigma_{M_{j_m}} = t(p) \cdot \sigma_x \sqrt{1 - r^2} \cdot \sqrt{j_m}$$

Si l'on tient compte de la contrainte qui stipule que la somme des résidus est nulle, donc que la ligne brisée part du point (0, 0) et s'arrête au point (n, 0) la courbe de probabilité "p" devient une ellipse et la valeur  $M_{j_m}$  s'écrit:

$$M_{j_m} = t(p) \cdot \sigma_{M_{j_m}} = t(p) \cdot \sigma_x \sqrt{1 - r^2} \cdot \sqrt{\frac{j_m (n - j_m)}{n - 1}}$$

Nous prendrons pour "p" les niveaux:

$$p = 95\% \quad \text{soit} \quad t(p) = 1.97$$

$$p = 99\% \quad \text{soit} \quad t(p) = 2.57$$

### Comparaison avec la méthode classique des "doubles masses"

Après de nombreux essais comparatifs des deux méthodes, Bois (1971) conclut que lorsque l'erreur est détectable par la méthode des doubles masses, l'analyse du cumul des résidus est simple et donne rapidement des résultats, mais de façon beaucoup plus claire (ex.: doubles masses et cumul des résidus, figures 3.6 et 3.7).

#### 3.3.2 Analyse des résultats

Afin de contrôler l'homogénéité des séries chronologiques des vingt stations météorologiques étudiées sur le bassin du lac Saint-Jean, la méthode du cumul des résidus développée par Bois (1971) a été appliquée séparément aux précipitations liquides et aux précipitations solides. Dans le premier cas, l'étude a porté sur les précipitations liquides cumulées par 15 jours entre le 120<sup>e</sup> et le 300<sup>e</sup> jour de l'année, de 1966 à 1974. Un total de 49 périodes pour lesquelles il existait des données concomitantes à toutes les stations a pu être retenu pour l'analyse.

Quant aux précipitations solides, cumulées aussi par 15 jours, entre le 1<sup>er</sup> et le 100<sup>e</sup> jour de l'année, uniquement onze périodes

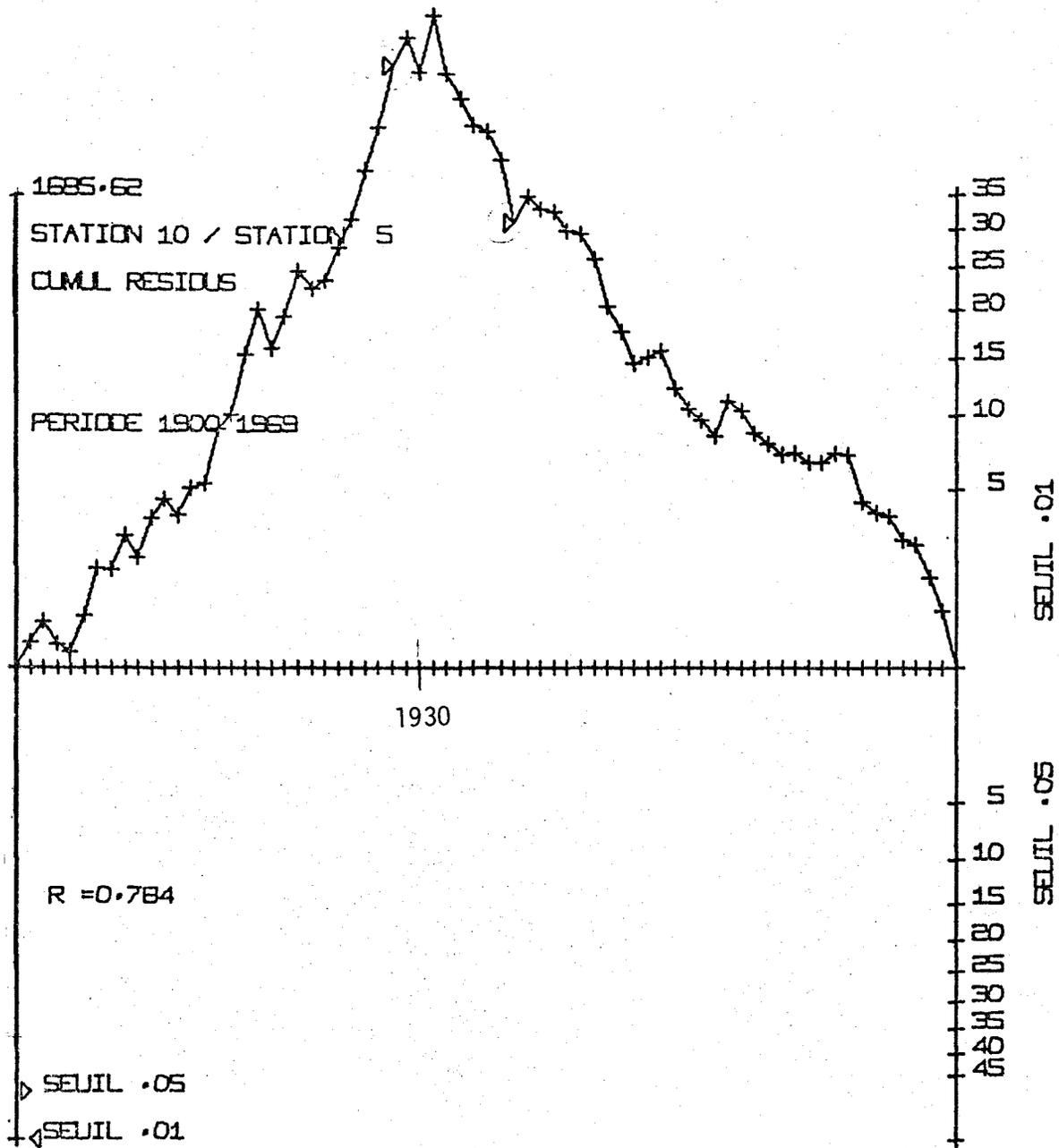


FIGURE 3.6 Sensibilité de la méthode (Multiplication par 1,1 de 1900 à 1930,  $\bar{X} = 1000$ ,  $\sigma = 160$ ).

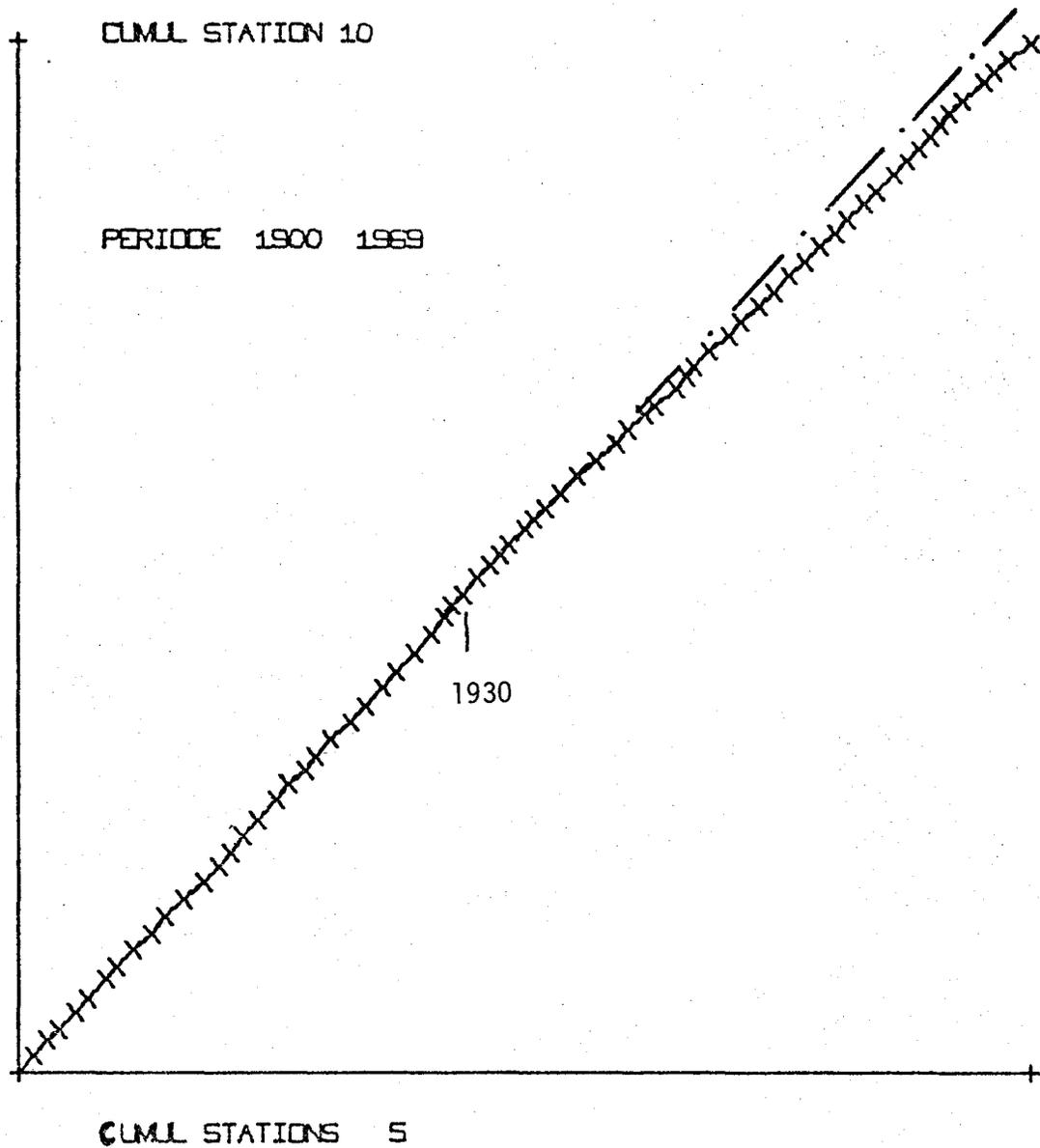


FIGURE 3.7 Double masse correspondant à la figure 3.6  
(Multiplication par 1,1 de 1900 à 1930,  
 $\bar{X} = 1000$ ,  $\sigma = 160$ ).

communes ont pu être dénombrées. Ces données ont été analysées, mais cet échantillon est trop faible pour que des conclusions précises puissent être atteintes, quant aux caractéristiques des stations en hiver. En conséquence, ces résultats ne sont pas inclus dans le rapport.

Une fois les périodes communes définies, il faut décider du choix d'une station témoin avec laquelle comparer chacune des stations. Pour les raisons exprimées précédemment, la station témoin a été définie à partir de l'analyse des vingt stations, par composantes principales. Il faut noter toutefois que plusieurs stations témoins auraient pu être définies à partir des groupes de stations ou sous-régions définis au chapitre 4.

Cette division en sous-régions aurait été très intéressante, si un nombre plus grand de stations avaient été situées dans chacune de ces sous-régions. Ce n'est toutefois pas le cas, et une ou deux stations hétérogènes auraient pu avoir une influence indue sur la station témoin de la sous-région.

Par contre, compte tenu de l'option choisie de ne considérer qu'une grande région, il y a lieu de noter que les données d'une station peuvent être à l'occasion fort différentes de celles de la station témoin sans être nécessairement douteuses ou carrément erronées. Ainsi, les stations "Lac Bouchette" et "Lac-des-Commissaires" indiquent toutes deux pour la quinzaine débutant au jour 195 en 1968, des valeurs excédentaires par rapport à la station

témoin qui ne devraient se produire que dans 1% des cas (tableau 3.5). Ces deux stations étant relativement près l'une de l'autre, la possibilité d'une explication météorologique n'est pas à rejeter. Il est donc intéressant de comparer le comportement de la station étudiée au comportement d'une station voisine par rapport à la même station témoin. L'appréciation est plus nuancée ainsi.

L'analyse des données relatives aux 20 stations retenues permet de constater que les stations ne se comportent pas toutes de façon identiques. Ainsi, le tracé du cumul des résidus pour la station Mistassini Post (figure 3.8) offre un aspect aléatoire, traversant l'axe des temps à de multiples reprises. Les valeurs individuelles du cumul demeurent relativement près de l'axe indiquant des probabilités d'occurrence normales. La série chronologique obtenue pour cette station est donc considérée homogène dans le temps.

Au contraire, le tracé du cumul des résidus pour les stations Saint-Coeur-de-Marie et Saint-Léon-de-Labrecque (figure 3.9) a dans chaque cas la forme d'un V dont la pointe dépasse de façon nette le niveau de probabilité d'occurrence 1%. De 1967 à 1970, les résidus sont pratiquement tous négatifs, alors que c'est essentiellement le contraire de 1970 à 1974. L'analyse de chaque station prise individuellement conduit donc à conclure de ces deux stations sont hétérogènes avec une cassure en 1970. En poussant l'analyse un peu plus loin, on constate que ces deux stations sont situées relativement près l'une de l'autre. Comme ces stations réagissent

TABLEAU 3.5 Résultats de l'analyse chronologique des stations par la méthode Bois des pluies mesurées entre les jours 135 et 270.

STATION	NUMERO FEDERAL	REMARQUES GENERALES	RESULTATS DE L'ANALYSE				REMARQUES D'APRES LES RAPPORTS D'INSPECTION
			DEPASSEMENT AU NIVEAU DE PROBABILITE DE 1 %				
			Période excédentaire		Période déficitaire		
			Année	Jour du début	Année	Jour du début	
Albanel	7060080	Etés 1970 et 1971 douteux	74	180			Pluviomètre déplacé de 20 pieds en août 1970
Bonnard	7060825	Légère hétérogénéité en 1973 et 1974					
Chute-des-Passes	7061541	Station homogène	70	195			
Chute du Diable	7061560	Station hétérogène avec cassure en 1969	73	195			Déménagement de la station entre 1962 et 1975
Hénon	7063050	Station relativement homogène	69	210			
Isle-Maligne	7063320	Station homogène					
Lac Bouchette	7063560	Station relativement homogène	68	195			
Lac-des-Commissaires	7063610	Station hétérogène	68	195			Réinstallation du pluviomètre en 1969; Réparation du pluviomètre en juillet 1971
Mésy	7064890	Station possiblement hétérogène à partir de 1971 surtout à cause de périodes excédentaires	71 71	135 225			Changement d'observateur entre juin 1971 et juin 1972
Mistassini	7064998	Station homogène	73	210	73	180	
Mont-Apica	7065100	Station possiblement hétérogène à partir de 1970 ou 1971	71	225			A partir de la fin de 1972, alternance de plusieurs observateurs
Normandin-CDA	7065640	Station relativement homogène					
Rivière aux Rats	7066583	Station relativement homogène					Alternance de plusieurs observateurs
Roberval-A	7066685	Station homogène	70 72	180 240			
Saint-Coeur-de-Marie	7067060	Station hétérogène avec cassure en 1970	73	180			Déménagement du pluviomètre et changement d'observateur en juillet 1970
Saint-Léon-de-Labrecque	7067460	Station hétérogène avec cassure en 1970					Site mal exposé et mal aéré. Pluviomètre à 50 pouces du sol
Shipshaw	7068160	Station homogène					
Chapais-2	7091305	Station homogène					
Chibougamau	7091400	Station homogène	66 70	95 210			
Mistassini Post	7095000	Station homogène					

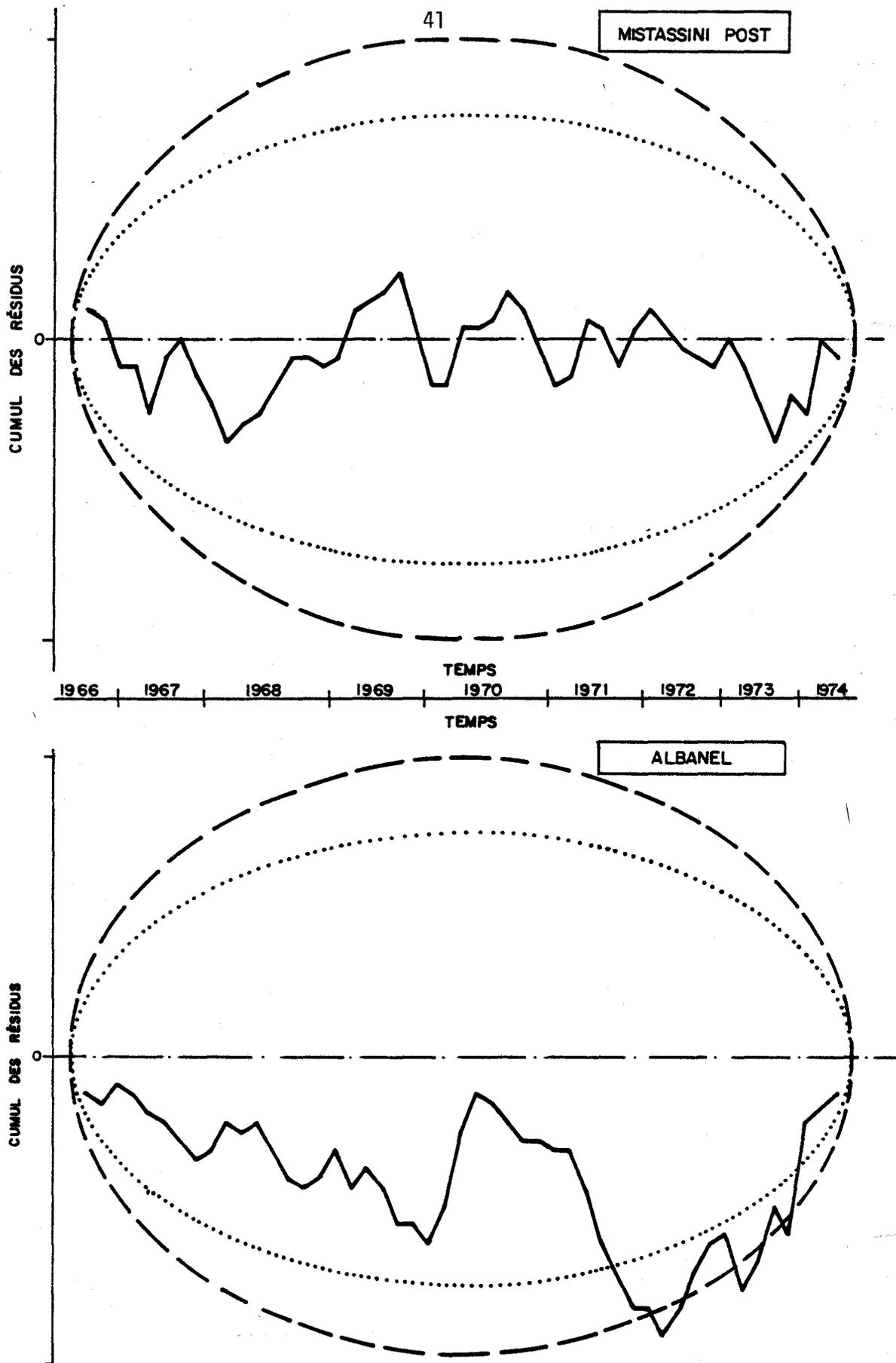


FIGURE 3.8 Cumul des résidus en fonction du temps (probabilité de dépassement à 5% (···), à 1% (---)).

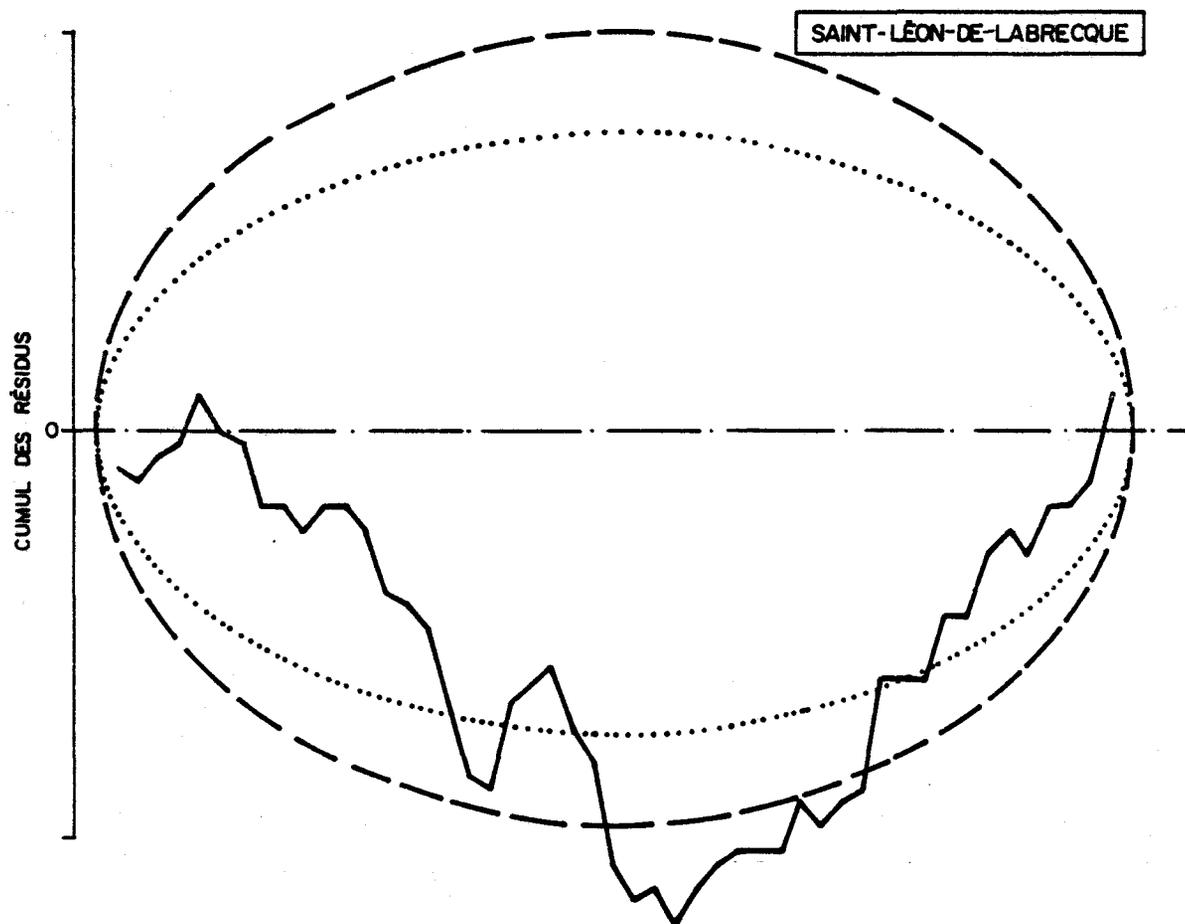
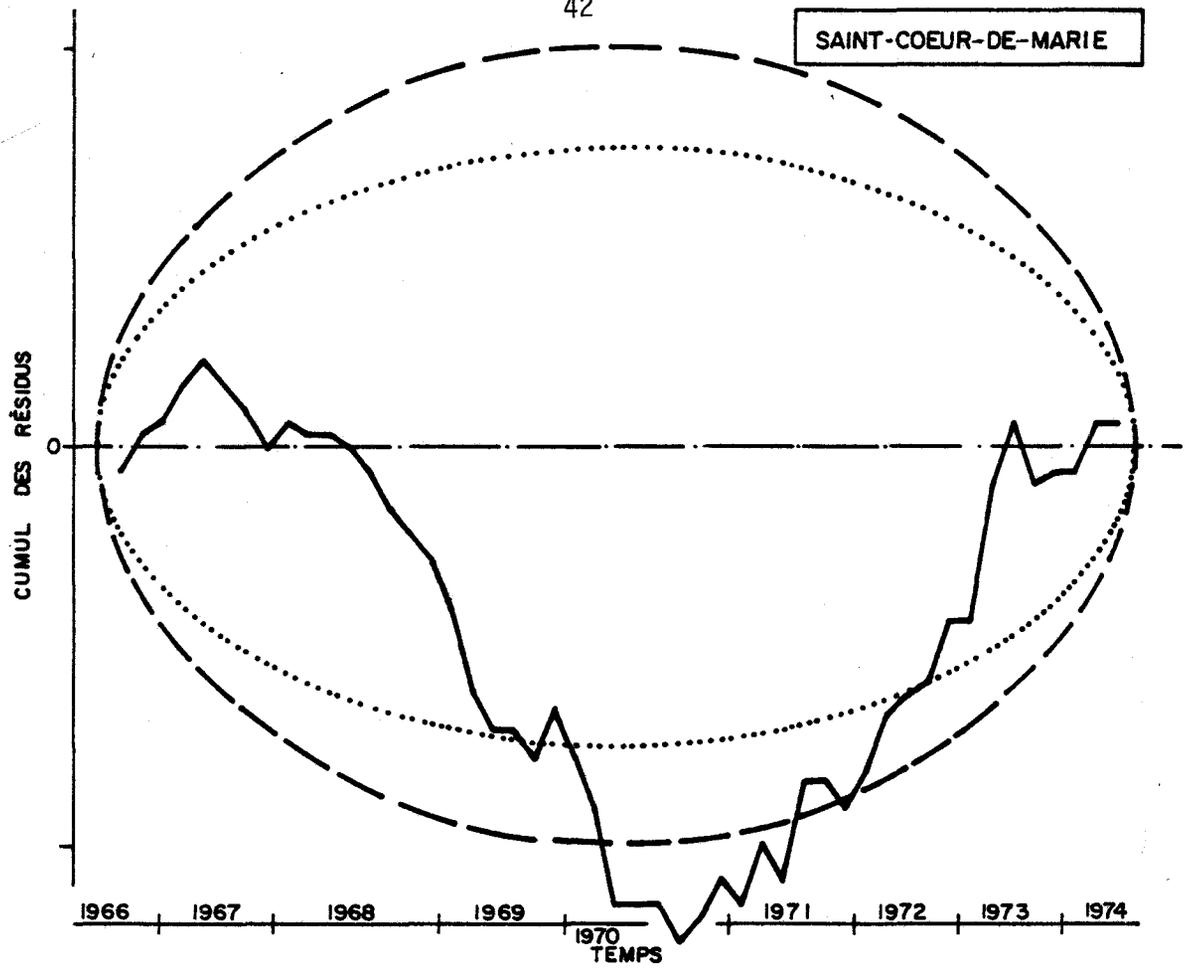


FIGURE 3.9 Cumul des résidus en fonction du temps (probabilité de dépassement à 5% ( $\cdots$ ), à 1% ( $---$ )).

de façon similaire par rapport à la station témoin, on peut être tenté de conclure à une singularité climatique sous-régionale demandant d'autres études avant de classer ces stations comme hétérogènes. Ces stations ont cependant été classées comme hétérogènes, parce que les rapports d'inspection ont permis de confirmer les résultats obtenus. Ainsi, dans le cas de la station Saint-Coeur-de-Marie, le pluviomètre a été déménagé et l'observateur changé en juillet 1970 (tableau 3.5). Quant à la station Saint-Léon-de-Labrecque, le rapport précise que le site est mal exposé, mal aéré et que le pluviomètre est à 50 pouces du sol et donc pas à la hauteur standard.

Entre ces cas facilement identifiables, il existe d'autres cas pour lesquels les données d'une station semblent bonnes pendant un certain temps, mais mauvaises ou douteuses pour une période déterminée. C'est le cas de la station Albanel (figure 3.8). Le cumul des résidus offre une allure aléatoire avec oscillations relativement faibles de 1966 à 1970. L'amplitude de ces oscillations augmente de beaucoup en 1970 et 1971 pour revenir à de plus faibles amplitudes après 1971. Plus précisément, en 1970, on constate d'abord plusieurs résidus positifs de suite, dont l'un dépassant la probabilité d'occurrence de 5%, suivi d'un plus grand nombre de résidus pratiquement tous négatifs jusqu'en 1972. Cette période de 1970 à 1972 renferme donc une hétérogénéité.

Il est intéressant de rappeler ici que la méthode du cumul

des résidus permet de quantifier de manière probabiliste la confiance à accorder aux données successives. Puisque les résidus sont indépendants théoriquement, il est toujours possible de tracer les ellipses de probabilité 5% et 1% à partir d'une date quelconque. On constate alors que la période de résidus positifs en 1970 semble plus improbable que celle des résidus négatifs qui la suit. Il est toutefois difficile d'en être absolument sûr. Les étés 1970 et 1971 sont donc considérés comme douteux à la suite de notre étude. Encore une fois, le rapport d'inspection confirme les doutes, puisque le pluviomètre a été déplacé de 20 pieds en août 1970. Ce déplacement peut sembler insignifiant, mais, en pratique, il peut être suffisant, compte tenu de l'environnement immédiat de l'appareil, pour modifier les observations de façon significative.

L'application à chaque station du même procédé d'analyse a conduit aux résultats présentés au tableau 3.5. On y constate que huit des vingt stations sont considérées comme homogènes alors que quatre seulement sont qualifiées d'hétérogène. Il reste huit autres stations, dont quatre sont relativement homogènes, deux sont légèrement hétérogènes ou ont des périodes douteuses, et deux sont possiblement hétérogènes.

D'autre part, les rapports d'inspection que nous avons pu obtenir confirment de façon très satisfaisante l'analyse statistique des données et aident dans certains cas à trancher les ambiguïtés. Bien plus, aucun de ces rapports ne vient en contradiction avec les

conclusions tirées de l'étude du cumul des résidus.

On peut conclure qu'une majorité de stations possède des séries chronologiques relativement homogènes sur le bassin du lac Saint-Jean.

Le tableau 3.6 présente le résumé de l'analyse de la qualité des mesures pour les jours 135 à 270.

TABLEAU 3.6 Résumé de l'analyse du contrôle de la qualité des mesures.

STATION	NUMERO FEDERAL	VARIABILITE DES PLUIES SELON LES JOURS (tableau 3.1)	ARRONDISSEMENT (tableau 3.3)	ANALYSE CHRONOLOGIQUE (tableau 3.5)
Lac Edouard-S	7013642	B	D	
La Doré	706CP09	B	D	
Aigremont	7060070	B	D	
Albanel	7060080	A	D	
Bonnard	7060825	A	G	J
Chute-des-Passes	7061541	A	E	I
Chute du Diable	7061560	A	G	M
Hénon	7063090	A	F	K
Isle-Maligne	7063320	A	G	I
Jonquière	7063370	A	E	
Lac Bouchette	7063560	A	F	K
Lac-des-Commissaires	7063610	A	F	M
Mésy	7064830	A	D	L
Mistassibi	7064993	B	H	
Mistassini	7064998	A	E	M
Mont-Apica	7065100	A	C H	L
Normandin-CDA	7065640	A	D	J
Rivière aux Rats	7066583	A	D	J
Roberval-A	7066685	A	E	I
Saint-Coeur-de-Marie	7067060	A	D	M
Saint-Léon-de-Labrecque	7067460	A	E	M
Shishaw	7068160	A	F H	I
Chapais-2	7091305	A	C	I
Chibougamau	7091400	A	G	I
Chibougamau-A	7091401	A	G	
Mistassini Post	7095000	A	C	I
		A- moyenne B- forte	C- très fort D- fort E- moyenne F- faible G- très faible H- exponentielle mal soulignée	I- homogène J- légère homogénéité K- relativement homogène L- possiblement hétérogène M- hétérogène

## CHAPITRE 4

### ETUDE DU RESEAU METEOROLOGIQUE ACTUEL PAR LA METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES



L'étude à l'aide des composantes principales du comportement des stations les unes par rapport aux autres, va nous permettre de caractériser le réseau actuel et d'en faire ressortir, s'il y a lieu, les redondances. L'étude est faite sur les précipitations liquides et solides et sur les lames d'eau au sol mesurées par les relevés de neige. L'annexe A décrit brièvement la méthode des composantes principales.

#### 4.1 DONNEES UTILISEES

Pour appliquer la méthode des composantes principales qui utilise les corrélations entre les stations prises deux par deux, il est nécessaire de s'assurer qu'il existe une période d'observations concomitantes suffisamment longue pour que les coefficients de corrélation soient significatifs. Compte tenu des données disponibles (tableau 2.1), la période 1966 à 1975 a été retenue. Les 19 stations pour lesquelles on a des observations pour cette période sont listées au tableau 4.1. La figure 4.1 indique l'emplacement de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

A l'intérieur de la période utilisée, une station peut avoir des manques de quelques jours et ainsi briser la période commune avec les autres stations. Pour remédier à ce problème, on a complété ces manques d'observations à l'échelle journalière pour les 19 stations. La procédure employée est la suivante: pour les manques de la station A par exemple, on identifie à l'aide des composantes principales la station B ayant un comportement semblable à A. Deux stations ont un comportement

TABLEAU 4.1 Stations météorologiques de la région du lac Saint-Jean utilisées pour l'étude du réseau par la méthode des composantes principales.

NO	NO FEDERAL	LATITUDE	LONGITUDE	NOM	ALTITUDE
1	7060080	4853	7227	Albanel	500
2	7060825	5043	7102	Bonnard	1660
3	7061541	4950	7110	Chute-des-Passes	1310
4	7061560	4847	7142	Chute du Diable	570
5	7063090	4906	7236	Hémon	600
6	7063320	4835	7138	Isle-Maligne	250
7	7063560	4816	7212	Lac Bouchette	1050
8	7063610	4812	7215	Lac des Cygnes	1175
9	7064890	4816	7141	Mésy	1260
10	7064998	4852	7212	Mistassini	360
11	7065100	4758	7125	Mont-Apica	1800
12	7065640	4851	7232	Normandin-CDA	450
13	7066685	4831	7216	Roberval-A	590
14	7067060	4838	7143	Saint-Coeur-de-Marie	350
15	7067460	4848	7131	Saint-Léon-de-Labrecque	430
16	7068160	4827	7113	Shipshaw	75
17	7091305	4947	7452	Chapais-2	1300
18	7091400	4955	7422	Chibougamau	1240
19	7095000	5025	7353	Mistassini Post	1246

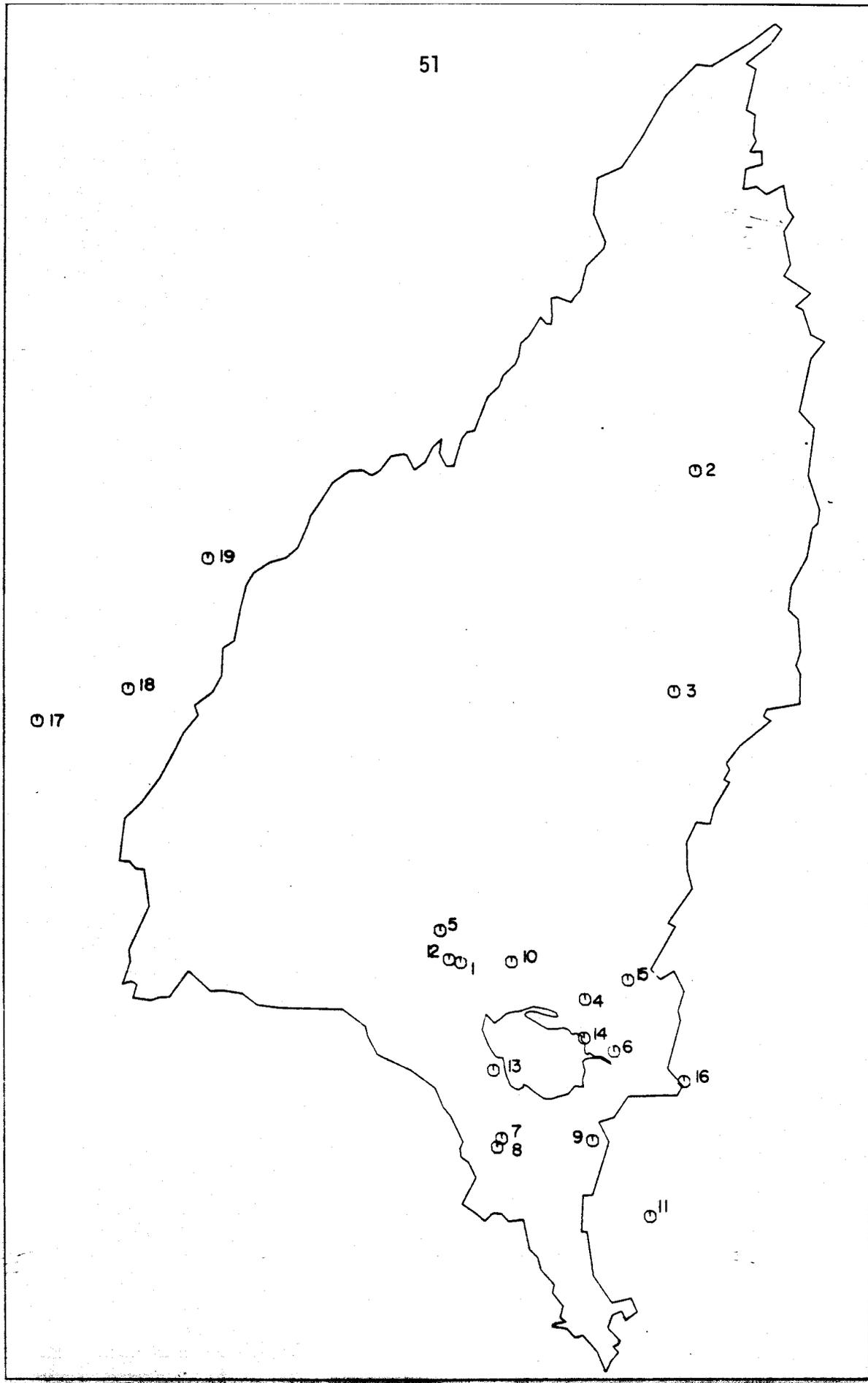


FIGURE 4.1 Emplacement sur le bassin versant du lac Saint-Jean des 19 stations météorologiques utilisées pour l'étude du réseau par la méthode des composantes principales.

semblable dans la théorie des composantes principales si leurs projections dans le nouveau système d'axes sont à proximité l'une de l'autre.

Les manques de la station A sont comblés à l'aide des valeurs observées de la station B, pondérés par le rapport de leurs moyennes respectives. Cette pondération est nécessaire parce que deux stations de comportement semblable n'ont pas obligatoirement la même moyenne. Comme la station B qui sert à compléter la station A peut également présenter des absences de données, on utilise, si nécessaire, une deuxième ou une troisième station. Le tableau 4.2 nous montre les stations utilisées pour cette opération.

L'étude en composantes principales peut être faite pour différentes saisons et pour des périodes de différentes durées. Le tableau 4.3 nous indique les périodes utilisées telles que proposées par la SECAL, et leurs durées en jours.

#### 4.2 APPLICATION DE LA METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES

Les données observées aux 19 stations sont regroupées dans la matrice  $X$  de dimension  $19 \times n$  ( $n =$  nombre d'années multiplié par le nombre de périodes).

La matrice  $Y$  des observations centrées réduites s'obtient par:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j}$$

TABLEAU 4.2 Stations employées pour compléter les absences de données journalières.

NUMERO DE STATION A COMPLETER	NUMERO DE STATION EMPLOYE ET MOYENNE A LONG TERME <sup>1</sup>					
	1 <sup>er</sup> choix		2 <sup>e</sup> choix		3 <sup>e</sup> choix	
7060080 (1.61)	7065640 (1.64)	7064998 (1.73)	7063090 (1.73)			
7060825 (1.98)	7061541 (1.96)	7091305 (1.75)	7091400 (1.86)			
7061541 (1.96)	7060825 (1.98)	7064998 (1.73)	7091305 (1.75)			
7061560 (1.95)	7066685 (1.81)	7067460 (2.13)	7063320 (1.93)			
7063090 (1.73)	7066583 (1.83)	7060080 (1.61)	7065640 (1.64)			
7063320 (1.93)	7067460 (2.13)	7067060 (1.85)	7061560 (1.95)			
7063560 (1.93)	7063610 (1.94)	7064890 (2.17)	7065100 (2.85)			
7063610 (1.94)	7063560 (1.93)	7064890 (2.17)	7068160 (1.91)			
7064890 (2.17)	7068160 (1.91)	7065100 (2.85)	7063610 (1.94)			
7064998 (1.73)	7065640 (1.64)	7060080 (1.61)	7063090 (1.73)			
7065100 (2.85)	7068160 (1.91)	7064890 (2.17)	7063610 (1.94)			
7065640 (1.64)	7060080 (1.61)	7064998 (1.73)	7063090 (1.73)			
7066583 (1.83)	7063090 (1.73)	7060080 (1.61)	7065640 (1.64)			
7066685 (1.81)	7061560 (1.95)	7067460 (2.13)	7063320 (1.93)			
7067060 (1.85)	7067460 (2.13)	7063320 (1.93)	7061560 (1.95)			
7067460 (2.13)	7067060 (1.85)	7063320 (1.93)	7061560 (1.95)			
7068160 (1.91)	7064890 (2.17)	7065100 (2.85)	7067060 (1.85)			
7091305 (1.75)	7066583 (1.83)	7063090 (1.73)	7064998 (1.73)			
7091400 (1.86)	7095000 (1.61)	7091305 (1.75)	7060825 (1.98)			
7095000 (1.61)	7091400 (1.86)	7091305 (1.75)	7060825 (1.98)			

<sup>1</sup> Les moyennes à long terme (pouce) des précipitations cumulées par 15 jours (jours à 120 à 300) sont inscrites entre parenthèses.

TABLEAU 4.3 Périodes utilisées pour l'étude.

PERIODES ETUDIEES	NOMBRE DE PERIODES	NOMBRE DE JOURS PAR PERIODE	DEBUT	FIN
Annuelle	1	365	1er janvier	31 décembre
Hiver	1	90	1er janvier	31 mars
Printemps	1	76	1er avril	15 juin
Eté	1	107	16 juin	30 septembre
Automne	1	92	1er octobre	31 décembre
Hiver/15 jours	6	15	1er janvier	31 mars
Printemps/15 jours	5	15	1er avril	14 juin
Eté/15 jours	7	15	16 juin	28 septembre
Automne/15 jours	6	15	1er octobre	29 décembre

où

$X_{ij}$  = variable observée

$\bar{X}_j$  = moyenne de la  $j^{\text{ième}}$  station

$\sigma_j$  = écart type de la  $j^{\text{ième}}$  station

De la matrice  $Y$  nous obtenons facilement la matrice des coefficients de corrélation par:

$$r'_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{ij} Y_{ik}$$

où

$r'_{jk}$  est le coefficient de corrélation entre les stations  $j$  et  $k$

$Y_{ij}$  et  $Y_{ik}$  les observations centrées réduites

$n$  le nombre d'observations

Si on diagonalise cette matrice des coefficients de corrélation, on obtient les coordonnées des vecteurs propres ( $C_{ij}$ ) de cette matrice. Cette diagonalisation est faite à l'aide de la sous-routine EIGEN de IBM. Les valeurs propres  $\lambda$ , également obtenues par la sous-routine EIGEN, sont les variances des nouvelles variables et sont calculées par ordre décroissant. La corrélation entre la station  $j$  et la composante d'ordre  $k$  nous est donnée par:

$$r_{jk} = C_{jk} \sqrt{\lambda_k}$$

L'étude de ce coefficient de corrélation nous renseigne sur le comportement des stations.

#### 4.2.1 Période "ANNUELLE"

Cette étude est faite en considérant la précipitation totale, pluie et neige, pour l'année complète. Le tableau 4.4 montre les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations annuelles. La première composante explique 57% de la variance et ce pourcentage atteint 94% lorsque les cinq premières composantes sont retenues. On sait que plus la variance expliquée est grande pour un nombre limité de composantes, plus le réseau est homogène et redondant.

Si l'on compare les coefficients de corrélation des stations (tableau 4.4) avec la première composante principale, on voit que l'influence de cette composante n'est pas la même pour toutes les stations. Par exemple, la corrélation au carré qui indique la variance expliquée, est de 91% pour la station 7061560 et de seulement 28% pour la station 7095000.

Les valeurs des coefficients de corrélation ou de variance expliquée varient d'une composante à l'autre et dépendent des observations. Si le coefficient de corrélation entre deux stations est égal à 1 (sans que les stations aient nécessairement même moyenne), les coefficients de corrélation entre les composantes et ces deux stations seront égaux.

TABLEAU 4.4 Corrélation entre composantes et station;  
période "ANNUELLE".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.736	-.115	-.407	.458	.172	.960
7060825	2	.749	.512	-.142	-.024	-.180	.875
7061541	3	.498	.672	.197	.332	-.068	.854
7061560	4	.952	.103	.119	.079	-.190	.974
7063090	5	.670	-.372	-.333	.511	.171	.988
7063320	6	.911	-.048	.126	-.316	-.116	.962
7063560	7	.681	-.518	.346	.149	.237	.930
7063610	8	.619	-.673	.013	.089	-.337	.958
7064890	9	.641	-.646	.232	-.216	.221	.977
7064998	10	.915	.080	-.238	-.116	-.258	.981
7065100	11	.793	.180	.048	-.210	.517	.975
7065640	12	.914	-.125	-.343	.127	.032	.985
7066685	13	.725	-.182	-.529	-.231	-.126	.907
7067060	14	.838	.139	.119	-.405	.145	.920
7067460	15	.852	-.232	.395	-.050	-.136	.957
7068160	16	.691	-.078	.620	.239	-.195	.964
7091305	17	.783	.252	-.248	-.366	.034	.873
7091400	18	.708	.588	-.244	.156	.068	.936
7095000	19	.531	.558	.540	.161	.119	.925
Valeurs propres		10.9	2.9	1.96	1.29	.81	
Variance expliquée		57.5%	15.3%	10.3%	6.8%	4.3%	
Variance totale expliquée		57.5%	72.8%	83.1%	89.9%	94.2%	

Comme on observe rarement des corrélations parfaites, même pour deux stations météorologiques voisines, par suite d'erreurs de mesure et de conditions micro-climatiques locales, on doit rechercher les groupes homogènes en associant les stations de comportement semblable sur l'ensemble des premières composantes.

Le nombre de composantes à considérer ne suit pas de règle rigide. En général, on tient compte de la variance expliquée par la composante et de la variance totale expliquée. Dans ce cas-ci on considère les cinq premières composantes.

Il existe deux méthodes simples de présenter le tableau 4.4 sous forme de figure, de manière à déterminer les groupes de stations dont le comportement est semblable. La première est la représentation dans l'espace à trois dimensions des corrélations entre les stations et les trois premières composantes. La deuxième méthode, qui est moins employée mais plus discriminante et qui contient plus d'informations à notre point de vue, est une projection, dans le plan des composantes 2 et 3, des corrélations avec les autres composantes. Contrairement à la première méthode, cette deuxième méthode peut présenter plus de trois composantes simultanément.

Les résultats pour la période "ANNUELLE" sont présentés et discutés avec les deux formes de graphiques pour qu'on puisse se rendre compte des avantages de l'une sur l'autre.

La figure 4.2 est la présentation en trois dimensions du tableau 4.4. Les axes A, B et C représentent respectivement les composantes 1, 2 et 3. L'origine des segments de droite qui représentent chacun une station, a pour coordonnées les valeurs des coefficients de corrélation de la station avec les composantes deux et trois, tandis que la longueur du segment de droite est égale à la valeur du coefficient de corrélation de la station avec la première composante. Au vu de la figure 4.2 les stations peuvent se grouper de la façon suivante:

- A) 1, 5, 12, 13
- B) 7, 8, 9
- C) 2, 18
- D) 4, 6, 11, 14
- E) 3, 19
- F) 10, 17
- G) 15, 16

La figure 4.3 explique comment on met en graphique les données du tableau 4.4 selon la seconde méthode. Comme dans le cas précédent, on détermine tout d'abord le point A, d'un segment de droite  $\vec{AB}$ , en prenant comme coordonnées sur les axes R2 et R3 (plan des composantes 2 et 3) les valeurs respectives des coefficients de corrélation entre la station et les composantes deux et trois. La longueur du segment  $\vec{AB}$  est égale à la valeur prise par le coefficient de corrélation entre la station et la première

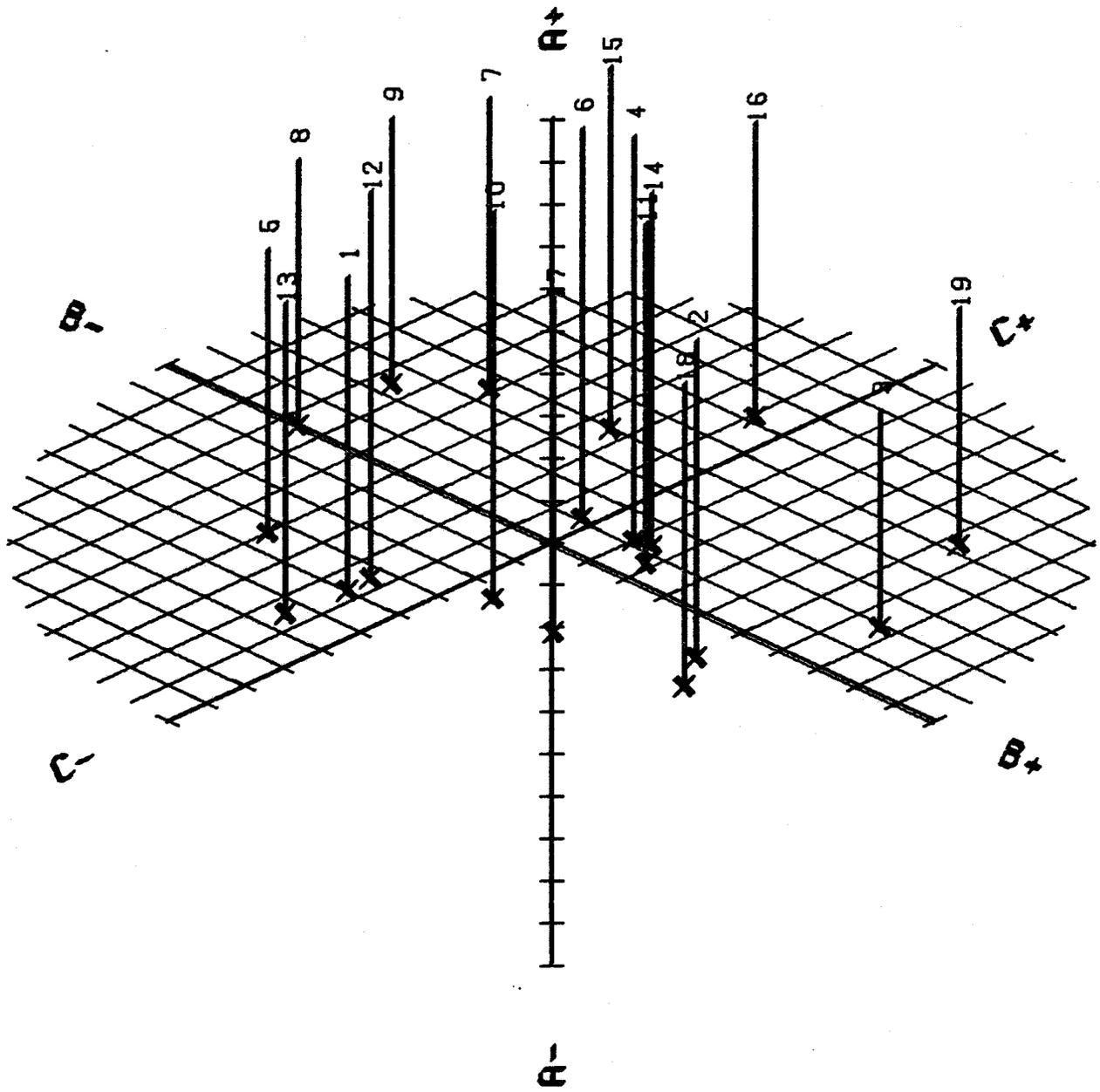
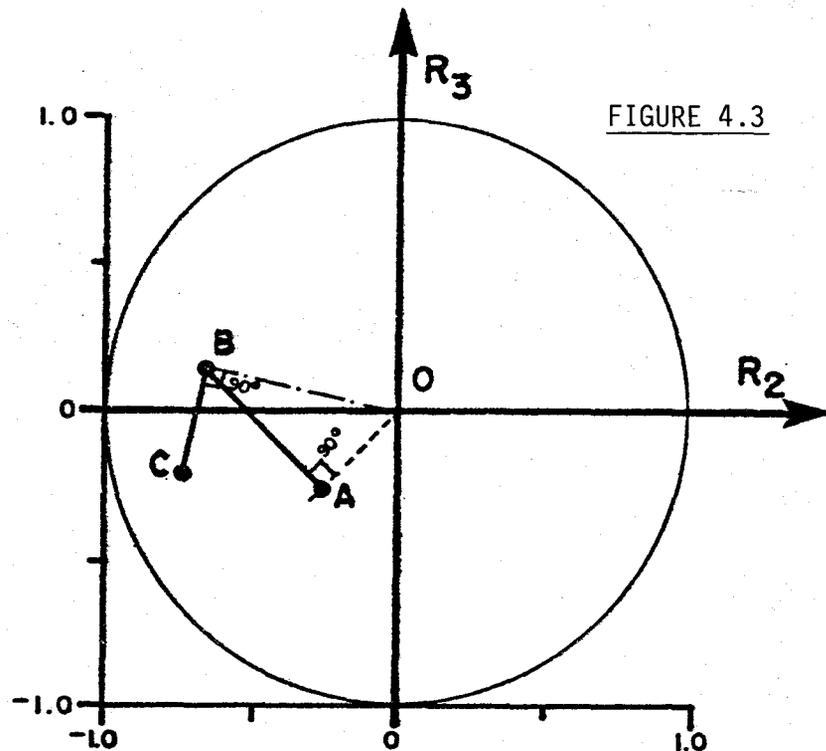


FIGURE 4.2 Représentation des coefficients de corrélation entre les stations et les trois premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ANNUELLE".

composante principale. Ce segment  $\vec{AB}$  est tracé dans le plan des axes  $R_2$  et  $R_3$  perpendiculairement au segment  $\vec{OA}$  (orthogonalité des composantes principales). Enfin, par convention, si la corrélation est positive, on trace le segment  $\vec{AB}$  dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire si elle est négative. Le segment  $\vec{OB}$  est le coefficient de corrélation multiple entre la station et les trois premières composantes. On peut tracer ainsi toutes les composantes. Cependant, compte tenu du peu de variance expliquée par les dernières composantes on trace rarement plus de six composantes.



La figure 4.4 qui est la présentation par la seconde méthode des résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations "ANNUELLE", permet de trouver les groupes de stations par la proximité des segments et leur pente. Elle nous montre également l'importance des premières composantes et le nombre minimum utile pour la reconstitution des observations à chaque station. Rappelons en effet que l'on peut reconstituer les observations pour chaque station à l'aide des  $K$  premières composantes. Cette reconstitution des observations sera d'autant meilleure que le coefficient de corrélation multiple s'approchera de 1, ce qui nous est indiqué sur le graphique par la proximité de l'extrémité de la ligne brisée relative à la station avec le cercle qui correspond à une corrélation de 1.

L'étude de la figure 4.4 nous montre qu'avec cinq composantes les observations de toutes les stations peuvent être bien reproduites (proximité de la fin de chaque segment avec le cercle). Cette figure confirme en général, les groupes établis à l'aide de la figure 4.2 et fait davantage ressortir les particularités de quelques stations. Par exemple, pour le premier groupe on voit que la station No 5 a un comportement différent des trois autres stations. La figure 4.2 montre un comportement pratiquement identique des stations Nos 4, 11 et 14 alors que la figure 4.4 indique que la station No 11 a un comportement légèrement différent des deux autres.

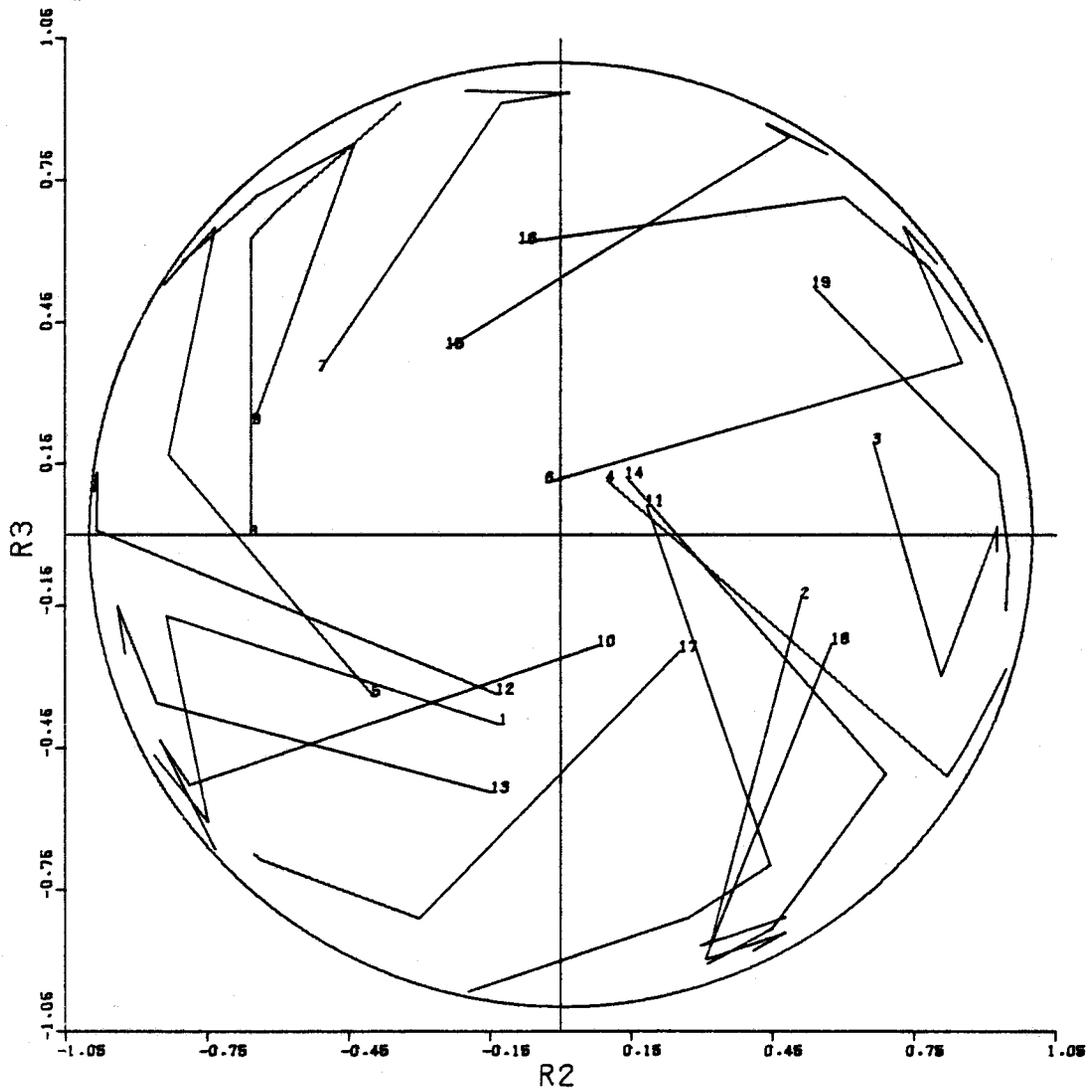


FIGURE 4.4 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ANNUELLE".

Les groupes de stations ont été identifiés sur les graphiques par des points, ou segments de droite voisins, ce qui indique des contributions identiques sur le calcul des composantes. Compte tenu du nombre de composantes à considérer, il est quelquefois difficile de trouver des groupes. De plus, deux personnes peuvent ne pas identifier les mêmes stations pour un même groupe; la proximité n'étant pas définie de façon rigide.

On peut, si on le désire, faire ressortir les groupes, d'une façon rigide, en faisant subir une rotation aux premiers axes principaux. Pour les précipitations "ANNUELLES" par exemple, si l'on fait cette rotation (on utilise la méthode varimax<sup>1</sup>) avec les cinq premiers axes principaux, la variance expliquée sur l'ensemble demeure 94.2% mais est distribuée différemment sur les cinq premiers axes. La rotation étant faite, on détermine les groupes en soulignant pour chaque station la corrélation maximale. Le tableau 4.5 montre les valeurs obtenues après rotation et les valeurs soulignées sur une même colonne forment un groupe. Nous obtenons les groupes suivants:

- A) 7, 8, 9, 15, 16
- B) 3, 18, 19
- C) 2, 4, 6, 10, 13, 14, 17
- D) 1, 5, 12
- E) 11

La rotation des axes est faite après avoir imposé le nombre

---

<sup>1</sup> Statistical Package for the social sciences - McGraw-Hill, 1975.

TABLEAU 4.5 Corrélation entre composantes et station après rotation; période "ANNUELLE".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	.178	.200	.312	<u>.885</u>	.093
7060825	2	.027	.599	<u>.693</u>	.189	.012
7061541	3	-.017	<u>.894</u>	.193	.129	.001
7061541	4	.532	.521	<u>.574</u>	.300	.006
7063090	5	.340	.037	.159	<u>.918</u>	.050
7063320	6	.600	.238	<u>.711</u>	.076	.184
7063560	7	<u>.833</u>	.0611	.023	.377	.299
7063610	8	<u>.776</u>	-.205	.298	.390	-.268
7064890	9	<u>.828</u>	-.238	.227	.209	.373
7064998	10	.326	.273	<u>.828</u>	.336	-.043
7065100	11	.265	.339	.473	.234	<u>.715</u>
7065640	12	.340	.161	.615	<u>.673</u>	.114
7066685	13	.192	-.160	<u>.809</u>	.436	.025
7067060	14	.411	.296	<u>.678</u>	.007	.452
7067460	15	<u>.837</u>	.294	.382	.127	.085
7068160	16	<u>.801</u>	.555	.073	.079	-.057
7091305	17	.112	.232	<u>.835</u>	.150	.294
7091400	18	-.138	<u>.657</u>	.556	.385	.166
7095000	19	.248	<u>.883</u>	.083	-.079	.265

d'axes que l'on désire garder. Dans ce cas-ci, on a imposé la rotation en ne conservant que les cinq premiers axes. Il est évident que si l'on fixe, par exemple, la rotation avec six axes, quelques stations à la limite d'un groupe peuvent former un autre groupe. Par exemple, la contribution de la station No 4 sur l'axe 3 n'est peut-être pas significativement différente de sa contribution à l'axe 1 ou 2 et pourrait à la rigueur faire partie du groupe de l'axe 1 ou 2.

Afin de porter un jugement sur la composition des groupes, il est intéressant de tracer dans le plan des axes 2 et 3, des ellipses de proximité des coefficients de corrélation pour un niveau de probabilité donné. Ces ellipses d'égale probabilité se calculent à l'aide d'une loi normale à deux variables, en prenant pour acquis que telle ou telle station fait partie d'un groupe (au moins trois stations). Si une station est à l'intérieur de l'ellipse, on ne peut rejeter l'hypothèse qu'elle fait partie du groupe selon le niveau de probabilité correspondant au tracé de l'ellipse. Inversement, si une station est à l'extérieur de l'ellipse, l'hypothèse qu'elle fait partie du groupe, toujours à un niveau de probabilité donné qui est de 80% dans les graphiques de cette étude, est inacceptable.

L'interprétation des ellipses peut être la suivante: la redondance est d'autant plus forte pour un groupe que les axes de l'ellipse sont de faible dimension et de longueur sensiblement équivalente.

Une ellipse allongée signifie qu'une seule station ne peut représenter adéquatement le phénomène. Des ellipses qui se chevauchent, d'axes confondus ou légèrement décalés signifient que l'information est comparable et redondante sur les groupes correspondants.

La figure 4.5 nous montre les ellipses de proximité tracées en supposant les groupes de stations tels que définis au tableau 4.5. Sur ce graphique, les lettres indiquent la position des stations: A les stations du premier groupe, B les stations du second groupe, etc. Pour déterminer le numéro de la station correspondant à une lettre, on se reporte à la figure 4.4, où l'on voit le numéro de station inscrit au début de chaque segment à la même position dans le plan.

Les stations Nos 2 et 13 ne peuvent être introduites dans le groupe C avec un niveau de probabilité de 80%. En étudiant le tableau 4.5, on voit que la contribution de la station No 2 est de .693 au groupe C et de .599 au groupe B; ce qui nous laisse supposer que cette station se situe à la limite des deux groupes. Tel n'est pas le cas de la station No 13.

Les ellipses A, B et C, de formes très allongées, indiquent la nécessité de garder plus d'une station à chaque groupe en vue de bien représenter les précipitations annuelles. L'ellipse C dont les deux axes sont importants, montre qu'il y a peu de redondance dans ce groupe même si le nombre de stations est important.

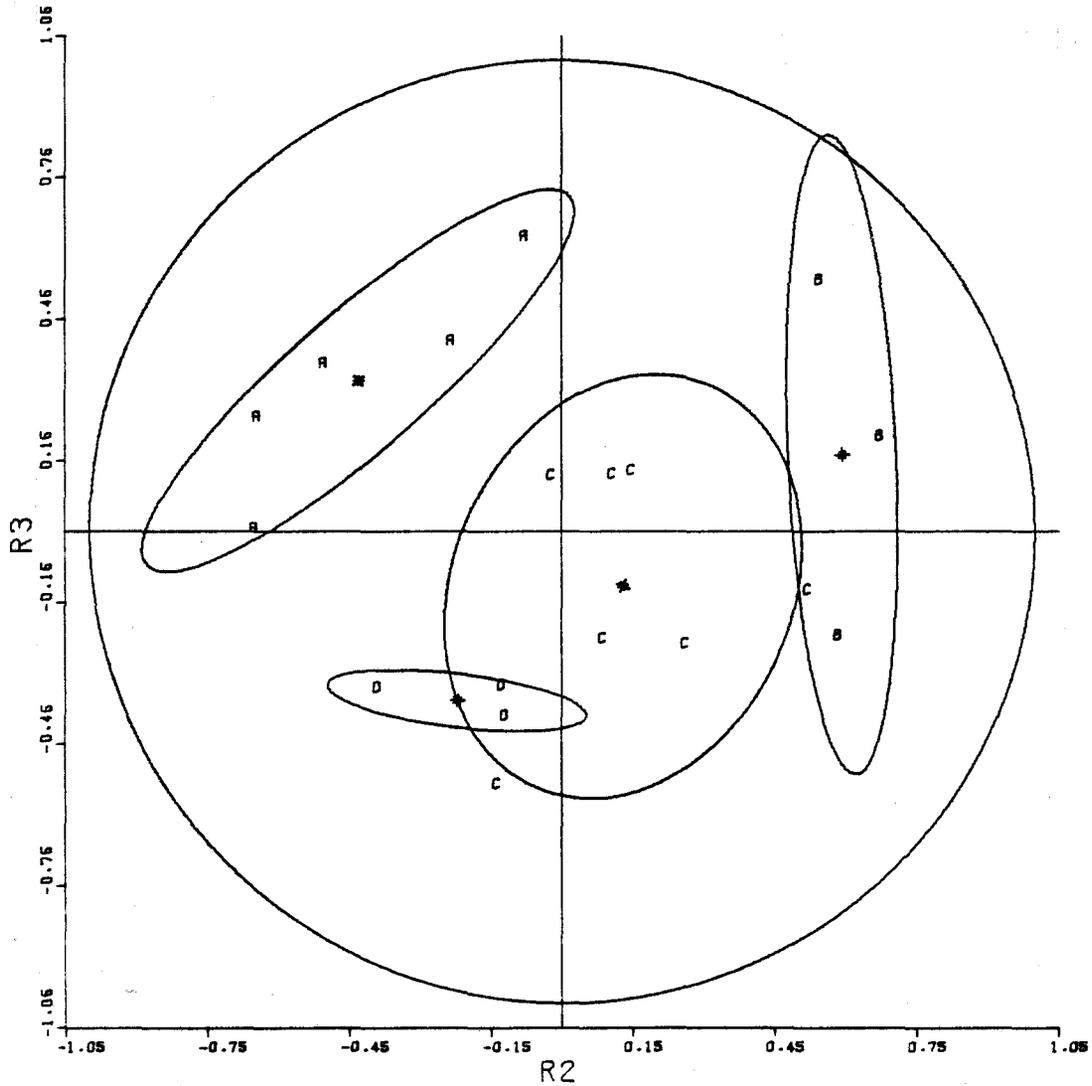


FIGURE 4.5 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "ANNUELLE".

#### 4.2.2 Période saisonnière

L'analyse en composantes principales, pour les quatre saisons, a été réalisée en utilisant la précipitation totale de chaque période telle que définie au tableau 4.3.

#### PERIODE "HIVER, 1 PERIODE"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations de la période "HIVER" sont compilés au tableau 4.6. La première composante explique seulement 40% de la variance totale tandis que l'ensemble des cinq composantes explique 88% de cette même variance.

A la figure 4.6, on constate que la corrélation ne tend pas vers 1. L'extrémité du segment de la station No 9 par exemple, n'est pas très près du cercle. On voit également sur ce graphique que la contribution de la quatrième et de la cinquième composantes est importante et indique de nombreuses variations du phénomène. Par exemple, les projections des stations Nos 6 et 7 sont comparables pour les trois premières composantes tandis que les précipitations des composantes 4 et 5 montrent une grande divergence de ces deux stations.

Le tableau 4.7 présente les coefficients de corrélation entre station et composantes, après rotation des axes et fait à nouveau ressortir pour chaque station l'axe de contribution maximal. On groupe les stations de la façon suivante:

- A) 1, 5, 8, 12, 18, 19
- B) 4, 6, 15, 16
- C) 3, 13, 14
- D) 9, 11, 17
- E) 2, 7, 10

La figure 4.7 montre les ellipses tracées pour chaque groupe de stations. On observe en général que les stations de chacun des groupes ne sont pas redondantes. Cependant les groupes B et D se chevauchent, c'est-à-dire que les stations de ces groupes ont le même comportement. L'étude des figures 4.5 et 4.7 nous indique des ellipses beaucoup plus grandes pour la période "HIVER" que pour la période "ANNUELLE".

TABLEAU 4.6 Corrélacion entre composantes et station;  
période "HIVER, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.852	-.411	-.226	.053	-.095	.959
7060825	2	.468	-.210	.181	-.710	.182	.833
7061541	3	.559	-.281	.392	.204	-.449	.789
7061560	4	.493	.786	.253	-.170	-.156	.978
7063090	5	.485	-.269	-.125	.691	.388	.952
7063320	6	.734	.311	-.230	-.211	-.426	.914
7063560	7	.747	-.164	-.142	-.345	.397	.882
7063610	8	.969	.002	-.196	.003	-.036	.979
7064890	9	.510	.362	-.009	.079	.407	.563
7064998	10	.618	-.061	.679	-.315	.104	.957
7065100	11	.590	.565	-.294	.024	.312	.851
7065640	12	.840	-.146	.156	-.036	-.081	.758
7066685	13	.696	-.328	.427	.270	-.115	.860
7067060	14	.316	.389	.728	.377	.030	.924
7067460	15	.406	.677	-.360	.275	-.175	.859
7068160	16	.672	.266	-.635	-.054	-.207	.972
7091305	17	.508	.688	.230	.140	.150	.827
7091400	18	.438	-.800	-.194	.224	.019	.919
7095000	19	.724	-.639	-.095	-.068	-.007	.945
Valeurs propres		7.64	3.89	2.35	1.69	1.15	
Variance expliquée		40.2%	20.5%	12.3%	8.9%	6.1%	
Variance totale expliquée		40.2%	60.7%	73.0%	82.0%	88.0%	

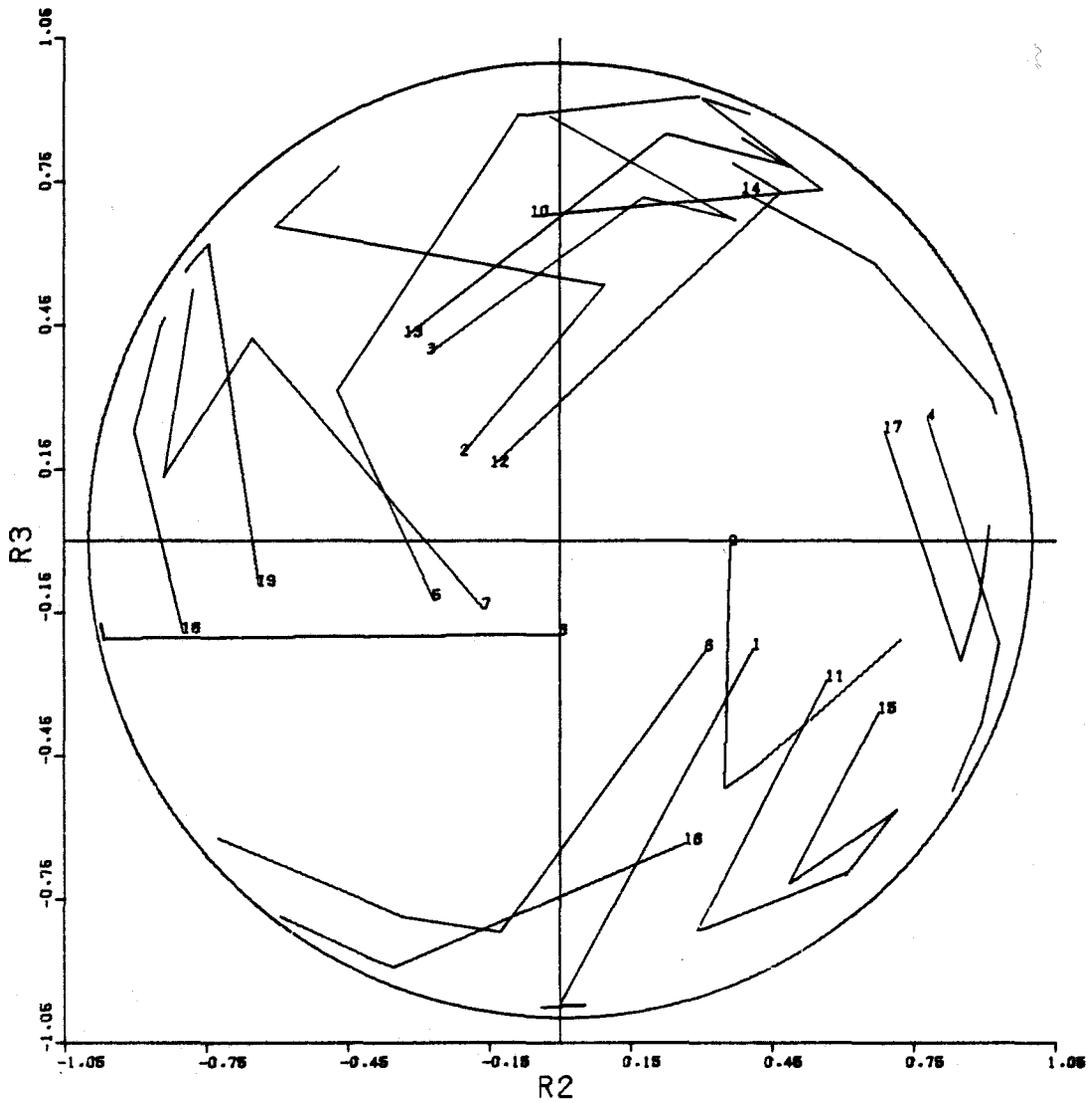


FIGURE 4.6 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "HIVER, 1 période".

TABLEAU 4.7 Corrélation entre composantes et station après rotation; période "HIVER, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	<u>.818</u>	.434	.135	.063	.282
7060825	2	.114	.080	.050	.012	<u>.901</u>
7061541	3	.435	.231	<u>.703</u>	-.219	.072
7061541	4	-.423	<u>.557</u>	.475	.473	.197
7063090	5	<u>.786</u>	-.131	.110	.478	-.277
7063320	6	.112	<u>.888</u>	.199	.131	.237
7063560	7	.473	.209	-.079	.399	<u>.671</u>
7063610	8	<u>.573</u>	.612	.212	.367	.310
7064890	9	.102	.155	.107	<u>.702</u>	.157
7064998	10	.112	-.032	.661	.170	<u>.691</u>
7065100	11	.041	.471	-.060	<u>.783</u>	.105
7065640	12	<u>.501</u>	.358	.442	.175	.391
7066685	13	.596	.060	<u>.686</u>	.052	.168
7067060	14	-.130	-.102	<u>.845</u>	.415	-.099
7067460	15	-.083	<u>.697</u>	.056	.502	-.333
7068160	16	.290	<u>.874</u>	-.191	.290	.053
7091305	17	-.191	.309	.436	<u>.710</u>	.032
7091400	18	<u>.932</u>	-.038	-.023	-.200	.092
7095000	19	<u>.839</u>	.187	.111	-.091	.431

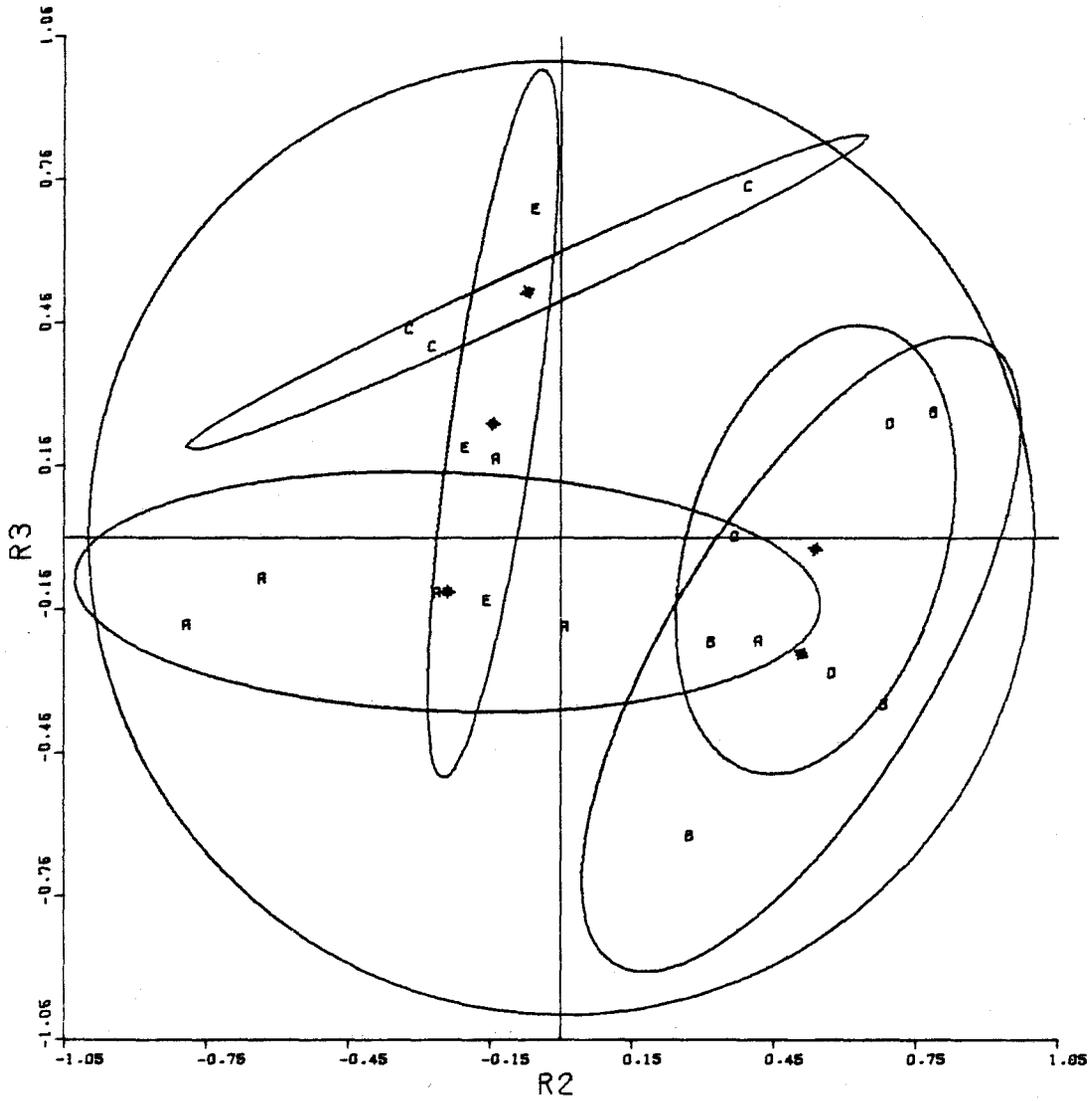


FIGURE 4.7 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "HIVER, 1 période".

PERIODE "PRINTEMPS, 1 PERIODE"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations de la période "PRINTEMPS" sont compilés au tableau 4.8. Les cinq premières composantes expliquent près de 97% de la variance totale dont 73.4% pour la première composante. Ce pourcentage élevé de variance expliquée peut être considéré comme un indice d'homogénéité des précipitations pour la période "PRINTEMPS".

La présentation graphique de ce tableau est montrée à la figure 4.8. L'étude de ce graphique permet de constater que l'extrémité de chaque segment représentant les stations s'approche très près du cercle. Ce qui veut dire qu'avec cinq composantes, le coefficient de corrélation multiple ou le pourcentage de variance expliquée, est satisfaisant pour toutes les stations.

Suite à une rotation par la méthode varimax du système d'axes des composantes principales, les groupes suivants sont définis à partir des résultats présentés au tableau 4.9:

- A) 1, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 17
- B) 3, 4, 6, 9, 14, 15, 16
- C) 2, 18, 19
- D) 11

La figure 4.9 illustre les ellipses correspondant à ces groupes

de stations. La station No 1 ne peut être considérée comme faisant partie du groupe A avec un niveau de probabilité de 80%; il en va de même des stations Nos 3 et 16 qui ne peuvent appartenir au groupe B.

TABLEAU 4.8 Corrélation entre composantes et station;  
période "PRINTEMPS, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.817	-.244	-.470	.149	-.107	.982
7060825	2	.654	.699	.271	.059	-.042	.995
7061541	3	.787	.102	.513	-.187	-.056	.931
7061560	4	.946	-.250	.124	-.041	-.093	.984
7063090	5	.890	.063	-.313	.139	-.105	.924
7063320	6	.932	-.175	.030	-.180	-.102	.943
7063560	7	.877	-.408	.037	.169	.165	.992
7063610	8	.848	-.441	-.008	.213	.098	.969
7064890	9	.930	-.137	.021	-.080	.298	.980
7064998	10	.935	.070	-.175	-.101	-.142	.940
7065100	11	.647	.301	-.395	-.512	.251	.990
7065640	12	.940	-.011	-.234	.121	-.155	.977
7066685	13	.958	.041	-.172	.016	.223	.998
7067060	14	.953	.052	.200	-.115	.030	.964
7067460	15	.949	-.208	.133	-.071	-.016	.949
7068160	16	.704	-.312	.567	-.122	-.107	.941
7091305	17	.901	.287	-.144	.122	-.217	.977
7091400	18	.852	.464	-.061	-.069	-.063	.954
7095000	19	.638	.450	.252	.506	.230	.981
Valeurs propres		13.9	1.78	1.41	.790	.446	
Variance expliquée		73.4%	9.3%	7.4%	4.2%	2.3%	
Variance totale expliquée		73.4%	82.8%	90.2%	94.4%	96.7%	

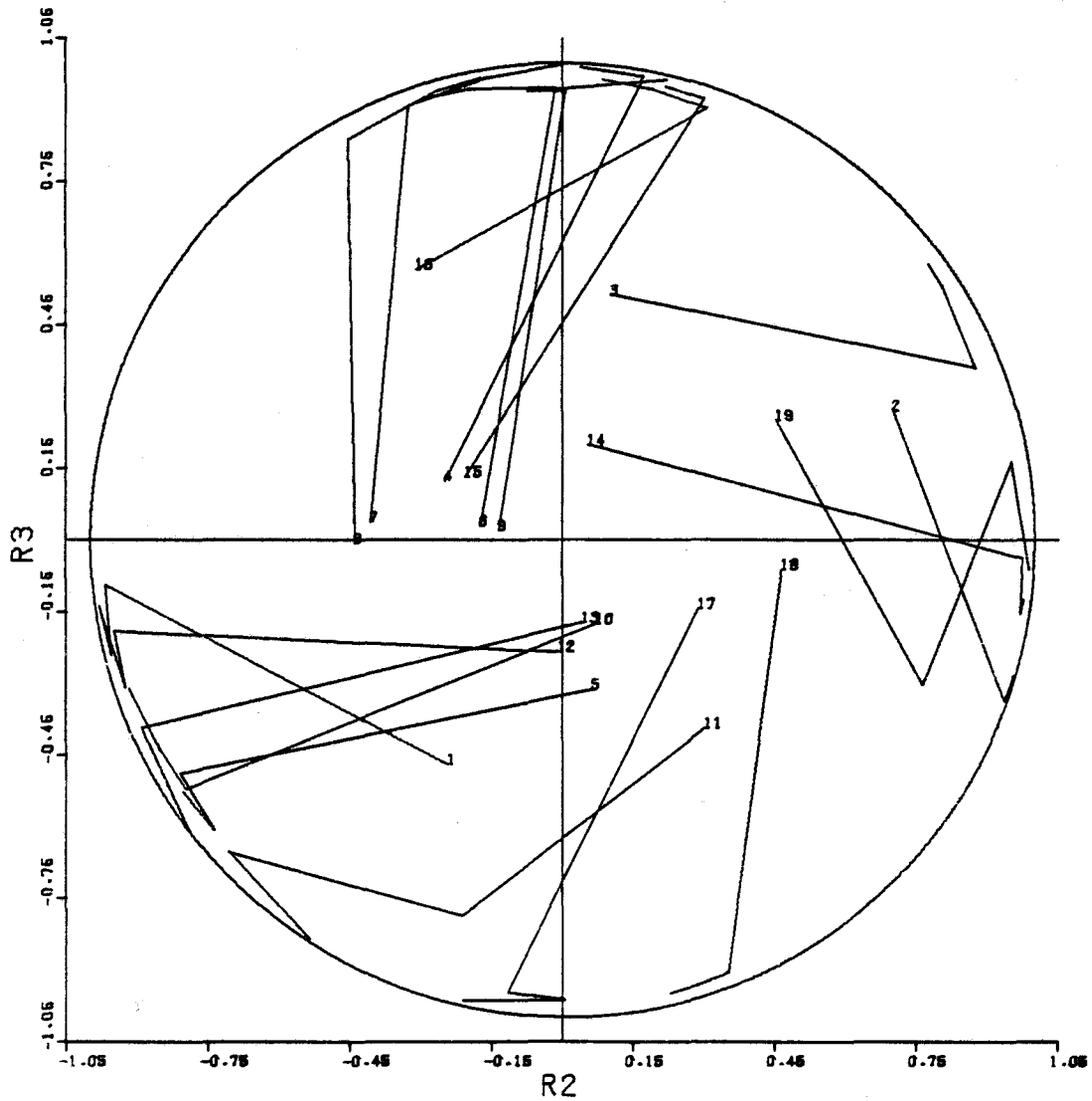


FIGURE 4.8 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "PRINTEMPS, 1 période".

TABLEAU 4.9 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
période "PRINTEMPS, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	<u>.935</u>	.209	.060	.212	.124
7060825	2	.105	.258	<u>.919</u>	.256	-.087
7061541	3	.127	<u>.800</u>	.481	.207	-.023
7061541	4	.605	<u>.731</u>	.208	.175	.098
7063090	5	<u>.806</u>	.235	.374	.276	.062
7063320	6	.590	<u>.673</u>	.187	.328	.015
7063560	7	<u>.644</u>	.612	.102	.078	.432
7063610	8	<u>.695</u>	.572	.067	.019	.393
7064890	9	.499	<u>.585</u>	.246	.413	.395
7064998	10	<u>.686</u>	.423	.353	.405	-.055
7065100	11	.327	.111	.210	<u>.908</u>	.032
7065640	12	<u>.819</u>	.354	.352	.236	.038
7066685	13	<u>.636</u>	.382	.379	.448	.322
7067060	14	.426	<u>.677</u>	.446	.338	.108
7067460	15	.552	<u>.718</u>	.231	.233	.144
7068160	16	.186	<u>.938</u>	.157	-.029	.048
7091305	17	<u>.683</u>	.280	.599	.255	-.092
7091400	18	.451	.281	<u>.675</u>	.458	-.077
7095000	19	.233	.178	<u>.864</u>	-.047	.382

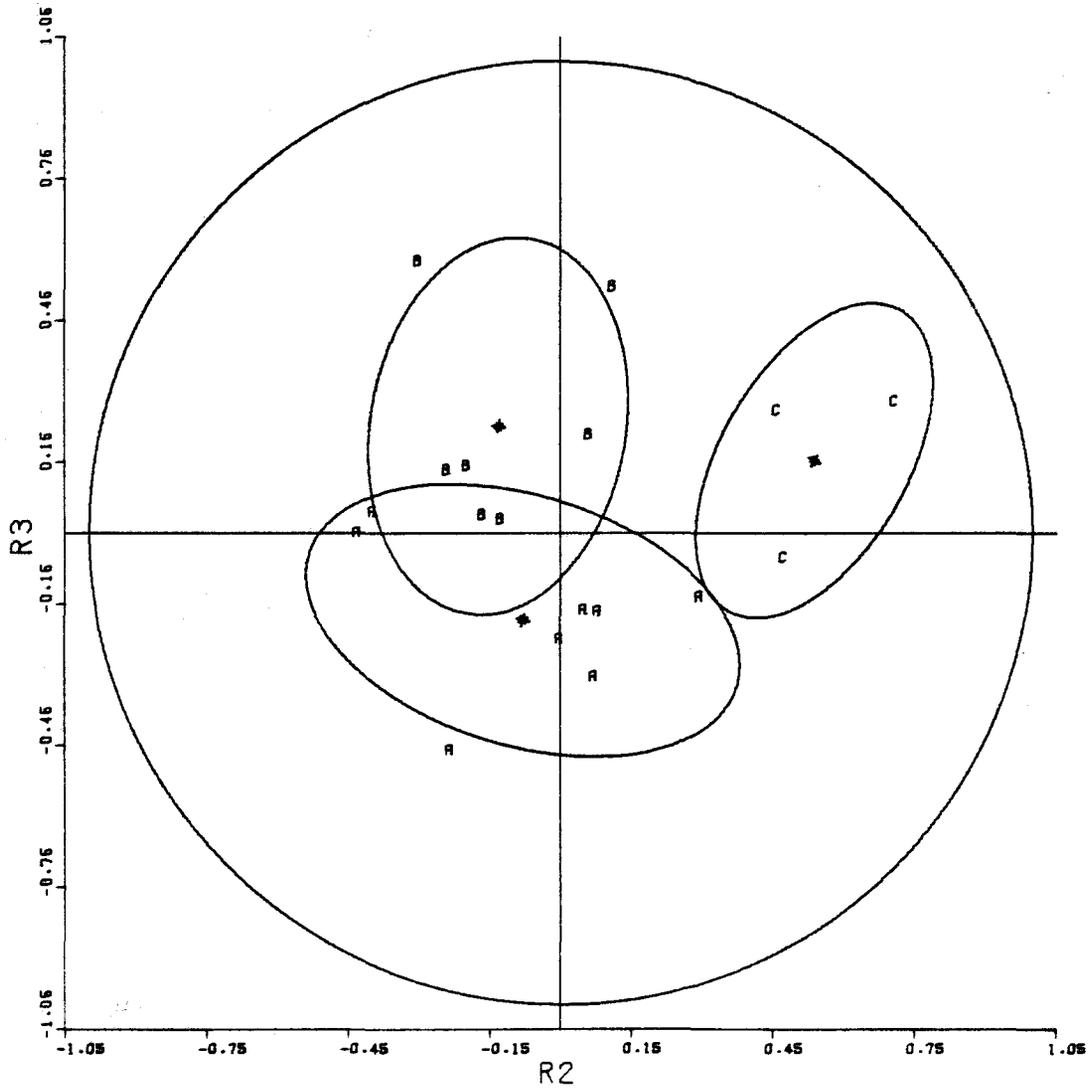


FIGURE 4.9 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "PRINTEMPS, 1 période".

PERIODE "ETE, 1 PERIODE"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations de la période "ETE, 1 période" sont compilés au tableau 4.10. La figure 4.10 montre les projections, dans le plan des axes 2 et 3 des cinq premières composantes. Comme précédemment, cette figure fait ressortir les stations qui ont un comportement semblable.

Suite à une rotation par la méthode varimax du système d'axes des composantes principales, le tableau 4.11 définit les groupes suivants:

- A) 1, 2, 3, 4, 10, 12
- B) 11, 17, 18, 19
- C) 7, 8, 9, 13
- D) 6, 14, 15, 16
- E) 5

La figure 4.11 illustre les ellipses tracées pour chaque groupe de stations. A l'exception de l'ellipse D, on remarque leur forme allongée ce qui traduit la nécessité de garder plusieurs stations pour bien représenter les précipitations pendant cette période. Egalement, l'ellipse C chevauchant l'ellipse D, une certaine redondance existe entre les groupes C et D.

TABLEAU 4.10 Corrélacion entre componentes et station;  
période "ETE, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.882	-.024	-.363	-.009	-.043	.912
7060825	2	.492	.710	-.284	-.055	.224	.880
7061541	3	.529	.617	-.352	.092	-.164	.819
7061560	4	.906	.121	-.161	-.272	-.070	.940
7063090	5	.612	.051	-.192	.549	-.436	.905
7063320	6	.812	-.371	.254	-.315	.132	.978
7063560	7	.582	-.460	.206	.490	.188	.868
7063610	8	.293	-.534	-.147	.159	.447	.618
7064890	9	.530	-.266	.581	.304	-.140	.801
7064998	10	.777	.032	-.533	-.219	.211	.981
7065100	11	.543	.390	.603	.030	-.115	.825
7065640	12	.911	-.091	-.268	.089	.120	.932
7066685	13	.829	-.388	.003	.197	.299	.966
7067060	14	.743	-.252	.442	-.387	.119	.975
7067460	15	.754	-.374	-.027	-.338	-.261	.892
7068160	16	.631	-.099	.136	-.179	-.682	.924
7091305	17	.660	.633	.119	.104	.087	.879
7091400	18	.555	.637	.316	.292	.170	.922
7095000	19	-.003	.589	.511	-.247	.297	.756
Valeurs propres		8.54	3.29	2.18	1.39	1.38	
Variance expliquée		44.9%	17.3%	11.4%	7.3%	7.3%	
Variance totale expliquée		44.9%	62.2%	73.7%	81.0%	88.2%	

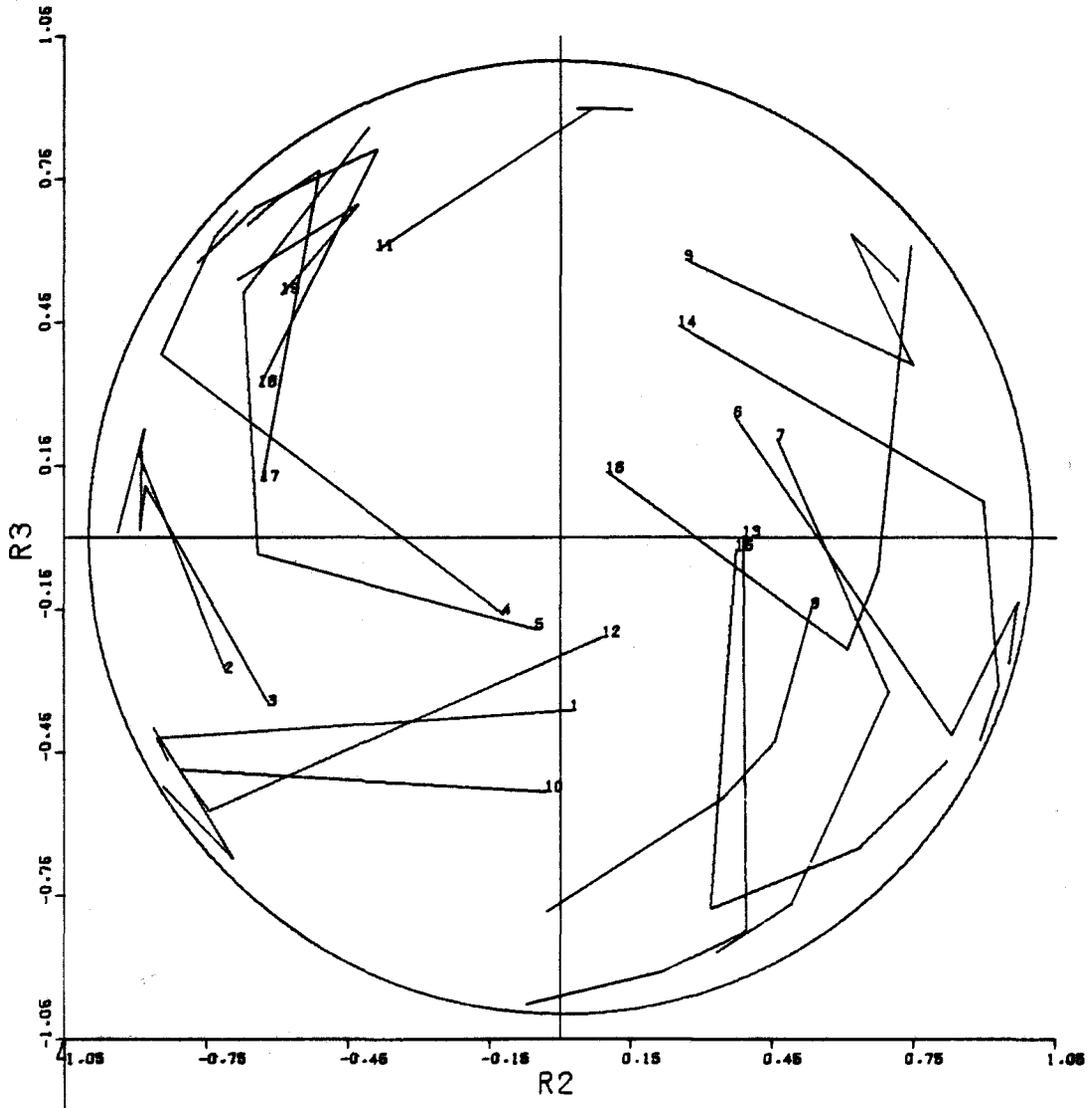


FIGURE 4.10 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ETE, 1 période".

TABLEAU 4.11 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
période "ETE, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
706080	1	<u>.717</u>	-.003	.341	.444	.291
7060825	2	<u>.825</u>	.427	-.084	-.075	-.059
7061541	3	<u>.770</u>	.292	-.180	.000	.329
7061541	4	<u>.684</u>	.187	.155	.629	.131
7063090	5	.360	.099	.216	.102	<u>.842</u>
7063320	6	.169	.162	.502	<u>.815</u>	-.082
7063560	7	-.046	.138	<u>.834</u>	.197	.337
7063610	8	.076	-.246	<u>.731</u>	.072	-.113
7064890	9	-.272	.416	<u>.460</u>	.421	.406
7064998	10	<u>.862</u>	-.107	.309	.360	-.043
7065100	11	.049	<u>.806</u>	.008	.365	.197
7065640	12	<u>.654</u>	.070	.532	.397	.241
7066685	13	.311	.093	<u>.823</u>	.401	.149
7067060	14	.064	.331	.380	<u>.833</u>	-.155
7067460	15	.263	-.118	.226	<u>.850</u>	.186
7068160	16	.123	.081	-.137	<u>.771</u>	.537
7091305	17	.574	<u>.708</u>	.046	.109	.160
7091400	18	.378	<u>.854</u>	.137	-.035	.172
7095000	19	-.004	<u>.726</u>	-.225	-.016	-.422

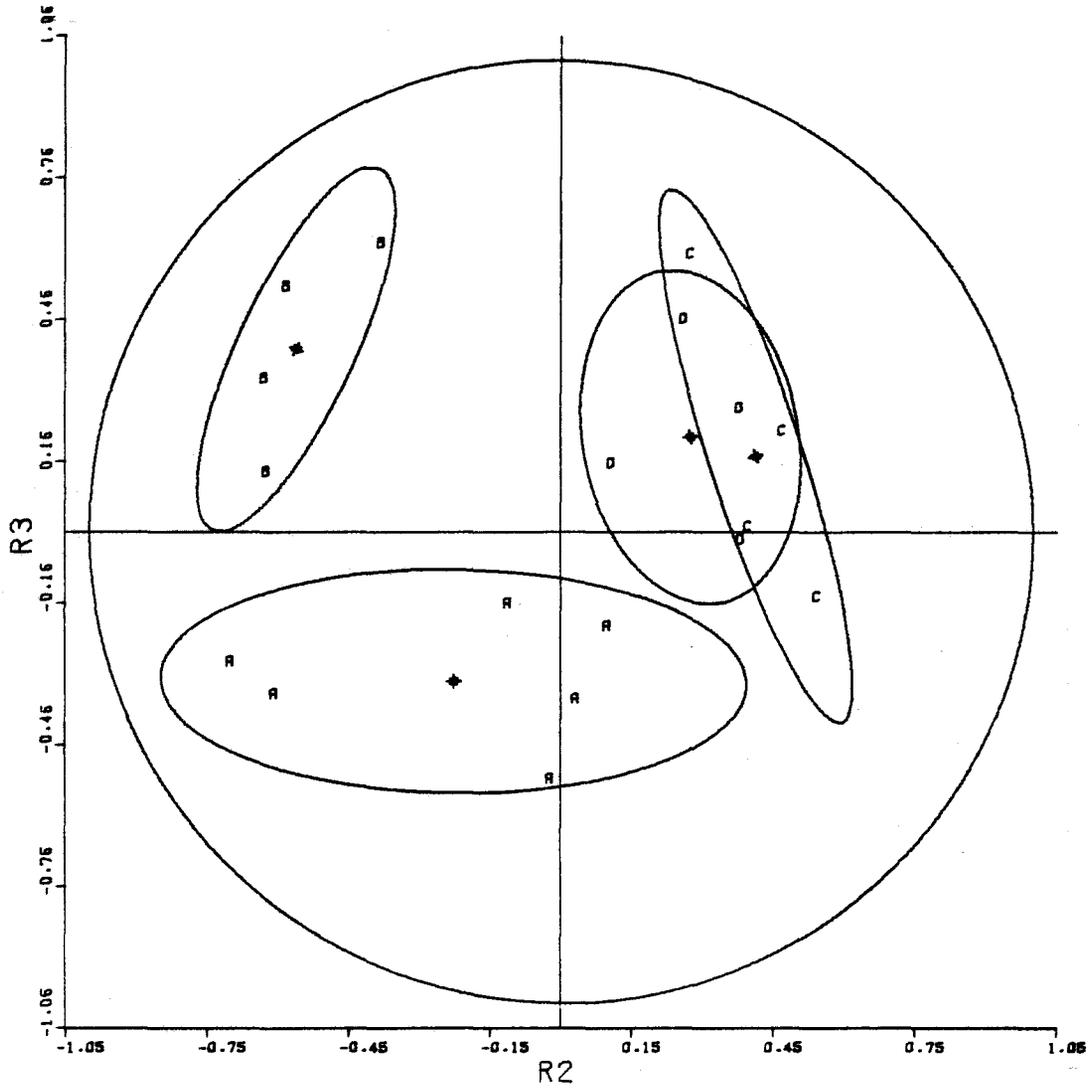


FIGURE 4.11 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "ETE, 1 période".

PERIODE "AUTOMNE, 1 PERIODE"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations de la période "AUTOMNE" sont compilés au tableau 4.12. La première composante explique 73.6% de la variance tandis que l'ensemble des cinq composantes explique près de 95%. La figure 4.12 montre ces résultats sous forme de graphique et fait ressortir les stations de comportement semblable.

Suite à une rotation du système d'axe initial des composantes principales, les groupes de stations suivants sont définis à partir du tableau 4.13.

- A) 1, 2, 3, 6, 14, 15, 19
- B) 5, 7, 8, 12, 13, 17, 18
- C) 4, 10, 11
- D) 16
- E) 9

La figure 4.13 présente les ellipses tracées pour chaque groupe de stations. L'ellipse C, de forme très allongée, chevauche l'ellipse B; ce qui signifie qu'il y a redondance d'un groupe à l'autre. La forme allongée de l'ellipse C nous indique une grande variation du phénomène. On considère que la station No 8 ne peut appartenir au groupe B avec un niveau de probabilité de 80%.

TABLEAU 4.12 Corrélation entre composantes et station;  
période "AUTOMNE, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.875	-.384	-.052	.190	.001	.952
7060825	2	.923	.131	.233	.057	-.118	.940
7061541	3	.804	-.481	-.024	.018	.166	.906
7061560	4	.898	-.055	-.076	-.377	.105	.968
7063090	5	.897	-.043	-.037	.069	-.331	.921
7063320	6	.974	.013	.014	-.157	.123	.989
7063560	7	.913	.203	-.002	.086	-.000	.883
7063610	8	.730	.582	-.302	-.086	-.058	.974
7064890	9	.385	.666	.401	.463	.149	.989
7064998	10	.951	.011	-.085	-.223	-.040	.963
7065100	11	.754	.511	.080	-.344	.185	.988
7065640	12	.946	-.056	-.211	.124	.012	.958
7066685	13	.856	.067	-.350	.341	-.019	.977
7067060	14	.802	-.503	.234	.067	.163	.982
7067460	15	.848	-.070	.473	-.006	.127	.964
7068160	16	.819	.078	.400	-.170	-.338	.981
7091305	17	.912	.174	-.285	.050	.028	.946
7091400	18	.939	-.048	-.219	.080	.082	.945
7095000	19	.897	-.338	.084	.039	-.133	.945
Valeurs propres		14.	1.90	1.07	.785	.421	
Variance expliquée		73.6%	10.0%	5.6%	4.1%	2.2%	
Variance totale expliquée		73.6%	83.7%	89.3%	93.4%	95.6%	

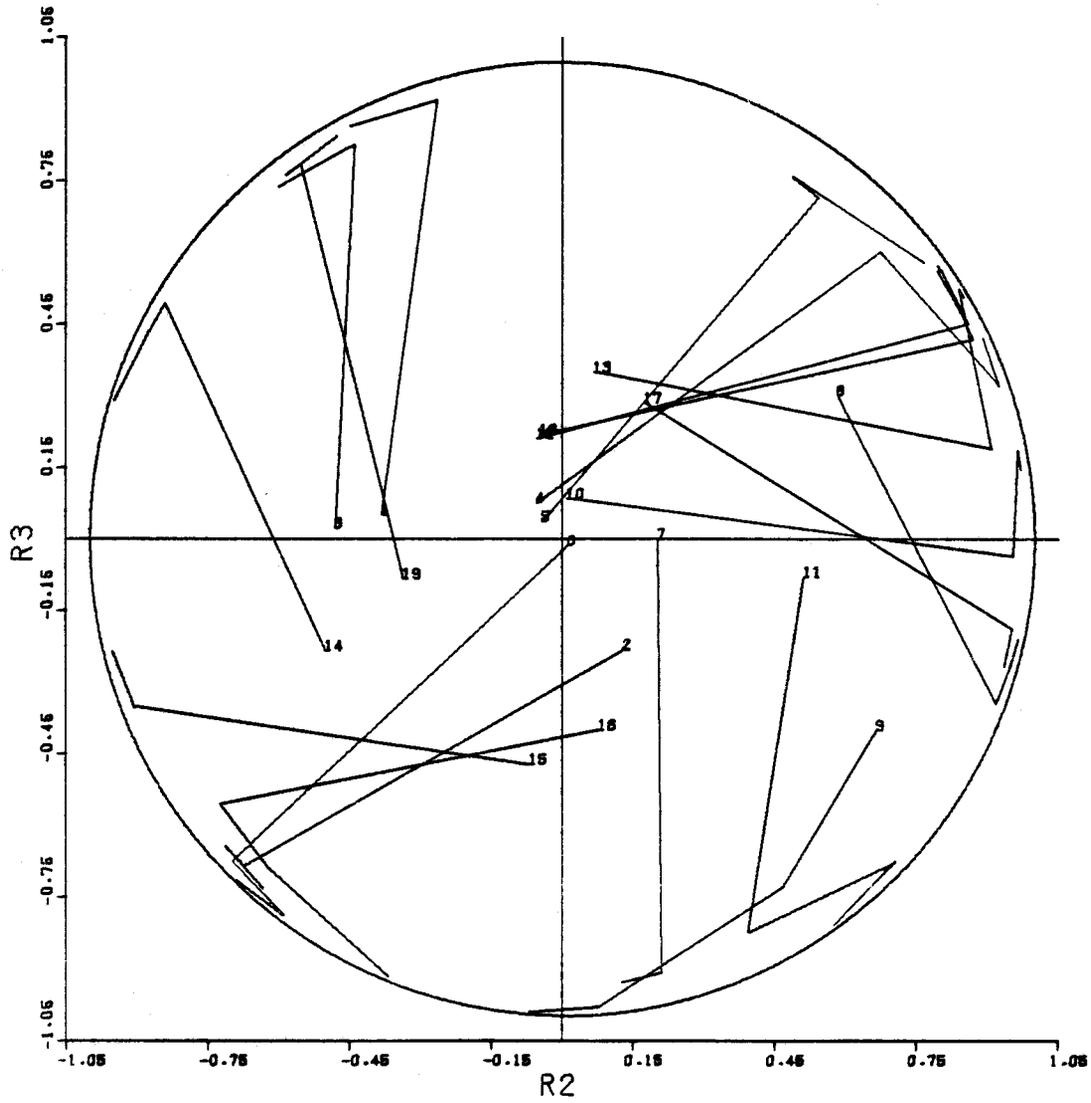


FIGURE 4.12 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "AUTOMNE, 1 période".

TABLEAU 4.13 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
période "AUTOMNE, 1 période".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	<u>.793</u>	.515	.096	.218	.030
7060825	2	<u>.499</u>	.397	.391	.487	.378
7061541	3	<u>.858</u>	.343	.195	.090	-.080
7061541	4	.556	.358	<u>.686</u>	.231	-.080
7063090	5	.464	<u>.590</u>	.237	.543	.088
7063320	6	<u>.607</u>	.429	.597	.243	.147
7063560	7	.422	<u>.558</u>	<u>.441</u>	.289	.339
7063610	8	-.060	<u>.679</u>	.637	.200	.252
7064890	9	-.022	.189	.168	.109	<u>.955</u>
7064998	10	.511	.492	<u>.585</u>	.344	.012
7065100	11	.156	.263	<u>.864</u>	.193	.333
7065640	12	.569	<u>.692</u>	.327	.191	.113
7066685	13	.405	<u>.854</u>	.179	.102	.205
7067060	14	<u>.944</u>	.176	.140	.186	.069
7067460	15	<u>.725</u>	.083	.382	.355	.400
7068160	16	.427	.169	.409	<u>.739</u>	.237
7091305	17	.370	<u>.732</u>	.471	.157	.161
7091400	18	.574	<u>.665</u>	<u>.381</u>	.134	.104
7095000	19	<u>.755</u>	.406	.181	.418	.015

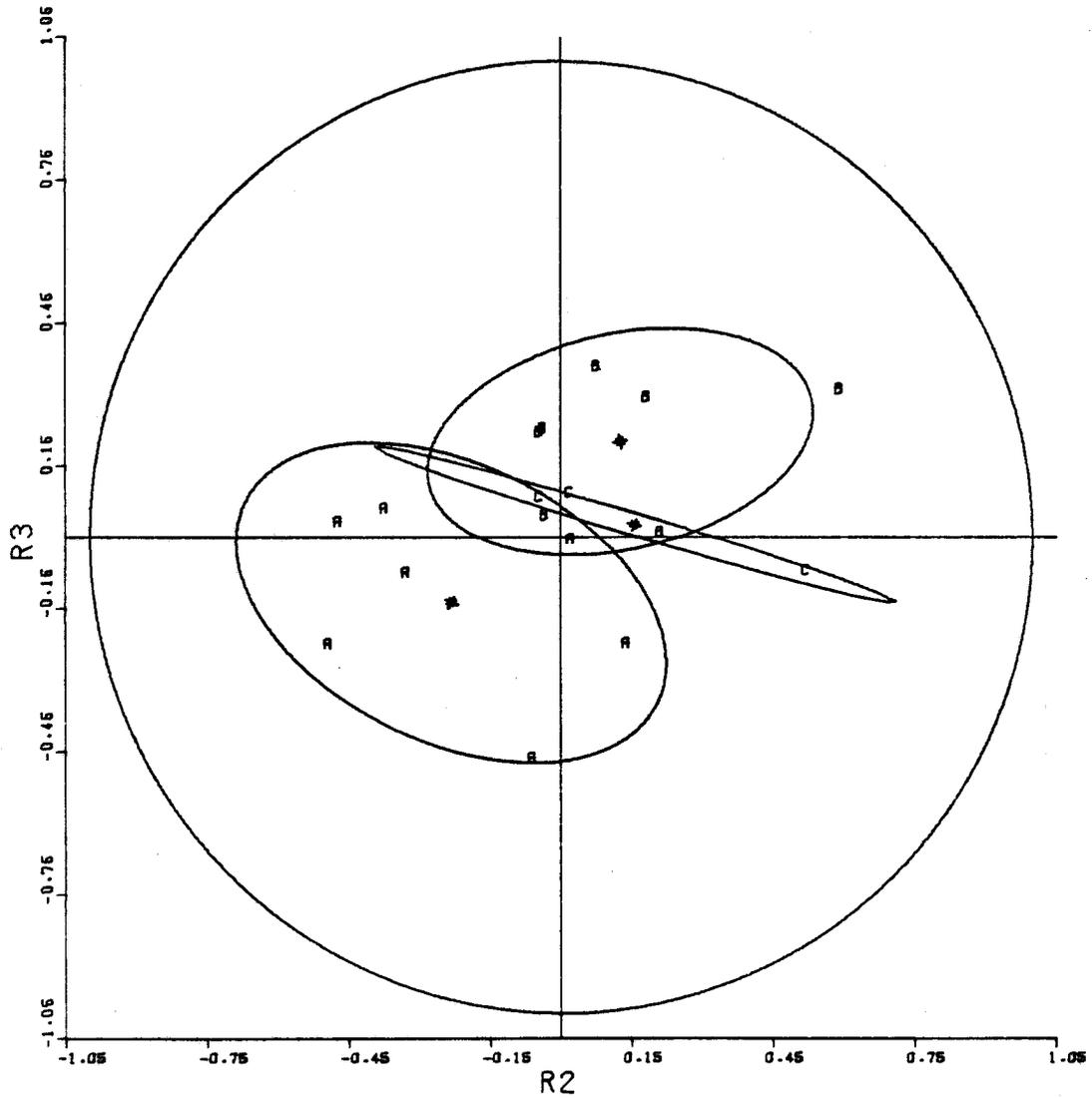


FIGURE 4.13 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "AUTOMNE, 1 période".

#### 4.2.3 Période 15 jours

L'analyse en composantes principales du réseau météorologique actuel, de la région du lac Saint-Jean a également été faite en utilisant les précipitations totales, par période de 15 jours, pour chacune des périodes telle que définie au tableau 4.3

#### PERIODE "HIVER/15 JOURS"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations totales de 15 jours pour la période "HIVER" sont compilés au tableau 4.14. La représentation graphique de ce tableau est montrée à la figure 4.14. Une étude de ce graphique nous précise les stations dont le comportement est semblable.

Suite à une rotation du système d'axes initial des composantes principales, on obtient les résultats présentés au tableau 4.15. En fonction de ces résultats on peut regrouper les stations de la manière suivante:

- A) 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12, 13
- B) 4, 6, 14, 15, 16
- C) 8, 9, 11
- D) 18, 19
- E) 17

Les ellipses pour chaque groupe de stations sont présentées à la

figure 4.15. On considère que la station No 7 ne peut faire partie du groupe A au niveau de probabilité de 80%. Si l'on compare les ellipses des précipitations pour la période "HIVER, 1 période" (figure 4.7) et les ellipses de la période "HIVER/15 jours" (figure 4.15), on observe que les ellipses des précipitations de 15 jours sont beaucoup plus faibles ce qui peut s'interpréter comme une plus grande homogénéité de ces précipitations, ou une meilleure précision des coefficients de corrélation par suite du plus grand nombre d'observations.

TABLEAU 4.14 Corrélacion entre componentes et station;  
période "HIVER/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.885	.189	.035	-.164	-.020	.848
7060825	2	.794	.097	.155	-.216	-.022	.711
7061541	3	.770	.135	.006	-.026	-.110	.624
7061560	4	.859	.018	-.417	.017	-.107	.923
7063090	5	.808	.336	-.040	-.185	.231	.856
7063320	6	.920	-.143	-.109	-.047	-.180	.914
7063560	7	.840	-.280	.226	-.183	.066	.872
7063610	8	.900	-.310	.168	-.073	-.043	.942
7064890	9	.787	-.452	.166	.091	.142	.879
7064998	10	.910	.046	-.061	-.183	.130	.884
7065100	11	.699	-.400	.292	.387	.202	.925
7065640	12	.914	.196	-.011	-.090	.100	.893
7066685	13	.861	-.196	.021	-.172	.081	.816
7067060	14	.834	-.129	-.112	.010	-.077	.730
7067460	15	.892	-.096	-.258	.181	-.169	.933
7068160	16	.815	-.168	-.170	.255	-.332	.896
7091305	17	.629	.328	-.294	.326	.499	.945
7091400	18	.593	.699	.163	.032	-.146	.889
7095000	19	.599	.505	.425	.312	-.168	.919
Valeurs propres		12.5	1.7	.811	.681	.653	
Variance expliquée		66.0 %	9.1 %	4.3 %	3.6 %	3.4 %	
Variance totale expliquée		66.0 %	75.0 %	79.3 %	82.9 %	86.3 %	

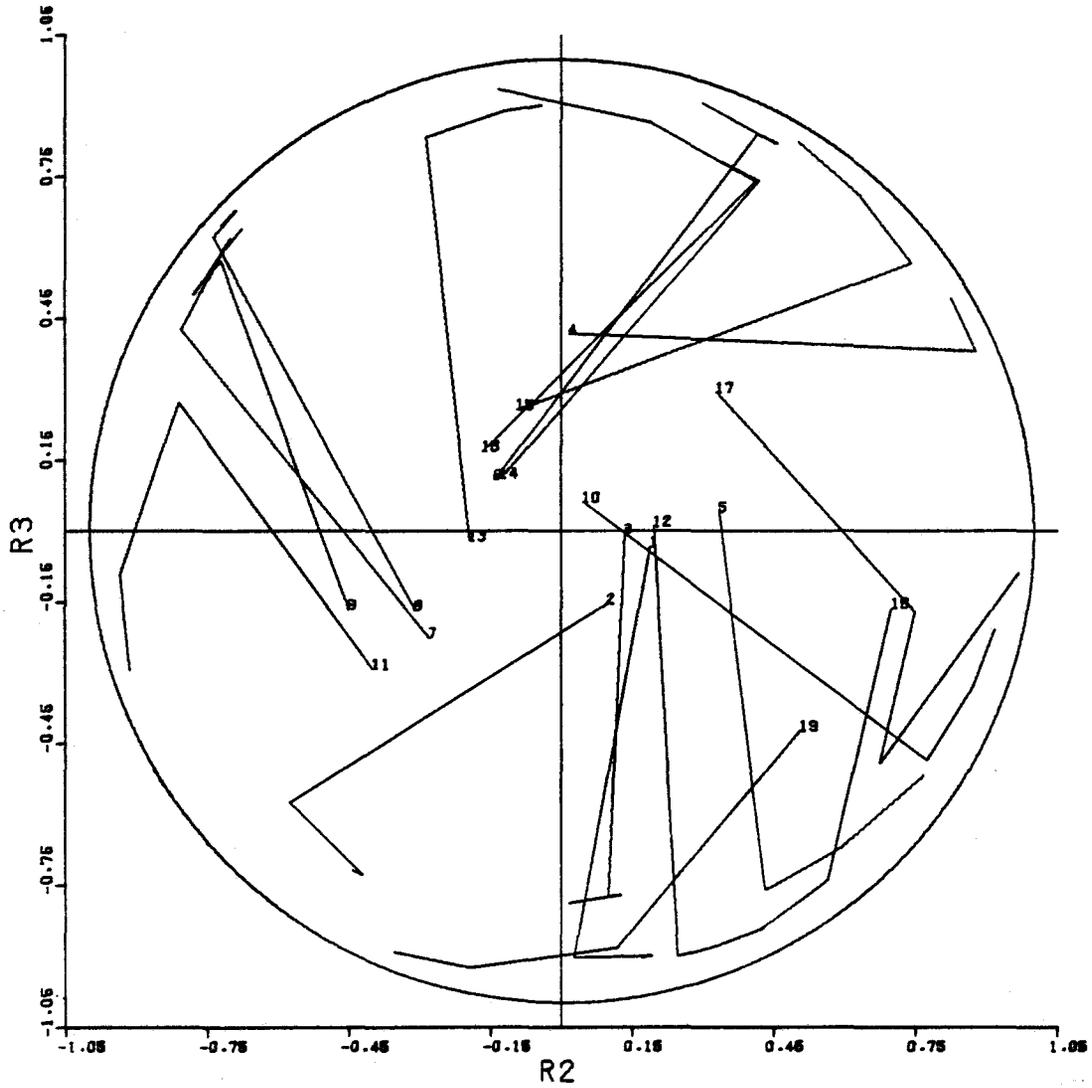


FIGURE 4.14 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "HIVER/15 jours".

TABLEAU 4.15 Corrélation entre composantes et station après rotation; période "HIVER/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	<u>.654</u>	.402	.237	.406	.194
7060825	2	<u>.640</u>	.290	.293	.354	.069
7061541	3	<u>.456</u>	.443	.231	.381	.146
7061541	4	.441	<u>.761</u>	.147	.136	.331
7063090	5	<u>.682</u>	.232	.128	.370	.427
7063320	6	.516	<u>.673</u>	.386	.195	.087
7063560	7	<u>.628</u>	.297	.611	.125	.004
7063610	8	.550	.451	<u>.640</u>	.159	-.004
7064890	9	.378	.346	<u>.776</u>	.016	.115
7064998	10	<u>.694</u>	.407	.317	.221	.296
7065100	11	.116	.245	<u>.887</u>	.151	.205
7065640	12	<u>.633</u>	.390	.277	.386	.337
7066685	13	<u>.631</u>	.405	.475	.091	.140
7067060	14	.441	<u>.580</u>	.382	.161	.165
7067460	15	.318	<u>.776</u>	.353	.209	.249
7068160	16	.184	<u>.802</u>	.393	.243	.078
7091305	17	.212	.238	.169	.252	<u>.867</u>
7091400	18	.358	.192	-.102	<u>.818</u>	.209
7095000	19	.134	.148	.243	<u>.898</u>	.120

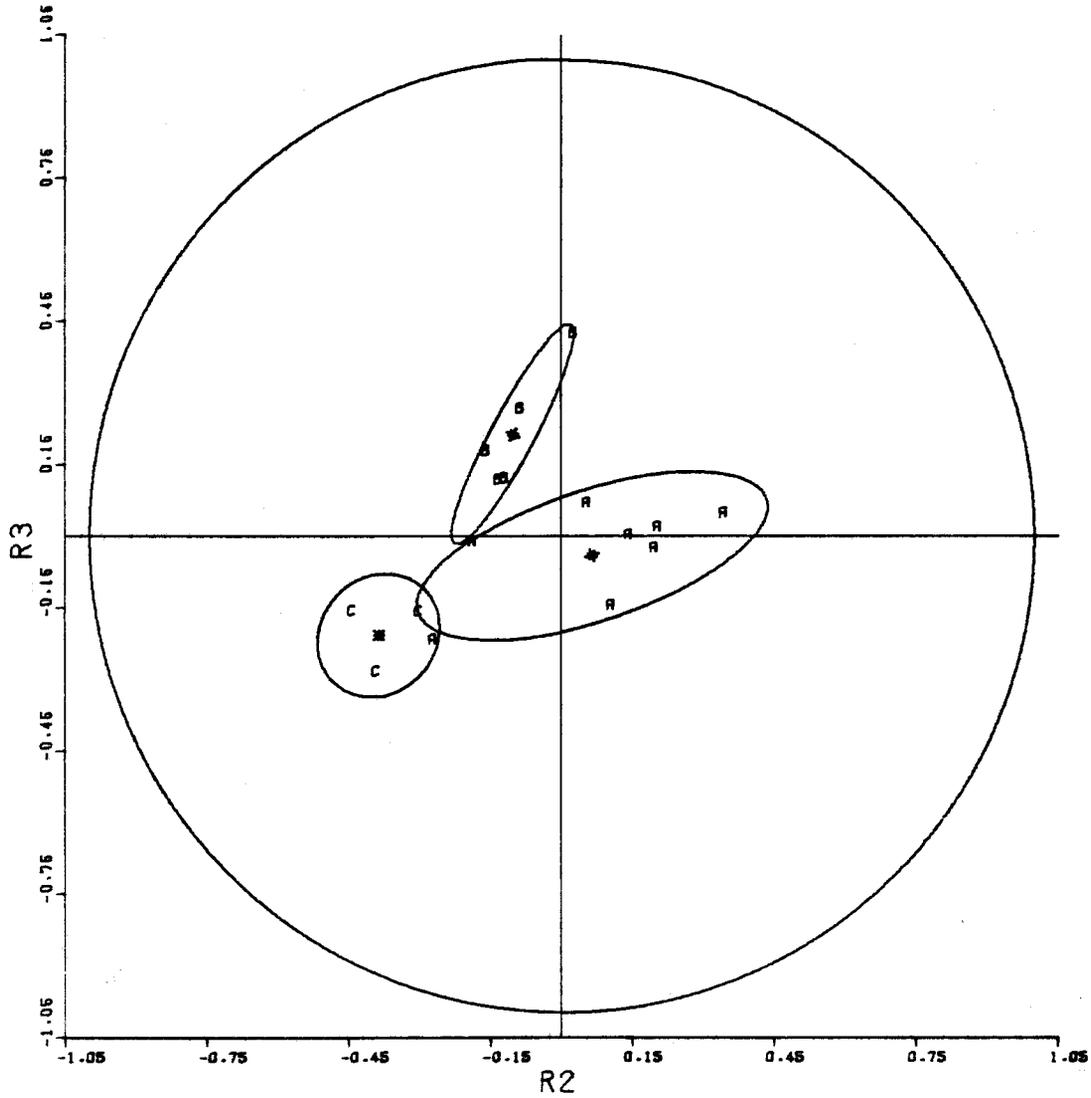


FIGURE 4.15 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "HIVER/15 jours".

PERIODE "PRINTEMPS/15 JOURS"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations totales de 15 jours pour la période "PRINTEMPS" sont présentés au tableau 4.16. L'étude de la représentation graphique de ce tableau (figure 4.16) permet d'identifier les stations dont le comportement est semblable.

D'après le tableau 4.17 on peut regrouper les stations de façon suivante:

- A) 2, 17, 18, 19
- B) 1, 5, 10, 12, 13
- C) 7, 8, 9, 11
- D) 4, 6, 14, 15
- E) 3, 16

Comme dans le cas précédent, la figure 4.17 présente les ellipses correspondant aux différents groupes de stations. Compte tenu de la dimension des ellipses on déduit une homogénéité assez forte des précipitations de 15 jours pour la période "PRINTEMPS".

TABLEAU 4.16 Corrélation entre composantes et station;  
période "PRINTEMPS/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.794	-.128	-.458	-.090	.117	.879
7060825	2	.731	.498	.201	-.145	.082	.852
7061541	3	.755	.196	.381	-.211	.349	.919
7061560	4	.928	-.068	-.002	-.107	-.116	.891
7063090	5	.901	.043	-.267	-.066	.072	.894
7063320	6	.923	-.013	.014	-.194	-.238	.946
7063560	7	.837	-.351	-.067	.117	.221	.890
7063610	8	.824	-.415	.040	.082	.190	.896
7064890	9	.766	-.462	.166	.240	.053	.888
7064998	10	.919	.015	-.110	-.106	-.056	.871
7065100	11	.686	-.295	.185	.455	-.230	.851
7055640	12	.889	-.009	-.326	-.120	.033	.913
7066685	13	.888	-.165	-.141	-.019	-.088	.844
7067060	14	.931	.134	.091	-.096	-.236	.958
7067460	15	.917	.040	.111	-.174	-.275	.960
7068160	16	.783	-.262	.420	-.177	.074	.894
7091305	17	.788	.404	-.085	.213	.172	.866
7091400	18	.807	.420	-.031	.317	.061	.932
7095000	19	.642	.538	.036	.313	-.078	.807
Valeurs propres		13.1	1.7	.880	.752	.546	
Variance expliquée		69.1 %	8.7 %	4.6 %	4.0 %	2.9 %	
Variance totale expliquée		69.1 %	77.8 %	82.4 %	86.3 %	89.2 %	

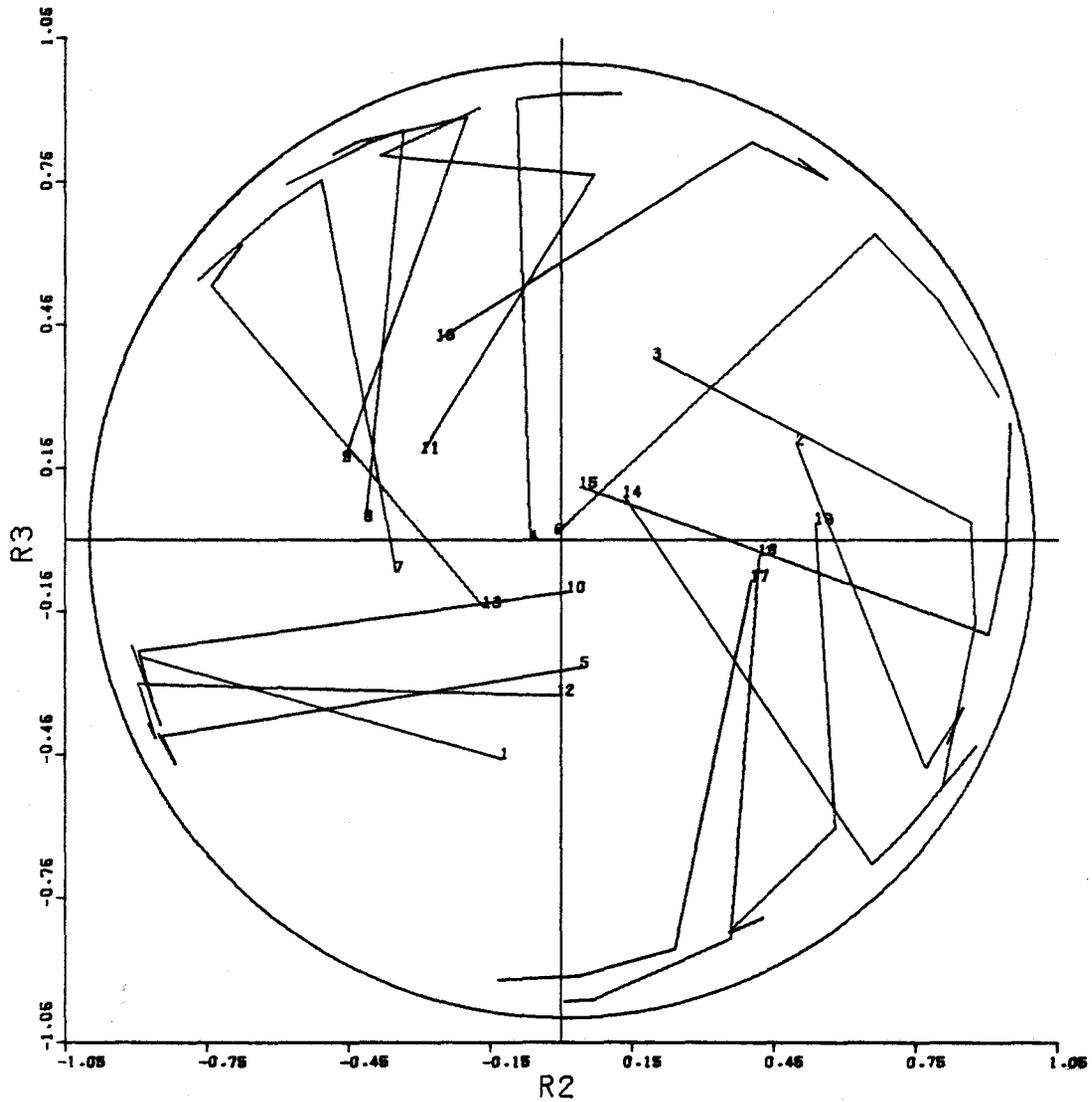


FIGURE 4.16 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "PRINTEMPS/15 jours".

TABLEAU 4.17 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
période "PRINTEMPS/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	.228	<u>.845</u>	.257	.195	.093
7060825	2	<u>.643</u>	.214	.004	.371	.505
7061541	3	.407	.229	.221	.220	<u>.777</u>
7061541	4	.321	.515	.416	<u>.525</u>	.274
7063090	5	.416	<u>.713</u>	.270	.308	.212
7063320	6	.313	.480	.340	<u>.660</u>	.256
7063560	7	.186	.593	<u>.647</u>	.102	.273
7063610	8	.114	.520	<u>.696</u>	.152	.324
7064890	9	.124	.330	<u>.826</u>	.185	.217
7064998	10	.380	<u>.589</u>	.326	.459	.250
7065100	11	.304	.119	<u>.811</u>	.290	-.051
7065640	12	.344	<u>.763</u>	.252	.344	.174
7066685	13	.271	<u>.599</u>	.464	.418	.148
7067060	14	.475	.377	.327	<u>.641</u>	.269
7067460	15	.359	.382	.345	<u>.698</u>	.282
7068160	16	.084	.222	.560	.412	<u>.596</u>
7091305	17	<u>.771</u>	.407	.195	.114	.233
7091400	18	<u>.838</u>	.322	.269	.173	.156
7095000	19	<u>.844</u>	.127	.139	.231	.072

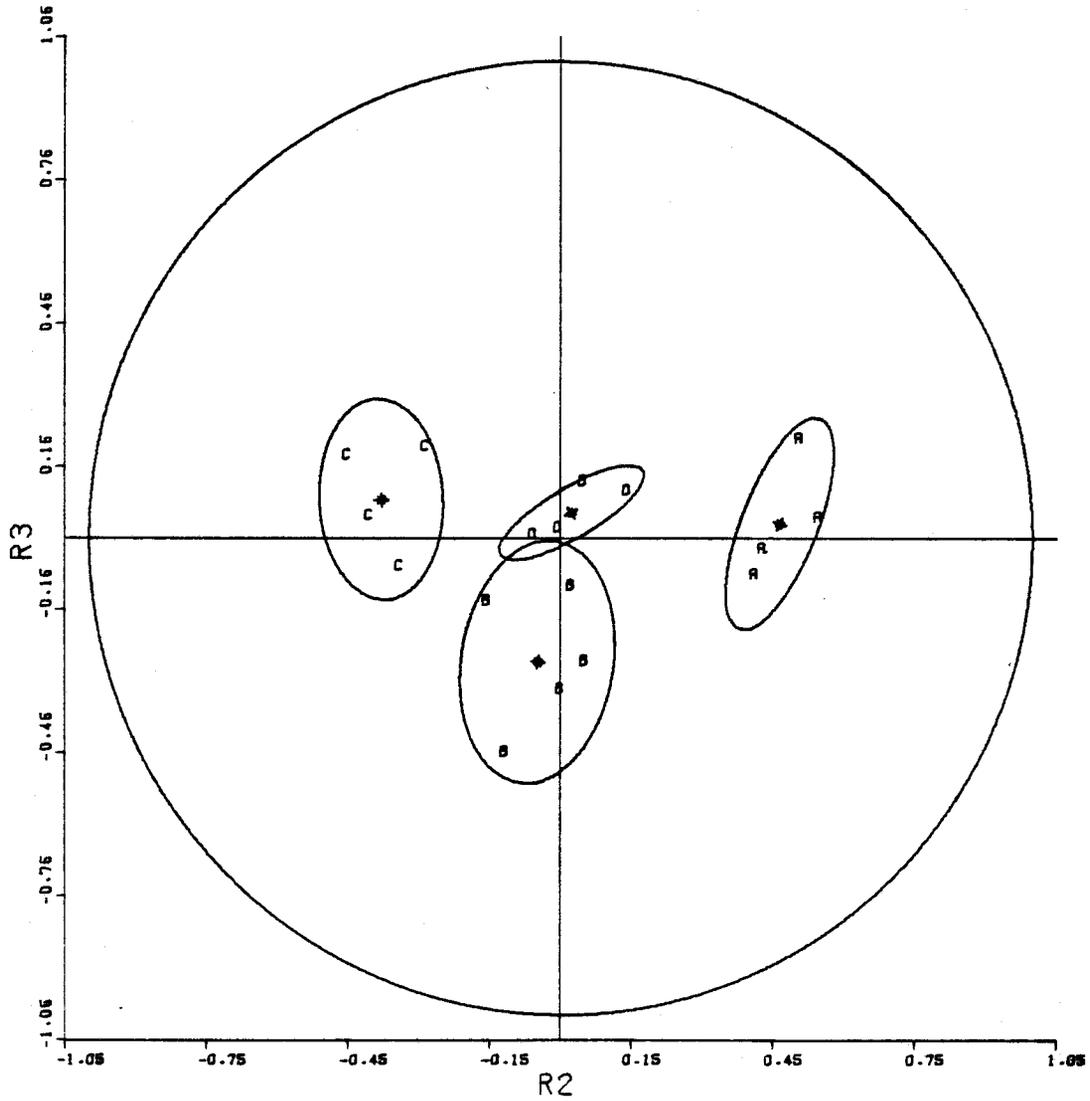


FIGURE 4.17 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "PRINTEMPS/15 jours".

PERIODE "ETE/15 JOURS"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations de 15 jours pour la période "ETE" apparaissent au tableau 4.18. La variance expliquée est de 83% pour l'ensemble des cinq premières composantes. La figure 4.18 montre ces résultats sous forme de graphique et fait ressortir quelques stations particulières.

Comme dans les cas précédents le tableau 4.19 permet de définir les groupes de stations suivants:

- A) 7, 8, 9, 11, 16
- B) 1, 5, 10, 12, 13
- C) 17, 18, 19
- D) 4, 6, 14, 15
- E) 2, 3

A partir des ellipses tracées pour chaque groupe de stations (figure 4.19) on ne peut affirmer avec une niveau de probabilité de 80% que la station No 10, appartient au groupe B. Les ellipses B et D se chevauchant, une certaine redondance existe entre les deux groupes.

TABLEAU 4.18 Corrélation entre composantes et station;  
période "ETE/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.865	.205	-.203	-.209	-.131	.891
7060825	2	.560	.356	.048	.556	-.277	.828
7061541	3	.595	.387	-.195	.439	-.183	.769
7061560	4	.840	-.065	-.273	.132	.280	.880
7063090	5	.716	.321	-.241	-.152	-.308	.791
7063320	6	.881	-.234	-.100	.145	.167	.890
7063560	7	.818	-.281	.172	-.057	-.165	.808
7063610	8	.775	-.197	.294	-.275	-.147	.822
7064890	9	.726	-.372	.383	-.018	-.063	.817
7064998	10	.819	.273	-.162	-.175	.015	.802
7065100	11	.717	-.328	.295	.076	.021	.715
7065640	12	.847	.160	-.187	-.291	-.190	.899
7066685	13	.872	-.122	-.145	-.219	-.069	.849
7067060	14	.859	-.251	-.090	.132	.257	.892
7067460	15	.836	-.228	-.170	.169	.310	.904
7068160	16	.713	-.480	.087	.101	-.084	.764
7091305	17	.577	.601	.050	-.100	.318	.808
7091400	18	.413	.639	.392	-.158	.339	.872
7095000	19	.480	.409	.584	.155	-.084	.769
Valeurs propres		10.5	2.2	1.2	.971	.814	
Variance expliquée		55.5 %	11.8 %	6.3 %	5.1 %	4.3 %	
Variance totale expliquée		55.5 %	67.3 %	73.6 %	78.7 %	83.0 %	

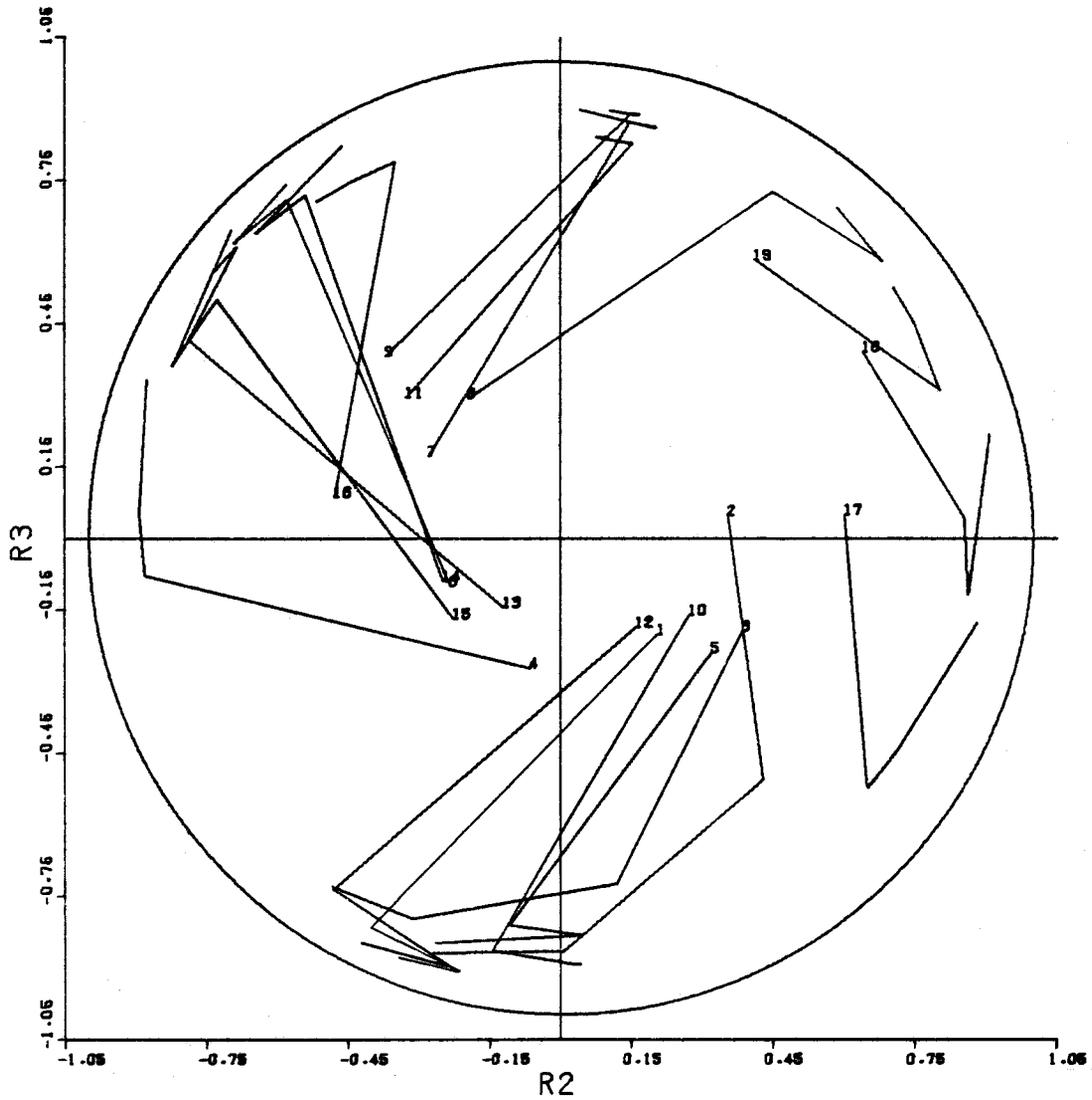


FIGURE 4.18 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "ETE/15 jours".

TABLEAU 4.19 Corrélacion entre composantes et station après rotation;  
période "ETE/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	.307	<u>.777</u>	.226	.313	.211
7060825	2	.178	.190	.193	.144	<u>.838</u>
7061541	3	.030	.356	.155	.289	<u>.730</u>
7061541	4	.297	.387	.136	<u>.764</u>	.200
7063090	5	.170	<u>.782</u>	.153	.130	.330
7063320	6	.534	.318	.073	<u>.676</u>	.206
7063560	7	<u>.759</u>	.374	.051	.259	.152
7063610	8	<u>.766</u>	.427	.208	.114	-.009
7064890	9	<u>.853</u>	.143	.118	.222	.079
7064998	10	.235	<u>.681</u>	.341	.364	.188
7065100	11	<u>.750</u>	.110	.121	.329	.130
7065640	12	.348	<u>.813</u>	.187	.245	.150
7066685	13	.512	<u>.644</u>	.073	.404	.059
7067060	14	.518	.269	.105	<u>.720</u>	.146
7067460	15	.434	.261	.090	<u>.785</u>	.154
7068160	16	<u>.734</u>	.187	-.140	.389	.138
7091305	17	-.032	.393	<u>.729</u>	.302	.170
7091400	18	.048	.181	<u>.909</u>	.063	.082
7095000	19	.391	.055	<u>.636</u>	-.127	.439

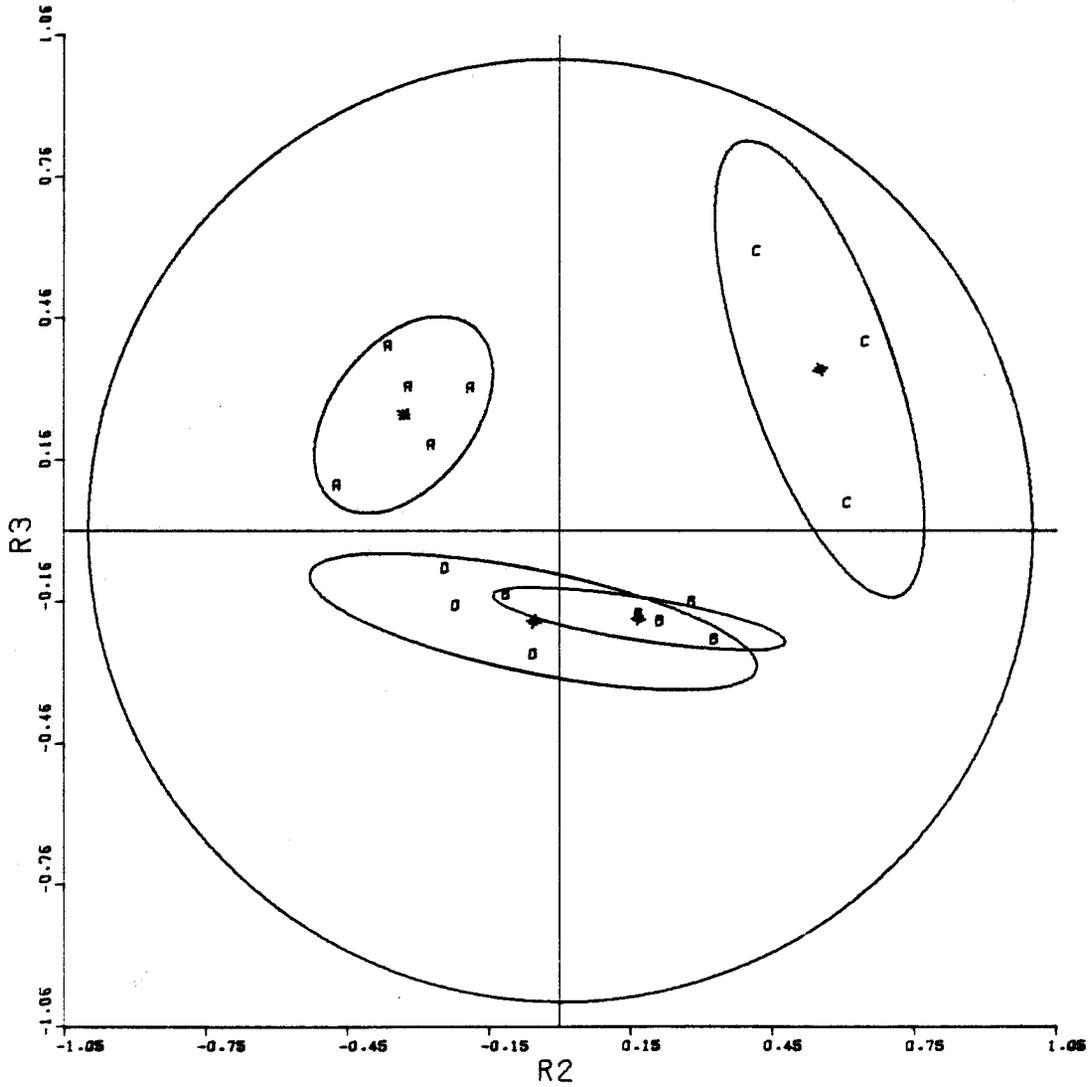


FIGURE 4.19 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; précipitation "ETE/15 jours".

PERIODE "AUTOMNE/15 JOURS"

Les résultats de l'analyse en composantes principales des précipitations totales de 15 jours pour la période "AUTOMNE" apparaissent au tableau 4.20 et sont présentés graphiquement à la figure 4.20.

D'autre part, le tableau 4.21 conduit au regroupement suivant:

- A) 1, 7, 8, 10, 12, 13
- B) 4, 6, 14, 15, 16
- C) 17, 18, 19
- D) 2, 3, 5
- E) 9, 11

La figure 4.21 montre les ellipses de probabilité de 80% tracées pour chaque groupe de stations. L'ellipse D, de forme très allongée, nous indique la nécessité d'avoir quelques stations pour une représentation adéquate des précipitations de ce groupe.

TABLEAU 4.20 Corrélation entre composantes et station;  
période "AUTOMNE/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	NO	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
7060080	1	.823	-.005	-.411	-.196	.085	.892
7060825	2	.819	.260	-.044	.066	.279	.822
7061541	3	.686	.404	.110	-.187	.355	.807
7061560	4	.832	-.018	.322	-.127	-.068	.817
7063090	5	.800	.124	-.218	-.062	.280	.784
7063320	6	.853	-.186	.206	-.236	-.133	.879
7063560	7	.853	-.305	-.181	.163	-.161	.906
7063610	8	.751	-.347	-.202	.337	-.191	.875
7064890	9	.644	-.373	.160	.438	.188	.807
7064998	10	.835	-.076	-.234	-.089	.107	.778
7065100	11	.630	.038	.524	.312	.131	.787
7065640	12	.859	-.129	-.329	-.158	.129	.904
7066685	13	.768	-.253	-.419	.112	-.004	.843
7067060	14	.785	-.033	.259	-.383	-.165	.858
7067460	15	.824	-.114	.319	-.149	-.214	.862
7068160	16	.740	-.284	.445	-.039	.074	.833
7091305	17	.536	.602	.126	.316	-.014	.766
7091400	18	.698	.583	-.099	.167	-.213	.910
7095000	19	.659	.447	-.141	.020	-.422	.832
Valeurs propres		11.0	1.7	1.5	.927	.759	
Variance expliquée		58.2 %	9.0 %	7.9 %	4.9 %	4.0 %	
Variance totale expliquée		58.2%	67.2 %	75.1 %	80.0 %	84.0 %	

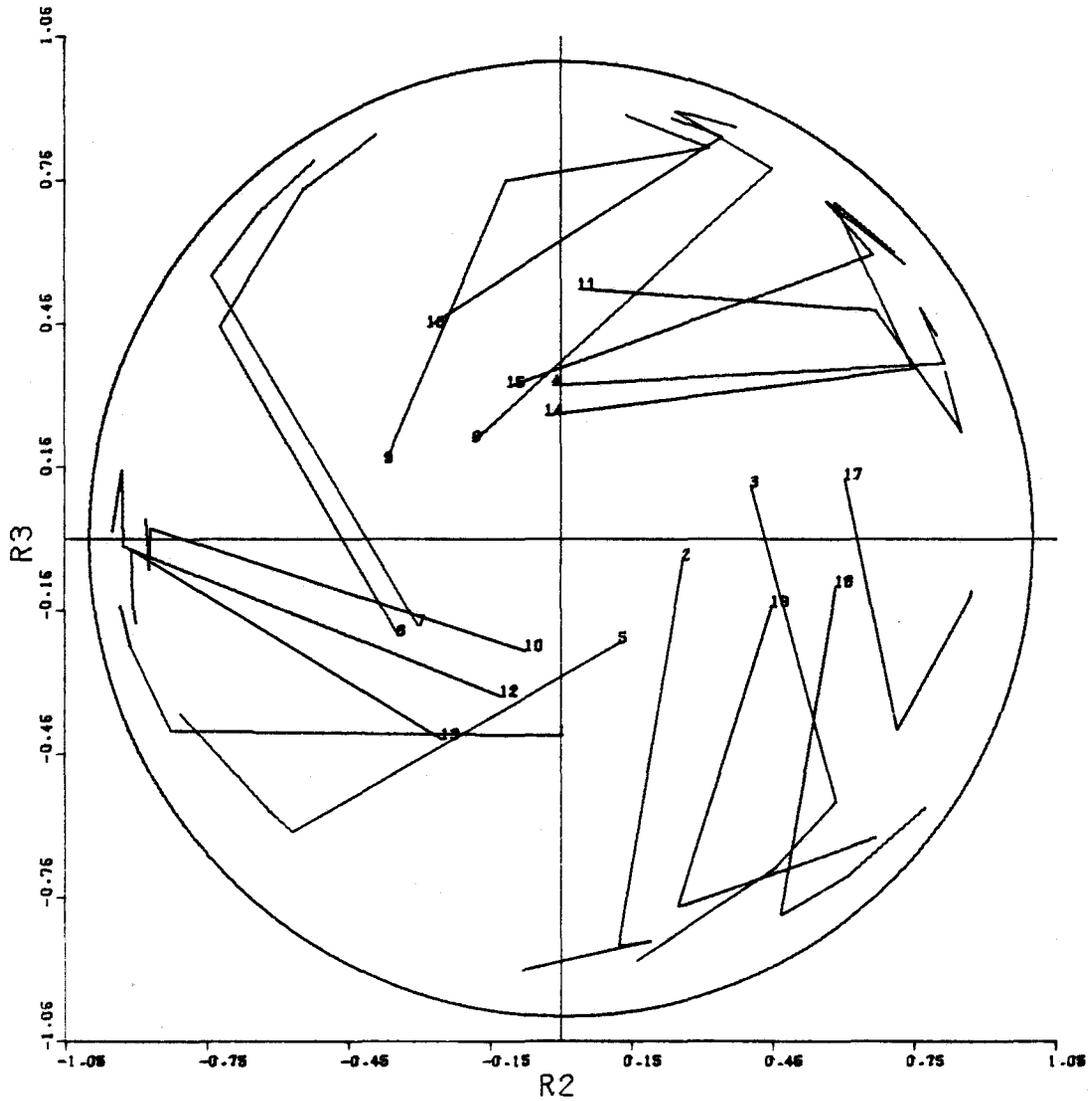


FIGURE 4.20 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station pour la période "AUTOMNE/15 jours".

TABLEAU 4.21 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
période "AUTOMNE/15 jours".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
7060080	1	<u>.698</u>	.297	.225	.510	-.083
7060825	2	.360	.242	.416	<u>.608</u>	.301
7061541	3	.065	.334	.367	<u>.728</u>	.162
7061541	4	.269	<u>.713</u>	.276	.265	.299
7063090	5	.498	.232	.271	<u>.623</u>	.144
7063320	6	.421	<u>.774</u>	.151	.218	.181
7063560	7	<u>.798</u>	.385	.202	.076	.273
7063610	8	<u>.805</u>	.245	.197	-.056	.353
7064890	9	.488	.215	.000	.102	<u>.716</u>
7064998	10	<u>.638</u>	.350	.191	.446	.109
7065100	11	.047	.408	.287	.183	<u>.709</u>
7065640	12	<u>.722</u>	.352	.132	.491	.037
7066685	13	<u>.853</u>	.191	.156	.201	.118
7067060	14	.257	<u>.823</u>	.212	.261	.044
7067460	15	.326	<u>.784</u>	.251	.124	.249
7068160	16	.252	<u>.691</u>	-.001	.202	.501
7091305	17	.018	.075	<u>.765</u>	.280	.311
7091400	18	.266	.186	<u>.854</u>	.263	.073
7095000	19	.335	.313	<u>.776</u>	.096	-.106

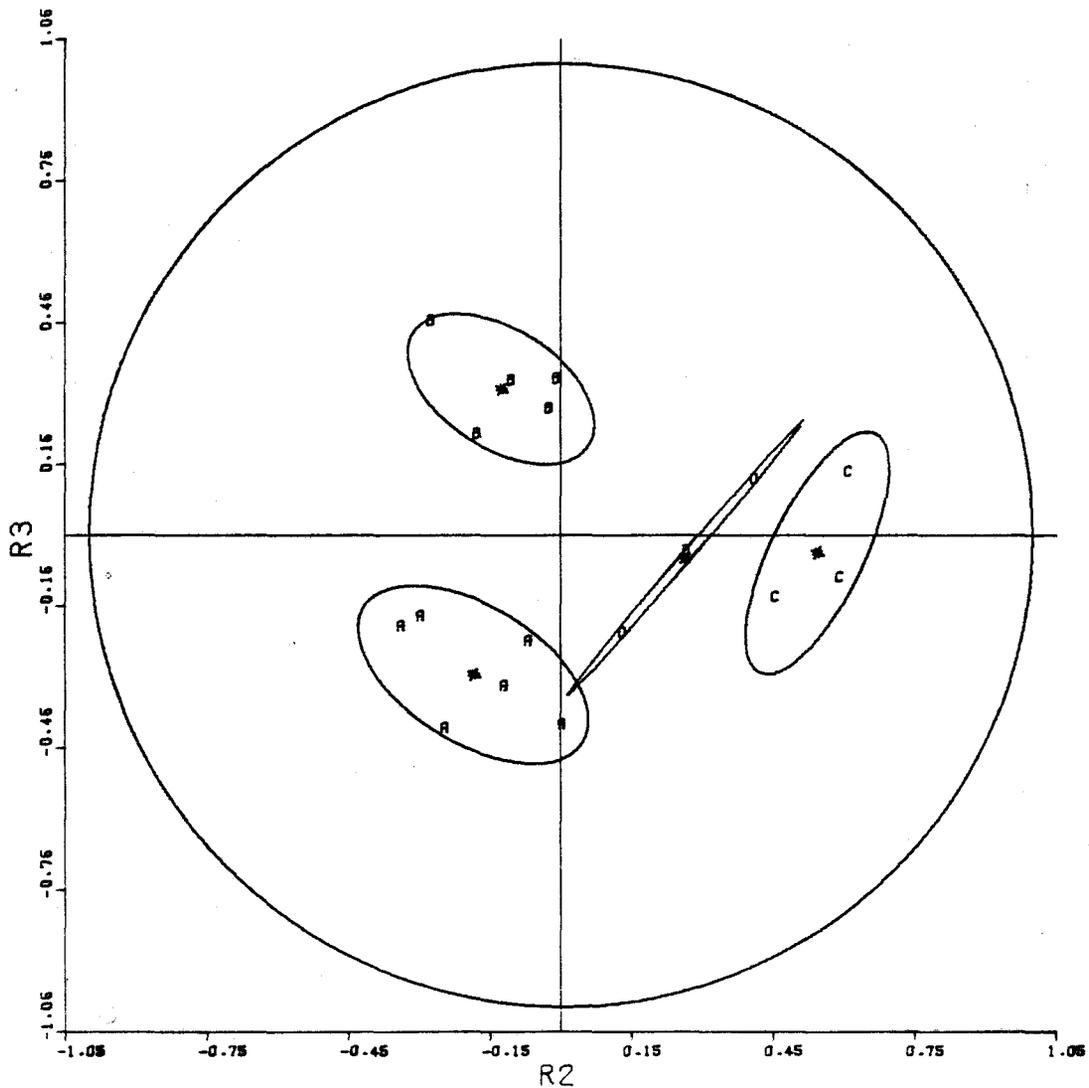


FIGURE 4.21 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; période "AUTOMNE/15 jours".

#### 4.2.4 Ligne de relevés de neige

L'analyse en composantes principales a porté sur les relevés de neige des mois de JANVIER, FEVRIER et MARS. Des 24 stations disponibles telles que présentées au tableau 2.2, on a retenu seulement 20 ou 21 de celles-ci ayant suffisamment de données pour l'analyse. Les tableaux préparés pour chacun de ces mois (tableaux 4.22, 4.24 et 4.26) indiquent les numéros de stations retenus dans chaque cas.

#### RELEVÉ DE NEIGE DU MOIS DE JANVIER

Le tableau 4.22 présente les coefficients de corrélation entre les 20 stations retenues et les cinq premières composantes principales des relevés de neige du mois de janvier. La variance totale expliquée par ces composantes est de 90%. A la figure 4.22 qui montre sous forme de graphique les résultats de l'analyse en composantes principales, on observe beaucoup de dispersion sauf pour les stations Nos 9 et 18. Le tableau 4.23 présentant les résultats de la rotation des cinq premiers axes principaux, dont on obtient les groupes suivants:

- A) 1, 4, 5, 7, 11, 13
- B) 3, 10, 23, 24
- C) 2, 6, 9, 18, 19
- D) 8, 17, 22
- E) 12, 14

Les ellipses de proximité correspondant à ces groupes sont tracées à la figure 4.23. La forme très allongée du groupe D, indique la nécessité de garder quelques stations pour ce groupe qui inclut des stations géographiquement très éloignées. Les autres ellipses se chevauchent légèrement, principalement celles des groupes A et C.

TABLEAU 4.22 Corrélation entre composantes et station;  
"RELEVÉ NEIGE JANVIER".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
621010	1	.875	-.167	-.249	-.148	-.084	.884
619030	2	.892	.134	.035	.341	.050	.933
619010	3	.844	-.194	-.346	.124	-.019	.885
621020	4	.868	-.329	-.016	-.215	-.167	.936
621030	5	.871	-.165	.228	-.087	-.229	.897
621040	6	.713	-.547	.188	.148	.297	.953
622020	7	.847	-.109	.018	-.131	-.348	.864
622090	8	.457	.771	.292	-.086	.008	.895
807010	9	.718	.004	.473	.274	.105	.828
619020	10	.905	.024	-.170	.125	.238	.921
616010	11	.807	-.430	-.050	.098	-.228	.900
621050	12	.774	.260	-.086	-.326	.283	.860
622010	13	.925	-.110	.083	-.037	-.021	.876
619050	14	.824	.077	-.023	-.434	.212	.918
622080	17	.661	.685	-.047	.209	-.163	.979
622040	18	.781	-.005	.459	-.180	.044	.855
622030	19	.907	.041	.320	.014	.032	.927
610010	22	.623	.532	-.355	-.129	-.135	.819
610020	23	.700	-.057	-.628	.038	.169	.917
610040	24	.728	.179	-.131	.449	-.013	.781
Valeurs propres		12.6	2.2	1.5	.946	.617	
Variance expliquée		63.1 %	10.9 %	7.3 %	4.7 %	3.1 %	
Variance totale expliquée		63.1 %	74.0 %	81.3 %	86.1 %	89.1 %	

TABLEAU 4.23 Corrélacion entre componentes et station après rotation;  
"RELEVÉ NEIGE JANVIER".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	-No 5
621010	1	<u>.655</u>	.548	.168	.155	.320
619030	2	.344	.504	<u>.592</u>	.453	.075
619010	3	.520	<u>.720</u>	.251	.124	.136
621020	4	<u>.806</u>	.339	.272	.034	.309
621030	5	<u>.766</u>	.163	.440	.221	.204
621040	6	.416	.370	<u>.712</u>	-.293	.224
622020	7	<u>.797</u>	.266	.225	.279	.168
622090	8	.007	-.122	.239	<u>.851</u>	.314
807010	9	.313	.090	<u>.797</u>	.277	.096
619020	10	.319	<u>.653</u>	.454	.280	.329
616010	11	<u>.757</u>	.439	.364	-.034	.006
621050	12	.256	.359	.215	.394	<u>.682</u>
622010	13	<u>.616</u>	.362	.468	.232	.303
619050	14	.438	.299	.227	.260	<u>.720</u>
622080	17	.159	.303	.207	<u>.904</u>	.043
622040	18	.520	-.039	<u>.580</u>	.262	.422
622030	19	.517	.185	<u>.630</u>	.362	.312
610010	22	.252	.416	-.118	<u>.701</u>	.277
610020	23	.262	<u>.872</u>	.017	.124	.269
610040	24	.227	<u>.571</u>	.433	.455	-.094

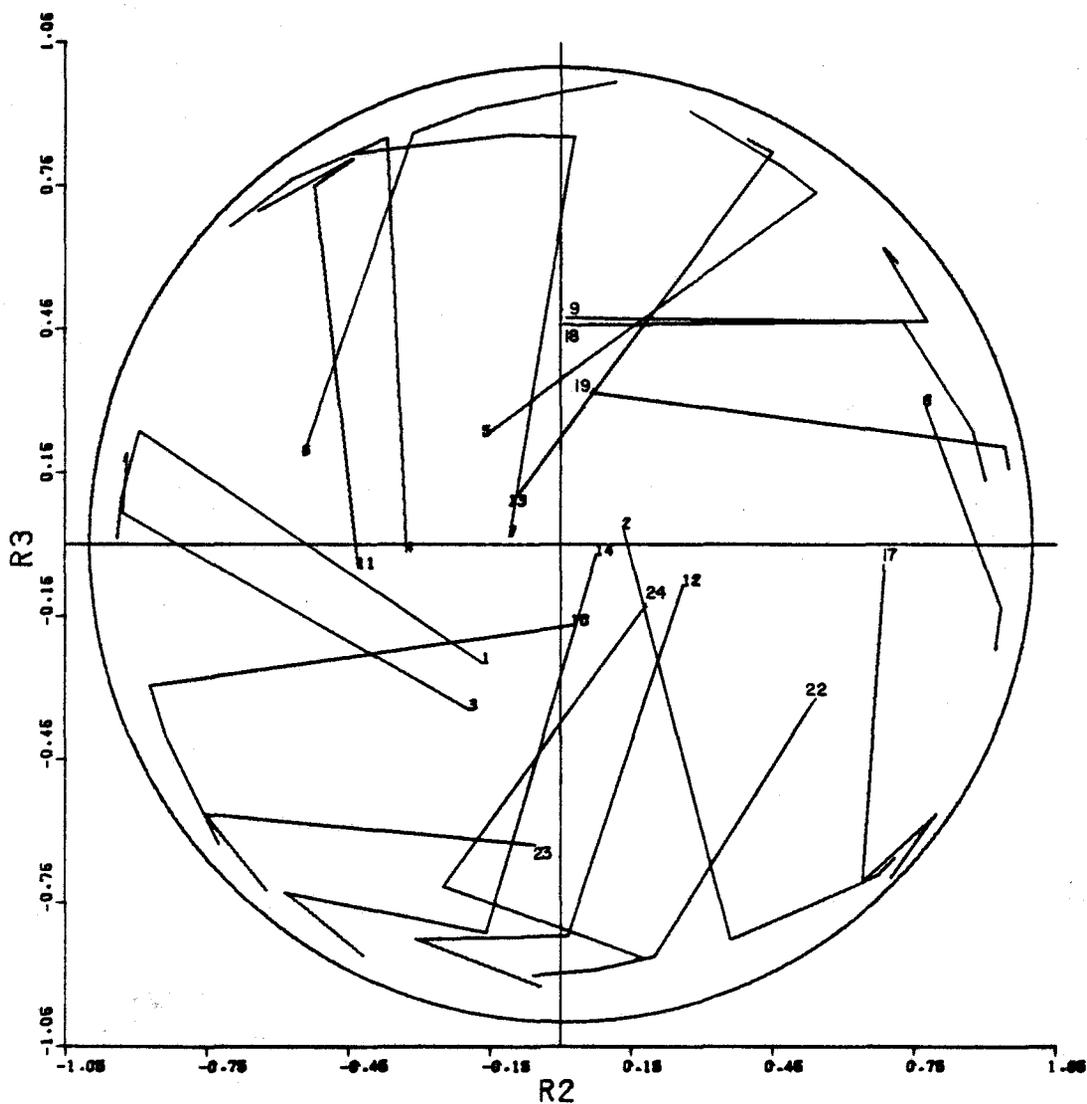


FIGURE 4.22 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "JANVIER".

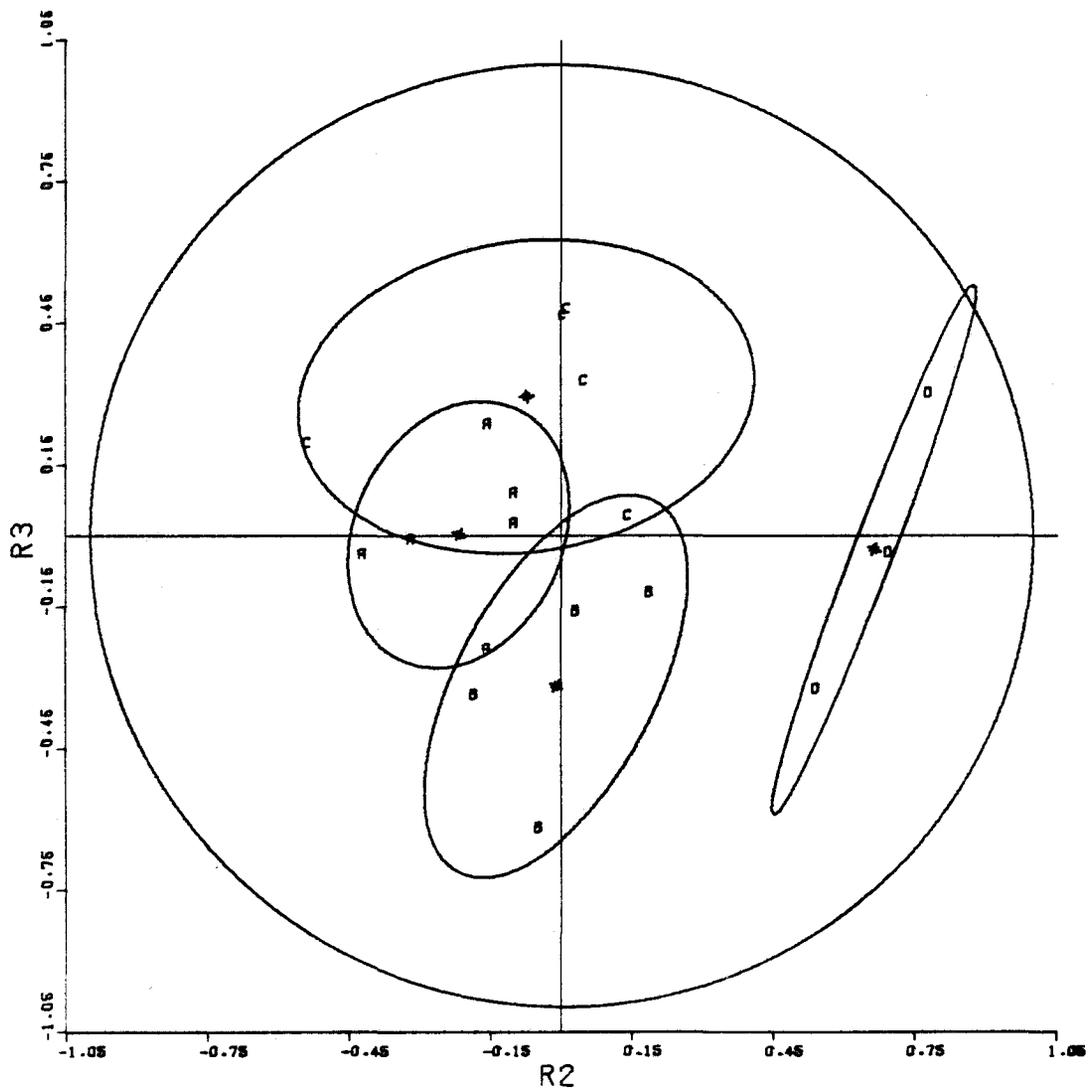


FIGURE 4.23 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE JANVIER".

### RELEVÉ DE NEIGE DU MOIS DE FEVRIER

Le tableau 4.24 et la figure 4.24 montrent les résultats de l'analyse en composantes principales des relevés de neige du mois de février pour les 20 stations retenues. Tout comme en "JANVIER" on observe une grande dispersion des stations. Le tableau 4.25 présente les résultats de la rotation des cinq premiers axes principaux.

Les groupes déterminés sont:

- A) 2, 8, 9, 17
- B) 4, 5, 6, 7, 10, 13, 18, 19
- C) 1, 12, 22, 23, 24
- D) 3, 11
- E) 16

Les ellipses de probabilité de 80% de ces groupes apparaissent à la figure 4.25. On constate que les stations Nos 10 et 13 sont situées à la limite du groupe B.

TABLEAU 4.24 Corrélation entre composantes et station;  
"RELEVÉ NEIGE FEVRIER".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
621010	1	.814	.378	-.019	.057	.272	.884
619030	2	.758	-.515	.269	-.093	-.153	.944
619010	3	.875	.202	.020	-.293	.188	.927
621020	4	.895	.063	-.156	-.045	.190	.868
621030	5	.889	-.213	-.241	-.184	-.074	.932
621040	6	.709	-.226	-.514	-.101	-.007	.828
622020	7	.801	-.062	-.055	.329	-.112	.769
622090	8	.603	-.457	.522	-.194	.165	.909
807010	9	.655	-.664	.161	.061	-.043	.902
619020	10	.908	-.152	.027	-.255	-.142	.933
616010	11	.653	.451	-.259	-.399	.110	.869
621050	12	.821	.083	.299	.016	-.260	.839
622010	13	.837	.202	-.228	.398	-.090	.960
622060	16	.665	-.133	-.092	.328	.569	.899
622080	17	.798	-.223	.373	.212	.047	.873
622040	18	.756	-.074	-.370	.107	-.172	.755
622030	19	.776	-.097	-.431	.007	-.208	.841
610010	22	.739	.386	.374	-.050	.145	.859
610020	23	.503	.602	.291	.089	-.256	.774
610040	24	.667	.560	.269	.049	-.161	.859
Valeurs propres		11.7	2.4	1.7	.853	.835	
Variance expliquée		58.3 %	11.9 %	8.5 %	4.3 %	4.2 %	
Variance totale expliquée		58.3 %	70.2 %	78.7 %	82.9 %	87.1 %	

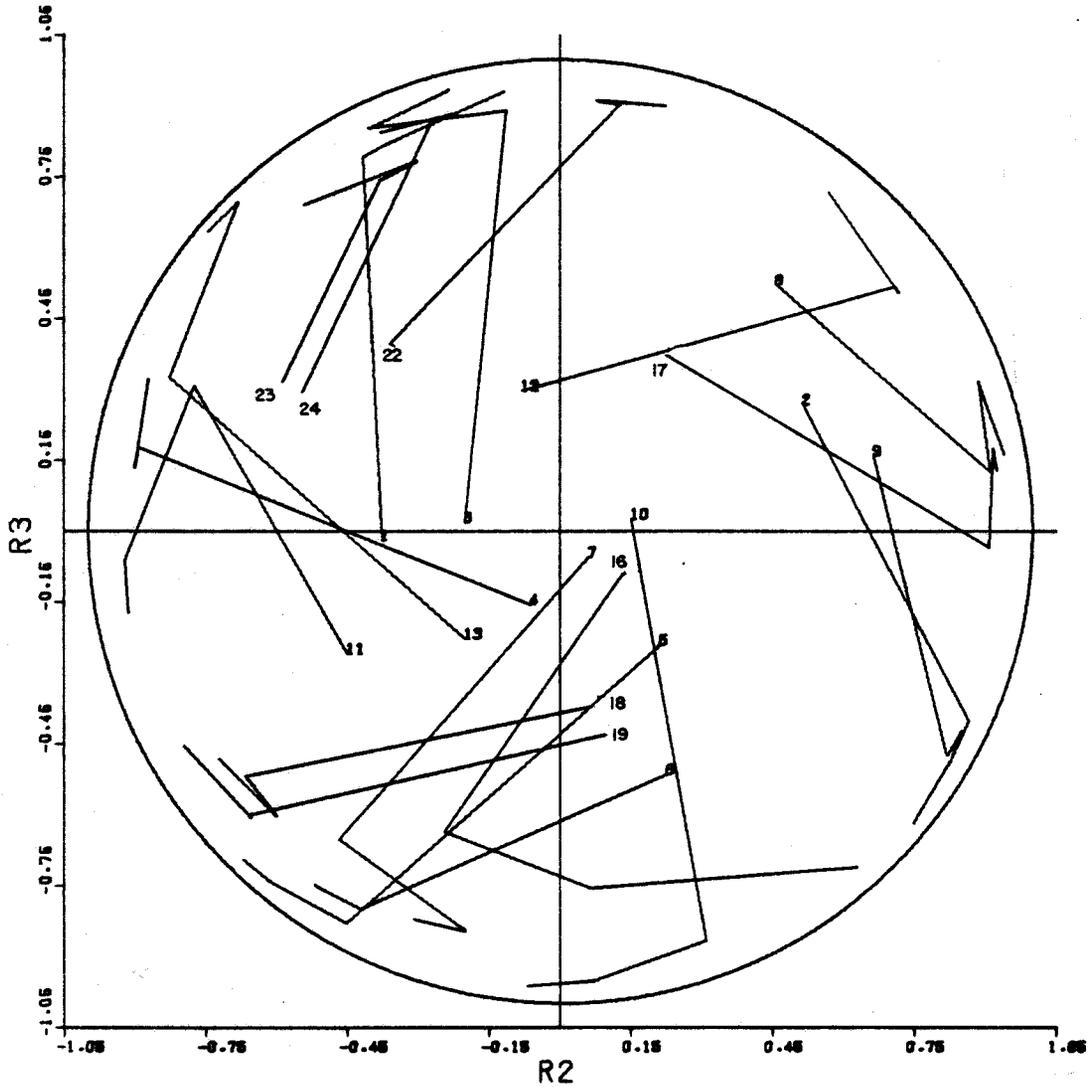


FIGURE 4.24 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "FEVRIER".

TABLEAU 4.25 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
"RELEVÉ NEIGE FEVRIER".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
621010	1	.124	.341	<u>.571</u>	.432	.489
619030	2	<u>.876</u>	.386	.148	.068	.032
619010	3	.347	.362	.453	<u>.640</u>	.247
621020	4	.312	<u>.552</u>	.339	.440	.396
621030	5	.471	<u>.728</u>	.161	.377	.113
621040	6	.225	<u>.801</u>	-.054	.322	.172
622020	7	.355	<u>.603</u>	.408	-.062	.328
622090	8	<u>.908</u>	-.017	.110	.207	.169
807010	9	<u>.836</u>	.405	-.052	-.064	.176
619020	10	.503	<u>.557</u>	.332	.386	.013
616010	11	<u>-.061</u>	.399	.403	<u>.733</u>	.080
621050	12	.520	.356	<u>.653</u>	.116	.031
622010	13	.093	<u>.703</u>	.542	.004	.405
622060	16	.294	.319	.083	.165	<u>.823</u>
622080	17	<u>.710</u>	.258	.412	-.015	.364
622040	18	.201	<u>.789</u>	.221	.122	.164
622030	19	.210	<u>.847</u>	.181	.196	.090
610010	22	.320	.053	<u>.725</u>	.380	.288
610020	23	.009	.098	<u>.868</u>	.101	-.014
610040	24	<u>.107</u>	.177	<u>.873</u>	.216	.088

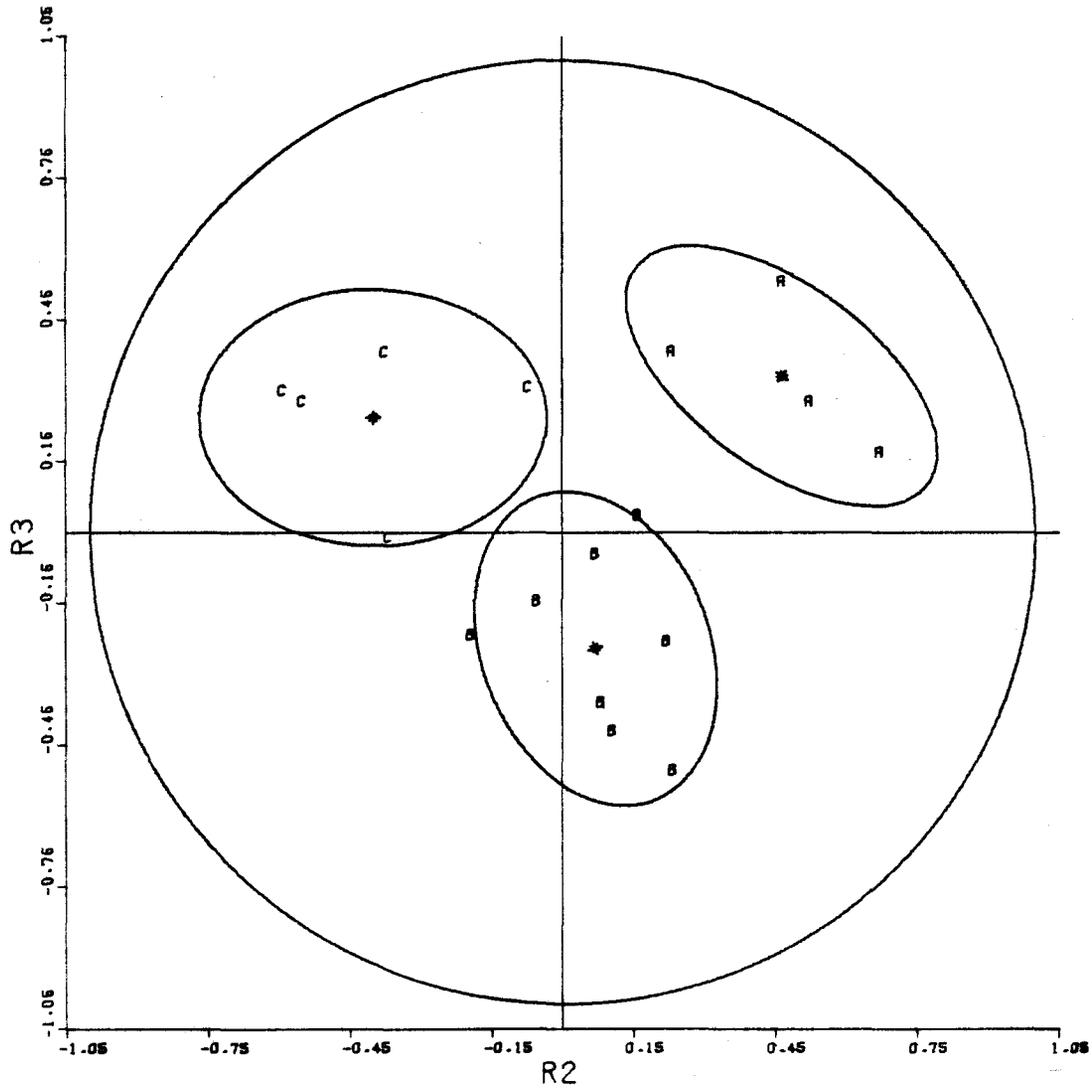


FIGURE 4.25 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE FEVRIER".

### RELEVÉ DE NEIGE DU MOIS DE MARS

Le tableau 4.26 et la figure 4.26 présentent les résultats de l'analyse en composantes principales des relevés de neige du mois de mars pour les 21 stations retenues. Contrairement aux mois de "JANVIER" et de "FEVRIER", quelques stations ont des comportements relativement semblables.

D'après le tableau 4.27 on obtient les groupes suivants:

- A) 2, 10, 11, 22, 23
- B) 1, 3, 4, 5, 7, 13, 19
- C) 8, 9, 12, 14, 16
- D) 15, 17, 24
- E) 18

Les ellipses tracées avec ces groupes apparaissent à la figure 4.27. Celles des groupes A et D se superposent dû au fait que l'ellipse D est très grande. Les trois stations du groupe D sont très éloignées l'une de l'autre, deux d'entre elles étant situées au nord du bassin et l'autre au sud. L'étude du graphique 4.26 montre que ces trois stations (Nos 15, 17 et 24) ont un comportement relativement semblable au niveau de la 4<sup>e</sup> composante seulement.

TABLEAU 4.26 Corrélacion entre composantes et station;  
"RELEVÉ NEIGE MARS".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES					COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	
621010	1	.906	-.137	-.113	-.092	-.123	.876
619030	2	.713	-.045	.378	-.404	.101	.827
619010	3	.882	-.106	-.159	-.278	-.148	.913
621020	4	.900	.006	-.219	-.138	-.149	.899
621030	5	.856	.203	-.102	-.287	-.036	.868
622020	7	.804	.287	-.260	.184	-.153	.854
622090	8	.664	.557	.142	.268	.273	.918
807010	9	.697	.227	.377	-.092	.172	.717
619020	10	.795	-.018	.184	-.372	.067	.809
616010	11	.760	-.274	-.003	-.324	-.073	.763
621050	12	.792	.283	.333	.143	-.297	.927
622010	13	.768	.036	-.351	-.007	-.267	.785
619050	14	.795	.239	.326	.325	-.260	.969
621060	15	.731	-.261	.384	.410	-.009	.918
622060	16	.454	.673	.081	-.021	.120	.680
622080	17	.866	-.121	-.078	.293	.212	.900
622040	18	.681	.070	-.508	.198	.394	.921
622030	19	.844	-.003	-.485	.128	.038	.965
610010	22	.710	-.377	.142	-.072	.359	.801
610020	23	.727	-.557	.107	-.063	.092	.863
610040	24	.438	-.660	.086	.478	-.109	.875
Valeurs propres		12.2	2.2	1.5	1.4	.800	
Variance expliquée		58.0 %	10.3 %	7.3 %	6.6 %	3.8 %	
Variance totale expliquée		58.0 %	68.3 %	75.6 %	82.1 %	86.0 %	

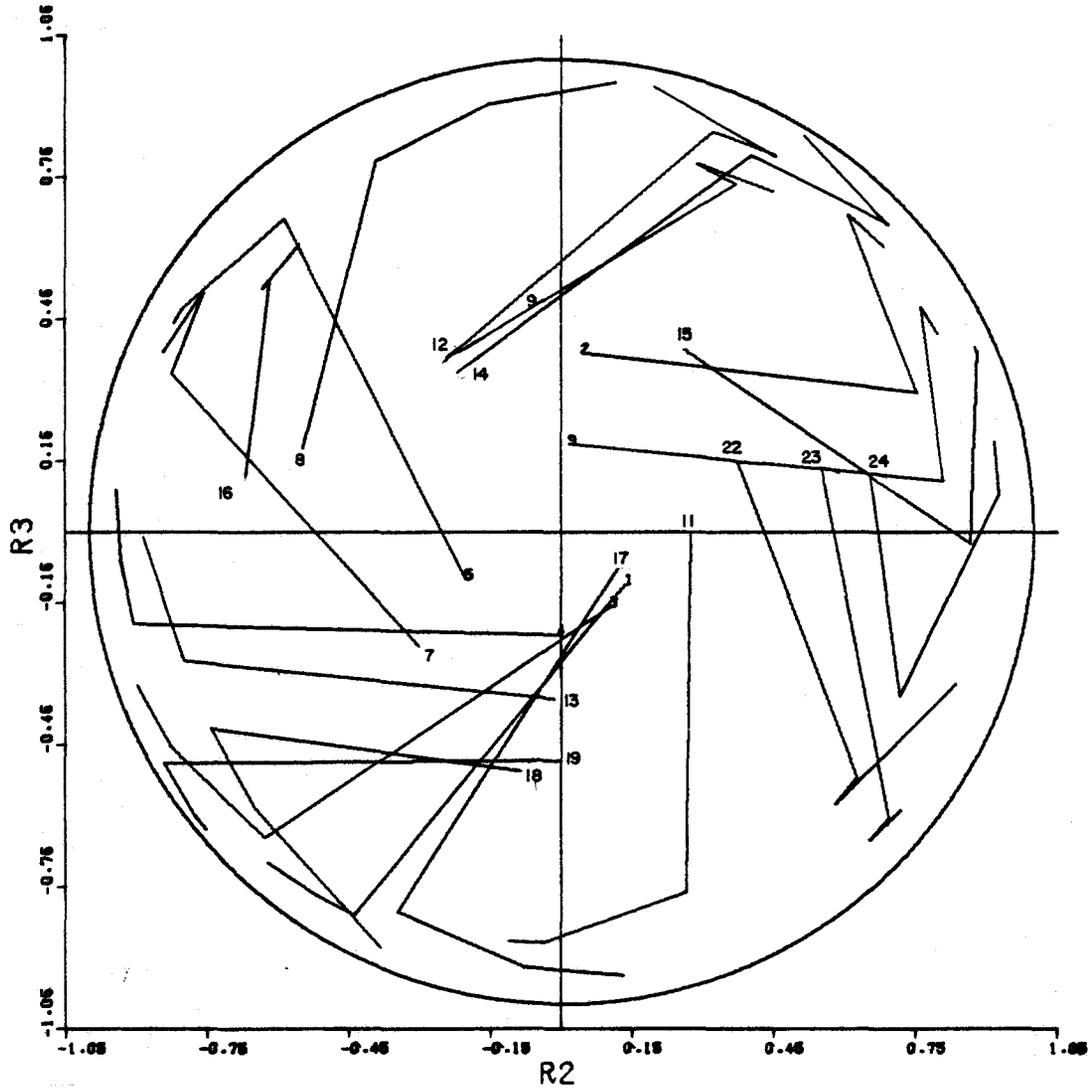


FIGURE 4.26 Représentation dans le plan des projections des coefficients de corrélation entre les stations et les cinq premiers axes principaux pour les précipitations mesurées à chaque station des relevés de neige de "MARS".

TABLEAU 4.27 Corrélation entre composantes et station après rotation;  
"RELEVÉ NEIGE MARS".

IDENTIFICATION DE LA STATION	No	COMPOSANTES				
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
621010	1	.504	<u>.673</u>	.227	.317	.133
619030	2	<u>.823</u>	.170	.330	.105	-.022
619010	3	.584	<u>.716</u>	.163	.162	.085
621020	4	.446	<u>.759</u>	.268	.170	.149
621030	5	<b>.540</b>	<u>.627</u>	.400	-.044	.145
622020	7	<b>.087</b>	<u>.719</u>	.509	.156	.218
622090	8	<b>.197</b>	.181	<u>.850</u>	.055	.375
807010	9	.548	.114	<u>.615</u>	.119	.108
619020	10	<u>.757</u>	.356	.312	.086	.064
616010	11	<u>.674</u>	.503	.041	.230	.036
621050	12	<b>.293</b>	.412	<u>.737</u>	.306	-.186
622010	13	.203	<u>.812</u>	.211	.168	.112
619050	14	.192	.383	<u>.758</u>	.445	-.110
621060	15	.323	.152	.423	<u>.778</u>	.073
622060	16	.127	.199	<u>.724</u>	-.272	.163
622080	17	.318	.432	.359	<u>.510</u>	.473
622040	18	.117	.521	.209	.129	<u>.759</u>
622030	19	.190	<u>.779</u>	.208	.233	.474
610010	22	<u>.669</u>	.145	.093	.430	.374
610020	23	<u>.642</u>	.298	-.050	.574	.174
610040	24	<b>.099</b>	.186	-.107	<u>.902</u>	.075

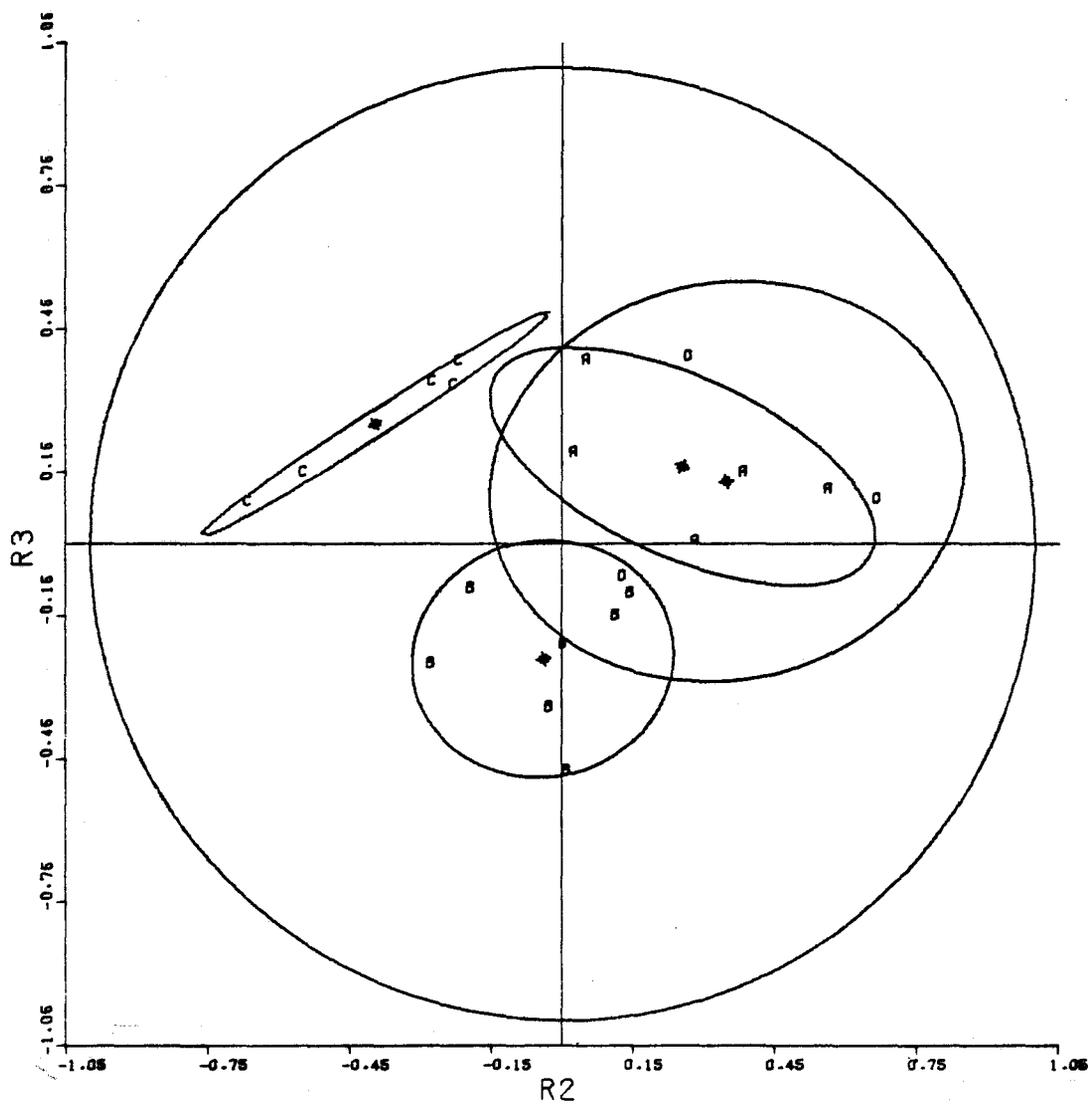


FIGURE 4.27 Ellipses de proximité à 80% établies d'après les coefficients de corrélation entre les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes principales pour les groupes établis par la méthode varimax; "RELEVÉ NEIGE MARS".

### 4.3 CONCLUSION

Tout au long de ce chapitre portant sur l'analyse des diverses séries chronologiques observées aux stations par la méthode des composantes principales, chacune des périodes retenues (tableau 4.3) a été étudiée de façon relativement indépendante sans vraiment insister sur les caractéristiques communes aux diverses périodes. Il est cependant important de faire ressortir par une analyse de l'ensemble des résultats, les ressemblances et les différences entre les périodes. Ainsi, les ellipses de proximité tracées pour les précipitations cumulées par période de 15 jours pour chaque saison (figures 4.15, 4.17, 4.19 et 4.21) sont de plus faibles dimensions que celles des précipitations de la saison complète (figures 4.7, 4.9, 4.11 et 4.13). Cette constatation porte à conclure que les groupes sont plus homogènes et redondants pour les périodes de faible durée. Cette interprétation doit être atténuée en prenant en considération que la définition des saisons a été la même pour toutes les stations du bassin versant.

Compte tenu de la dimension de la région couverte par l'étude, il est probable que quelques stations au nord sont dans une saison donnée tandis que les stations du sud sont déjà dans la saison suivante. Par exemple, on peut penser qu'à la fin de la période "HIVER", telle que définie pour l'étude, c'est déjà le printemps dans le sud. Ce mélange possible des précipitations de deux saisons peut avoir pour effet d'augmenter l'hétérogénéité des observations et donc les dimensions des ellipses de proximité.

Un autre point à considérer est le nombre d'observations qui ont servi aux calculs. Dans le cas des précipitations annuelles et saisonnières, on a utilisé 10 observations seulement ce qui est très peu pour le calcul de coefficients de corrélation. Pour les précipitations par période de 15 jours, on avait 60 ou 70 observations selon les saisons. Même si la variance des précipitations de 15 jours est plus importante que celle des précipitations saisonnières, l'intervalle de confiance des coefficients de corrélation est plus faible pour les précipitations de 15 jours. Ceci revient à dire que les variations observées entre les précipitations saisonnières et les précipitations par 15 jours proviennent peut-être du manque de précision dans le calcul de la matrice des coefficients de corrélation que l'on utilise pour l'analyse en composantes principales.

Pour compléter cette étude à l'aide des composantes principales, il est intéressant d'étudier l'évolution des groupes obtenus pour chacune des périodes telles que déterminées après rotation des axes principaux par la méthode varimax, sans tenir compte des restrictions apparues en étudiant les ellipses de proximité de chaque groupe. Pour la période "ANNUELLE" (figure 4.28) les groupes sont bien définis géographiquement, sauf le groupe C qui inclut les stations Nos 2 et 17. Notons immédiatement que les courbes qui délimitent les différents groupes dans les figures 4.28 à 4.39 ne sont pas représentatives de la superficie qui pourrait être couverte par tel ou tel groupe. Ainsi, à la figure 4.28 on ne peut avoir d'idée précise sur l'étendue spatiale du groupe C autour de la station No 2.

Dans le cas des précipitations saisonnières (figures 4.29 à 4.32), on constate que les groupes des périodes "HIVER" et "AUTOMNE" sont très mal définis géographiquement alors que les périodes "PRINTEMPS" et "ETE" le sont par contre assez bien. On observe cependant des variations d'une saison à l'autre pour quelques stations. Il est bon de rappeler que le manque de précision sur l'estimation des coefficients de corrélation associé aux différences climatiques des stations, particulièrement importantes en automne et en hiver, peuvent être la cause des dispersions observées.

Les figures 4.33 à 4.36 montrent les précipitations des quatre saisons cumulées par 15 jours. Dans tous les cas, on observe une bonne distribution géographique; c'est-à-dire que les groupes ne contiennent pas de stations distribuées de part et d'autre du bassin. On déduit également que les stations Nos 4, 6, 14 et 15 appartiennent toujours au même groupe. Les stations Nos 18 et 19 sont également toujours groupées et la station No 17 se joint à ces deux stations trois fois sur quatre. Les stations Nos 1, 10, 12 et 13 forment également un groupe pour les quatre saisons; la station No 5 se joint toujours à ce groupe sauf en automne. Les résultats obtenus pour les précipitations de 15 jours semblent plus cohérents que les résultats découlant des précipitations saisonnières.

Les figures 4.37, 4.38 et 4.39 montrent la répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour "JANVIER", "FEVRIER" et "MARS". Dans l'ensemble, les groupes présentent beaucoup de variation

d'un mois à l'autre et les stations d'un même groupe sont quelquefois très dispersées sur le bassin versant. Par exemple, pour les relevés de neige du mois de mars, on voit sur la figure 4.39 que la station No 24 se joint aux stations Nos 15 et 17 situées au nord du bassin versant. Les stations Nos 4, 5, 7 et 13 sont groupées pour les trois mois. Enfin, il est intéressant de noter le nombre de fois qu'une station donnée se regroupe avec une autre station pour l'ensemble des périodes étudiées. Les tableaux 4.28 à 4.68 présentent ces résultats pour les 19 stations météorologiques ainsi que pour les 24 stations nivométriques retenues pour l'étude.

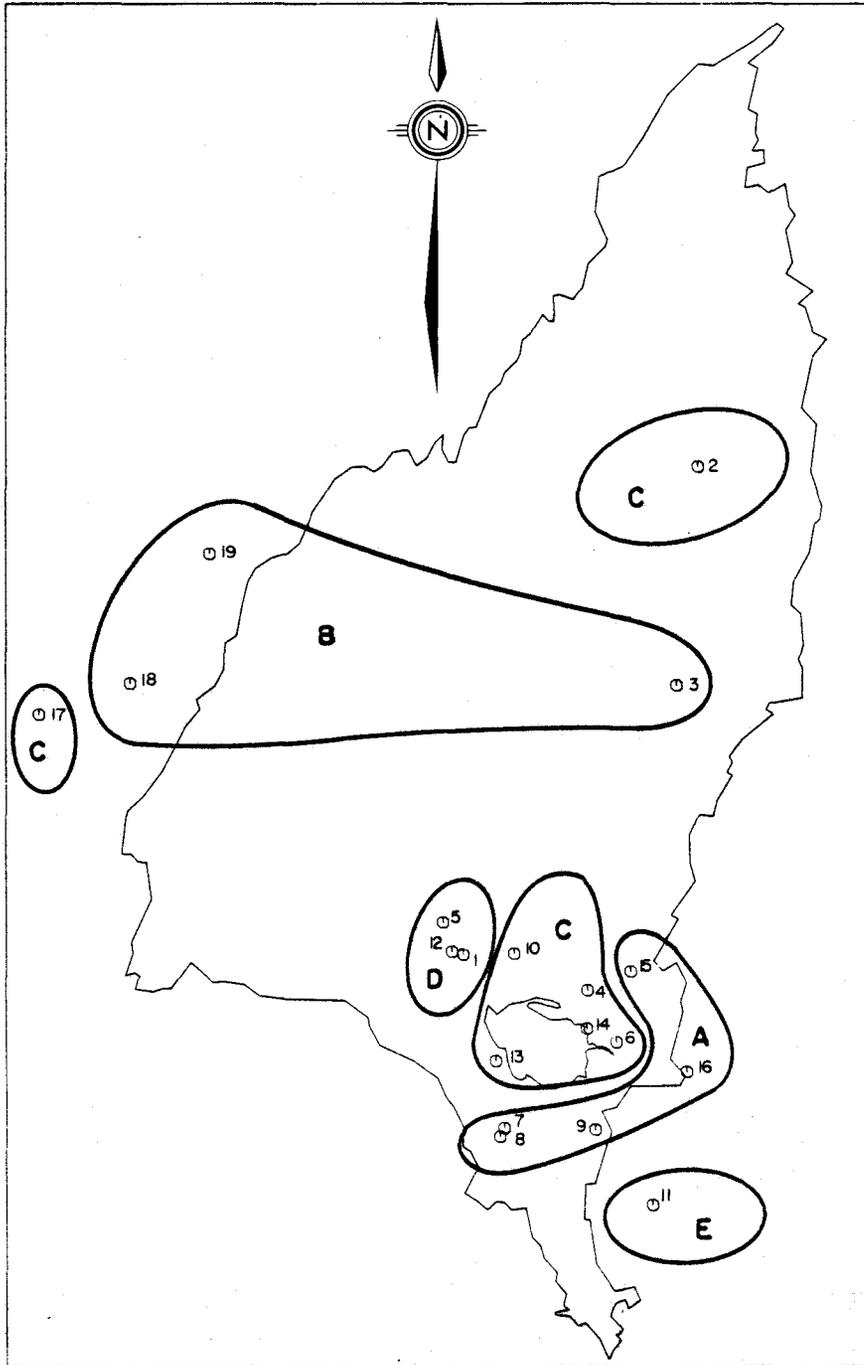


FIGURE 4.28 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ANNUELLE".

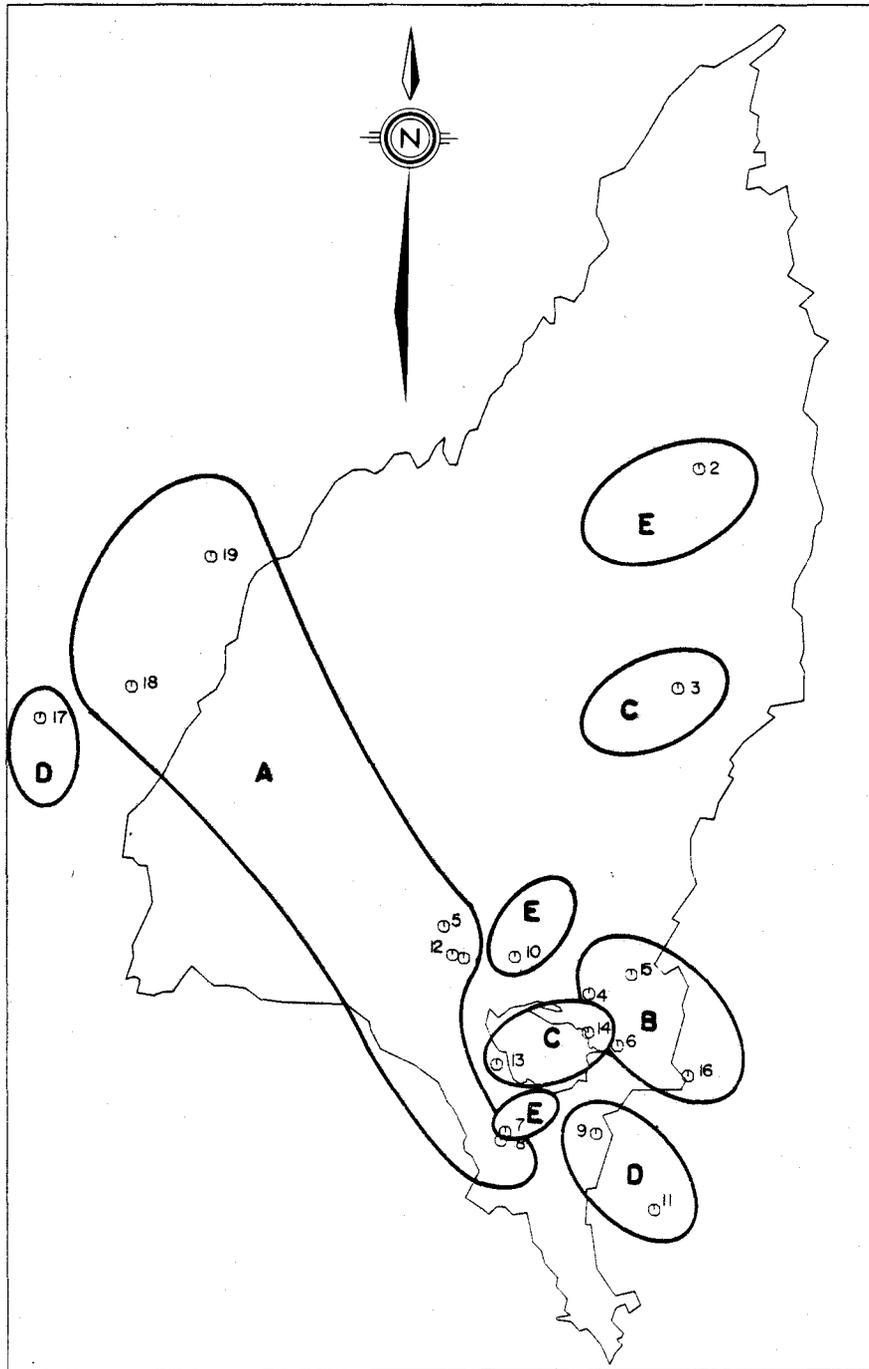


FIGURE 4.29 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "HIVER".

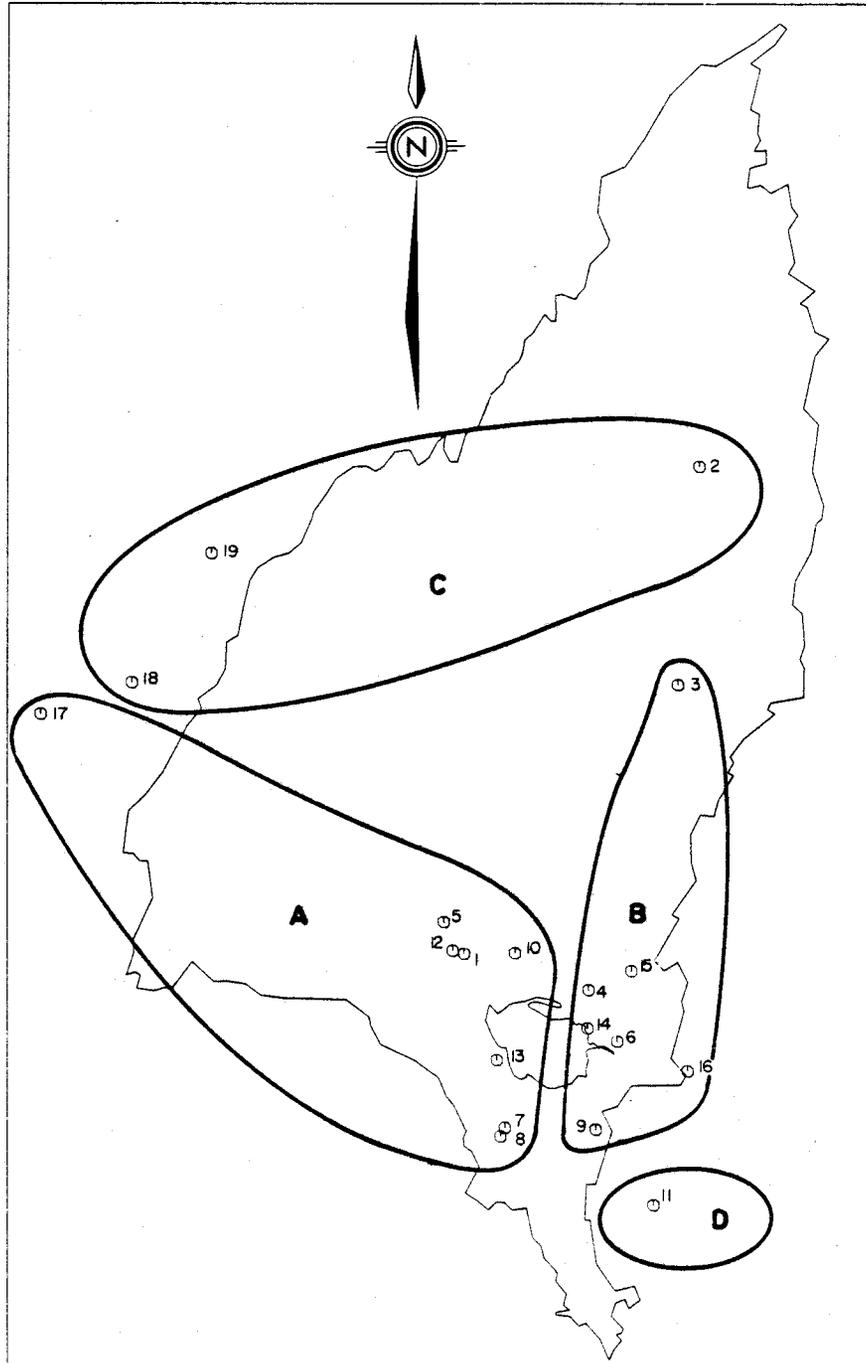


FIGURE 4.30 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "PRINTEMPS".

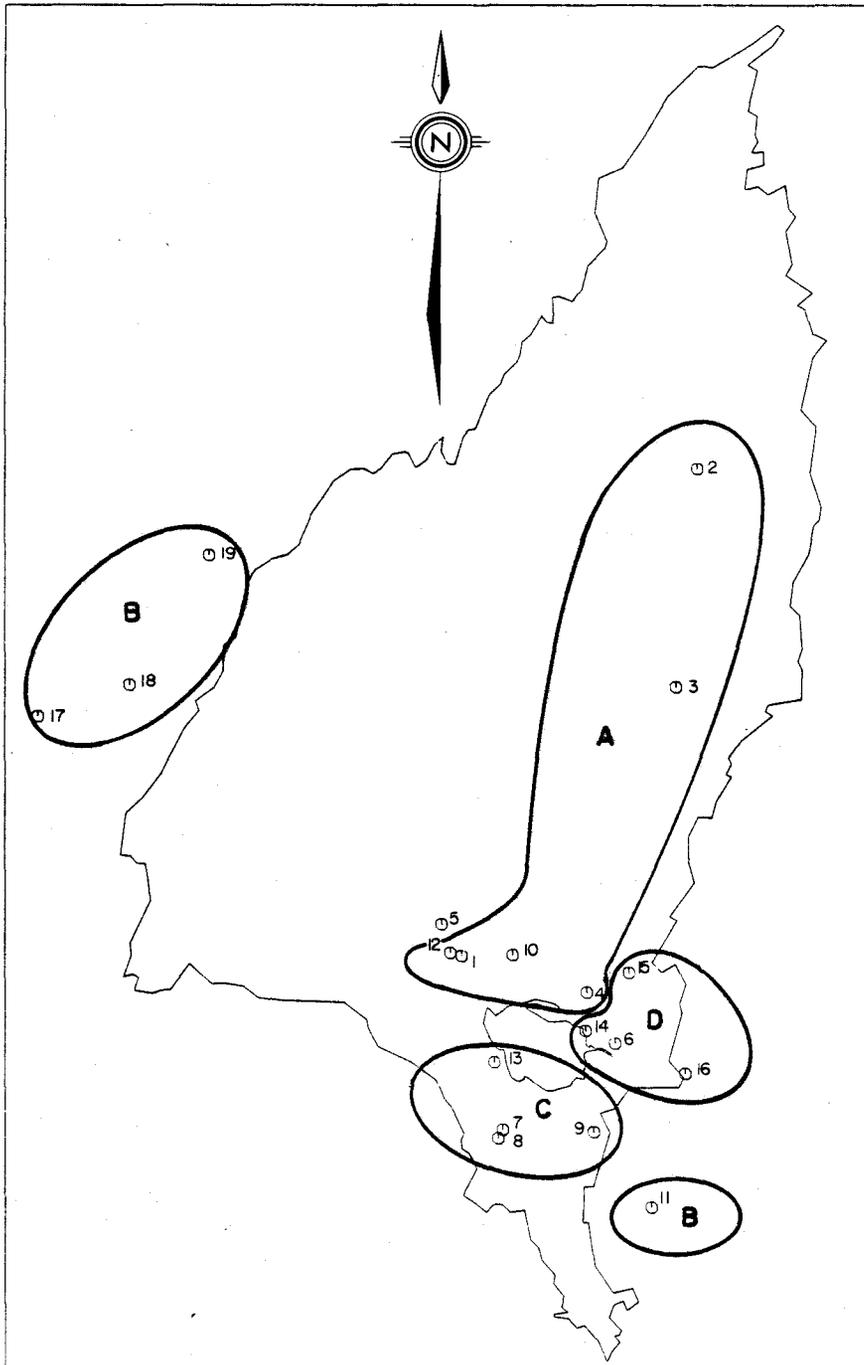


FIGURE 4.31 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ETE".

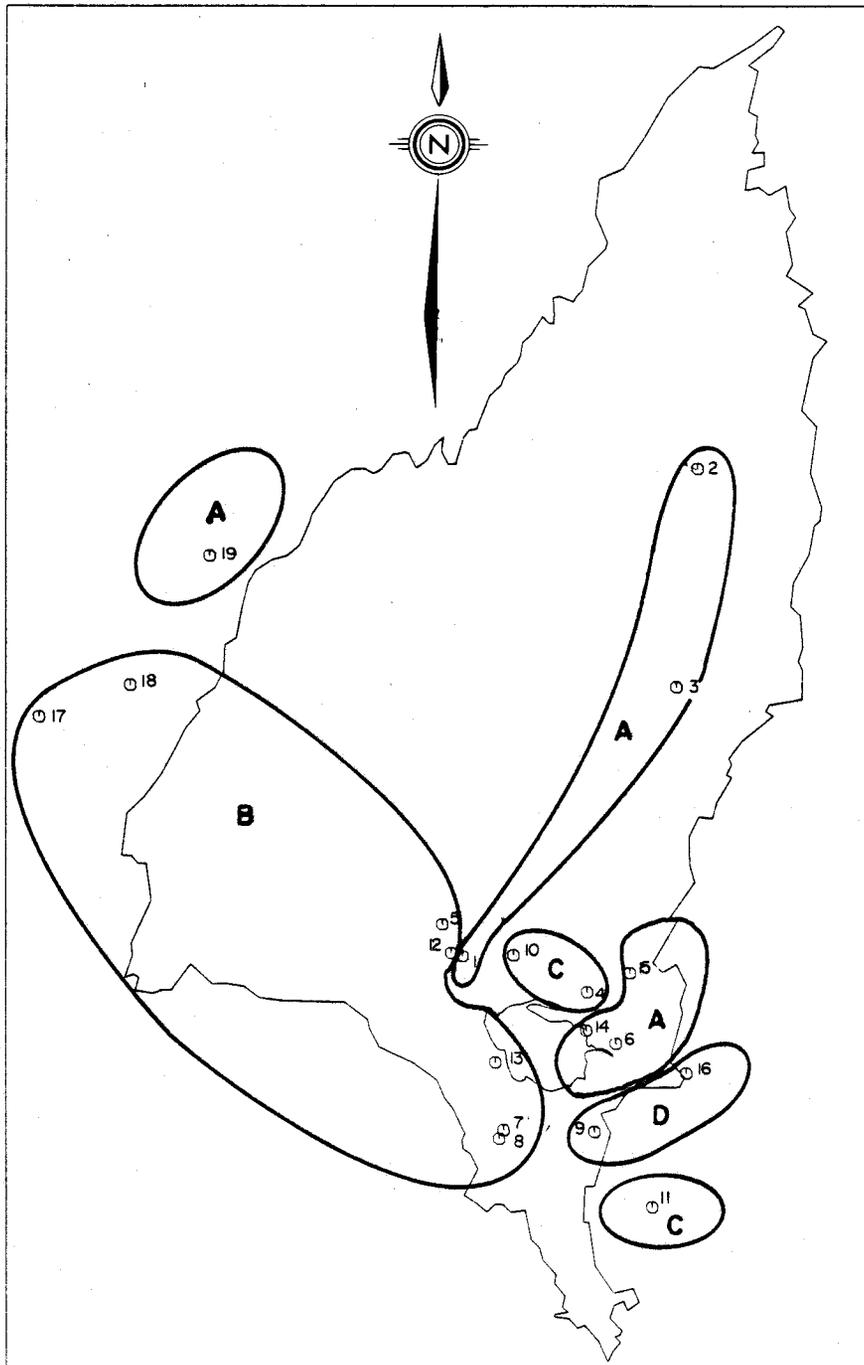


FIGURE 4.32 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "AUTOMNE".

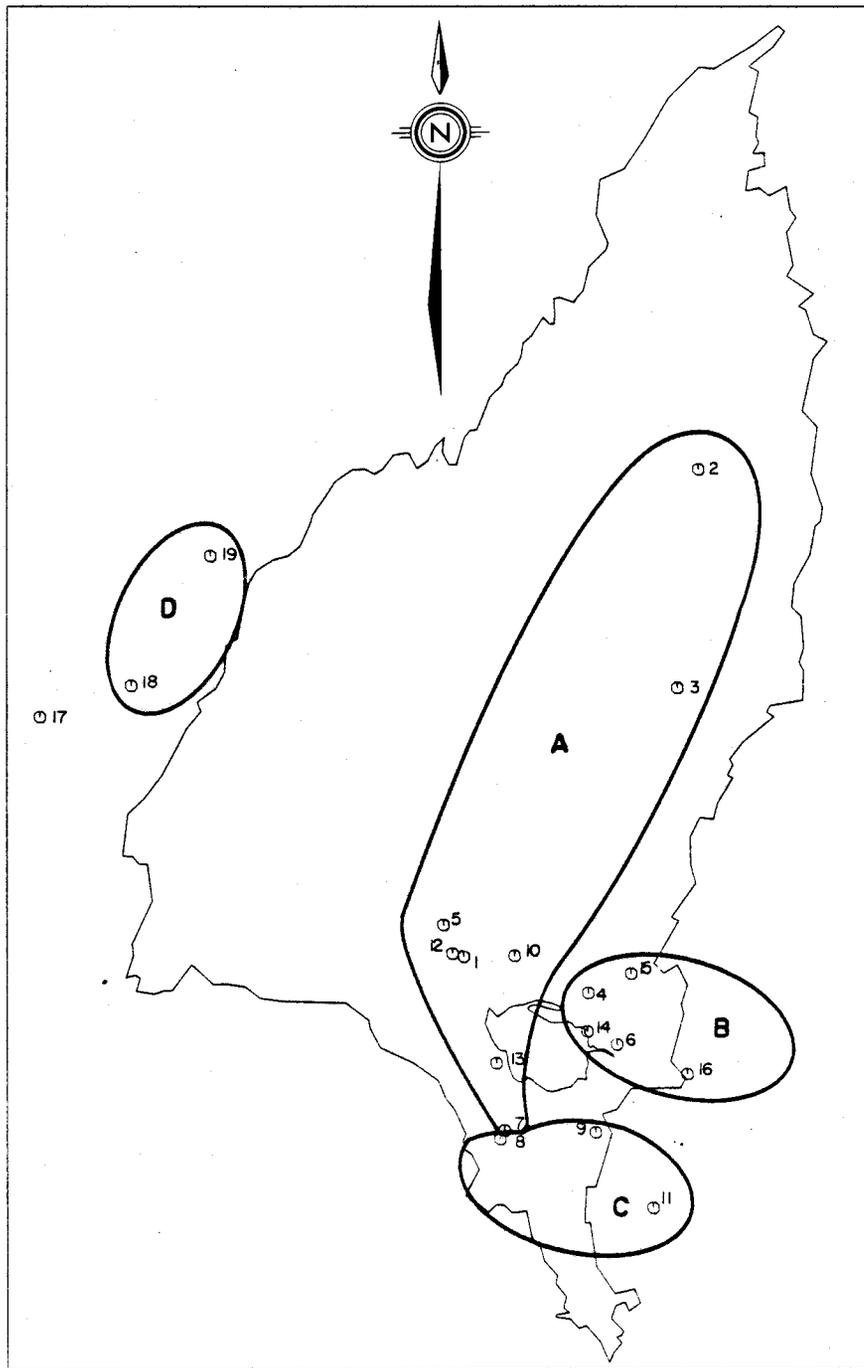


FIGURE 4.33 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "HIVER/15 jours".

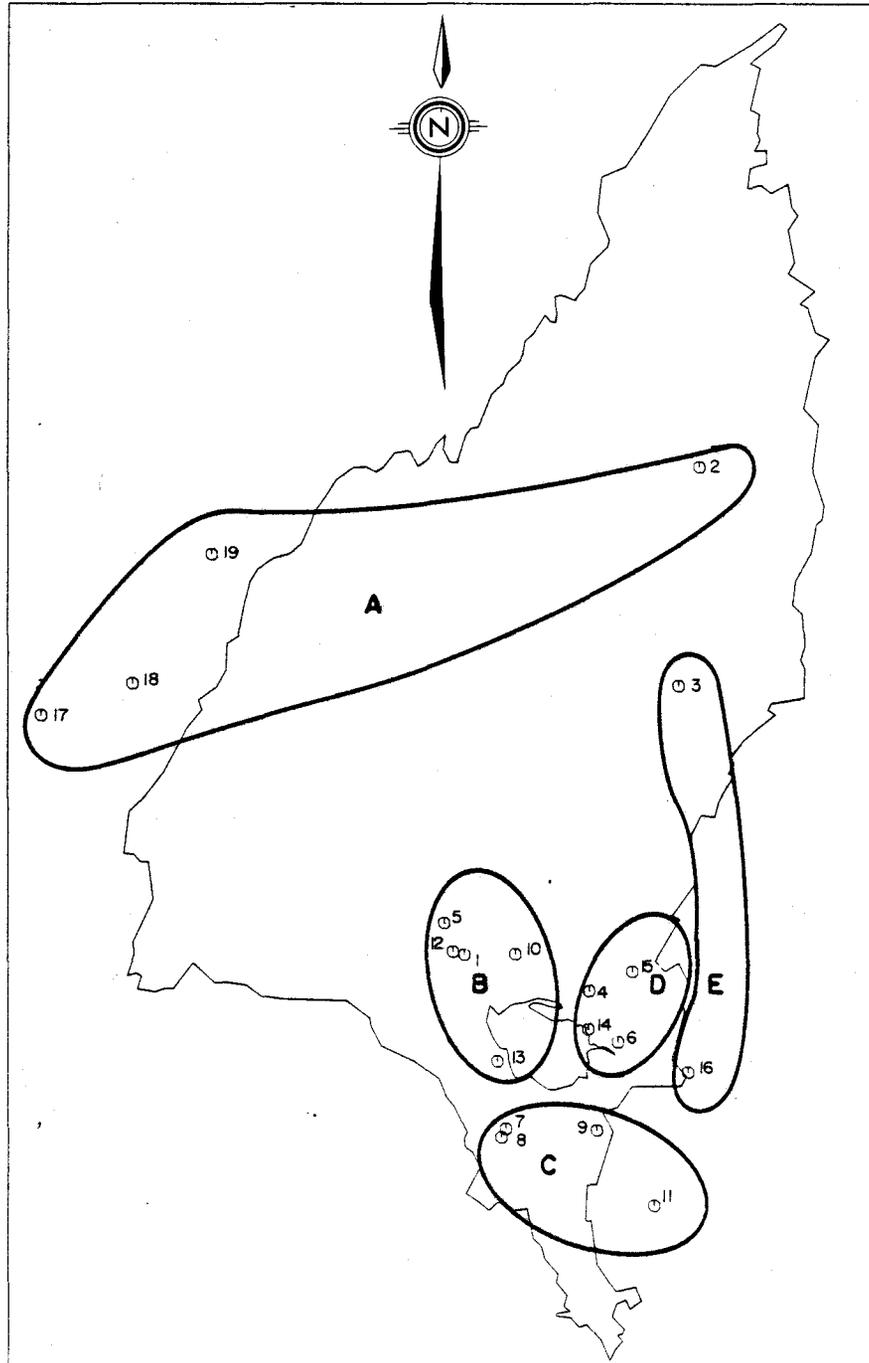


FIGURE 4.34 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "PRINTEMPS/15 jours".

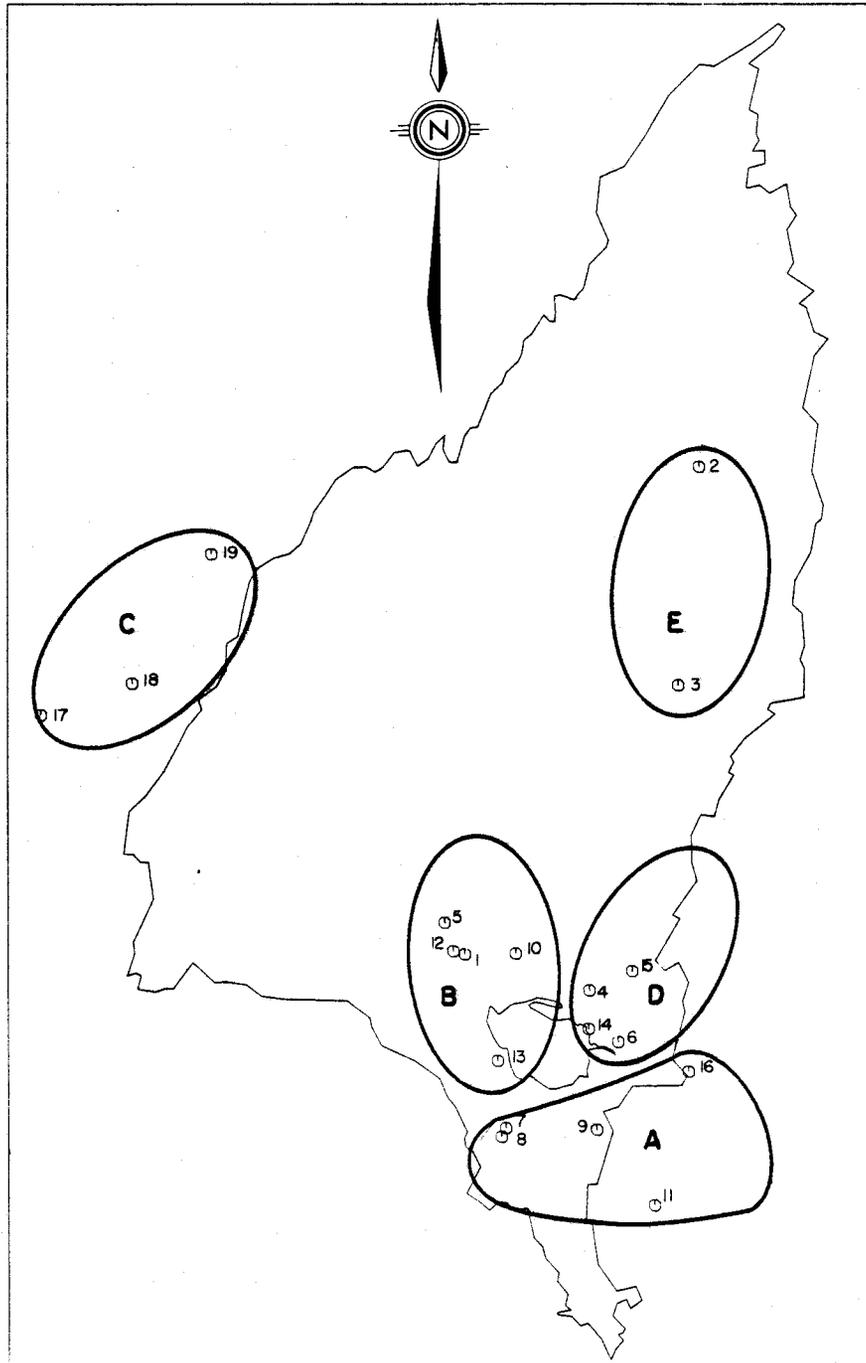


FIGURE 4.35 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "ETE/15 jours".

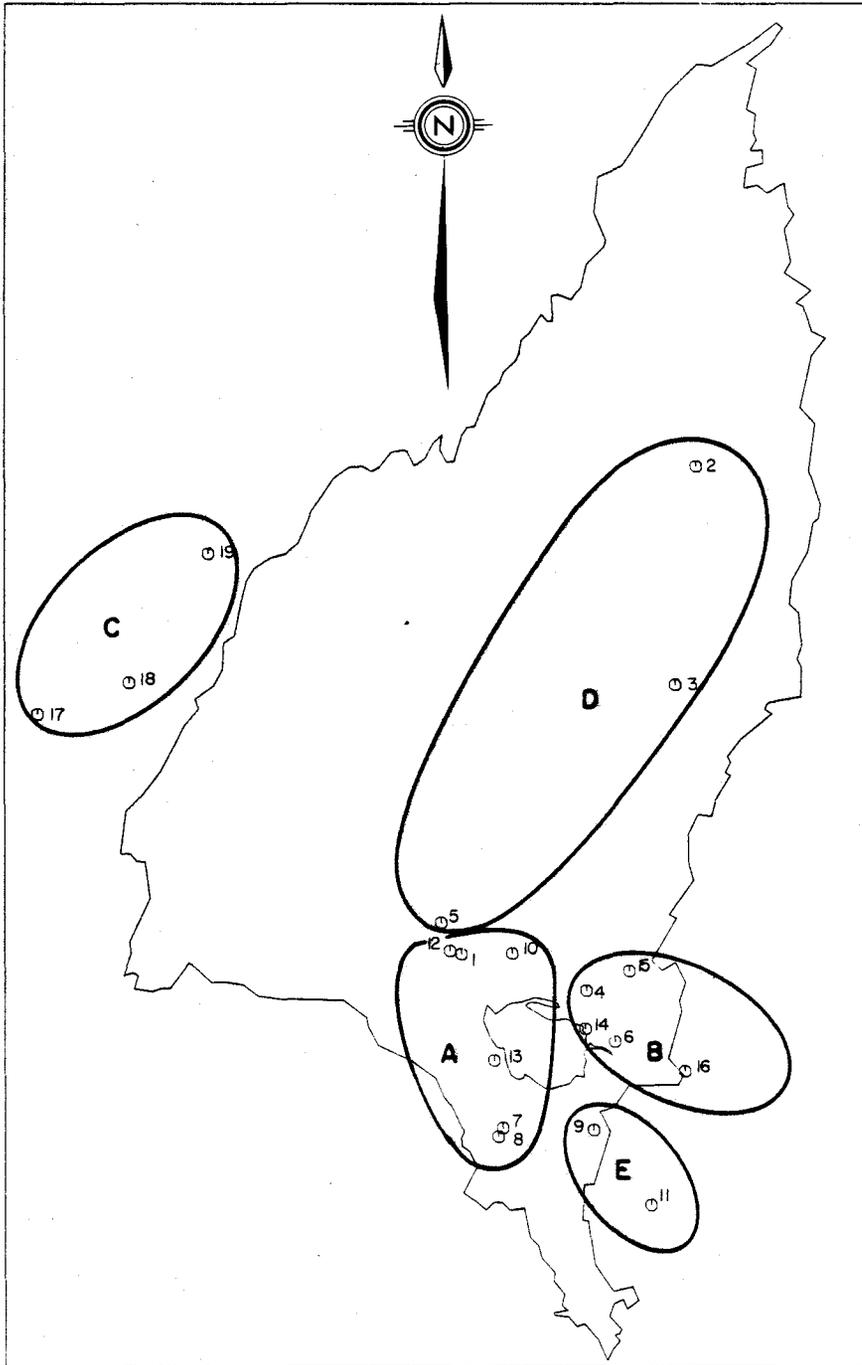


FIGURE 4.36 Répartition géographique des groupes de stations météorologiques pour la période "AUTOMNE/15 jours".

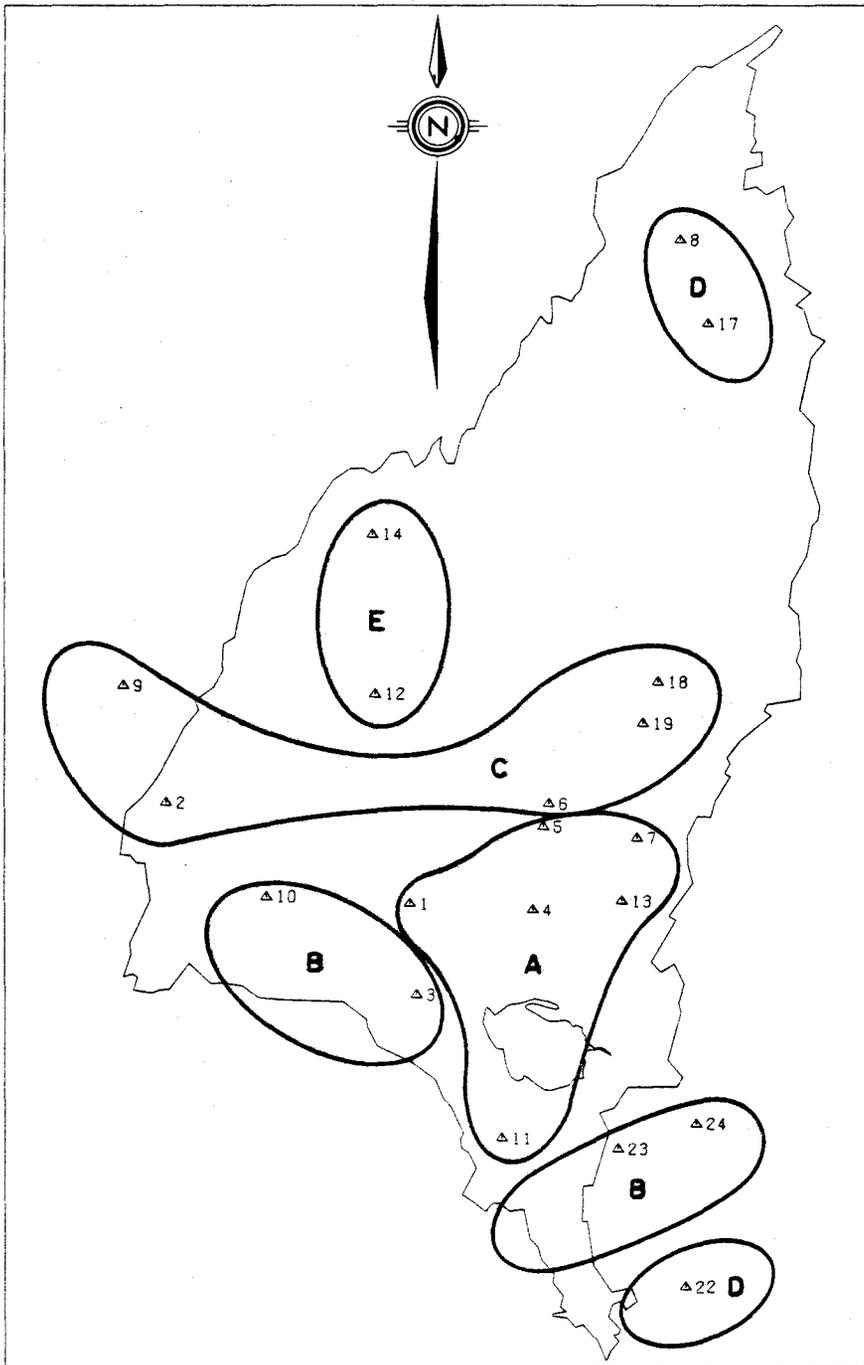


FIGURE 4.37 Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "JANVIER".

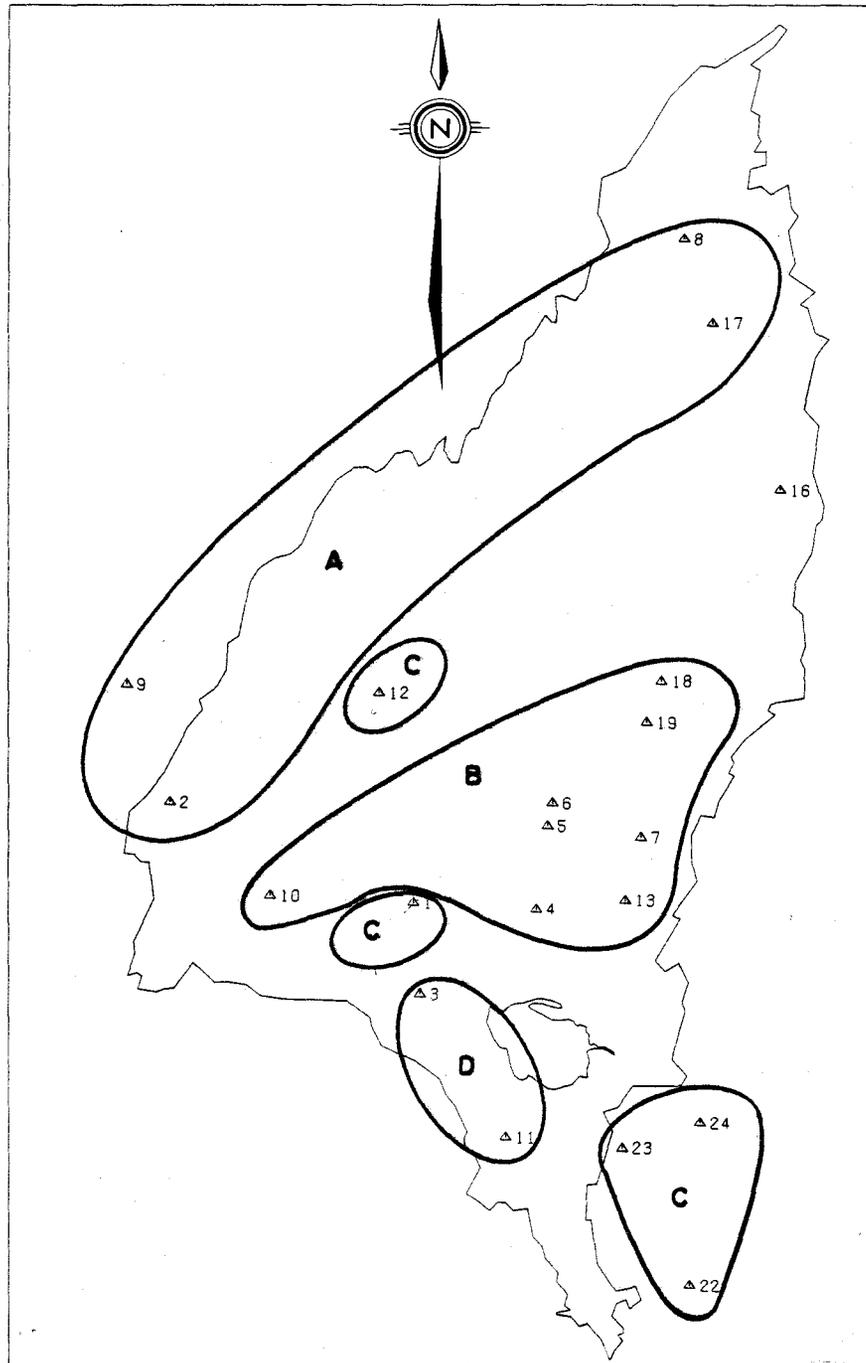


FIGURE 4.38 Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "FEVRIER".

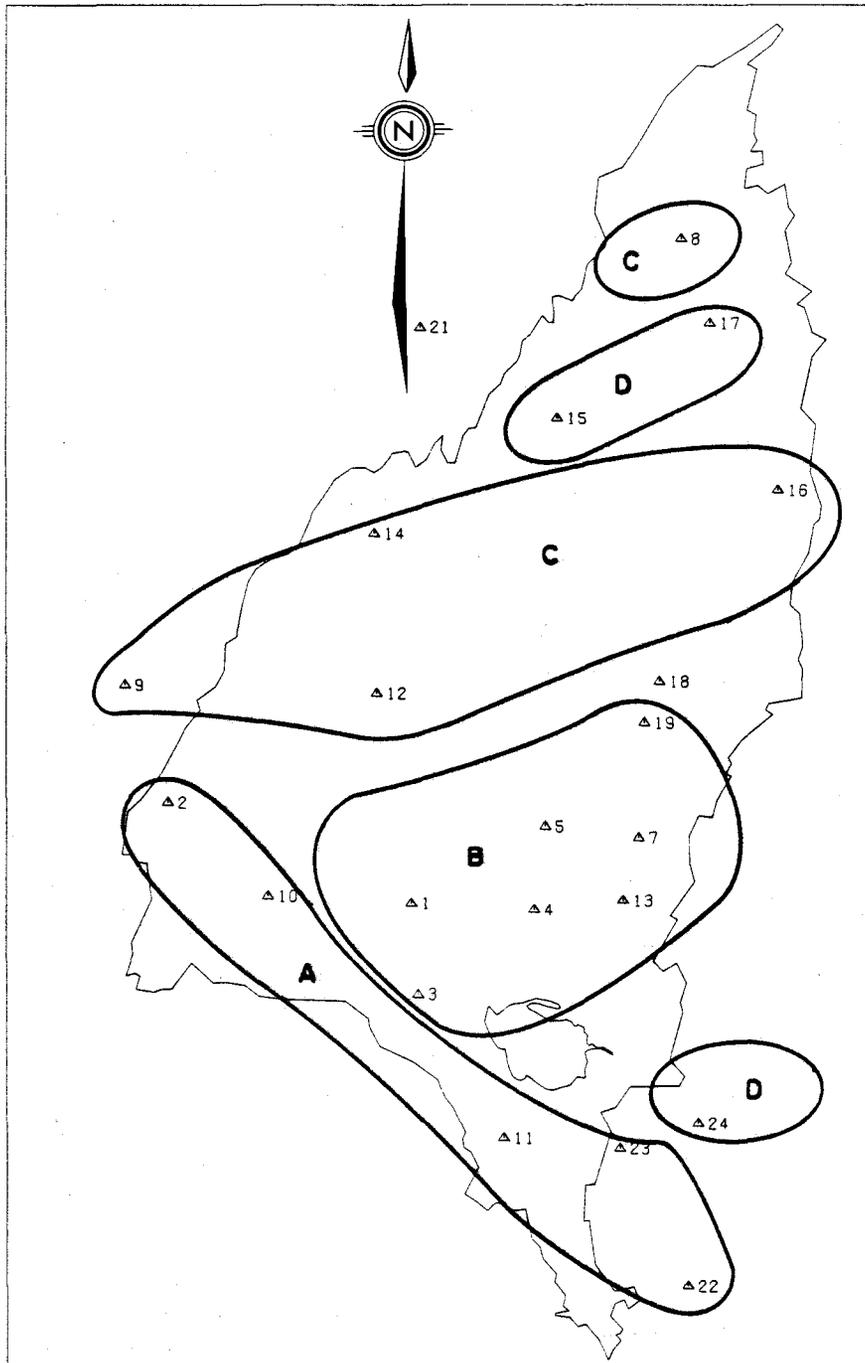


FIGURE 4.39 Répartition géographique des groupes de stations de relevés de neige pour la période "MARS".

TABLEAU 4.28 Regroupement de la station 1 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle				x							x								
Hiver, 1 période				x		x					x						x	x	
Printemps, 1 période				x	x	x			x		x	x				x			
Eté, 1 période	x	x	x						x		x								
Automne, 1 période	x	x			x								x	x				x	
Hiver/15 jours	x	x			x	x			x		x	x							
Printemps/15 jours				x					x		x	x							
Eté/15 jours				x					x		x	x							
Automne/15 jours						x	x		x		x	x							
TOTAL	3	3	1	5	2	3	3	-	6	-	8	5	1	1	-	1	1	2	

TABLEAU 4.29 Regroupement de la station 2 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle			x	x					x			x	x				x		
Hiver, 1 période							x		x										
Printemps, 1 période																	x	x	
Eté, 1 période	x	x	x						x		x								
Automne, 1 période	x	x			x								x	x				x	
Hiver/15 jours	x	x		x	x				x		x	x							
Printemps/15 jours																	x	x	x
Eté/15 jours			x																
Automne/15 jours			x	x															
TOTAL	3	5	2	2	2	2	-	-	4	-	2	2	2	1	-	2	2	3	

TABLEAU 4.30 Regroupement de la station 3 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle																	x	x	
Hiver, 1 période												x	x						
Printemps, 1 période			x		x		x					x	x	x					
Eté, 1 période	x	x	x						x		x								
Automne, 1 période	x	x			x								x	x				x	
Hiver/15 jours	x	x		x		x			x		x	x							
Printemps/15 jours																x			
Eté/15 jours			x																
Automne/15 jours			x		x														
TOTAL	3	5	2	2	2	1	-	1	2	-	2	2	3	2	2	-	1	2	

TABLEAU 4.31 Regroupement de la station 4 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle		x			x				x			x	x				x		
Hiver, 1 période					x									x	x				
Printemps, 1 période			x		x		x						x	x	x				
Eté, 1 période	x	x	x						x		x								
Automne, 1 période									x	x									
Hiver/15 jours					x								x	x	x				
Printemps/15 jours					x								x	x					
Eté/15 jours					x								x	x					
Automne/15 jours					x								x	x	x				
TOTAL	1	2	2	-	7	-	-	1	3	1	1	1	6	6	4	1	-	-	

TABLEAU 4.32 Regroupement de la station 5 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle	x										x								
Hiver, 1 période	x						x				x						x	x	
Printemps, 1 période	x						x	x	x		x	x				x			
Eté, 1 période																			
Automne, 1 période							x	x			x	x				x	x		
Hiver/15 jours	x	x	x				x			x		x	x						
Printemps/15 jours	x									x		x	x						
Eté/15 jours	x									x		x	x						
Automne/15 jours			x	x															
TOTAL	6	2	2	-	-	3	3	-	4	-	7	5	-	-	-	2	2	1	

TABLEAU 4.33 Regroupement de la station 6 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle		x	x						x			x	x				x		
Hiver, 1 période																			
Printemps, 1 période																			
Eté, 1 période																			
Automne, 1 période																			
Hiver/15 jours																			
Printemps/15 jours																			
Eté/15 jours																			
Automne/15 jours																			
TOTAL	1	2	2	7	-	-	-	1	1	-	-	1	8	8	5	1	-	1	

TABLEAU 4.34 Regroupement de la station 7 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle							x	x						x	x				
Hiver, 1 période		x							x										
Printemps, 1 période	x				x		x		x		x	x					x		
Eté, 1 période							x	x				x							
Automne, 1 période					x		x				x	x					x	x	
Hiver/15 jours	x	x	x		x				x		x	x							
Printemps/15 jours							x	x		x									
Eté/15 jours							x	x		x						x			
Automne/15 jours	x						x		x		x	x							
TOTAL	3	2	1	-	3	-	7	4	4	2	4	5	-	1	2	2	1	-	

TABLEAU 4.35 Regroupement de la station 8 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle							x	x						x	x				
Hiver, 1 période	x				x						x						x	x	
Printemps, 1 période	x				x		x		x		x	x					x		
Eté, 1 période							x	x				x							
Automne, 1 période					x		x				x	x					x	x	
Hiver/15 jours								x		x									
Printemps/15 jours							x	x		x									
Eté/15 jours							x	x		x						x			
Automne/15 jours	x						x		x		x	x							
TOTAL	3	-	-	-	3	-	7	5	2	3	4	4	-	1	2	2	2	1	

TABLEAU 4.36 Regroupement de la station 9 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle						x	x							x	x				
Hiver, 1 période										x							x		
Printemps, 1 période			x	x		x							x	x	x				
Eté, 1 période							x					x							
Automne, 1 période																			
Hiver/15 jours								x		x									
Printemps/15 jours							x	x		x									
Eté/15 jours							x	x		x					x				
Automne/15 jours										x									
TOTAL	-	-	1	1	-	1	4	5	-	5	-	1	1	2	3	1	-	-	

TABLEAU 4.37 Regroupement de la station 10 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle		x	x	x								x	x				x		
Hiver, 1 période		x						x											
Printemps, 1 période		x			x		x	x			x	x					x		
Eté, 1 période		x	x	x	x						x								
Automne, 1 période					x					x									
Hiver/15 jours		x	x	x		x		x			x	x							
Printemps/15 jours		x				x					x	x							
Eté/15 jours		x				x					x	x							
Automne/15 jours		x						x	x		x	x							
TOTAL	6	4	2	3	4	1	4	2	-	1	6	6	1	-	-	2	-	-	

TABLEAU 4.38 Regroupement de la station 11 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle																			
Hiver, 1 période									x									x	
Printemps, 1 période																			
Eté, 1 période																	x	x	
Automne, 1 période					x					x									
Hiver/15 jours									x	x									
Printemps/15 jours								x	x	x									
Eté/15 jours								x	x	x						x			
Automne/15 jours									x										
TOTAL	-	-	-	1	-	-	2	3	5	1	-	-	-	-	1	2	1	1	

TABLEAU 4.39 Regroupement de la station 12 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	
Annuelle	x				x														
Hiver, 1 période	x				x			x									x	x	
Printemps, 1 période	x				x			x	x	x		x				x			
Eté, 1 période	x	x	x	x						x									
Automne, 1 période					x			x	x			x				x	x		
Hiver/15 jours	x	x	x		x			x				x							
Printemps/15 jours	x				x					x		x							
Eté/15 jours	x				x					x		x							
Automne/15 jours	x							x	x	x		x							
TOTAL	8	2	2	1	7	-	4	4	-	5	-	6	-	-	-	2	2	1	

TABLEAU 4.40 Regroupement de la station 13 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NÚMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	
Annuelle		x	x	x						x			x				x		
Hiver, 1 période				x										x					
Printemps, 1 période	x				x		x	x		x			x					x	
Eté, 1 période								x	x	x									
Automne, 1 période					x		x	x					x				x	x	
Hiver/15 jours	x	x	x		x		x			x			x						
Printemps/15 jours	x				x					x			x						
Eté/15 jours	x				x					x			x						
Automne/15 jours	x							x	x			x							
TOTAL	5	2	2	1	5	1	5	4	1	6	-	6	2	-	-	3	1	-	

TABLEAU 4.41 Regroupement de la station 14 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	
Annuelle		x	x	x						x			x				x		
Hiver, 1 période				x										x					
Printemps, 1 période				x	x		x		x					x	x				
Eté, 1 période							x							x	x				
Automne, 1 période	x	x	x				x							x				x	
Hiver/15 jours				x	x									x	x				
Printemps/15 jours				x	x									x					
Eté/15 jours				x	x									x					
Automne/15 jours				x	x									x	x				
TOTAL	1	2	3	6	-	8	-	-	1	1	-	-	2	7	4	1	-	1	

TABLEAU 4.42 Regroupement de la station 15 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	
Annuelle							x	x	x						x				
Hiver, 1 période				x		x										x			
Printemps, 1 période			x	x		x			x					x		x			
Eté, 1 période						x								x		x			
Automne, 1 période	x	x	x			x								x				x	
Hiver/15 jours				x		x								x		x			
Printemps/15 jours				x		x								x					
Eté/15 jours				x		x								x					
Automne/15 jours				x		x								x		x			
TOTAL	1	1	2	6	-	8	1	1	2	-	-	-	-	7	6	-	-	1	

TABLEAU 4.43 Regroupement de la station 16 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	
Annuelle							x	x	x						x				
Hiver, 1 période				x		x										x			
Printemps, 1 période			x	x		x			x					x		x			
Eté, 1 période						x								x		x			
Automne, 1 période																			
Hiver/15 jours				x		x								x		x			
Printemps/15 jours			x																
Eté/15 jours								x	x	x		x							
Automne/15 jours				x		x								x		x			
TOTAL	-	-	2	4	-	5	2	2	3	-	1	-	-	4	6	-	-	-	

TABLEAU 4.44 Regroupement de la station 17 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	
Annuelle		x		x		x				x				x		x			
Hiver, 1 période								x			x								
Printemps, 1 période	x				x		x	x		x		x	x						
Eté, 1 période											x						x	x	
Automne, 1 période					x		x	x				x	x				x		
Hiver/15 jours																			
Printemps/15 jours		x															x	x	
Eté/15 jours																	x	x	
Automne/15 jours																	x	x	
TOTAL	1	2	-	1	2	1	2	2	1	2	2	2	3	1	-	-	5	4	

TABLEAU 4.45 Regroupement de la station 18 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NUMERO STATION																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	
Annuelle			x															x	
Hiver, 1 période	x				x		x				x							x	
Printemps, 1 période	x																	x	
Eté, 1 période											x						x	x	
Automne, 1 période					x		x	x				x	x				x		
Hiver/15 jours																		x	
Printemps/15 jours		x															x	x	
Eté/15 jours																	x	x	
Automne/15 jours																	x	x	
TOTAL	1	2	1	-	2	-	1	2	-	-	1	2	1	-	-	-	5	8	

TABLEAU 4.45 Regroupement de la station 19 avec les autres stations météorologiques.

PERIODE	NÚMERO STATION																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Annuelle			x															x
Hiver, 1 période	x				x		x				x							x
Printemps, 1 période		x																x
Eté, 1 période											x						x	x
Automne, 1 période	x	x	x			x								x	x			
Hiver/15 jours																		x
Printemps/15 jours		x															x	x
Eté/15 jours																	x	x
Automne/15 jours																	x	x
TOTAL	2	3	2	-	1	1	-	1	-	-	1	1	-	1	1	-	4	8

TABLEAU 4.47 Regroupement de la station 1 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	
Janvier			x	x		x				x		x												
Février											x											x	x	x
Mars			x	x	x		x					x							x					
TOTAL	-	1	2	2	-	2	-	-	-	1	1	2	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	1	

TABLEAU 4.48 Regroupement de la station 2 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier					x		x										x	x						
Février							x	x								x								
Mars									x	x											x	x		
TOTAL	-	-	-	-	1	-	1	2	1	1	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	1	-	

TABLEAU 4.49 Regroupement de la station 3 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier									x													x	x	
Février										x														
Mars	x		x	x		x						x							x					
TOTAL	1	-	1	1	-	1	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	1	

TABLEAU 4.50 Regroupement de la station 4 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x			x		x				x		x												
Février				x	x	x			x		x							x	x					
Mars	x		x	x		x					x								x					
TOTAL	2	-	1	3	1	3	-	-	1	1	-	3	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	

TABLEAU 4.51 Regroupement de la station 5 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x			x		x				x		x												
Février				x	x	x			x		x							x	x					
Mars	x		x	x		x					x								x					
TOTAL	2	-	1	3	1	3	-	-	1	1	-	3	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	

TABLEAU 4.52 Regroupement de la station 6 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x							x										x	x					
Février				x	x	x			x		x							x	x					
Mars																								
TOTAL	-	1	-	1	1	1	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-	

TABLEAU 4.53 Regroupement de la station 7 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x			x	x					x		x												
Février				x	x	x			x		x						x	x						
Mars	x		x	x	x						x							x						
TOTAL	2	-	1	3	3	1	-	-	1	1	-	3	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	

TABLEAU 4.54 Regroupement de la station 8 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier																x					x			
Février		x						x								x								
Mars								x			x		x		x									
TOTAL	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	1	1	1	-	1	2	-	-	-	-	1	-	-	

TABLEAU 4.55 Regroupement de la station 9 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x				x												x	x						
Février	x							x								x								
Mars								x			x		x		x									
TOTAL	-	2	-	-	-	1	-	2	-	-	1	-	1	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	

TABLEAU 4.56 Regroupement de la station 10 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier				x																			x	x
Février					x	x	x	x				x						x	x					
Mars		x									x												x	x
TOTAL	-	1	1	1	1	1	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	1	-	-	1	2	1	

TABLEAU 4.57 Regroupement de la station 11 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x			x	x		x					x												
Février				x																				
Mars		x									x											x	x	
TOTAL	1	1	1	1	1	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	

TABLEAU 4.58 Regroupement de la station 12 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier																x								
Février		x																				x	x	x
Mars											x	x			x		x							
TOTAL	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	2	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1

TABLEAU 4.59 Regroupement de la station 13 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier	x			x	x		x				x													
Février				x	x	x	x			x								x	x					
Mars	x		x	x	x		x												x					
TOTAL	2	-	1	3	3	1	3	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-	

TABLEAU 4.60 Regroupement de la station 14 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier												x												
Février																								
Mars							x	x			x				x									
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	

TABLEAU 4.61 Regroupement de la station 15 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier																								
Février																								
Mars																	x						x	
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	

TABLEAU 4.62 Regroupement de la station 16 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier																								
Février																								
Mars								x	x			x		x										
TOTAL	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

TABLEAU 4.63 Regroupement de la station 17 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	24	
Janvier								x													x			
Février		x						x	x															
Mars															x								x	
TOTAL	-	1	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	1	

TABLEAU 4.64 Regroupement de la station 18 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20	21	22	23	24	
Janvier		x				x		x											x					
Février				x	x	x	x			x			x						x					
Mars																								
TOTAL	-	1	-	1	1	2	1	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	



TABLEAU 4.68 Regroupement de la station 24 avec les autres stations nivométriques.

PERIODE	NUMERO STATION																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Janvier			x							x													x
Février	x											x										x	x
Mars															x		x						
TOTAL	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	2



CHAPITRE 5

ERREURS D'ESTIMATION ASSOCIEES A L'INTERPOLATION  
DES PRECIPITATIONS ET DE LA NEIGE AU SOL



Les données météorologiques disponibles sur un bassin versant étant ponctuelles en raison de la nature discrète de tout réseau de mesures, l'hydrologue doit, pour répondre à ses besoins, interpoler ces données de façon à estimer le phénomène en tout point du territoire.

Les méthodes les plus utilisées par les hydrologues pour estimer les précipitations en un point quelconque ou sur une surface donnée, à partir des points de mesure, sont les suivantes:

- la méthode des polygones de Thiessen;
- la méthode des iso-valeurs.

Cette seconde méthode, qui est en somme une interpolation linéaire; est plus précise dans bien des cas que l'estimé par les polygones de Thiessen. Mais tout comme la première, elle ne tient pas compte à la fois des particularités des points de mesure et de la structure spatiale du phénomène. La méthode d'interpolation optimale (décrite en annexe B) que nous utilisons, est une méthode probabiliste qui tient compte de la structure du phénomène à étudier et ainsi, permet non seulement d'estimer la valeur ponctuelle d'un phénomène ou sa valeur moyenne sur une surface donnée à l'intérieur de la région retenue mais, permet aussi de calculer l'erreur ponctuelle d'estimation en n'importe quel point de la surface étudiée.

## 5.1 DONNEES ET PERIODES UTILISEES

Les périodes utilisées sont celles demandées par la Société

d'électrolyse et de chimie Alcan et apparaissent au tableau 4.3 du chapitre précédent. Pour chacune de ces périodes, on a étudié cinq réseaux de stations météorologiques possibles et deux de stations de relevés de neige. Ceux-ci ont été déterminés par la Société d'électrolyse et de chimie Alcan et tenaient compte de la possibilité physique d'implanter des stations à tel ou tel endroit sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

## 5.2 CALCUL DE LA FONCTION DE STRUCTURE

La fonction de structure (F.S.) est déterminée en calculant pour tous les couples de stations la valeur:

$$F.S. = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (f'_{ij} - f'_{ik})^2}{n} \quad (5-1)$$

où

- $f'_{ij}$  est la  $i^{\text{ème}}$  déviation de la station  $j$ ;
- $f'_{ik}$  est la  $i^{\text{ème}}$  déviation de la station  $k$ ;
- $f'$  est la déviation de l'observation par rapport à la moyenne des observations de la station;
- $n$  est le nombre d'observations.

Les déviations sont obtenues par:

$$f'_{ij} = f_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij}}{n} \quad (5-2)$$

où

$f_{ij}$  est la  $i^{\text{ème}}$  observation de la station  $j$ .

Les valeurs obtenues de l'équation (5-1) sont utilisées pour définir la fonction de structure du phénomène étudié en fonction de la distance qui sépare chaque couple de stations. En pratique, l'axe des distances est subdivisé en classes et on calcule à l'intérieur de chaque classe la valeur moyenne de la fonction de structure. L'ajustement d'une courbe, de type positif, passant par ces valeurs en fonction de la distance permet par la suite d'interpoler la fonction entre les stations et le point à interpoler à l'aide des distances de ce point à chacune des stations. De plus, en extrapolant la courbe à une distance zéro on peut estimer l'erreur minimale ponctuelle à laquelle on peut s'attendre. Cette erreur est due à la fois à l'imprécision des mesures et à l'influence du micro-climat.

Les fonctions de structure des périodes étudiées pour les précipitations et les relevés de neige ont été calculées en utilisant le plus grand nombre possible de stations qui avaient une période concomitante suffisamment longue. Pour les précipitations, on a utilisé les 19 stations météorologiques, listées au tableau 3.1 pour la période 1966 à 1975. Pour les relevés de neige on a utilisé 20 ou 21 des stations, indiquées au tableau 2.2, pour la période 1955-1977.

Pour chaque fonction de structure considérée, une des courbes suivantes a été ajustée aux points expérimentaux à l'aide d'un processus interactif visant à minimiser la variance d'estimation:

- exponentielle de la forme:

$$FS(X) = A - B \text{ EXP } (-X/C) \quad (5-3)$$

- Gompertz de la forme:

$$FS(X) = CA^{(B^X)} \quad (5-4)$$

A, B et C sont les paramètres

X distances en milles

- Droite:

$$FS(X) = A + B X \quad (5-5)$$

La forme retenue pour chacune des périodes est celle qui s'ajuste le mieux aux points expérimentaux.

Le tableau 5.1 contient les paramètres des fonctions de structure calculées pour les différentes périodes de précipitations et de relevés de neige. Quant aux figures 5.1 à 5.12, elles présentent les points calculés de chaque fonction de structure ainsi que la courbe ajustée à ces points. Tous les points calculés sont indiqués sur ces figures, bien que pour l'ajustement on a négligé quelquefois les points supérieurs à 125 milles.

L'étude de ces courbes nous renseigne sur le phénomène étudié. Ainsi, si l'ordonnée à l'origine est importante, on déduit que les erreurs de mesure ou les effets du micro-climat sont importants. Si la courbe tend vers une ligne horizontale, on déduit que le phénomène a une portée

TABLEAU 5.1 Paramètres d'ajustement des fonctions de structure.

PERIODE	FORME DE LA COURBE	PARAMETRES			
		A	B	C	X (distance en milles)
Annuelle	Gompertz	0.22567	0.79548	15.89731	$X_1^1$
Hiver, 1 période	Gompertz	0.33450	0.54253	1.54506	$X_1$
Printemps, 1 période	Gompertz	0.02140	0.49043	1.71029	$X_1$
Eté, 1 période	Gompertz	0.25173	0.72329	5.53815	$X_1$
Automne, 1 période	Droite	0.91843	0.02233	-	X
Hiver/15 jours	Gompertz	0.34827	0.70359	0.25321	$X_1$
Printemps/15 jours	Gompertz	0.15284	0.68290	0.30433	$X_1$
Eté/15 jours	Exponentielle	0.79232	0.65297	43.22910	X
Automne/15 jours	Gompertz	0.22191	0.86932	0.62739	$X_1$
Relevé de neige JANVIER	Droite	0.77098	0.00646	-	X
Relevé de neige FEVRIER	Exponentielle	3.03390	2.20903	135.0530	X
Relevé de neige MARS	Gompertz	0.17749	0.96716	2.84739	X

<sup>1</sup>  $X_1 = X \div 9.85$

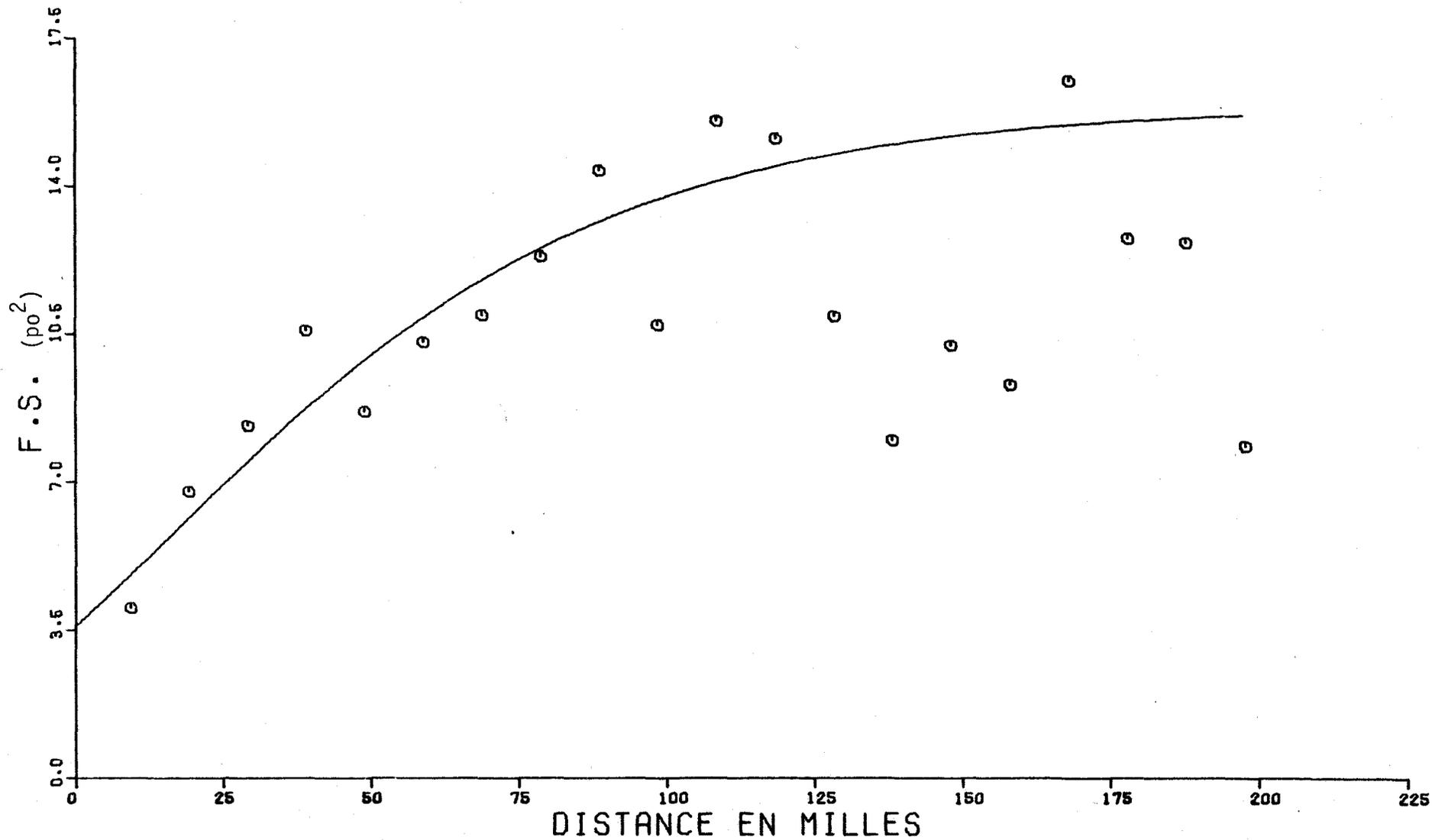


FIGURE 5.1 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ANNUELLE".

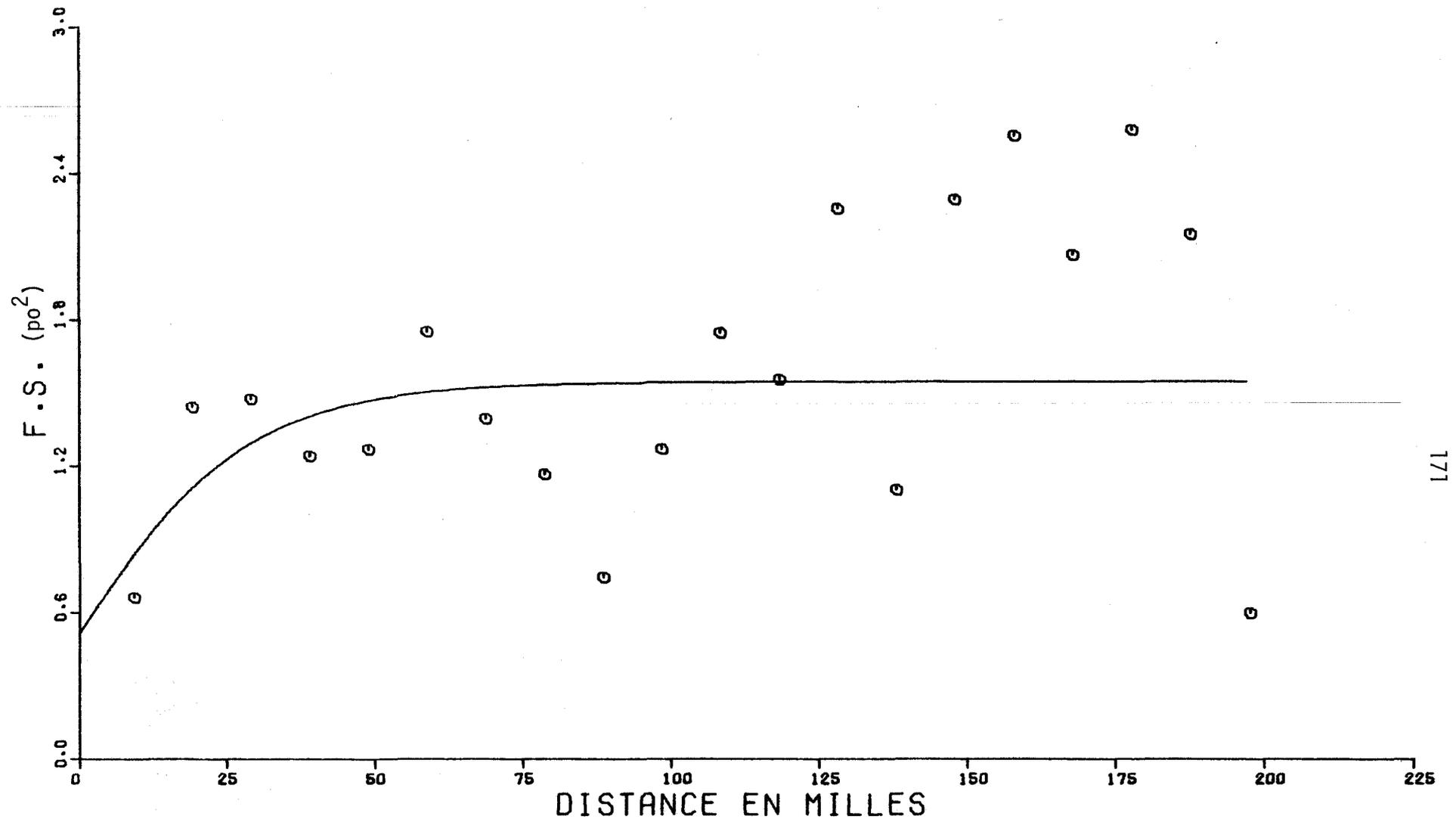


FIGURE 5.2 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "HIVER, 1 période".

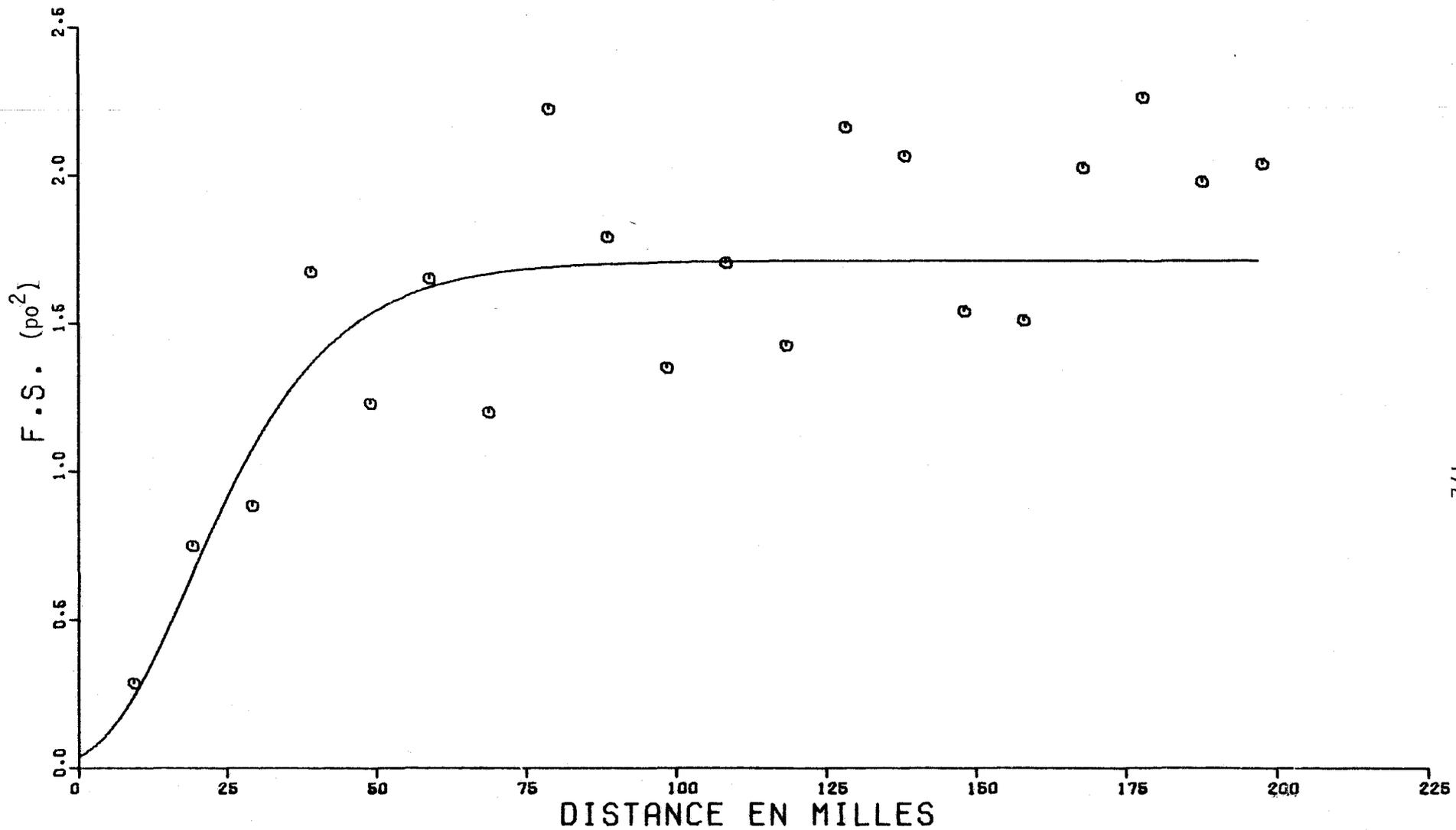


FIGURE 5.3 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "PRINTEMPS, 1 période".

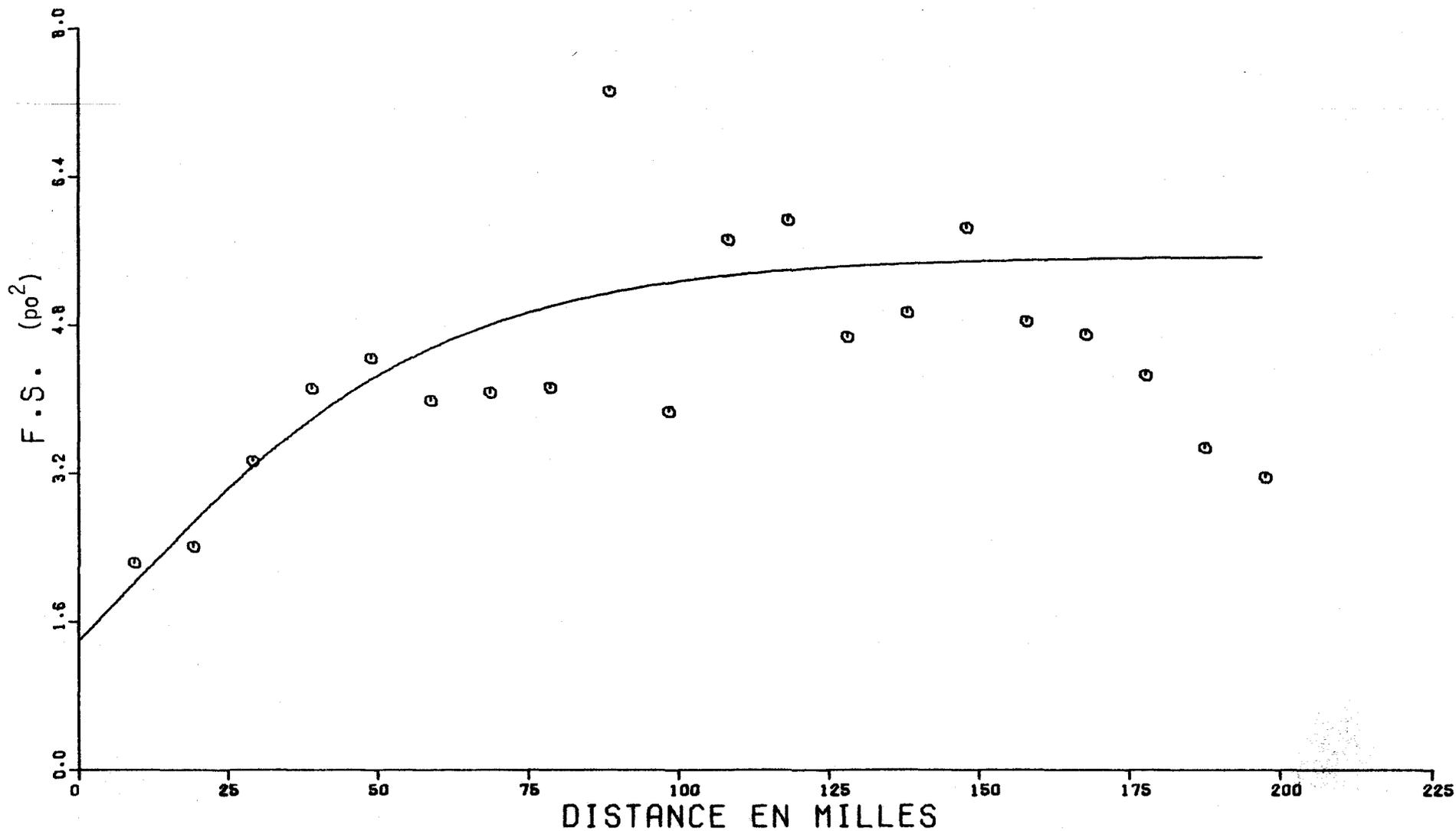


FIGURE 5.4 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ETE, 1 période".

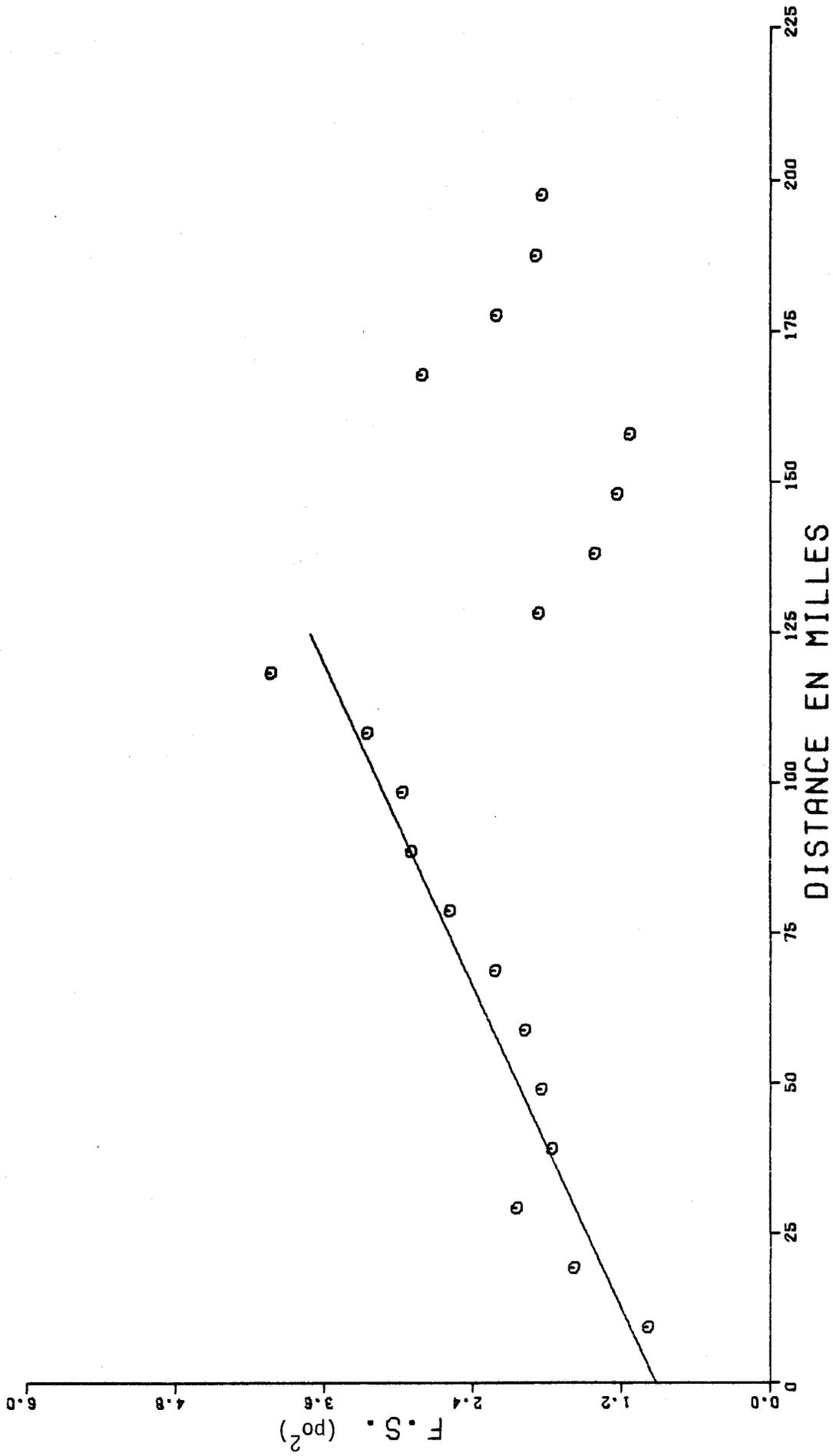


FIGURE 5.5 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "AUTOMNE, 1 période".

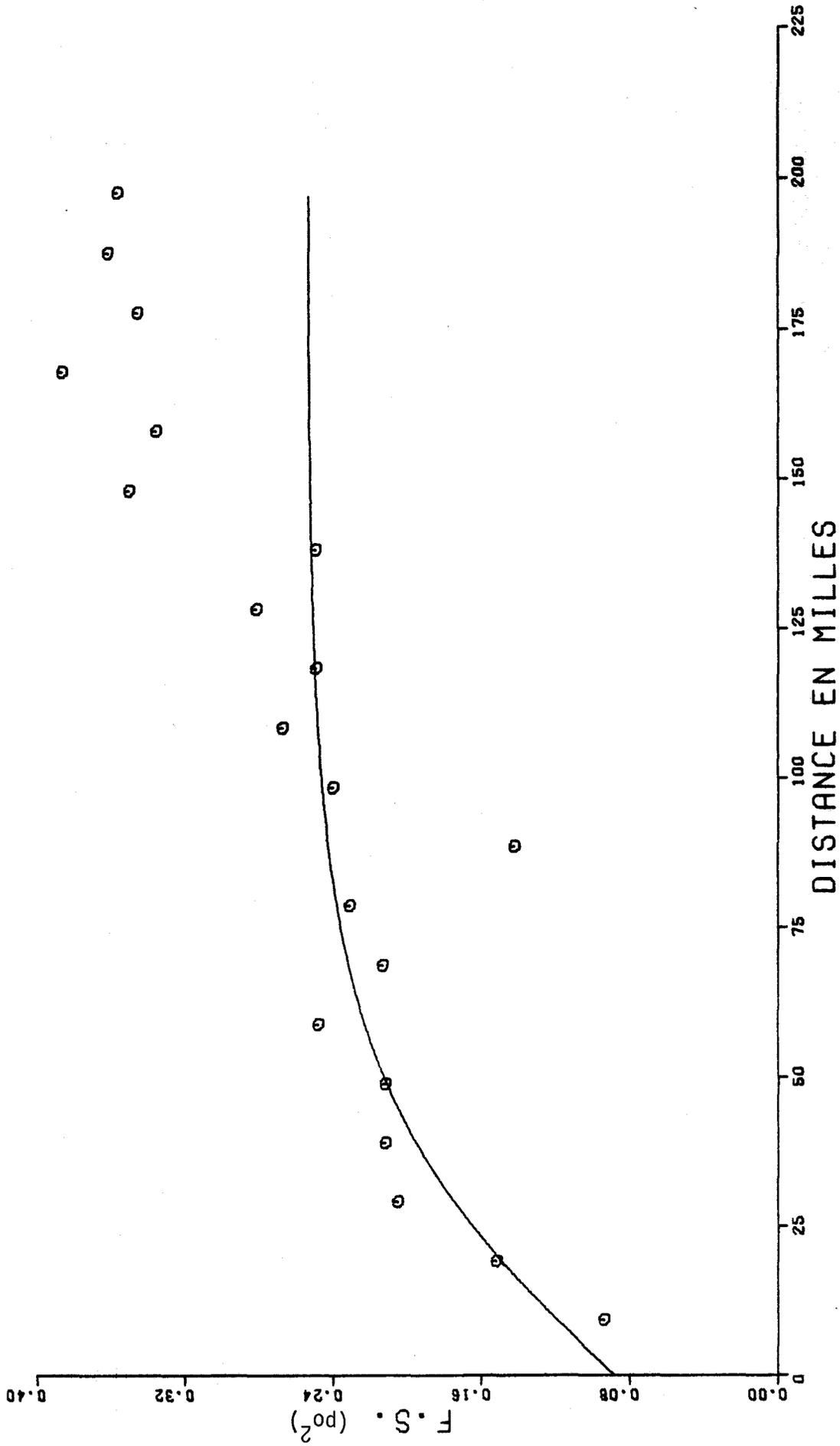


FIGURE 5-6 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "HIVER/15 jours".

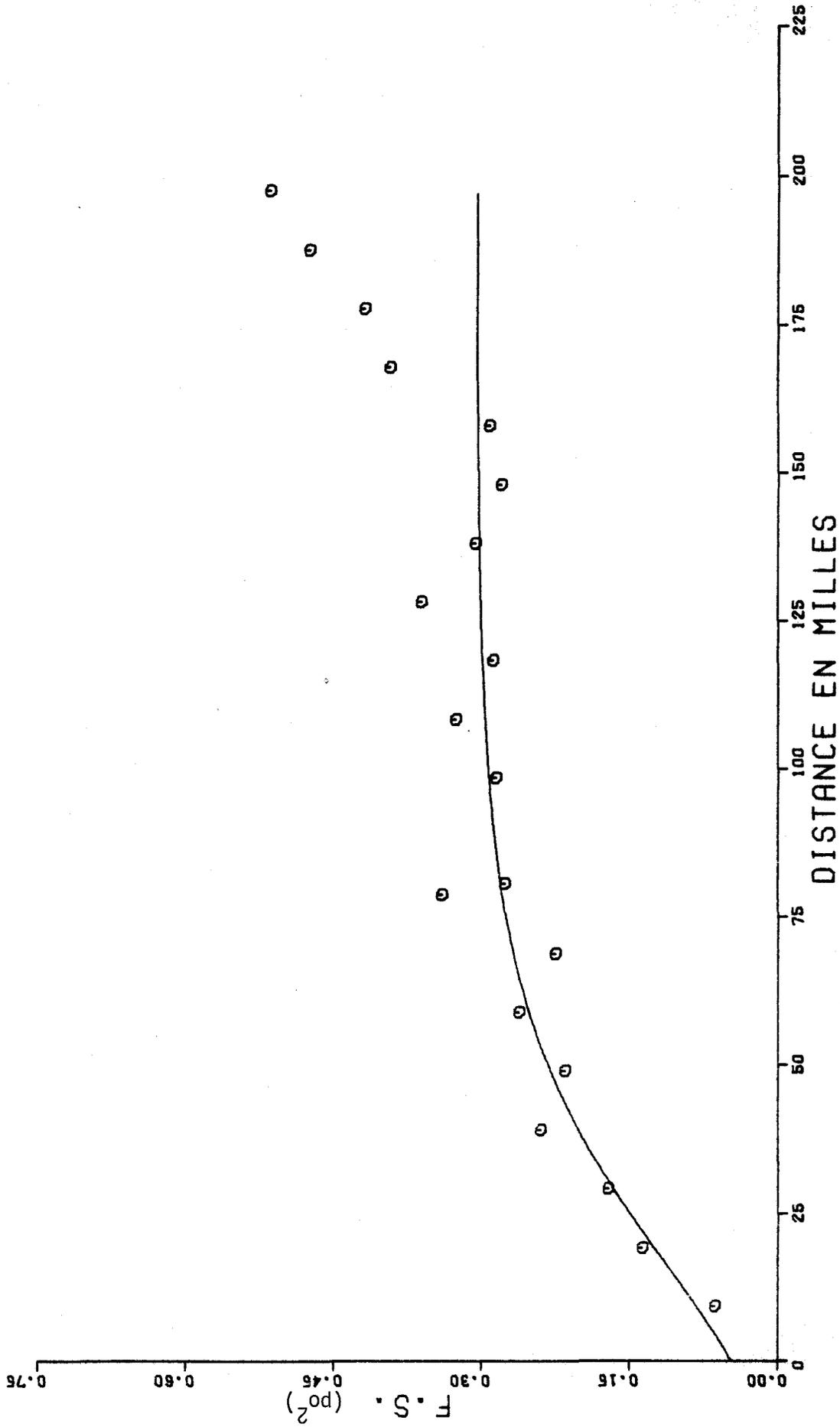


FIGURE 5.7 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "PRINTEMPS/15 jours".

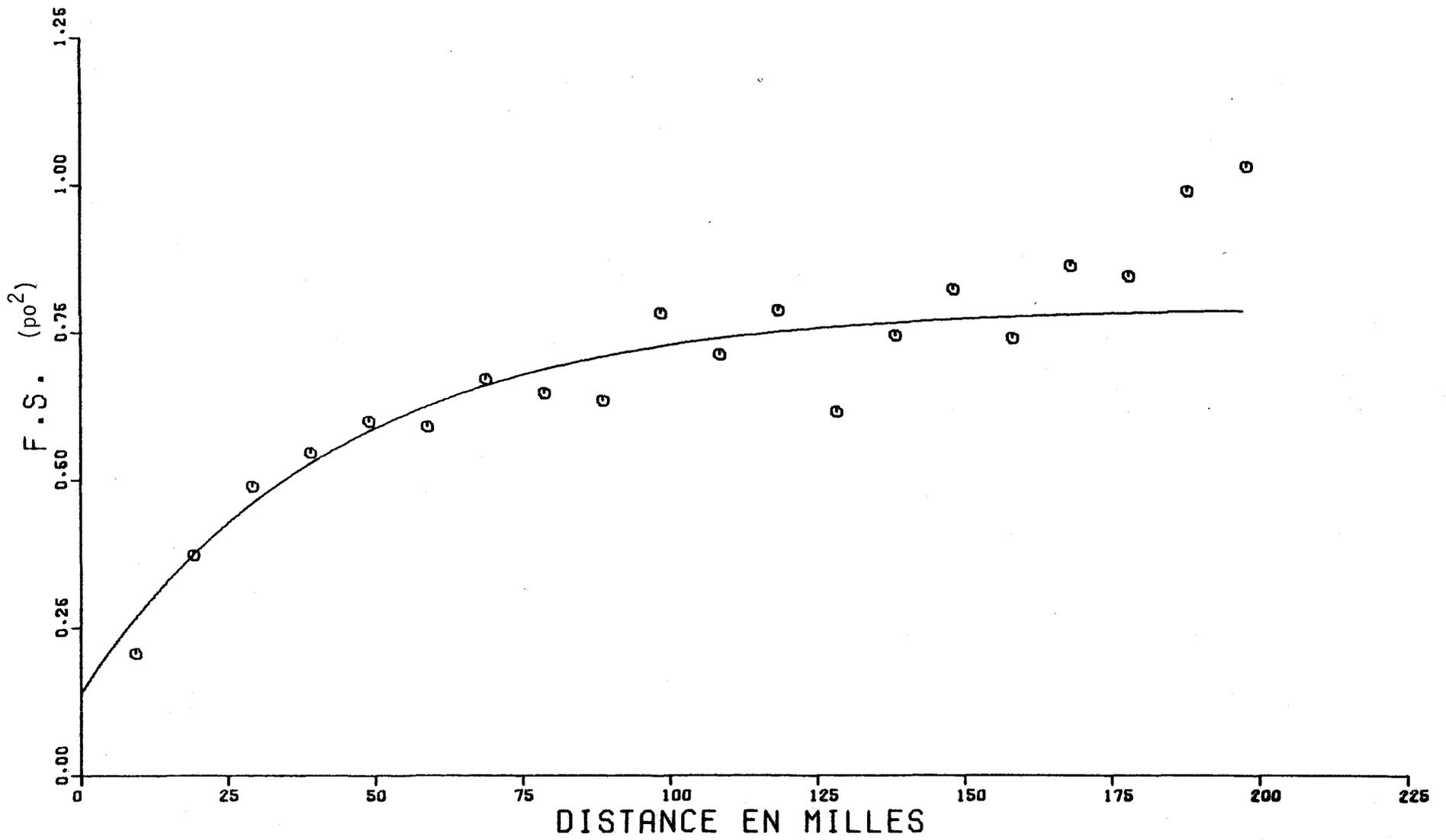
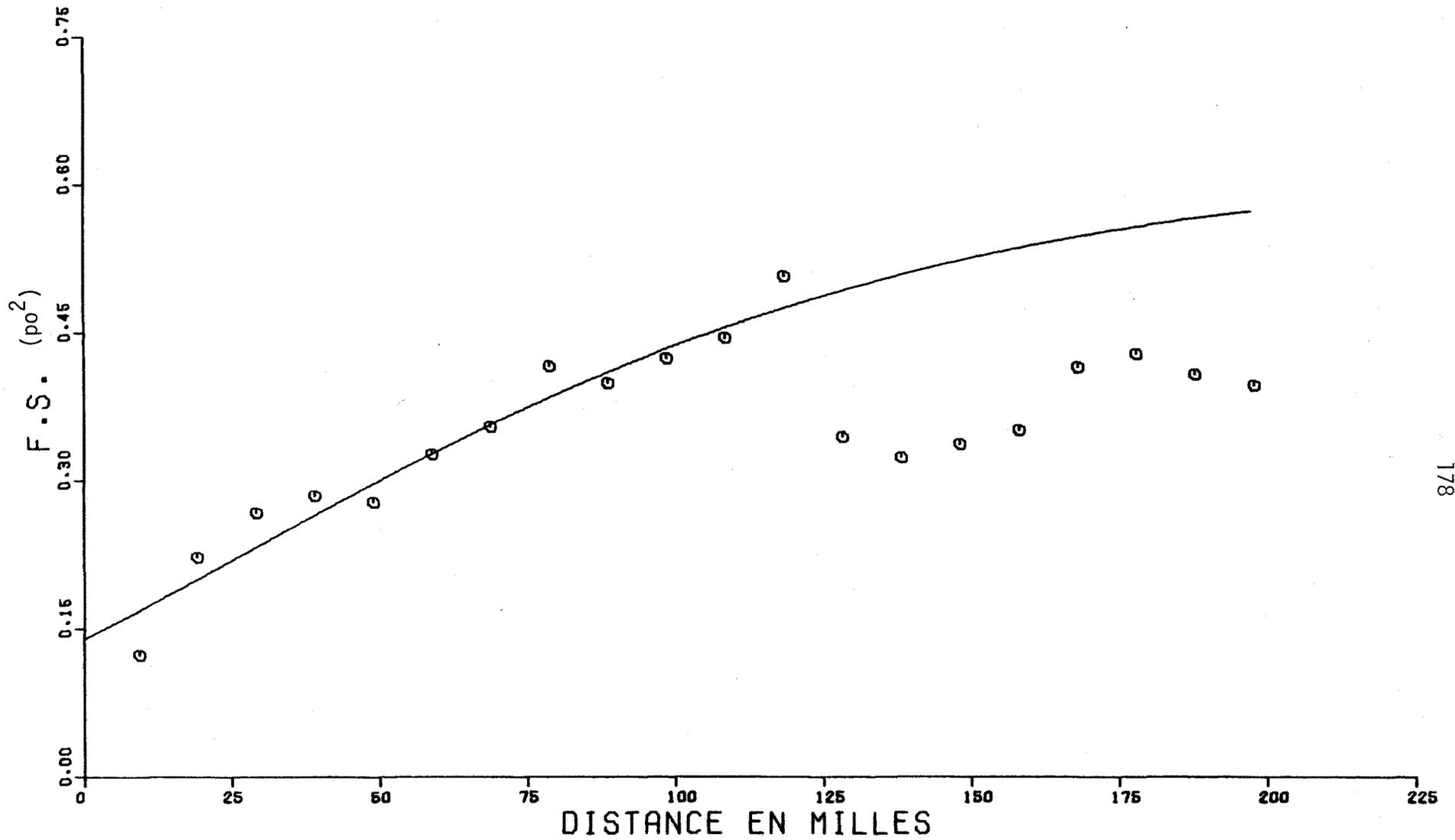


FIGURE 5.8 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "ETE/15 jours".



FFIGURE 5.9 Fonction de structure dans l'espace des précipitations de la période "AUTOMNE/15 jours".

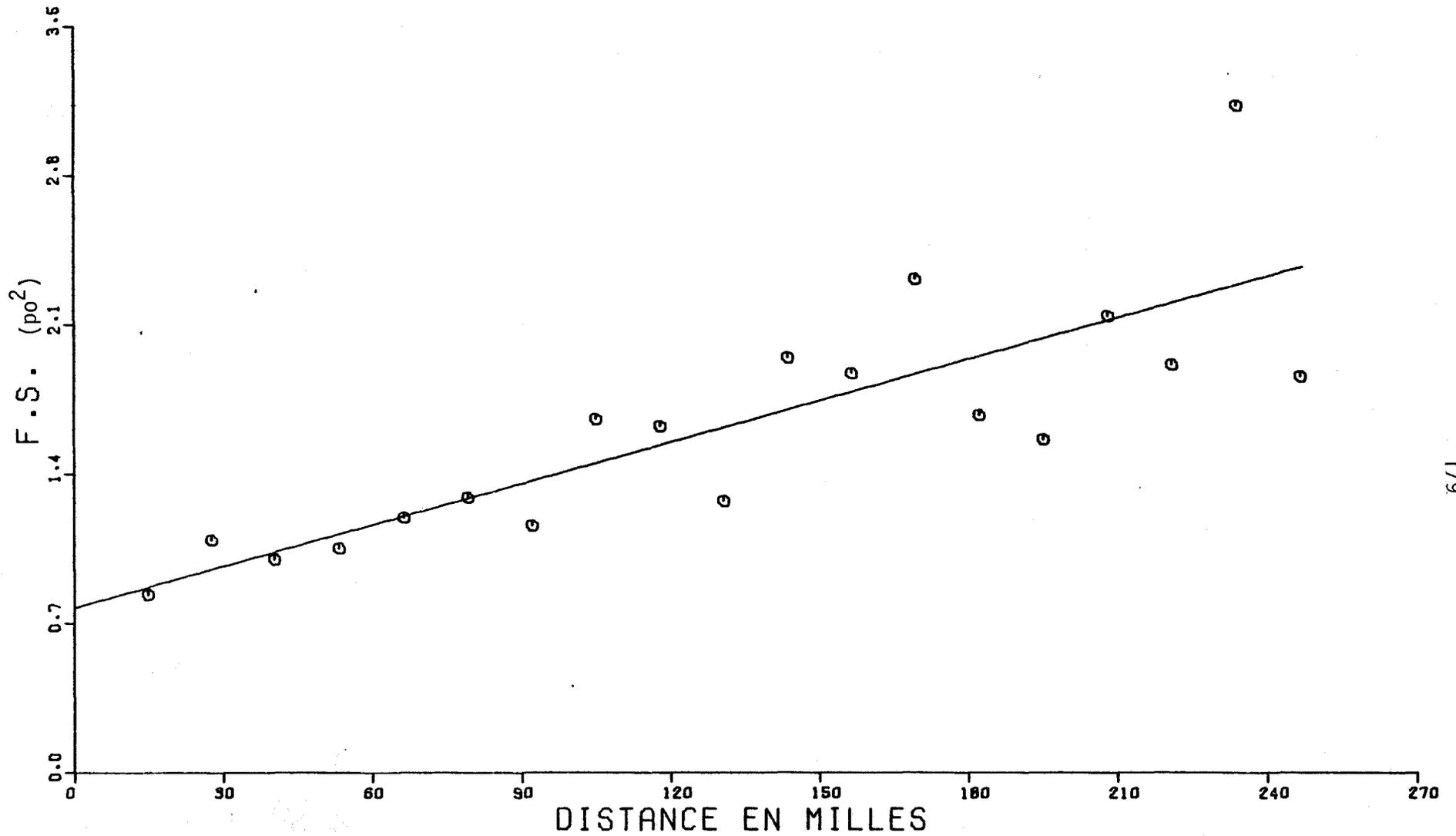


FIGURE 5.10 Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "JANVIER".

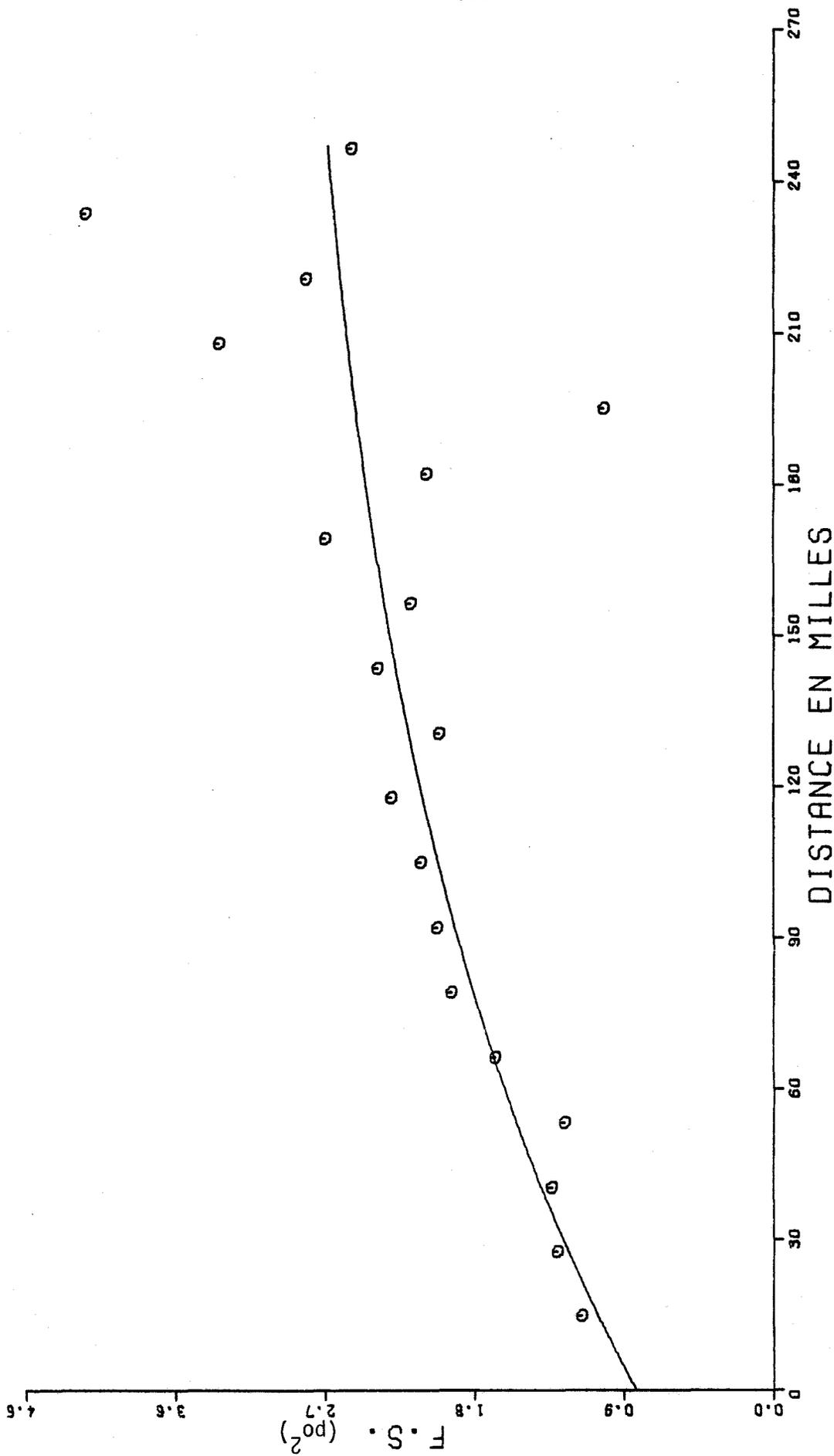


FIGURE 5.11 Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "FEVRIER".

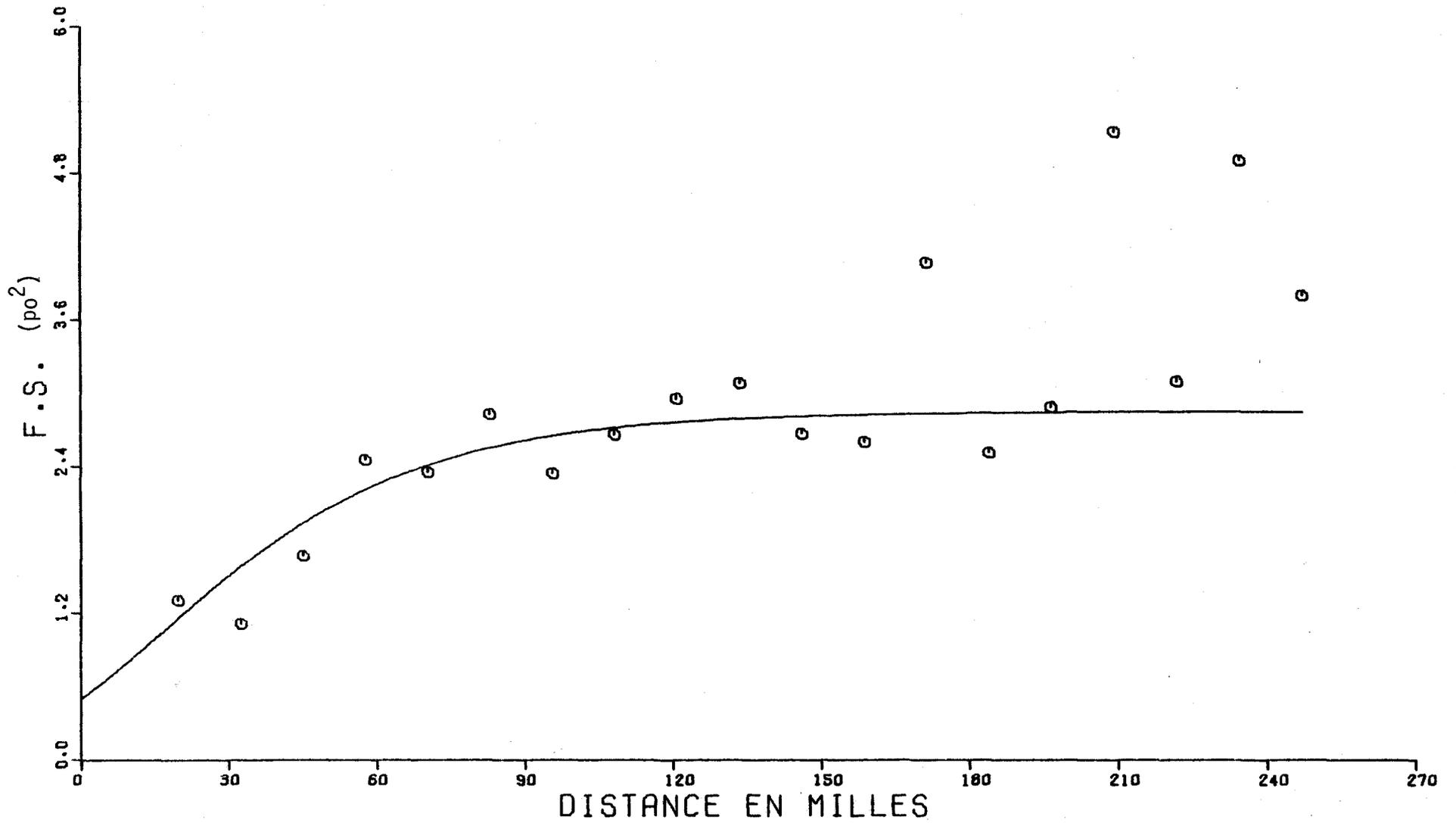


FIGURE 5.12 Fonction de structure dans l'espace des relevés de neige de "MARS".

maximale qu'on détermine facilement sur le graphique. La pente de la fonction de structure est aussi très importante; plus la pente est forte, plus l'erreur d'interpolation augmente rapidement.

L'étude de la figure 5.2, par exemple, nous montre une croissance très rapide jusqu'à environ 50 milles où l'on observe le plafond. Ceci indique que la précision de l'interpolation des précipitations "HIVER, 1 période" décroît très rapidement jusqu'à 50 milles et que le rayon d'influence des stations est limité à 50 milles. Sur la figure 5.5 qui nous montre la fonction de structure des précipitations "AUTOMNE, 1 période", on observe une croissance régulière. Cette courbe est valable pour les distances inférieures à 125 milles. On a d'ailleurs négligé les points supérieurs à 125 milles pour l'ajustement de cette courbe.

### 5.3 INTERPOLATION OPTIMALE

Pour estimer les précipitations en un point, on doit déterminer le poids à donner à chacune des stations. Ces poids sont déterminés en minimisant l'erreur quadratique moyenne, ce qui nous donne un système à  $N$  équations à résoudre lorsqu'on a  $N$  stations. Soit à résoudre:

$$\sum_{j=1}^N b_{ij} p_j = b_{oi} \quad (i = 1, 2 \dots N) \quad (5-6)$$

où

$b_{ij}$  sont les valeurs de la fonction de structure entre les stations  $i$  et  $j$ ;

$b_{oi}$  sont les valeurs de la fonction de structure entre le point à interpoler et les stations;

$p_j$  sont les poids à donner à chacune des stations.

Ce système est régulier et admet une seule solution qui donne les  $N$  poids  $p_j$  qui minimisent la variance. Les valeurs  $b_{ij}$  et  $b_{oi}$  sont prises sur la fonction de structure en fonction des distances inter-stations et des distances entre le point à estimer et les stations.

Connaissant les poids, on peut calculer la variance de l'estimation par:

$$E_o^2 = \sum_{i=1}^N p_i b_{oi} \quad (5-7)$$

où

$E_o^2$  = variance de l'estimé au point  $o$ ;

$b_{oi}$  = valeur de la fonction de structure entre le point à interpoler et chacune des stations.

L'estimé du phénomène au point nous est donné par:

$$V_o = \sum_{i=1}^N p_i f'_i + \overline{f}_o \quad (5-8)$$

où

$V_o$  = valeur au point zéro;

$p_i$  = poids de chacune des stations;

$f'_i$  = déviation de l'observation de la station  $i$  par rapport à la moyenne des observations de cette station;

$\overline{f}_o$  = norme ou moyenne au point  $o$ .

Si l'on ne connaît pas la norme à tous les points, on peut faire les

calculs directement avec les observations (cf. annexe B; problème de la norme) en imposant une contrainte supplémentaire  $\sum p_i = 1$  pour que l'estimé soit sans biais. C'est cette méthode que nous utilisons. Le système d'équations (5-6) devient un système à  $N + 1$  équations, le  $N + 1$ <sup>ième</sup> paramètre est le multiplicateur de Lagrange. Dans ce cas, l'estimé du phénomène nous est donné par:

$$V_0 = \sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (5-9)$$

où

- $V_0$  = valeur calculée au point zéro;
- $p_i$  = poids à donner à la station  $i$ ;
- $f_i$  = observation de la station  $i$ ;
- $N$  = nombre de stations.

La variance de l'estimation est calculée par:

$$E_0^2 = \sum_{i=1}^N p_i b_{oi} + \mu \quad (5-10)$$

où

- $E_0^2$  = variance de l'estimé au point zéro;
- $b_{oi}$  = valeur de la fonction de structure entre le point à interpoler et chacune des stations;
- $p_i$  = poids de la station  $i$ ;
- $\mu$  = multiplicateur de Lagrange.

En pratique, pour tracer les iso-valeurs et les iso-erreurs on fait

les calculs sur un grand nombre de points répartis uniformément sur la région. Pour le bassin versant du lac Saint-Jean les calculs ont été faits aux intersections d'une grille de 10 km par 10 km ce qui donne 1,960 points différents (matrice de  $56 \times 35$ ).

#### 5.4 ESTIMATION DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU AU SOL SUR LE BASSIN VERSANT DU LAC SAINT-JEAN

Le tableau 5.2 donne les stations météorologiques utilisées et les précipitations moyennes calculées aux stations pour chaque période. La figure 4.1 montre l'emplacement sur le bassin versant de ces 19 stations. La liste des stations de relevés de neige et les lames d'eau moyennes calculées pour ces stations pour les mois de janvier, février et mars sont présentées au tableau 5.3.

Connaissant les valeurs des précipitations (tableau 5.2) ou des lames d'eau au sol (tableau 5.3) aux stations, on calcule à l'aide de l'équation (5-9) les valeurs correspondantes à tous les points de la grille de manière à tracer les courbes d'iso-valeurs sur le bassin versant. Les iso-valeurs des précipitations totales pour les neuf périodes étudiées sont présentées aux figures 5.13 à 5.21 tandis que les iso-valeurs des lames moyennes d'eau au sol pour les mois de janvier, février et mars apparaissent aux figures 5.22 à 5.24.

Les lignes pointillées sur ces figures indiquent le contour du bassin versant du lac Saint-Jean et du lac lui-même.

TABLEAU 5.2 Précipitation moyenne pour la période 1966-1975.

NUMERO	STATION NUMERO	PERIODE					15 JOURS			
		Annuelle	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Automne
1	7060080	34.74	6.56	6.32	13.02	8.44	1.09	1.22	1.83	1.39
2	7060825	34.37	4.65	5.67	15.71	8.04	0.78	1.12	2.22	1.33
3	7061541	36.46	5.33	6.07	15.40	9.29	0.89	1.16	2.17	1.54
4	7061560	40.13	7.11	6.78	15.61	10.19	1.18	1.32	2.18	1.69
5	7063090	34.43	5.22	5.58	15.16	8.15	0.87	1.07	2.11	1.35
6	7063320	38.46	7.01	6.15	15.58	9.28	1.17	1.21	2.19	1.54
7	7063560	40.28	8.29	6.61	15.63	9.33	1.38	1.30	2.21	1.54
8	7063610	41.53	8.89	6.82	15.68	9.77	1.48	1.34	2.22	1.62
9	7064890	46.36	8.98	7.59	17.53	11.85	1.50	1.49	2.49	1.96
10	7064998	38.14	7.55	6.15	14.84	9.31	1.26	1.19	2.09	1.54
11	7065100	56.35	9.94	9.68	21.66	14.53	1.66	1.90	3.06	1.41
12	7065640	34.87	7.24	5.82	13.19	8.30	1.21	1.12	1.86	1.37
13	7066685	38.99	8.84	6.20	14.24	9.25	1.47	1.22	2.01	1.53
14	7067060	36.34	6.41	5.73	15.21	8.63	1.07	1.13	2.14	1.43
15	7067460	45.60	8.75	7.01	17.46	11.97	1.46	1.38	2.45	1.98
16	7068160	37.54	6.68	6.42	14.86	9.25	1.11	1.26	2.10	1.53
17	7091305	34.65	5.36	5.89	14.77	8.33	0.89	1.14	2.07	1.38
18	7091400	39.39	7.78	6.24	15.46	9.50	1.30	1.19	2.17	1.57
19	7095000	38.39	8.47	5.93	14.08	9.47	1.41	1.16	1.99	1.56

TABLEAU 5.3 Lamé moyenne d'eau au sol pour la période 1955-1977

NUMERO	STATION NUMERO	JANVIER	FEVRIER	MARS
1	610010	5.167	7.605	9.390
2	610020	6.200	8.204	9.091
3	610040	5.374	7.374	9.330
4	616010	5.722	7.843	9.543
5	619010	5.691	7.878	9.252
6	619020	5.706	8.005	9.131
7	619030	6.561	8.787	10.061
8	619050	6.389	8.489	9.648
9	621010	6.732	8.683	9.674
10	621020	5.582	7.687	8.600
11	621030	5.282	7.543	9.039
12	621040	5.856	8.074	9.235
13	621050	6.336	8.774	10.185
14	621060	6.128	8.262	9.385
15	622010	7.394	9.241	10.510
16	622020	6.764	8.981	10.164
17	622030	5.906	8.350	9.635
18	622040	7.117	8.896	10.717
19	622060	6.530	8.730	10.439
20	622080	6.517	8.033	9.433
21	622090	-	6.560	9.111
22	807010	7.409	10.204	11.973
23	807020	6.543	8.274	8.941
24	810150	4.548	6.848	8.309

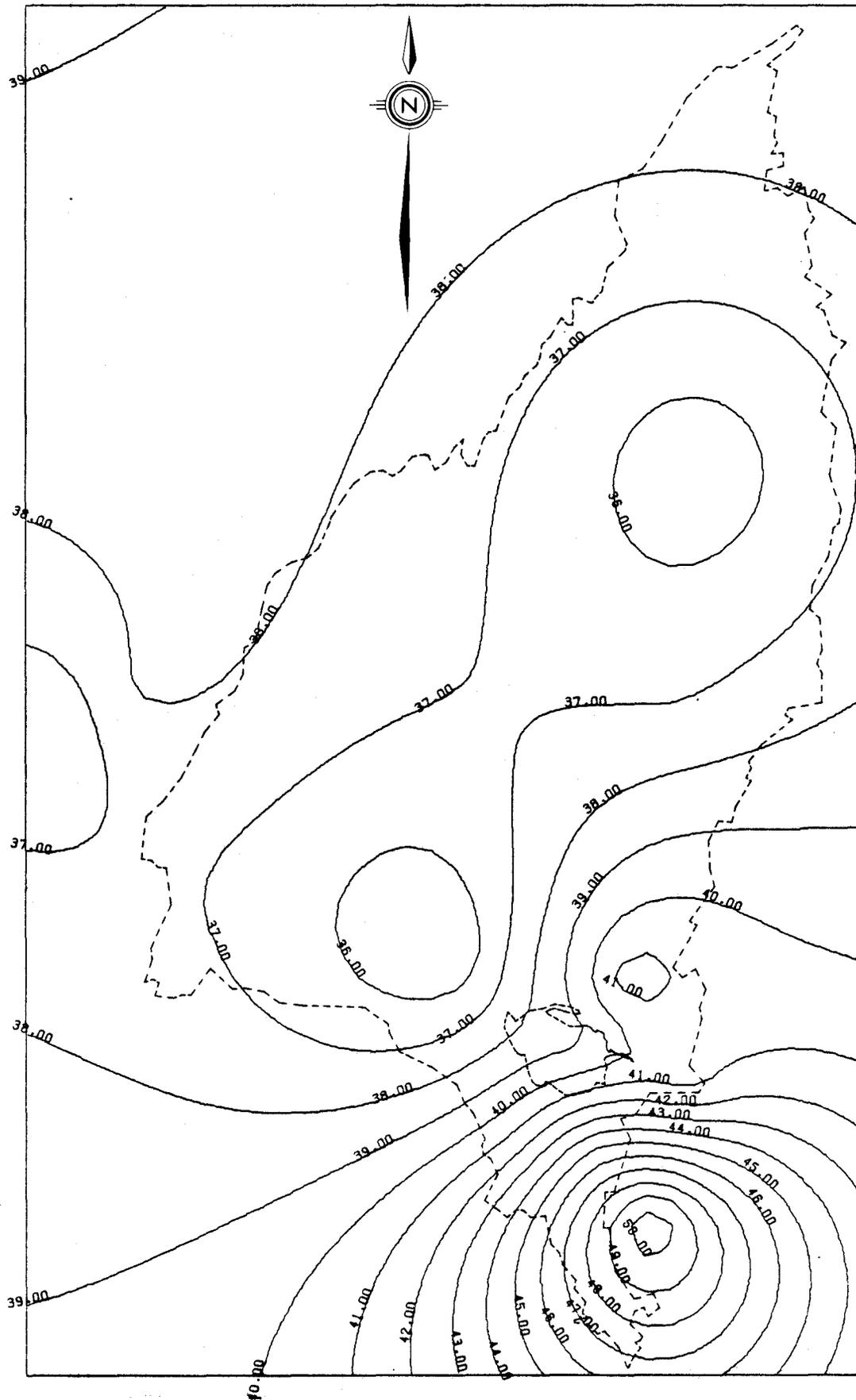


FIGURE 5.13 Précipitation moyenne pour la période "ANNUELLE" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

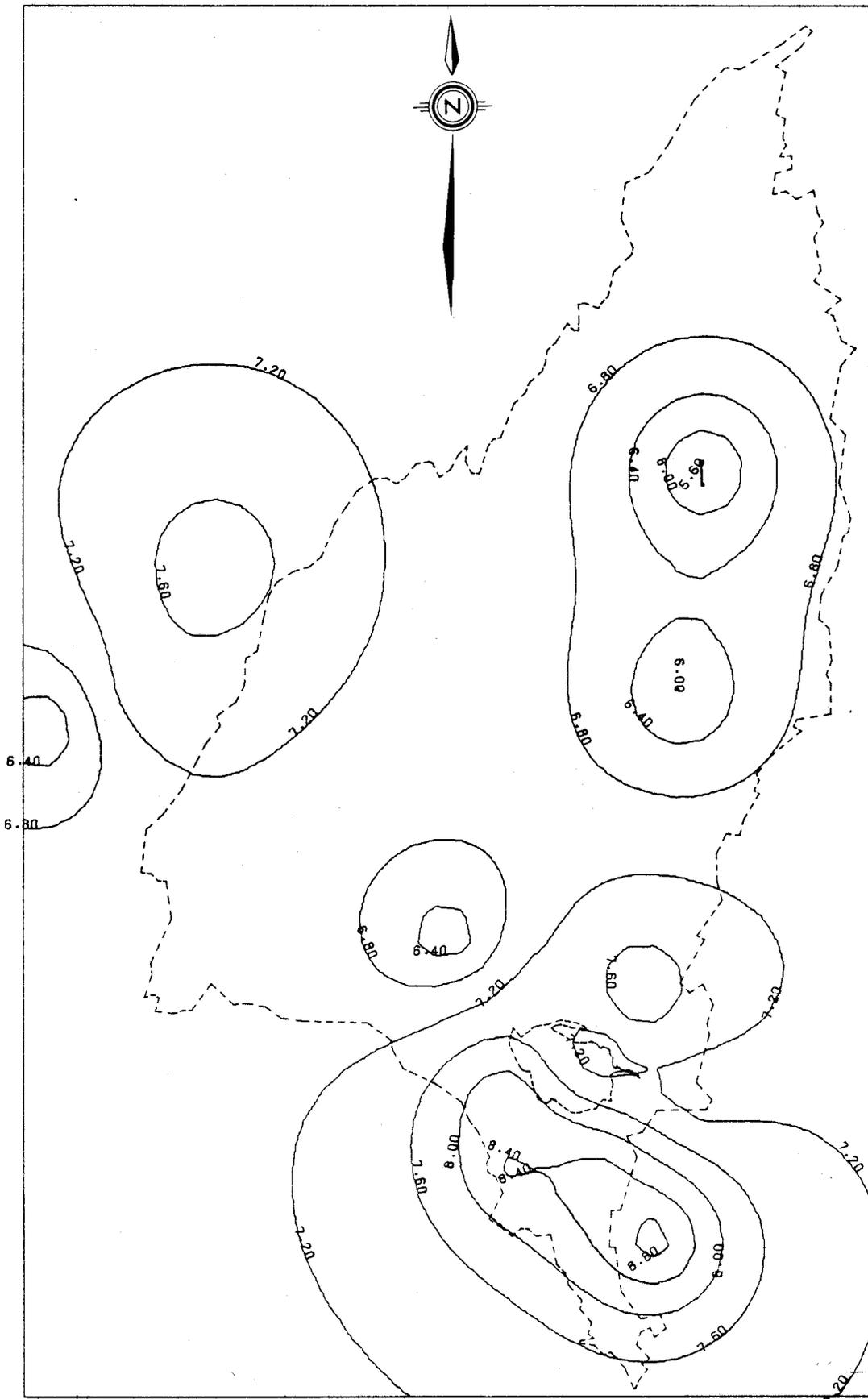


FIGURE 5.14 Précipitation moyenne pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

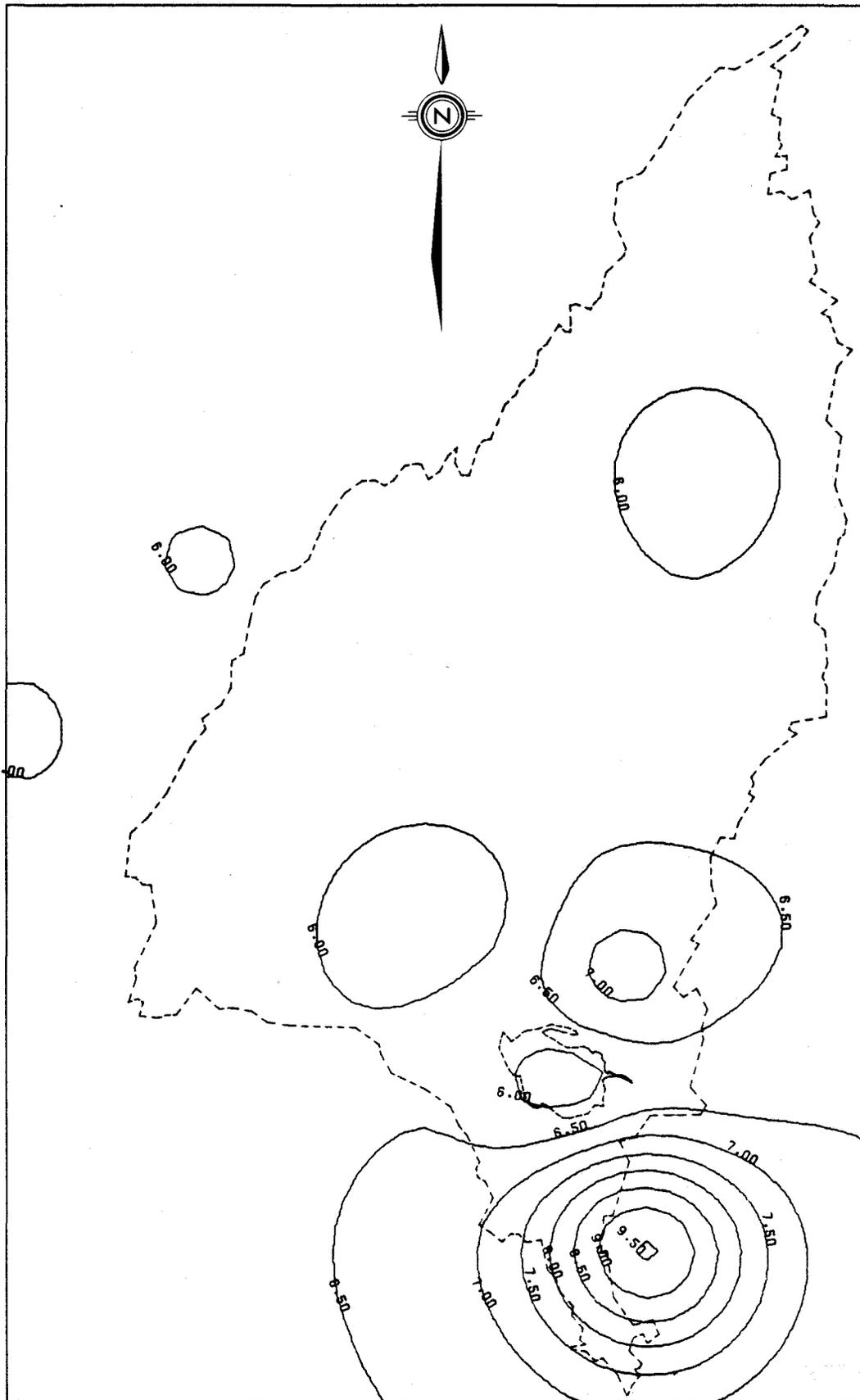


FIGURE 5.15 Précipitation moyenne pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

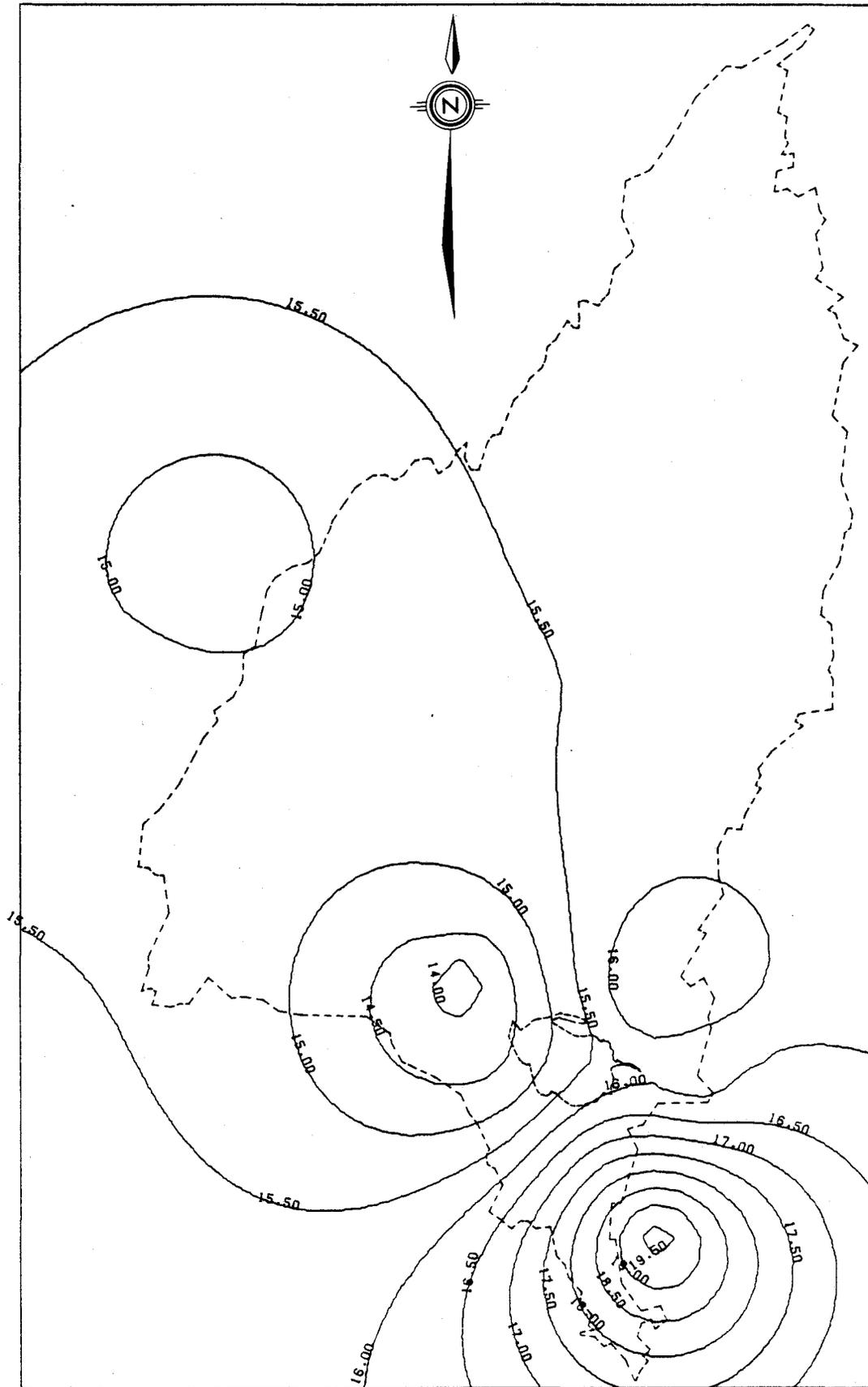


FIGURE 5.16 Précipitation moyenne pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

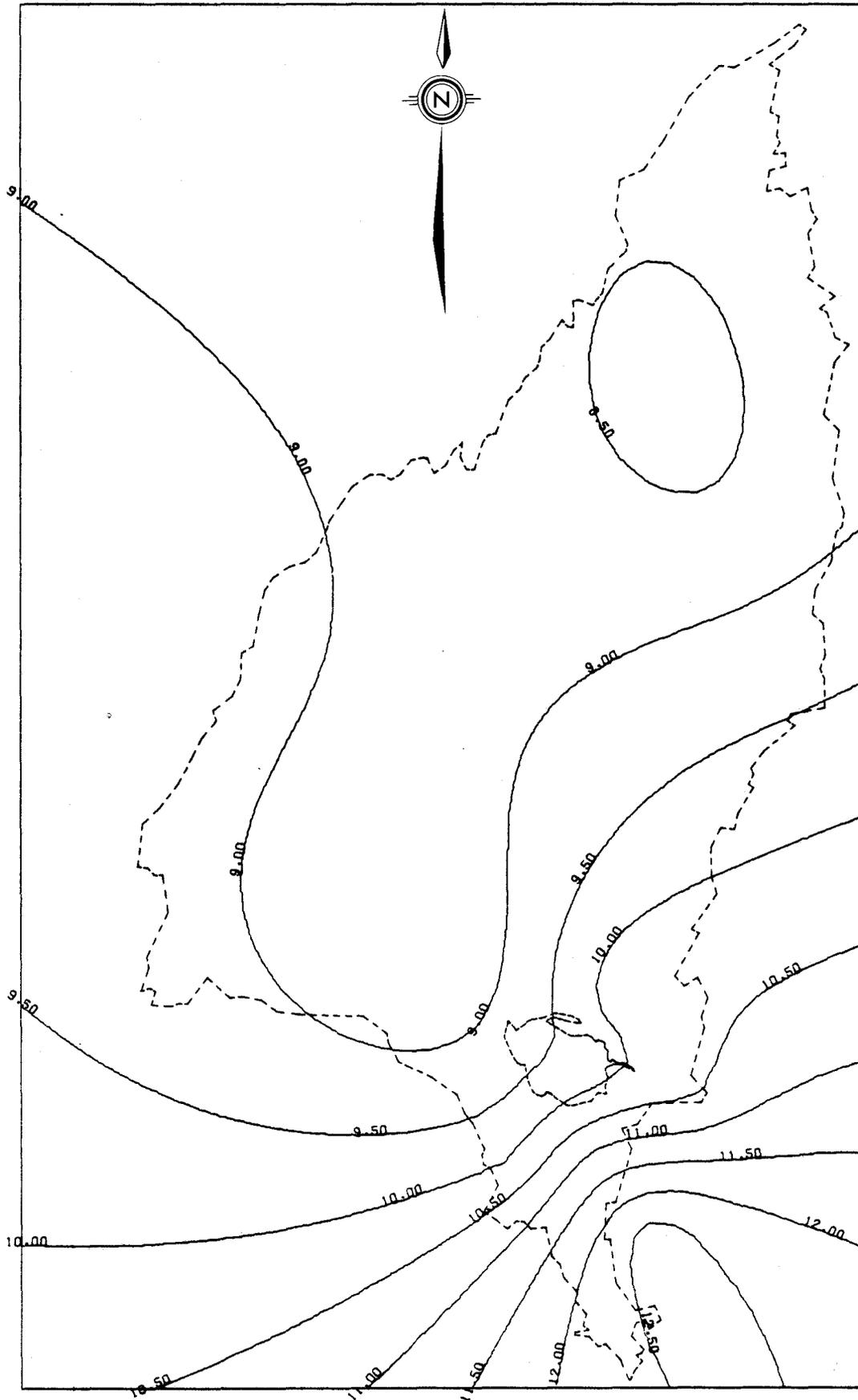


FIGURE 5.17 Précipitation moyenne pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

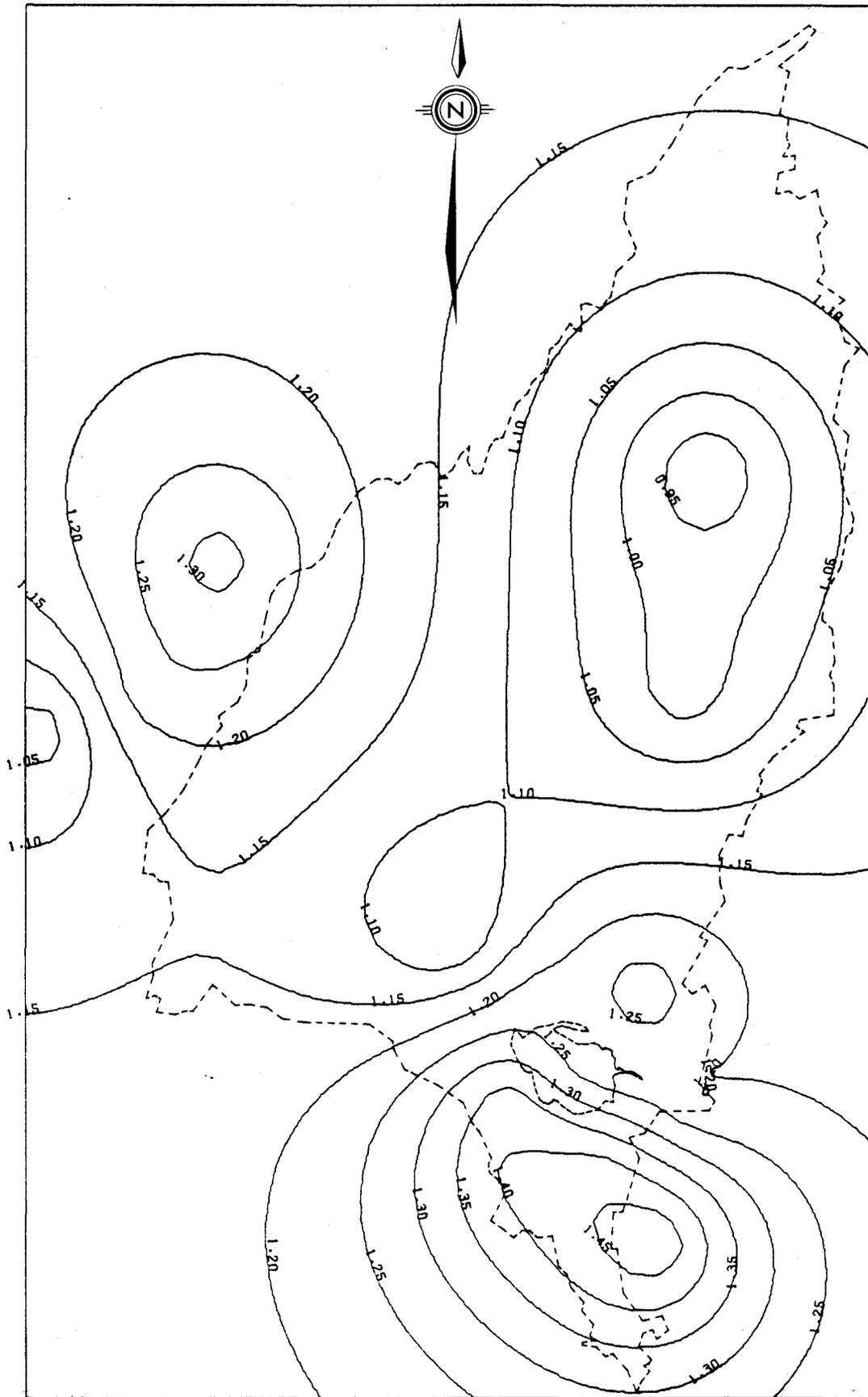


FIGURE 5.18 Précipitation moyenne pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

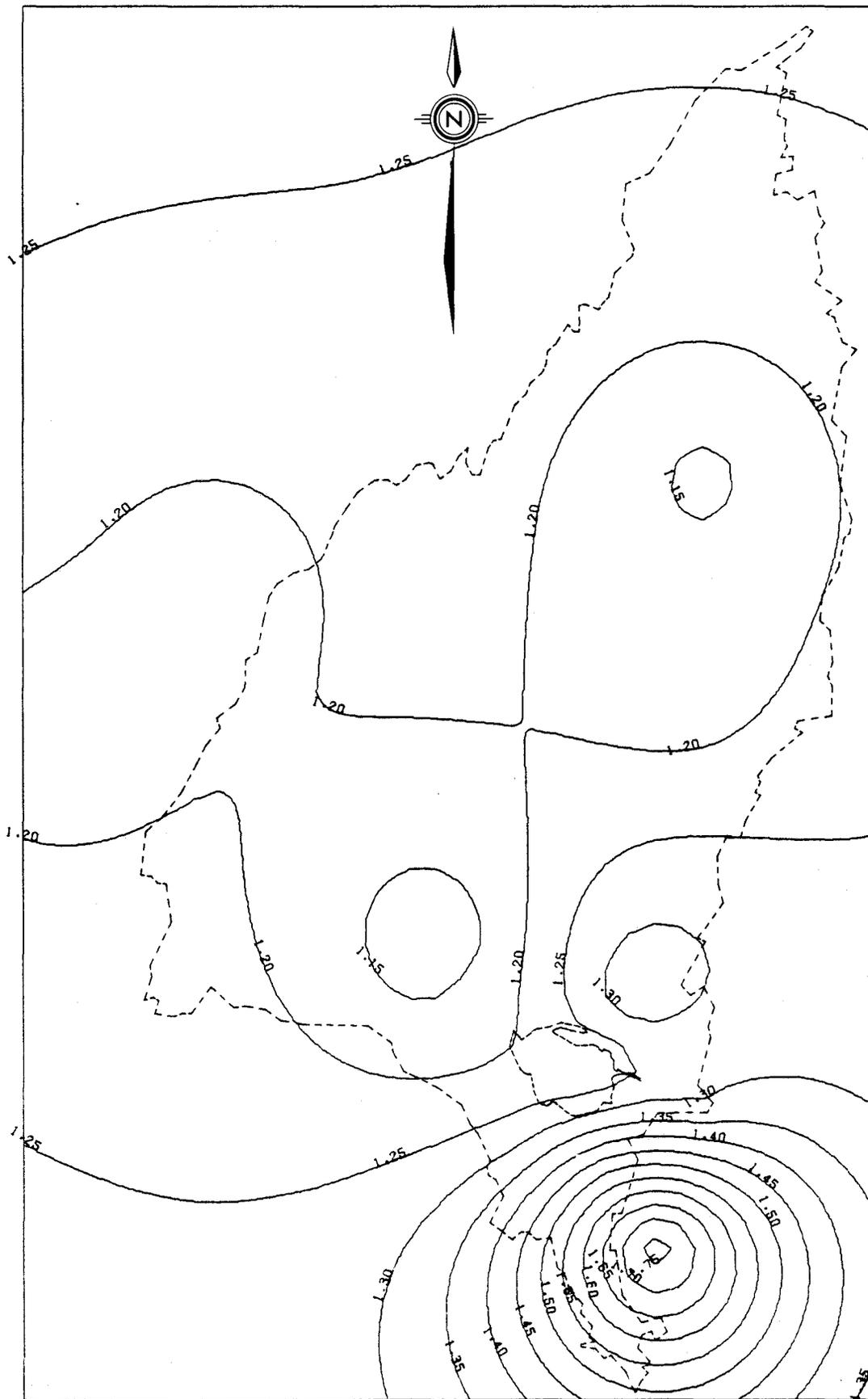


FIGURE 5.19 Précipitation moyenne pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

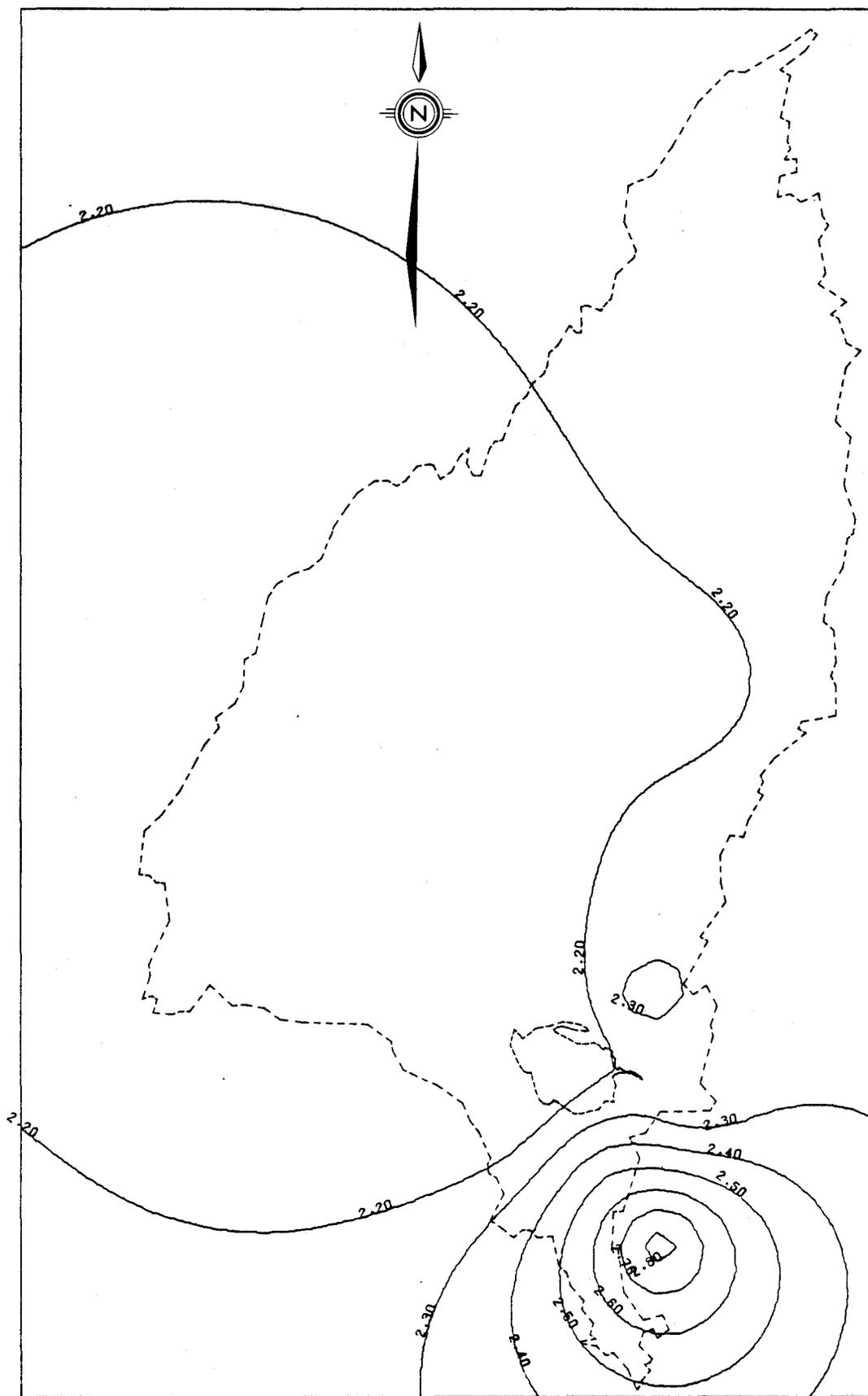


FIGURE 5.20 Précipitation moyenne pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

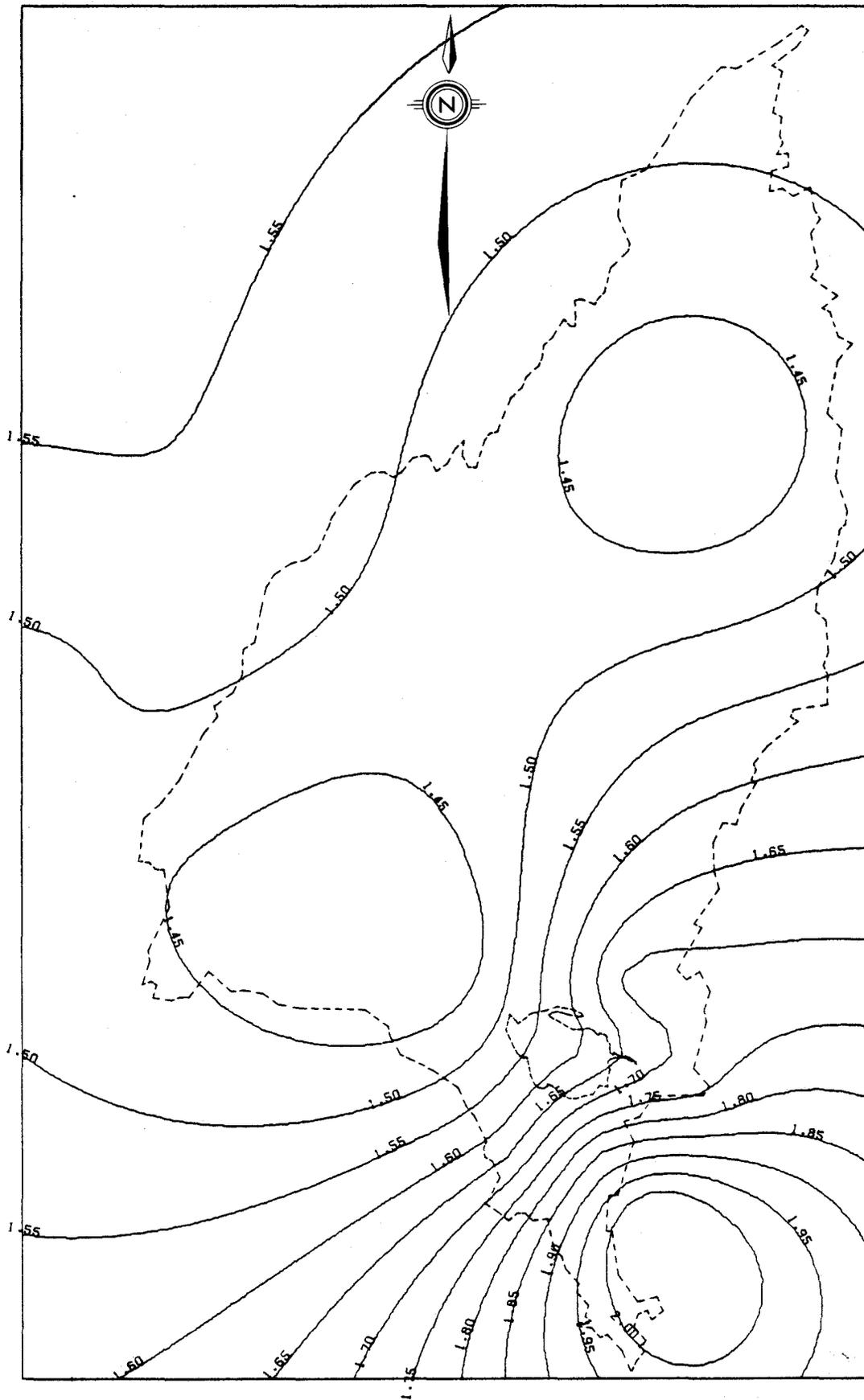


FIGURE 5.21 Précipitation moyenne pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (pouces) pour les années 1966 à 1975 obtenue par interpolation optimale des valeurs observées à 19 stations.

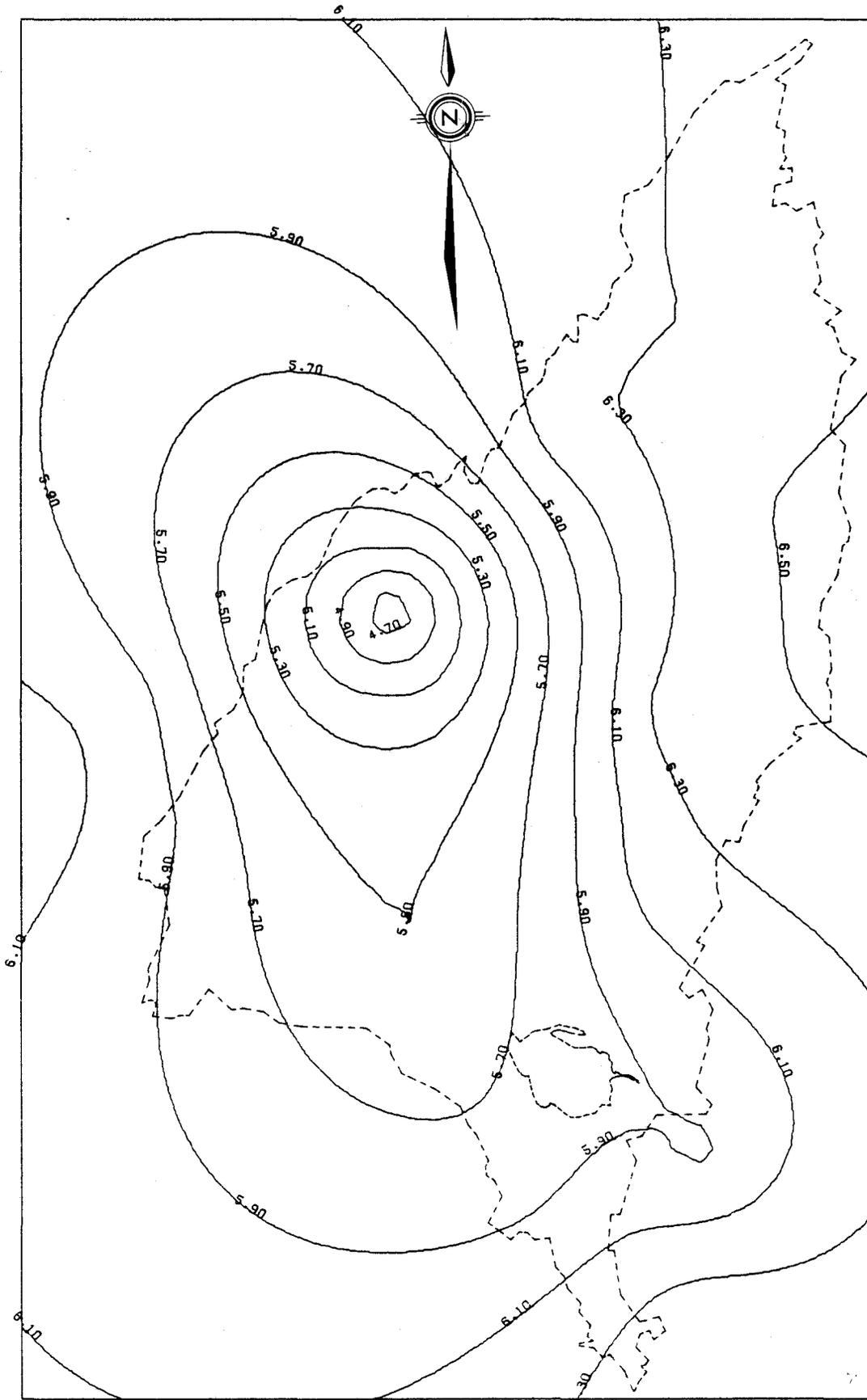


FIGURE 5.22 Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "JANVIER" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 23 stations.

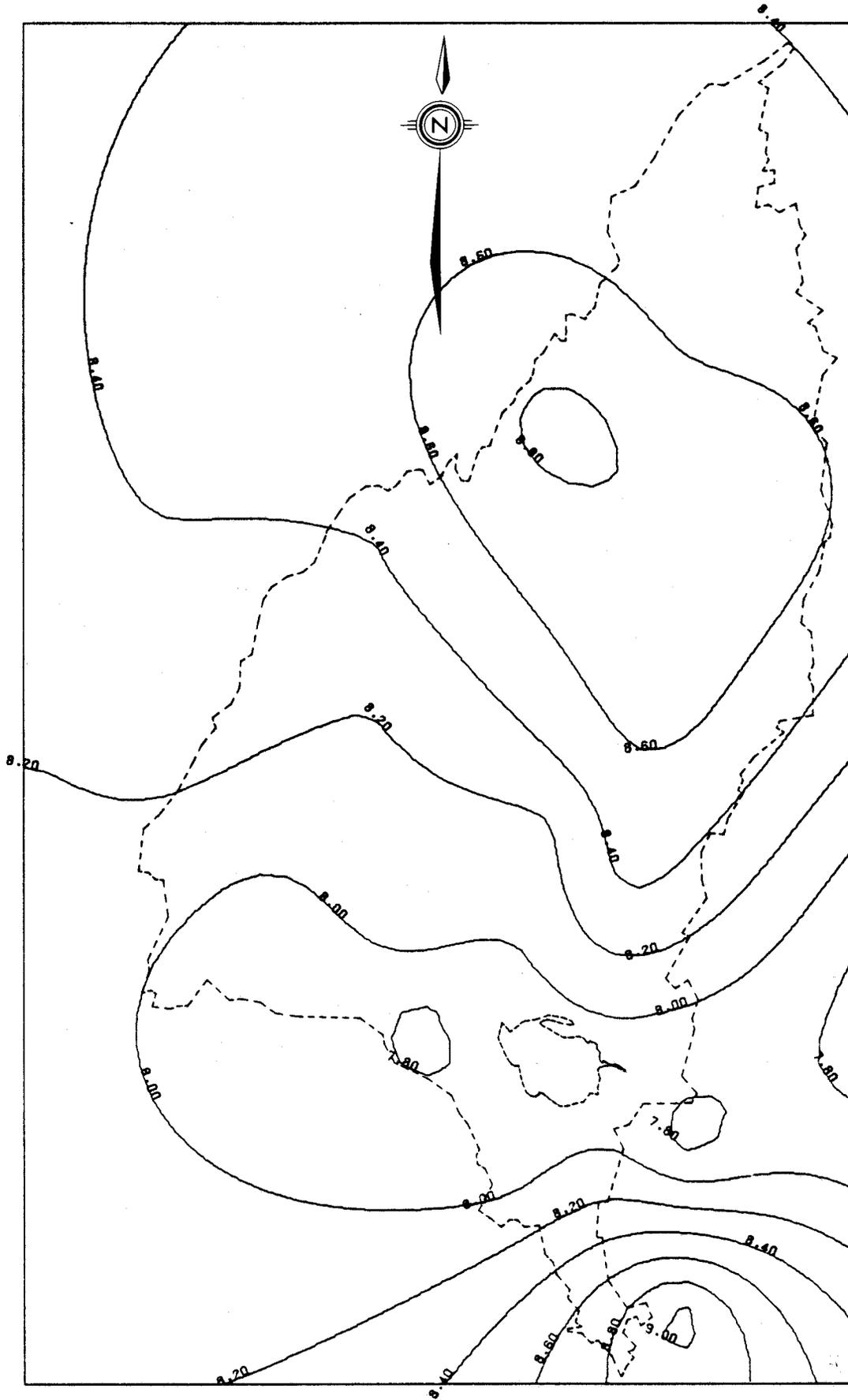


FIGURE 5.23 Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "FEVRIER" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 24 stations.

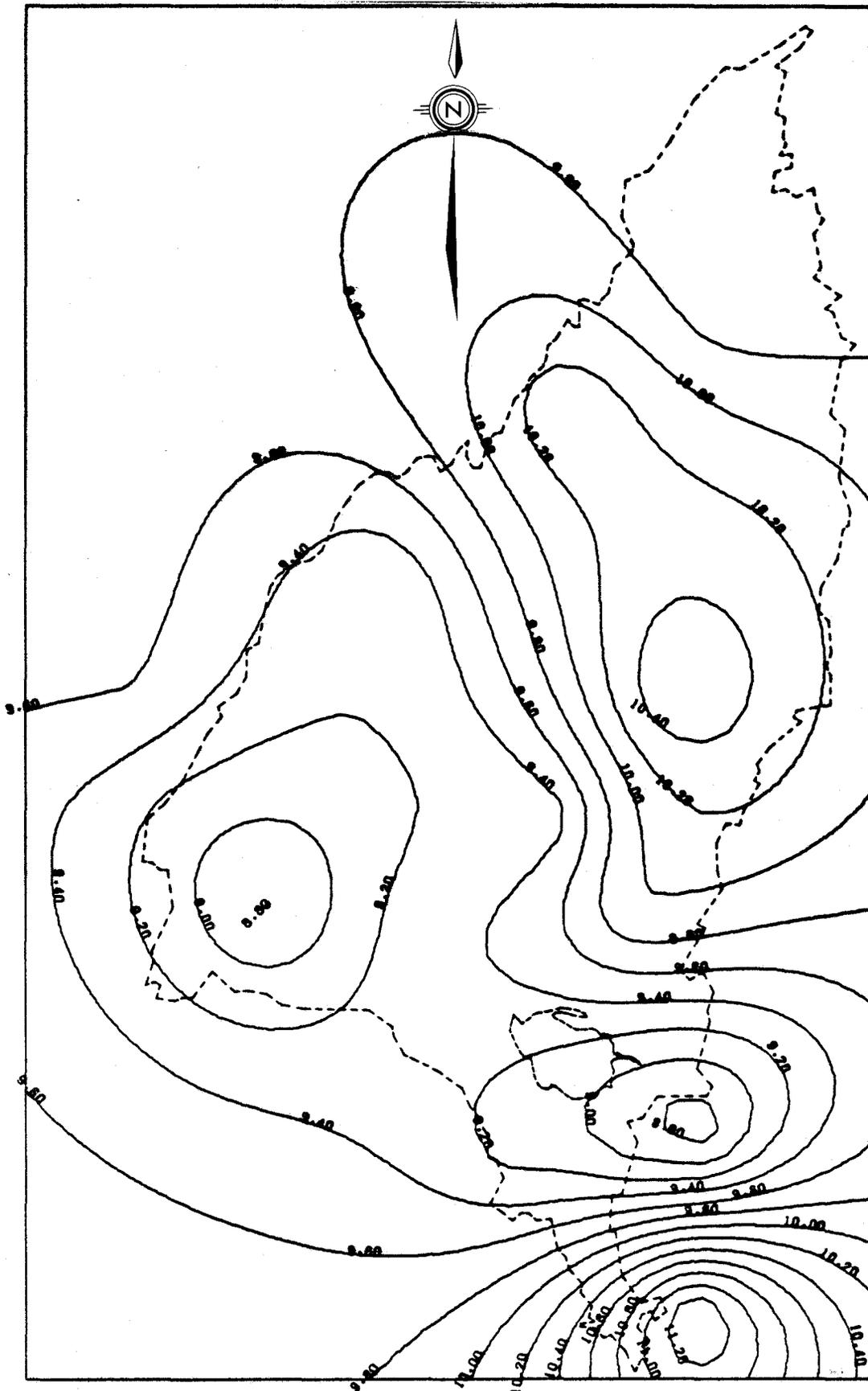


FIGURE 5.24 Equivalence moyenne en eau (pouces) de la neige au sol en "MARS" pour les années 1955 à 1977 obtenue par interpolation optimale des valeurs mesurées à 24 stations.

L'étude de ces mêmes figures montre que les précipitations sont plus importantes dans la partie sud du bassin versant. Sur le tableau 5.2 on observe d'ailleurs que les précipitations mesurées sont toujours plus importantes à la station Mont-Apica (7065100).

L'étude des isohyètes des précipitations annuelles (figure 5.13) montre que la valeur maximale tracée est de 50 pouces alors qu'on observe 56.35 pouces de précipitations au Mont-Apica. Cette différence entre la valeur calculée et la valeur observée à la station s'explique par le fait que la méthode d'interpolation optimale prend en compte les erreurs de mesure et de micro-climat dans les calculs.

#### 5.5 ECART TYPE DE L'ESTIMATION PONCTUELLE DES PRECIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU AU SOL SUR LE BASSIN VERSANT DU LAC SAINT-JEAN

Connaissant la fonction de structure d'un phénomène, on peut à l'aide de la méthode d'interpolation optimale, calculer l'écart type de l'estimation d'un réseau existant ou encore d'un réseau projeté en supposant que les fonctions de structure calculées sont valables pour toutes les stations qui seront implantées. Pour ce faire, en plus de la fonction de structure il suffit de connaître la position exacte des stations réelles ou fictives.

L'écart type d'estimation a été calculé pour cinq réseaux de stations météorologiques et deux réseaux de mesure de neige au sol, tel que proposé par la SECAL, qui a tenu compte de l'accessibilité des sites proposés pour les stations et des coûts d'implantation. Dans le but de

distinguer facilement dans le rapport les réseaux étudiés, on a numéroté de M1 à M5 les cinq réseaux météorologiques, et N1 et N2, les deux réseaux de mesure de neige au sol.

#### 5.5.1 "Réseau M1"

Le premier réseau étudié comprend les 19 stations utilisées dans l'analyse en composantes principales et pour le calcul des fonctions de structure. Le numéro et le nom de ces stations sont présentés au tableau 4.1 tandis que leur position sur le bassin versant du lac Saint-Jean apparaît à la figure 4.1.

Pour tracer les iso-erreurs on a calculé l'erreur ponctuelle à l'aide de l'équation (5-10) à tous les points centre de la grille de 10 km par 10 km utilisée.

Les figures 5.25 à 5.33 montrent les écarts types d'estimation des précipitations ponctuelles pour les neuf périodes étudiées.

L'écart type d'estimation des précipitations moyennes annuelles (figure 5.25) a une valeur minimale de 2.40 pouces. Cette valeur minimale comprend l'erreur de mesure et de micro-climat et l'erreur d'interpolation. Sur cette figure on peut déterminer approximativement la position des stations qui ont servi aux calculs en se référant aux iso-erreurs minimales.

L'étude des figures 5.26 à 5.29 indique des erreurs maximales dans le nord du bassin nettement plus élevées en été et en automne

(figures 5.28 et 5.29) qu'en hiver et au printemps (figures 5.26 et 5.27). Les erreurs sont en effet deux fois plus grandes dans la deuxième moitié de l'année que dans la première, 2.50 pouces contre 1.30 pouces. Les valeurs minimales atteignent pour leur part un maximum en été (figure 5.28), alors qu'elles sont les plus faibles au printemps avec 0.30 pouce (figure 5.27). Ces diverses observations ne sont pas surprenantes, si l'on se reporte aux fonctions de structure correspondant à ces diverses saisons (figures 5.2 à 5.5). Les valeurs des fonctions de structure pour des distances de l'ordre de 100 milles sont relativement plus faibles en hiver et au printemps qu'en été et en automne, indiquant un lien plus fort entre les stations à cette distance pour les premières saisons que pour les dernières. De même, le comportement des fonctions de structure aux faibles distances est traduit dans les erreurs minimales observées.

Si l'on passe aux précipitations cumulées sur 15 jours, on observe généralement les mêmes variations d'une saison à l'autre (figures 5.30 à 5.33). Encore une fois les valeurs les plus élevées sont observées en été. De fait, en tout point du bassin, l'écart type d'estimation est de 0.2 à 0.3 pouce supérieur à celui des autres saisons.

Compte tenu de la répartition géographique des stations, les erreurs calculées les plus grandes se situent dans tous les cas au nord et au nord-ouest du bassin, par suite de l'absence de stations.

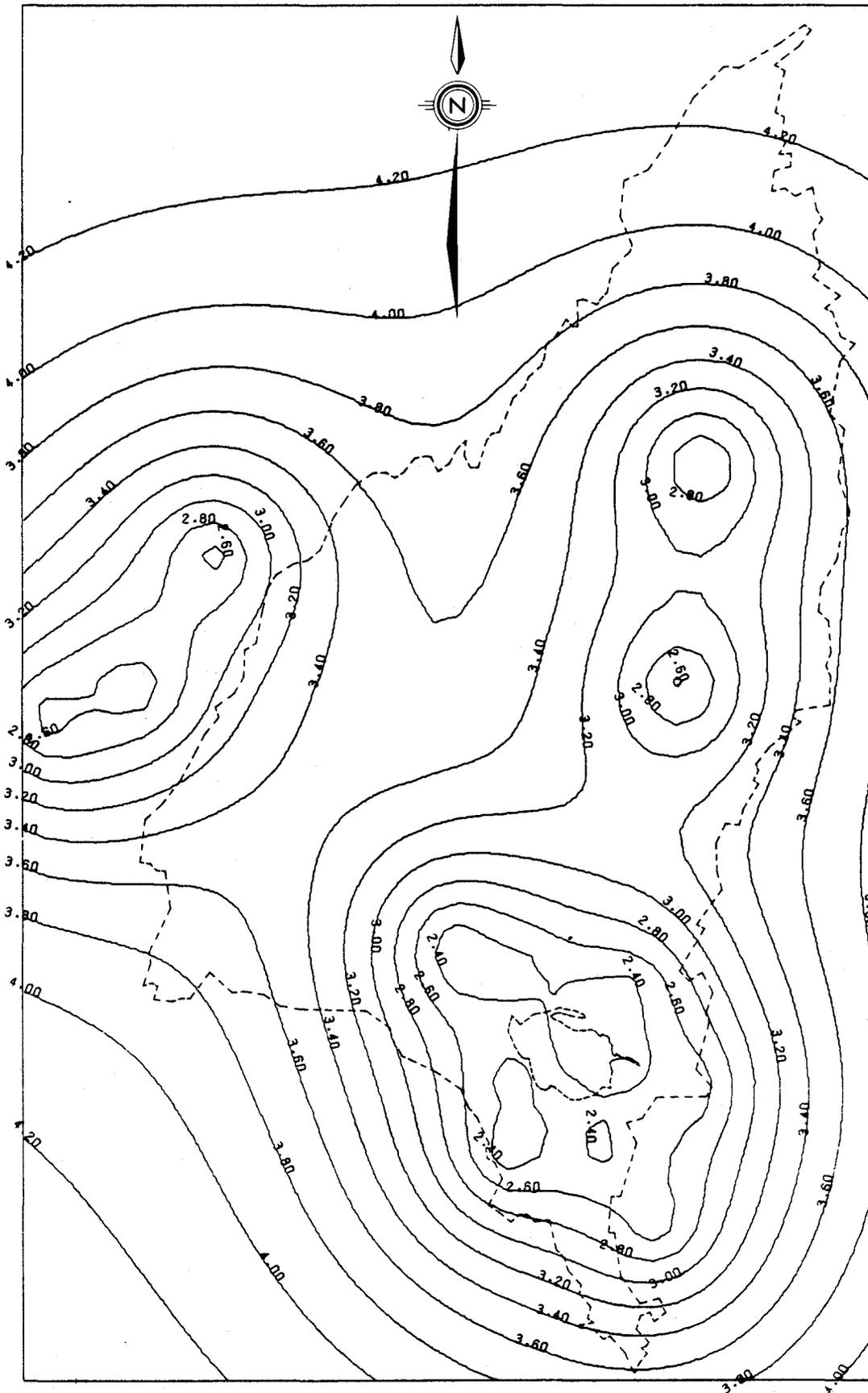


FIGURE 5.25 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M1, 19 stations).

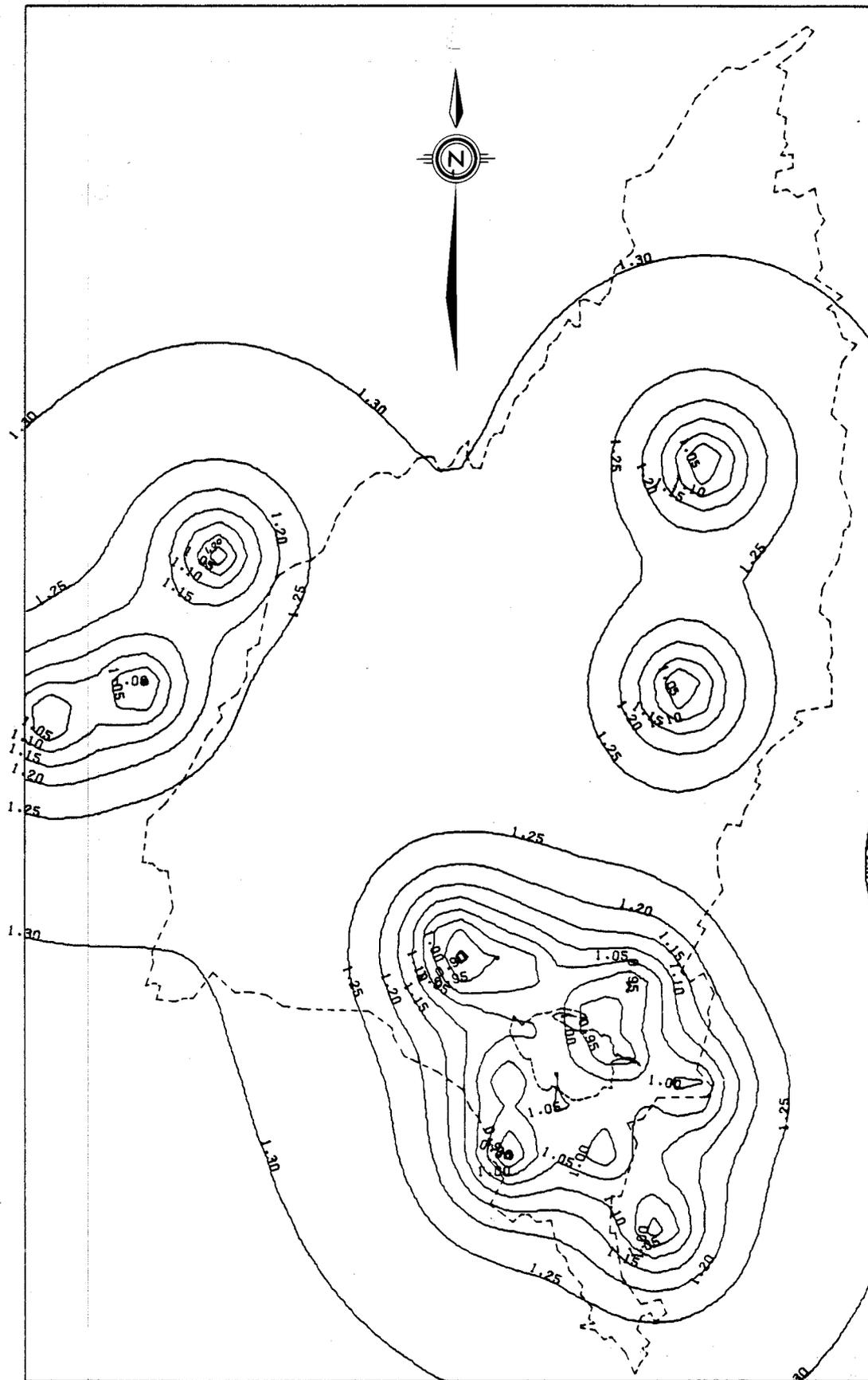


FIGURE 5.26 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M1, 19 stations).

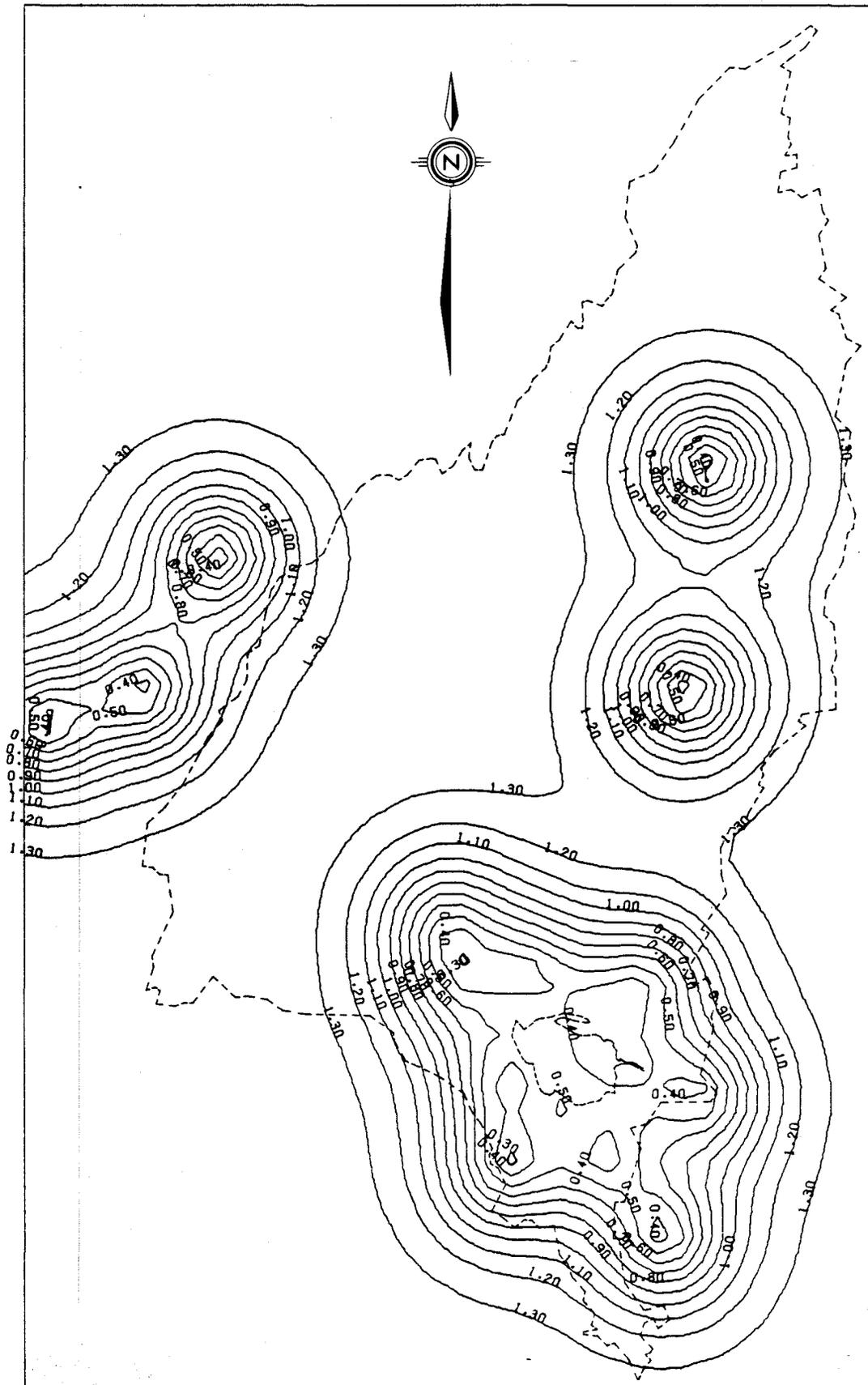


FIGURE 5.27 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M1, 19 stations).

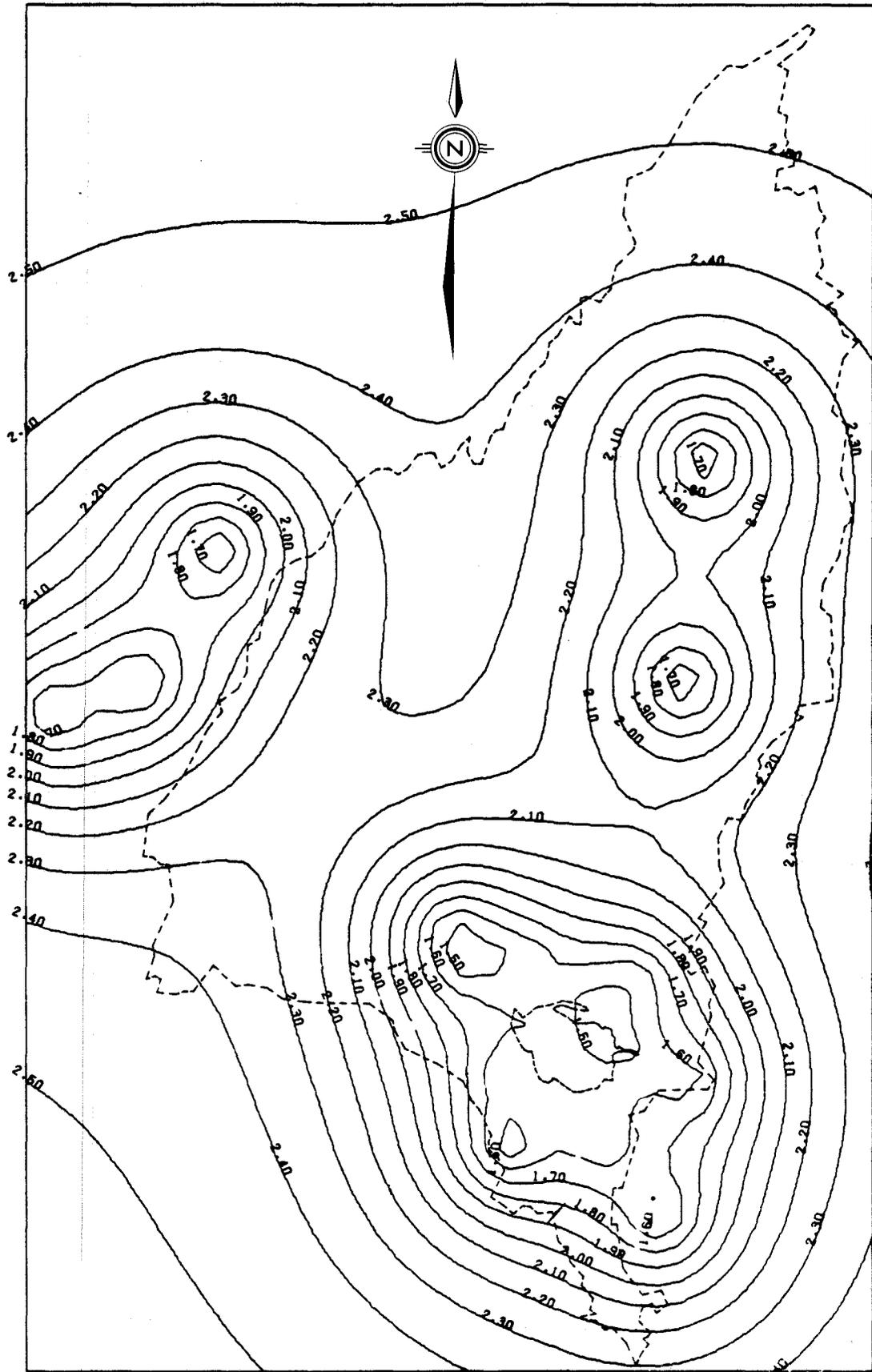


FIGURE 5.28 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M1, 19 stations).

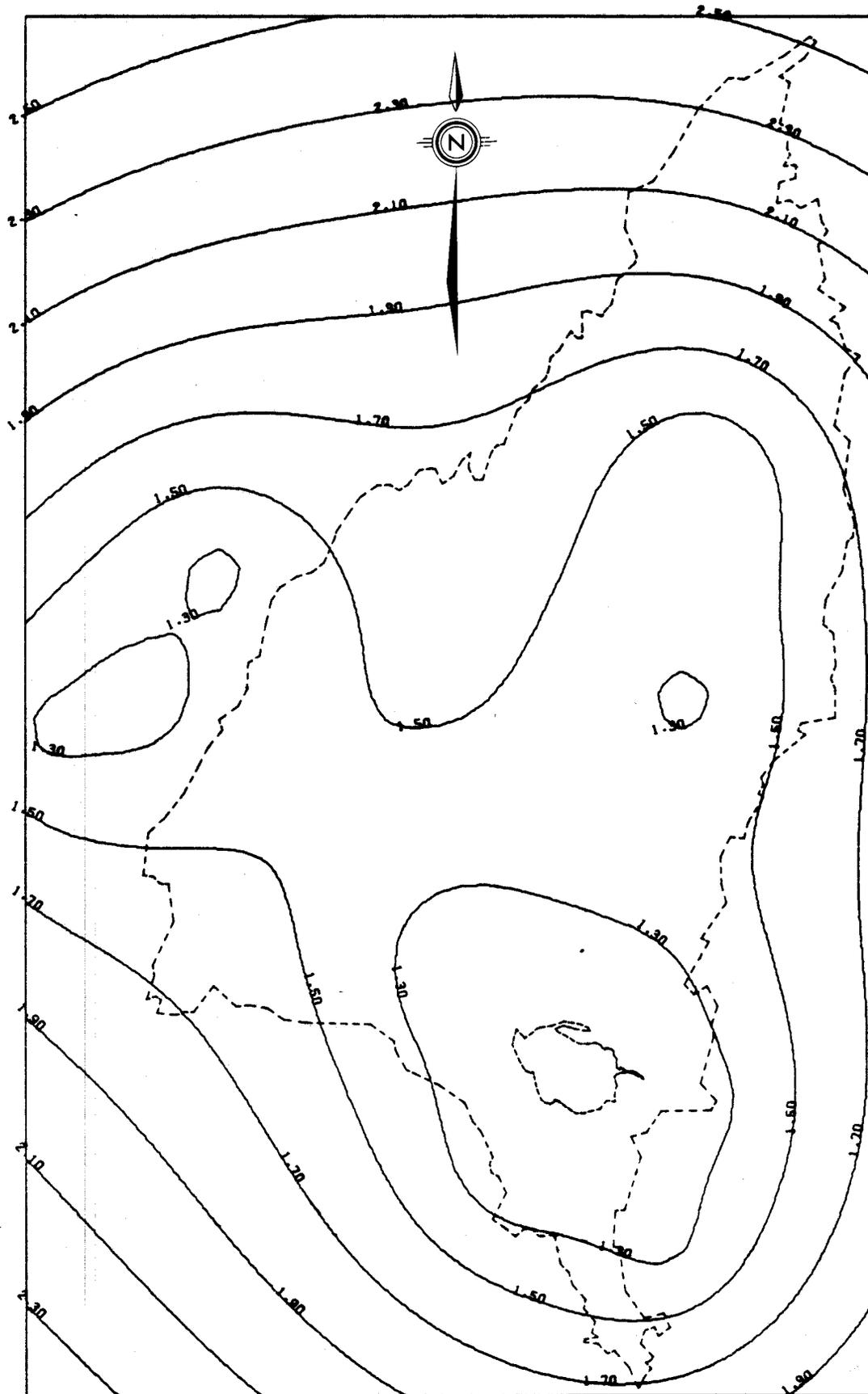


FIGURE 5.29 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M1, 19 stations).

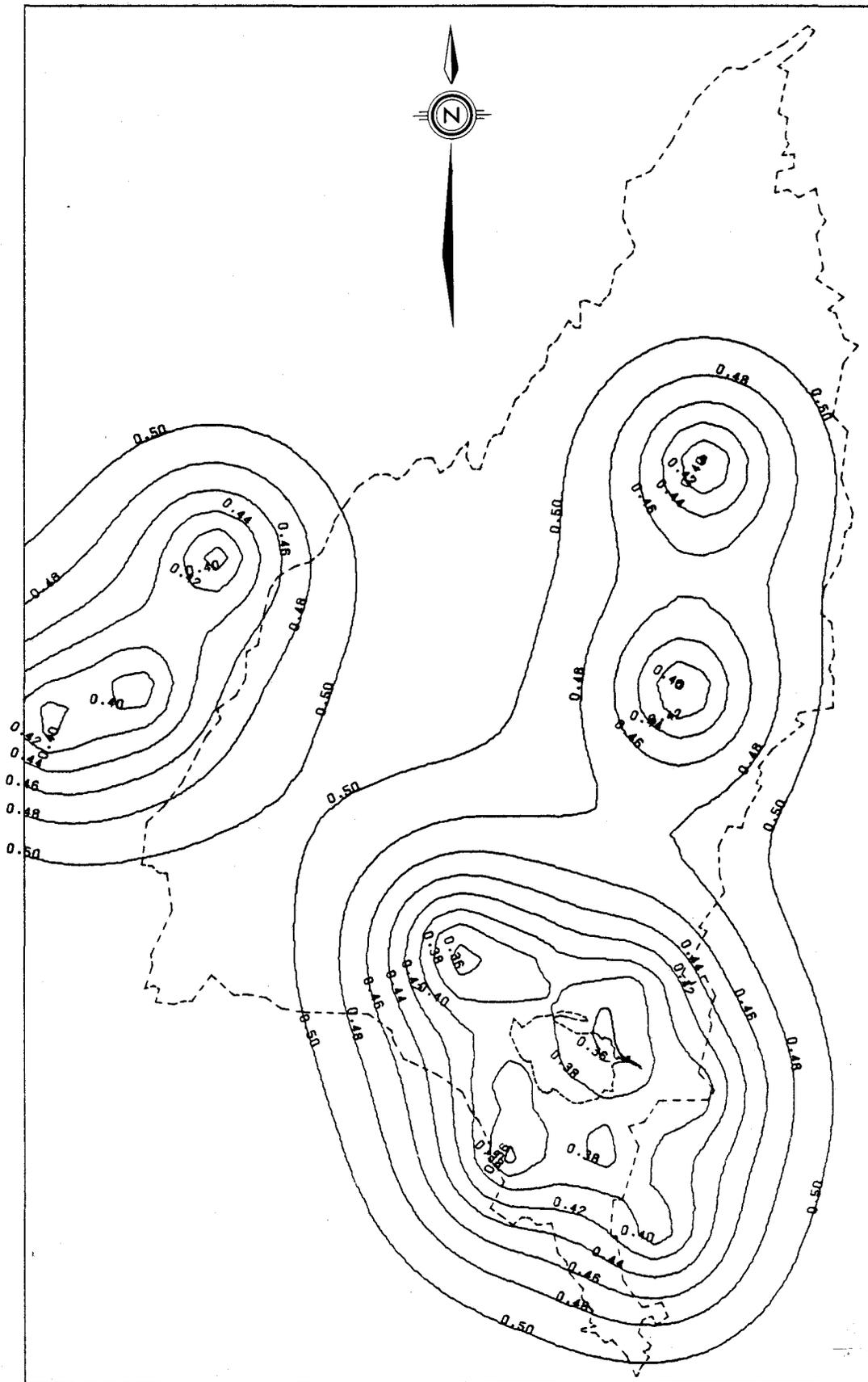


FIGURE 5.30 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).

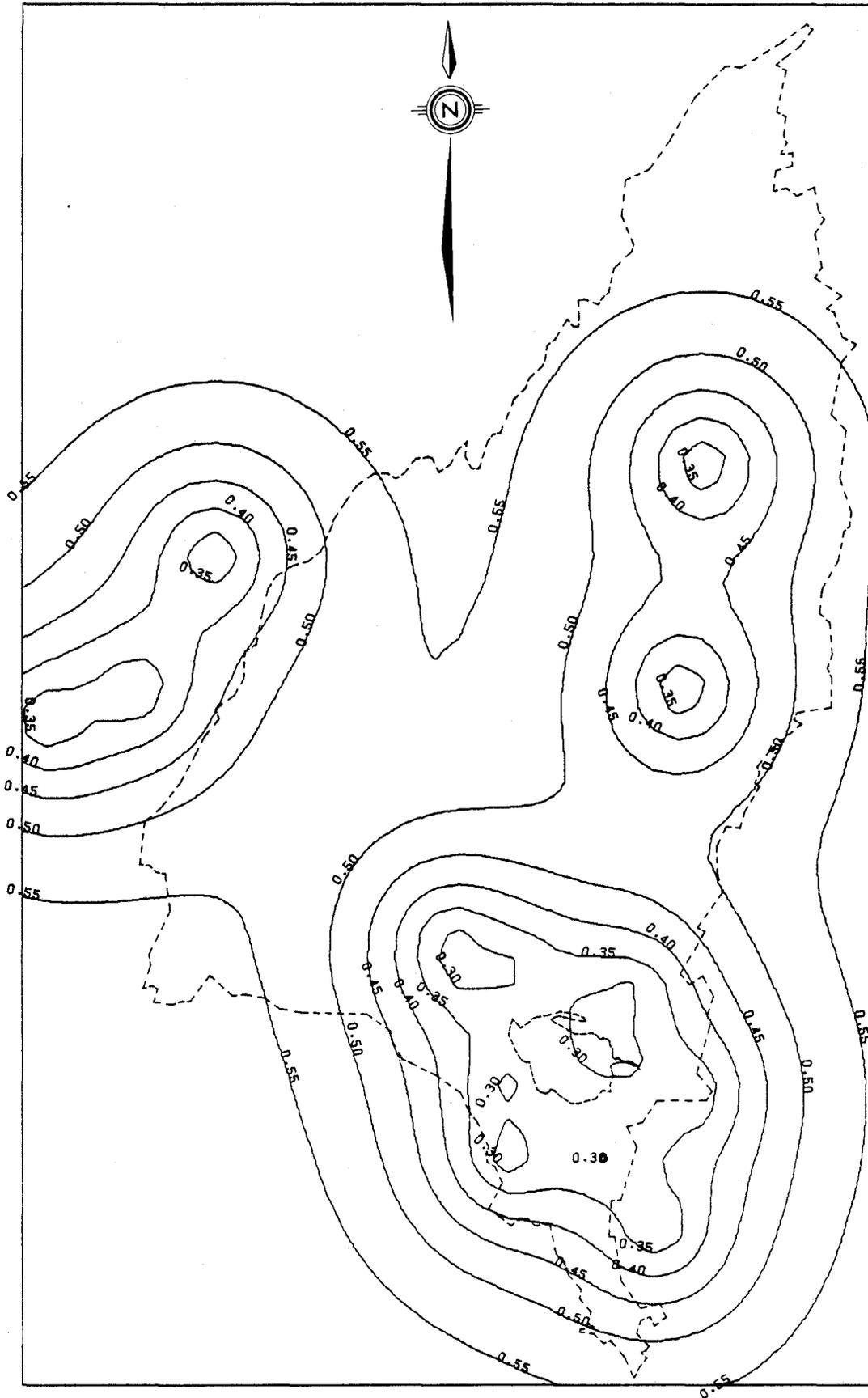


FIGURE 5.31 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).

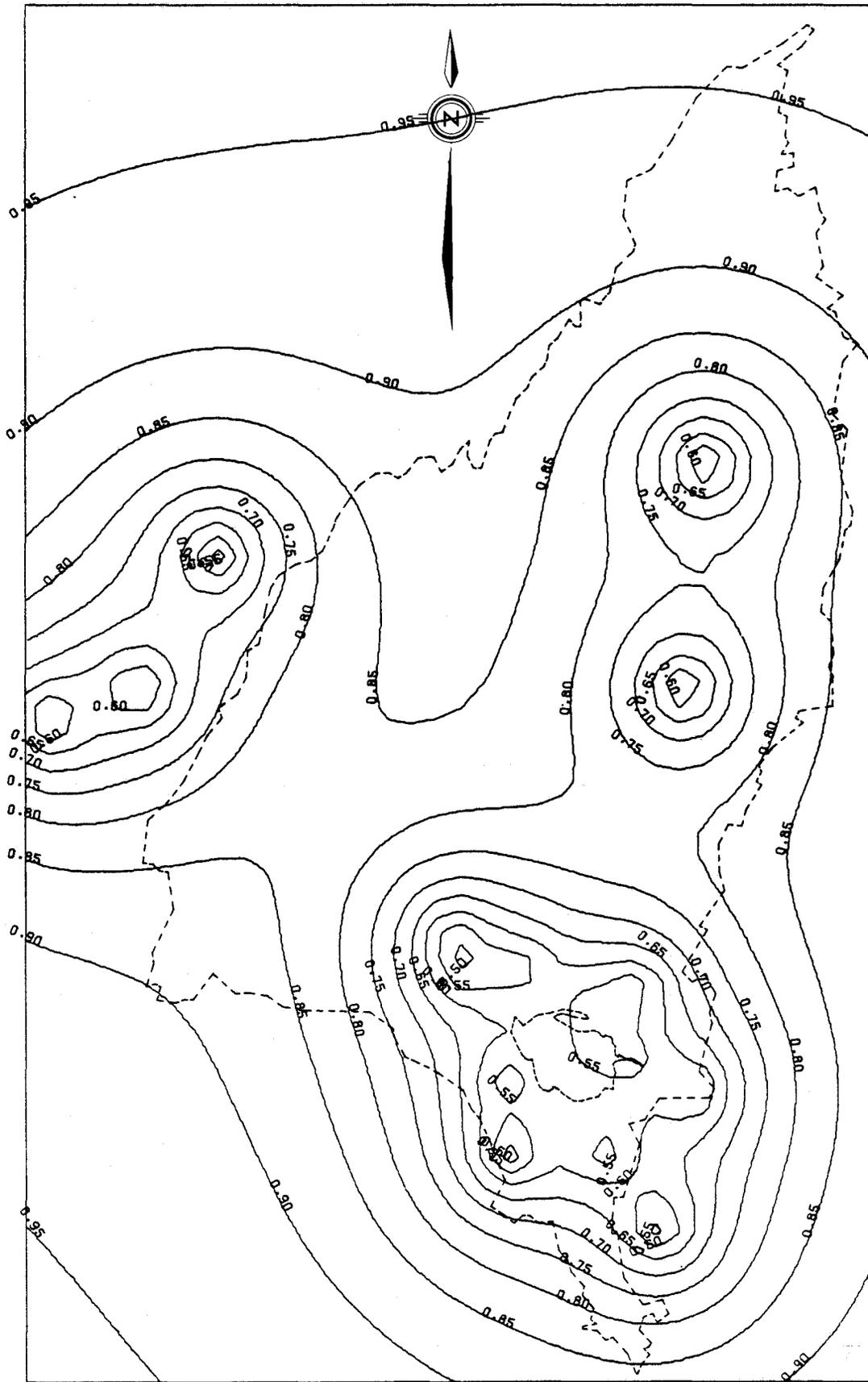


FIGURE 5.32 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).

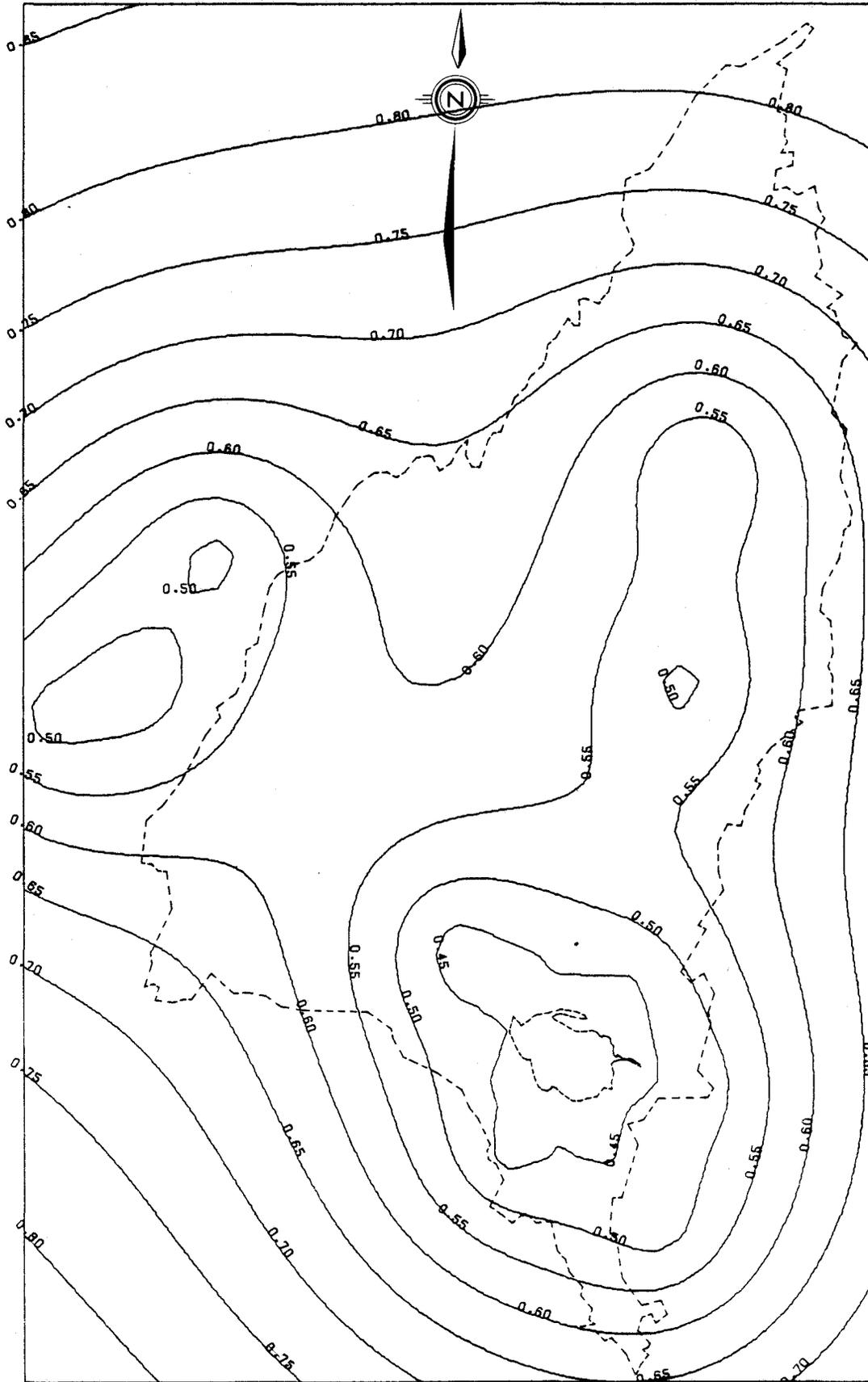


FIGURE 5.33 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M1, 19 stations).

### 5.5.2 "Réseau M2"

Le second réseau proposé par SECAL prend en compte les 30 stations disponibles; c'est-à-dire les 26 stations permanentes et les quatre stations automatiques. Le nom et le numéro fédéral de ces stations apparaissent au tableau 2.1 et leur position sur le bassin versant du lac Saint-Jean est montré à la figure 2.1.

Les iso-écarts types d'estimation des précipitations avec ce réseau de 30 stations sont tracés pour les neuf périodes (figures 5.34 à 5.42). Comme précédemment, on observe que les iso-erreurs sont centrées sur la position des stations et les variations observées, d'une période à l'autre, s'expliquent facilement par les fonctions de structure. Les écarts types d'estimation sont plus faibles que ceux calculés pour le "Réseau M1" principalement dans le nord du bassin versant, où quelques stations ont été ajoutées.

Plus précisément, comme les nouvelles stations proposées par rapport au réseau M1 sont surtout ajoutées dans les parties du bassin où la densité de stations était faible dans le réseau précédent, les écarts types maximaux sont en général plus faibles que dans le cas précédent. Ainsi l'écart type des précipitations annuelles passe de 4.20 pouces (figure 5.25) à 3.50 pouces (figure 5.34), celui des précipitations d'automne de 2.50 pouces (figure 5.29) à 1.60 pouces (figure 5.38) et celui des précipitations d'automne cumulées sur 15 jours de 0.80 pouce (figure 5.33)

à 0.55 pouce (figure 5.42). Les valeurs minimales deviennent toutefois à peu près inchangées, puisque la densité de stations n'est pas modifiée de façon appréciable autour du lac Saint-Jean, partie du bassin déjà la mieux pourvue en stations. Ajoutons ici que ces erreurs minimales ne peuvent être inférieures aux erreurs de mesure et de micro-climat qui constituent une limite inférieure à la précision obtenue, quel que soit le nombre de stations.

D'autre part, même si, pour certaines périodes les valeurs maximales et minimales des écarts types ponctuels deviennent les mêmes en passant du réseau M1 au réseau M2 (figures 5.27 et 5.36; figures 5.30 et 5.39), il n'en va pas de même de la distribution géographique des écarts types. En particulier, l'introduction des stations Nos 3, 28 et 27 selon un axe SSO-NNE dans la partie ouest du bassin, a un effet marqué sur la précision des estimations dans cette région.

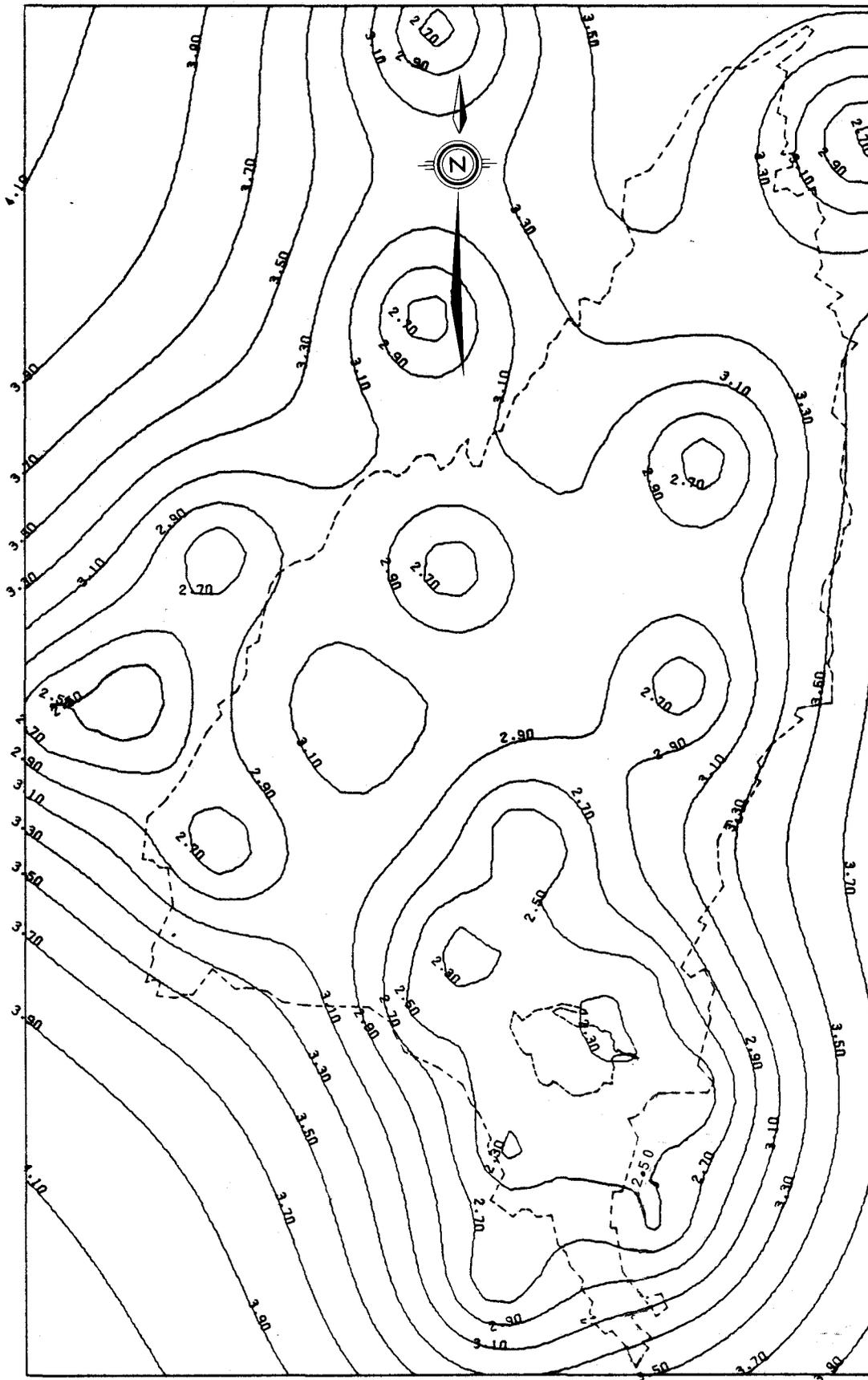


FIGURE 5.34 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M2, 30 stations).

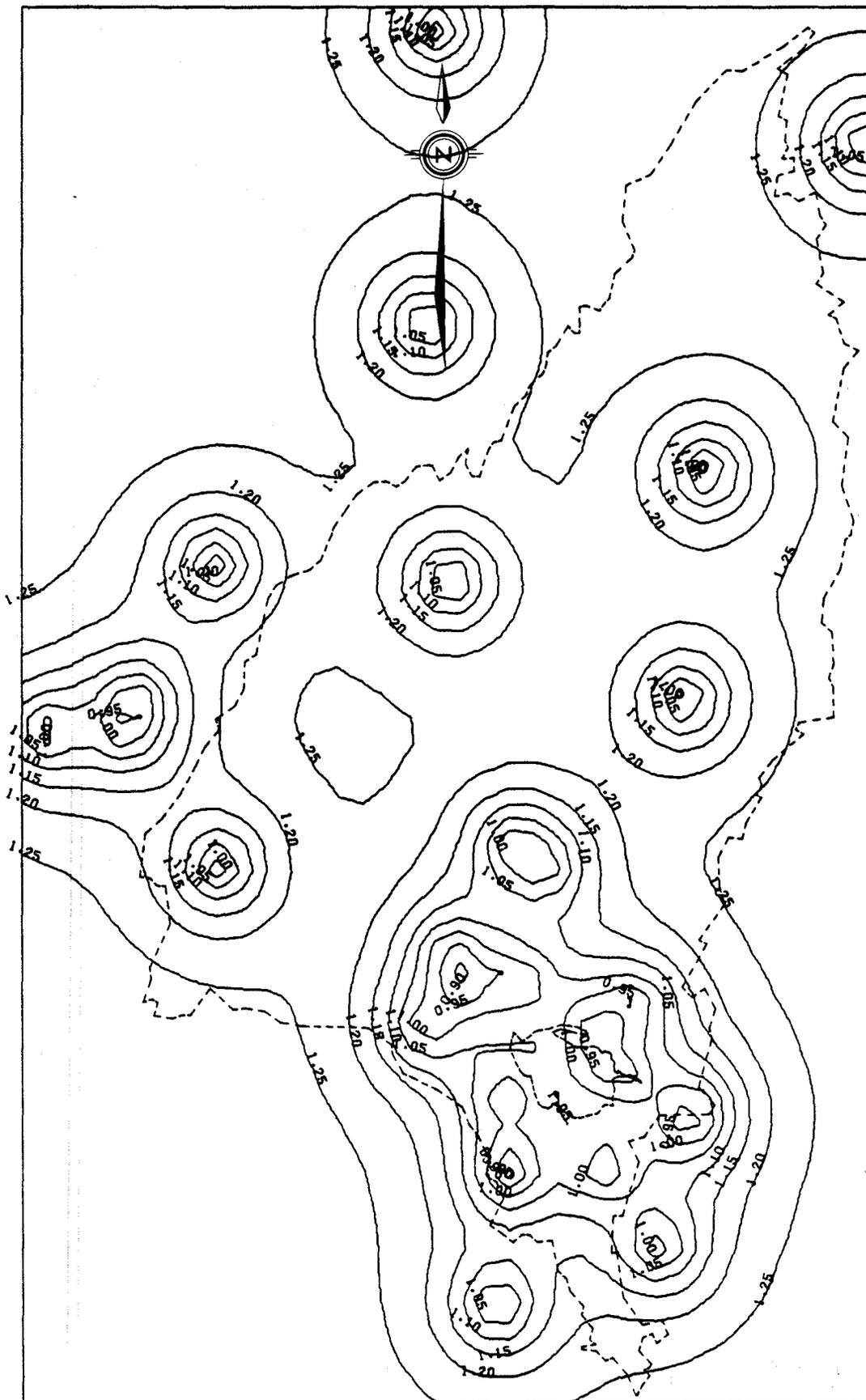


FIGURE 5.35 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M2, 30 stations).

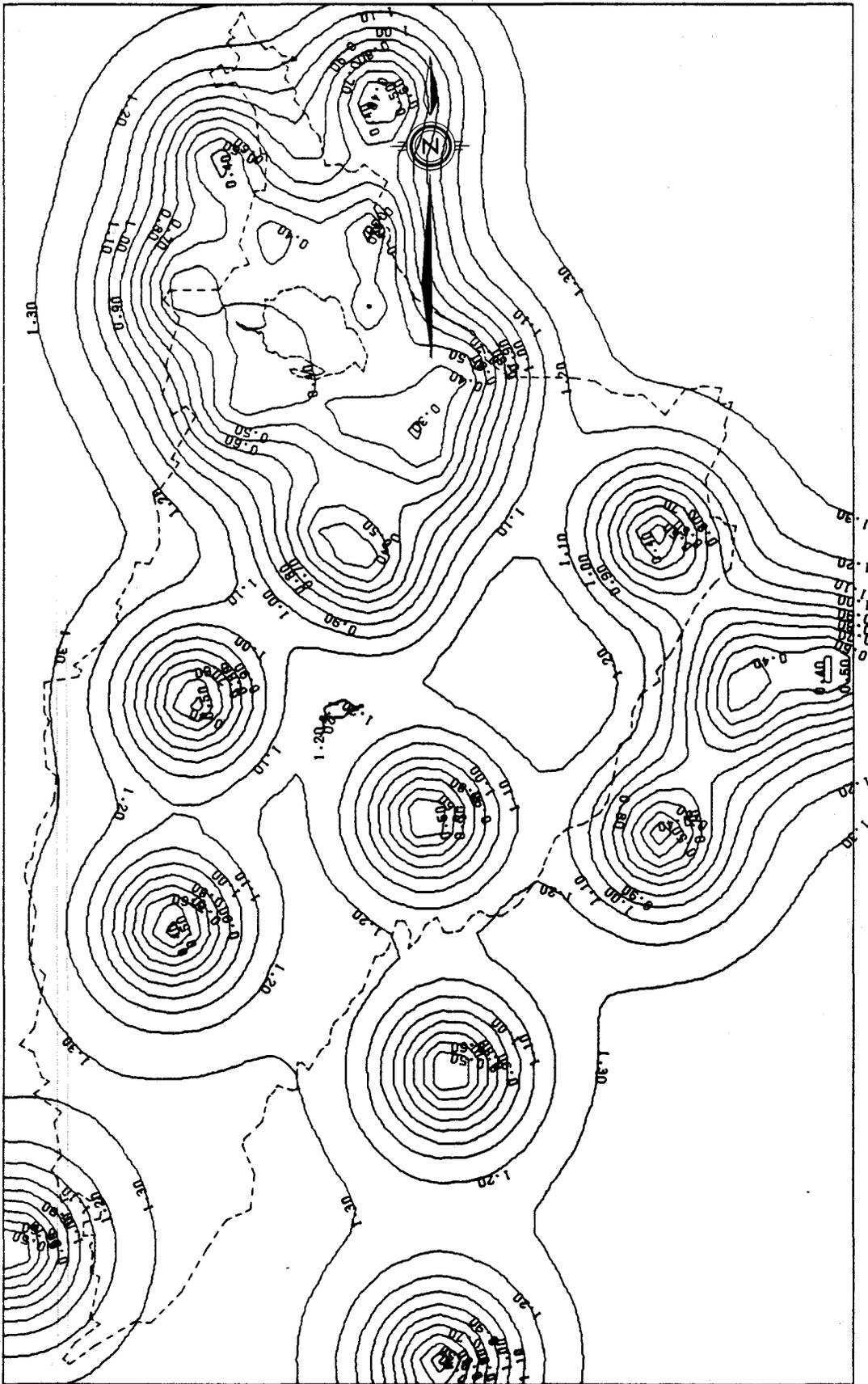


FIGURE 5.36 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M2, 30 stations).

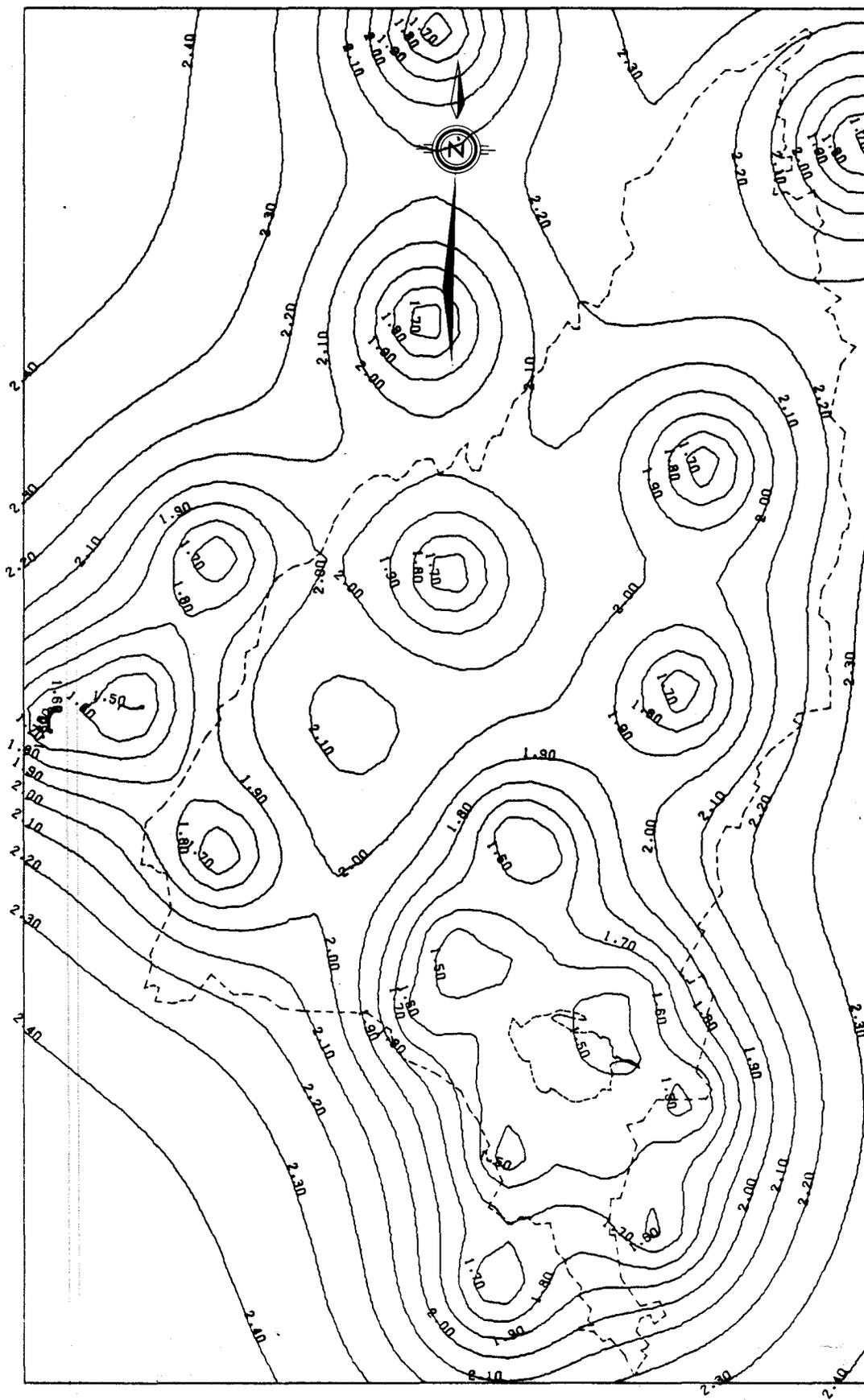


FIGURE 5.37 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M2, 30 stations).

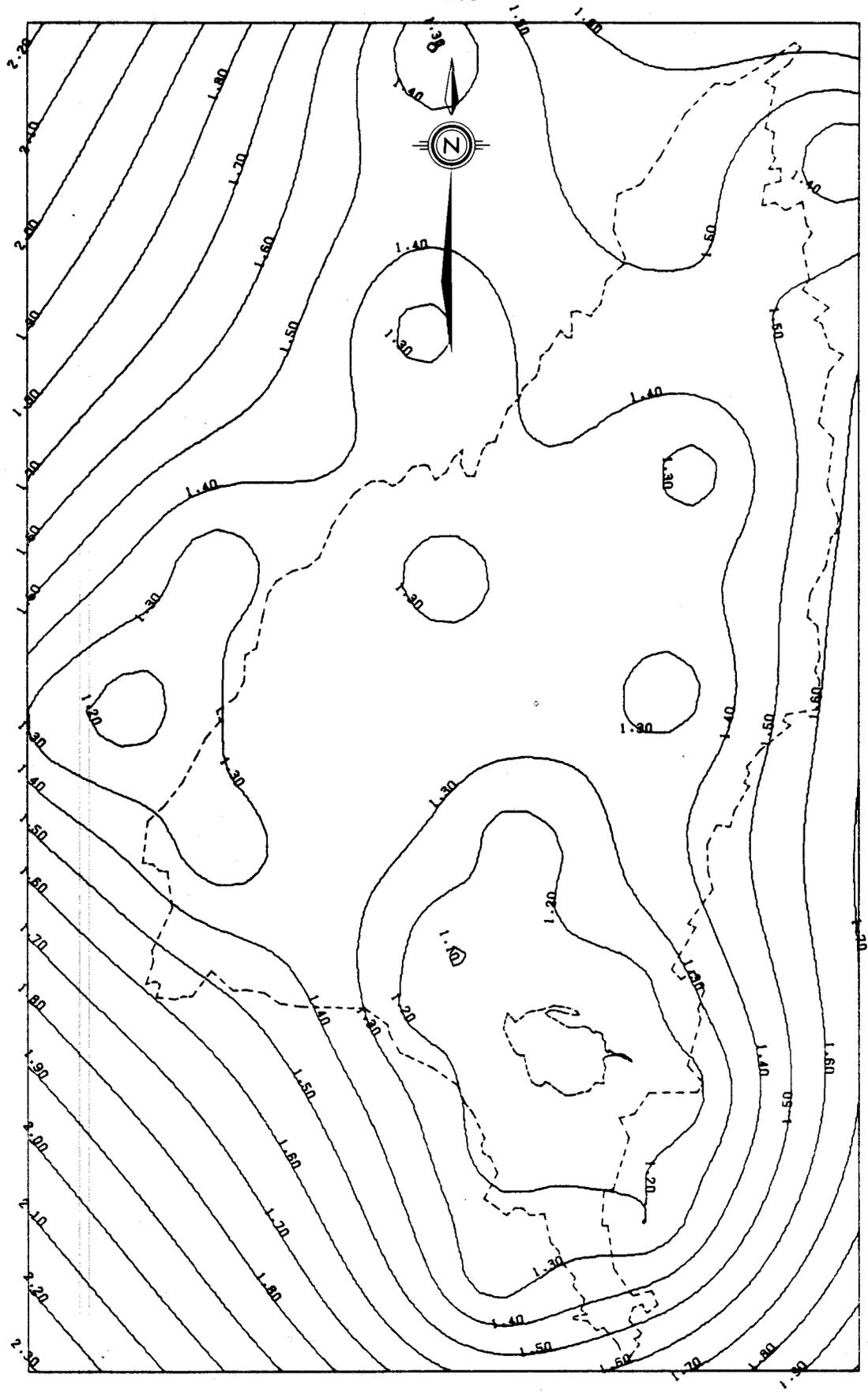


FIGURE 5.38 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M2, 30 stations).

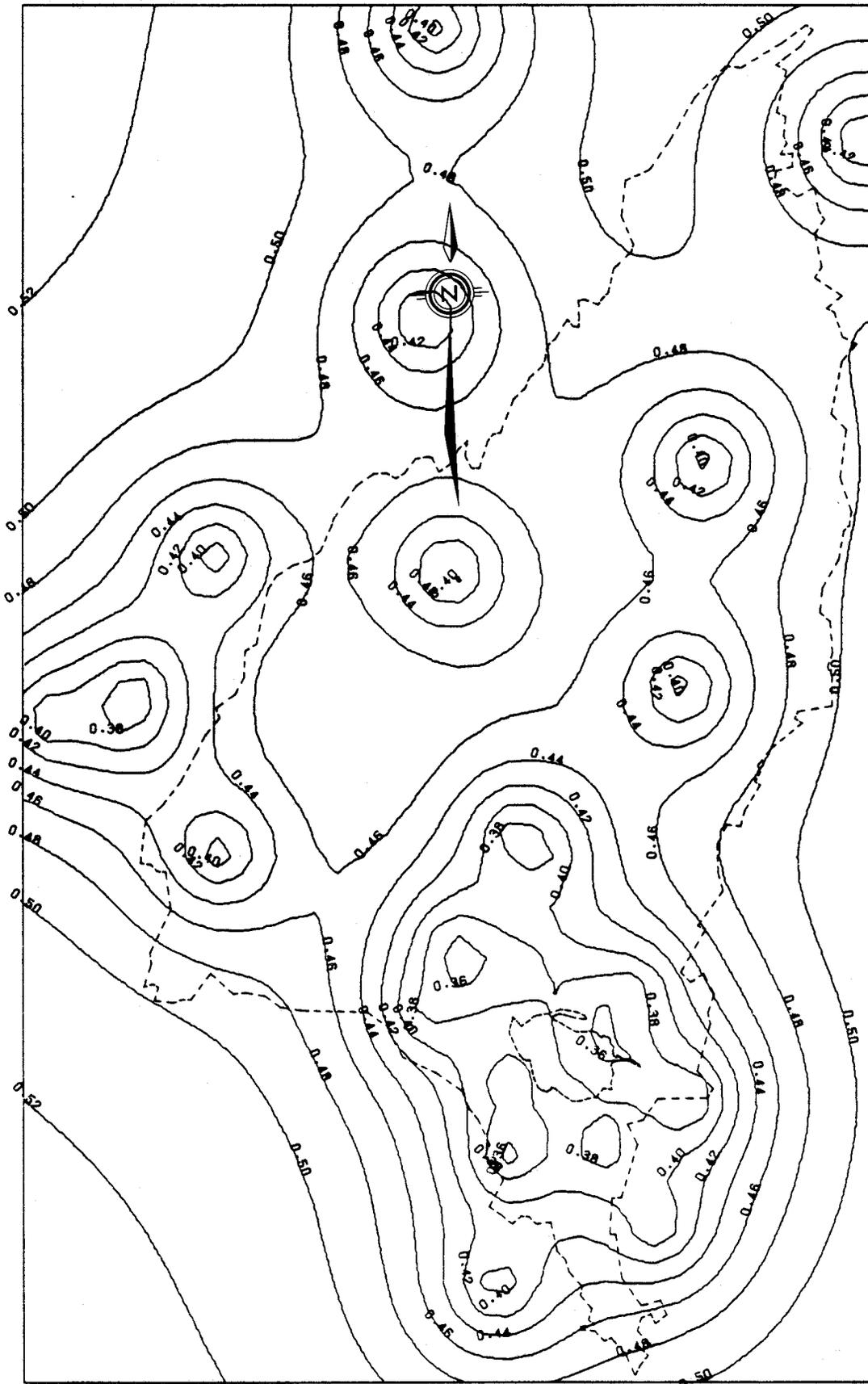


FIGURE 5.39 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).

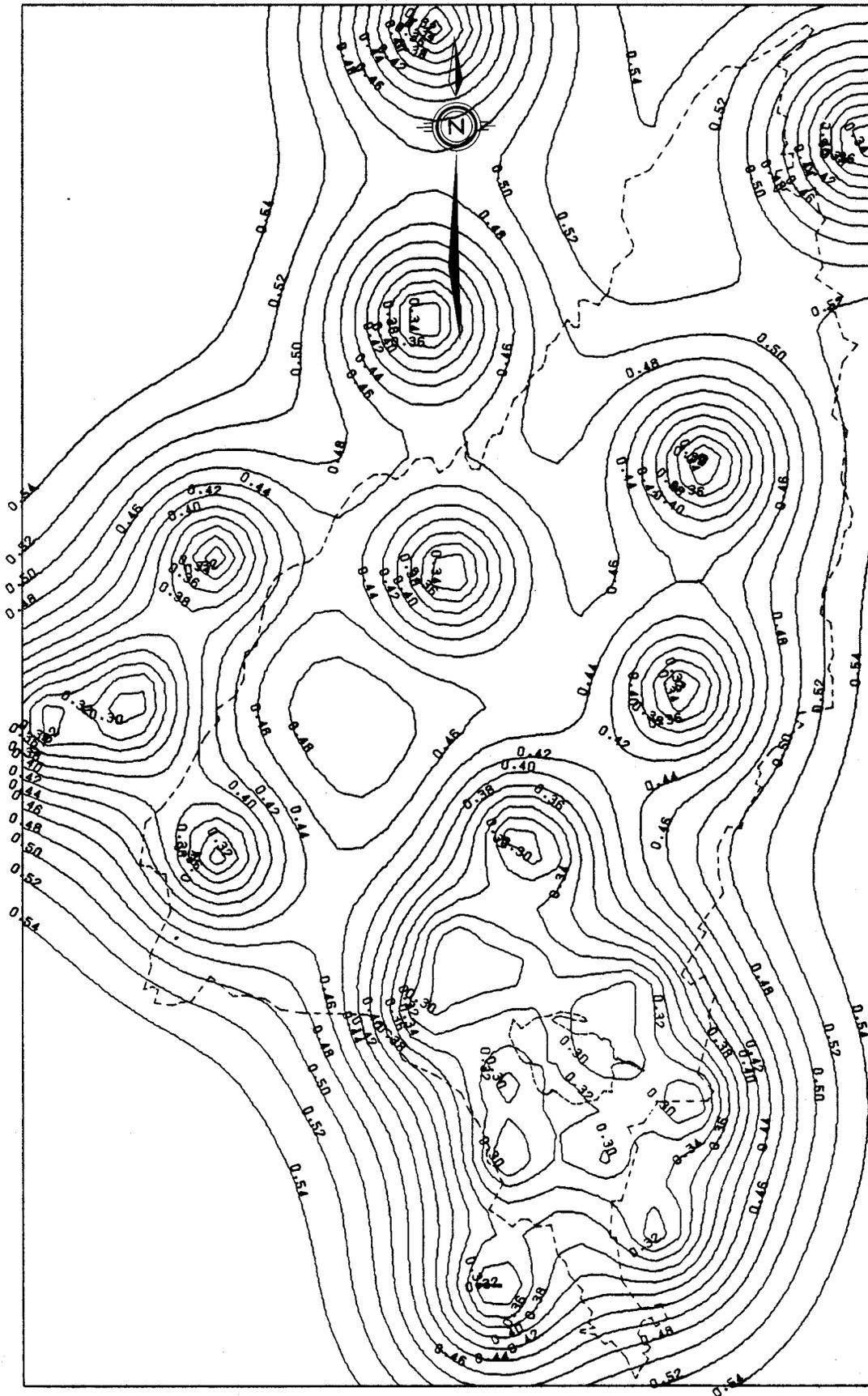


FIGURE 5.40 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).

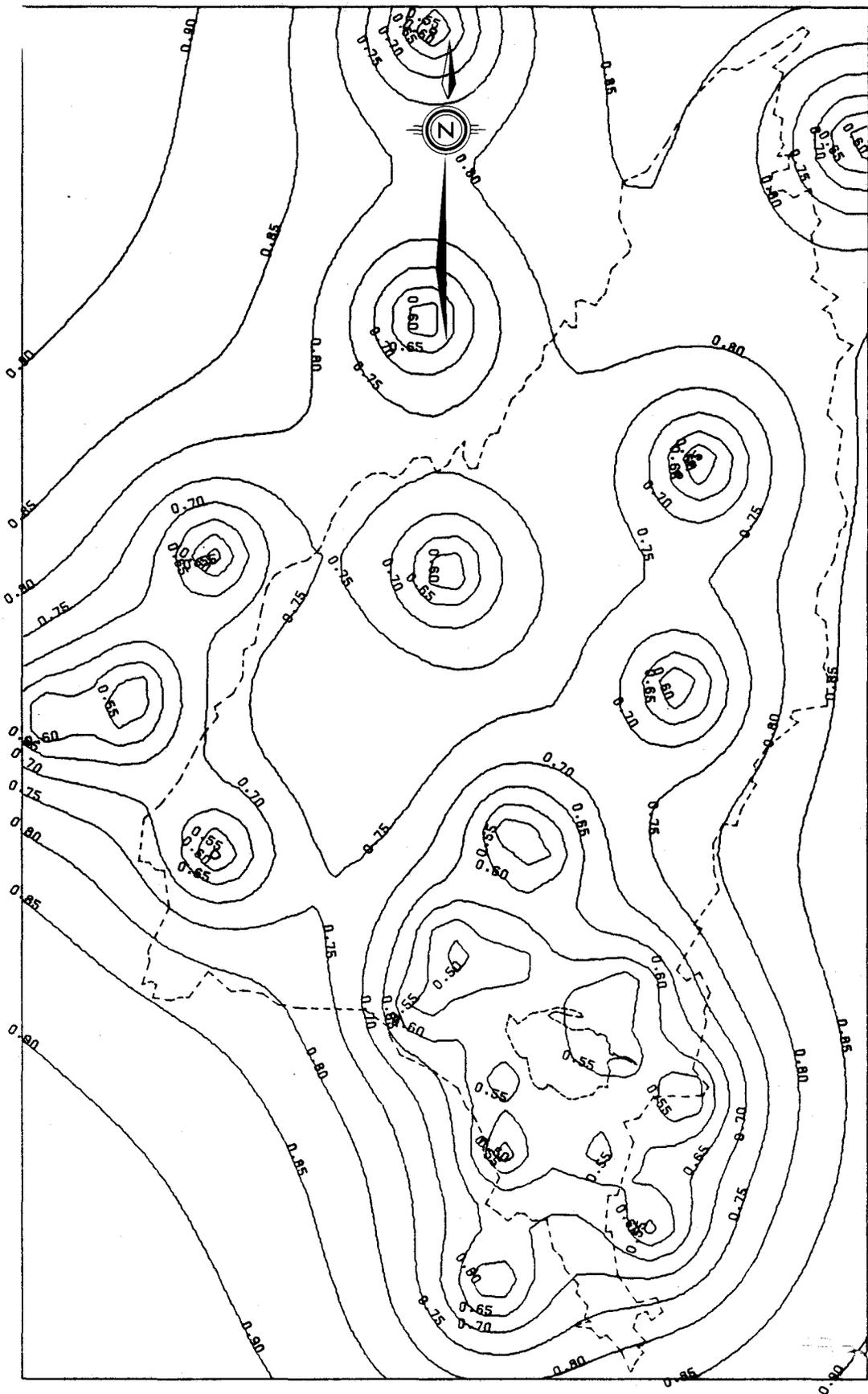


FIGURE 5.41 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours". (réseau M2, 30 stations).

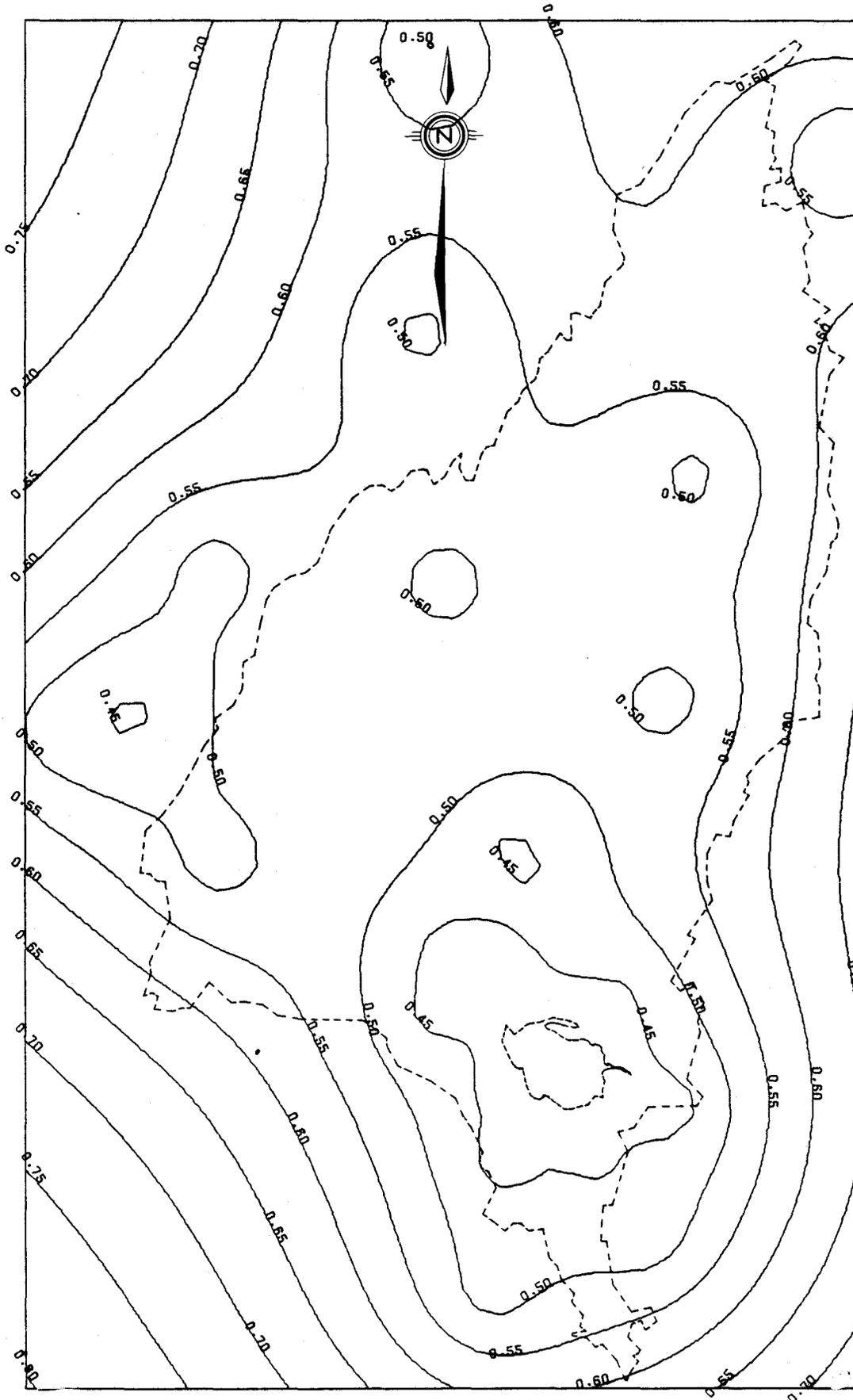


FIGURE 5.42 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M2, 30 stations).

### 5.5.3 "Réseau M3"

Le troisième réseau proposé comprend les 10 stations météorologiques pour lesquelles les données sont disponibles sur le système informatique de la SECAL. Ces 10 stations sont identifiées au tableau 5.4 et la répartition de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean est montrée à la figure 5.43.

Les écarts types d'estimation des précipitations, pour chacune des neuf périodes étudiées apparaissent aux figures 5.44 à 5.52. Les remarques formulées pour les réseaux précédents s'appliquent également ici.

Avec un nombre restreint de stations, ce réseau ne conduit pas à des écarts types maximaux beaucoup plus importants que le réseau M1. Ainsi, l'écart type maximal des précipitations annuelles est de 4.40 pouces (figure 5.44) contre 4.20 pouces (figure 5.25) pour le réseau M1. Les autres écarts types maximaux correspondant aux autres périodes étudiées sont aussi sensiblement identiques à ceux du réseau M1. Cette constatation s'explique par le choix des stations retenues. Les deux stations de la moitié nord du bassin ont été conservées et les trois stations situées en périphérie ouest du bassin ont été remplacées par une station située à l'intérieur des limites du bassin. D'autre part, la diminution du nombre de stations autour du lac Saint-Jean n'est pratiquement pas ressentie au niveau des écarts types, sauf au sud-ouest du lac où le nombre de stations retranchées est relativement important.

La distribution géographique des lignes d'iso-écarts types est légèrement modifiée, surtout par la pénétration plus à l'intérieur de la partie nord-ouest du bassin de lignes d'écarts types plus élevés.

TABLEAU 5.4 Stations météorologiques du "Réseau M3".

NOM	NUMERO	NUMERO FEDERAL	ALTITUDE (pieds)	LATITUDE (degrés et minutes)	LONGITUDE (degrés et minutes)
Lac Edouard-S	2	706CP09	1195	47° 40'	72° 16'
Aigremont	3	7060070	1325	49° 18'	73° 51'
Albanel	4	7060080	500	48° 53'	72° 27'
Bonnard	5	7060825	1660	50° 44'	71° 03'
Chute-des-Passes	6	7061541	1310	49° 54'	71° 15'
Chute-du-Diable	7	7061560	570	48° 45'	71° 42'
Mont Apica	16	7065100	1800	47° 58'	71° 25'
Normandin-CDA	17	7065640	450	48° 51'	72° 32'
Saint-Léon-de-Labrecque	21	7067460	430	48° 40'	71° 31'
Shipshaw	22	7068160	75	48° 27'	71° 13'

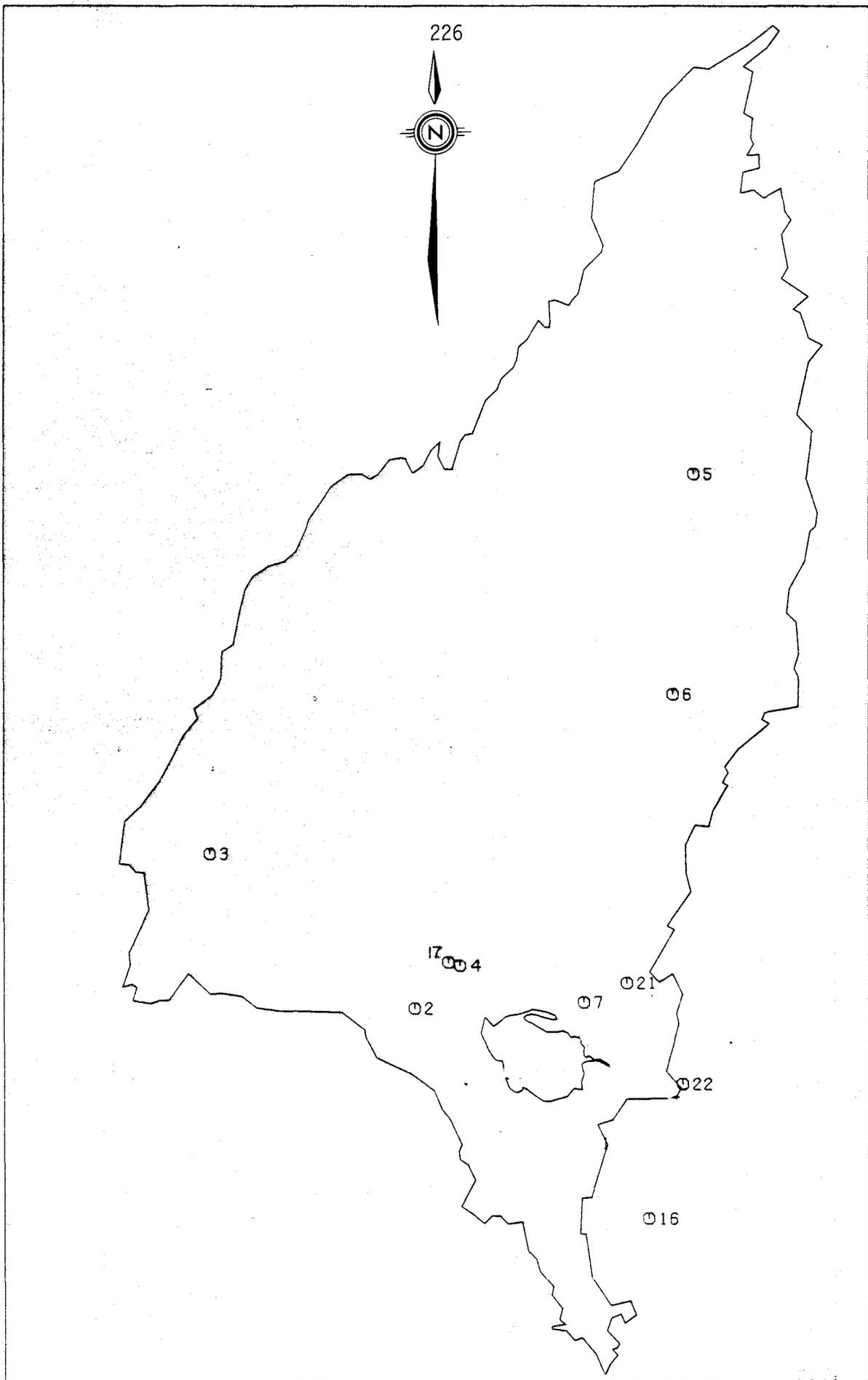


FIGURE 5.43 Répartition géographique des 10 stations météorologiques du réseau M3.

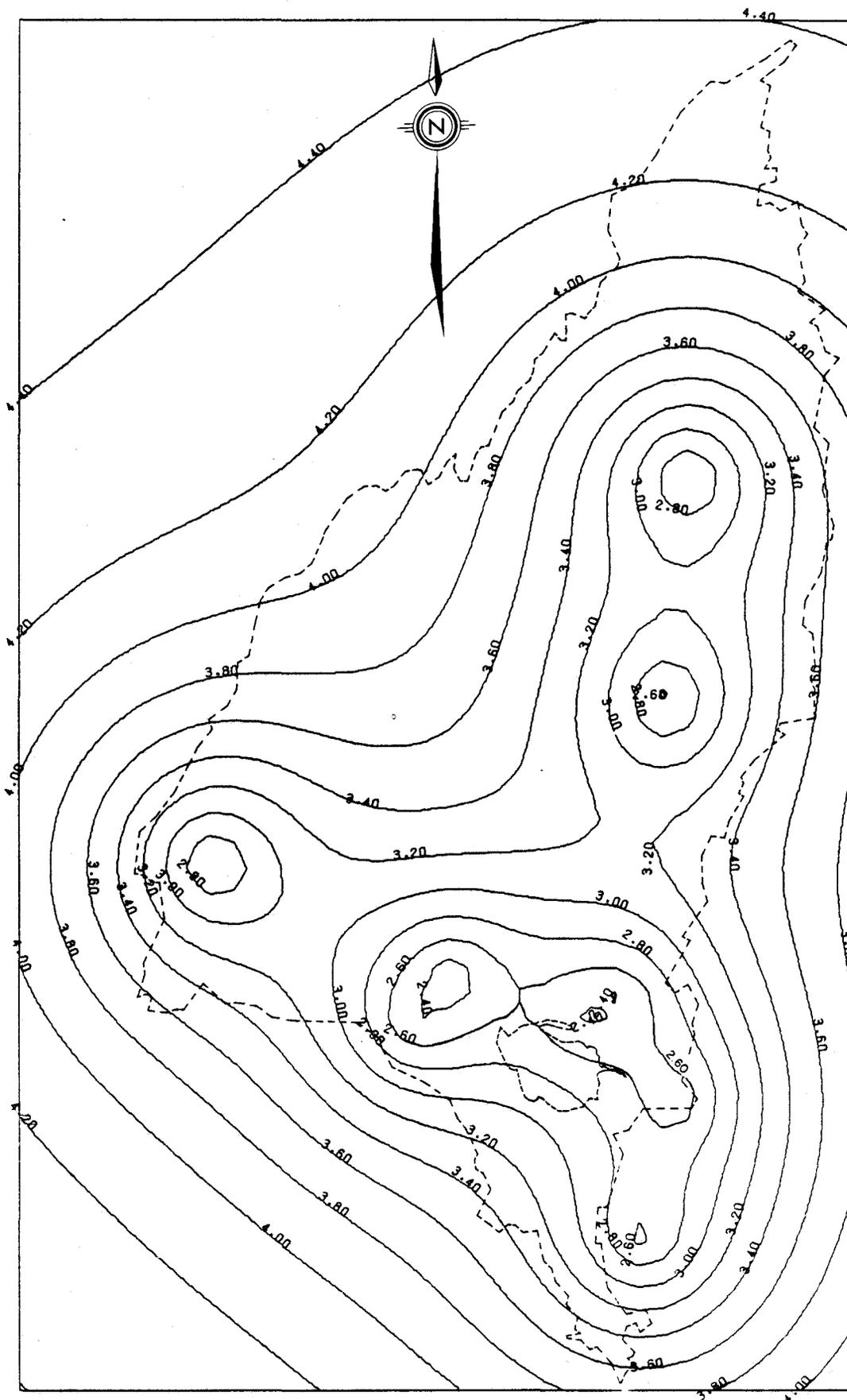


FIGURE 5.44 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M3, 10 stations).

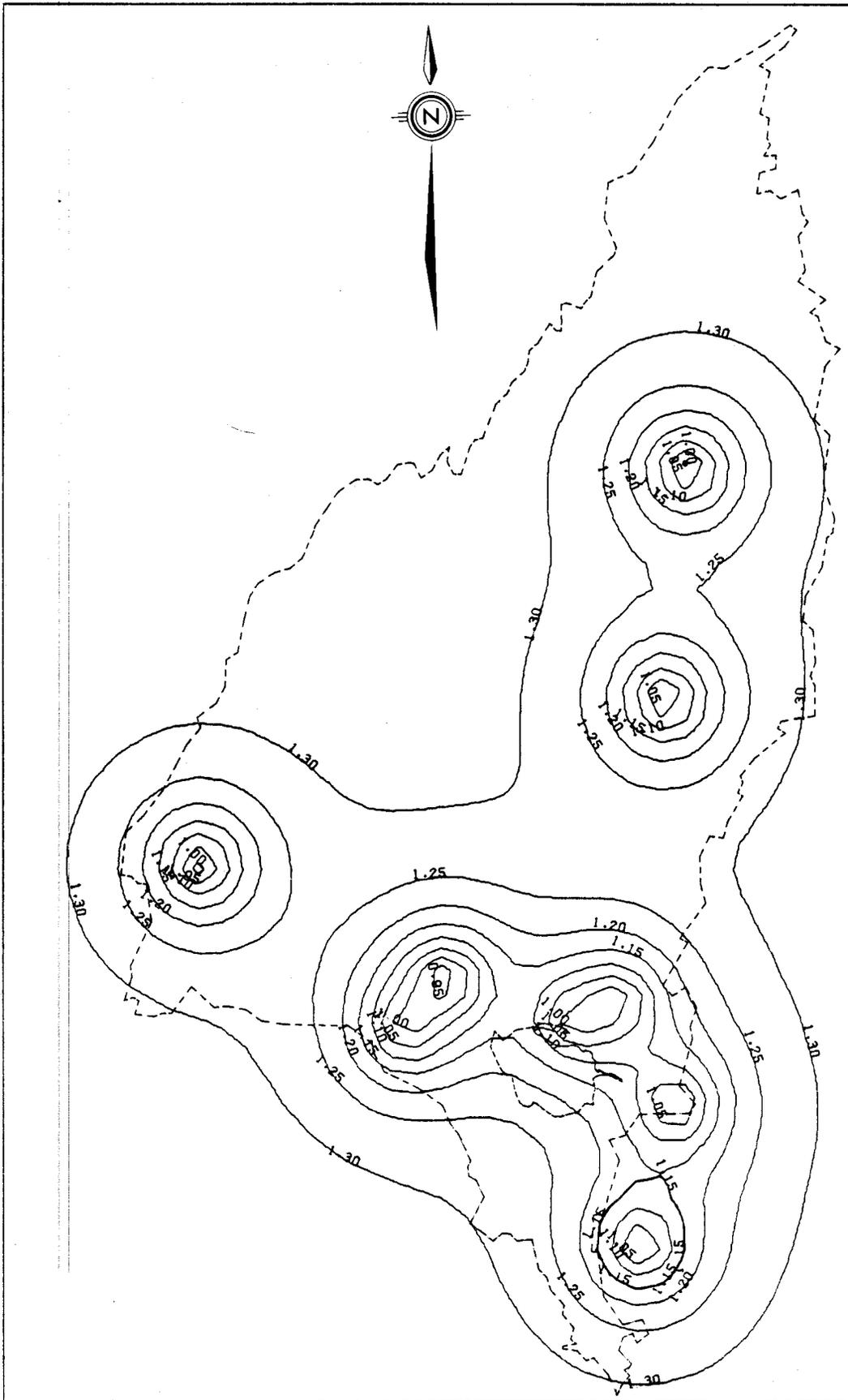


FIGURE 5.45 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M3, 10 stations).

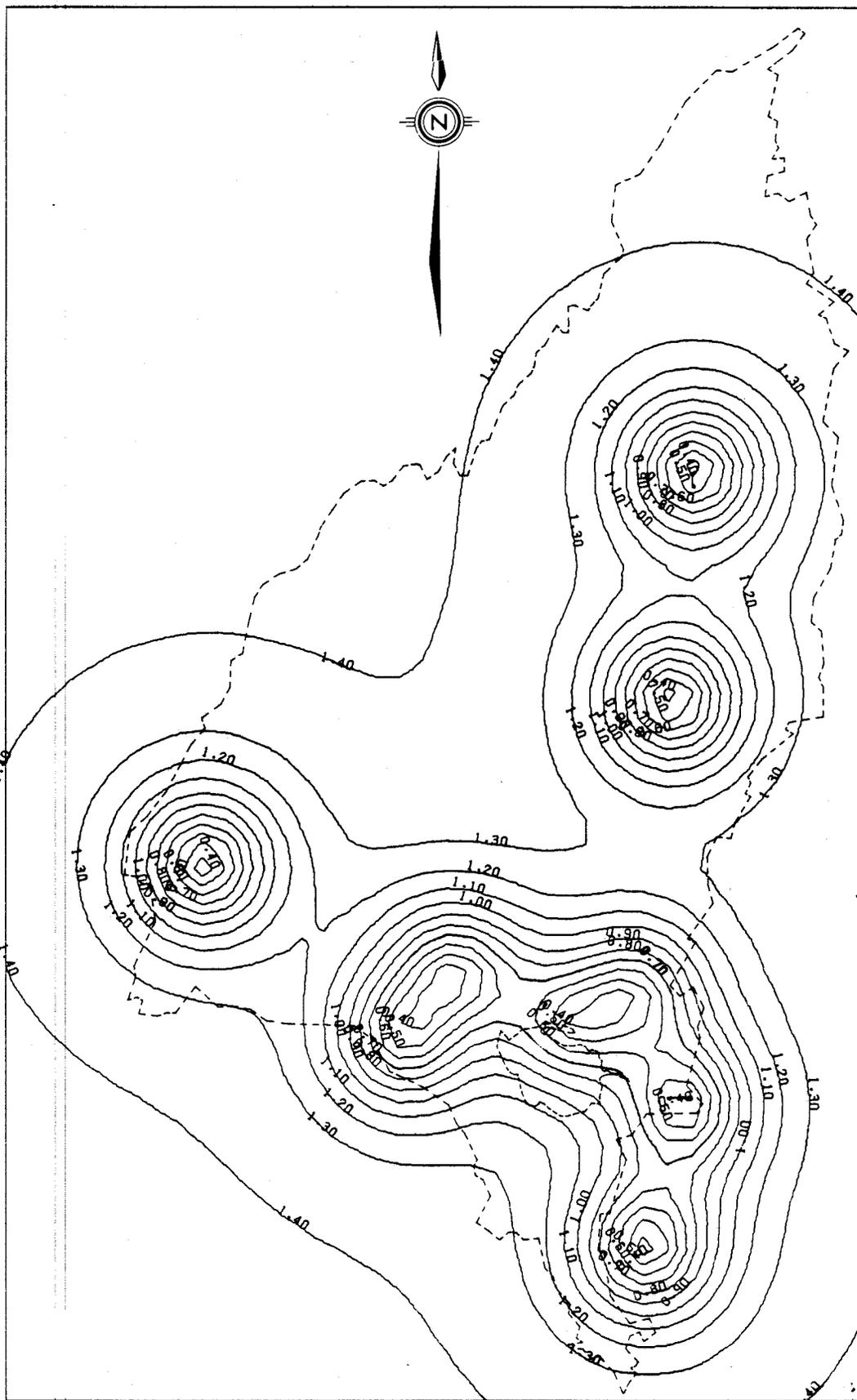


FIGURE 5.46 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M3, 10 stations).

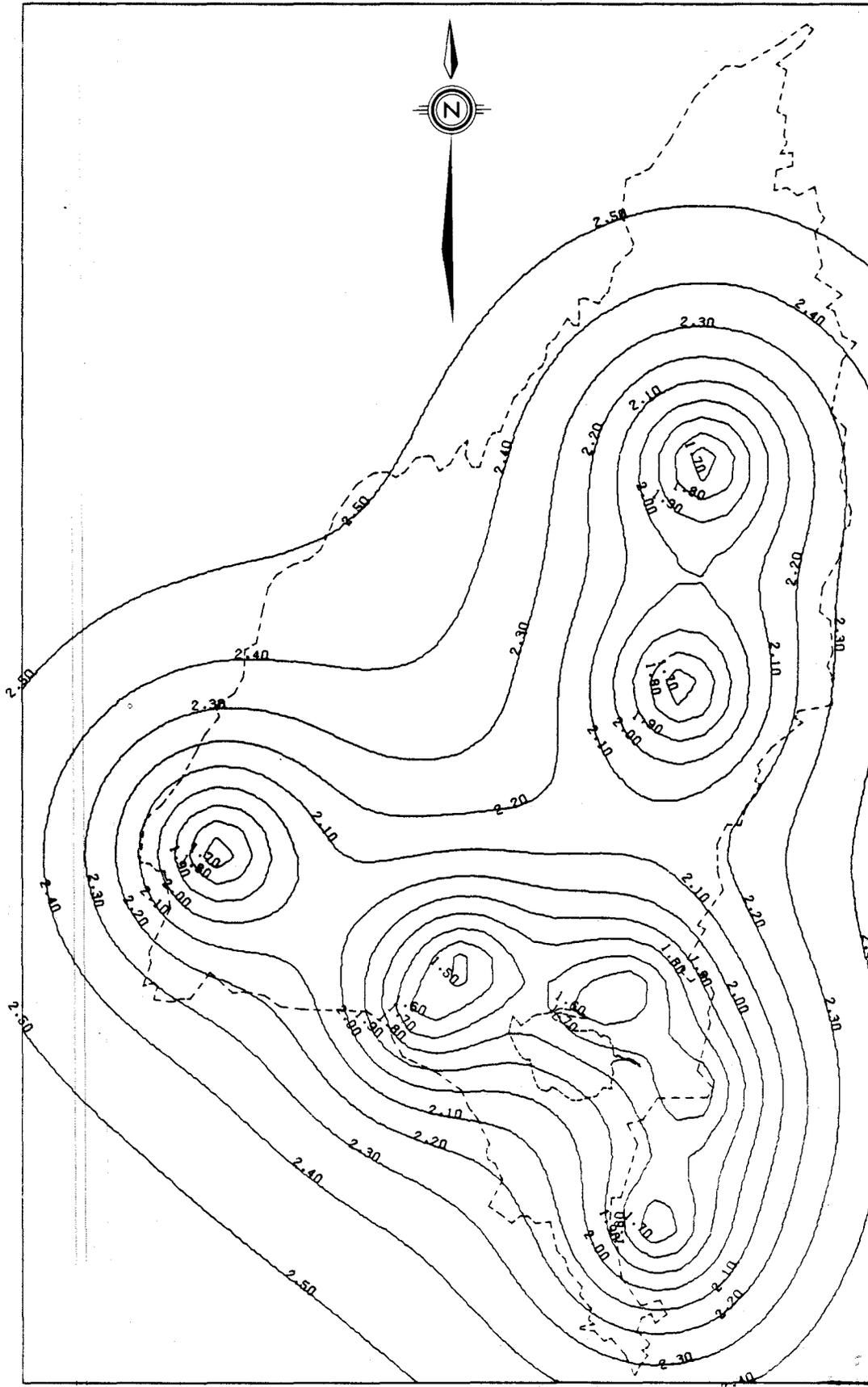


FIGURE 5.47 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE" cumulée sur 107 jours" (réseau M3, 10 stations).

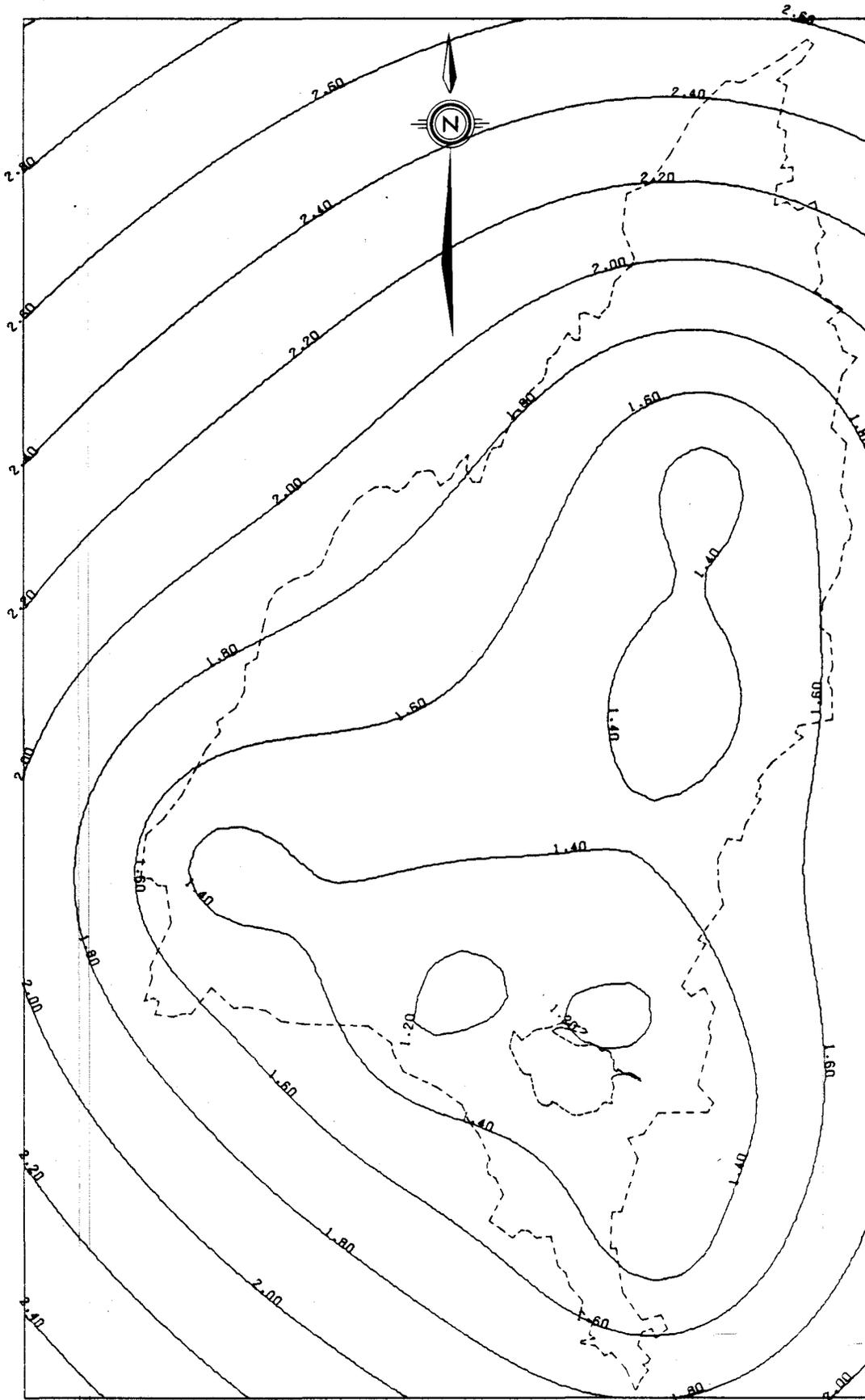


FIGURE 5.48 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M3, 10 stations).

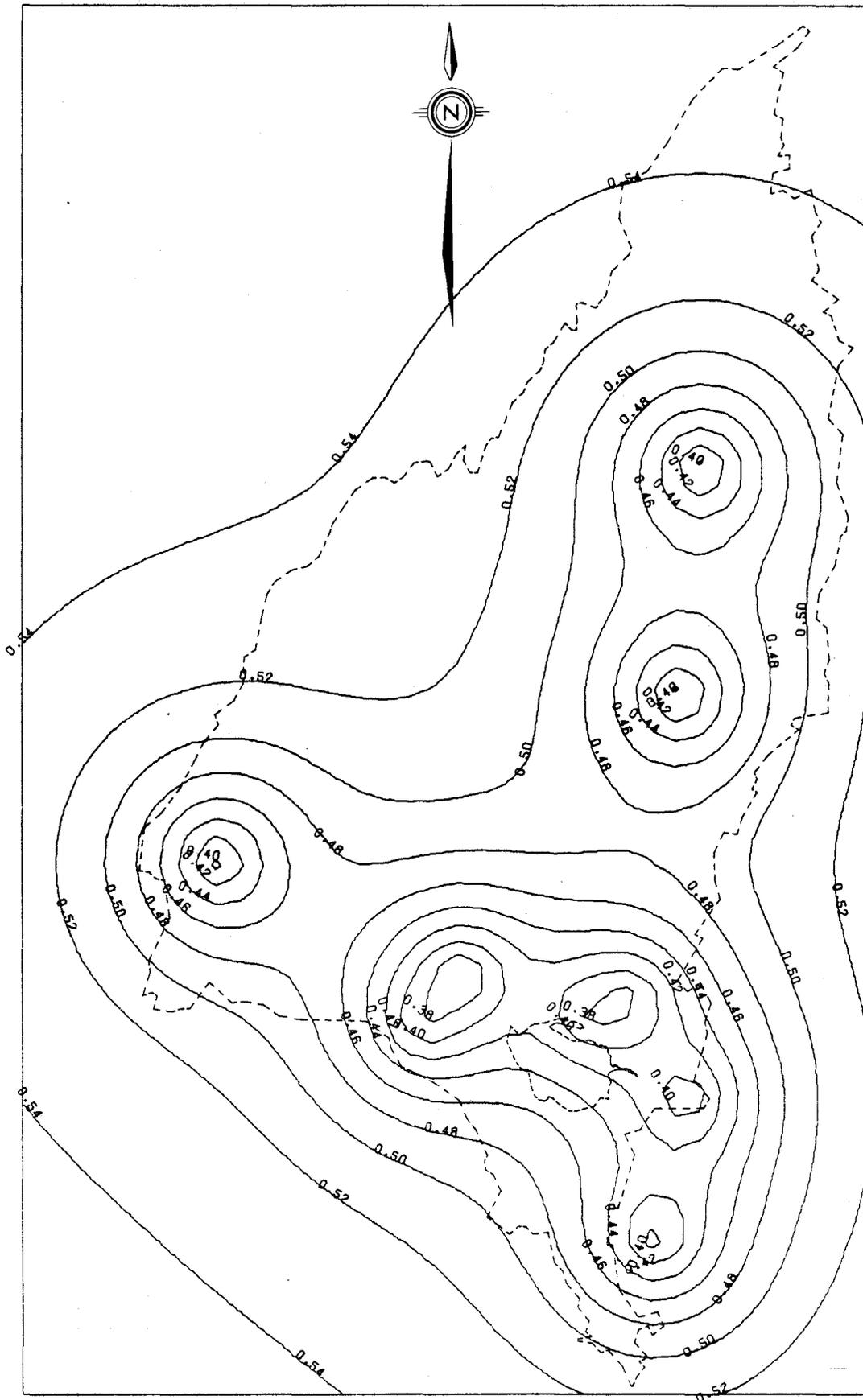


FIGURE 5.49 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).

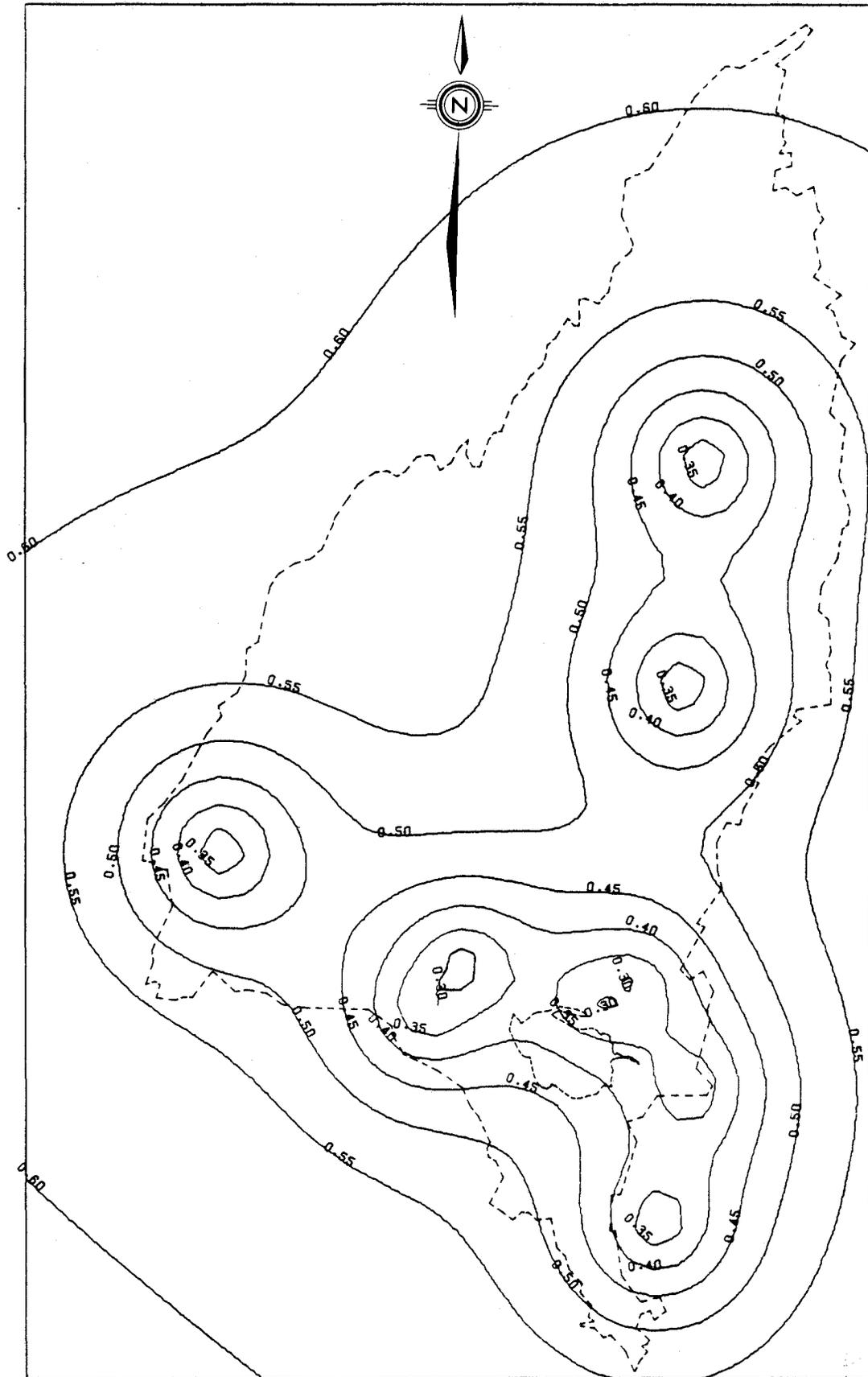


FIGURE 5.50 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).

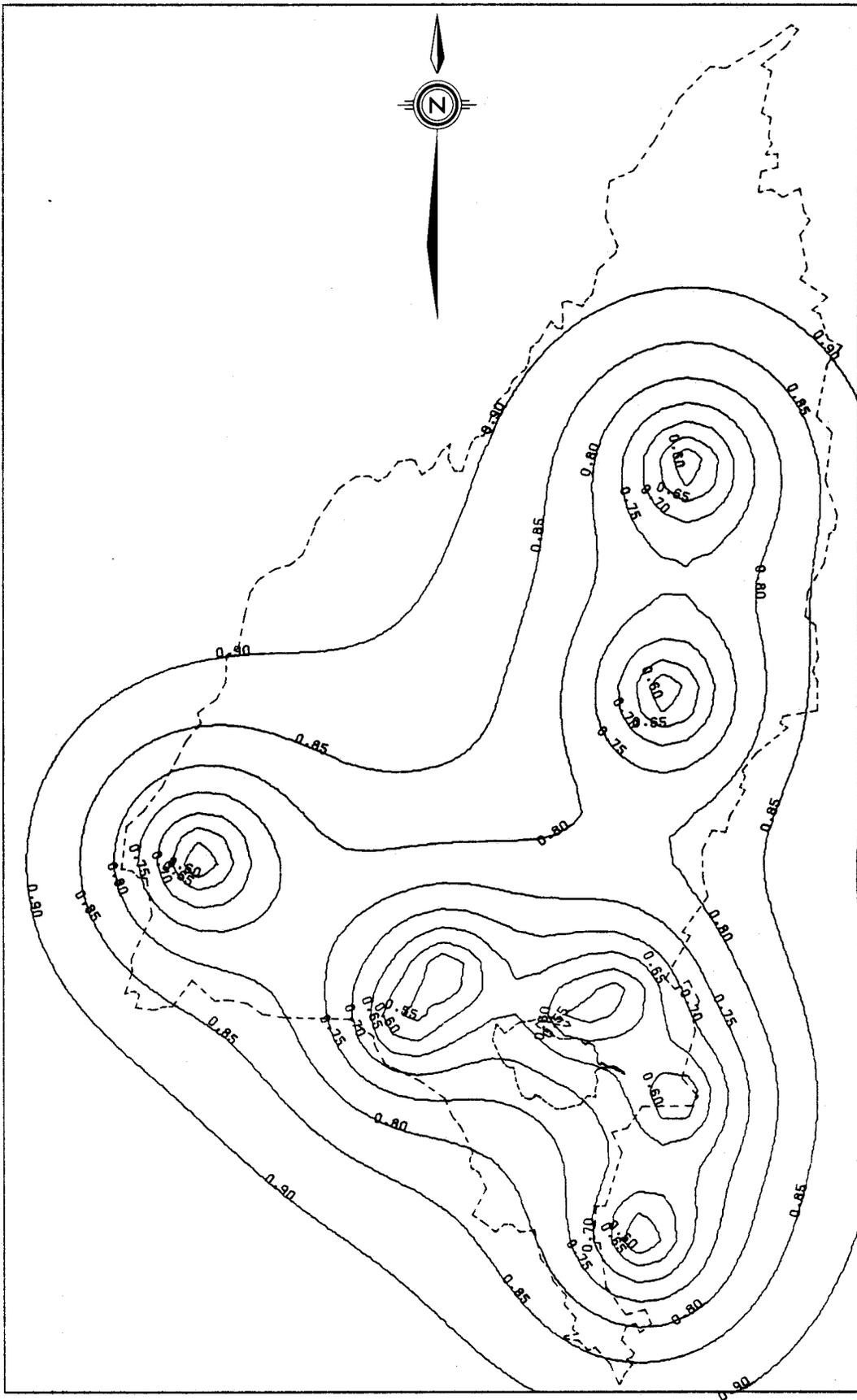


FIGURE 5.51 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).

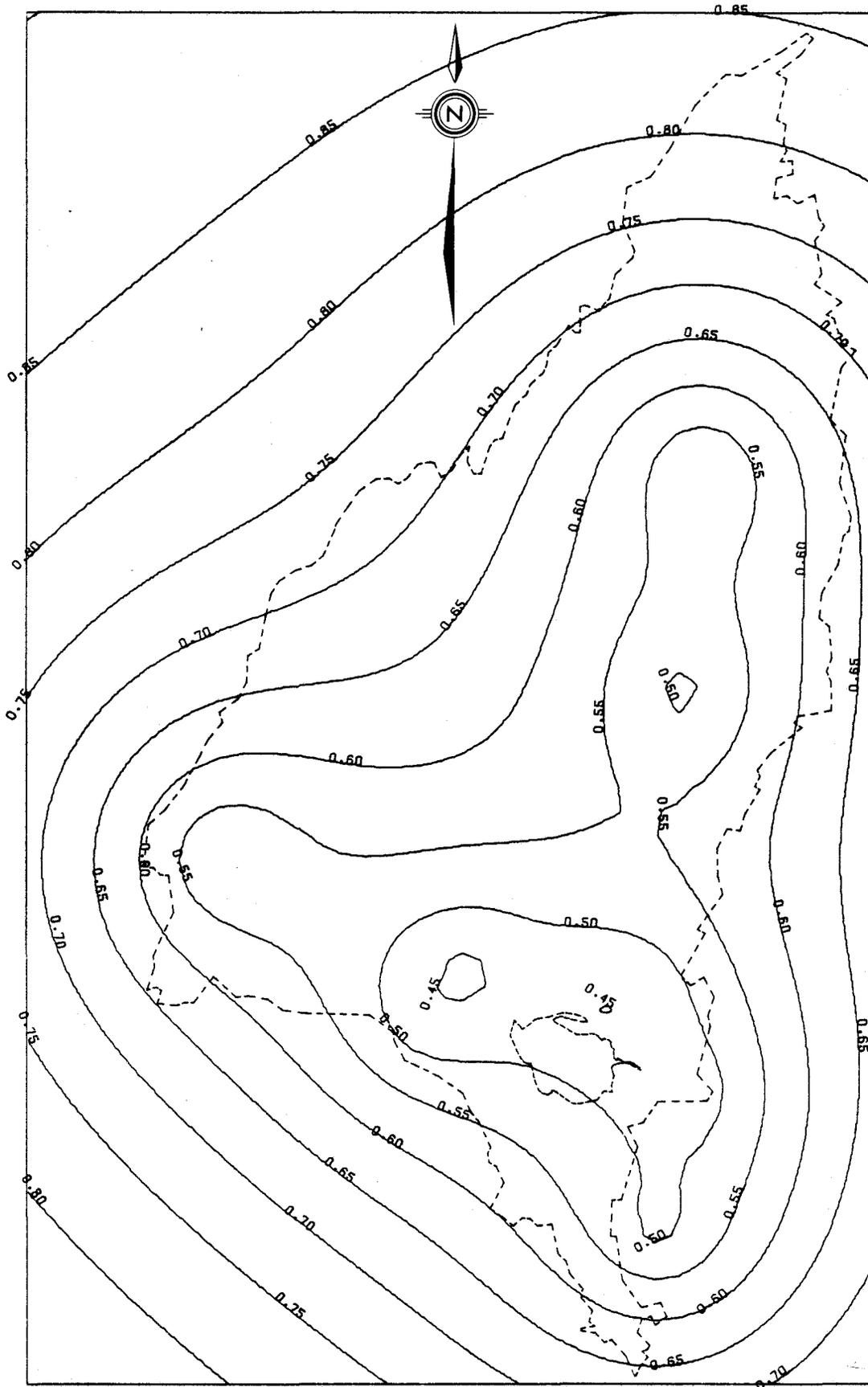


FIGURE 5.52 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M3, 10 stations).

#### 5.5.4 "Réseau M4"

Le tableau 5.5 comprend la liste des 18 stations proposées par SECAL comme quatrième réseau possible.

La distribution de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean est montré à la figure 5.53. Les figures 5.54 à 5.62 présentent les écarts types d'estimation des précipitations pour chacune des neuf périodes étudiées.

Avec le réseau M4, on retrouve un réseau dont le nombre de stations est identique, à une station près, à celui du réseau M1. La répartition géographique de ces stations n'est toutefois pas la même. La distribution des stations dans l'ouest et le centre du bassin est meilleure que dans le réseau M1. Cependant, la station No 2 située la plus au nord dans le réseau M1 est abandonnée au profit d'une autre station (No 27) située encore plus au nord et à l'extérieur du bassin, ce qui permet de diminuer l'erreur à l'extrême nord du bassin tout en détériorant généralement cette dernière dans la région où la station No 2 a été enlevée.

Les écarts types maximaux calculés sont sensiblement identiques à ceux du réseau M1, de même que les écarts types minimaux. Toutefois, l'addition de stations distribuées de telle sorte que les distances moyennes soient mieux représentées conduit à une diminution de l'écart type maximal calculé en automne (figures 5.58 et 5.29; figures 5.62 et 5.33). Ce résultat est explicable par les

fonctions de structure des précipitations d'automne (figures 5.5 et 5.9) qui croissent de façon régulière, alors que les autres fonctions de structure ont une croissance plus marquée aux courtes distances, suivies d'une croissance plus faible aux moyennes et grandes distances.

La distribution géographique des stations meilleure pour le réseau M4 que pour le réseau M1, surtout dans la partie centrale du bassin, conduit à des erreurs ponctuelles plus faibles pour le réseau M4 que pour le premier réseau.

TABLEAU 5.5 Stations météorologiques du "Réseau M4".

NOM	NUMERO	NUMERO FEDERAL	ALTITUDE (pieds)	LATITUDE (degrés et minutes)	LONGITUDE (degrés et minutes)
Lac Edouard-S	2	706CP09	1195	47° 40'	72° 16'
Aigremont	3	7060070	1325	49° 18'	73° 51'
Albanel	4	7060080	500	48° 53'	72° 27'
Chute-des-Passes	6	7061541	1310	49° 54'	71° 15'
Hémon	8	7063090	600	49° 04'	72° 36'
Isle-Maligne	9	7063320	250	48° 35'	71° 38'
Jonquière	10	7063370	460	48° 24'	71° 16'
Lac Bouchette	11	7063560	1050	48° 16'	72° 12'
Mésy	13	7064890	1260	48° 16'	71° 41'
Mont Apica	16	7065100	1800	47° 58'	71° 25'
Roberval-A	19	7066685	590	48° 31'	72° 16'
Saint-Coeur-de-Marie	20	7067060	350	48° 38'	71° 43'
Saint-Léon-de-Labrecque	21	7067460	430	48° 40'	71° 31'
Shipshaw	22	7068160	75	48° 27'	71° 13'
Chibougamau-A	25	7091401	1321	49° 49'	74° 25'
Mistassini Post	26	7095000	1246	50° 25'	73° 53'
Lac Plétipi	27	704CFHE	1755	51° 49'	70° 01'
Lac Hourier	28	706CF48	1450	50° 20'	72° 36'

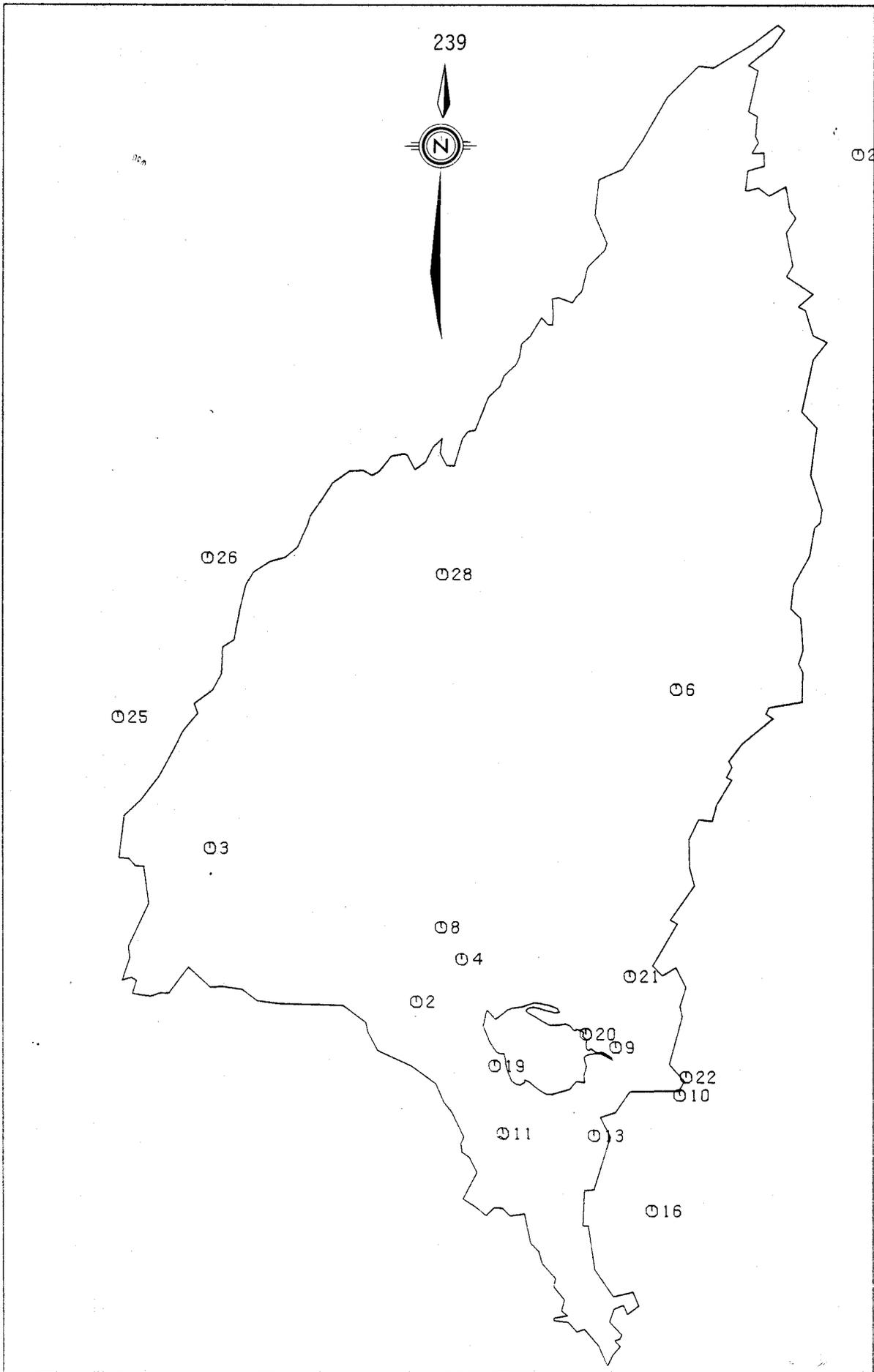


FIGURE 5.53 Répartition géographique des 18 stations météorologiques du réseau M4.

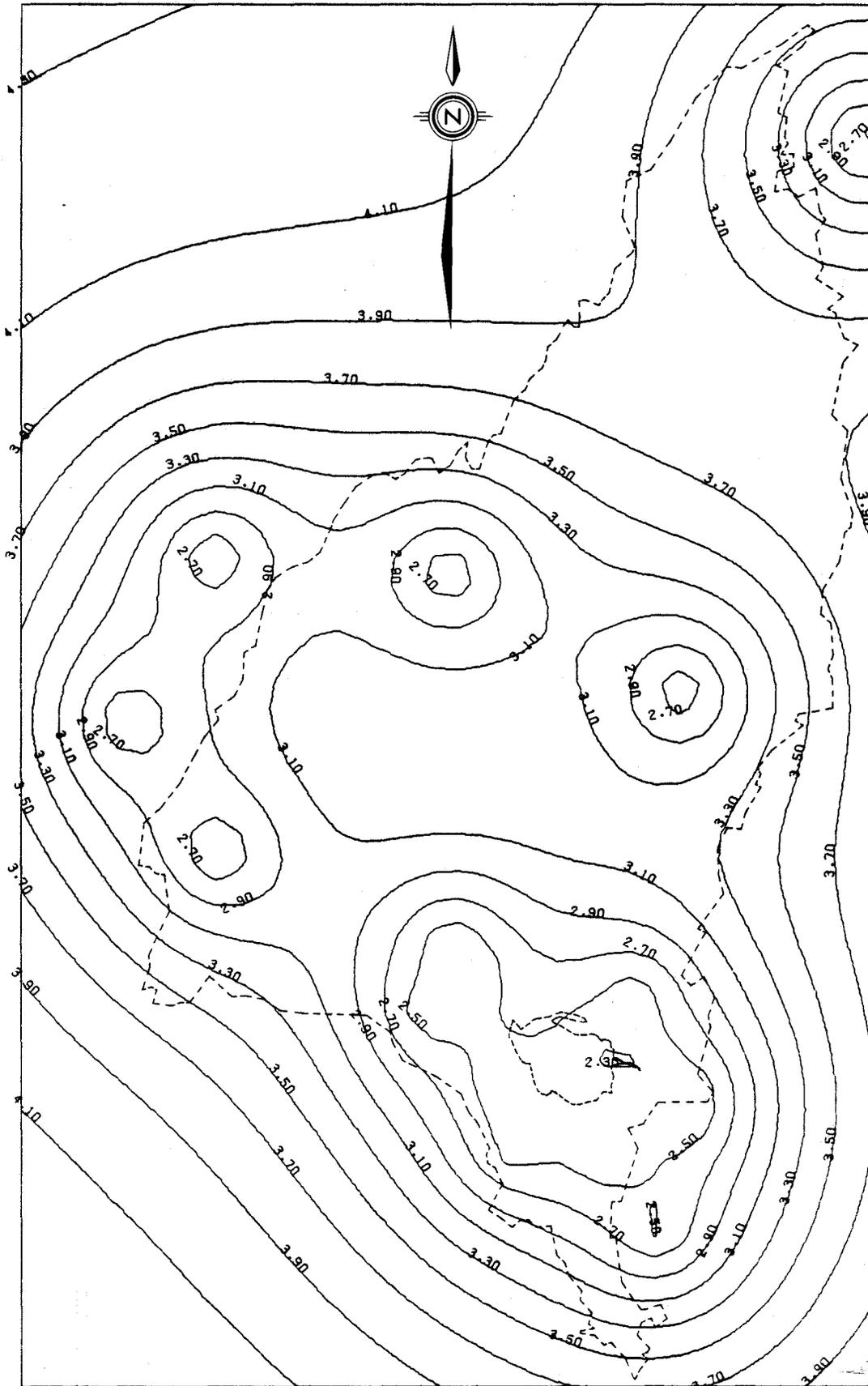


FIGURE 5.54 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M4, 18 stations).

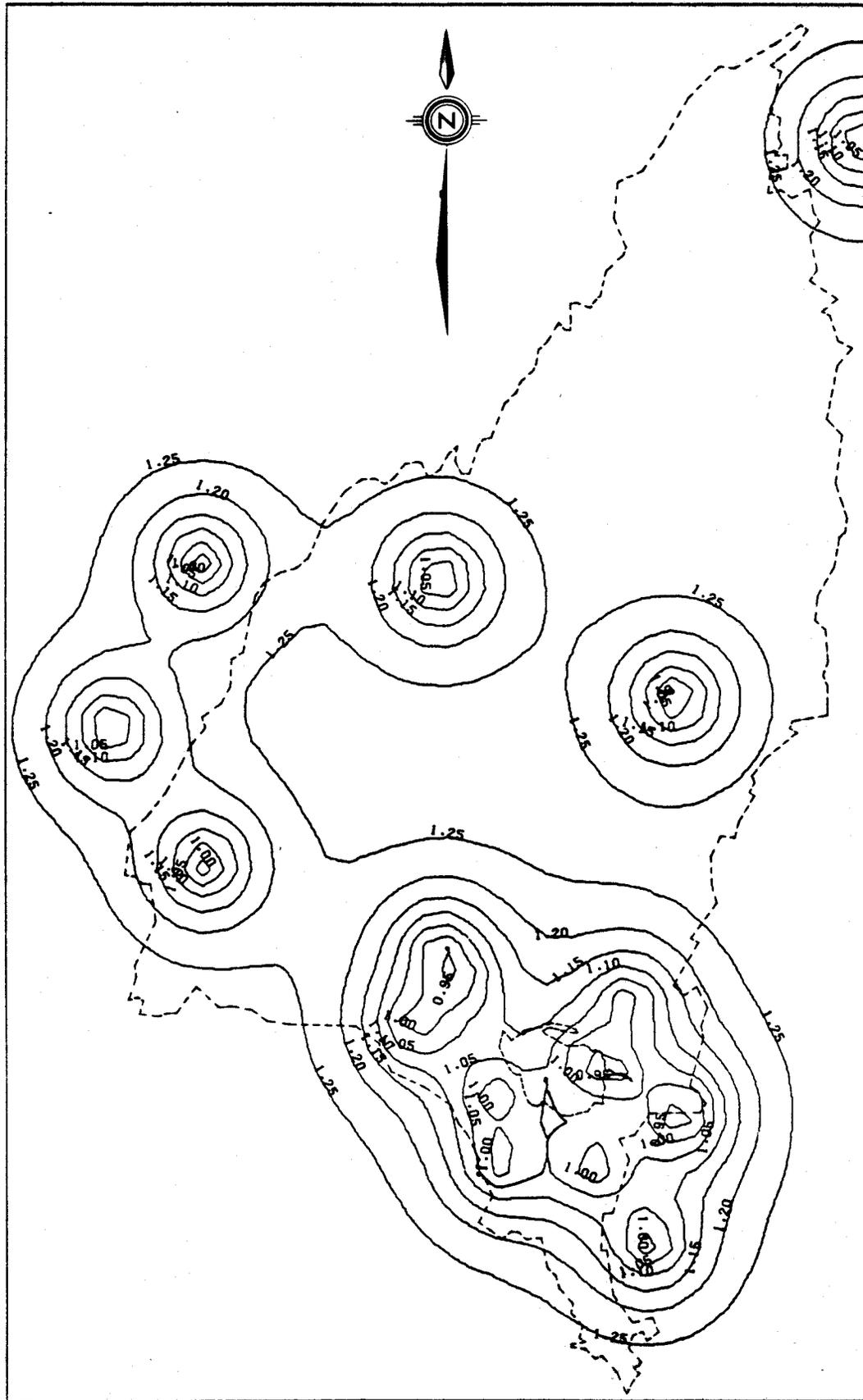


FIGURE 5.55 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M4, 18 stations).

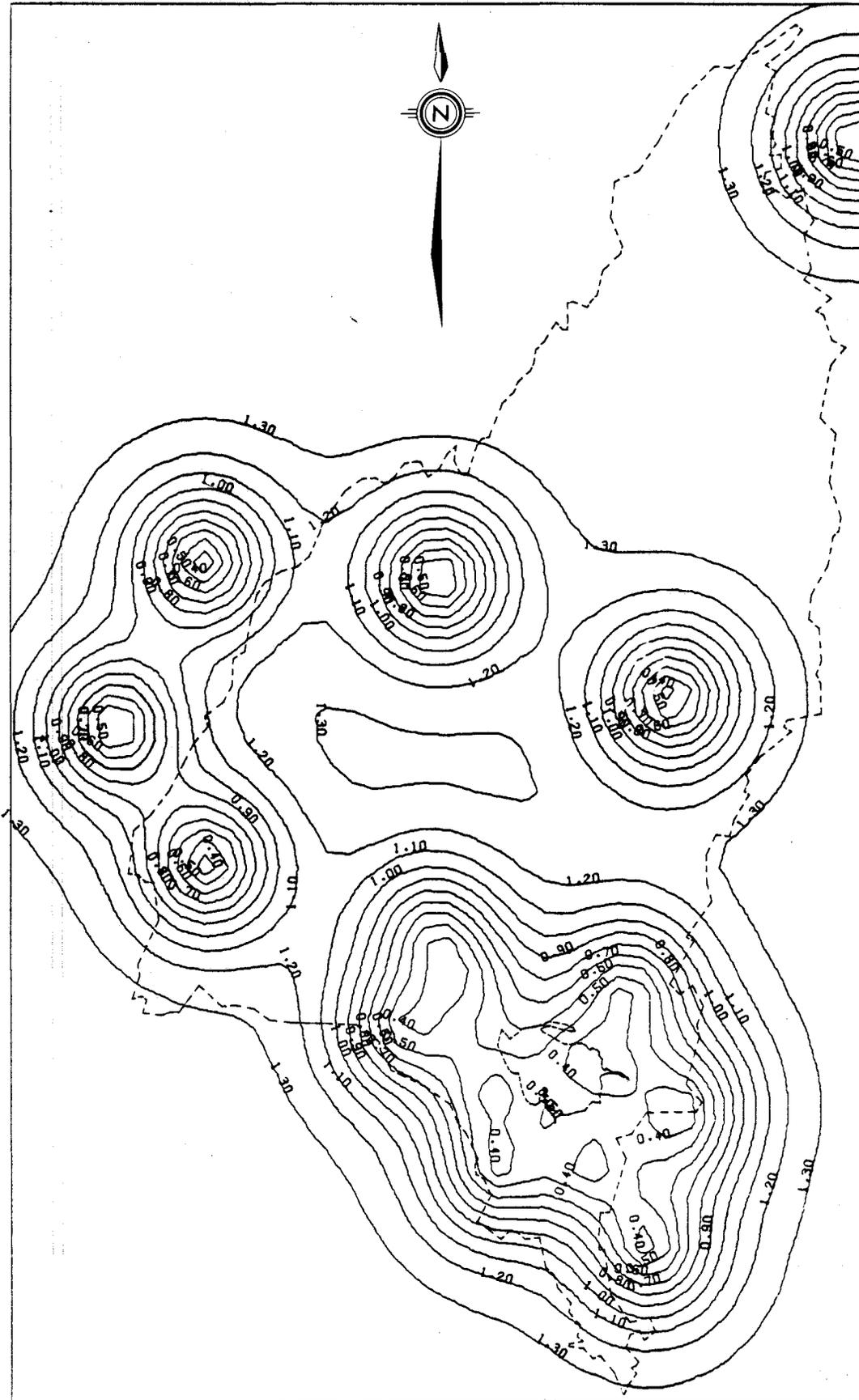


FIGURE 5.56 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M4, 18 stations).

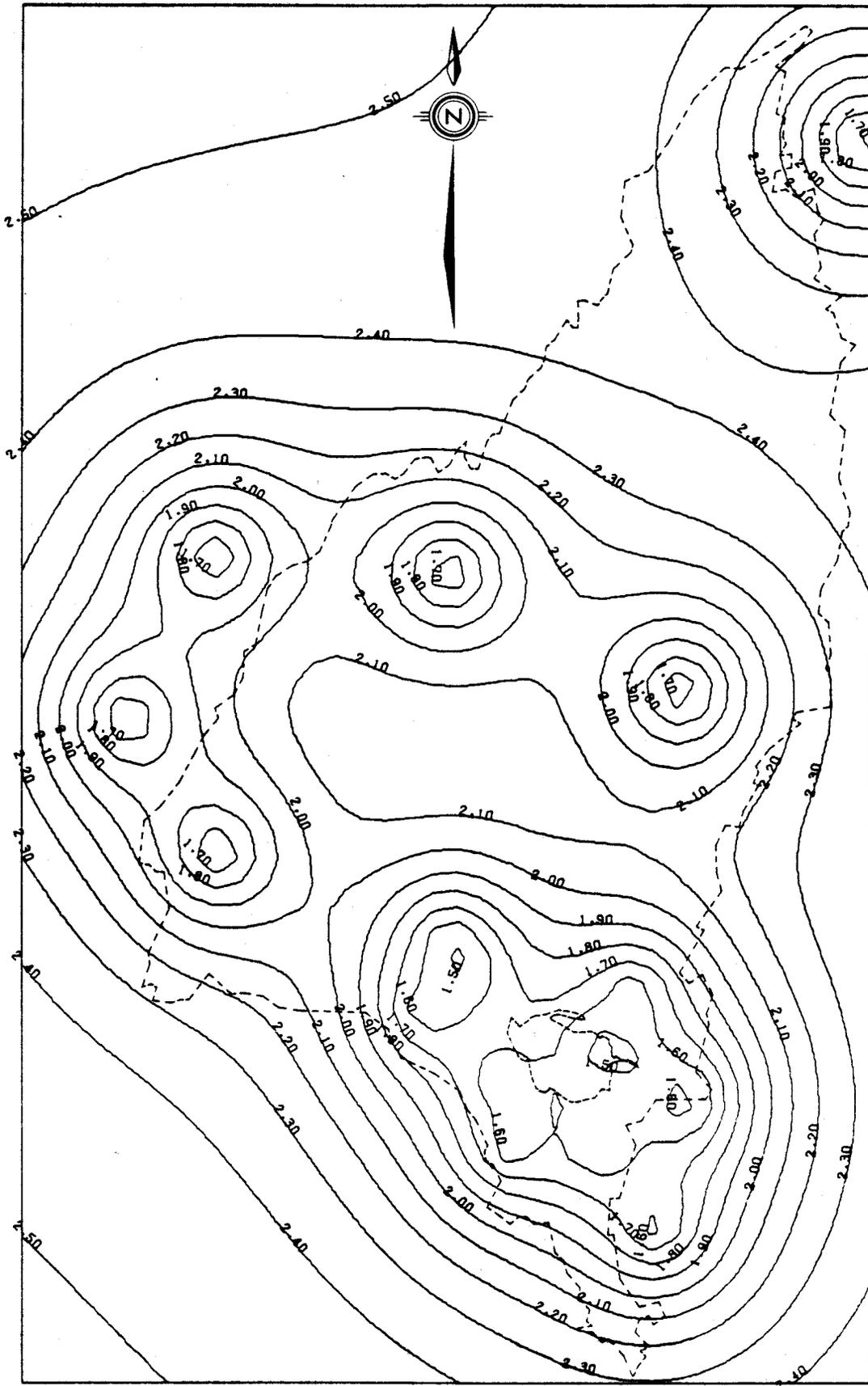


FIGURE 5.57 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M4, 18 stations).

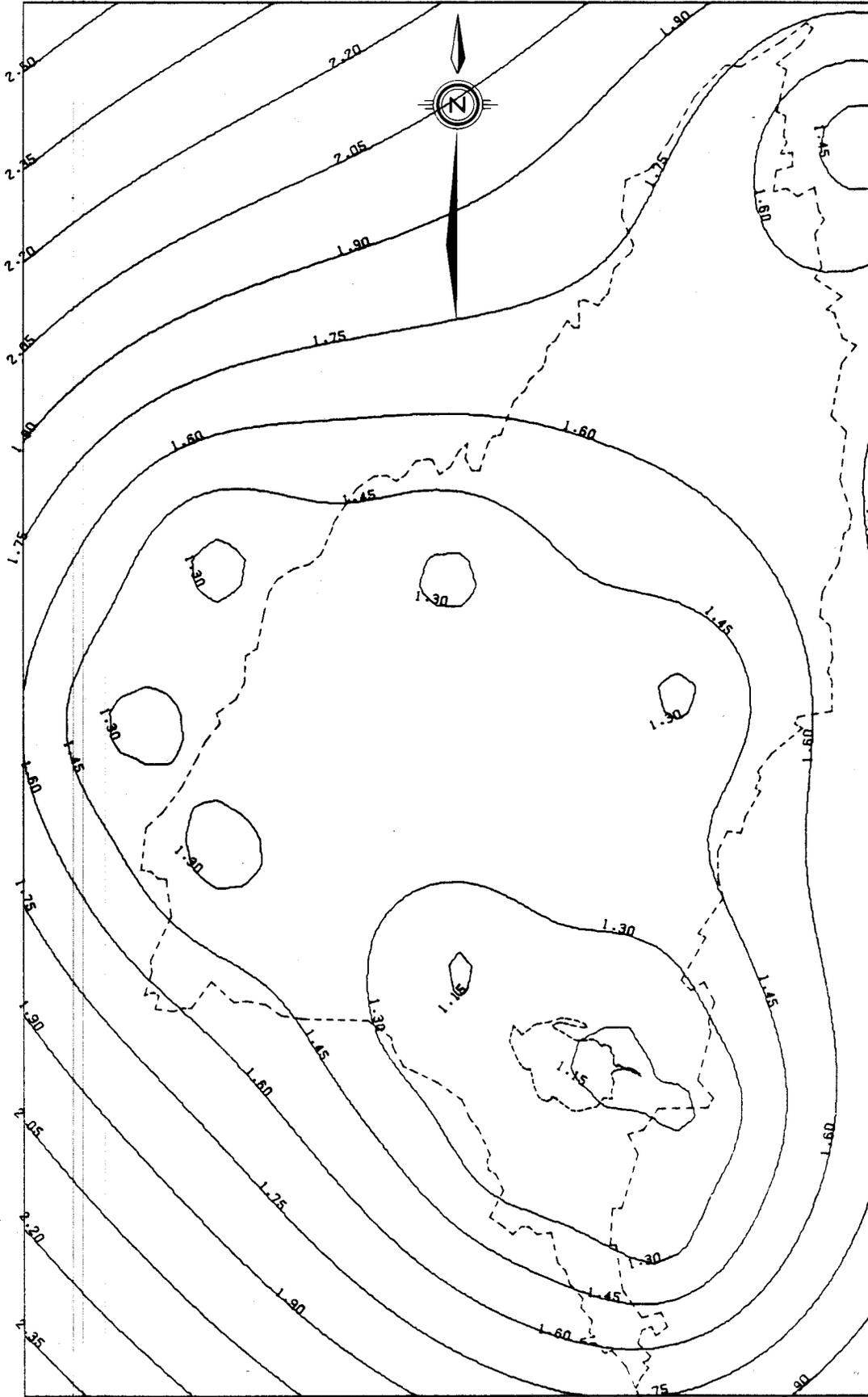


FIGURE 5.58 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M4, 18 stations).

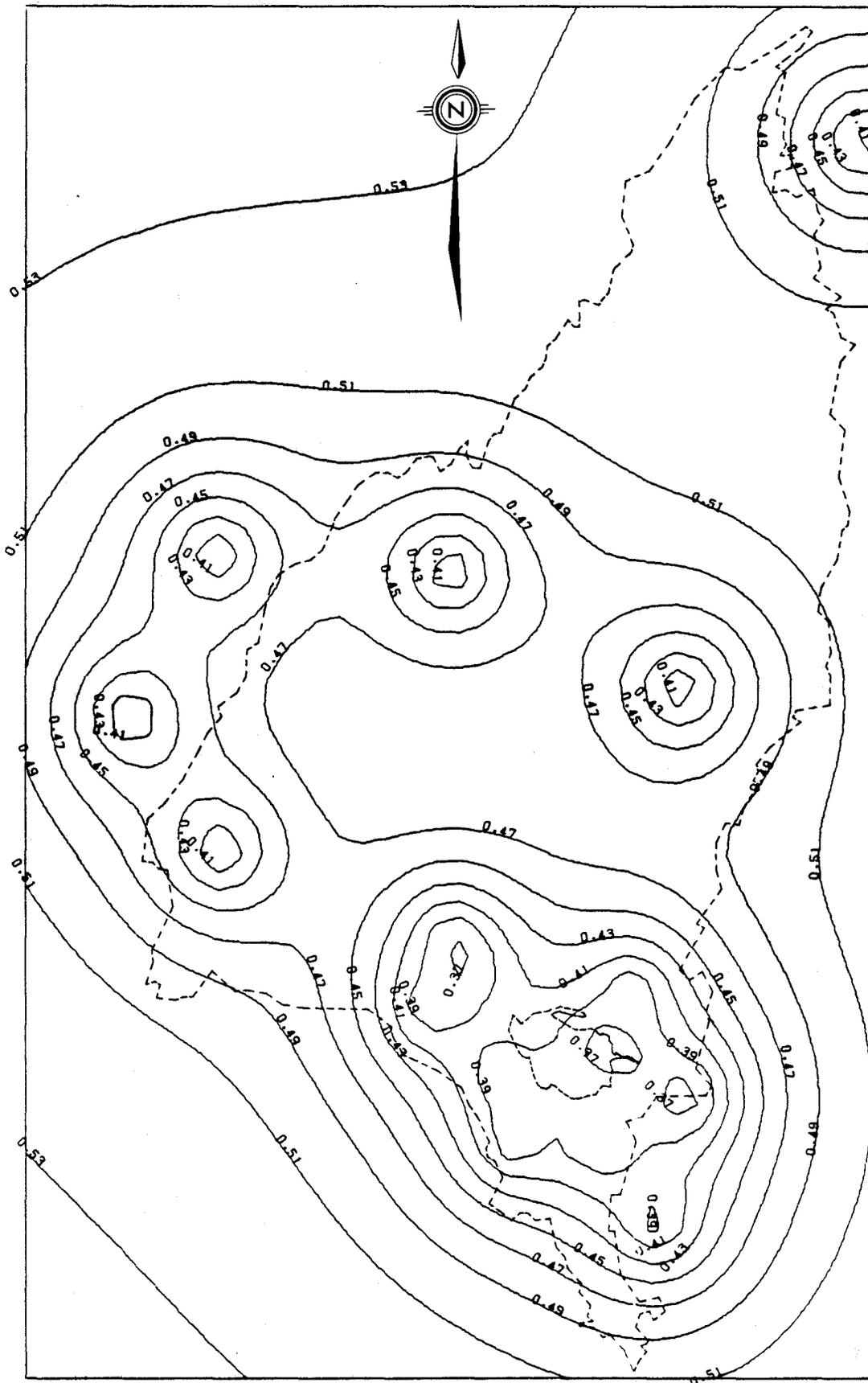


FIGURE 5.59 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).

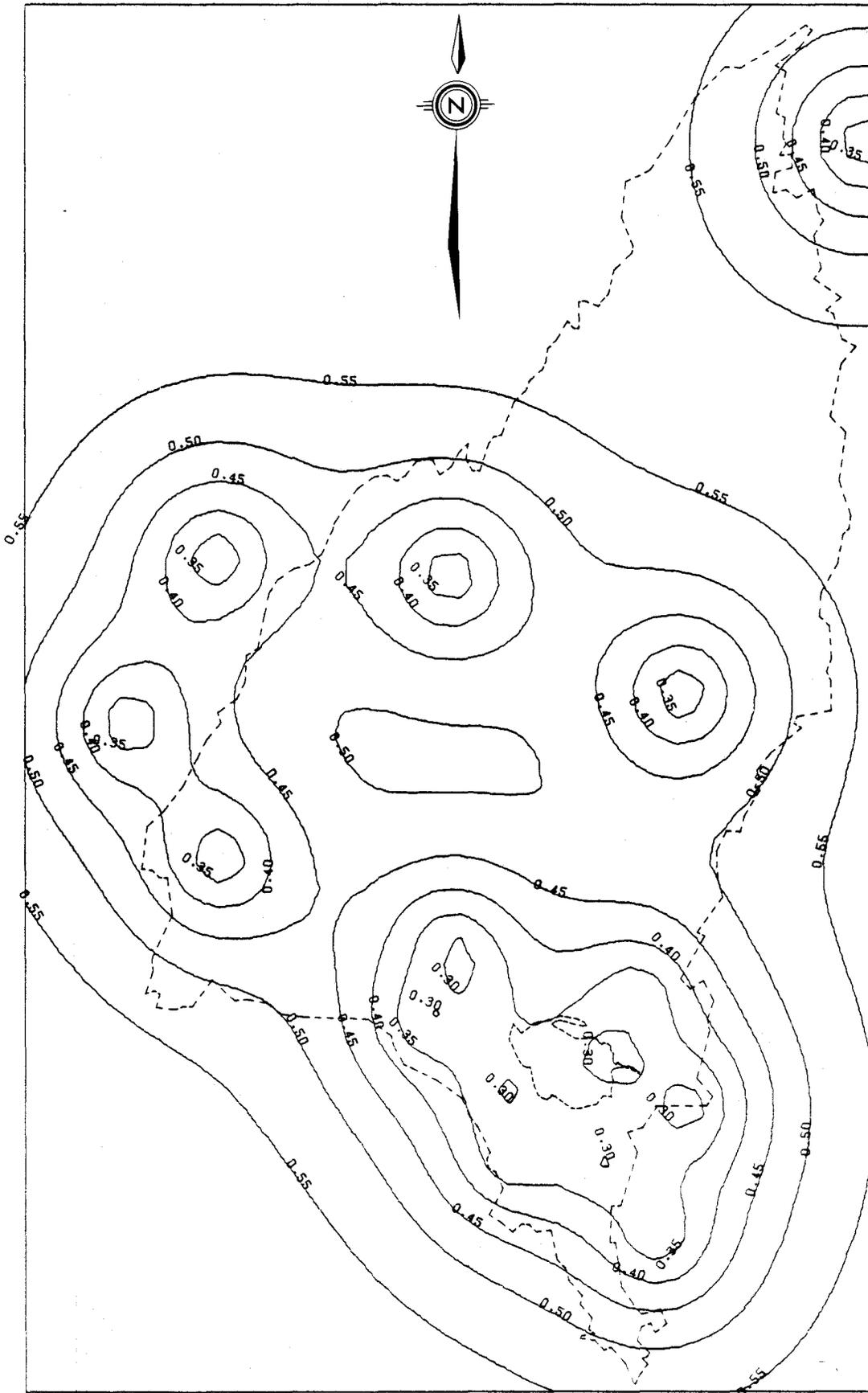


FIGURE 5.60 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).

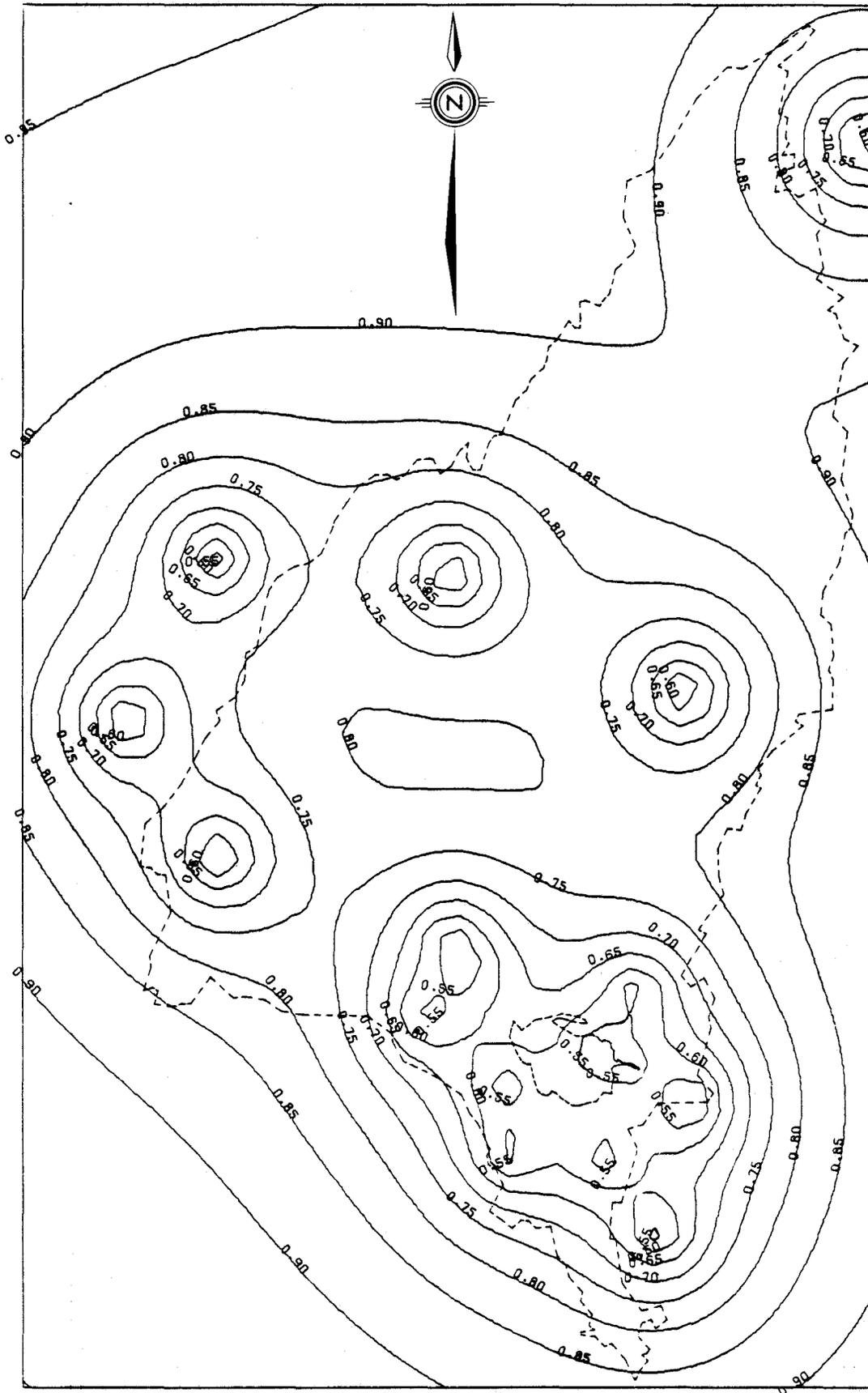


FIGURE 5.61 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).

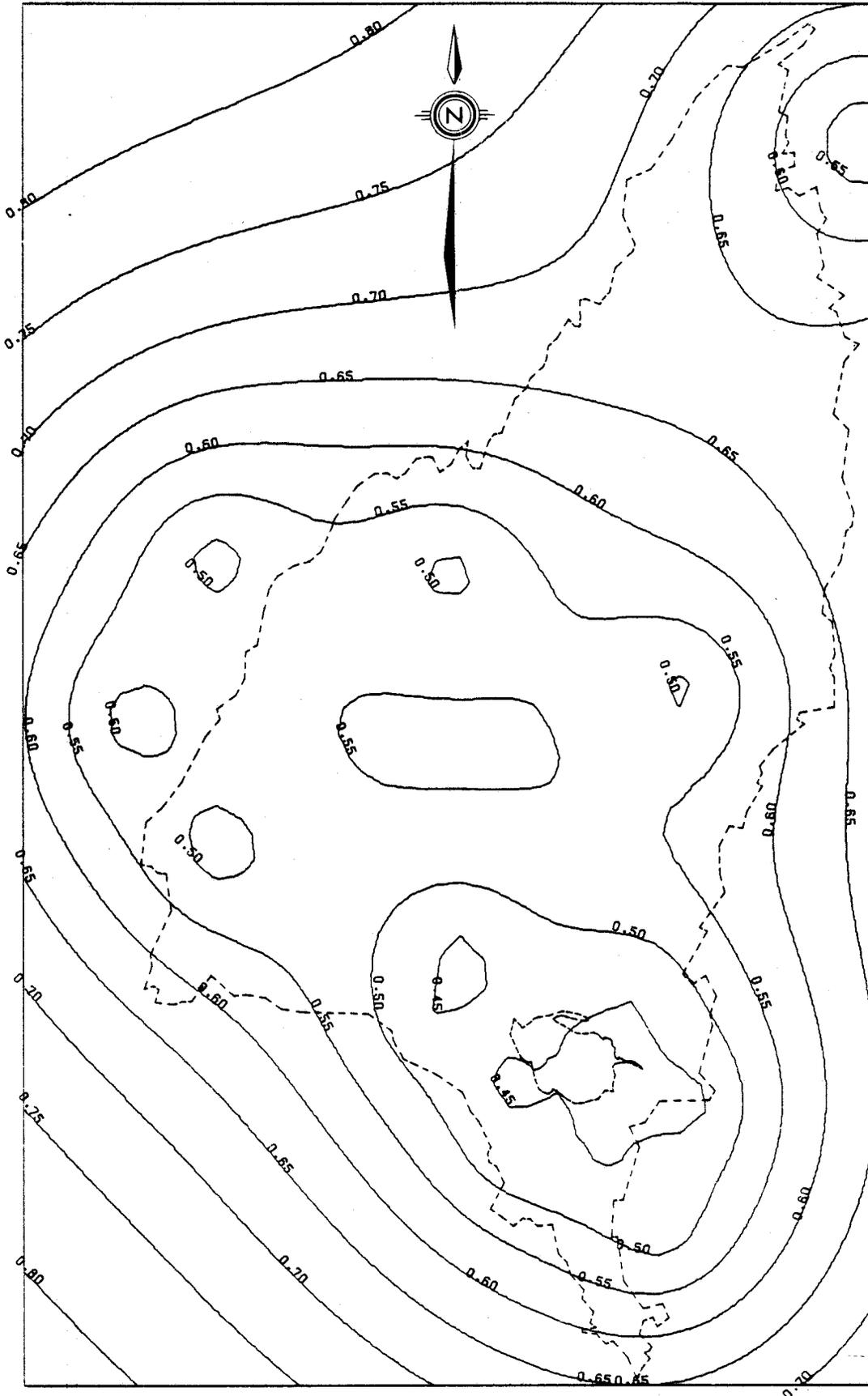


FIGURE 5.62 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M4, 18 stations).

#### 5.5.5 "Réseau M5"

Le tableau 5.6 donne la liste des 18 stations du réseau M5 et la figure 5.63 précise l'emplacement de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

Quant aux iso-écarts types d'estimation des précipitations calculés avec ce réseau, pour les neuf périodes, ils sont présentés sur les figures 5.64 à 5.72.

Le réseau M5, avec un nombre égal de stations, ressemble beaucoup au réseau M4. Deux modifications sensibles ont cependant été apportées au réseau précédent. La station No 32 remplace la station No 28, dans la partie ouest du bassin, tandis que la station No 31, située à l'intérieur du bassin est retenue de préférence à la station No 27 située à l'extérieur, au nord du bassin.

Le remplacement de ces deux stations ne change pas de façon appréciable les valeurs minimales et maximales des écarts types ponctuels. Toutefois, la répartition spatiale de ces écarts permet de constater une légère diminution des erreurs dans la moitié nord du bassin. Par conséquent, ce réseau, comme le précédent représente une amélioration sur le réseau M1.

TABLEAU 5.6 Stations météorologiques du "Réseau M5".

NOM	NUMERO	NUMERO FEDERAL	ALTITUDE (pieds)	LATITUDE (degrés et minutes)	LONGITUDE (degrés et minutes)
Lac Edouard-S	2	706CP09	1195	47° 40'	72° 16'
Aigremont	3	7060070	1325	49° 18'	73° 51'
Albanel	4	7060080	500	48° 53'	72° 27'
Chute-des-Passes	6	7061541	1310	49° 54'	71° 15'
Hémon	8	7063090	600	49° 04'	72° 36'
Isle-Maligne	9	7063320	250	48° 35'	71° 38'
Jonquière	10	7063370	460	48° 24'	71° 16'
Lac Bouchette	11	7063560	1050	48° 16'	72° 12'
Mésy	13	7064890	1260	48° 16'	71° 41'
Mont Apica	16	7065100	1800	47° 58'	71° 25'
Roberval-A	19	7066685	590	48° 31'	72° 16'
Saint-Coeur-de-Marie	20	7067060	350	48° 38'	71° 43'
Saint-Léon-de-Labrecque	21	7067460	430	48° 40'	71° 31'
Shipsaw	22	7068160	75	48° 27'	71° 13'
Chibougamau-A	25	7091401	1321	49° 49'	74° 25'
Mistassini Post	26	7095000	1246	50° 25'	73° 53'
Lac Benoit	31	-	1800	51° 32'	71° 07'
Lac des Cygnes	32	-	1300	49° 53'	72° 54'

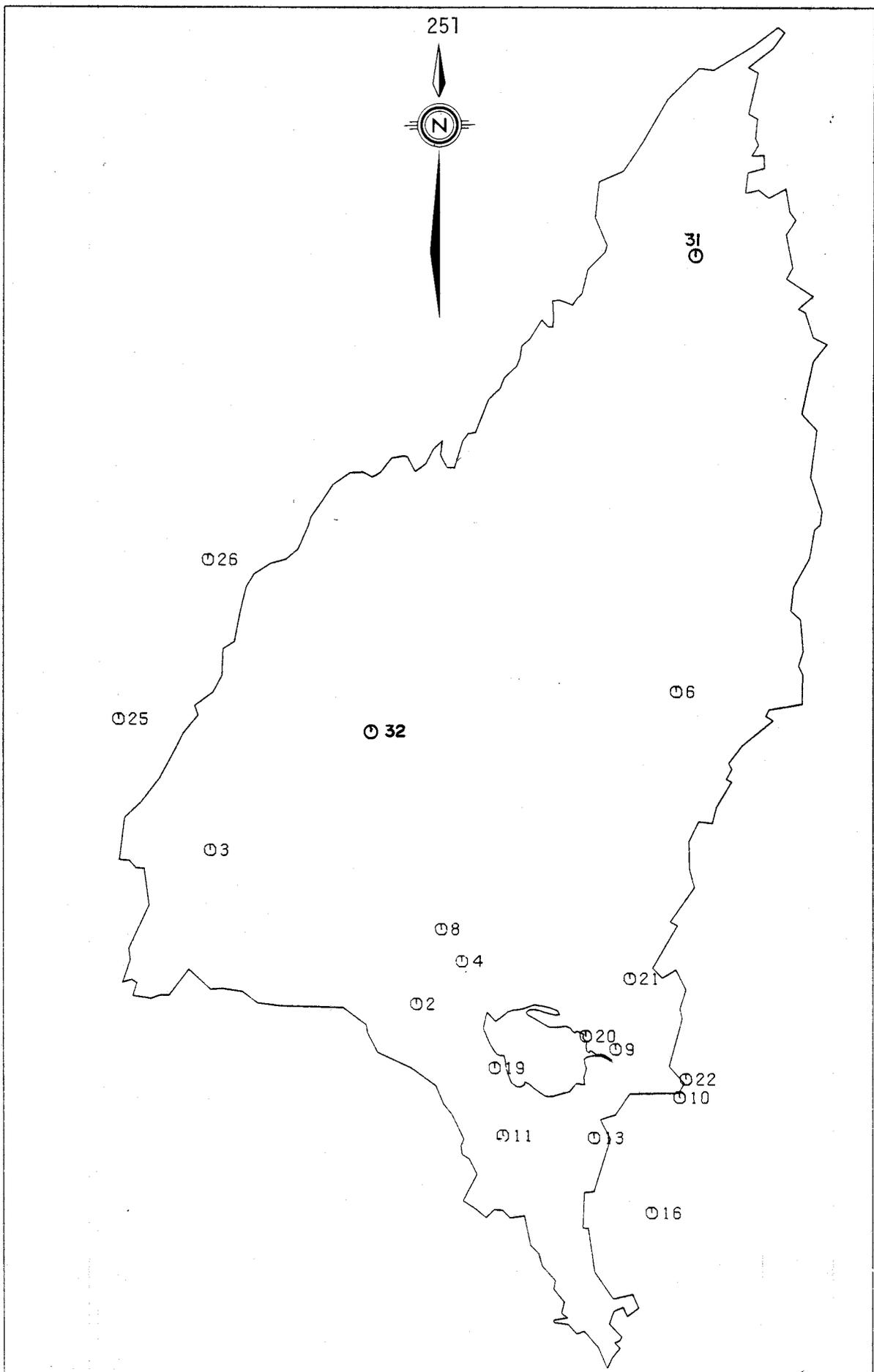


FIGURE 5.63 Répartition géographique des 18 stations météorologiques du réseau M5.

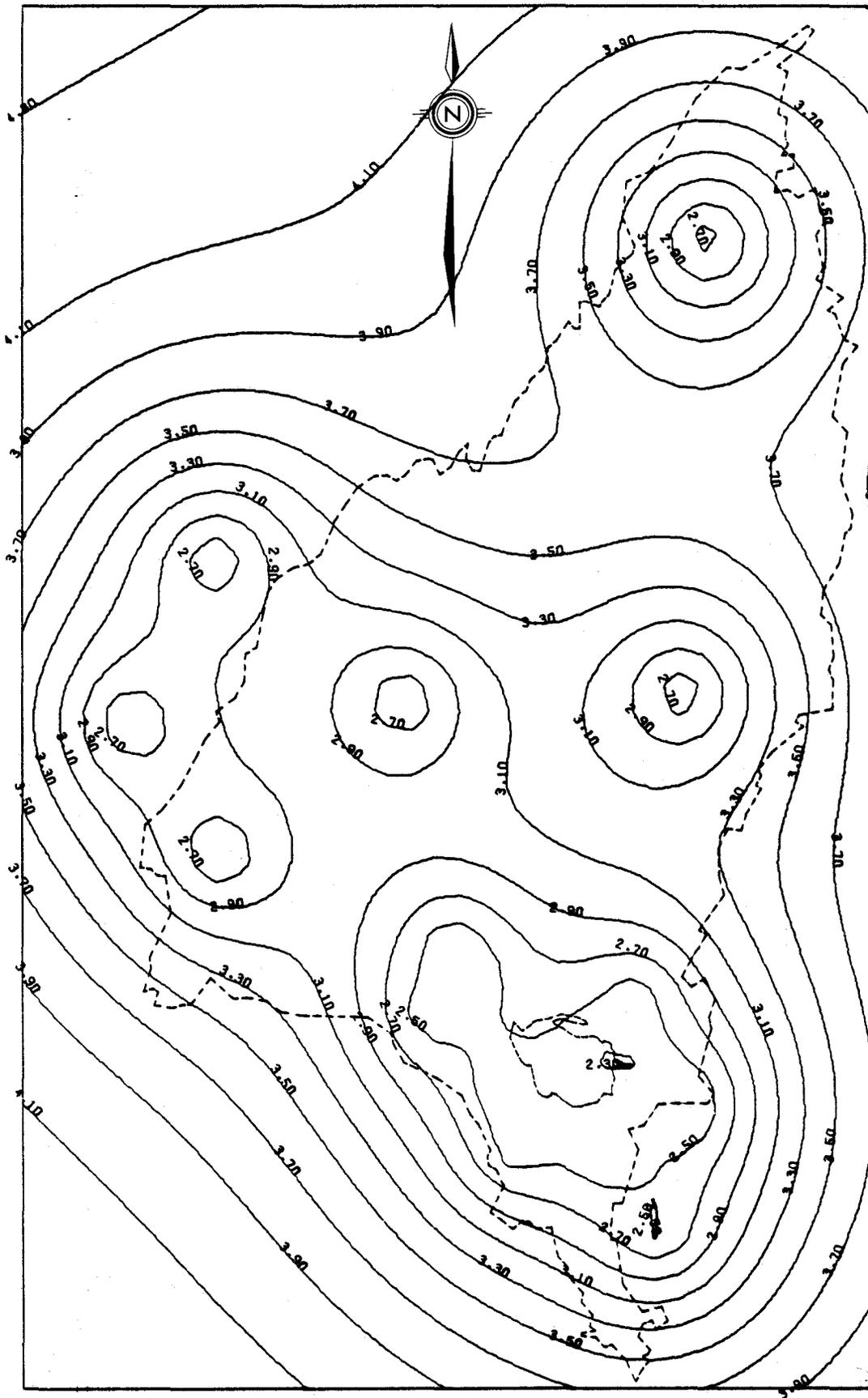


FIGURE 5.64 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ANNUELLE" (réseau M5, 18 stations).

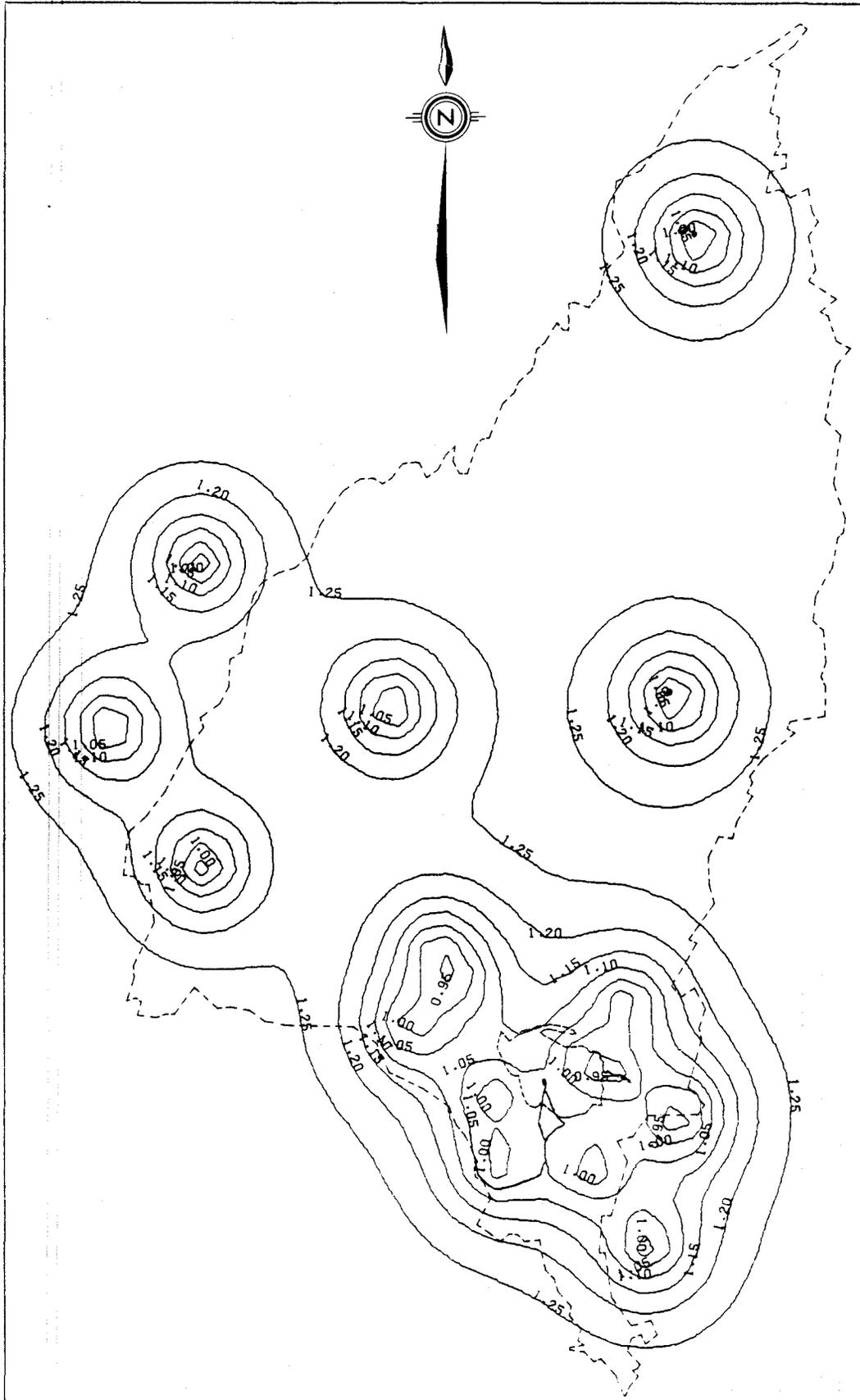


FIGURE 5.65 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée sur 90 jours" (réseau M5, 18 stations).

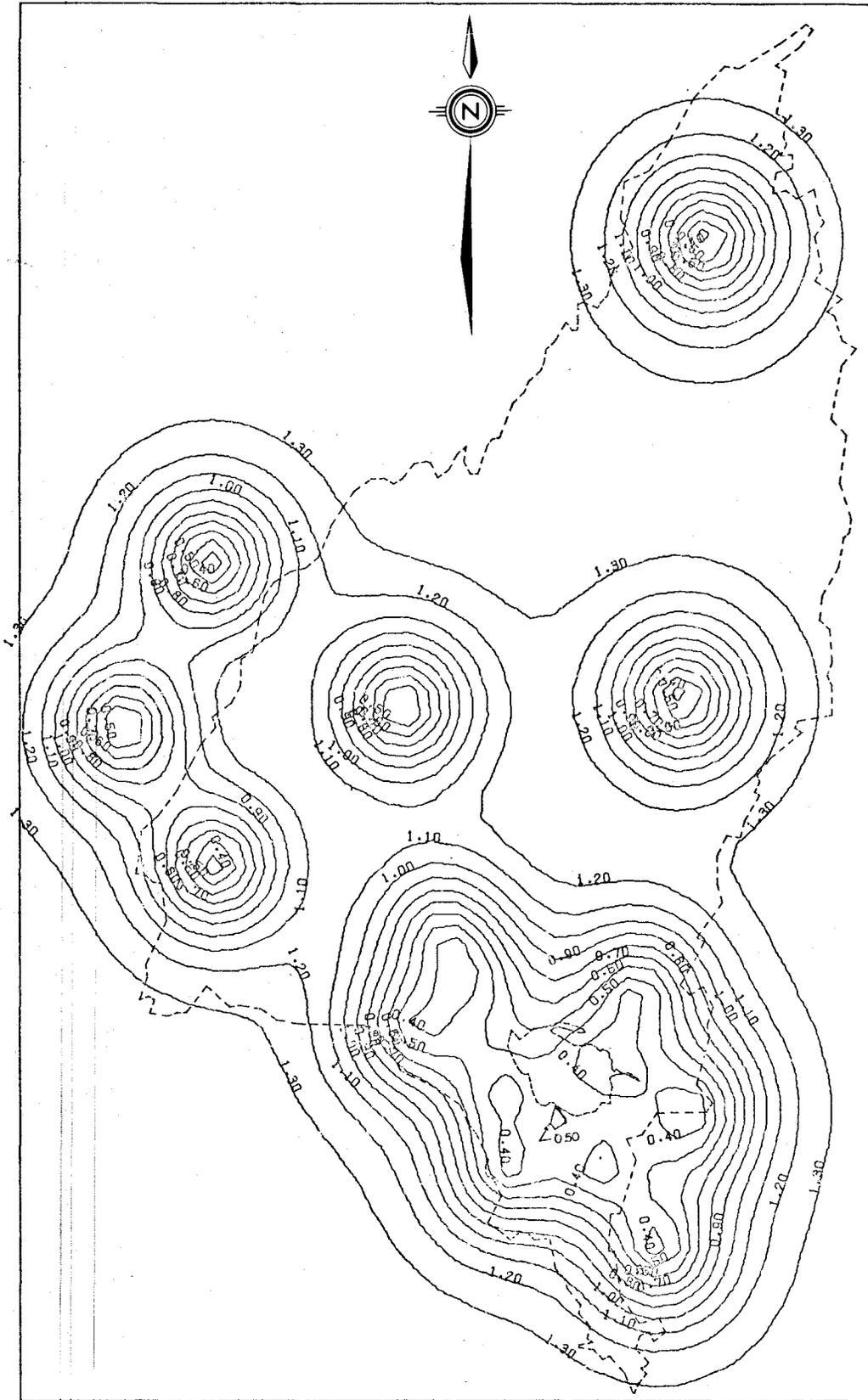


FIGURE 5.66 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée sur 76 jours" (réseau M5, 18 stations).

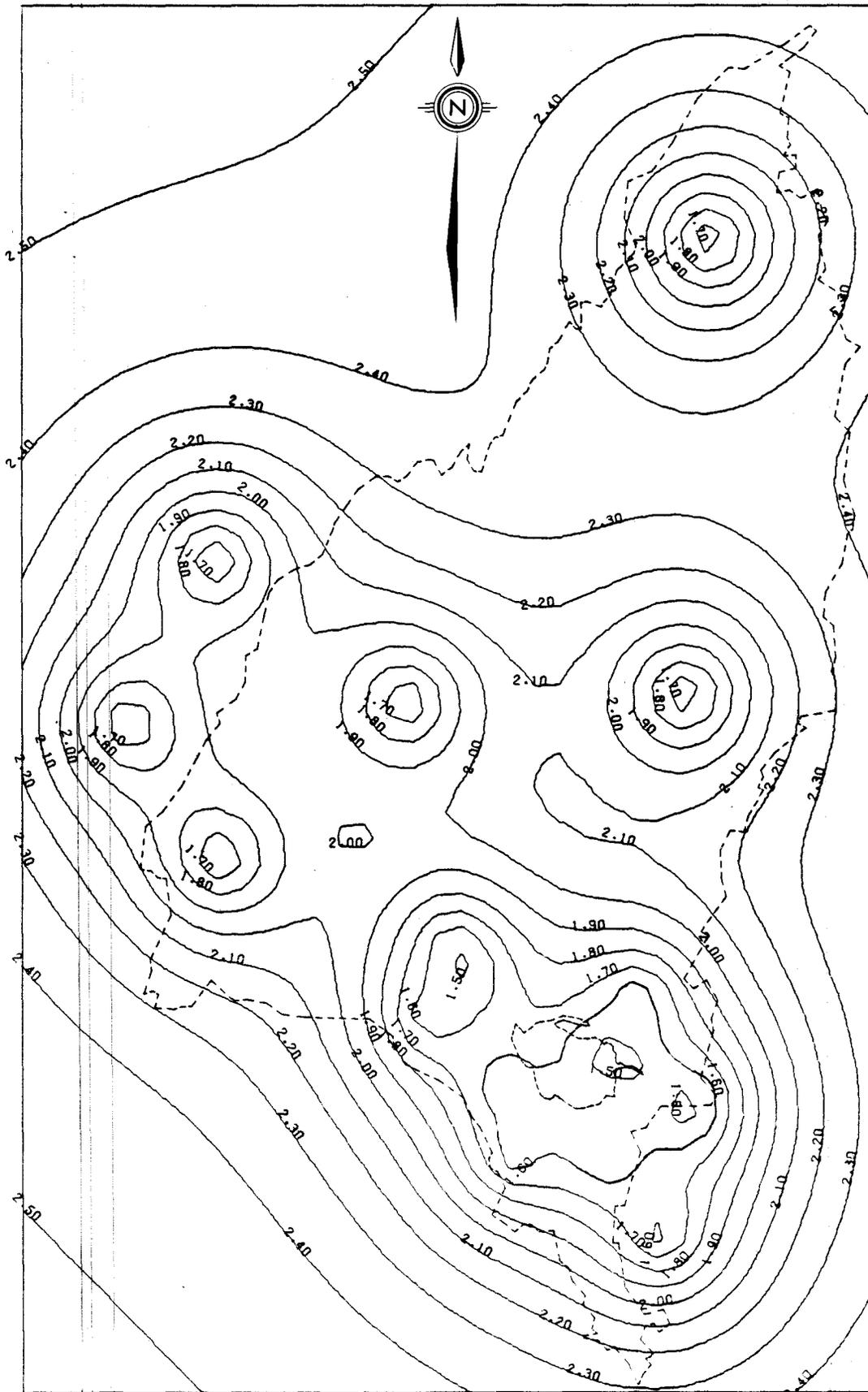


FIGURE 5.67 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée sur 107 jours" (réseau M5, 18 stations).

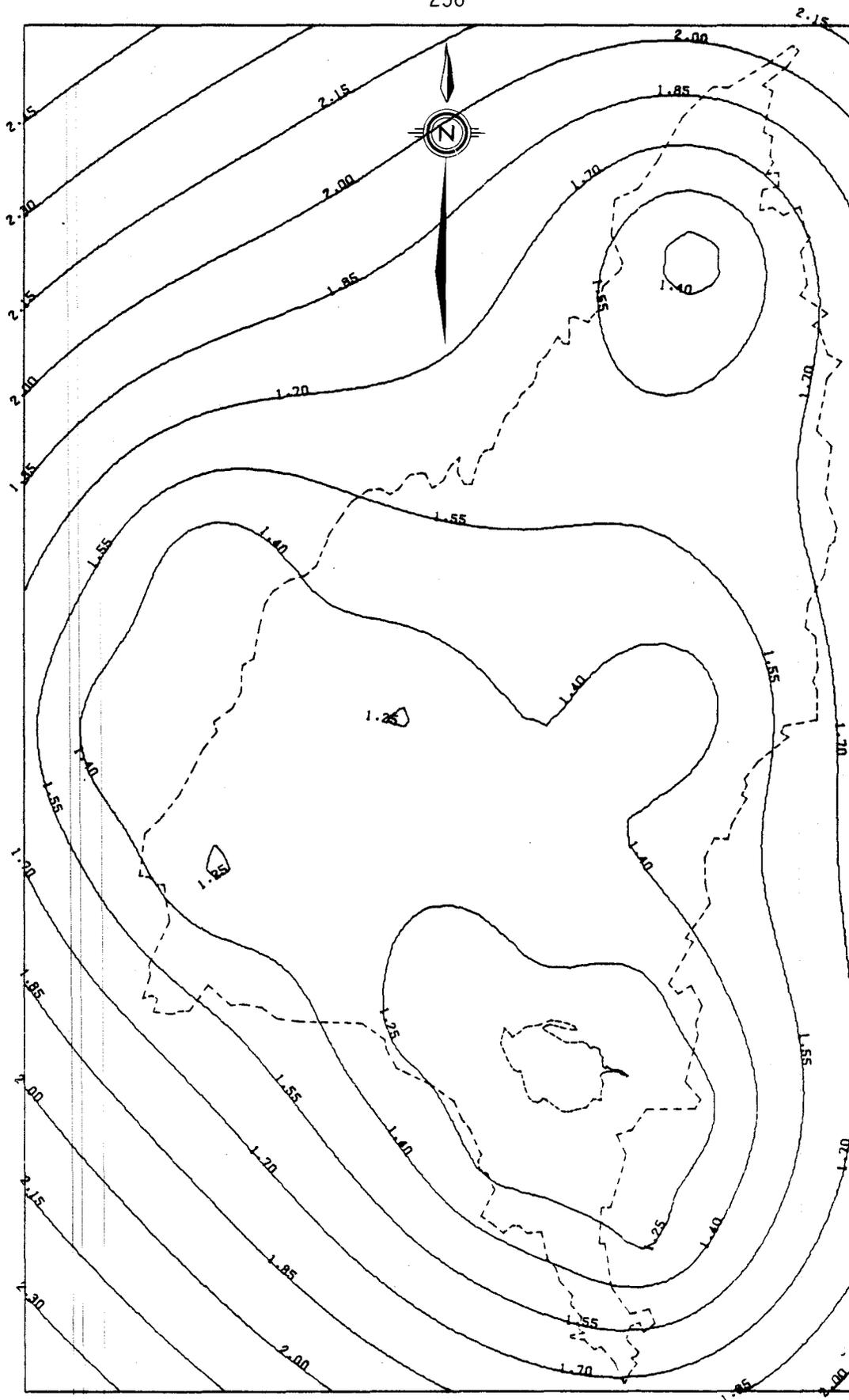


FIGURE 5.68 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée sur 92 jours" (réseau M5, 18 stations).

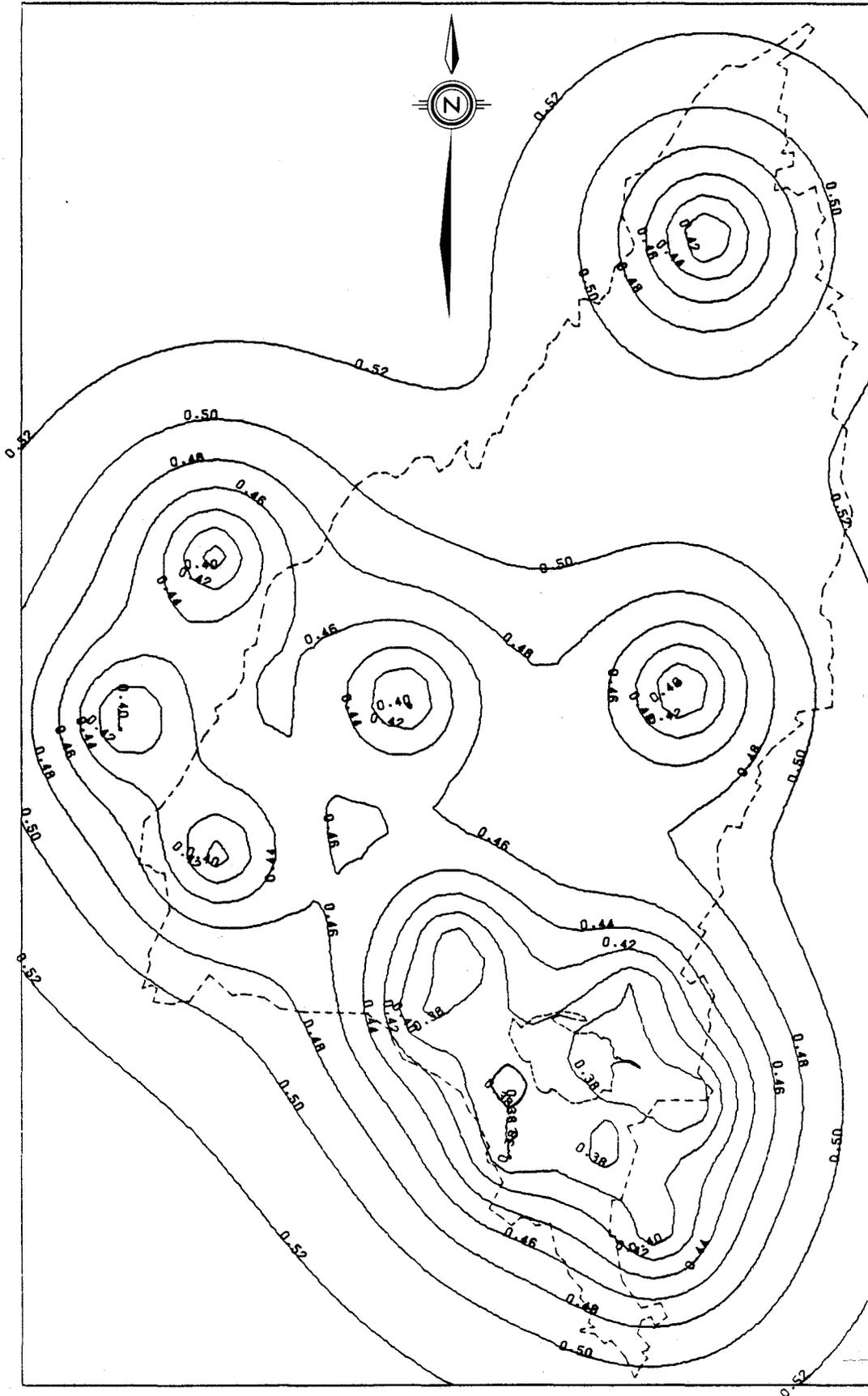


FIGURE 5.69 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "HIVER cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).

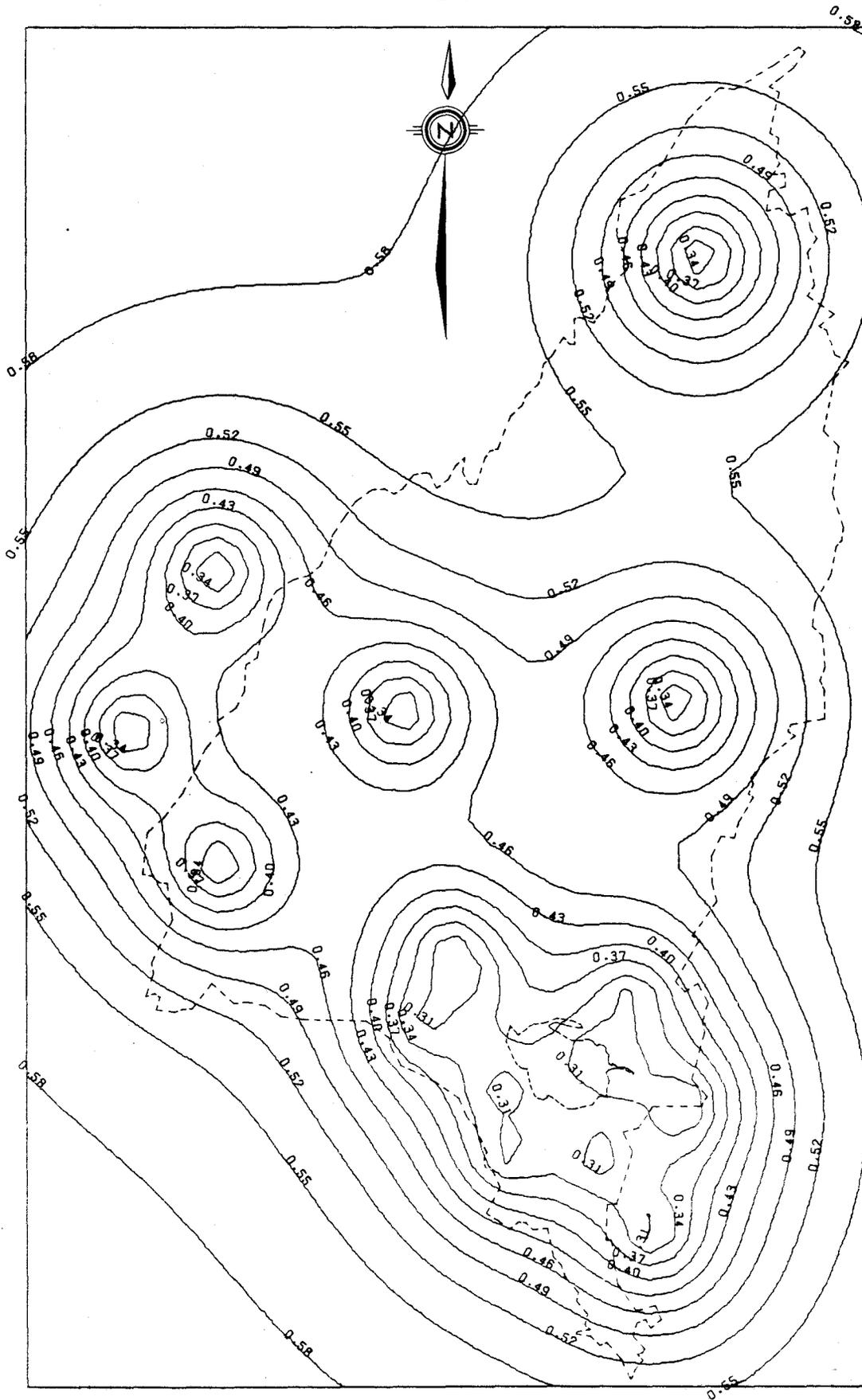


FIGURE 5.70 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "PRINTEMPS cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).

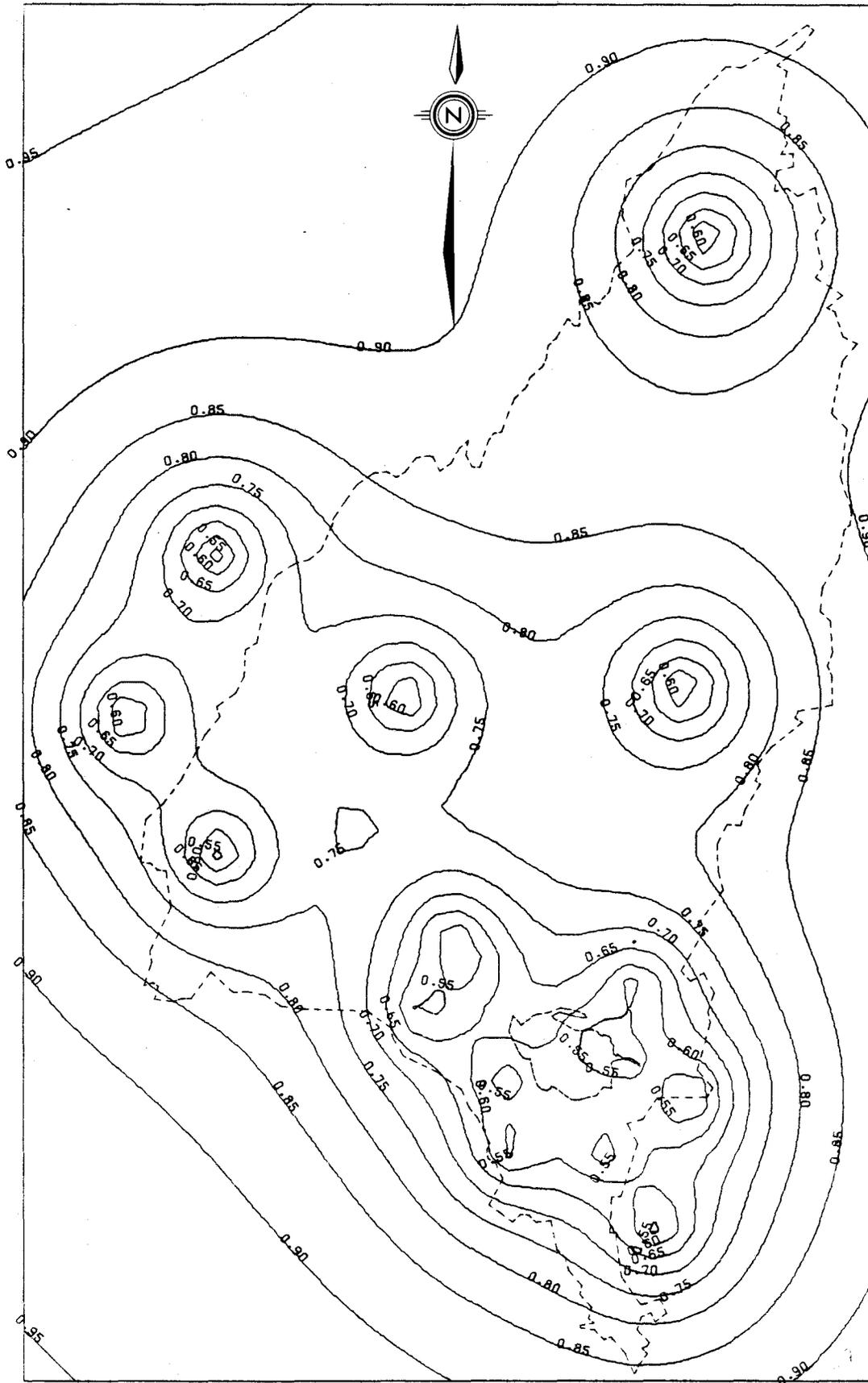


FIGURE 5.71 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "ETE cumulée par 15 jours (réseau M5, 18 stations).

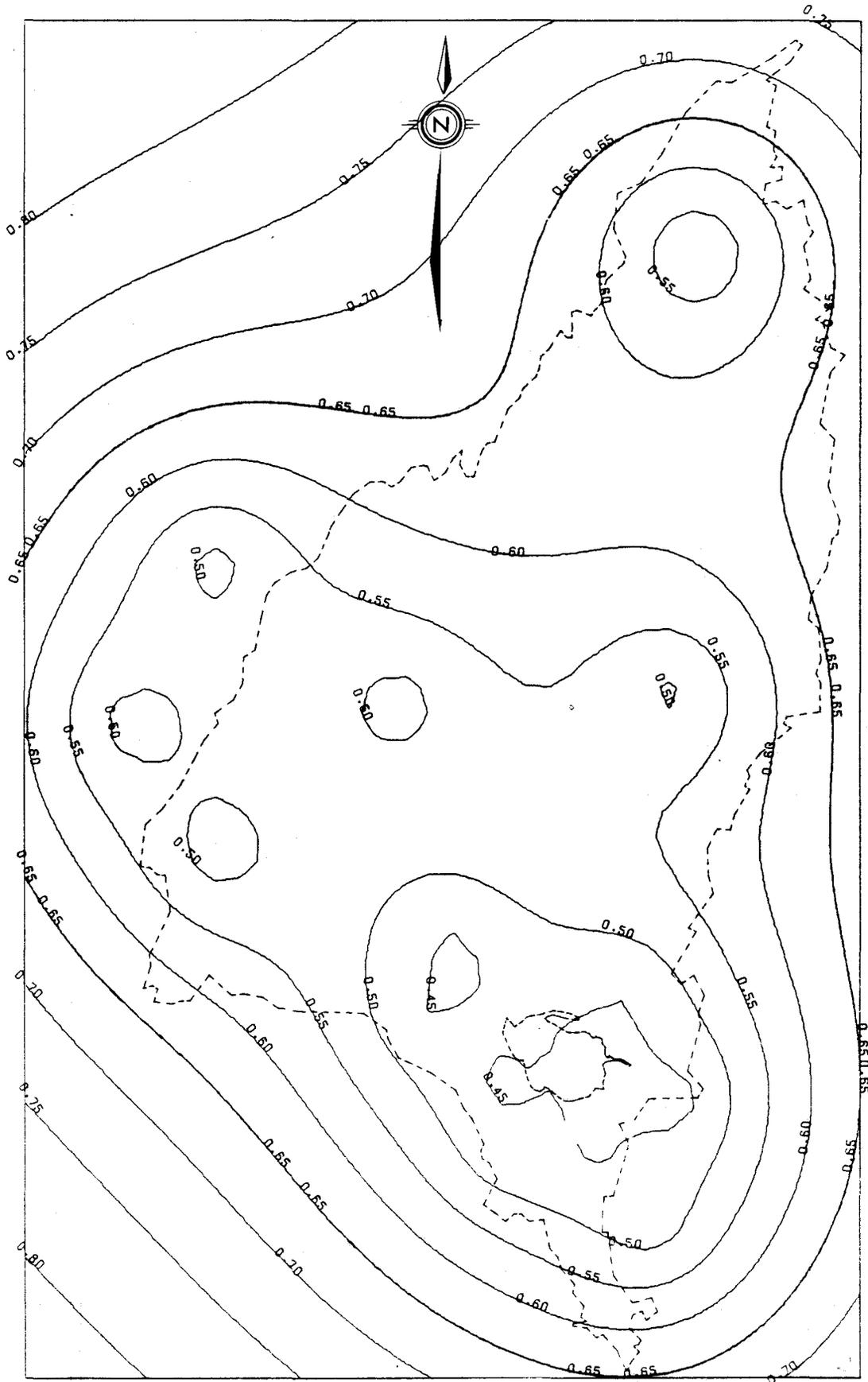


FIGURE 5.72 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation des précipitations moyennes pour la période "AUTOMNE cumulée par 15 jours" (réseau M5, 18 stations).

### 5.5.6 "Réseau N1"

Le premier réseau de stations nivométriques proposé par la SECAL comprend les 24 stations disponibles actuellement dans la région. Le tableau 2.2 contient la liste de ces stations et la figure 2.2 en précise l'emplacement sur le bassin versant du lac Saint-Jean. Quant aux iso-écarts types d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour les mois de "JANVIER", "FEVRIER" et "MARS", ils sont présentés aux figures 5.73 à 5.75. L'étude de ces figures démontre que l'écart type d'estimation maximal varie relativement peu d'un mois à l'autre, soit de 1.35 pouces en "JANVIER" à 1.70 pouces en "MARS". On observe également que pour les trois mois, l'écart type minimal est d'environ 1 pouce, ce qui indique que l'erreur ponctuelle de mesure et de micro-climat ne change pas d'un mois à l'autre.

Les fonctions de structure correspondant à chacun de ces mois (figures 5.70 à 5.72) indiquent une détérioration de plus en plus rapide de l'information lorsque l'on passe de "JANVIER", mois où la fonction est la plus faible et croît de façon uniforme, à "MARS", mois où la fonction croît rapidement aux courtes distances pour atteindre un palier d'environ  $2.85 \text{ po.}^2$  pour 120 milles alors que la fonction de structure de "JANVIER" n'a qu'une valeur de  $1.55 \text{ po.}^2$  à la même distance. Il n'est donc pas étonnant de constater des écarts types plus élevés en "MARS" qu'en "JANVIER".

Notons enfin que les écarts types sont maintenus à des valeurs

inférieures à 1.10 pouces et 1.30 pouces pour plus des trois quarts du bassin, en "JANVIER" et "MARS" respectivement.

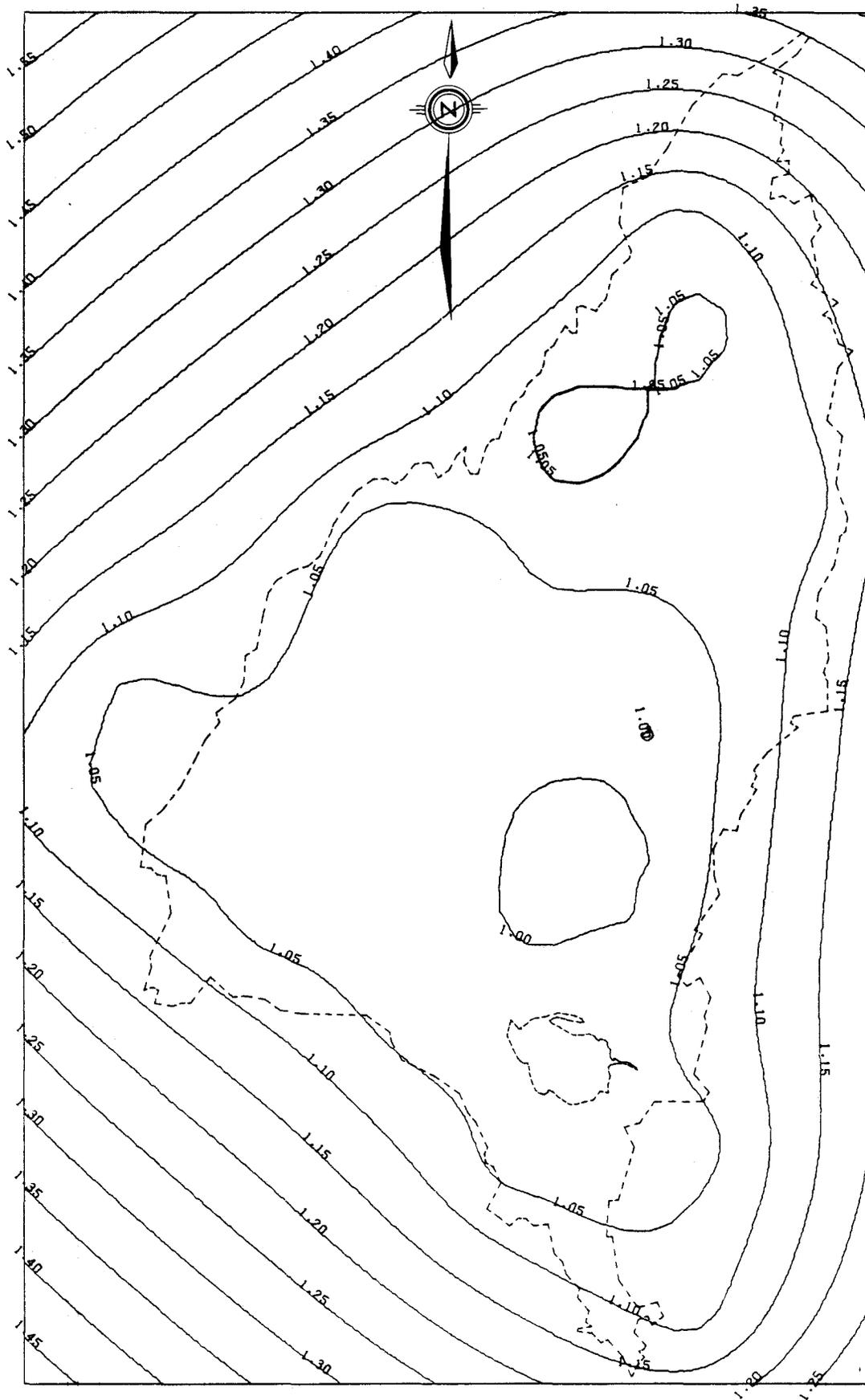


FIGURE 5.73 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "JANVIER" (réseau N1, 24 stations).

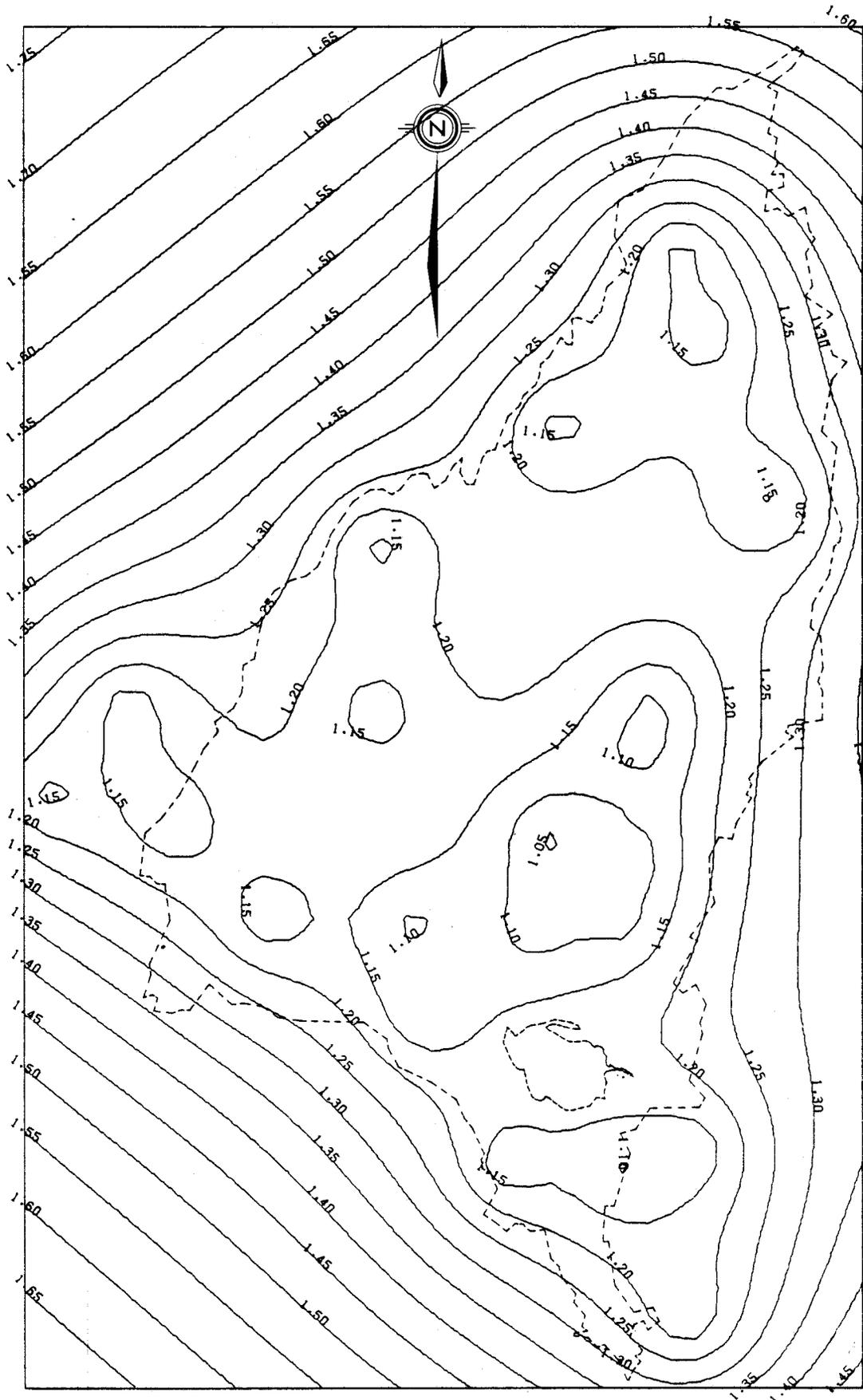


FIGURE 5.74 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "FEVRIER" (réseau N1, 24 stations).

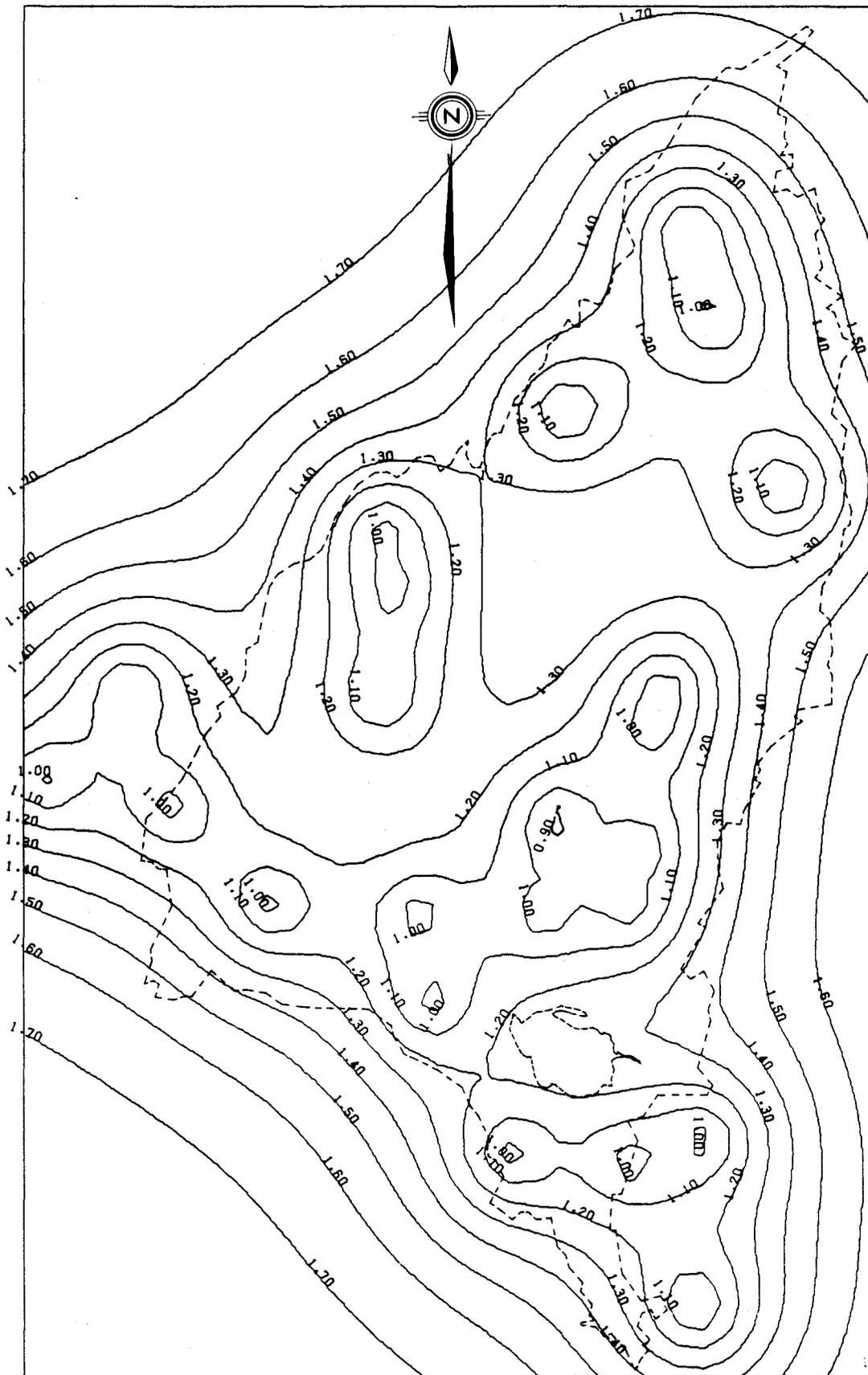


FIGURE 5.75 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "MARS" (réseau N1, 24 stations).

### 5.5.7 "Réseau N2"

Le second réseau de stations nivométriques proposé par la SECAL comprend 17 stations présentées au tableau 5.7. L'emplacement de ces stations sur le bassin versant du lac Saint-Jean est montré à la figure 5.76.

Pour leur part, les écarts types d'estimation calculés avec ce réseau apparaissent aux figures 5.77 à 5.79.

De l'étude comparative du patron des iso-écarts types des réseaux N1 et N2 il ressort très peu de différences, même si le deuxième réseau a sept stations de moins. Une explication plausible de cette observation provient du fait que l'écart type minimal sur le centre du bassin provient en grande partie de l'erreur de mesure et de micro-climat, telle qu'on peut l'estimer par l'ordonnée à l'origine des fonctions de structure.

Les détériorations les plus importantes de l'information météorologique fournie par les stations apparaissent, particulièrement dans l'extrême sud du bassin, à l'est du lac Saint-Jean et à un degré moindre au nord du lac, pour la région correspondant à la ligne d'écart type égale à 1.10 pouces.

TABLEAU 5.7 Stations météorologiques du "Réseau N2".

NOM	NUMERO	NUMERO FEDERAL	ALTITUDE (pieds)	LATITUDE (degrés et minutes)	LONGITUDE (degrés et minutes)
Barrage Gervais	1	621010	650	49° 08'	72° 42'
Barrage nord du Chemin Chibougamau	2	619030	1300	49° 31'	74° 11'
Barrage sud du Chemin Chibougamau	3	619010	650	48° 49'	72° 44'
Chemin de la rivière Mistassibi (22)	4	621020	700	49° 07'	72° 05'
Chemin de la rivière Mistassibi (55)	6	621040	700	49° 29'	71° 56'
Lac Alex	7	622020	900	49° 18'	72° 16'
Lac Benoit	8	622090	1800	51° 32'	71° 07'
Lac Caché	9	807010	1327	49° 53'	74° 24'
Lac Chigoubiche	10	619020	1200	49° 09'	73° 36'
Lac des Commissaires	11	616010	1100	48° 12'	72° 15'
Lac des Cygnes	12	621050	1330	49° 53'	72° 54'
Lac Long	14	619050	1530	50° 30'	72° 58'
Lac Machisque	15	621060	1780	50° 53'	71° 50'
Lac Manouane	16	622060	1650	50° 39'	70° 32'
Lac Piacouadie	17	622080	1800	51° 17'	70° 55'
Passes Dangereuses	18	622040	1290	49° 53'	71° 15'
Rivières aux Ecorces	23	610020	1400	48° 11'	71° 38'

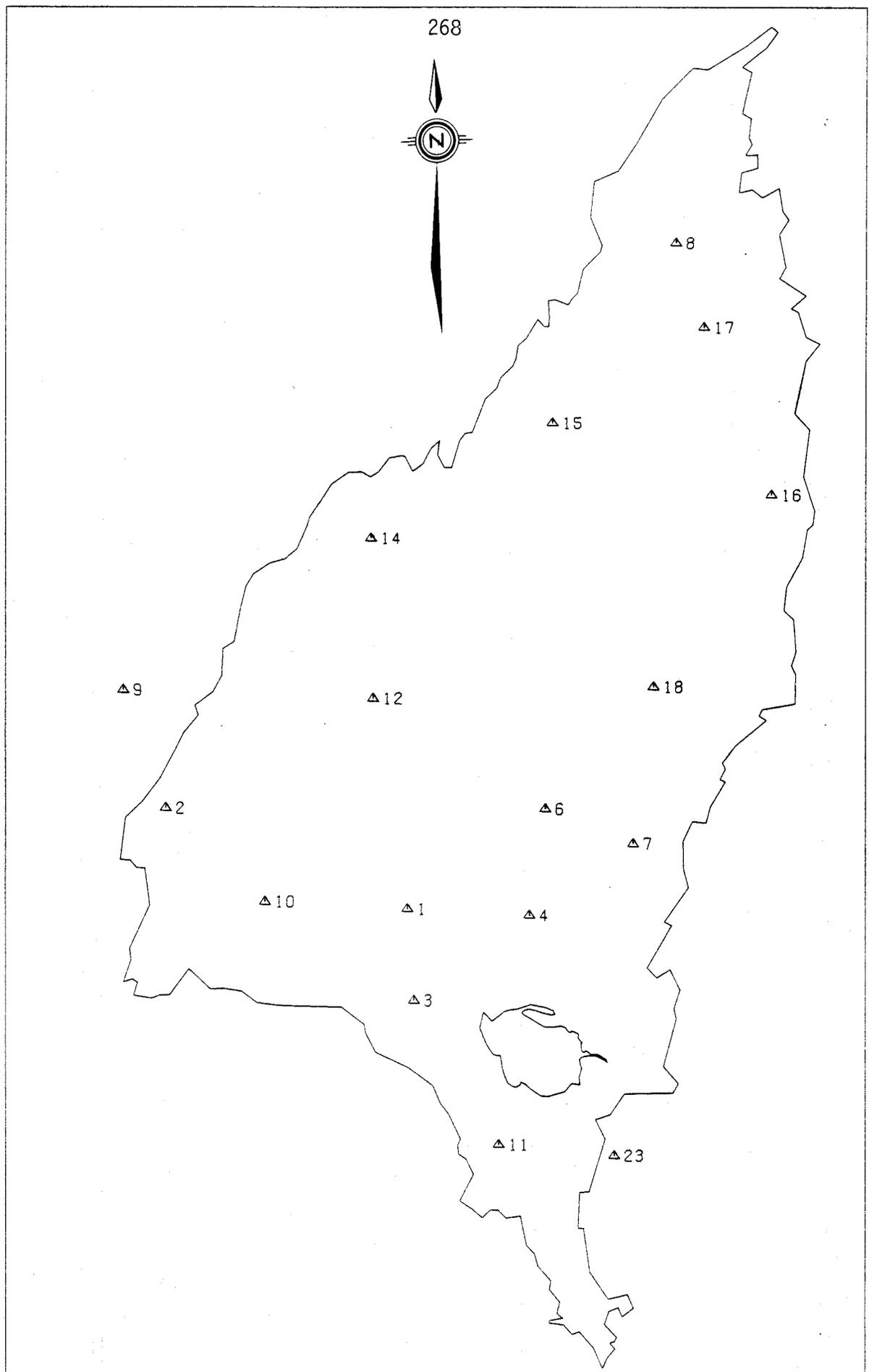


FIGURE 5.76 Répartition géographique des 17 stations de relevés de neige du réseau N2.

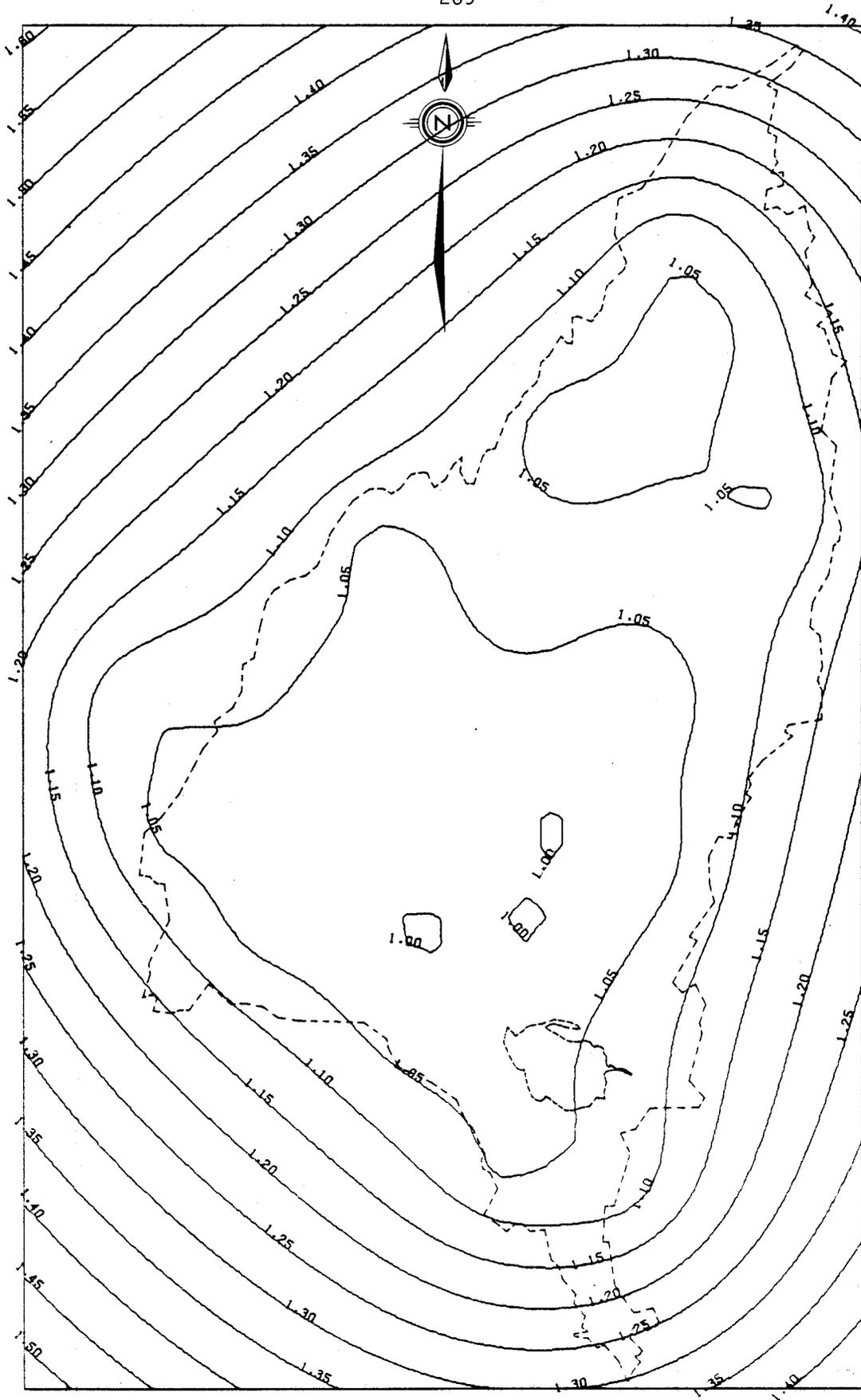


FIGURE 5.77 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "JANVIER" (réseau N2, 17 stations).

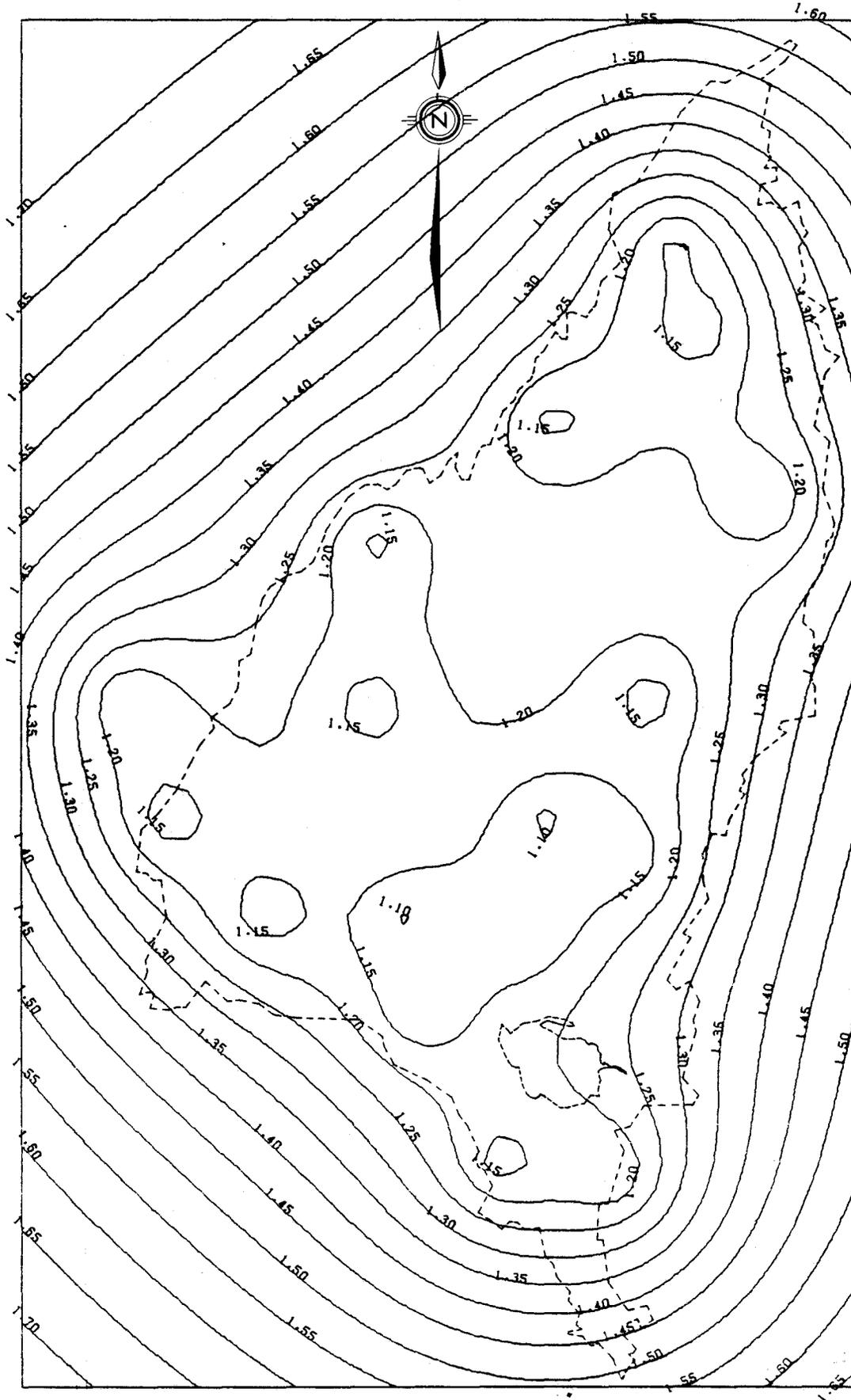


FIGURE 5.78 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois "FEVRIER" (réseau N2, 17 stations).

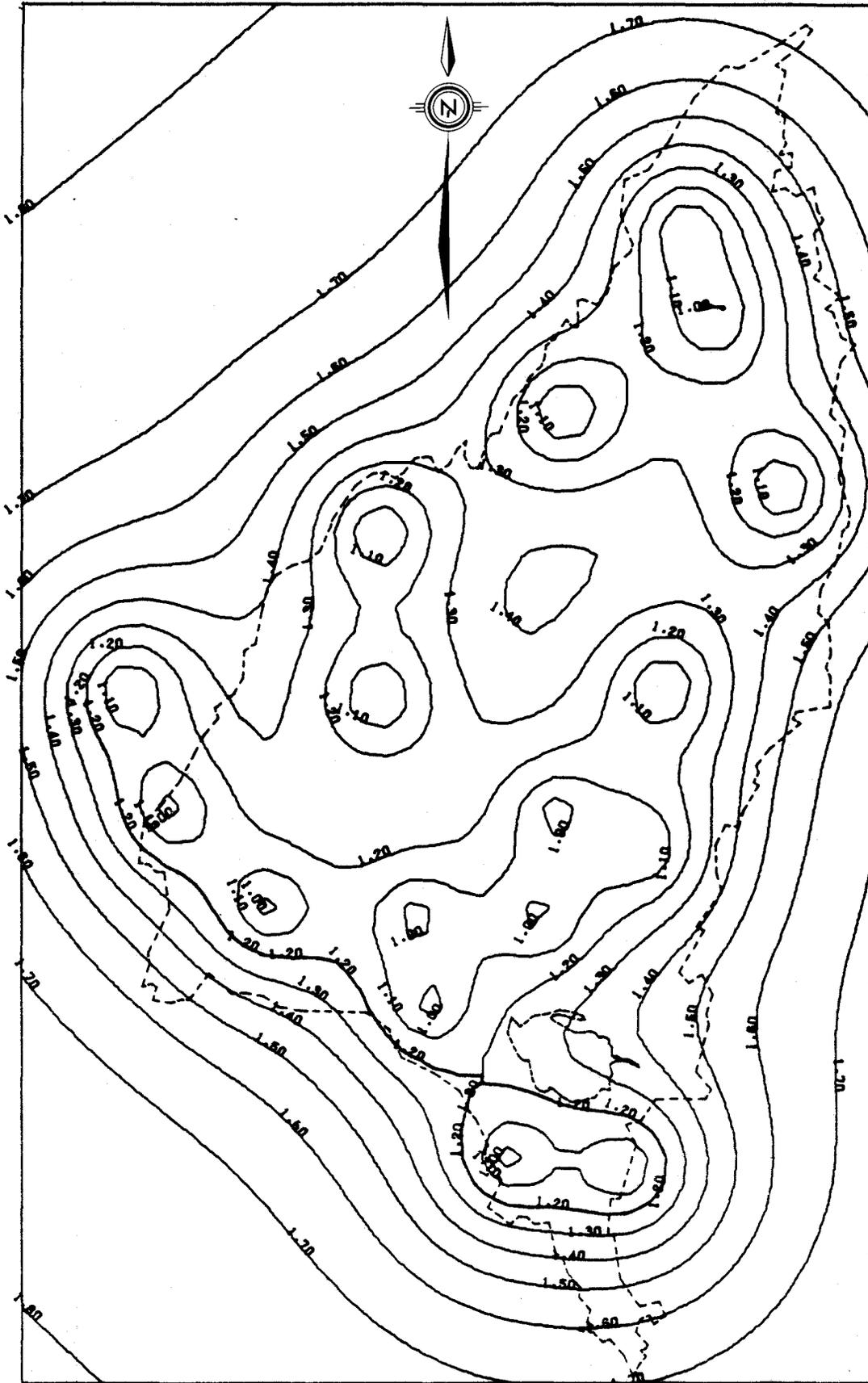


FIGURE 5.79 Ecart type ponctuel (pouce) d'estimation de l'équivalent en eau de la neige au sol pour le mois de "MARS" (réseau N2, 17 stations).

## 5.6 ERREUR SUR DES SURFACES

Jusqu'à maintenant nous n'avons discuté que de l'évaluation des erreurs ponctuelles. Il est bien évident que l'intégration de ces erreurs sur une surface donnée ne correspond pas à l'erreur de l'estimé sur cette surface. Les études hydrologiques, plus particulièrement les modèles paramétriques ou statistiques pluie-débit, ou encore les prévisions de débits sur un bassin versant nécessitent de préférence l'estimé des erreurs sur une surface donnée.

Kagan (1966) a développé une méthode simple pour estimer l'erreur commise sur l'évaluation de la précipitation moyenne sur une superficie donnée.

La base de la méthode proposée par Kagan est la fonction de corrélation  $\rho(d)$  qui dépend de la distance entre les stations. Cette fonction  $\rho(d)$  peut être représentée par la forme exponentielle suivante:

$$\rho(d) = \rho(0) e^{-d/d_0} \quad (5-12)$$

où

$\rho(0)$  est la corrélation correspondant à la distance zéro;

$d_0$  est le "rayon de corrélation" ou la distance pour laquelle la corrélation est égale à  $\rho(0)/e$ .

Théoriquement  $\rho(0)$  doit être égal à l'unité; mais en pratique c'est rarement le cas. Ceci est dû aux erreurs de mesure des précipitations et au micro-climat, tout comme on l'a vu précédemment pour la fonction

de structure. On peut d'ailleurs estimer l'écart type de ces erreurs par:

$$\sigma = \sqrt{(1 - \rho(o)) \sigma_h^2} \quad (5-13)$$

où

$\sigma$  = écart type relié aux erreurs de mesure et au micro-climat;

$\sigma_h^2$  = variance des précipitations en un point.

Kagan a montré que la variance de l'erreur d'estimation de la précipitation moyenne sur une surface (s) avec une station centrale est donnée par:

$$V = \sigma_h^2 \left[ 1 - \rho(o) \right] + 0.23 \sigma_h^2 \frac{\sqrt{s}}{d_o} \quad (5-14)$$

Le premier terme est attribué à l'erreur associée aux mesures et au micro-climat et le second est attribué à la variance des champs de précipitations.

Pour une surface S avec n stations distribuées uniformément la variance de l'erreur de la précipitation moyenne est donnée par:

$$V_n = \frac{\sigma_h^2}{n} \left[ 1 - \rho(o) + \frac{0.23 \sqrt{S}}{d_o \sqrt{n}} \right] \quad (5-15)$$

L'erreur relative est alors définie par:

$$Z = \frac{\sqrt{V_n}}{\bar{h}} = C_v \sqrt{\frac{1 - \rho(o) + 0.23 \cdot \frac{\sqrt{S}}{d_o \sqrt{n}}}{n}} \quad (5-16)$$

où

$Z$  = est l'erreur relative;

$C_v = \sigma_h / \bar{h}$  ;

$\bar{h}$  = précipitation moyenne sur  $s$ .

Si  $\rho(o)$  et  $d_o$  sont connus, on peut calculer le nombre de stations requises pour obtenir une erreur spécifiée  $Z$ , ou inversement évaluer  $Z$  pour un nombre  $n$  de stations.

Les réseaux météorologiques et nivométriques du bassin versant du lac Saint-Jean ne sont pas distribués uniformément. On peut cependant estimer l'erreur moyenne sur la surface sachant que les valeurs obtenues correspondent à un réseau dont les stations sont uniformément distribuées; ce vers quoi on doit tendre.

### 5.6.1 Analyse des résultats

La fonction de corrélation est déterminée en calculant pour tous les couples de stations, les coefficients de corrélation et les distances les séparant. Comme pour la fonction de structure, l'axe des distances est subdivisé en classes et on calcule à l'intérieur de chaque classe la corrélation moyenne. On ajuste

alors la courbe exponentielle décrite par l'équation (5-12). Comme d'après Kagan la forme exponentielle décrit la plupart des fonctions de corrélation pour des distances de 10 à 150 km; l'ajustement a été fait en utilisant seulement les points dont la distance est inférieure à 80 milles.

Les figures 5.80 et 5.81 présentent ces ajustements pour les différentes périodes étudiées. Les graphiques montrent l'ensemble des points calculés, mais seulement les points à gauche de la ligne pointillée ont été utilisés. Le fait de prendre seulement ces points pour l'ajustement nous permet de mieux définir la corrélation à la distance zéro ( $\rho(0)$ ). Les caractéristiques des précipitations et des relevés de neige nécessaires au calcul de l'erreur sur une surface sont reportés au tableau 5.8; on constate beaucoup de variations d'une période à l'autre. Ainsi,  $d_0$  varie de 71 milles pour la saison "ETE" à 278 milles pour la saison "AUTOMNE". La corrélation à la distance zéro ( $\rho(0)$ ), qui nous indique l'erreur d'observation et de micro-climat, varie de 0.59 pour la période "HIVER" à 0.99 pour la période "PRINTEMPS". A quelques exceptions près, ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la littérature. Ainsi, Haragan (1976) trouve des valeurs de  $d_0$  variant de 100 à 220 milles pour les précipitations mensuelles des mois de mai à septembre au Texas. Gushchina (1967) trouve 140 milles pour des précipitations de 10 jours en été dans la région de Valdaï et 200 milles dans une autre région de Russie. L'étude de Gushchina montre en outre des valeurs de  $\rho(0)$  variant

de 0.85 à 0.97 pour des périodes d'une journée à une saison. On observe en général que le coefficient de corrélation estimé à une distance zéro s'approche d'autant plus de 1 que la période est longue. Ainsi, la corrélation  $\rho(0)$  des précipitations saisonnières est en général plus forte que celles des précipitations mensuelles.

Sur le tableau 5.8 on observe que les coefficients de corrélation estimés pour une distance zéro est trois fois sur quatre plus faible pour les périodes saisonnières que pour les périodes par 15 jours. On ne peut expliquer physiquement ce résultat; on peut cependant, encore une fois, supposer l'influence du peu d'observations utilisées pour les calculs des coefficients de corrélation des périodes saisonnières. L'influence des erreurs de mesure et de micro-climat ne peuvent être retenues puisque qu'elles interviennent dans les deux cas.

Les intervalles de confiance à 95% des valeurs de  $\rho(0)$  et  $d_0$  qui sont tabulées au tableau 5.8 indiquent une grande variation des paramètres provenant de l'ajustement de la courbe exponentielle sur des points dont la dispersion est quelquefois importante, comme on peut le constater sur les figures 5.80 et 5.81.

A l'aide de l'équation (5-16) et des données du tableau 5.8, on peut calculer l'erreur relative de l'estimé des précipitations et de l'équivalent en eau de la neige au sol pour les différentes périodes en fonction d'un nombre de  $n$  stations réparti uniformément

TABLEAU 5.8 Caractéristiques des précipitations et des relevés de neige pour différentes périodes sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

PERIODE	MOYENNE (pouce)	$\sigma_h$ (pouce)	$C_v$	$\rho$ (o)	INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%		$d_o$ (mille)	INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%	
					minimum	maximum		minimum	maximum
Annuelle	37.613	4.566	0.12	0.88	0.80	0.95	111	75	148
Hiver	7.022	2.452	0.35	0.59	0.51	0.67	78	40	115
Printemps	6.313	2.142	0.34	0.99	0.91	1.0	171	102	240
Eté	15.497	2.556	0.16	0.86	0.73	0.99	71	43	99
Automne	9.065	2.284	0.25	0.80	0.74	0.87	278	98	459
Hiver/15 jours	1.132	0.776	0.69	0.86	0.83	0.89	220	170	271
Printemps/15 jours	1.217	0.86	0.71	0.94	0.88	1.00	171	116	226
Eté/15 jours	2.181	1.126	0.52	0.91	0.86	0.97	111	85	137
Automne/15 jours	1.505	0.833	0.55	0.85	0.78	0.92	129	84	175
Relevé de neige JANVIER	5.880	1.811	0.31	0.81	0.77	0.86	328	217	439
Relevé de neige FEVRIER	8.346	1.883	0.23	0.78	0.73	0.84	246	154	339
Relevé de neige MARS	9.632	2.229	0.23	0.84	0.74	0.94	212	114	309

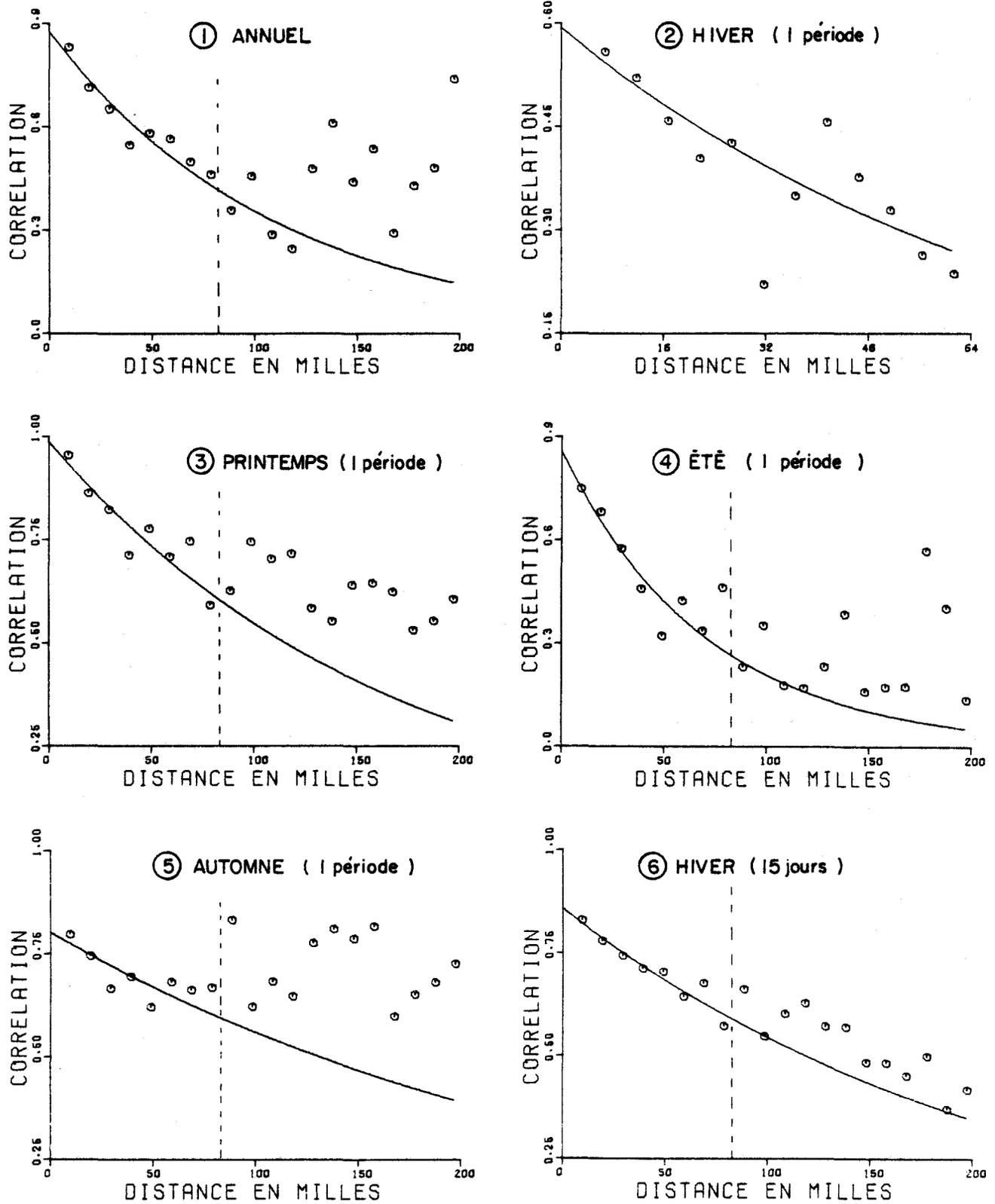


FIGURE 5.80 Exponentielles ajustées aux coefficients de corrélation des précipitations en fonction de la distance.

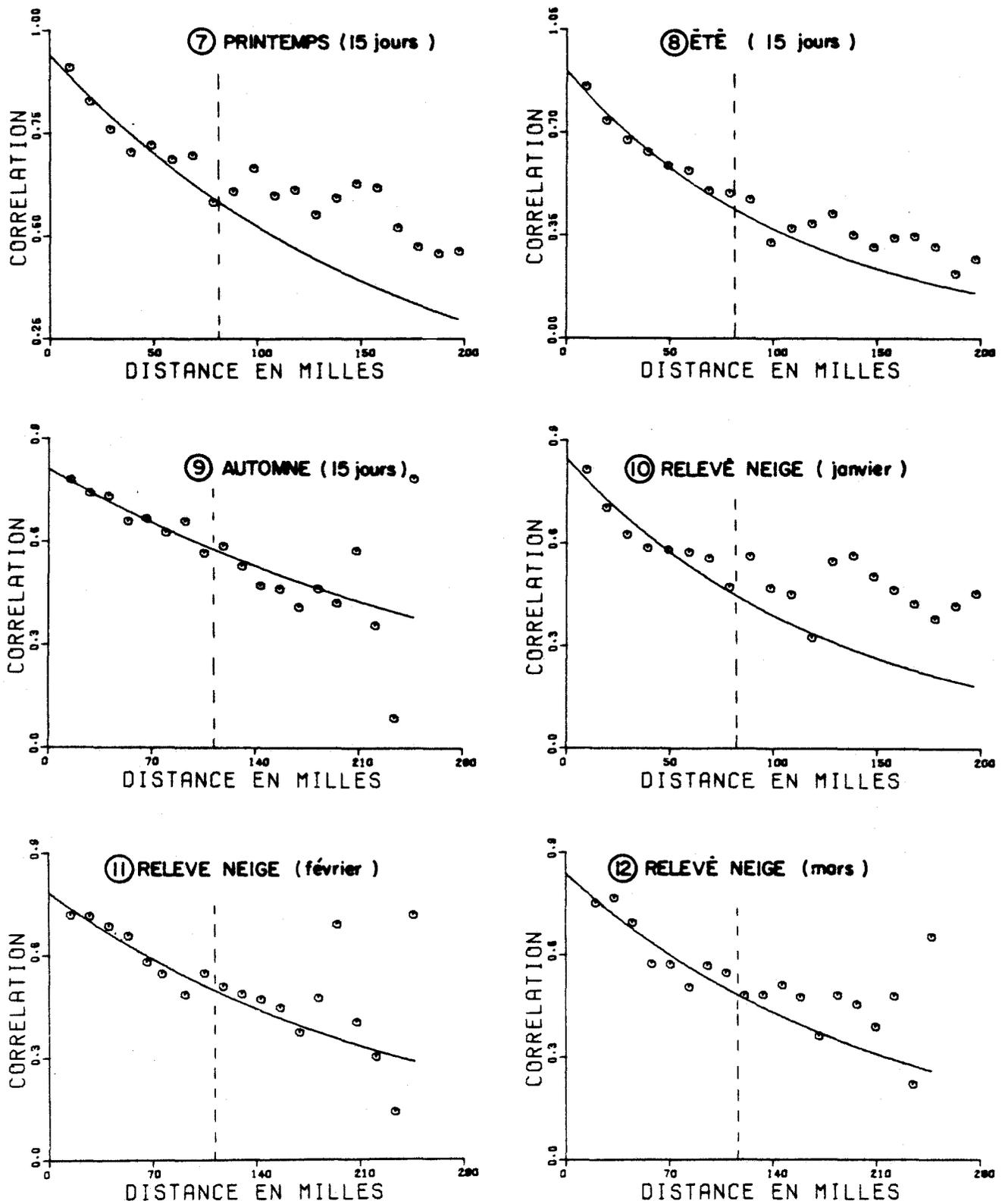


FIGURE 5.81 Exponentielles ajustées aux coefficients de corrélation des précipitations et des relevés de neige en fonction de la distance.

sur le bassin versant du lac Saint-Jean, bassin dont la superficie est égale à 28,200 milles carrés.

Le tableau 5.9 montre pour chaque période étudiée l'erreur relative moyenne de l'estimation des précipitations et de l'équivalent en eau de la neige au sol. On constate que dans l'ensemble ces pourcentages d'erreurs sont relativement faibles, ce qui peut être attribué en particulier aux valeurs élevées de  $d_0$  et aux faibles valeurs du coefficient de variation  $C$ . Notons encore une fois que ces résultats ont trait à un réseau de stations uniformément distribuées sur la surface, ce qui n'est pas le cas des divers réseaux étudiés. Même le réseau M2, le plus complet, n'est pas uniforme, les distances moyennes entre les stations étant plus courtes dans le sud que dans le nord du bassin.

Comme la diminution de l'erreur relative dépend en particulier de la racine carrée du nombre de  $n$  de stations, elle décroît plus rapidement lorsque le nombre de stations augmente de 5 à 10 que lorsque ce nombre passe de 10 à 20 puis de 20 à 30. Il y a donc un intérêt limité à augmenter le nombre de stations, passé une certaine erreur, le nombre de stations à ajouter devenant relativement important pour une légère diminution de l'erreur relative.

## 5.7 CONCLUSION

Le calcul des écarts types en tout point du bassin du lac Saint-Jean a permis d'analyser chacun des réseaux proposés par la SECAL et de

TABLEAU 5.9 Erreur relative en % des précipitations et des relevés de neige pour différentes périodes, en fonction du nombre de postes météorologiques distribués uniformément sur le bassin versant du lac Saint-Jean.

PERIODE	NOMBRE DE STATIONS			
	30	20	10	5
Annuel	0.93	1.19	1.82	2.81
Hiver	4.52	5.64	8.33	12.44
Printemps	1.40	1.87	3.06	5.06
Eté	1.42	1.83	2.82	4.43
Automne	2.16	2.69	3.90	5.72
Hiver/15 jours	5.22	6.53	9.65	14.42
Printemps/15 jours	4.12	5.27	8.14	12.7
Eté/15 jours	3.17	4.76	7.35	11.52
Automne/15 jours	4.54	5.73	8.60	13.10
Relevé neige JANVIER	2.60	3.22	4.67	6.83
Relevé neige FEVRIER	2.09	2.59	3.78	5.54
Relevé neige MARS	1.85	2.30	3.39	5.05

comparer ces réseaux entre eux.

Il ressort que ce n'est pas au niveau des écarts types maxima et minima que les réseaux se distinguent, ces valeurs étant souvent les mêmes quel que soit le réseau, pour une période donnée. C'est plutôt la variation de la répartition spatiale des valeurs prises par les écarts types qui différencie les réseaux les uns des autres.

Dans le cas des précipitations, c'est naturellement le réseau M2, avec ses 30 stations, qui permet d'obtenir les écarts types ponctuels les plus bas sur l'ensemble du bassin. Le réseau M5, avec 18 stations, donne les meilleurs résultats, après le réseau M2. Dans l'éventualité où le réseau M2 ne pourrait être maintenu, il serait bon de considérer alors le réseau M5 additionné de quelques stations placées aux endroits où le réseau M5 est le plus déficient, tel qu'indiqué par la distribution spatiale des écarts types. Dans tous les cas, il faudrait tenter de maintenir un réseau de stations réparties de façon relativement uniforme, tout en tenant compte des sous-bassins pour lesquels des données plus précises seraient requises et de la possibilité d'établissement de stations aux sites suggérés par la distribution spatiale d'écarts types.

Les mêmes remarques peuvent s'adresser aux réseaux de lignes de neige N1 et N2. Ces réseaux qui comptent respectivement 24 et 17 stations ne conduisent pas à des résultats tellement différents l'un de l'autre. L'addition d'une station à l'est du lac, près des limites du bassin versant, permettrait de diminuer les écarts types calculés pour cette partie du bassin. D'autre part, l'étude des deux distributions

spatiales d'écarts types pourrait permettre de décider de créer des stations en d'autres points.

Rappelons en terminant que les erreurs de surfaces ont été calculées pour le bassin entier. Il y aurait avantage éventuellement à reprendre le même type de calculs pour certains sous-bassins, surtout si des précisions différentes sont requises.



CHAPITRE 6

CONCLUSION GENERALE



L'analyse des réseaux de mesure des précipitations et de neige au sol, pour le bassin du lac Saint-Jean, a permis de faire ressortir les principales caractéristiques des réseaux actuels et d'étudier dans quelle mesure des réseaux différents pourraient permettre d'estimer les données désirées avec une précision supérieure ou au moins égale à celle des réseaux actuels.

Dans le chapitre 3, qui porte sur la qualité des données, on a pu constater qu'en général la qualité des données aux stations est satisfaisante. On dénote cependant certaines anomalies dans la prise des données et dans l'homogénéité des séries chronologiques pour un nombre restreint de stations. Notons ici que l'un des buts principaux de la SECAL étant de faire de la gestion des ressources en eau du bassin, et donc de travailler sur des données futures, il sera important pour la compagnie de s'assurer que les données futures soient de bonne qualité et homogènes dans le temps. Quelques stations seront peut-être davantage à surveiller, pour assurer une meilleure précision dans l'utilisation qui sera faite des données qu'elles fourniront.

A l'échelle du bassin versant du lac Saint-Jean, certaines stations ont des comportements assez semblables pour former des groupes. On a constaté ainsi que certaines stations demeuraient toujours dans le même groupe, alors que d'autres pouvaient passer d'un groupe à un autre suivant la saison. Evidemment, le faible nombre de stations dans la moitié nord du bassin n'a pas permis de faire une analyse très fine de ce qui pourrait être le regroupement des stations d'un éventuel réseau

plus dense. Cette étude, complétée par celle qui a été réalisée à l'aide de l'interpolation optimale, donne cependant des indications utiles sur la façon dont on pourrait améliorer la répartition géographique des stations et par suite la précision du réseau actuel.

Enfin les cinq réseaux proposés ont été étudiés à l'aide de la méthode de l'interpolation optimale. Pour chacun de ces réseaux, on a déterminé la distribution spatiale des écarts types d'estimation des valeurs prises en tout point du bassin. Chacun de ces réseaux a donné lieu à des résultats différents, compte tenu du nombre de stations qu'il comprenait et de la distribution géographique de ses stations. A partir de ces résultats, la SECAL pourra déterminer si l'un de ces réseaux correspond à ses besoins et à la précision qu'elle désire, ou sinon bâtir un réseau qui résulte des diverses observations faites dans l'étude des distribution spatiale d'écarts types.

A la suite de cette étude, et des décisions qui en découleront, la SECAL pourra donc atteindre une meilleure gestion des ressources en eau du bassin du lac Saint-Jean.

CHAPITRE 7

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- ANDERSON, T.W. (1958).  
An introduction to multivariate statistical analysis. John Wiley and Sons, New York, 374 p.
- BOIS, P. (1968).  
Contribution à l'étude de la variabilité interannuelle des débits des rivières. Recherche des lois de probabilité représentant ces phénomènes. Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble, Grenoble, 97 p., 15 fig., 36 tab., 3 annexes.
- BOIS, P. (1971).  
Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie. Laboratoires de Mécanique des Fluides, Université de Grenoble, section hydrologie, 49 p.
- DELHOMME, J.P. (1976).  
Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris-6.
- GANDIN, L.S. (1963).  
Objective analysis of meteorological fields. Leningrad, translated from Russian by "Israel Program for Scientific Translations", Jerusalem, 1965.
- GANDIN, L.S. (1970).  
The planning of meteorological station networks. WMO Technical Note No 111.
- GUSHCHINA, M.V., KAGAN, R.L. and POLISHCHUK, A.I. (1967).  
Accuracy in determining the mean precipitation depth over an area. Hydrology: Selected papers, Issue No 6: 585-596.
- HARAGAN, D.R. (1976).  
Spatial variation of precipitation on the Texas High Plains. Water Resources Bulletin, 12(6): 1191-1204.
- HOTELLING, H. (1933).  
Analysis of a complex of statistical variables into principal components. J. Educ. Psych., 24: 417-441, 498-520.
- IBM. (1970).  
System/360 Scientific Subroutine Package. Version III, 5 TH EDITION.
- KAGAN, R.L. (1966).  
An evaluation of the representiveness of precipitation data. Works of the Main Geophysical Observatory, USSR, Vol. 191.

- KAGAN, R.L. (1972).  
I-1.1 Precipitation-Statistical Principles. Casebook on hydrological network design practice. Rapport OMM, No 324.
- KENDALL, M.G. (1957).  
A course in multivariate analysis. Chas. Griffin and Co., London, 185 p.
- LEBART, L. et J.P. FENELON. (1971).  
Statistique et informatique appliquées. Dunod, Paris.
- RALS, A. and H.S. WILF. (1962).  
Mathematical methods for digital computer. John Wiley and Sons, New York, chapter 7.
- SHAW, E.M. and P.E. O'CONNELL.  
Design of networks and data transfer for precipitation. P. 129-150.

ANNEXE A

METHODE DES COMPOSANTES PRINCIPALES



L'analyse en composantes principales (Hotelling, 1933; Kendall, 1957; Anderson, 1958) est une méthode qui appartient à la statistique descriptive multidimensionnelle.

#### A.1 DESCRIPTION THEORIQUE

Une série de  $p$  variables mesurées sur  $n$  observations est représentée par une matrice de dimension  $p \times n$  qu'on note  $X_{pn}$ . Chaque observation peut être représentée par un point dans un espace à  $p$  dimensions. Cependant, comme il peut exister une corrélation entre chaque variable, les  $p$  axes de cet espace ne sont pas toujours orthogonaux. L'analyse en composantes principales a pour but de faire subir une transformation aux variables pour rendre les axes orthogonaux et faire en sorte que le premier axe explique le maximum de variance, que le deuxième axe explique le maximum de variance résiduelle, etc...

Le calcul de la première composante principale se résume à la détermination de l'axe tel que la somme des carrés des distances des  $n$  points à cet axe soit minimale, ou encore que la somme des carrés des projections des points sur cet axe soit maximale.

Pour déterminer le second axe, on projette les  $n$  points dans un plan orthogonal au premier axe et on cherche l'axe tel que la somme des carrés des distances des points observations soit

minimale. On répète ce processus de calcul  $p$  fois. Les derniers axes expliquant de moins en moins de variance, les observations peuvent ainsi être représentées dans un sous-espace à  $q$  dimensions ( $q < p$ ) sans perte importante d'information, ce qui signifie qu'on remplace  $p$  variables reliées entre elles par  $q$  variables indépendantes.

## A.2 DESCRIPTION MATHÉMATIQUE

Les calculs peuvent être effectués soit sur les variables observées, soit sur les variables centrées réduites. Dans cette étude, pour que chaque variable ait même poids dans la somme des carrés des distances, on travaille seulement avec les variables centrées réduites. Ainsi, par exemple, si les précipitations d'une station sont d'un ordre de grandeur différent d'une autre station, les séries centrées réduites peuvent être considérées homogènes quant à leur moyenne et à leur dispersion.

Notons  $X$  la matrice qui représente la série de variables mesurée sur  $n$  observations, et  $x_{ij}$  l'observation  $i$  de la variable  $j$ .

Les valeurs centrées réduites nous sont données par

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_j} \quad (\text{A-1})$$

$y$  = nouvelle variable centrée réduite de

moyenne = 0  
variance = 1;

$x$  = variable observée;

$\bar{X}_j$  = moyenne de la  $j^{\text{ième}}$  variable;

$\sigma_j$  = l'écart type de la  $j^{\text{ième}}$  variable.

La recherche des nouveaux axes pour les variables  $y$  est faite en respectant les critères suivants: nous choisissons les coefficients de façon à obtenir le maximum de variance pour la première composante; la deuxième composante est déterminée de façon à être orthogonale à la première et à expliquer le maximum de la variance résiduelle; la troisième doit être orthogonale aux deux premières et expliquer le maximum de variance résiduelle, etc...

Considérons  $n$  points dans un espace à  $p$  dimensions, lorsque les variables sont centrées réduites, c'est-à-dire, lorsque la moyenne est nulle et que la variance est unitaire. L'équation de l'axe des  $y$  est:

$$\frac{y_1 - m_1}{c_1} = \frac{y_2 - m_2}{c_2} = \dots \dots \dots \frac{y_p - m_p}{c_p} \quad (\text{A-2})$$

où les  $c_i$  sont les cosinus directeurs de cet axe et sont soumis à la condition:

$$\sum_{i=1}^p c_i^2 = 1$$

et les  $m_i$  sont les projections d'un point  $m$  sur les axes.

Puisque l'axe passe par l'origine, nous pouvons prendre zéro pour toutes les valeurs de  $m$ ; nous avons alors l'équation:

$$\frac{y_1}{c_1} = \frac{y_2}{c_2} = \dots \dots \dots \frac{y_p}{c_p} \quad (\text{A-3})$$

Nous recherchons l'axe  $y$  défini par ses cosinus directeurs qui rend minimale la somme des carrés des distances de  $n$  points observations à cet axe. Nous devons donc minimiser:

$$nD = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p y_{ji}^2 - \left( \sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right)^2 \quad (\text{A-4})$$

Les  $y_{ji}$  étant centrés réduits, nous avons:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right)^2 \quad (\text{A-5})$$

Il a été démontré que la condition (A-3) appliquée à (A-5) nous impose de minimiser:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right)^2 + \lambda \sum_{i=1}^p c_i^2 \quad (\text{A-6})$$

$\lambda$  est un scalaire appelé multiplicateur de Lagrange.

L'équation (A-6) peut s'écrire:

$$D = p - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( c_1 y_{j1} + c_2 y_{j2} + \dots + c_p y_{jp} \right)^2 + \lambda \left( c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_p^2 \right) \quad (\text{A-7})$$

Pour trouver  $C$  qui minimise (A-7), nous devons annuler les dérivées partielles de cette équation par rapport aux coefficients  $c_k$ .

Nous obtenons:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \left( y_{jk} \sum_{i=1}^p c_i y_{ji} \right) + 2 \lambda c_k \\ &= -2 \sum_{i=1}^p c_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ji} y_{jk} - \lambda c_k \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

$y$  étant centré réduit, nous avons:

$$r_{ik} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ji} y_{jk} \quad (\text{A-9})$$

$r_{ik}$  est le coefficient de corrélation entre les variables  $i$  et  $k$ .

L'équation (A-9) dans (A-8) nous donne l'équation à résoudre pour  $C_k$ :

$$\sum_{i=1}^p C_i r_{ik} - \lambda C_k = 0 \quad (\text{A-10})$$

Pour  $k$  variant de 1 à  $p$ , nous avons à résoudre le système d'équations suivant:

$$\left[ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^p C_i r_{i1} - \lambda C_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^p C_i r_{i2} - \lambda C_2 = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^p C_i r_{ip} - \lambda C_p = 0 \end{array} \right] \quad (\text{A-11})$$

(A-11) peut s'écrire en notation matricielle

$$RL - \lambda L = 0 \quad (\text{A-12})$$

$R$  = matrice des coefficients de corrélation des variables

$$L = \text{vecteur unitaire} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ C_p \end{bmatrix}$$

L'élimination de  $L$  conduit finalement à résoudre:

$$\left| R - \lambda I \right| = 0 \quad (\text{A-13})$$

$I$  = matrice unité

$\lambda$  = valeurs propres

L'axe le plus près de tous les points au sens des moindres carrés a pour vecteur directeur un des vecteurs propres de la matrice des coefficients de corrélation et  $\lambda$  est la valeur propre correspondante.

Nous avons vu avec la relation (A-5) que, lorsque les variables sont centrées réduites, la distance  $D$  est égale à  $p$  moins la variance des projections des points sur l'axe. La variance des points projetés sur l'axe est égale à la valeur propre  $\lambda$ . On obtient donc pour  $D$ :

$$D = p - \lambda \quad (\text{A-14})$$

La plus grande des racines de l'équation caractéristique  $\lambda_1$  minimise  $D$  et définit le premier axe ou composante principale. La somme des carrés des distances des points à cet axe est minimum et les variates<sup>1</sup> mesurées le long de cet axe ont le maximum de variance.

Les premières variates ou composantes nous sont données par:

$$z_{n1} = \sum_{k=1}^p c_{k1} y_{nk} \quad (A-15)$$

$z_{n1}$  = première variate ou première composante;

$c$  = cosinus directeur;

$y$  = observations centrées réduites.

Si on cherche maintenant l'axe perpendiculaire au premier, pour lequel la somme des carrés des distances des points à cet axe soit minimum, nous devons projeter tous les points sur un hyperplan orthogonal au premier axe. Nous nous trouvons alors dans un nouveau système comprenant  $p - 1$  équations et nous trouvons l'axe correspondant à  $\lambda_2$ , la deuxième plus grande racine et nous pouvons calculer les deuxièmes variates ou composantes.

Si nous procédons ainsi jusqu'à  $\lambda_p$ , nous avons obtenu une nouvelle série de variates  $Z$  qui ne sont pas corrélées et dont

---

<sup>1</sup> variate: variable aléatoire. Terme d'origine anglaise assez usité. "cf. dictionnaire de statistique", E. MORICE-DUNOD.

Les variances sont respectivement  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$  par ordre de valeur décroissante.

Si nous désirons obtenir une série de variates ou composantes normées, (A-15) doit être de la forme:

$$z_{nj} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} \sum_{i=1}^p c_{ij} y_{ni} \quad (\text{A-16})$$

$z_{nj}$  = j<sup>ième</sup> composante, n<sup>ième</sup> observation;

$\lambda_j$  = j<sup>ième</sup> valeur propre;

$c$  = cosinus directeur;

$y$  = observation.

### A.3 PROPRIÉTÉS DU NOUVEAU SYSTÈME D'AXES ET DES TRANSFORMÉES

Nous allons énumérer les propriétés des nouvelles variates sans faire de démonstrations mathématiques. Ces démonstrations peuvent être retrouvées dans les ouvrages d'analyse multidimensionnelle.

#### A.3.1 Les variables transformées sont non-corrélées entre elles

C'est-à-dire qu'on a:

$$E(z_{.i} \cdot z_{.j}) = 0 \quad \text{pour } i \neq j \quad (\text{A-17})$$

Cette propriété est très importante si nous voulons nous servir de ces variables pour des régressions. Ainsi, si on trouve par régression une relation entre une variable et les composantes, nous pouvons améliorer cette relation en y ajoutant des termes sans qu'il soit nécessaire de refaire les premiers calculs.

### A.3.2 Les premières composantes contiennent une grande partie de la variance totale

Les calculs ont été faits de façon à ce que la première composante explique le maximum de variance, puis la deuxième explique le maximum de variance résiduelle, etc...

Comme les calculs sont faits avec une matrice semi-définie positive, ce qui est le cas pour une matrice de coefficients de corrélation, nous pouvons démontrer que:

$$\sum_{i=1}^p \lambda_i = p \quad (\text{A-18})$$

$p$  = nombres de variables ;

$\lambda$  = valeur propre .

Nous pouvons calculer le pourcentage de variance expliquée en utilisant les  $m$  premières composantes à l'aide de:

$$p_m = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{p} \times 100 \quad (\text{A-19})$$

### A.3.3 Relation entre variables et composantes

Le coefficient de corrélation entre la variable  $i$  et la  $k^{\text{ième}}$  composante nous est donné par:

$$r(Y_{.i} : Z_{.k}) = \sqrt{\lambda_k C_{ik}} \quad (\text{A-20})$$

Le coefficient de corrélation multiple entre la variable  $i$  et les  $m$  premières composantes nous est donné par:

$$r(Y_{.i} : Z_{.1}, Z_{.2}, \dots, Z_{.m}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \lambda_j C_{ij}^2} \quad (\text{A-21})$$

### A.4 METHODE PRATIQUE DE CALCUL DES RACINES DE L'EQUATION CARACTERISTIQUE

Il existe plusieurs façons de calculer les valeurs et les vecteurs propres d'une matrice symétrique. Dans notre cas, les calculs des valeurs et vecteurs propres ont été faits à l'aide de la sous-routine EIGEN disponible dans la bibliothèque des programmes de la compagnie IBM (1970).

Cette sous-routine, qui calcule toutes les valeurs propres avec ou sans les vecteurs propres correspondants, utilise pour ses

calculs une méthode de diagonalisation adaptée pour les grandes calculatrices dont on peut trouver un exposé dans Rals et Wilf (1962).

REFERENCES

- ANDERSON, T.W. (1958).  
An introduction to multivariate statistical analysis. John Wiley and Sons, New York, 374 p.
- KENDALL, M.G. (1957).  
A course in multivariate analysis. Chas. Griffin and Co., London, 185 p.
- HOTELLING, H. (1933).  
Analysis of a complex of statistical variables into principal components. J. Educ. Psych., 24: 417-441, 498-520.
- IBM. (1970).  
System/360 Scientific Subroutine Package. Version III, 5TH EDITION.
- RALS, A. and H.S. WILF. (1962).  
Mathematical methods for digital computer. John Wiley and Sons, New York, chapter 7.

ANNEXE B

METHODE DE L'INTERPOLATION OPTIMALE



Assumons qu'un phénomène  $f$  est connu sans erreur pour  $N$  points  $m_1, m_2 \dots m_n$  qu'on notera

$$f_1, f_2 \dots f_n$$

On cherche à évaluer la valeur au point  $m_0$  qu'on note  $f_0$ .

Premièrement on soustrait à chaque valeur la norme correspondante au point d'observation pour obtenir ce qu'on appelle les déviations

$$f'_i = f_i - \frac{\sum_{j=1}^N f_{ij}}{N} \quad (\text{B-1})$$

où

$f_{ij}$  est la  $j^{\text{ième}}$  observation de la station  $i$ .

La valeur cherchée au point  $m_0$  est donnée par:

$$f_0 = f'_0 + \overline{f_0} \quad (\text{B-2})$$

Gandin (1963) dans la théorie d'interpolation optimale calcule seulement les anomalies ( $f'$ ). La norme ou moyenne  $\overline{f_0}$  au point  $m_0$  est supposément connue. On verra plus loin comment on peut appliquer les mêmes théories sur les valeurs observées et ainsi ne pas avoir à estimer la norme par une autre méthode.

## a) Valeurs exactes

Nous cherchons la valeur  $f'_0$  c'est-à-dire la déviation au point  $(x_0, y_0)$ . Cette déviation peut être estimée par une équation de cette forme:

$$f'_0 = p_1 f'_1 + p_2 f'_2 + \dots + p_n f'_n = \sum_{i=1}^N p_i f'_i \quad (\text{B-3})$$

où:

$p_i$  = sont les poids à déterminer;

$f'_i$  = la déviation aux  $N$  stations.

On cherche les poids qui minimisent l'erreur quadratique moyenne

$$E^2 = \left( f'_0 - \sum_{i=1}^N p_i f'_i \right)^2 \quad (\text{B-4})$$

Transformons l'équation (B-4) en effectuant le carré tel qu'indiqué

$$\begin{aligned} E^2 &= \overline{f'_0^2} - 2 \sum_{i=1}^N p_i \overline{f'_0 f'_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \overline{f'_i f'_j} \\ &= \overline{f'_0^2} - 2 \sum_{i=1}^N p_i \overline{f'_0 f'_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \overline{f'_i f'_j} \\ &= \sigma_{00}^2 - 2 \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_i p_j \sigma_{ij}^2 \quad (\text{B-5}) \end{aligned}$$

Pour minimiser l'équation (B-5) il suffit d'annuler les dérivées partielles par rapport aux  $p_i$ . On obtient ainsi le système à  $N$  équations qu'on écrit sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \cdots & \sigma_{1N}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \cdots & \sigma_{2N}^2 \\ \sigma_{N1}^2 & \sigma_{N2}^2 & \cdots & \sigma_{NN}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{o1}^2 \\ \sigma_{o2}^2 \\ \sigma_{oN}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B-6})$$

En vertu des propriétés d'une matrice de covariance ce système est régulier et admet une solution unique qui donne les  $N$  poids  $p_i$ . L'interpolation à l'aide de la formule (B-3) avec les poids  $p_i$  déterminés en résolvant l'équation (B-6) est appelée interpolation optimum. Les poids obtenus en résolvant l'équation (B-6) impliquent que l'erreur d'interpolation est minimum.

L'équation (B-6) sous forme simplifiée peut s'écrire

$$\sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^2 p_j = \sigma_{oi}^2 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{B-7})$$

Multipliant (B-7) par  $p_i$  et sommant sur  $i$  on obtient:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^2 p_i p_j = \sum_{i=1}^N \sigma_{oi}^2 p_i \quad (\text{B-8})$$

Combinant (B-8) et (B-5) on obtient:

$$E^2 = \sigma_{00}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{oi}^2 \quad (\text{B-9})$$

$E^2$  représente la variance de l'erreur d'interpolation sur  $f'_0$ .  
C'est une mesure de l'incertitude.

Considérons quelques cas limites de l'interpolation optimale:

- Assumons que le point à interpoler coïncide avec la station (i). Le système donne comme solution  $p_{i0} = 1$  et  $p_{j0} = 0$  pour  $\forall j \neq i$ . On a donc un interpolateur exact. L'estimé le plus précis à ce point est celui observé étant donné qu'on a supposé qu'il n'y a pas d'erreurs de mesure.
- Si toutes les stations se situent suffisamment loin du point à interpoler pour qu'il n'y ait pas de corrélation possible avec le point et les stations, on obtient  $p_i = 0$  pour  $i = 1$  à  $N$ , c'est-à-dire que l'estimé qu'on peut faire à ce point est la norme, la déviation calculée étant nulle.

## b) Valeurs avec erreurs

Le système précédent suppose des valeurs exactes c'est-à-dire sans erreurs de mesure. Si l'on a des erreurs ( $\mathcal{E}$ ) sur les observations qu'on suppose:

- i) non systématiques de moyenne nulle  $\overline{\mathcal{E}_i} = 0$ ;
- ii) non corrélées avec les observations  $\overline{\mathcal{E}_i f_j} = 0$ ;
- iii) non corrélées entre elles  $\overline{\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j} = 0$ ;

et qu'on cherche à estimer la déviation entachée d'erreurs ( $f'_0 + \mathcal{E}_0$ ), on est ramené au problème précédent en remplaçant la covariance des  $f'_0$  par la covariance des ( $f'_0 + \mathcal{E}_0$ ). L'équation (B-3) s'écrit alors:

$$f'_0 = p_0 (f'_i + \mathcal{E}_1) + p_2 (f'_2 + \mathcal{E}_2) \dots = \sum_{i=1}^N p_i (f'_i + \mathcal{E}_i) \quad (\text{B-10})$$

En pratique on suppose que les erreurs de mesure sont analogues pour toutes les stations.

Comme précédemment on cherche les facteurs qui minimisent l'erreur moyenne

$$E^2 = \left( f'_0 - \sum_{i=1}^N p_i (f'_i + \mathcal{E}_i) \right)^2 \quad (\text{B-11})$$

Si l'on refait les mêmes calculs, on obtient le système

suisant à résoudre:

$$\sum_{j=1}^N p_j \left( \sigma_{ij}^2 + \mathcal{E}_i \mathcal{E}_j \right) = \sigma_{i0}^2 \quad (i = 1 \text{ à } N) \quad (\text{B-12})$$

$\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j$  est la covariance des erreurs de mesure. En vertu des hypothèses faites sur les erreurs on a:

$$\mathcal{E}_i \mathcal{E}_j = \sigma_{\mathcal{E}}^2 c_{ij} \quad (\text{B-13})$$

où:

$$\sigma_{\mathcal{E}}^2 = \text{variance commune des erreurs de mesure}$$

$$c_{ij} = 0 \text{ pour } i \neq j$$

$$= 1 \text{ pour } i = j$$

La variance de l'interprétation nous est donnée par:

$$E^2 = \sigma_{00}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{0i}^2 \quad (\text{B-14})$$

les  $p_i$  étant déterminés en résolvant l'équation (B-12).

Dans ce cas on n'a plus un interpolateur exact, c'est-à-dire que si on interpole à un point qui coïncide avec une station, on ne retrouve pas  $p_{i0} = 1$  d'où la valeur estimée au point diffère de la valeur observée. Il est normal que les valeurs estimées ne soient pas égales aux valeurs expérimentales si ces valeurs ont une erreur.

## c) Problème de la norme

On vient de voir comment on peut déterminer la déviation  $f'_0$ . D'après l'équation (B-2):

$$f_0 = \overline{f_0} + f'_0$$

Ce que l'on cherche étant  $f_0$  on doit connaître  $\overline{f_0}$  au point désiré. Gandin (1963) propose deux méthodes permettant de calculer directement les valeurs  $f_0$  lorsque  $\overline{f_0}$  est inconnu.

Jusqu'à présent la détermination des poids n'était sujette qu'à la seule condition que l'erreur quadratique moyenne d'interpolation soit minimum. Comme conséquence, cette méthode d'interpolation peut être appliquée seulement aux déviations  $f'$ . Pour l'élément  $f$  lui-même, l'équation (B-3) peut s'écrire:

$$f_0 = \overline{f_0} - \sum_{i=1}^N p_i \overline{f_i} + \sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (\text{B-15})$$

Généralement, le gradient du champ de la norme est considérablement plus petit que le gradient observé sur chaque situation. En particulier, on peut faire l'approximation suivante:

$$\overline{f_i} = \overline{f_0}$$

qu'on applique à l'équation (B-15) pour obtenir

$$f_0 = \left( 1 - \sum_{i=1}^N p_i \right) \overline{f_0} + \sum_{i=1}^N p_i f_i \quad (\text{B-16})$$

Gandin (1963) a par ailleurs démontré que si les distances entre les stations augmentent ainsi que les covariances, les poids obtenus par l'interpolation optimum baissent si toutes les autres conditions sont égales. La somme des poids diminue également. Ceci implique avec l'équation (B-16) que plus les stations sont distantes et que l'erreur des mesures augmente, le facteur appliqué à la norme sera de plus en plus grand, c'est-à-dire qu'à la limite, avec des distances inter-stations très grandes ou des erreurs très importantes sur les observations, le meilleur estimé en un point peut être la norme. Ainsi, on voit que le fait de travailler avec les valeurs sans contraintes supplémentaires, peut avoir un effet positif sur l'analyse en autant que l'on dispose de la norme au point à interpoler.

Si la norme au point à interpoler n'est pas connue et que l'on travaille directement avec les observations, on doit imposer que l'estimé soit sans biais.

Vérifions que l'espérance mathématique des valeurs calculées en un point, moins la valeur réelle, est nulle:

$$E \left( \sum_{i=1}^N p_i f_i - f_0 \right) = 0 \quad (\text{B-17a})$$

$$\sum_{i=1}^N p_i E [f_i] - E(f_0) = 0 \quad (\text{B-17b})$$

$$\sum_{i=1}^N p_i m - m = 0 \quad (\text{B-17c})$$

où:

$m$  représente la moyenne

$$m \left( \sum_{i=1}^N p_i - 1 \right) = 0. \quad (\text{B-18})$$

Pour que l'estimé soit sans biais, l'équation (B-18) doit être vérifiée. Quelque soit la valeur de  $m$ , cette équation est vérifiée si

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (\text{B-19})$$

Cette condition doit être imposée si on travaille avec les valeurs observées et non avec les déviations.

On peut démontrer que le système d'équations permettant de travailler sur la valeur et qui minimise l'erreur moyenne est identique au système précédent à laquelle on ajoute la contrainte (B-19). On obtient un système de  $N + 1$  équations et de  $N + 1$  inconnues, la  $(N + 1)^{\text{ième}}$  inconnue étant le paramètre de Lagrange  $\mu$ ,

$$\sum_{j=1}^N p_j \sigma_{ij}^2 = \sigma_{i0}^2 + \mu \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B-20})$$

dans laquelle

$$\sum_{j=1}^N p_j = 1$$

La variance de l'erreur d'interpolation est donnée par:

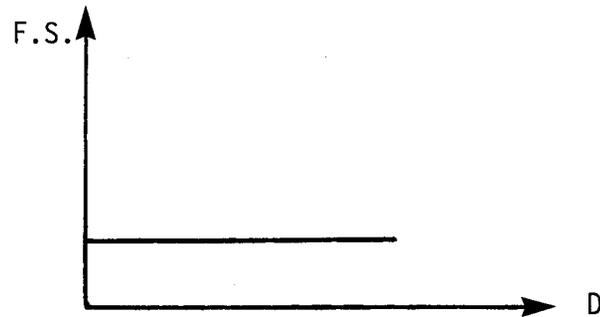
$$E^2 = \sigma_{00}^2 - \sum_{i=1}^N p_i \sigma_{i0}^2 + \mu \quad (\text{B-21})$$

#### d) Résolution pratique

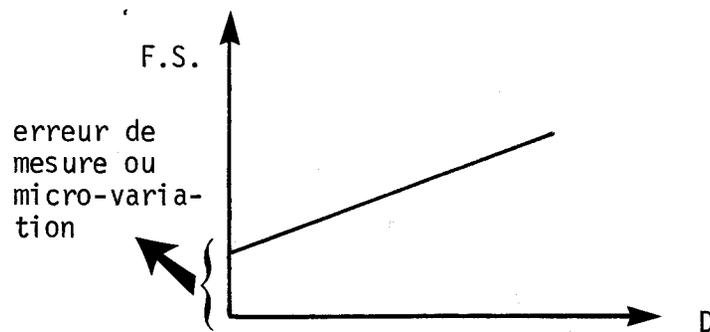
Pour résoudre le système d'équations (B-20), on doit connaître la fonction de covariance entre les stations et le point à interpoler; cependant, Gandin (1963) a démontré qu'il est possible de faire les calculs d'interpolation optimale, si ce qu'il appelle "fonction de structure" du phénomène à interpoler, est connu. La fonction de structure de Gandin ou demi-variogramme de la théorie du krigeage (Delhomme, 1976) est une courbe, calculée à l'aide des observations, qui définit, pour une région homogène, les liens d'un phénomène en fonction de la distance. Cette courbe est utilisée par la suite pour déterminer les valeurs  $b_{i0}$  entre les stations et le point à interpoler en fonction de la distance qui les sépare.

La forme de courbe obtenue pour la fonction de structure est une description synthétique de la structure spatiale du phénomène étudié. Les formes les plus courantes sont:

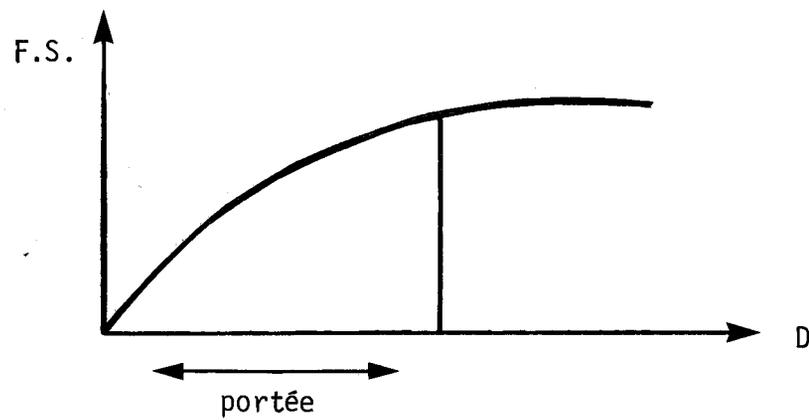
i) pour un phénomène aléatoire



ii) pour un phénomène ayant des erreurs d'observation ou de micro-variations



iii) pour un phénomène dont la zone d'influence est limitée



La forme mathématique de la fonction de structure proposée est:

$$F.S. = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left( f'_i - f'_j \right)^2 \quad (B-22)$$

où

$f'_i$  = déviation par rapport à la moyenne;

$m$  = nombre d'observations;

$i$  et  $j$  varient de 1 à  $N$ .

La fonction de structure étant connue, on peut remplacer les  $\sigma_{ij}^2$  et  $\sigma_{oi}^2$  du système d'équations (B-20), pour le calcul des poids  $p_i$ , par les valeurs  $b_{ij}$  et  $b_{oi}$  prises par la fonction de structure.

Quant à l'erreur d'interpolation, elle est calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$E = \sum_{i=1}^N p_i b_{oi} + \mu \quad (B-23)$$

Cette équation est équivalente à l'équation B-21 étant donné que la fonction de structure et la fonction de covariance sont reliées par:

$$F.S. = \sigma_{00}^2 - \sigma_{oi}^2 \quad (B-24)$$

REFERENCES

DELHOMME, J.P. (1976).

Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Pierre et Marie Curie. Paris-6.

GANDIN, L.S. (1963).

Objective analysis of meteorological fields. Leningrad, Translated from Russian by "Israel Program for Scientific translations", Jerusalem, 1965.

GANDIN, L.S. (1970).

The planning of meteorological station networks. WMO Technical Note No 111.